



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Seminararbeit

Lennard Hamann

Grundlagen des Eyetrackings

Lennard Hamann  
Grundlagen des Eyetrackings

Seminararbeit eingereicht im Rahmen der Veranstaltung Anwendungen 1  
von Prof. Dr. Kai von Luck  
im Studiengang Master Of Science Informatik  
am Fachbereich Elektrotechnik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Abgegeben am 1. März 2008

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>6</b>
<b>2 Augenbewegungen</b>	<b>8</b>
2.1 Fixationen und Sakkaden . . . . .	8
2.2 Arten von Augenbewegungen . . . . .	8
2.2.1 Reaktion auf die Bewegung des Körpers oder der visuellen Umwelt . .	9
2.2.2 Ausrichtung des Auges auf das Sehobjekt . . . . .	9
2.2.3 Mikrobewegungen des Auges . . . . .	10
<b>3 Techniken zur Augenbewegungsmessung</b>	<b>11</b>
3.1 Subjektive Erfassung der Augenbewegungen . . . . .	13
3.1.1 Direkte Beobachtung . . . . .	13
3.1.2 Retinale Nachbilder . . . . .	13
3.2 Getrennte Erfassung horizontaler und vertikaler Bewegungen . . . . .	13
3.2.1 Kontaktlinsen-Methode . . . . .	14
3.2.2 Elektro-Okulogramm (EOG) . . . . .	14
3.2.3 Limbus-, Pupillen- oder Augenlidregistrierung . . . . .	15
3.3 Videobasierte Erfassung und Bildverarbeitung . . . . .	15
3.3.1 Blickachsenmessung . . . . .	15
3.3.2 Kontaktlinsenmethode (Videobasiert) . . . . .	16
3.3.3 Cornea-Reflex-Methode . . . . .	16
3.3.4 Doppelte Purkinje-Bild-Technik . . . . .	16
3.3.5 'Bright Pupil' . . . . .	17
<b>4 Anwendung von Eyetracking in der Mensch-Maschine-Kommunikation</b>	<b>18</b>
4.1 'Augenmaus' . . . . .	18
4.1.1 'Eyecon' . . . . .	18
4.1.2 'EyePoint' . . . . .	19
4.2 Scrolling . . . . .	19
4.3 Übersetzungs-Hilfe . . . . .	20
4.4 Application switching . . . . .	20

4.5	'Gemeinsame Aufmerksamkeit' . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Probleme</b>	<b>22</b>
5.1	'Midas-Touch'-Problem . . . . .	22
5.2	Sakkaden- und Fixations-Erkennung . . . . .	22
5.3	Auge-Hand-Koordination . . . . .	23
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Simulierte ortsabhängige Auflösung des menschliche Auges . . . . .	9
3.1	Darstellung des Auges ([Joos u. a. 2003]) . . . . .	11
3.2	Entstehung des Corneareflexes und seine Verschiebung bei Rotation des Auges([Joos u. a. 2003]). . . . .	17
4.1	Bildersequenz der 'Eycon'- Schaltfläche [Velichkovsky und Hansen 1996] . .	19
4.2	Ablauf der Selektion bei der 'EyePoint'-Technik [Kumar u. a. 2007] . . . . .	19
4.3	Scrolling mit Unterstützung durch Eyetracking [Kumar und Winograd 2007] .	20
4.4	Der virtuelle Konferenzraum des GAZE-Systems [Vertegaal u. a. 1997] . . .	21

# 1 Einführung

In dieser Arbeit werden die Grundlagen von Eyetracking-Techniken dargestellt. Ein bereits verbreitetes Anwendungsgebiet von Eyetracking-Techniken als Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation sind Bereiche, in denen es schwierig oder unmöglich ist, die Hände zu benutzen, wie dies z.B. bei Menschen mit entsprechenden Behinderungen der Fall ist. In solchen Fällen kann Eyetracking als 'Augenmaus' benutzt werden, um unterschiedliche elektronische Medien, wie z.B. Telefon, Fax, e-mail oder Sprachgeneratoren zu steuern. Für eine zukünftige Verbreitung der 'Augenmaus' als Standard-Eingabegerät sprechen die immer leistungsfähigere und günstigere Hardware, die Verbreitung von Webcams und die Integration von Kameras in Computer/Monitore. Deshalb liegt das besondere Interesse dieser Arbeit bei Techniken, die als Standard-Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation einsetzbar sind. Die Eyetracking-Techniken können im allgemeinen keine existierenden Eingabegeräte ersetzen, aber sie können als zusätzliche Quelle dienen, die Mensch-Maschine-Kommunikation zu vereinfachen. Durch die Kombination und gleichzeitige Nutzung von mehreren Eingabemedien (z.B. Maus, Tastatur, Sprache, Gesten, Blicke, etc.) können Eingaben schneller (z.B. Texteingabe durch Sprache), weniger fehleranfällig (da die Eingabe über mehrere Kanäle redundant erfolgt) und für den Anwender natürlicher erfolgen.

