

Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen

Markus Joos, Matthias Rötting und Boris M. Velichkovsky

Augen- und Blickbewegungen sind – neben motorischen Handlungen und Sprachproduktion – die einfachsten physischen Akte des Menschen. Dabei werden Prozesse, die sensorischen, perceptiven und attentiven Ereignissen zugrunde liegen, mit kognitiven Prozessen, die in Manipulation von Symbolen und der Organisation komplexen Verhaltens involviert sind, verbunden. Viele Laborexperimente der letzten Jahrzehnte haben Augenbewegungen zuerst in sehr restriktiven Kontexten untersucht, in denen Probanden auf das Erscheinen eines Stimulus reagieren sollten (Becker, 1991; Robinson, 1975). Bei alltäglichen Tätigkeiten ist das Auge aber nicht nur Sensor, sondern wird aktiv zur Exploration der Umgebung eingesetzt. Die Exploration ist an die laufenden Handlungen der Person gebunden und eilt diesen voraus (etwa eine halbe Sekunde beim Basteln, Lesen, Musikspielen oder Autofahren – Buswell, 1920; Land & Furneux, 1997). Oft spielen Augenbewegungen auch in komplexen kommunikativen Interaktionen eine wesentliche Rolle, wie zum Beispiel bei deiktischen Anweisungen oder bei Auge-zu-Auge Kontakten (Velichkovsky, Pomplun und Rieser, 1996).

Die Analyse der Augenbewegungen hat deshalb in der modernen Sprachpsychologie und in der Kommunikationsforschung zunehmend an Bedeutung gewonnen. In diesem Kapitel werden in erster Linie methodische Fragen des Einsatzes der entsprechenden Meßinstrumente beschrieben. Zunächst werden Grundlagen über Augen- und Blickbewegungen und deren Klassifizierung dargestellt. Anschließend wird ein Überblick der Meßmethoden gegeben sowie eine ausführliche Darstellung der am häufigsten benutzten Parameter der Registrierung - Sakkaden, Fixationen und Augenbewegungspfade. Am Ende des Kapitels beschreiben wir einige innovative Anwendungen des Eyetrackings in der Mensch-Computer-Interaktion und in Kommunikationstechnologien.

1. Arten von Augenbewegungen

1.1 Einführung

Augenbewegungen umfassen sowohl Bewegungen des Augapfels als auch Lidschluß- und Pupillenmotorik (Galley, 2001). In diesem Kapitel wird der Begriff Augenbewegung größtenteils auf Bewegungen des Augapfels eingeschränkt, ohne die Bedeutung der übrigen Bewegungen für die Sprachpsychologie unterschätzen zu wollen.

Das menschliche Auge ist in der Lage, eine Vielzahl unterschiedlicher Bewegungen auszuführen. Auch wenn diese immer durch dieselben sechs äußerlich am Augapfel angreifenden Muskeln vollzogen werden, unterscheiden sich die Bewegungen durch die sie verursachenden Stimuli, ihre Bewegungscharakteristika und die bei der Steuerung involvierten Prozesse. Im folgenden werden drei Klassen von Augenbewegungen unterschieden:

- (1) Bewegungen des Auges, die ein „Verschieben“ der Information auf der Retina verhindern. Sie erfolgen entweder als Reaktion auf Bewegungen des eigenen Körpers, des überwiegenden Teils der visuellen Umwelt oder eines fixierten Objektes.
- (2) Zielsuchende Bewegungen des Auges zur Ausrichtung der Fovea auf (neue) Sehobjekte.
- (3) Mikrobewegungen des Auges.

Eine Übersicht und detailliertere Beschreibungen der wichtigsten Arten von Augenbewegungen finden sich bei Rötting (1999). Im weiteren wird - insbesondere bei der Diskussion - der Parameter zwischen Augenbewegungen und Blickbewegungen unterschieden. Augenbewegungen sind alle Bewegungen des Auges, die allein durch Beobachtung des Auges erfasst und interpretiert werden können. Im Gegensatz hierzu werden als Blickbewegungen solche Bewegungen des Auges bezeichnet, die in Verbindung mit den vom Auge aufgenommenen Informationen interpretiert werden. Bei der Erfassung von Blickbewegungen muss folglich, neben der Augenbewegung, definitionsgemäß immer auch „der Zielort“ der Augen mit erfasst oder anderweitig bestimmt werden. Demnach ist die Fixationsdauer an sich (ohne Objektbezug) ein Augenbewegungsparameter während die Dauer der Fixation bezüglich eines Objektes einen Blickbewegungsparameter darstellt.

1.2 Reaktion auf die Bewegung des Körpers oder der visuellen Umwelt

Vestibuläre Augenbewegungen sind Anpassungsbewegungen, die der anhaltenden Fixierung eines Punktes bei Kopf- und Körperbewegungen dienen. Die notwendigen Informationen werden durch Impulse von den Bogengängen des Innenohres erfasst und zum okulomotorischen Zentrum über den vestibulo-okulären Reflexbogen geleitet. Sie sind daher unabhängig von visuellen Stimuli und treten auch bei Dunkelheit auf. Weiterhin sind sie biphasischer Natur: Langsame Gleitbewegungen wechseln sich mit schnellen Rückstellbewegungen ab (vestibulärer Nystagmus).

Um das Fixieren (d. h. Festhalten) eines sich bezüglich des Auges bewegenden Blickobjektes zu ermöglichen, gibt es die sogenannten Folgebewegungen (*smooth pursuit*). Folgebewegungen sind relativ langsame, gleitende Bewegungen des Auges und werden, mit Ausnahme von Beginn und Ende, autonom (unwillkürlich) gesteuert: nur bewegte Blickobjekte können solche Augenbewegungen auslösen und aufrechterhalten. Bewegt sich nicht nur ein Objekt, sondern auch ein Großteil der visuellen Umgebung (z. B. durch Kopf- oder Körperbewegungen), dient die sogenannte Optokinese zur Aufrechterhaltung eines stabilen Netzhautbildes. Bei schnellen Bewegungen zeigt sich hier, wie auch bei den vestibulären Augenbewegungen, eine typische biphasische Bewegung, der *optokinetische Nystagmus*: In raschem Wechsel folgen schnelle und langsame Augenbewegungen aufeinander. Die schnellen Phasen ähneln Sakkaden, die langsamen ähneln den *smooth pursuit* Bewegungen.

1.3 Ausrichtung des Auges auf das Sehobjekt

Das gesamte Blickfeld eines Auges umfasst einen Kegel von etwa 100° (Schandry, 1989), der Bereich des scharfen Sehens ist jedoch deutlich kleiner. In der Mitte der menschlichen Netzhaut (Retina) befindet sich die Zentralgrube (Fovea Centralis), ein kleines, etwas vertieftes Gebiet, das die Zone des schärfsten Sehens darstellt. Hier ist die Dichte der lichtempfindlichen Rezeptoren, besonders der für das Farbsehen zuständigen Zapfen, am größten, so dass die Einzelheiten eines betrachteten Objektes dort besonders gut unterschieden werden können. Schärfstes Sehen ist nur in einem Winkel von ca. 1° um den fixierten Blickort möglich. Weiter entfernt, in der Peripherie liegende Objekte, werden mit progressiv verringerter Auflösung und abnehmender Farbintensität wahrgenommen. Der Grund dieser peripheren Unschärfe besteht in der Konvergenz mehrerer Rezeptoren auf eine Ganglionzelle (Verhältnis 125:1). Bereits bei einer Abweichung von 3° vom Fixationsort vermindert sich die Sehschärfe um die Hälfte. Augenbewegungen ermöglichen also scharfes Sehen. Es sind drei verschiedene Fälle zu unterscheiden, bei denen sich die Augen bewegen, um auf ein Objekt gerichtet zu werden:

- Es findet ein Blickwechsel von einem Objekt zu einem anderen statt. In diesem Fall werden die Augen durch eine oder mehrere Sakkaden bewegt (s. u.).
- Das Objekt bewegt sich, und die Augen versuchen dieser Bewegung zu folgen. Bewegt sich das Objekt langsam, kann das Auge mit Folgebewegungen (*pursuit movements*) dem Objekt folgen. Bei höherer Geschwindigkeit des Objektes sind Sakkaden notwendig.
- Der Körper bzw. der Kopf bewegt sich, und die Augen gleichen diese Bewegungen aus.

Das Problem der Wahrnehmung besteht darin, aus sensorischen Informationen „relevante und valide“ Eigenschaften der externen Welt zu extrahieren (vgl. Marr, 1982). Der Wechsel von Sakkaden und Fixationen spiegelt diesen Prozess zumindest teilweise wider, da einige dieser Eigenschaften nicht aus einem statischen retinalen Abbild gewonnen werden können.

Sakkaden sind sehr schnelle ballistische Bewegungen, die das Auge auf ein Blickobjekt richten. Sie werden entweder spontan durch gezielte Verhaltenspläne bei der Inspektion und Interpretation der Umweltinformationen oder unwillkürlich, etwa durch Veränderungen im peripheren Gesichtsfeld, ausgelöst (Mickasch & Haack, 1986). In einem Zeitraum einer Sakkade von zirka 30-40 ms vor und bis zu 120 ms nach dem Start einer Sakkade (bei kurzen Sakkaden also während der folgenden Fixation) ist das visuelle Wahrnehmungsvermögen drastisch eingeschränkt (*saccadic suppression*, vgl. Volkman et al., 1978; *saccadic omission*, Chekaluk & Llewellyn, 1994). In der alltäglichen Erfahrung wird diese Einschränkung nicht bewusst; schaut man beispielsweise in einen Spiegel und blickt abwechselnd das eigene linke und rechte Auge an, so kann man selbst keine Bewegung der Augen beobachten (Dodge, 1900). Während der Fixationen, bei denen sich das Auge in relativer Ruhe zu einem Sehobjekt befindet, werden visuelle Informationen aufgenommen. Die minimale Fixationsdauer liegt nach empirischen Befunden normalerweise bei 100 ms (Karsh & Breitenbach, 1983; Young & Sheena, 1975). Dieser Wert erscheint aufgrund der *saccadic suppression* plausibel, weil bei kürzeren Fixationsdauern keine Information wahrgenommen werden. Übliche durchschnittliche Fixationsdauern sind jedoch um ein Vielfaches länger. Da den Sakkaden und Fixationen in psychologischen Untersuchungen mit Recht eine besonders wichtige Rolle zugeschrieben wird, sollen ihre Charakteristiken im dritten Abschnitt detaillierter dargestellt werden.

Die bisher vorgestellten Augenbewegungen sind konjugiert, d.h. beide Augen werden annähernd parallel geführt. Auf die Vergenzbewegungen trifft dies nicht zu. Diese dienen dazu, Objekte auf der Fovea beider Augen abzubilden. Bei einem Blickwechsel zwischen unterschiedlich entfernten Objekten müssen sich die Augen gegenläufig bewegen. Phylogenetisch sind die Vergenzbewegungen relativ jung. Es wird angenommen, dass sie deswegen relativ langsam sind, sich erst spät bei kleinen Kindern vollständig entwickeln und bei Ermüdung oder unter Alkoholeinfluss gestört sind.

1.4 Mikrobewegungen des Auges

Neben den bereits vorgestellten Augenbewegungen gibt es noch eine Reihe von Bewegungen des Auges mit vergleichsweise geringer Amplitude (unter 10 Winkelminuten). Diese Miniaturbewegungen treten bei jeder Fixation auf und lassen sich in Drift, Tremor und Mikrosakkaden untergliedern. Wie andere Nervenzellen auch, reagieren die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut primär auf Veränderungen. Wird dem Auge ein konstantes Bild dargeboten (z. B. durch künstliche Lähmung der Augenmuskeln oder durch optische Stabilisierung des Bildes auf dem Netzhaut), verschwindet allmählich das wahrgenommene Bild durch die Rezeptormüdigung.

Die Drift ist eine langsame Abgleitung des Auges vom Fixationsort während der fort dauernden Fixation. Sie bewirkt, dass sich die Netzhaut fortwährend um einen Bereich mehrerer Sehzellen verschiebt. Dadurch trifft der Lichtreiz stets auf unterschiedliche Nervenzellen, und die Sensitivität gegenüber dem optischen Stimulus wird aufrechterhalten. Von den Mikrosakkaden wird angenommen, dass sie die durch Drift verursachte Verschiebung korrigieren und so zu einer Refixierung des intendierten Objektes beitragen. Allerdings treten sie auch teilweise regellos auf bzw. können das Auge weg von fixierten Objekten führen (Gippenreiter, 1978). Die typische Kombination von Drift und Mikrosakkaden wird auch als *physiologischer Nystagmus* bezeichnet.

Der sogenannte Tremor bezeichnet die kleinsten, zitterartigen Bewegungen (deutlich unter 1 Bogenminute) des Auges mit Frequenzen von etwa 50 Hz (vgl. Wolf & Wolf, 1990). Er verursacht eine Verschiebung der Netzhaut um einen Bereich von 5 bis 10 Sehzellen. Dem Tremor wird ebenso wie dem Drift, die Funktion zugeschrieben, die Nervenzellen mit neuen Reizen zu versorgen. Es gibt jedoch auch eine weitere Erklärung für den Tremor (Bruce & Green, 1990). Danach wird dieser durch Instabilitäten in der Steuerung der drei Paare antagonistischer Muskeln verursacht.

Zusammenfassend gibt Tabelle 1 einen Überblick der verschiedenen Arten von Augenbewegungen und ihrer Funktionen.

Tab. 1: Verschiedene Arten der Augenbewegungen, verursachender Stimulus, Wirkung und Geschwindigkeit (vgl. Boff & Lincoln, 1988; Unema, 1995).