In diesem Kapitel wird einleitend der Begriff Eyetracking erläutert. Im folgenden Kapitel werden die Eigenschaften des menschlichen Auges sowie der Augen- und Blickbewegungen dargestellt, die für das Eyetracking relevant sind. Im anschließenden Kapitel über Eyetracking-Techniken werden Methoden vorgestellt, mit denen Augen- bzw. Blickbewegungen gemessen werden können. Danach werden beispielhaft Arbeiten vorgestellt, in denen die Anwendung von Eyetracking-Techniken als Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation untersucht werden. Abschließend werden hierbei auftretende Probleme erläutert.

Augen- und Blickbewegungen gehören zu den einfachsten physischen Akten des Menschen. Deshalb stehen sie seit vielen Jahrzehnten im Mittelpunkt wissenschaftlicher Arbeit. Viele Experimente, vor allem in der medizinischen und psychologischen Forschung, haben Augenbewegungen in einem sehr eingeschränkten Rahmen untersucht, in denen Probanden auf das Erscheinen eines Stimulus reagieren sollten. Das Auge ist aber nicht nur Sensor,

sondern wird auch aktiv zur Erkundung der Umgebung eingesetzt. Hierbei sind die Augenbewegungen an die laufenden Handlungen der Person gebunden und eilen diesen voraus (etwa eine halbe Sekunde beim Lesen, Musikspielen oder Autofahren [Land und Furneaux 1997]). In [Just und Carpenter 1976] wird gezeigt, daß im allgemeinen ein Zusammenhang zwischen dem Fixationsort und der visuellen Aufmerksamkeit besteht. Die Blickposition ist ein verlässlicher Indikator für die Aufmerksamkeit und Absichten eines Menschen. Auch bei der Nutzung einer graphischen Benutzerschnittstelle fixiert der Anwender eine Schaltfläche, bevor er sie mit einem herkömmlichen Maus-Klick aktiviert. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wird versucht, Augen- und Blickbewegungen als Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation zu nutzen. Die Auswahl von Objekten auf dem Bildschirm durch Blicke ist eine gegenüber der Maus-Benutzung viel natürlichere, effizientere und schneller erlernbare Handlung.

Eyetracking ist das Beobachten von Augenbewegungen oder von Blickbewegungen. Mit dem Begriff Augenbewegungen werden sowohl Bewegungen des Augapfels als auch Lidschluß- und Pupillenmotorik zusammengefaßt [Galley 2001]. Beim Messen von Blickbewegungen werden die Augenbewegungen in Verbindung mit den vom Auge aufgenommenen Informationen interpretiert. Hierfür ist es also notwendig, die Augenbewegungen und den 'Zielort' der Augen, den Fixationspunkt, zu erfassen. Neben der Blickposition (wo sieht der Anwender hin), kann das Eyetracking noch weitere Informationen liefern:

- Fixationsdauer als Indikator für die Tiefe der Verarbeitung
- Pupillengröße als Indikator für die mentale Beanspruchung
- Lidschlagamplitude als Indikator für emotionale Erregung
- 'Scan path' - Auffindbarkeit von Objekten

Das Messen von Augenbewegungen wird vor allem in der medizinischen und psychologischen Forschung und Diagnose eingesetzt, um z.B. Zusammenhänge zwischen Augenbewegungen und Verarbeitungsprozessen im Gehirn zu untersuchen. Die Blickbewegungs-Registrierung findet Anwendung unter anderem in der Werbepsychologie, der Erforschung von Benutzerfreundlichkeit und als Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation.

## 2 Augenbewegungen

In diesem Kapitel werden zunächst kurz die Begriffe Fixation und Sakkade eingeführt. In den daran anschließenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Arten von Augenbewegungen beschrieben.

### 2.1 Fixationen und Sakkaden

Während der Fixationen, bei denen sich das Auge in relativer Ruhe zu einem Sehobjekt befindet und nicht bewußt bewegt wird, werden visuelle Informationen aufgenommen.