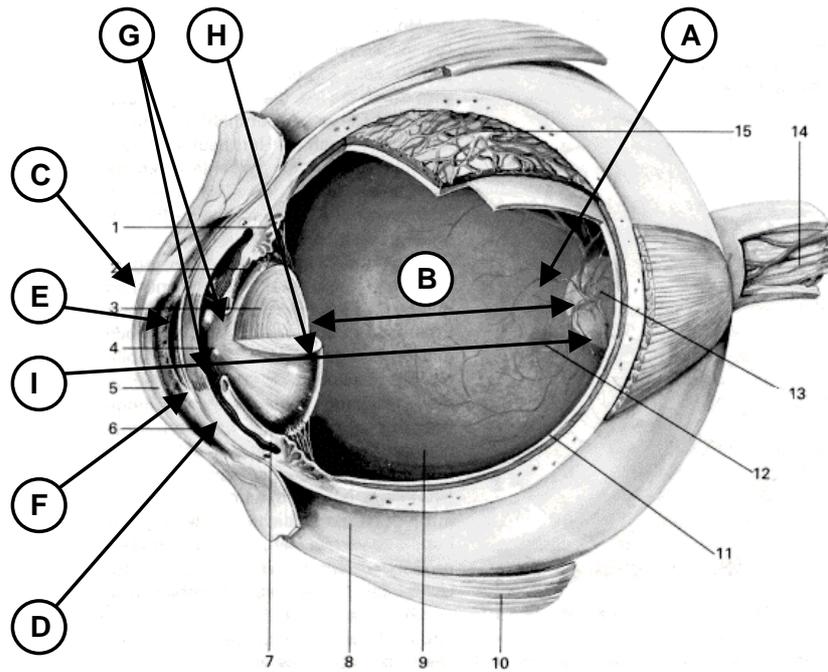
Art der Augenbewegung	Stimulus	Wirkung	Geschwindigkeit
Stabilisierende Bewegungen			
Vestibulärer Nystagmus	Kopf- oder Körperbewegungen, unwillkürlich (Reflex)	Aufrechterhaltung der Fixation während Kopf- oder Körperbewegung	Analog zur Kopf- oder Körperbewegung, Rückstellbewegung: bis zu 500°/s
Optokinescher Nystagmus	Verschiebung des retinalen Abbildes, unwillkürlich (Reflex)	Aufrechterhaltung eines stabilen Netzhautbildes	Langsame Phase: bis zu 80°/s, Rückstellbewegung: bis zu 500°/s
Folgebewegung (<i>smooth pursuit</i>)	Sich langsam bewegendes Objekt, unwillkürlich	Verfolgung eines sich langsam bewegendes Objektes	bis zu 80°/s
Zielsuchende Bewegungen			
Sakkade	Periphere Veränderungen oder willkürlich ausgelöst	Exploration der Umgebung, Orientierung auf neue Ziele, visuelle Suche, Refixation	bis zu 1000°/s, Amplitude bis zu 60°
Vergenzbewegungen	Binokuläre Disparität oder willkürlich	Aufrechterhaltung der Konvergenz beider Augen auf dem fixierten Objekt	bis zu 10°/s
Mikrobewegungen			

Drift	Spontan, tonische motorische und vestibuläre Einflüsse	Aufrechterhaltung der Stimulation von Rezeptoren und Neuronen	bis zu 10 Bogenminuten
Tremor	Nicht ausregelbare Ungenauigkeit der Muskelsteuerung	Destabilisierung des Abbildes auf Netzhaut	40 bis 100Hz, < 1 Bogenminute
Mikrosakkade	Kompensation der Drift, physiologischer Regelkreis	Repositionierung des Auges auf das vorher fixierte Objekt	ähnlich Sakkaden, bis zu 10 Bogenminuten

2. Methoden der Blickbewegungsregistrierung

2.1 Einführung

Die im folgenden dargestellten Methoden zur Registrierung von Augenbewegungen basieren auf anatomisch-physiologischen Eigenschaften des Auges, die der Eigen- oder Fremdbeobachtung zugänglich oder technisch erfassbar sind. Sowohl Eigenschaften der Retina als auch des Limbus und der Pupille, das corneo-retinale Potential, die Krümmung der Cornea und Reflexionen an verschiedenen Grenzflächen des dioptrischen Apparates können zur Bestimmung von Augenbewegungen dienen (siehe Abb. 1). Anschließend sollen die darauf beruhenden Prinzipien der Augenbewegungsregistrierung kurz dargestellt werden.



1	Ziliarmuskel	10	Augenmuskulatur	(C)	Krümmung der Cornea
2	Iris	11	Retina	(D)	Limbus
3	Linse	12	Fovea	(E)	Pupille
4	Pupille	13	blinder Fleck	(F)	Corneareflex / 1. Purkinje Bild
5	Hornhaut	14	Sehnerv	(G)	2. und 3. Purkinje Bild
6	vordere Augenkammer	15	Aderhaut	(H)	4. Purkinje Bild
7	hintere Augenkammer	(A)	Retinales Nachbild und Blutgefäße auf der Retina	(I)	Reflexion von der Retina (bright pupil)
8	Sklera	(B)	corneo-retinale Potential		
9	Glaskörper				

Abb. 1 Darstellung des Auges - die anatomisch-physiologischen Eigenschaften, die zur Bestimmung der Augenbewegungen dienen, sind mit (A) bis (I) gekennzeichnet.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden und Geräte zur Registrierung von Augenbewegungen geben Auskunft über die rotierenden Bewegungen des Auges selbst. Veränderungen in der Position der Augen, die durch Kopf- und Körperbewegungen verursacht werden, sind dabei nicht erfassbar bzw. unterscheidbar. Kopfbewegungen können gegebenenfalls mittels optischer, elektromagnetisch- oder ultraschallbasierter Verfahren gemessen werden.

2.2 Art der gewünschten Meßgrößen und Methodenübersicht

Die Auswahl der Methode und der Geräte hängt immer grundsätzlich von dem Ziel der Untersuchung ab. Bedeutsam sind dabei besonders folgende, in zeitlicher und örtlicher Ausprägung beschreibbare, technische Eigenschaften der Geräte:

Der örtliche Meßbereich ist definiert als der Winkelbereich von Augenbewegungen, in dem diese, mit den im weiteren angegebenen Spezifikationen, gemessen werden können. Der zeitliche Meßbereich entspricht der Aufzeichnungsdauer, die einerseits durch die Speicherkapazität des Datenträgers und andererseits durch die Trageeigenschaften des Meß-

systems bestimmt wird. Die örtliche Auflösung ist die Größe des kleinsten Inkrements für die gemessene Blickrichtung. Die zeitliche Auflösung ergibt sich aus der Anzahl der Meßwerte pro Zeiteinheit. Die örtliche Genauigkeit ist die Differenz zwischen wahrer Augenposition und dem vom System gemessenen Wert. Sie kann nicht größer als die örtliche Auflösung sein. Die Linearität (angegeben in %) ist das Verhältnis von der Differenz zwischen gemessener und tatsächlicher Augenposition zu tatsächlicher Augenposition. Die zeitliche Genauigkeit ist die zeitliche Dauer zwischen der Erfassung einer Augenposition und der Bereitstellung der Meßgröße. Das Signal-Rauschen-Verhältnis gibt den Betrag der verschiedenen Störgrößen in Relation zum Nutzsignal an.

Zu unterscheiden sind berührungsfreie und kopfbasierte Meßsysteme, wobei letztere über eine Kopfbewegungsregistrierung verfügen können. Sowohl bei den berührungsfreien als auch den kopfbasierten Meßsystemen mit Kopfbewegungsregistrierung, sind für die Kopfbewegungserfassung die obigen Eigenschaften kennzeichnend. Bei Systemen ohne Kopfbewegungserfassung sind entweder die Kopfbewegungen durch Kinnstütze oder Beißplatte zu unterbinden, oder bei der (manuellen) Auswertung zu kompensieren. Die verschiedenen Meßsysteme unterscheiden sich in der Geschwindigkeit und der Komplexität der Signalverarbeitung und -verdichtung, um zu interpretierbaren Daten zu gelangen. Für viele Anwendungen ist es wünschenswert, das Meßsystem mit anderen Systemen, etwa einem Experimentalsystem und weiteren physiologischen Meßgeräten, zu koppeln.

Die Auswahl des Meßsystems muss außerdem den Untersuchungskontext, wie beispielsweise die zu untersuchende Personengruppe, berücksichtigen. Zudem sollten die Beeinträchtigungen durch die Meßtechnik gegenüber der Meßgenauigkeit abgewogen werden.

Im folgenden sollen verschiedene Geräte und die in Tabelle 2 aufgelisteten Methoden beschrieben werden. Ausführlicher sind einige von diesen Methoden z. B. bei Saupe (1985) dargestellt. Eine kurzgefasste Übersicht über die verschiedenen Verfahren findet sich bei Galley (im Druck). Carpenter (1988) gibt, neben einer Übersicht, zusätzliche Informationen für den Nachbau von Meßsystemen.

Tab. 2 Methoden zur Registrierung von Augenbewegungen, die von ihnen genutzten anatomisch-physiologischen Eigenschaften des Auges und das zugrundeliegende Meßprinzip

Anatomisch-physiologische Eigenschaften des Auges	Meßprinzip		
	Subjektive Erfassung	Getrennte Erfassung horizontaler und vertikaler Bewegungen	Videobasierte Erfassung und Bildverarbeitung
Retinale Nachbilder	Bericht durch Probanden (Abschn. 2.3.1)		
Retinale Gefäße			„Point of regard measurement“ (Abschn. 2.5.2)
Corneo-retinales Potential		EOG (Abschn. 2.4.2)	
Krümmung der Cornea		Kontaktlinsenmethode - Search	Kontaktlinsenmethode (Abschn.

		Coil (Abschn. 2.4.3)	2.5.3)
Limbus (Augenlid)	Direkte Beobachtung (Abschn. 2.3.2)	Limbus Tracking (Abschn. 2.4.4)	(X)
Pupille		Pupil Tracking (Abschn. 2.4.4)	„Point of regard measurement“ (Abschn. 2.5.2)
Corneareflex		(XX)	Cornea-Reflex-Methode (Abschn. 2.5.4) „Point of regard measurement“ (Abschn. 2.5.2)
Purkinje Bilder			Doppelte Purkinje-Bild-Technik (Abschn. 2.5.5)
Retinareflexion		(X)	„Bright Pupil“ (Abschn. 2.5.6)
(X) Theoretisch denkbare Variante, eine Umsetzung ist jedoch nicht bekannt. (XX) Bei dem System EMR-600 der Firma NAC wird das Augenbild mit dem Corneareflex optisch so verändert, daß eine getrennte Erfassung der horizontalen und vertikalen Augenbewegung erfolgt.			

2.3 Subjektive Erfassung der Augenbewegungen

2.3.1 Retinale Nachbilder

Durch eine Folge starker Lichtreize werden auf der Retina Nachbilder erzeugt (Grüsser & Grüsser-Cornehls, 1990). Bewegt sich währenddessen das Auge, entstehen die Nachbilder an unterschiedlichen Orten der Retina. Die Probanden berichten die Positionen der Nachbilder, woraus auf die Augenbewegungen geschlossen wird. Nachbilder mit einem Abstand von $0,25^\circ$ werden sicher unterschieden. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass es nur bei Dunkelheit funktioniert und die Probanden Lichtblitzen ausgesetzt sind. Außerdem können retinale Nachbilder nur durch Mitwirkung der Probanden zur Augenbewegungsregistrierung genutzt werden. Weiterhin begrenzt das Abklingen der Nachbilder die Dauer der untersuchbaren Bewegungssequenzen. Eine kontinuierliche Messung ist nicht möglich. Häufig wird dieses Verfahren zur Untersuchung der torsionalen Augenbewegungen, etwa im Rahmen der Gleichgewichtsforschung, eingesetzt.

2.3.2 Direkte Beobachtung

Die technisch einfachste, älteste (vgl. Laurentius, 1599), aber auch sehr ungenaue Methode ist sicherlich die direkte Beobachtung. Bewegungen ab etwa 1° sind bemerkbar, aber nicht genauer zu quantifizieren. Anwendung findet die direkte Beobachtung im medizinischen Bereich. Im Sinne eines Screenings wird dabei festgestellt, ob bestimmte Typen von Augenbewegungen ausgeführt werden können und bestimmte Reflexe vorhanden sind.

2.4 Getrennte Erfassung horizontaler und vertikaler Bewegungen

2.4.1 Einführung

Den im folgenden beschriebenen Verfahren ist gemeinsam, daß für die Bewegungen des Auges in horizontaler und vertikaler Richtung¹ jeweils ein eigener Meßkanal genutzt wird. Die Meßwerte liegen üblicherweise in analoger Form, z. B. als Spannung, vor. Diese werden dann mittels Analog-Digital-Wandlung (A/D-Wandlung) in digitale Werte überführt und auf einem Rechner weiterverarbeitet. Die A/D Wandlung wird mit einer begrenzten Abtastrate durchgeführt, wodurch die zeitliche Auflösung der Daten bestimmt wird.

2.4.2 Elektroofokulogramm (EOG)

Zwischen Hornhaut und Netzhaut des Auges besteht eine Potentialdifferenz² von bis zu 20 mV, wobei die Hornhaut positiv geladen ist. Diese Spannung U_0 ist nicht konstant, sondern unterliegt leichten tageszeitlichen Schwankungen. Sie hängt in geringem Maße vom Adaptationszustand des Auges und vom Aufmerksamkeitsniveau der Versuchsperson ab (Mickasch & Haack, 1986; Schandry, 1989). Das Auge kann als Dipol aufgefaßt werden, dessen an die Körperoberfläche weitergeleitetes elektrisches Feld mit Oberflächenelektroden nahe am Auge meßbar ist (vgl. Shackel, 1967). Abbildung 3a zeigt die Entstehung des Elektro-Okulogramm bei Veränderung der Blickrichtung. Für den Zusammenhang zwischen Blickwinkel σ und der Signalspannung U ergibt sich theoretisch folgender Zusammenhang:

$$U = U_0 \cdot \sin \sigma$$

Praktisch ist der entstehende Fehler im Winkelbereich bis 40° gering, wenn ein linearer Zusammenhang angenommen wird.

Um nicht nur die Bewegungen, sondern auch die Position der Augen bestimmen zu können, sollte mit Gleichspannungsableitung gearbeitet werden. Abbildung 2b zeigt die Platzierung der Elektroden für die Ableitung des horizontalen und vertikalen EOG's.

¹ Beim *search coil* Verfahren zusätzlich auch der dritten Raumachse

² Die Angaben verschiedener Autoren sind recht unterschiedlich: Schandry (1989) und Mickasch & Haack (1986) geben eine Potentialdifferenz von bis zu 1 mV an.

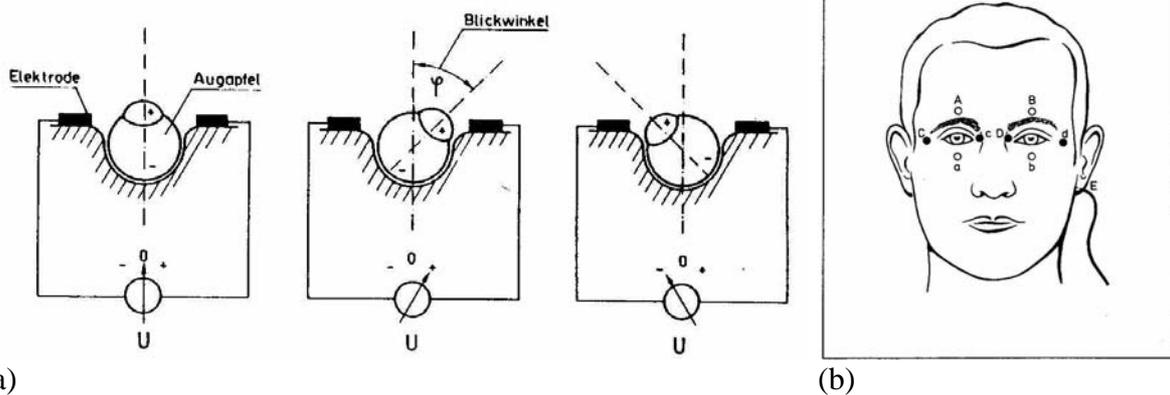


Abb. 2: (a) Entstehung des Elektro-Okulogramms bei Veränderung der Blickrichtung (aus Zipp, 1988). (b) Platzierung der EOG-Elektroden. Die Elektroden A und a bzw. B und b dienen der Aufzeichnung vertikaler Bewegungen. Die Position C und c bzw. D und d werden für die horizontale Ableitung verwendet. Die häufigsten horizontalen Platzierungen sind C und d (binokular). Vertikale Aufzeichnungen werden gewöhnlich monokular durchgeführt. Die Erdungselektrode E wird i. a. hinter dem Ohr (Mastoid) angebracht (aus Schandry, 1989).

Vor und ggf. während einer Messung sind Eichungen vorzunehmen, damit den Spannungen entsprechende Blickwinkel bzw. angeschaute Objekte zugeordnet werden können. Dabei sollte das Auge der Person vollständig an die herrschende Leuchtdichte adaptiert sein.