Sakkaden sind sehr schnelle und ruckhafte Augenbewegungen, mit denen die Augen bewusst von einem Fixationspunkt zum nächsten bewegt werden. Während einer Sakkade ist das visuelle Wahrnehmungsvermögen drastisch eingeschränkt.

Bei der sogenannten Verfolgung folgt der Blick einem beweglichen Objekt, indem sich Fixationen und Sakkaden abwechseln.

Da sich das Auge nie in absoluter Ruhe befindet und nicht alle Augenbewegungen bewußt vollzogen werden, ist die Unterscheidung von Fixationen und Sakkaden ein Problem der Eyetracking-Techniken (siehe Abschnitt 5).

### 2.2 Arten von Augenbewegungen

In diesem Abschnitt werden die in [Joos u. a. 2003] beschriebenen Arten von Augenbewegungen vorgestellt.

### 2.2.1 Reaktion auf die Bewegung des Körpers oder der visuellen Umwelt

Bei Kopf- und Körperbewegungen dienen vestibuläre Augenbewegungen der anhaltenden Fixierung eines Punktes. Die Kopf- und Körperbewegungen werden durch den Gleichgewichtssinn erfasst und zum okulomotorischen Zentrum weitergeleitet. Bei den vestibulären Augenbewegungen wechseln sich langsame Gleitbewegungen mit schnellen Rückstellbewegungen der Augen ab.

Um das Fixieren eines sich bezüglich des Auges bewegenden Blickobjektes zu ermöglichen, gibt es die sogenannten Folgebewegungen (auch als Verfolgung bezeichnet, siehe Abschnitt 2.1). Nur bewegte Blickobjekte können solche verfolgenden Augenbewegungen auslösen und aufrechterhalten.

### 2.2.2 Ausrichtung des Auges auf das Sehobjekt

Das Blickfeld eines Auges umfasst einen Kegel von etwa  $100^\circ$  [Schandry 1989]. Der Bereich des scharfen Sehens ist mit ca.  $1^\circ$  um den fixierten Blickort deutlich kleiner. Bei einer Abweichung von  $3^\circ$  vom Blickort verringert sich die Sehschärfe um die Hälfte.

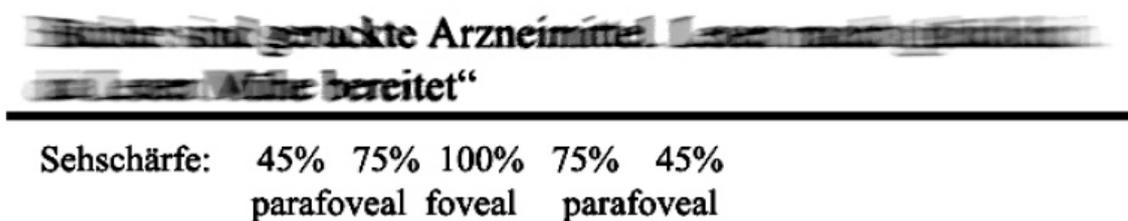


Abbildung 2.1: Simulierte ortsabhängige Auflösung des menschliche Auges

Im Zentrum der Netzhaut (Retina) befindet sich die Zentralgrube (Fovea Centralis). Weil dort die Dichte der lichtempfindlichen Rezeptoren am größten ist, können die Einzelheiten eines betrachteten Objektes besonders gut unterschieden werden. Die Zentralgrube ist die Zone des schärfsten Sehens. Augenbewegungen ermöglichen also scharfes Sehen, indem durch sie alle Bereiche des betrachteten Objektes auf die Zentralgrube gelenkt werden.

In [Joos u. a. 2003] werden drei Fälle von Bewegungen zur Ausrichtung des Auges auf ein Objekt unterschieden:

- Es findet ein Blickwechsel von einem Objekt zu einem anderen statt.

- Das betrachtete Objekt bewegt sich, und die Augen versuchen dieser Bewegung zu folgen.
- Der Körper bzw. der Kopf bewegt sich, und die Augen gleichen diese Bewegungen aus.

Eine weitere Art von Augenbewegungen sind die Vergenzbewegungen, die dazu dienen, Objekte auf der Zentralgrube beider Augen abzubilden. Dies ist notwendig bei einem Blickwechsel zwischen unterschiedlich entfernten Objekten.