Das registrierbare Gesichtsfeld beim EOG beträgt bis zu $\pm 80^\circ$, wobei im Bereich über 30° nicht mehr sehr genau gemessen werden kann (Mickasch & Haack, 1986, S.16). Die Genauigkeit bei der Verwendung von Oberflächenelektroden beträgt im günstigsten Fall für die horizontale Komponente $\pm 30'$, typischerweise aber eher $\pm 1^\circ$ bis $1,5^\circ$. Für die vertikale Komponente beträgt die Genauigkeit etwa $\pm 2^\circ$ (vgl. Mickasch & Haack, 1986, S.16, sowie Oster & Stern, 1980, S.284). Bestimmend für die Genauigkeit ist u. a. die Empfindlichkeit des Registriersystems. Das EOG eignet sich für die Registrierung aller Augenbewegungen, die größer als 1° sind. Probleme bei der EOG-Messung entstehen durch die schon erwähnte Variation des corneo-retinalen Potentials (nach Oster & Stern, 1980, bis zu 60 % des Meßwertes). Für die vertikale Komponente ergeben sich Meßprobleme durch Lidschläge und Überlagerung der Potentiale der Gesichtsmuskulatur sowie durch elektrisches Rauschen, Drift des Meßsystems und Veränderungen des Übergangswiderstandes zwischen Haut und Elektroden. Die zeitliche Auflösung wird allein durch das Registriersystem bestimmt, in der Regel also durch die Abtastrate der A/D-Wandlung.

Der Proband wird in seinem Blickfeld durch die Abnahme des EOG's nicht eingeschränkt, und die Beeinträchtigung durch die Elektroden ist ähnlich wie bei anderen in der Arbeitswissenschaft üblichen physiologischen Meßgrößen. Die Augenbewegungen von Personen, die Brille oder Kontaktlinsen tragen, können in der Regel problemlos mittels EOG aufgezeichnet werden.

2.4.3 Kontaktlinsenmethode (Analog)

Zu den genauesten, aber auch aufwendigsten Methoden zur Augenbewegungsregistrierung gehören diejenigen, bei denen der Person eine Kontaktlinse angepaßt wird. Diese sollte natürlich sicher auf Hornhaut und Sklera sitzen und selbst bei schnellen Augenbewegungen nicht verrutschen. Die Kontaktlinsen müssen individuell an die Probanden angepaßt werden, was sowohl den Vorbereitungsaufwand als auch die Kosten für die Messung erhöht. Sie sind

mit spezieller Sorgfalt anzuwenden, um das Auge des Probanden nicht zu schädigen (vgl. Mickasch & Haack, 1986). Die Tragedauer ist auf relativ kurze Zeiträume von etwa 30 Minuten pro Messung begrenzt.

Zwei unterschiedliche Varianten zur Bestimmung der Augenbewegungen sind üblich. Bei der einen Variante ist auf der Kontaktlinse ein Spiegel angebracht, der eingestrahktes Licht reflektiert. Die punktförmige Reflexion wird von einer Kamera oder einem anderen lichtempfindlichen Element aufgezeichnet (siehe Abschnitt 2.5.3). In der anderen Variante, bekannt unter dem Namen *search coil*, wird in eine in einem magnetischem Wechselfeld liegende Spule eine Spannung induziert. Entweder werden die Spulen am Kopf des Probanden angebracht (vgl. Carpenter, 1988) oder der Kopf des Probanden befindet sich in einem Rahmen, an dem Spulen für jede Raumrichtung ein magnetisches Wechselfeld erzeugen. An der Kontaktlinse sind eine oder mehrere kleine Spulen untergebracht. Die dort induzierten Spannungen, die sich proportional mit der Lage der Spulen im Feld verändern, werden gemessen.

2.4.4 Limbus-, Pupillen- oder Augenlidregistrierung

Einige Charakteristika des Auges sind optisch sehr leicht erkennbar und haben sich insofern für die kontinuierliche Registrierung von Augenbewegungen bewährt. Die Grenzlinie zwischen Augapfel und Iris, der Limbus, eignet sich besonders für die Registrierung horizontaler Bewegungen. Das Augenlid folgt den vertikalen Augenbewegungen, so daß dessen Beobachtung Informationen über die vertikale Komponente der Augenbewegungen liefert. Sowohl zur Bestimmung der horizontalen als auch der vertikalen Augenbewegungen kann die Pupille dienen.

Die eigentliche Registrierung der Bewegung kann in allen drei Fällen entweder mittels einer Videokamera und anschließender Auswertung mit einer Bildverarbeitungskarte (vgl. Abschnitt 2.5.2) oder über photoelektrische Registrierung erfolgen. Diese wird von Carpenter (1988, Appendix 1) erläutert. Das Ausgangssignal der photoelektrischen Sensoren ist üblicherweise eine Spannung oder eine Widerstandsänderung. Diese werden dann A/D-gewandelt, und in einen Rechner übertragen und dort weiter verarbeitet.

2.5 Videobasierte Erfassung und Bildverarbeitung

2.5.1 Einführung

Bei der videobasierten Erfassung wird mittels einer Videokamera oder eines anderen lichtempfindlichen Sensors ein Bild des Auges aufgezeichnet. Das Signal wird dann einer rechnergestützten Bildverarbeitung zugeführt, um die interessierenden charakteristischen Merkmale des Augenbildes zu extrahieren. Die zeitliche Auflösung der videobasierten Verfahren wird üblicherweise durch die entsprechenden Videonormen bestimmt und liegt bei 25 Bildern pro Sekunde bei der europäischen CCIR Norm und 30 Bildern pro Sekunde bei der in den USA und Japan NTSC Norm. Für einen Einsatz bei psychologischen Experimenten, zum Beispiel bei blickkontingenten Versuchen in der Leseforschung, sind diese Systeme sicherlich zu langsam. Da die Videobilder nach beiden Normen aus Halbbildern (frames) aufgebaut werden kann die zeitliche Auflösung verdoppelt werden, wenn die Halbbilder analysiert werden. Hierdurch verringert sich aber entsprechend die örtliche Genauigkeit (vgl. z. B. auch Clarke, 1996). Inzwischen sind videobasierte, kommerzielle Systeme erhältlich, die zeitliche Auflösungen von 250 und 600 Hz gewährleisten.

Ist die Lage des Meßgerätes gegenüber dem Kopf fest, reicht ein mit den Augenbewegungen veränderlicher Bezugspunkt, um die Augenbewegungen zu messen. Ein zweiter Bezugspunkt

ist notwendig, um bei berührungsfreier Messung die Augenbewegungen bestimmen zu können. Abbildung 3 zeigt die berührungslose Registrierung der Augenbewegungen mit einem videobasierten System.

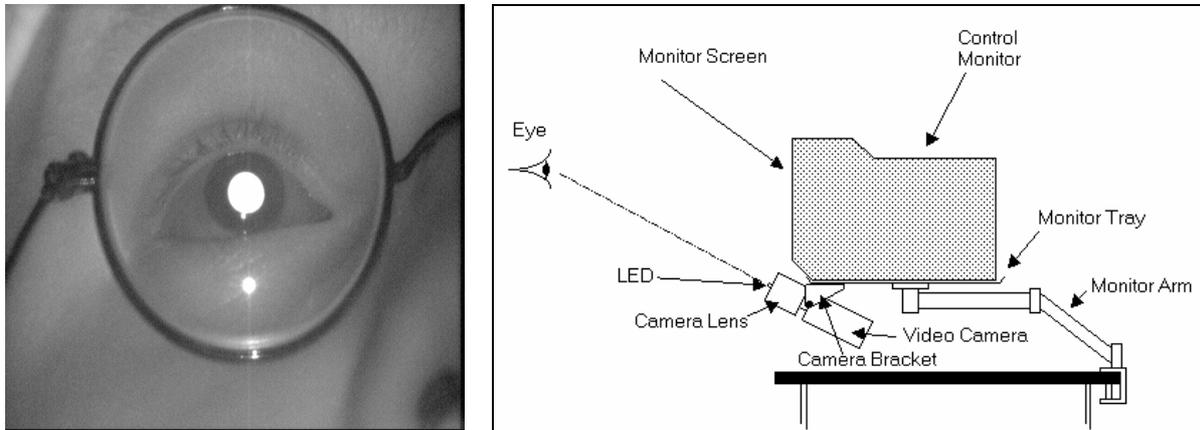


Abb. 3. Menschliches Auge im Infrarotlicht eines videobasiertes Gerätes. Rechts: Kontaktlose Augenkamera am PC-Arbeitsplatz.

2.5.2 Blickachsenmessung (Point of Regard Measurement)

Für Meßsysteme, bei denen aus einem festen Punkt des Auges und einem Lichtreflex auf die Blickachse geschlossen wird, hat sich der Name *Point of Regard Measurement* (Blickachsenmessung) eingebürgert. Üblich ist die Messung der Distanz zwischen Corneareflex (siehe auch Abschnitt 2.5.4) und Mittelpunkt der Pupille oder zwischen Lichtreflex auf der Netzhaut und einem charakteristischem Blutgefäß auf der Netzhaut (vgl. Carpenter, 1988).

Bei Bewegungen des Kopfes verändert sich die relative Position der beiden Meßpunkte nicht. Bei Bewegungen des Auges hingegen verschiebt sich der Corneareflex gegenüber dem gewählten Fixpunkt (Pupillenmittelpunkt oder Blutgefäß) systematisch, woraus die Blickposition bestimmt werden kann. Die Ermittlung der Lage beider Bezugspunkte erfolgt üblicherweise durch Verfahren der automatischen Bildverarbeitung. Die Meßvorrichtung braucht nicht notwendigerweise am Kopf des Probanden angebracht zu sein, d.h. es ist auch eine „kontaktfreie“ Messung möglich.

Für ein von der Firma ISCAN hergestelltes kontaktfreies System, das Remote Eye Imaging & Camera Control System, hat Franke (1995) die folgenden technischen Parameter am künstlichen Auge bestimmt. Die Auflösung gibt er mit $0,45^\circ$ horizontal und $0,65^\circ$ vertikal an. Die Meßgenauigkeit beträgt $1,2^\circ \pm 0,27^\circ$ horizontal und $0,95^\circ \pm 0,41^\circ$ vertikal. Das Systemrauschen beträgt ± 1 Pixel und hat damit in Blickwinkel umgerechnet die gleichen Werte wie die Auflösung. Das ISCAN-System ermittelt die Blickposition aus den Mittelpunkten der Pupille und des Corneareflexes.

2.5.3 Kontaktlinsenmethode (Videobasiert)

Bei der videobasierten Variante der Kontaktlinsenmethoden wird, ähnlich wie bei der Cornea-Reflex-Methode (vgl. Abschnitt 2.5.4), die punktförmige Reflexion eines auf der Kontaktlinse angebrachten Spiegels aufgezeichnet. Carpenter (1988) zeigt, daß eine Bewegung des Auges um einen bestimmten Winkel eine doppelt so große Bewegung des Reflexes bewirkt. Verglichen mit den anderen optischen Verfahren ist also eine höhere örtliche Auflösung (bei

gleichem optischen Sensor) realisierbar. Wegen der schon im Abschnitt 2.4.3 erläuterten Nachteile wird die Kontaktlinsenmethode jedoch nur selten angewandt.

2.5.4 Cornea-Reflex-Methode

Helmholtz berichtet über eine frühe Anwendung der Cornea-Reflex-Methode: „Professor Junge aus St.Petersburg hat in meinem Laboratorium den Drehpunkt des Auges zu bestimmen versucht, indem er beobachtete, um wieviel sich die Lichtreflexe beider Hornhäute einander näherten, wenn die Gesichtslinien aus paralleler Stellung in einen bestimmten Konvergenzwinkel übergingen. Es zeigte sich indes, daß die Elliptizität der Hornhäute einen merklichen Einfluß auf die Berechnung der Resultate hatte, und da es sehr mühsam ist, diese Elliptizität für viele Augen zu bestimmen, so war die Methode nicht eben ausgedehnter Verwendung fähig, obgleich sie übrigens sehr genaue Resultate gab“ (Helmholtz, 1910, S. 35).

Da die Oberfläche der Hornhaut (Cornea) glänzend ist, spiegelt sich dort auftreffendes Licht einer punktförmigen Quelle. Dieser Corneareflex ist das erste Purkinje-Bild und scheint etwa 3,5 mm hinter der Augenoberfläche zu liegen. Der Rotationspunkt des Auges r_r befindet sich etwa 13 mm hinter der Oberfläche des Auges und der Radius der Cornea r_c beträgt knapp 8 mm, dementsprechend kommt es bei einer Bewegung des Auges um den Winkel σ in erster Näherung zu einer Verschiebung des Corneareflexes (vgl. Abbildung 4) um den Betrag h_q :

$$h_q = (r_r - r_c) * \sin \sigma$$

Insbesondere bei größeren Winkeln kommt es jedoch zu stärkeren Abweichungen von dieser Formel, weil sich der Drehpunkt des Auges um etwa einen Millimeter verschiebt, der Radius der Hornhaut sich zum Rand hin verändert und sich die Lichtquelle nicht im Unendlichen befindet.

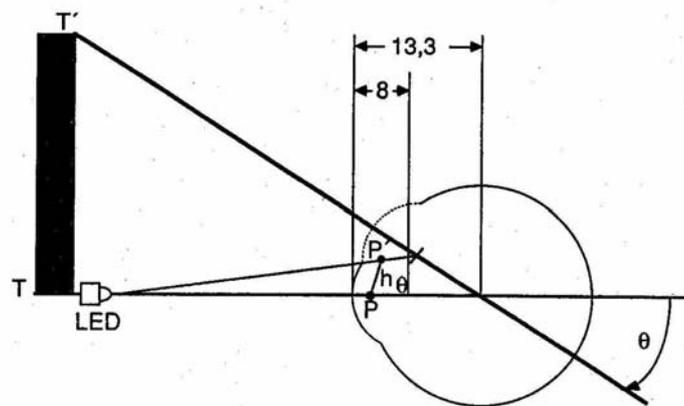


Abb. 4: Entstehung des Corneareflexes (erstes Purkinje-Bild) und seine Verschiebung bei Rotation des Auges.

Die Cornea-Reflex-Methode wird, zum Beispiel, in den Geräten der japanischen Firma NAC (EMR-V und EMR-600) angewendet. Für die Registrierung werden dabei insgesamt drei Videokameras eingesetzt. Mit der Feldkamera wird in etwa das Blickfeld der Person aufgenommen. Die linke und rechte Augenbewegungsregistriereinheit zeichnen den Corneareflex auf. Im Camera-Controller werden die Signale der drei Kameras zusammengebracht. Der Corneareflex wird in ein + bzw. □ Marker für das linke bzw. rechte Auge gewandelt. Abhängig von der Person muß das Signal der Augenbewegungskameras elektronisch so aufgespreizt werden, daß Marker und fixiertes Objekt übereinander liegen. Der Camera-Controller besitzt einen Ausgang für ein Video Signal. Nachdem zur Identifizierung jedes

Videobildes eine Stoppuhr eingeblendet wurde, kann das Signal mit einem Videorekorder aufgezeichnet werden. Entweder gleichzeitig oder später vom Videoband gelangt das Signal in die „Data-Output-Unit“. Dort wird die Markerposition aus dem Videosignal extrahiert und über die serielle Schnittstelle für die weitere Datenverarbeitung an einen PC übertragen.

2.5.5 Doppelte Purkinje-Bild-Technik

Lichtstrahlen werden an den verschiedenen Oberflächen des Auges gebrochen. Die erste Reflexion entsteht an der Oberfläche der Hornhaut und heißt daher Corneareflex (siehe auch Abschnitt 2.5.4) oder auch erstes Purkinje-Bild. Das zweite, dritte und vierte Purkinje-Bild entstehen respektive an der Grenzfläche zwischen Hornhaut und Kammerwasser, Kammerwasser und Linse sowie Linse und Glaskörper. Das erste und vierte Purkinje-Bild sind besonders geeignet zur Bestimmung der Blickrichtung, da sich deren Lage zueinander nur durch rotierende und nicht durch translatorische Bewegungen des Auges ändern. Für eine ausführliche Beschreibung des Meßprinzips sei auf Crane & Steel (1978) verwiesen.

2.5.6 „Bright Pupil“

Beleuchtet man das Auge mit einem sich in der optischen Achse der Kamera befindlichen Licht, reflektiert die Netzhaut dieses, und die Pupille erscheint hell („*bright pupil*“). Die weitere Verarbeitung kann analog zu den Verfahren erfolgen, die auch zur Bestimmung der „dunklen“ Pupille eingesetzt werden.

Von Morimoto et al. (1998) wurde ein kontaktfreies Verfahren vorgestellt, bei dem ein oder auch mehrere Gesichter wechselweise im Takt der Kamerahalb bilder mit zwei IR-Dioden beleuchtet werden. Eine der Dioden befindet sich nahe der Kameraachse, die zweite entfernt davon. So erscheinen die Pupillen im ersten Halbbild hell und im zweiten dunkel. Durch vergleichsweise einfache Bildverarbeitungsalgorithmen lassen sich so die Pupillen detektieren.

2.6 Zusätzliche Daten der Augenbewegungsregistrierung

Bei der Registrierung der Augenbewegungsdaten können, insbesondere bei dem Einsatz der gerade vorgestellten videobasierten Verfahren, weitere Informationen erfasst werden. Diese Informationen betreffen Pupillengröße und Lidschlag-Parameter. Sie werden bei anderen Typen der Augenbewegungsmessung entweder ignoriert oder als unerwünschtes Rauschen betrachtet.

2.6.1 Pupillendurchmesser

Bei Lichteinfall verengt sich die Pupille, während sie sich bei Dunkelheit erweitert. Beide Pupillen verengen sich auf minimal 1,5 mm – dies ist auf Grund des sogenannten konsensuellen Pupillenreflexes auch der Fall, wenn Licht nur in ein Auge fällt. Die Pupille erweitert sich auf maximal 8 mm, wenn es dunkel wird. Unter üblichen Beleuchtungsbedingungen beträgt der Spielraum jedoch zwischen 2 und 6 mm Durchmesser. Die Lichtmengenregulierung, die analog zur Blende eines Fotoapparates gesehen werden kann, ist unumstritten die wichtigste Funktion der menschlichen Pupillenbewegung (Alexandridis, 1985). Sie verhindert als relativ schneller Regelungsmechanismus häufig eine Blendung, ersetzt aber nicht die langsameren Pigmentverschiebungen der Hell- und Dunkeladaptation der Netzhaut, die bis zu 30 Minuten in Anspruch nehmen und sekundär auch zu einer Veränderung der Pupillengröße führen kann (Hornung, 1967). Es sind also nicht so sehr die absoluten Lichtmengen, sondern eher die wahrgenommenen

Lichtmengenveränderungen, welche die Pupillenweite steuern. Zusätzlich zum Lichteinfall führt auch die Nah-Akkommodation und die Konvergenz zu einer Pupillenverkleinerung (Lowenstein & Loewenfeld; 1969). Eine ausführliche Zusammenschau der in der Literatur beschriebenen Einflüsse auf den Durchmesser der Pupille (etwa durch emotionelle Faktoren oder Prozesse der Informationsverarbeitung) findet sich in Rößger (1997).

2.6.2 Lidschlag

Bei einem Lidschlag wird das Auge kurzzeitig durch die Augenlider verschlossen und dadurch mit einem Tränenfilm überzogen, wodurch die Hornhaut vor dem Austrocknen bewahrt wird. Eine zusätzliche Funktion des spontanen Lidschlags sehen Haberich und Fischer (1958) in der Ausschaltung störender Scheinverschiebungen bei großen Sakkaden, da Lidschläge bevorzugt bei großen Sakkaden und Kopfbewegungen vorkämen. Weiterhin unterscheidet man den reflektorischen Lidschlag als Schutzreflex des Auges auf verschiedene Reize und den willkürlichen Lidschlag. Bei einer Lidschlagregistrierung unterscheidet man das Lidschlagintervall, die Lidschlagamplitude sowie die Lidschlagdauer. Da der Lidschlag aus einer Lidschluß- sowie einer Lidöffnungsphase besteht, kann deren Dauer bzw. Geschwindigkeit auch getrennt bestimmt werden. Die genannten Parameter wurden in den letzten Jahren als Indikatoren für die mentale Beanspruchung verwendet.

2.7 Bewertung und Ausblick

Die vorgestellten Methoden besitzen unterschiedliche Relevanz für experimentelle und praktische Anwendungen. Die Häufigkeit des Einsatzes ist unter anderem von der Invasivität einer Methode, den entstehenden Kosten, der Leistungsfähigkeit sowie der Handhabbarkeit der Systeme abhängig.

Die manuelle Auswertung von Augenbewegungsdaten kann aufgrund des erheblichen Datenumfanges nur in begrenztem Maße geleistet werden. Üblicherweise werden sehr kurze Aufzeichnungssequenzen, in denen besonders forschungsrelevante Situationen oder Aufgabenabschnitte beachtet werden, analysiert. Die manuelle Auswertung ist mit hohem Zeitaufwand verbunden und stellt wegen der Gleichförmigkeit der Aufgabe auch eine Belastung für die Personen dar, welche die Analyse durchführen. Werden mehrere Personen die Daten aus, muss die Kategorisierung präzise definiert sein, um eine valide Datenbasis für die weitere Auswertung und Interpretation zu erstellen. Allerdings können bei der manuellen Auswertung systematische Fehler, wie sie etwa durch das Verrutschen der Meßvorrichtung auf dem Kopf der Person entstehen, durch erfahrene Auswerter korrigiert werden.

Gegenüber der manuellen Auswertung ist mit einer automatischen Auswertung die Bewältigung größerer Datenmengen in sehr viel kürzerer Zeit möglich. Viele Parameter sind allein aus den Daten der Augenbewegungen zu ermitteln. Um aber bei der automatischen Auswertung Bezüge zu den betrachteten Objekten herstellen zu können, müssen zum einen die Koordinaten der Objekte bekannt sein und zum anderen der Kopf fixiert oder die Kopfbewegungen mit erfasst werden (siehe z.B. Pelz, 1995).

Abschließend sei angemerkt, dass die wachsenden hardware- und software-technischen Möglichkeiten auch für die Augen- und Blickbewegungsmessung neue Perspektiven eröffnen. In den letzten Jahren werden vermehrt, zum Teil recht preiswerte Geräte vorgestellt, die primär unter dem Aspekt der Interaktion des Menschen mit technischen Geräten entwickelt wurden. Neben dem schon seit langer Zeit verfolgtem Ziel, mittels Blickbewegungen Schwerstbehinderten eine Interaktion zu ermöglichen, wird der Einsatz der Geräte auch zunehmend für gesunde Nutzer interessant. Sie werden, wie der letzte Abschnitt dieses Kapitels zeigt, auch zunehmend in modernen Kommunikationstechnologien verwendet. Für

bestimmte Fragestellungen der Forschung sind diese Geräte schon heute leicht einsetzbar. Für andere Anwendungen fehlt es aber immer noch an einfachen Systemen, die über die nötige örtliche und/oder zeitliche Auflösung verfügen.

3. Relevante Parameter der Augen- und Blickbewegungen

3.1 Einführung

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten allgemeine Informationen über Augenbewegungen und entsprechende Meßmethoden dargestellt wurden, sollen in diesem Teil des Kapitels gezielt, wenn auch fragmentarisch, die Parameter der Augen- bzw. Blickbewegungen besprochen werden, die eine besondere Relevanz für psychologische und hierbei speziell für sprachpsychologische und kommunikative Untersuchungen haben. Dies sind Parameter der Sakkaden, Fixationen und dem Zusammenspiel von beiden – den Blickpfaden (*scanpaths*).

Die Auswahl dieser Parameter aus der großen Menge von möglichen Parametern, erfolgte in Anbetracht deren Beziehung zur Aufmerksamkeit. Zahlreiche Untersuchungen (z.B. Just & Carpenter, 1976) stützen die Annahme, dass im allgemeinen eine Übereinstimmung zwischen dem Fixationsort und dem Fokus der visuellen Aufmerksamkeit angenommen werden kann, da die Aufmerksamkeit, gekoppelt an Sakkaden, normalerweise das Auge zu seinem Ziel führt. So kann z.B. durch die Provokation einer Blickbewegung in eine bestimmte Richtung ein in dieser Richtung erscheinender Reiz schneller beantwortet werden, was für eine in Reizrichtung gelenkte Aufmerksamkeit spricht (Posner, 1980). Posner (1995) geht davon aus, dass sich die Aufmerksamkeit vom Fixationsort lösen muss („attentional disengagement“), bevor sie sich auf ein anderes Objekt verlagern kann - bei einer Fixation bindet sich der Betrachter an ein Objekt („engagement“). Bevor keine Loslösung stattfindet, wird keine Sakkade initiiert. Dieser Loslösungsprozess findet vor allem im *gap-Paradigma* statt, bei dem ein fixiertes Blickobjekt ca. 150ms vor dem Erscheinen eines peripheren Reizes von der Fovea Centralis verschwindet, was die kürzeren Sakkadenlatenzen erklärt. Hieraus wird ersichtlich, dass „gebundene“ Aufmerksamkeit Sakkaden hemmen kann. Diese Hemmung ist sogar spezifisch für den Ort im Gesichtsfeld, auf den die Aufmerksamkeit gelenkt ist (Weber & Fischer, 1995), d.h. sie wird nur für die beachtete Stelle wirksam, während unbeachtete Stellen sehr wohl mit Expreßsakkaden (s.u.) erreicht werden können. Durch diese „Reflexkontrolle“ können aus dem Augenwinkel, in der Peripherie liegende, Objekte beobachtet und analysiert werden, um sodann eine Entscheidung treffen zu können, zu diesem Objekt oder woandershin zu blicken.

Die Fähigkeit der bewussten Blickfixierung bzw. Freigabe ist besonders in Situationen von großer Bedeutung, in denen etwas „gesucht“ wird. Die Tatsache, dass man etwas aus den Augenwinkeln beobachten kann, ohne es zu fixieren, zeigt, dass eine Übereinstimmung von Fixationsort und Aufmerksamkeit nicht zwingend ist. Eine weitere Ausnahme stellt das „Nachdenken“ dar: Hier ist die Aufmerksamkeit nach innen gerichtet und keinem der Objekte in der Umgebung zugewandt (Posner et al., 1980; Reeves & Sperling, 1986). Wieder anders ist es im Fall des Lesens, wo ein Wort zur Informationsaufnahme fixiert, gleichzeitig aber auch das nächste, im außerfovealen Bereich liegende Wort, vorverarbeitet wird (Hoffman, 1999). Solche und ähnliche Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Aufmerksamkeit sich zwischen dem fixierten und dem peripher liegenden Wort aufteilt. Zusammenfassend gilt es als gesichert, dass der Aufmerksamkeitsfokus ohne jegliche Augenbewegungen verlagert werden kann. Die Ausrichtung der Augen auf ein visuelles Ziel, ohne dass parallel dazu eine Aufmerksamkeitsverlagerung stattfindet, scheint eher zweifelhaft. (Deubel, 1998).

3.2 Sakkaden

3.2.1 Geschwindigkeit und Dauer

Sakkaden sind die schnellsten Bewegungen, die vom menschlichen Körper ausgeführt werden können. Geschwindigkeit und Dauer einer Sakkade sind von der Sprungweite abhängig. Carpenter (1988) gibt für die Dauer von Sakkaden die Formel

$$\text{Sakkadendauer [ms]} = 2,2 \cdot \text{Sakkadenamplitude [}^\circ\text{]} + 21$$

an. Ähnliche Dauern nennen Oster & Stern (1980) und Rayner (1978). Für die Sakkadengeschwindigkeit (*saccadic speed* oder *saccadic velocity*) nennen Boff & Lincoln (1988) Daten von bis zu 1000°/s. Die höchsten Geschwindigkeiten werden vor der Mitte der Bewegungsbahn erreicht und die Abbremsphase ist länger als die Beschleunigungsphase.

Die Sakkadengeschwindigkeit kann als Indikator für Vigilanz und Beanspruchung betrachtet werden (Galley, 1989; Galley, im Druck), hat aber bisher erst als Aktivierungsindikator bei Untersuchungen der Vigilanzminderung durch Pharmaka und Alkohol (vgl. Galley, im Druck), bei neurologischen Erkrankungen (Lim et al., 1995; Anastasopoulos et al. 1996) oder als Maß für Schläfrigkeit Anwendung gefunden. Auch die erste Ableitung der Sakkadengeschwindigkeit, die Sakkadenbeschleunigung (*saccadic acceleration*), wird nur selten als Parameter eingesetzt. Zur Beschreibung der Sakkadenbewegung ist von van Opstal und van Gisbergen (1987) der Parameter „*skewness*“ eingeführt worden, der das Verhältnis der Beschleunigungsphase zur Abbremsphase einer Sakkade angibt. Saito (1992) entwickelte ein Maß für die Augenbewegungen, das Produkt aus mittlerer Sakkadenamplitude in Grad und der Sakkadenhäufigkeit pro Sekunde. Er nennt die Größe *average saccadic velocity* und findet bei Arbeiten am Bildschirm Werte die mit knapp 23°/s etwa 2,5 mal höher sind, als bei Tätigkeiten ohne Bildschirm. Als maximalen physiologisch möglichen Wert dieser Größe gibt er 48°/s an (Saito, 1992).

3.2.2 Reaktionszeit der Sakkaden

Die Sakkadenlatenz (*saccadic latency* oder *saccadic reaction time*) ist die Zeit zwischen Erscheinen eines Zieles und dem Start der Sakkade zum intendierten Ziel. Es handelt sich also um eine Art visuelle Reaktionszeit, wobei der Parameter hauptsächlich in chronometrischen Laboruntersuchungen verwendet wird. Sowohl das Erscheinen des Stimulus als auch der Zeitpunkt, an dem das Ziel erreicht wird, muss mit relativ hoher zeitlicher Genauigkeit erhoben werden. Daher wird dieses Maß fast ausschließlich bei Laboruntersuchungen erhoben. Die Verteilung der Sakkadenlatenzen zeigt dabei drei Gipfel. Der erste Gipfel mit einer mittleren Sakkadenlatenz von 240ms besteht aus Sakkaden, bei denen alle Prozesse, von der Lösung der Fixation bis zur Erstellung und Ausführung des motorischen Programms ablaufen mussten. Der zweite Gipfel mit einer mittleren Sakkadenlatenz von 175ms kommt durch Sakkaden zustande, bei denen bei Erscheinen des neuen Blickziels die Fixation schon gelöst war, aber noch keine Entscheidung und Koordination stattgefunden hat. Bei dem dritten Gipfel, handelt es sich um sogenannte Expreßsakkaden, mit einer mittleren Sakkadenlatenz von 125ms. Bei den Expreßsakkaden sind alle Prozesse, außer der Bestimmung der Zielkoordinaten, abgeschlossen (Fischer, 1990). Die Sakkadenlatenz spiegelt den Einfluss des Aktivierungs-Mechanismus auf die Blickbewegungssteuerung wieder und ist gegenüber Parametern, die auf der Messung der Fixationsdauer basieren, in ihrer psychologischen Aussagekraft deutlich unterlegen.

3.2.3 Sakkadenamplitude und weitere abgeleitete Maße

Die Sakkadenamplitude (*saccadic extent* und *saccadic amplitude*) ist die wohl gebräuchlichste Größe zur Beschreibung von Sakkaden. Verschiedene Autoren bezeichnen diese allerdings

auch als Sakkadenhöhe oder als Sakkadenlänge. Die Sakkadenamplitude ist offensichtlich durch das Stimulusmaterial bzw. die visuelle Umgebung bestimmt. Darüber hinaus hängt die Sakkadenamplitude aber auch von dem *functional field of view* (s.u.) ab. Von verschiedenen Autoren ist eine Verkleinerung des Sichtfeldes in Abhängigkeit von der Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit beobachtet worden. Es ist zu erwarten, dass die Mehrzahl der Änderungen der Fixationsorte nur innerhalb des Sichtfeldes erfolgt. Mithin wird sich die Größe des Sichtfeldes in der durchschnittlichen Sakkadenamplitude widerspiegeln. May et al. (1990) nennen verschiedene Arbeiten, bei denen eine Verkleinerung des Sichtfeldes bei erhöhter Aufgabenschwierigkeit gefunden wurde. In den eigenen Untersuchungen fanden May et al. (1990) eine Verringerung der Sakkadenamplitude bei erhöhter Stimuluskomplexität. Ceder (1977) und Troy et al. (1972) fanden eine Verringerung der Häufigkeit von Augenbewegungen größerer Amplitude (größer $9,5^\circ$) mit zunehmender Aufgabenbearbeitungszeit.