### 2.2.3 Mikrobewegungen des Auges

Bei jeder Fixation treten Miniaturbewegungen mit einer geringen Amplitude von unter 10 Winkelminuten auf, die sich in Drift, Tremor und Mikrosakkaden einstufen lassen.

Als Drift wird die langsame Ableitung des Auges vom Fixationsort während der fortdauernden Fixation bezeichnet. Dadurch wird der Rezeptorermüdung, verursacht durch das konstante Bild, entgegengewirkt. Die Drift bewirkt, dass sich die Netzhaut verschiebt und so der Lichtreiz stets auf unterschiedliche Nervenzellen trifft. So wird die Empfindlichkeit gegenüber dem optischen Reiz aufrechterhalten.

Die Mikrosakkaden dienen der Refixierung des betrachteten Objektes nach einer durch Drift verursachten Verschiebung.

Der Tremor verursacht eine Verschiebung der Netzhaut um einen Bereich von 5 bis 10 Sehzellen und ist somit die kleinste Augenbewegung. Ihm wird ebenso wie der Drift die Funktion zugeschrieben, die Nervenzellen mit neuen Reizen zu versorgen.

### 3 Techniken zur Augenbewegungsmessung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Techniken zur Messung von Augenbewegungen basieren auf anatomisch-physiologischen Eigenschaften des Auges, die der Eigen- oder Fremdbeobachtung zugänglich oder technisch erfassbar sind. Es können Eigenschaften der Retina, des Limbus, der Pupille, die elektrische Spannung zwischen Hornhaut und Netzhaut, die Krümmung der Cornea und Reflexionen an verschiedenen markanten Punkten der Augen zur Messung von Augenbewegungen dienen (siehe Abbildung 3.1). Die anatomisch-physiologischen Eigenschaften, die zur Bestimmung der Augenbewegungen dienen, sind mit (A) bis (I) gekennzeichnet.

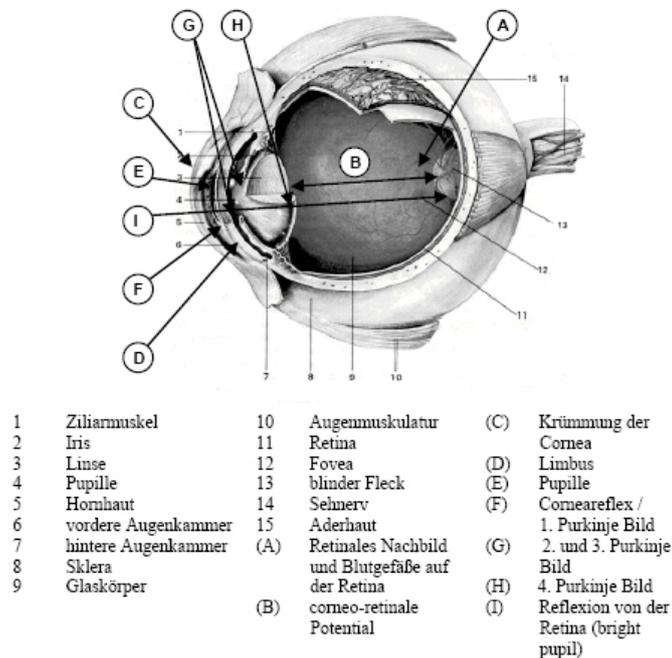


Abbildung 3.1: Darstellung des Auges ([Joos u. a. 2003])

Die Messsysteme lassen sich in kopfbasierte und berührungsfreie Systeme einteilen. Die berührungsfreien Systeme bieten den Vorteil, den Anwender bei der Nutzung nicht zu stören.

Nachteilig ist jedoch, daß nicht ohne weiteres unterschieden werden kann, ob eine Veränderung der Augenposition durch eine Bewegung des Kopfes oder durch eine Augenbewegung ausgelöst wurde. Es existieren verschiedene Methoden zum Ausgleich von Kopfbewegungen:

- Mechanisch bewegliche Komponenten führen die Kamera den Kopfbewegungen des Probanden nach
- Während die Kamera raumfest bleibt, erlauben bewegliche Spiegel ein Nachverfolgen des Auges bei Kopfbewegungen
- Fixed-Camera-Systeme: hat keine mechanisch beweglichen Komponenten; Bewegungsfreiraum wird mittels Bildverarbeitung erreicht

Kopfbasierte System kommen in Hinblick auf die Verwendung des Eyetrackings als Eingabegerät nicht in Betracht, da sie den Anwender zu sehr stören.

Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Messmethoden läßt sich anhand ihrer in zeitlicher und örtlicher Ausprägung beschreibbaren technische Eigenschaften beurteilen. Um brauchbare Daten für das Eyetracking liefern zu können, gibt es besondere Anforderungen an das optische Aufnahmegerät. In Hinblick auf die Verwendung des Eyetrackings als Eingabegerät ergeben sich Echtzeit-Anforderungen an die Hardware.

### **Messbereich**

Der örtliche Messbereich ist der Winkelbereich, in dem die Augenbewegungen gemessen werden. Der zeitliche Messbereich ist der Aufzeichnungsdauer. Diese hängt ab von der Speicherkapazität des Datenträgers und den Trageeigenschaften des Messsystems.

### **Auflösung**

Die örtliche Auflösung ist die kleinste messbare Veränderung der Blickrichtung. Die zeitliche Auflösung ist die Anzahl der Messwerte pro Zeiteinheit.

### **Messgenauigkeit**

Die örtliche Genauigkeit ist die Abweichung des vom Messsystem ermittelten Wertes und der tatsächlichen Augenposition bzw. Blickposition. Die örtliche Genauigkeit kann nicht größer als die örtliche Auflösung sein. Die zeitliche Genauigkeit entspricht dem Zeitabschnitt zwischen der Erfassung einer Augenposition und der Bereitstellung der Messgröße durch das System.

In den folgende Abschnitten werden unterschiedliche Augenbewegungsmessmethoden vorgestellt, unabhängig von ihrer Verwendbarkeit in Bezug auf Eyetracking als Eingabegerät.

## **3.1 Subjektive Erfassung der Augenbewegungen**

Bei den im folgenden dargestellten Techniken werden die Augenbewegungen direkt durch den Versuchsleiter oder durch den Probanden selbst durch Beobachtung registriert.

### **3.1.1 Direkte Beobachtung**

Die technisch einfachste und älteste aber auch sehr ungenaue Methode zur Augenbewegungsmessung die direkte Beobachtung [Laurentius 1938]. Bewegungen ab etwa  $1^\circ$  sind unterscheidbar. Angewendet wird die direkte Beobachtung nach wie vor im medizinischen Bereich.

### **3.1.2 Retinale Nachbilder**

Durch starke Lichtreize werden auf der Netzhaut(Retina) Nachbilder hervorgerufen [Grüsser und Grüsser-Cornehls 1990]. Bewegt sich dabei das Auge, entstehen die Nachbilder an verschiedenen Positionen der Retina. Die Probanden berichten die Positionen der Nachbilder, woraus auf die Augenbewegungen geschlossen wird. Häufig wird dieses relativ ungenaue Verfahren bei medizinischen oder psychologischen Untersuchungen wie zum Beispiel der Gleichgewichtsforschung eingesetzt.

## **3.2 Getrennte Erfassung horizontaler und vertikaler Bewegungen**

Bei den im folgenden beschriebenen Verfahren werden die horizontalen und vertikalen Bewegungen der Augen getrennt erfaßt. Die Messwerte liegen in analoger Form, z. B. als Spannung, vor. Durch die notwendige Analog-Digital-Wandlung (A/D-Wandlung) mit ihrer begrenzten Abtastrate ist die zeitliche Auflösung der Daten gegeben.

### 3.2.1 Kontaktlinsen-Methode

Zu den genauesten Methoden zur Augenbewegungs-Registrierung gehören diejenigen, bei denen dem Probanden Kontaktlinsen angepaßt werden. Diese Methoden sind sehr aufwendig, weil die Kontaktlinsen individuell an die Probanden angepaßt werden müssen, um sicher auf Hornhaut und Sklera zu sitzen und bei schnellen Augenbewegungen nicht zu verrutschen.

Zwei Alternativen der Kontaktlinsen-Methode 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 3.3.2).

Bei der anderen Variante sind an der Kontaktlinse eine oder mehrere kleine Spulen angebracht. Um den Kopf des Probanden sind weitere Spulen angeordnet, die für jede Raumrichtung ein magnetisches Wechselfeld erzeugen. Ändert sich mit einer Augenbewegung auch die Position der Kontaktlinsen im Feld, ändert sich proportional dazu die in die Kontaktlinsen-Spulen induzierte Spannung. Diese Spannung wird dann A/D-gewandelt, in einen Rechner übertragen und weiter verarbeitet. Aus der Variation der induzierten Spannung kann die Augenposition berechnet werden.