Zenhausen und Kraemer (1991) benutzen eine Größe, die von Day (1964) eingeführt wurde und „*lateral eye movements*“ bzw. „*conjugate lateral eye movements*“ genannt wird. Day (1964) stellte eine Beziehung zwischen der Zahl der nach links bzw. rechts gerichteten Augenbewegungen und dem individuellen Bewältigen von Stress auf. Kinsbourne (1972,) erweiterte den Ansatz und postulierte, daß Aufgaben, die überwiegend auf der linken Gehirnhälfte lokalisierte Funktionen erfordern, Augenbewegungen nach rechts zur Folge haben und das umgekehrt linksgerichtete Augenbewegungen mit einer Beanspruchung der rechten Hemisphäre einhergehen. Auf die Person bezogen kann die Richtung der Augenbewegung darauf hinweisen, welche Problemlösetechnik bevorzugt wird. Bei Kopfrechenaufgaben deutet eine Bewegung nach links auf eine Visualisierung und eine Bewegung nach Rechts auf eine abstrakte Lösung des Problems (vgl. Oster & Stern, 1980).

3.3 Fixationen

3.3.1 Fixationsdauer

Die Fixationsdauer (*fixation duration*) ist der wohl am häufigsten benutzte Parameter der Augenbewegungen. Eine Fixation wird definiert als der Zustand, bei dem das Auge sich bezüglich eines Sehobjektes in „relativem“ Stillstand befindet. Eindeutig sind mit dieser Definition die Fixationen von den Sakkaden abgegrenzt. In der Definition wird in doppeltem Bezug das Wort „relativ“ genutzt. Wird relativ auf Stillstand bezogen, erfolgt die Abgrenzung zu den Mikrobewegungen (vgl. Abschnitt 1.2.3) des Auges³. Wird hingegen relativ auf das Sehobjekt bezogen, werden Folgebewegungen (vgl. Abschnitt 1.2.1) in den Fixationen mit eingeschlossen. Beide Abgrenzungen erfolgen über die Operationalisierung der Fixationen. Üblich ist eine Kombination eines örtlichen und eines zeitlichen Kriteriums (vgl. z. B. Anliker, 1976; Unema & Rötting, 1990). Nicht immer wird die Fixationsdauer auch so bezeichnet. So sprechen Oster & Stern (1980) von *saccadic reaction time* und *intersaccadic interval*. Dies ist insofern auch sinnvoll, da sie die Fixationsdauer (bei einer Registrierung mittels EOG) als die Zeit definieren, die zwischen dem Ende einer und dem Start der folgenden Sakkade liegt (a. a. O.).

Fixationen haben eine Dauer von 100-2000 ms mit einer Konzentration im Bereich von 200-600ms (Karsh & Breitenbach, 1983; Young & Sheena, 1975), wobei Velichkovsky et al. (1997) auch extrem kurze Expreßfixationen mit einer Dauer zwischen 50 und 100 ms fanden. Dieser Wert erscheint aufgrund der *saccadic suppression* (vgl. Abschnitt 1.2.2) plausibel, weil

³ Die Möglichkeit zur Erfassung von Mikrobewegungen ist abhängig von der zeitlichen und örtlichen Auflösung des Meßsystems.

bei kürzeren Fixationsdauern keine Information wahrgenommen werden könnte. Übliche durchschnittliche Fixationsdauern sind jedoch um ein Vielfaches länger, etwa 225 ms beim Lesen, bei visuellen Suchaufgaben rund 275 ms und bei der Bildwahrnehmung rund 330 ms (Rayner, 1978). Diese Ergebnisse sind jedoch keineswegs stabil: In vielen Fällen scheint ein Zusammenhang zwischen Fixationsdauer und Aufgabenparameter (Aufgabenschwere, erforderliche Genauigkeit, u. a.) zu bestehen.

Fixationsdauern werden deshalb oftmals als Maß für die Dauer der Bearbeitung der betrachteten Information interpretiert. Da während der Sakkaden das Sehvermögen weitgehend reduziert ist, findet die visuelle Informationsaufnahme fast ausschließlich während der Fixationen statt. In vielen Untersuchungen wird daher davon ausgegangen, dass die Information, die gerade fixiert wird, auch verarbeitet wird. Unter dieser Annahme ist also die Fixationsdauer identisch mit der Dauer der Informationsverarbeitung (*eye-mind assumption* und *immediacy assumption*, vgl. auch Inhoff & Radach, 1998, S.37). McConkie et al. (1985) haben für das Lesen gezeigt, dass die Verarbeitungszeit kürzer als die Fixationsdauer sein kann. So können Wörter erst fast 100 ms nach dem Ende der hinführenden Sakkade identifiziert werden. Die fortführende Sakkade muß schon 100ms vor ihrem Start programmiert werden (ihre Ausführung kann allerdings noch bis 30ms vor dem Start abgebrochen werden).

Sanders (1990) geht davon aus, daß eine Sakkade - und damit das Ende einer Fixation - die Antwort auf das Vorliegen eines internen Wahrnehmungscodes von konstanter Qualität ist. In anderen Worten: die Augen können das Signal, welches gerade bearbeitet wird, nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt während des Wahrnehmungsprozesses verlassen. Auch Oster und Stern (1980) gehen nach dem Vergleich der Fixationsdauern bei verschiedenen Aufgabentypen davon aus, dass die Zeit zwischen zwei Sakkaden eher eine Funktion der Aufgabenanforderungen als ein Merkmal des Sakkadensystems ist.

Rayner (1978) stellt zwei Modelle der Steuerung von Fixationsdauern vor. Nach dem Modell des kognitiven Rückstandes sind die Fixationen so kurz, daß die kognitiven Prozesse notwendigerweise mit einem zeitlichen Abstand zu der Informationsaufnahme ablaufen können. Die meisten Ergebnisse aus der Literatur sprechen jedoch dagegen (Carpenter & Just, 1978). Nach dem Modell der Prozeßüberwachung wird die Fixationsdauer von den kognitiven Prozessen beeinflusst, die zur Verarbeitung der während der Fixation aufgenommenen Informationen herangezogen werden. Die Verarbeitungsschwierigkeit würde sich demnach in der Fixationsdauer niederschlagen. Viele Forschungsergebnisse scheinen dieses Modell tatsächlich zu unterstützen (Balota et al., 1985). Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die beiden Modelle sich im Grunde nur auf Fixationsdauern bei Leseaufgaben beziehen, so daß die Kontextinformation, also zum Teil bereits verarbeitete Information, eine entscheidende Rolle in der Bestimmung bzw. Steuerung der Fixationsdauer spielt. Dieser Tatbestand macht die Interpretation der bei Leseaufgaben gefundenen Fixationsdauern problematisch. In den Veröffentlichungen von Henderson und Hollingworth (1998) bzw. Findlay und Walker (1999) werden generellere Theorien der Steuerung von Blickbewegungen entwickelt.

Während das Modell des kognitiven Rückstandes implizit von einer zufälligen Verteilung der Fixationszeiten ausgeht (Random-Kontrollhypothese, vgl. Kolers, 1976), ist die Grundhypothese des Modells der Prozeßüberwachung die kognitive Steuerung der Fixationsdauer. Das Randommodell kann systematische Unterschiede in der Fixationsdauer nicht erklären. Mit dem Modell der kognitiven Kontrolle läßt sich dagegen schwer erklären, daß Fixationsdauern - verglichen mit der zu vermutenden großen Variabilität in der kognitiven Prozeßdauer - relativ konstant sind.

Die Fixationsdauer kann auch als ein Maß für die Beanspruchung gelten. Allerdings ist zu beachten, daß die Interpretation der Fixationsdauer als Beanspruchungsmaß vom

Aufgabentyp abhängig ist. Verlangt die Aufgabe überwiegend zentral kontrollierte Verarbeitung, so ist eine Verlängerung der Fixationsdauer ein Hinweis auf größere Beanspruchung. So fand Rayner (1978, 1982) eine Verlängerung der Fixationsdauern bei zunehmender Schwierigkeit von Satzkonstruktionen. Stager und Angus (1978) konnten zeigen, daß die Fixationsdauer bei Erfahrung mit einer Aufgabe sinkt. Bei Aufgaben, bei denen schnelles Reagieren gefordert ist (z. B. Führen von Fahrzeugen), kommt es bei größerer Beanspruchung über einen Anstieg des Aktivierungs-Niveaus zu kürzeren Fixationsdauern. Verwiesen sei auch auf Gerathewohl et al. (1978), die zeigten, daß sich die Fixationsdauer bei höherer Schwierigkeit von Flugführungsaufgaben verkürzt. Miura (1986) sowie Unema und Rötting (1990) fanden gleichartige Ergebnisse beim Autofahren.

Verschieden Autoren haben die Größe des Bereichs untersucht, innerhalb dessen während einer Fixation Informationen aufgenommen und verarbeitet werden können. Mackworth (1965) nannte den Bereich „*functional field of view*“, Saida und Ikeda (1979) bezeichnen den Bereich als „*useful visual field*“, Nelson und Loftus (1980) sprechen vom „*functional visual field*“. In der Leseforschung wird der Bereich als „*perceptual span*“, (Rayner & Pollatsek, 1989) bezeichnet. Die Abschätzung des Bereiches, in dem während einer bestimmten Aufgabe und unter spezifischen Reizbedingungen Information aufgenommen werden kann, unterstützt die Zuverlässigkeit, der aus der Analyse von Fixationsdauern abgeleiteten Ergebnisse. Allerdings scheint sich die Größe des Bereiches unter dem Einfluß der Aufgabenanforderungen zu verändern und ist damit selbst ein potentieller Parameter. Außerhalb von Laborsituationen ist das „*functional field of view*“ über die Sakkadenamplitude zu operationalisieren. Bei vielen Aufgaben, etwa beim Autofahren, spielt allerdings nicht allein die foveale Wahrnehmung, die auf scharfem Sehen in einem kleinen Bereich (ca. $1,5^\circ$) des Gesichtsfeldes beruht, eine entscheidende Rolle, sondern auch die periphere Wahrnehmung. Über den Bereich des scharfen Sehens hinaus können besonders neu auftauchende und sich bewegende als auch durch ihre Kontrast zum Hintergrund auffällige Stimuli erkannt werden.

3.3.2 Objektbezogene Fixationsmaße

Zur Analyse des Handlungsvollzuges ist die Identifizierung der fixierten Objekte unumgänglich. Werden beispielsweise Bilder unter zwei verschiedenen Fragestellungen betrachtet, so gibt es kaum Überschneidungen in den Fixationsobjekten (Nodine et al., 1978; Velichkovsky & Hansen, 1996). Die meisten der hier erläuterten Parameter der Augenbewegung können auch auf die fixierten Objekte, Klassen von Objekten oder sogenannte *areas of interest* (AOI) bezogen werden. So ist es üblich, die absolute und relative Häufigkeit der Fixation bestimmter Objekte zu ermitteln. Neben der Häufigkeit wird sehr oft auch die Fixationsdauer bestimmt und daraus die durchschnittliche Fixationsdauer pro Blickobjekt errechnet (Gengenbach, 1999). Auch wenn die Fixationsdauer auf ein Objekt bezogen wird, können die Variation und die Verteilung der Fixationsdauern pro Blickobjekt ermittelt werden.

Moderne bildverarbeitende Verfahren erlauben es, zahlreiche unterschiedliche Darstellungen der Fixationen objektbezogen zu produzieren. In der Geschichte der Augenbewegungsforschung wurden Fixationen meistens als Punkte über die Oberfläche des Bildes dargestellt (z.B. Yarbus, 1967). Gebiete mit größerer Dichte der Punkte wurden als diejenige interpretiert, die mehr Aufmerksamkeit bekommen haben. Die Abbildung 5a zeigt eine moderne Version der Darstellungsweise wobei auch die Fixationsdauer mit einbezogen ist. Die Aufmerksamkeit wird aber nicht auf diskrete geometrische Punkte, sondern auf mehr oder weniger große Regionen gerichtet. Eine der fortgeschrittenen Methoden war die Darstellung der AOI mit Hilfe von Clusteranalyse (Pillaramari et al., 1993). Eine

entsprechende Darstellung wird in Abbildung 5b gezeigt. Aber auch in diesem Fall gibt es psychologische Bedenken, da die AOI nicht unbedingt eine elliptische Form mit scharfen Grenzen haben soll. Velichkovsky, Pomplun und Rieser (1996) schlagen deshalb vor, eine graduelle Funktion als „Aufmerksamkeitslandschaft“ über das gesehene Bild zu definieren. Je höher der Wert dieser Funktion in einem bestimmten Bereich des Bildes ist, desto mehr Aufmerksamkeit wurde dem Bereich gewidmet. Diese Funktion wurde als nach der Fixationsdauer gewichtete, zweidimensionale Gaußsche Verteilung mit dem Zentrum um den Fixationspunkt definiert. Als Standardabweichung dieser Verteilung wurde ein Winkelgrad genommen. Ein Beispiel für eine solche Aufmerksamkeitslandschaft ist in Abbildung 5c zu sehen. Schließlich kann man die auf diese Weise gewonnenen Funktionen als Filter zur Bearbeitung von betrachteten Bildern und Szenen anwenden. Die Ergebnisse dieses Vorgehens sind exemplarisch in Abbildung 5d gezeigt.

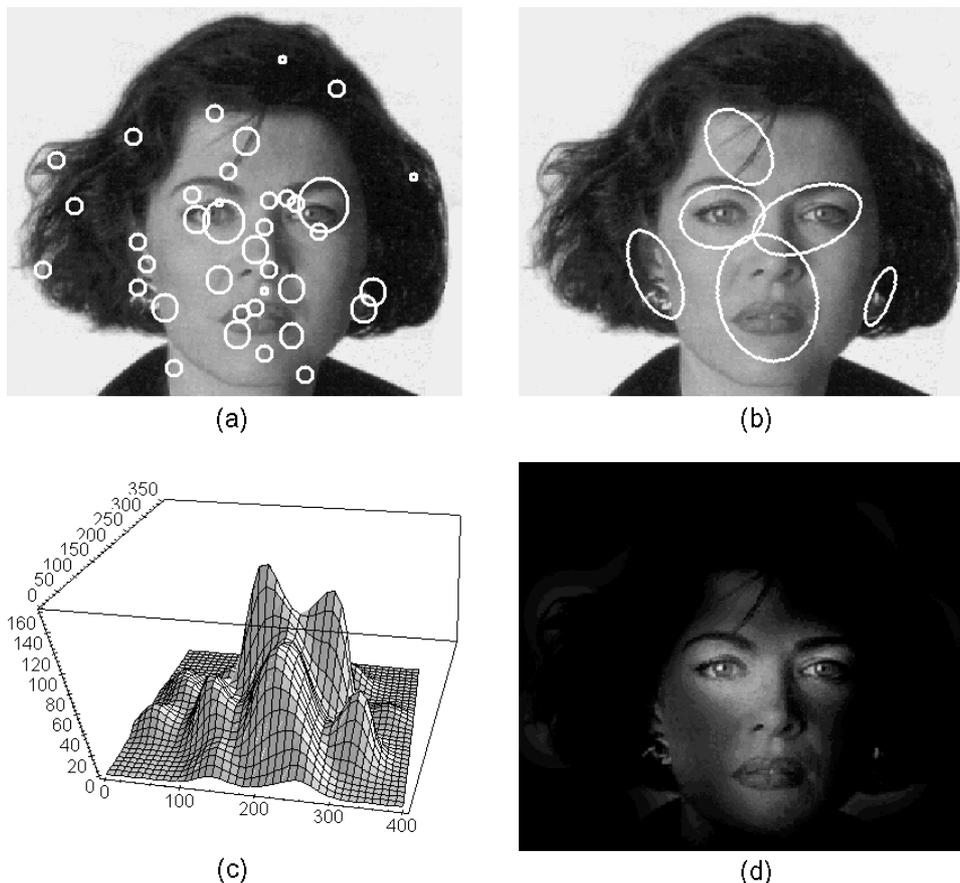


Abb. 5: Verschiedene Arten der Darstellung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung: als Fixationspunkte (a), als Cluster von Fixationen (b), als „Aufmerksamkeitslandschaften“ (c) und als „subjektives Ansicht“ (d) des Bildes (aus Velichkovsky, Pomplun & Rieser, 1996)

In einer weiteren Untersuchung wurden anhand der Aufmerksamkeitslandschaften subjektive Ansichten komplexer Szenen visualisiert und insbesondere die Wahrnehmung von mehrdeutigen Bildern (wie diese von Mauretus Cornelius Escher oder Giuseppe Arcimboldo) disambiguiert (Pomplun et al., 1996). Eine weiterführende Entwicklung ist mit der Trennung von Landschaften für präattentive und attentive Fixationen verbunden (Dornhöfer et al., im Druck).

Die Verweildauer pro Blickobjekt (*gaze duration*) ist die Gesamtsumme der Zeiten, die ein Objekt oder eine Gruppe von Objekten fixiert wird. Die „*first pass gaze duration*“ ist die Summe der Fixationsdauern von der ersten Fixation eines Objektes bis zum ersten Verlassen

des Objektes. Bei Identifizierungsaufgaben wird sie als ein Maß für die Objekterkennung angesehen und reflektiert die semantische Konsistenz des Objektes (Henderson et al., 1997).

3.3.3 Aus den Fixationen und Fixationsdauern abgeleitete Maße

Die Anzahl der Fixationen pro Zeiteinheit ist eine Größe, die ggf. einfacher als die Fixationsdauern zu bestimmen ist. Die Anzahl der Fixationen pro Zeiteinheit, zum Beispiel pro Minute (Casali & Wierwille, 1983), entspricht dem Kehrwert der mittleren Dauer (z. B. in Minuten) zwischen zwei Fixationen. Der Wert umfaßt damit die Fixationsdauer, die Dauer der dazwischen liegenden Sakkaden sowie eventueller weiterer Dauern (Mikrobewegungen, Meßartefakte, etc.).

Fixationsdauern müssen für jede einzelne Fixation bestimmt werden. Üblich ist dann die Bildung des Mittelwertes der Fixationsdauern über entsprechend gewählte Untersuchungsabschnitte. Oftmals wird auch die Streuung bzw. Variation der Fixationsdauern (Lambert, 1976) betrachtet.

Noch mehr Informationen enthält die Verteilung der Fixationsdauern. Dazu werden die Fixationsdauern in Klassen von beispielsweise 100 ms Breite eingeteilt und der prozentuale Anteil der Klasse an der Gesamtzahl der Fixationen aufgetragen. Die Verteilung der Fixationsdauern kann, auch bei identischem Mittelwert, recht unterschiedlich sein. Üblicherweise finden sich linksschiefe Verteilungskurven.

3.4 Wechselspiel von Fixationen und Sakkaden - Blickpfadenanalyse

3.4.1 Elementare Parameter des Blickpfades

Die Suchzeit ist ein Parameter des Blickpfades der insbesondere bei der Evaluation der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen genutzt werden kann. Sie ergibt sich aus der Zeit, die vom Erscheinen eines Stimulus bis zur ersten Fixation auf dem zu findenden Zielobjekt vergeht. Die Suchzeit ist in hohem Maße von der Aufgabe und dem Stimulusmaterial abhängig. Neben der Anordnung sind insbesondere die Kontraste für die Suchzeit mitbestimmend. Als Maß der globalen visuellen Suche wird die Blickpfaddauer (*scanpath duration*) genutzt. Diese ist definiert als die Folge von Fixationen und Sakkaden bis zur Lösung einer bestimmten Aufgabe und kann von weniger als einer Sekunde bis zu mehreren Minuten liegen. Ebenso wie die Suchzeit kann die Blickpfaddauer als Maß für die Angemessenheit einer Mensch-Maschine-Schnittstelle verwendet werden (Goldberg & Kotval, 1998). Ein drittes Maß der zeitlichen Ausprägung des Blickpfades ist das Fixationen-Sakkaden-Verhältnis. Es ergibt sich aus dem Verhältnis der mittleren Fixationsdauer zu der mittleren Sakkadendauer. Da während der Sakkaden keine Information aufgenommen werden kann, gibt das Fixationen-Sakkaden-Verhältnis Aufschluss über den Anteil der betrachteten Gesamtzeit, während derer Informationen aufgenommen werden können.

Als elementarer Parameter der örtlichen Ausprägung des Blickpfades dient die Länge des Blickpfades. Sie ist definiert als die Summe der Distanz zwischen aufeinanderfolgenden Fixationsorten und wird als Maß zur Beschreibung der globalen visuellen Suche interpretiert. Ein möglichst kurzer Blickpfad bis zum gewünschten Ziel wird dabei als günstig angesehen. Ein Maß, welches häufig in der Leseforschung Anwendung findet, sind die Rücksprünge (*regressive movements*), die als Richtungsänderung einer Sakkade von mehr als $\pm 90^\circ$ von der Richtung der vorhergehenden Sakkade definiert sind. Die Anzahl der Rücksprünge innerhalb einer Zeile verringert sich z.B. mit zunehmender Leseerfahrung.

3.4.2 Übergangshäufigkeit

Die Folge, in der die verschiedenen Blickobjekte fixiert werden, liefert Hinweise auf die sequentiellen Informationserfordernisse zur Ausführung der aktuellen Aufgabe und die dahinter liegenden steuernden Prozesse. Es bietet sich an, eine Übergangsmatrix zu erstellen, in der die Wahrscheinlichkeiten eingetragen sind, mit der von einem Blickgebiet in ein anderes gewechselt wird. Liegt dem Blickverhalten eine Strategie zugrunde, so zeigt sich in der Übergangsmatrix eine von dieser ermittelten Wahrscheinlichkeit abweichende Häufigkeit des Blickwechsels zwischen verschiedenen definierten Gebieten.

Ellis und Stark (1986) unterscheiden drei essentiell unterschiedliche Muster der Fixationsübergänge zwischen den anwesenden Sehobjekten:

Random (zufällig): Jedes Blickgebiet hat die gleiche Chance fixiert zu werden. Die Übergangshäufigkeiten zwischen allen Blickgebieten sind gleich groß.

Stratified Random (gewichtet zufällig): Jedes Blickgebiet wird mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit angeschaut. Die Übergangshäufigkeiten zwischen jeweils zwei Blickgebieten errechnet sich aus diesen jeweiligen Wahrscheinlichkeiten. Ein *stratified random*-Abtastmuster deutet auf einen automatischen, angelernten Prozeß hin.

Statistically Dependent (statistisch abhängig): Der Inhalt des gerade fixierten Blickgebietes bestimmt, welches Blickgebiet als nächstes betrachtet wird. Die Übergangshäufigkeiten zwischen den jeweiligen Blickgebieten sind nicht aus den Fixationshäufigkeiten zu errechnen, sondern müssen empirisch festgestellt werden und lassen sich durch Markov-Prozesse erster oder höherer Ordnung beschreiben. Eine große statistische Abhängigkeit kann als willkürliches Blickverhalten interpretiert werden (Ellis & Smith, 1985, siehe auch Rayner, 1978).

Untersuchungen mit trainierten Piloten, deren Blickverhalten durch die Anwesenheit neuer Instrumente stark beeinflusst werden kann (Harris et al., 1982), weisen auf eine Umschaltung von einem *stratified random* auf ein *statistically dependent* Muster des Abtastens der Umgebung hin.

3.4.3 Markov Matrizen

Eine Markov Matrix nullter Ordnung enthält für jedes Blickobjekt bzw. Blickgebiet den prozentualen Anteil an der Gesamtzahl der Fixationen. Eine Markov Matrix erster Ordnung enthält die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von einem zu einem anderen Blickgebiet und entspricht somit der Übergangsmatrix (siehe 3.4.2). Eine Markov Matrix zweiter Ordnung entspricht einer dreidimensionalen Matrix und enthält die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von einem Blickgebiet zu einem anderen in Abhängigkeit von dem vorletztem Blickgebiet. Obwohl theoretisch Markov Matrizen beliebiger Ordnung denkbar sind werden im Bereich der Blickbewegungsanalyse allerdings kaum Matrizen höher als die zweiter Ordnung benutzt. Liu (1999) verwendete beispielsweise Markov Matrizen zur Identifizierung des „typischen“ Blickverhaltens in einer Fahrsimulationsaufgabe. Indem die höchsten Übergangswahrscheinlichkeiten in jeder Zeile einer Markov Matrix betrachtet werden lässt sich die Sequenz von Fixationen feststellen, die die höchste Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Blickgebiet aufweist. So zeigte sich z.B. auf geraden Straßenstücken ein vorausschauendes und ein „Seite-zu-Seite“-schauendes Blickmuster, wohingegen in einer Kurve zwar ein „Seite-zu-Seite“-schauendes Blickmuster festgestellt werden konnte, jedoch kein vorausschauendes.

Auch bei dem Einsatz von Blickbewegungen als Interaktionsmittel mit einem Rechner kann eine Analyse der Folgen von Fixationen mittels Markov-Modellen hilfreich sein, um daraus

auf die kognitiven Modelle des Nutzers und insbesondere auf die intendierte Handlung zu schließen (Salvucci, 1999).

3.5 Ausblick

Bei den vorgestellten Parametern der Augen- und Blickbewegungen handelt es sich im weitesten Sinne um psychophysiologische Größen. Hockey et al. (1986) führen an, daß die Interpretation psychophysiologischer Daten oft widersprüchlich ist. Hilfreich bei der Auflösung dieser Widersprüche kann nach den Autoren die Unterscheidung sein, ob es sich bei der gemessenen Größe um eine tonische oder um eine phasische Messung handelt, ob also ein über längere Zeiträume anhaltender Zustand oder ein durch ein diskretes Ereignis ausgelöster Prozess beobachtet wurde. Ebenso wichtig ist die zwischen einer Manifestation eines physiologischen Prozesses und einem Korrelat dieses Prozesses. Zur Verdeutlichung: Wird das EMG eines an einer offensichtlichen motorischen Reaktion beteiligten Muskels aufgezeichnet, handelt es sich hierbei um die Manifestation dieses Prozesses. Wird hingegen die elektrodermale Aktivität zur Beschreibung von Aktivierung aufgezeichnet, handelt es sich um ein Korrelat, da nicht angenommen wird, daß Aktivierung in den Hautdrüsen implementiert ist.

Ohne das Kontextwissen bezüglich des Einsatzes kann eine Klassifizierung der vorgestellten Parameter der Augenmotorik nach den beiden Dimensionen tonisch vs. phasisch und Manifestation vs. Korrelat allerdings nicht allgemeingültig und vollständig gelingen. Es bedarf somit jeweils einer Theorie über die Interpretation der Parameter der Augenmotorik und deren Ausprägungen.

4. Technologische Anwendungen der Augenbewegungsforschung

Nachdem in den drei vorausgegangenen Abschnitten die Arten von Blickbewegungen, ihre Erfassung und ihre psychologische Bedeutung behandelt wurden, sollen im folgenden Abschnitt einige moderne Tendenzen der technologischen Umsetzung dieser Methoden exemplarisch dargestellt werden.

4.1 Blickbewegungen zur Kontrolle von Benutzerschnittstellen

Die erste und offensichtlichste Anwendung von Blickbewegungsdaten ist die sogenannte „Augenmaus“ bzw. „Blickmaus“. Vorausgegangene Versuche zur Erprobung waren nicht sehr erfolgreich, da diese nicht in der Lage waren den Unterschied zwischen Augenbewegungen und Aufmerksamkeit zu unterscheiden. Mittlerweile macht eine Einbindung von temporalen Filtern den Einsatz von Augenbewegungen zur Steuerung virtueller Tastaturen und zur Bedienung von graphischen Benutzeroberflächen praktisch fehlerfrei möglich (Velichkovsky et al., 1997). Die Filter bilden dabei Cluster aus einzelnen Fixationen. Die Schwelle die zur Filterung von kommunikativen Fixationen verwendet wird, beträgt in den meisten Fällen 500 ms. Im allgemeinen verkürzt eine solche Augenmaus die Selektionszeit. Ein verbreitetes Anwendungsgebiet sind Bereiche, in denen es schwierig oder unmöglich, sein Hände zu benutzen, wie dies z.B. bei Menschen mit entsprechenden Behinderungen der Fall ist. In solchen Fällen kann die „Augenmaus“ dazu benutzt werden, unterschiedliche elektronische Medien, wie z.B. Telefon, Fax, e-mail oder Sprachgeneratoren zu steuern. Über 200 Augenbewegungsmesssysteme wurden 1999 weltweit für diese Zwecke eingesetzt.

Im Gegensatz zu einer manuell gesteuerten Computer-Maus benötigt eine „Augenmaus“ keine explizite visuelle Rückmeldung. Um einen hohen Grad an Zuverlässigkeit zu erreichen

wird jedoch empfohlen, eine visuelle Rückmeldung zu geben. Abbildung 6 zeigt eine Realisierung dieser Idee in Form eines sogenannten „Eyecons“.



Abb. 6: Bildersequenz einer „Eyecon“- Schaltfläche

Fixiert ein Nutzer eine virtuelle Schaltfläche, so läuft eine 500 ms dauernde Bildersequenz ab und ermöglicht damit dem Nutzer die begonnene Aktivierung der Schaltfläche abzubrechen, noch bevor das virtuelle Auge geschlossen wird. Zusätzlich leitet die Animation die Aufmerksamkeit des Nutzers auf einen präzisen Ort, was dem System ermöglicht sich bei jedem virtuellen Knopfdruck zu rekalisieren. In einer Studie (siehe Velichkovsky & Hansen, 1996) zur Akzeptanz des „Eyecon“- Systems ergaben sich durchweg positive Reaktionen. Mehr als 95% der Benutzer bezeichneten das System als „aufregend“ und 70% glaubten, daß „die Blickbewegungsregistrierung in Zukunft eine alltägliche Sache“ sein wird.

Ein anderer Ansatz der blickbewegungsgesteuerten Interaktion entsteht, wenn man die Blickbewegungsdaten auf einer höheren semantischen Ebene interpretiert und in einer neuen Art von „noncommand“ Multimedia-Anwendungen benutzt. Diese registriert fortlaufend die Aufmerksamkeit, die auf individuelle Objekte auf dem Bildschirm gerichtet ist. (siehe z.B. Nielsen, 1993; Starker, Bolt, 1990). Diese Art der „noncommand“ Interaktionen werden auch als „Interessen- und Emotionssensitive Medien“ bezeichnet.