### 3.2.2 Elektro-Okulogramm (EOG)

Zwischen Hornhaut (positiver Pol) und Netzhaut (negativer Pol) des Auges gibt es eine Potentialdifferenz von bis zu 20 mV, die durch die mehreren Millionen gleichausgerichteter Rezeptorzellen in der Netzhaut zustande kommt. Bei dem Elektro-Okulogramm werden diese geringen Spannungsdifferenzen erfaßt, indem rechts und links (zur Messung der horizontalen Bewegungen) sowie oberhalb und unterhalb (zur Messung der vertikalen Bewegungen) der Augen Elektroden angebracht werden. Ein Blick nach rechts oben hat zur Folge, dass der rechten und der oberen Elektrode mehr positiv geladene Hornhaut zugewandt wird, was als die entsprechende Blickbewegung interpretiert wird. Mit dem Elektro-Okulogramm können Augenbewegungen größer  $1^\circ$  in einem Winkelbereich von ca.  $30^\circ$  genau gemessen werden [Mickasch und Haack 1986]. Messprobleme ergeben sich 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 die Abtastrate der A/D-Wandlung bestimmt.

### 3.2.3 Limbus-, Pupillen- oder Augenlidregistrierung

Für die kontinuierliche Messung von Augenbewegungen haben sich optisch leicht erkennbare Eigenschaften des Auges bewährt:

- Die Grenzlinie zwischen Augapfel und Iris eignet sich zum Beispiel für die Registrierung horizontaler Bewegungen.
- Das Augenlid folgt den vertikalen Augenbewegungen, so daß dessen Beobachtung Informationen über die Augenbewegungen in vertikaler Richtung liefert.
- Sowohl zur Bestimmung der horizontalen als auch der vertikalen Augenbewegungen kann die Pupille dienen.

Die Registrierung der Bewegung kann in diesen Fällen entweder mittels einer Videokamera und anschließender Auswertung mit einer Bildverarbeitungskarte oder über photoelektrische Registrierung erfolgen. 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 [Carpenter 1988].

## 3.3 Videobasierte Erfassung und Bildverarbeitung

Bei der videobasierten Erfassung von Augenbewegungen 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, die bei den im folgenden vorgestellten Messmethoden unterschiedlich sind, zu extrahieren.

### 3.3.1 Blickachsenmessung

Die Blickachsenmessungs-Methode (Point of Regard Measurement) zur Augenbewegungsregistrierung verwendet einem festen Punkt des Auges und einen Lichtreflex, um auf die Blickachse zu schließen. Üblich ist die Messung der Distanz zwischen Corneareflex und Mittelpunkt der Pupille oder zwischen Lichtreflex auf der Netzhaut und einem charakteristischem Blutgefäß auf der Netzhaut [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.

### 3.3.2 Kontaktlinsenmethode (Videobasiert)

Bei der videobasierten Variante der Kontaktlinsenmethoden wird, ähnlich wie bei der Cornea-Reflex-Methode, 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.

### 3.3.3 Cornea-Reflex-Methode

Da die Oberfläche der Hornhaut (Cornea) glänzend ist, spiegelt sich dort auftreffendes Licht einer punktförmigen Quelle. Dieser Corneareflex scheint etwa 3,5 mm hinter der Augenoberfläche zu liegen. Der Rotationspunkt des Auges befindet sich etwa 13 mm hinter der Oberfläche des Auges und der Radius der Cornea beträgt knapp 8 mm, dementsprechend kommt es bei einer Bewegung des Auges um den Winkel  $s$  in erster Näherung zu einer systematischen Verschiebung des Corneareflexes (siehe Abbildung 3.2).

### 3.3.4 Doppelte Purkinje-Bild-Technik

Einfallende Lichtstrahlen werden an den verschiedenen Oberflächen des Auges gebrochen. Die erste Reflexion entsteht an der Oberfläche der Hornhaut und heißt daher Cornea-Reflex (siehe Abschnitt 3.3.3) oder auch erstes Purkinje-Bild. Das zweite, dritte und vierte Purkinje-Bild entstehen 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. Eine ausführliche Beschreibung des Messprinzips ist in [Crane und Steele 1978] zu finden.