Die Möglichkeit der Kopplung von Messungen der Augenbewegungen mit der Darstellung des Stimulusmaterials erlaubt dem Nutzer, einen quasi-passiven Einfluss auf die Steuerung elektronischer Medien auszuüben. Dies kann erreicht werden durch die Erfassung 1) der Nutzerinteressen mit Hilfe der Detektierung von AOI, d.h. Gebieten mit hoher Aufmerksamkeitszuwendung und 2) der emotionalen Reaktionen, die sich aus der Lidschlagfrequenz und den Veränderungen der Pupillengröße ableiten lassen (Hansen, Andersen, Roed, 1995; Velichkovsky, 1995). Natürlich sind aber auch Hybrid-Lösungen als eine Kombination aus „command“ und „noncommand“ Prinzipien denkbar.

4.2 Eine neue Generation von Kommunikationshilfsmitteln

Bei Telekommunikation und Telearbeit ist es von Bedeutung, nicht nur zu wissen wer mit wem kommuniziert, sondern auch, wer woran arbeitet. Eine der bekanntesten Nutzungsprobleme herkömmlicher Telekommunikations- und Telearbeitsumgebungen ist die (mangelnde) Unterstützung, um diesen Fokus gemeinsamer Aufmerksamkeit, *Joint Attention*, zu repräsentieren (Vgl. Velichkovsky, 1995). Dieser Mangel führte mittlerweile dazu, dass innerhalb der Mensch-Computer-Interaktionsforschung und der Forschung auf dem Gebiet der Computer-unterstützten kooperativen Arbeit Aspekte der *Aufmerksamkeit* ein großes Interesse erfahren haben. Die dabei vorgeschlagenen Lösungen erfordern jedoch häufig explizites Kommunikationsfluss-Management, was bisher den Erfolg solcher Lösungsvorschläge erheblich schmälerte.

Visuelle Aufmerksamkeit im Speziellen ist ein wichtiges Element des allgemeinen Aufmerksamkeitszustandes eines Nutzers. Die Blickrichtung ist dabei der einzige reliable Indikator, um den Ort der visuellen Aufmerksamkeit bestimmen zu können. Die Erstellung

blickrichtungssensitiver Systeme gestaltete sich bislang aufgrund mangelnder Erfassungsapparaturen schwierig. Dies führte zur Konstruktion von komplizierten Systemen mit mehreren Kameras bzw. Systemen die unterschiedliche Eingabegeräte, wie z.B. die Computer-Maus als sensorischen Ersatzkanal zur Erfassung der visuellen Aufmerksamkeit einsetzen. Mit der Entwicklung neuer Blickbewegungserfassungssysteme (s.o.) ist es jedoch möglich geworden, die Blickrichtung reliabel zu erfassen und diese Daten zur Erfassung der Loci geteilter Aufmerksamkeit zu nutzen. Eine Realisation stellt beispielsweise das „GAZE Groupware System“ (Vertegaal, Velichkovsky & Van der Veer, 1997; Vertegaal, 1998) dar.

Das prototypische GAZE-System wurde als Konferenz- und Kooperationssystem für mehrere Teilnehmer entworfen. In dem GAZE-System wird die Metapher eines dreidimensionalen Konferenzraums angewandt, in dem die Teilnehmer auf dreidimensionalen Darstellungsflächen repräsentiert sind (siehe Abbildung 7). An allen Knotenpunkten des System rotieren diese Flächen in Abhängigkeit von der Blickrichtung jeder Teilnehmer. Die Möglichkeiten wie die Teilnehmer auf den Flächen repräsentiert sein können reicht von Standbildern mit Audio bis zu vollbewegter Videodarstellung. Farbige Lichtpunkte auf einem virtuellen Konferenztisch und auf gemeinsam zu bearbeitenden Dokumenten indizieren den visuellen Aufmerksamkeitsfokus der Teilnehmer und erlauben es, die Zustände der *Joint Attention* zu unterstützen.

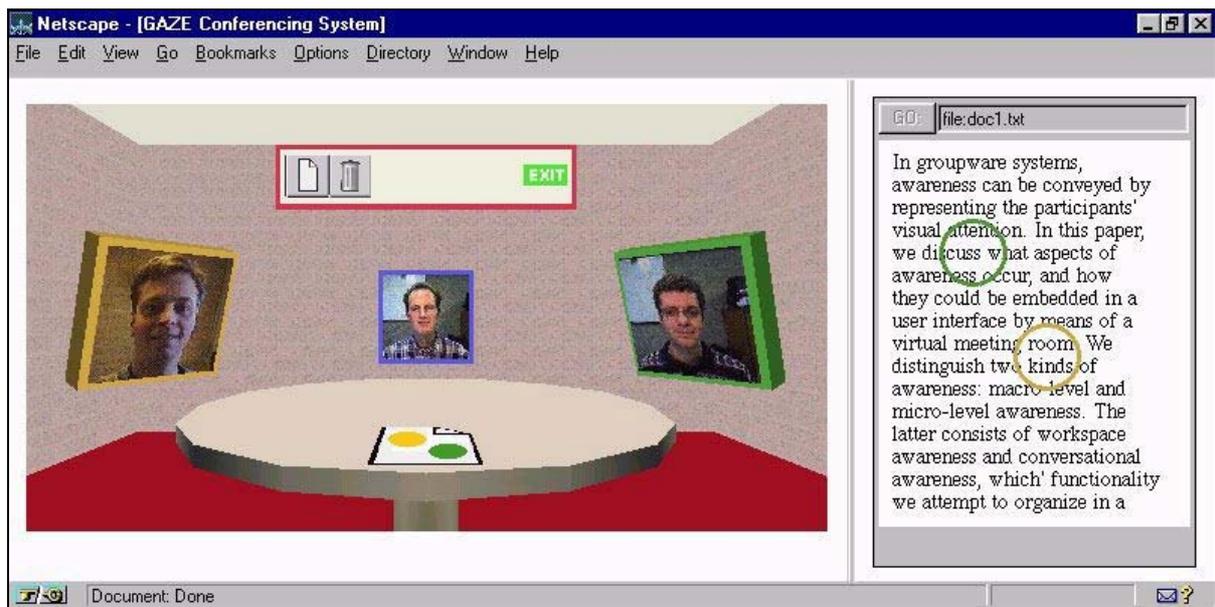


Abb. 7: Der virtuelle Konferenzraum des GAZE-Systems: Für eine Identifikation der Zugehörigkeit der Fixation wird eine zusätzlich Farbkodierung benutzt (nach Vertegaal, Velichkovsky & Van der Veer, 1997)

Die Implementierung des Gaze-Systems basiert auf der Virtual Room Modelling Language (VRML) und benutzt JAVA zur Steuerung. Zur Blickrichtungsregistrierung verwendet man im GAZE-System eine berührungslose Methode, die Blickkoordinaten in Echtzeit liefert - wobei eine relativ niedrige zeitliche und räumliche Auflösung der Methode völlig ausreichend ist (siehe Abbildung 8).



Abb. 8: Das berührungslose Blickerfassungssystem von GAZE Groupware-System (Firma LC Technologies)

Beim GAZE-System wird der Kommunikationsfluß in Abhängigkeit von der visuellen Aufmerksamkeit gesteuert. Die visuelle Aufmerksamkeit wird dabei über verschiedene Eingabemöglichkeiten erfaßt, die von der Computer-Maus bis zum Blickregistrierungssystem reichen können. Der Schwerpunkt des Systems liegt auf der Entwicklung von computervermittelten Interaktionsstilen und der Repräsentation von Aufmerksamkeit im Kontext unterschiedlicher Interaktionsmodalitäten wie z.B. Video-Kommunikation, Audio-Kommunikation, Text-Kommunikation und der gemeinsamen Bearbeitung von Dokumenten.

Auch auf psychologischen Idee von *Joint Attention* basierend, ist das „GazeToTalk“- System von Chino, Fukai und Suzuki (2000) entwickelt. Die *Joint Attention*-Zustände sollen hier aber nicht zwischen menschlichen Teilnehmern der Kommunikation entstehen, sondern zwischen Menschen und einem anthropomorphen Agenten. Es ist eine neue Mensch-Maschine Schnittstelle, die Blickbewegungserfassung, Spracherkennung und animierte menschenähnliche Agenten integriert. Das System interpretiert akustische Eingaben, sowie nonverbale Botschaften und reagiert mit einem anthropomorphen Agenten darauf. Diese multimodale Schnittstelle simuliert insofern meta-kommunikative Fähigkeiten, als daß es die Blickrichtung des Nutzers interpretiert.

Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Spracherkennungssystemen liegt darin, daß das System durch die Berücksichtigung der Blickrichtung rudimentär zu einem Cocktail-Party-Effekt fähig ist, d.h. in der Lage ist, zwischen der an das System gerichteten Sprache und Rauschen zu unterscheiden. Die innovative Komponente des Systems gewährleistet zudem, daß dem Nutzer die Bereitschaft zur Entgegennahme der Spracheingabe rückgemeldet wird, wenn das System zuvor anhand der Fixation durch den Nutzer dessen Kommunikationsbereitschaft erkannt hat. Im einzelnen funktioniert das System dabei nach folgendem Regelkreis: Das System wartet, bis der Nutzer den Agenten fixiert. Nach einer kurzen Phase der Fixation wechselt der Agent seine Gestalt, um Aufnahmebereitschaft zu signalisieren. Wenn der Nutzer die Spracheingabe beginnt, signalisiert der Agent dem Nutzer durch Kopfnicken, dass die Sprache interpretiert wird. Wendet der Nutzer seinen Blick vom Agenten, so wird die Spracherkennung unterbrochen und der Agent kehrt in seinen, auf Blickkontakt wartenden, Ausgangszustand zurück.

4.3 Intelligente on-line Hilfen

Bei der Darstellung von Blickmaus und den auf Verwendung von Augenbewegungsdaten basierenden Formen der Mensch-Computer-Interaktion haben wir auf die Möglichkeit hingewiesen, diese Interaktion implizit zu führen, ohne auf explizite Entscheidungen und

entsprechende Anweisungen seitens des Benutzers zurückzugreifen. Insoweit moderne Meßsysteme und psychologische Augenbewegungsforschung zuverlässige Daten über Absichten und psychologische Zustände des Menschen liefern, können diese Parameter zur intelligenten Unterstützung von Menschen-Maschine-Schnittstellen verwendet werden. Ein wichtiger Ansatz wird z.B. unter dem Namen „What human eye tells the car’s brain“ geführt (Liu, 1999). Bei diesem Ansatz werden bei Fahrern on-line Blickpfade diagnostiziert die z.B. auf eine Überholabsicht hindeuten. Die Ergebnisse der Analyse werden dann zur Adaptation von Maschinenfunktionen benutzt – in diesem Fall zur vorübergehenden Abschaltung von Systemen die den Abstand des Fahrzeuges zu vorausfahrenden Fahrzeugen sichern.

Wir wollen in diesem Abschnitt uns auf die Beschreibung eines System konzentrieren, das versucht, in hohem Masse psycholinguistisches Wissen einzusetzen. Das „iDict“- System von Hyrskykari et al. (2000) nutzt Augenbewegungsdaten, um den Anwender bei Übersetzungsaufgaben zu unterstützen. Da diese Daten aufgrund der physiologischen Eigenschaften der Augen, sowie Messfehlern bei der Blickdatenerfassung, oft fehlerbehaftet sind, integriert das System drei weitere Informationsquellen zur Disambiguierung der registrierten Daten. Dies sind zum einen Erkenntnisse, die aus der Leseforschung stammen, lexikalische und syntaktische Sprachanalyse des zu übersetzenden Textes, sowie benutzerspezifische Profile über die lesespezifischen Charakteristiken des Nutzers.

Die „iDict“ Übersetzungshilfe verfolgt die Blickbewegungen eines Nutzers, um Rückschlüsse über Nutzung und Angemessenheit von Hilfen beim Lesen eines Fremdsprachentextes zu ziehen. Das Grundprinzip besteht darin die natürlichen Augenbewegungen des Lesenden zu analysieren, ohne dass der Anwender spezielle Augenbewegungen ausführen müsste. Im „iDict“ Prototyp ist der zu übersetzende Text Englisch und die Zielsprache Finnisch, Deutsch oder Italienisch. Die Hilfe, die das System bietet, besteht darin, daß bei erkannten Problemstellen ein „*tooltip*“ erscheint mit der, aus der lexikalisch-syntaktischen Analyse sich ergebenden, besten Übersetzung. Der „*tooltip*“ schließt sich dann wieder, wenn der Anwender seinen Blick von der Problemstelle abwendet. Um die jeweils beste Hilfestellung zu geben, greift „iDict“ auf Wissensdatenbanken zu, die einerseits aus einer lexikalisch-syntaktischen Textanalyse und andererseits aus nutzerspezifischen adaptiven Lesecharakteristika bestehen.

5. Zusammenfassung

Das Kapitel gibt einen systematischen Überblick über die verschiedenen Arten der Augenbewegungen und methodischen Ansätze sowie Geräte, die zur Registrierung dieser Bewegungen verwendet werden können. Ausführlich werden die für psychologische Forschung und Praxis relevanten Parameter der Sakkaden, Fixationen und Blickpfade diskutiert. Exemplarisch wird auch eine Reihe von modernen technologischen Anwendungen der Augenbewegungsforschung beschrieben. Diese Anwendungen liegen auf Gebieten der Mensch-Computer-Interaktion, computer-unterstützter Mensch-Mensch-Kommunikation, anthropomorphen Agententechnologien und intelligenten Hilfesystemen.

Literatur

- Alexandridis, E. (1985).** *The pupil*. Berlin/NY: Springer.
- Anastasopoulos, D., Kimmig, H., Mergner, T. & Psilas, K. (1996).** Abnormalities of ocularmotility in myotonic dystrophy. *Brain*, 119 (6), December 1996.
- Anliker, J. (1976).** Eye Movements: On-Line Measurement, Analysis, and Control. In R.A.Monty & J.W. Senders (eds.). *Eye Movements and Psychological Processes*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Balota, D.A., Pollatsek, A. & Rayner, K. (1985).** The Interaction of Contextual Constraints and Parafoveal Information in Reading. *Cognitive Psychology*, 17, 364-390.
- Becker, W. (1991).** Saccades. In R.H.S. Carpenter (Ed.). *Eye Movements*. In J. Cronly-Dillon (Ed.), *Vision and Visual Dysfunction*, Vol. 8. Basingstoke, Hampshire: MacMillan Press.
- Boff, K.R. & Lincoln, J.E. (1988).** *Engineering data compendium – Human perception and performance*. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Airforce Base, Ohio.
- Bruce, V. & Green, P.R. (1990).** *Visual perception – Physiology, psychology and ecology*. 2nd Edition. Hove: Lawrence Erlbaum.
- Buswell, G. T. (1920).** *An experimental study of the Eye-Voice Span in reading*. Chicago. Supplementary Educational Monographs, 17.
- Carpenter, R.H.S. (1988).** *Movements of the eyes*. 2nd Edition. London: Pion Limited.
- Carpenter, P.A. & Just, M.A. (1978).** Eye fixation during mental rotation. In J.W. Senders, D.F. Fisher & R.A. Monty (eds.), *Eye movements and the higher psychological functions* (115-133). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Casali, J.G. & Wierwille, W.W. (1983).** A comparison of rating scale, secondary-task, physiological and primary-task workload estimation techniques in a simulated flight task emphasizing communications load. *Human Factors*, 25, 623-641.
- Ceder, A. (1977).** Drivers' eye movements as related to attention in simulated traffic flow conditions. *Human Factors*, 19 (6), 571-581.
- Chekaluk, E. & Llewellyn, K.R. (1994).** Masking effects in saccadic eye movements. In G.d'Ydewalle & J. Van Rensbergen (Eds.). *Visual and oculomotor functions –Advances in eye movement research*. Amsterdam: Elsevier.
- Chino, T., Fukui K. & Suzuki, K. (2000).** "GazeToTalk": A nonverbal interface with meta-communication facility. In *Proceedings of the International Conference Eye Tracking Research & Applications Symposium*, Palm Beach Gardens, FL, November 6-8, 2000, ACM Press.
- Clarke, A.H. (1996).** Current trends in eye movement measurement techniques. In W.H.Zangemeister, H.S. Stiehl & C. Freksa (eds.). *Visual attention and cognition*. Amsterdam: Elsevier.
- Crane, H.D. & Steele, C.M. (1978).** Accurate three-dimensional eyetracker. *Applied Optics*, Vol. 17 (5), S. 691-705.
- Day, M.E. (1964).** An eye-movement phenomenon relating to attention, thought and anxiety. *Perceptual and Motor Skills*, 19, 443-446.
- Deubel, H. (1998).** Die Rolle der visuellen Aufmerksamkeit bei der Selektion von Blickbewegungszielen. In H.H. Bülthoff, M. Fahle, K.R. Gegenfurtner & H.A. Mallot (Hrsg), *Visuelle Wahrnehmung: Beiträge zur 1.Tübinger Wahrnehmungskonferenz, Konferenzproceedings*. Kirchentellinsfurt: Knirsch.
- Dodge, R. (1900).** Visual perception during eye movement. *Psychological Review*, 7, 454-465.
- Dornhoefer, S., Pannasch, S., Velichkovsky, B.M. & Unema, P. (in press).** "Attentional landscapes" and phasic changes of fixation duration in picture perception. *Perception*.