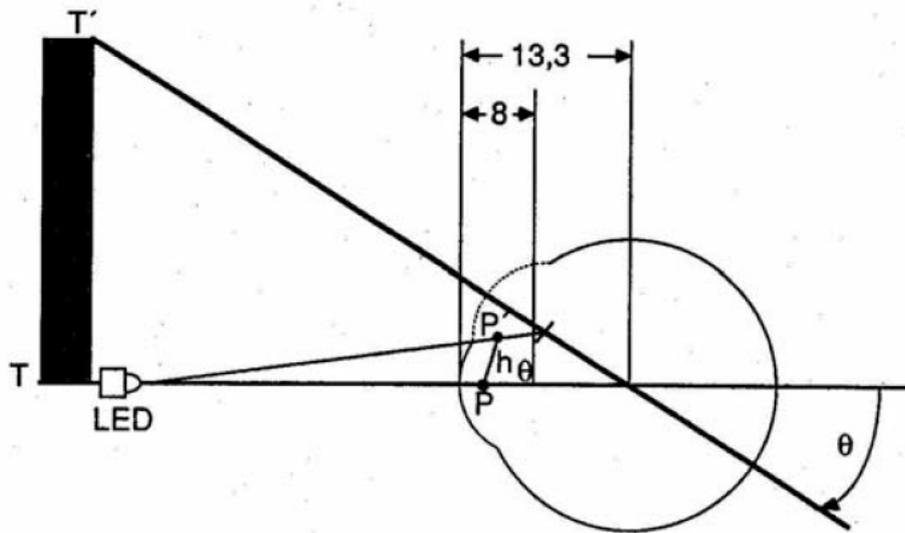


Abbildung 3.2: Entstehung des Corneareflexes und seine Verschiebung bei Rotation des Auges([Joos u. a. 2003]).

### 3.3.5 '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. In [Morimoto u. a. 1998] wird ein kontaktfreies Verfahren vorgestellt, bei dem ein oder auch mehrere Gesichter wechselweise im Takt der Kamerahalbbilder 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 [Joos u. a. 2003].

## 4 Anwendung von Eyetracking in der Mensch-Maschine-Kommunikation

In diesem Kapitel werden verschiedene Anwendungen von Eyetracking-Techniken als Eingabegerät in der Mensch-Maschine-Kommunikation vorgestellt. Bei diesen Anwendungen werden die Eyetracking-Daten mit anderen Eingabegeräten kombiniert. Im abschließenden Abschnitt werden Probleme, die hierbei auftreten und Lösungsansätze aufgezeigt.

### 4.1 'Augenmaus'

Die offensichtlichste Anwendung von Eyetracking als Interaktionsmedium ist die sogenannte 'Augenmaus'. Bevor ein Anwender in einer graphischen Benutzerschnittstelle eine Schaltfläche durch einen Maus-Klick aktiviert, blickt er auf diese Schaltfläche. Es ist also naheliegend eine Technik zu entwickeln, mit der der Anwender nicht durch Maus-Bewegungen, sondern durch Blickbewegungen und Fixationen Schaltflächen, Hyperlinks, etc. auswählen und aktivieren kann. Da es verschiedene Probleme bei der Verwendung von Eyetracking-Daten als Eingabeinformation gibt (siehe Abschnitt 5), wird bei den folgenden beiden Ansätzen die Tastatur als weiteres Eingabemedium verwendet.

#### 4.1.1 'Eyecon'

In [Velichkovsky und Hansen 1996] wird der 'Eyecon'-Ansatz vorgestellt. Fixiert ein Anwender eine Schaltfläche, wird nicht sofort eine Aktion ausgelöst. Stattdessen läuft eine 500ms dauernde Bildersequenz ab (siehe Abbildung 4.1) und ermöglicht damit dem Nutzer die begonnene Aktivierung der Schaltfläche abubrechen, bevor das virtuelle Auge geschlossen wird.



Abbildung 4.1: Bildersequenz der 'Eycon'- Schaltfläche [Velichkovsky und Hansen 1996]

### 4.1.2 'EyePoint'

Ein ähnlicher Ansatz wird in [Kumar u. a. 2007b] beschrieben. Fixiert der Anwender z.B. einen Hyperlink und klickt gleichzeitig einen vorher festgelegten 'Hotkey', wird der fixierte Bereich (in diesem Beispiel der Hyperlink und ein Teil seiner Umgebung) optisch hervorgehoben. Nur wenn der Anwender jetzt den Hyperlink in der hervorgehobenen Ansicht fixiert und dann den 'Hotkey' losläßt, wird der Hyperlink aktiviert.