- Ellis, S.R. & Smith, J.D. (1985).** Patterns of statistical dependency in visual scanning. In R. Groner, G.W. McConkie & C. Menz (eds.). *Eye movements and human information processing*. Amsterdam: Elsevier.
- Ellis, S.R. & Stark, L. (1986).** Statistical dependency in visual scanning. *Human Factors*, 28(4), 421-438.
- Findlay, J.M. & Walker, R. (1999).** A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 661-721.
- Fischer, B. (1990).** Neurophysiologische Grundlagen willkürlicher zielgerichteter Blicksprünge. In H. Mühlendyck & W. Rüssmann (Hrsg.). *Augenbewegungen und visuelle Wahrnehmung*. Stuttgart: Enke.
- Franke, J.-A. (1995).** *Analyse eines videobasierten Verfahrens zur kontaktfreien Registrierung der Blickrichtung*. Unveröffentlichte Studienarbeit, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Technische Universität Berlin.
- Galley, N. (1989).** Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de)activation. A review and some speculations. *Journal of Psychophysiology*, Vol. 3, 229-244.
- Galley, N. (2001).** Physiologische Grundlagen und Meßmethoden der okulomotorischen Aktivität. In F. Rösler (Hrsg.), *Grundlagen und Methoden der Psychophysiologie. Enzyklopädie der Psychologie, Serie Biologische Psychologie. Band 4*. Göttingen: Hogrefe.
- Gengenbach, R. (1999).** Blickerfassung im Kraftfahrzeug – Ein Anwendungsbeispiel für das Blicherfassungssystem JANUS. In M. Rötting & K.Seifert (Hrsg.). *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik*. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Gerathewohl, S.J., Brown, E.L., Burke, J.E., Kimball, K.A., Lowe, W.F. & Strackhouse, S.P. (1978).** Inflight measurement of pilot workload: A panel discussion. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 810-822.
- Gippenreiter, J.B. (1978).** *Dvizhenija chelovecheskogo glaza*. Moscow: Moscow University Press.
- Goldberg, J.H. & Kotval, X.P. (1998).** Eye movement-based evaluation of the computer interface. In S.K. Kumar (ed.). *Advances in occupational ergonomics and safety*. Amsterdam: IOS Press.
- Grüsser, O.-J. & Grüsser-Cornehls, U. (1990).** Gesichtssinn. In R.F. Schmidt & G. Thews (Hrsg.). *Physiologie des Menschen*. 24. Aufl., Berlin: Springer.
- Haberich, F.J. & Fischer, M.H. (1958).** Die Bedeutung des Lidschlags für das Sehen beim Umherblicken. *Pflügers Archiv*, 267, 626-635.
- Hansen, J.P., Andersen, A.W. and Roed, P. (1995).** Eye-gaze control of multimedia systems. In Y.Anzai, K.Ogawa and H.Mori (eds.). *Symbiosis of human and artifact. Proceedings of the 6th international conference on human computer interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Harris, R.L., Tole, J.R., Ephrath, A.R. & Stephens, A.T. (1982).** How a new instrument affects pilots' mental workload. In *Proceedings of the Human Factors Society – 26th Annual Meeting*.
- Helmholtz, H. von (1910).** *Handbuch der Physiologischen Optik. Dritter Band, Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen*. 3. Aufl. Hamburg & Leipzig: Voss.
- Henderson, J.M. & Hollingworth, A. (1998).** Eye movements during scene viewing. In G. Underwood (ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*. Amsterdam: Elsevier.
- Henderson, J.M., McClure, K., Pierce, S. & Schrock, G. (1997).** Object identification without foveal vision: Evidence from an artificial scotoma paradigm. *Perception and Psychophysics*, 59, 323-346.
- Hockey, G. R. J. (1986).** Operator efficiency as function of effects of environmental stress, fatigue and circadian rhythm. In K. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (eds.), *Handbook of perception and human performance, Vol. 2*. NY: John Wiley and Sons.

- Hoffman, J.E. (1999).** Stages of processing in visual search and attention. In B.H. Challis & B.M. Velichkovsky (eds.). *Stratification in cognition and consciousness*. Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins.
- Hornung, J. (1967).** Pupillenbewegung nach einem Sprung der Reizlichtintensität. *Pflügers Archiv*, 296, 39-48.
- Hyrskykari A., Majaranta P., Aaltonen A., Raiha K. J. (2000).** Design issues of iDict: A gaze-assisted translation aid. In *Proceedings of the International Conference Eye Tracking Research & Applications Symposium*, Palm Beach Gardens, FL, November 6-8, 2000, ACM Press.
- Inhoff, A.W. & Radach, R. (1998).** Definition and computation of oculomotor measures in the study of cognition. In G. Underwood (ed.), *Eye guidance in reading and scene perception*. Amsterdam: Elsevier.
- Just M.A. & Carpenter P. (1976).** Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8, 441-480.
- Karsh, R. & Breitenbach, F.W. (1983).** Looking at the amorphous fixation measure. In R. Groner, C. Menz, D.F. Fisher & R.A. Monty (eds.), *Eye movements and psychological functions*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Kinsbourne, M. (1972).** Eye and head turning indicate cerebral lateralization. *Science*, 176,539-541.
- Kolers, P.A. (1976).** Buswell's discoveries. In R.A. Monty & J.W. Senders (eds.), *Eye movements and psychological processes*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lambert, R.H. (1976).** Recent developments in high-speed data processing and unobtrusive monitoring of the eyes. In R.A. Monty & J.W. Senders (eds.), *Eye movement and psychological processes*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Land, M.F. & Furneaux, S. (1997).** The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences*, 382,1231-1239.
- Laurentius, A. (1599).** *A Discourse of the preservation of the sight: of melancholike diseases, of rheumes, and of old age*. Translated by R. Surphlet (Ralph Jackson, London), facsimile edition published by the Shakespeare Association, 1938 (Oxford University Press).
- Lim, L., Rosenbaum, A.L. & Demer, J.L. (1995).** Saccadic velocity analysis in patients with divergence paralysis. *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, 32, 76-81.
- Liu, A. (1999).** Towards predicting driver intentions from patterns of eye fixations. In A. Gale, I.D. Brown, C.M. Haslegrave & S.P. Taylor (Eds.). *Vision in vehicles VII*. Amsterdam: North-Holland.
- Lowenstein, O. & Loewenfeld, I.E. (1969).** The pupil. In H. Davson (ed.), *The eye*. New York: Academic Press.
- Marr, D. (1982).** *Vision*. New York: W.H. Freeman and Company.
- May, J.G., Kennedy, R.S., Williams, M.C., Dunlap, W.P. & Brannan, J.R. (1990).** Eye movement indices of mental workload. *Acta Psychologica*, 75, S. 75-89.
- McConkie, G.W., Underwood, N.R., Zola, D. & Wolverson, G.S. (1985).** Some temporal characteristics of processing during reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 168-186.
- Mickasch, H.D. & Haack, J. (1986).** Blickbewegungsforschung - Einführung in die Physiologischen Grundlagen, Techniken und in die Problem- und Anwendungsbereiche. In L.J. Issing, H.D. Mickasch Haack (Hrsg.), *Blickbewegung und Bildverarbeitung*. Frankfurt am Main/New York: Peter Lang.
- Miura, T. (1986).** Coping with Situational Demands: A Study of Eye Movements and Peripheral Vision Performance. In A.G. Gale, M.H. Freeman, C.M. Haslegrave, P. Smith & S.P. Taylor (eds.), *Vision in vehicles*. Amsterdam: Elsevier.

- Morimoto, C., Koons, D., Amir, A. & Flickner, M. (1998).** Pupil Detection and Tracking Using Multiple Light Sources. *Fifth European Conference on Computer Vision (ECCV '98). Workshop on Advances in Facial Image Analysis and Recognition Techniques.*
- Nielsen, J. (1993).** Noncommand user interfaces. *Communications of the ACM*, 36(4), 83-99.
- Van Opstal, A.J. & Van Gisbergen, J.A. (1987).** Skewness of saccadic velocity profiles: A unifying parameter for normal and slow saccades. *Vision Research*, 27(5), 731-745.
- Oster, P.J. & Stern, J.A. (1980).** Measurement of eye movements - Electrooculography. In I. Martin & P. H. Venables (eds.). *Techniques in psychophysiology*. Chichester: Wiley.
- Pelz, J.B. (1995).** *Visual representation in a natural visuo-motor task*. Doctoral Dissertation, Department of Brain and Cognitive Studies, University of Rochester.
- Pillalamari, R.S., Barnette, B.D., Birkmire, D. (1993).** Cluster: A program for the identification of eye-fixation-cluster characteristics. *Behavioral Research Methods, Instruments, and Computers*, 25,9.
- Pomplun, M., Ritter, H. & Velichkovsky, B.M. (1996).** Disambiguating complex visual information: Towards communication of personal views of a scene. *Perception*, 25(8), 931-948.
- Posner, M.I. (1980).** Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Posner, M.I. (1995).** Attention in cognitive neuroscience. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Posner, M.I., Snyder, C.R.R. & Davidson, B.J. (1980).** Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109, 160-174.
- Rayner, K. (1978).** Eye movements in reading and information processing. *Psychological Bulletin*, 85(3), 618-660.
- Rayner, K. (1982).** Visual selection in reading, picture perception and visual search. In H. Bouma & D.G. Bouwhuis (eds.), *Attention and performance X*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Reeves, A. & Sperling, G. (1986).** Attention gating in short-term visual memory. *Psychological Review*, 93, 180-206.
- Robinson, D.A. (1975).** Oculomotor control signals. In G. Lennerstrand & P. Bach-y-Rita (Eds.). *Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implications*. Oxford: Pergamon Press.
- Rößger, P. (1997).** *Die Entwicklung der Pupillometrie zu einer Methode der Messung mentaler Beanspruchung in der Arbeitswissenschaft*. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Rötting, M. (1999).** Typen und Parameter von Augenbewegungen. In M. Rötting & K. Seifert (Hrsg.). *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik* (1-18). Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Saito, S. (1992).** Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movements? *Ergonomics*, 35, 607-615
- Salvucci, D. D. (1999).** *Mapping eye movements to cognitive processes*. Doctoral Dissertation, Department of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- Sanders, A.F. (1990).** Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information. In E.-J. Stoffels, M.W. Van der Molen & P.J.G. Keuss (eds.), A serial stage vs. continuous flow discussion. *Acta Psychologica*, 74 (1990), 123-167.
- Saupe, I. (1985).** *Blickbewegungen und ihre Messung*. Bericht Nr. 64. Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V., Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Wachtberg-Werthhoven.
- Schandry, R. (1989).** *Lehrbuch Psychophysologie – Körperliche Indikatoren psychischen Geschehens*. 2. Auflage. München & Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Shackel, B. (1967).** Eye movement recording by electro-oculography. In P.H. Venables & I. Martin (eds.). *A manual of psychophysiological methods*. Amsterdam: North Holland.

- Starker, I. and Bolt, R. A. (1990).** A gaze-responsive self-disclosing display. In *CHI'90 Proceedings, ACM Press*.
- Troy, M.E., Chen, S.C. & Stern, J.A. (1972).** Computer analysis of eye movement patterns during visual search. *Aerospace Medicine*, 43, 390-394.
- Stager, P. & Angus, R. (1978).** Locating crash sites in simulated air-to-ground visual search. *Human Factors*, 20 (4), 453-466.
- Unema, P.J.A. (1995).** *Eye movements and mental effort*. Aachen: Shaker.
- Unema, P. & Rötting, M. (1990).** Differences in eye movements and mental workload between experienced and inexperienced motor-vehicle drivers. In D. Brogan (Ed.). *Visual search*. London: Taylor & Francis.
- Velichkovsky, B.M. (1995).** Communicating attention: Gaze position transfer in cooperative problem solving. *Pragmatics and Cognition*, 3(2), 199-222.
- Velichkovsky, B.M. & Hansen, J.P. (1996).** New technological windows into mind: There is more in eyes and brains for human-computer interaction. In *CHI-96: Human factors in computing systems*. New York: ACM Press.
- Velichkovsky, B., Pomplun, M. & Rieser, J. (1996).** Attention and communication: Eye-movement based research paradigms. In W. H. Zangenmeister, H. S Stiehl. & C. Freksa (Hrsg.). *Visual attention and cognition*. Amsterdam: Elsevier.
- Velichkovsky, B., Sprenger, A. & Pomplun, M. (1997).** Auf dem Weg zur Blickmaus: Die Beeinflussung der Fixationsdauer durch kognitive und kommunikative Aufgaben. In R. Liskowsky, B.M. Velichkovsky & W. Wünschmann (Hrsg.). *Usability engineering*. Stuttgart: Teubner.
- Vertegaal, R. (1998).** *Look who's talking to whom. Mediating Joint Attention in multiparty communication and collaboration*. Doctoral Dissertation. Cognitive Ergonomics Department. University of Twente.
- Vertegaal, R., Velichkovsky, B.M. & Van der Veer, G. (1997).** Catching the eye: Management of joint attention in teleconferencing and cooperative work. *ACM SIGCHI Bulletin*, 29(4), 87-92.
- Volkman, F.C., Riggs, L.A. & White, K.D. (1978).** Central and peripheral determinants of saccadic suppression. In J.W. Senders, D.F. Fisher & R.A. Monty (Eds.). *Eye movements and the higher psychological functions* (35-54). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Weber, H. & Fischer, B. (1995).** Gap duration and location of attention focus modulate the occurrence of left/right asymmetries in the saccadic reaction times of human subjects. *Vision Research*, 35, 987-998.
- Wolf, R. & Wolf, D. (1990).** Vom Sehen zur Wahrnehmung: Aus Illusionen entsteht ein Bild. In A. Maelicke (Hrsg.), *Vom Reiz der Sinne*. Weinheim: VCH.
- Yarbus, A.L. (1967).** *Eye movements and vision*. New York: Plenum Press.
- Young, L.R. & Sheena, D. (1975).** Survey of eye movement recording methods. *Behavioral Research Methods & Instrumentation*, Vol. 7 (5), 397-429.
- Zenhausern, R. & Kraemer, M. (1991).** The dual nature of lateral eye movements. *International Journal of Neuroscience*, 56, 169-175.
- Zipp, P. (1988).** *Optimierung der Oberflächenableitung bioelektrischer Signale*. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 17: Biotechnik, Nr. 45. Düsseldorf: VDI Verlag.