Abbildung 4.2: Ablauf der Selektion bei der 'EyePoint'-Technik [Kumar u. a. 2007]

## 4.2 Scrolling

Beim Scrolling mit der 'Page Down'-Taste wird eine (Text-) Seite soweit vorgeschoben, das die unterste Zeile am oberen Bildrand erscheint. Wenn der Anwender bis zur letzten Zeile liest und dann die 'Page Down'-Taste benutzt, kann er problemlos am oberen Bildrand seine Leseposition wiederfinden. Da Anwender aber oft die 'Page Down'-Taste bereits betätigen, bevor sie die letzte Zeile lesen, verschwindet die aktuelle Leseposition am oberen Bildrand. In [Kumar und Winograd 2007] wird eine Technik beschrieben, die Eyetracking einsetzt, um das Scrolling ergonomischer zu machen. Hierbei wird ebenfalls Tastatur- und Eyetracking-Einsatz kombiniert. In Abbildung 4.3 ist der Scrolling-Ablauf dargestellt. Der Anwender liest einen Text. Drückt er die 'Page Down'-Taste, wird seine aktuelle Blickposition optisch hervorgehoben. Läßt er die Taste wieder los, wird die Seite soweit vorgeschoben, daß sich die aktuelle Blickposition (immer noch optisch hervorgehoben) am oberen Bildrand befindet und so leicht wiederzufinden ist.

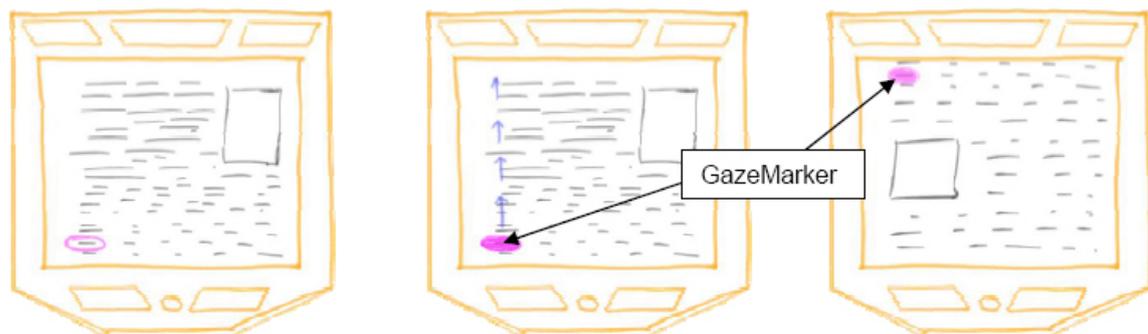


Abbildung 4.3: Scrolling mit Unterstützung durch Eyetracking [Kumar und Winograd 2007]

### 4.3 Übersetzungs-Hilfe

Das 'iDict'- System [Hyrskykari u. a. 2000] nutzt neben Erkenntnissen aus der Leseforschung, der Sprachanalyse und benutzerspezifischen Profilen auch Eyetracking-Daten, um den Anwender bei Übersetzungsaufgaben zu helfen. Das Grundprinzip der 'iDict' Übersetzungs-Hilfe besteht darin, die natürlichen Augenbewegungen des Lesenden zu analysieren, ohne dass der Anwender spezielle Augenbewegungen ausführen müsste. Die Hilfe, die das System bietet, besteht darin, daß bei erkannten Problemstellen (Blickposition bleibt für eine Zeitraum unverändert) 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.

### 4.4 Application switching

In [Kumar u. a. 2007b] wird eine Eyetracking-Anwendung vorgestellt, die ähnliche Ziele verfolgt wie die Exposé-Ansicht in Apples Mac OS X Betriebssystem. Mit ihr soll das Wechseln zwischen mehreren gleichzeitig laufenden Anwendungen vereinfacht werden. Das Halten eines 'Hotkeys' öffnet ein Übersichts-Fenster aller laufenden Anwendungen. Durch einen Blick wird die anzuzeigende Anwendung ausgewählt und durch loslassen des 'Hotkeys' wird das entsprechende Fenster angezeigt.

### 4.5 'Gemeinsame Aufmerksamkeit'

Bei Telekommunikation und Telearbeit ist es von Bedeutung, zu wissen, wer woran arbeitet. Ein Nutzungsproblem herkömmlicher Telekommunikations- und Telearbeitsumgebungen

ist die fehlende Unterstützung, einen Fokus gemeinsamer Aufmerksamkeit darzustellen. Die Blickrichtung zeigt den Ort der visuellen Aufmerksamkeit eines Anwenders an. Hiervon ausgehend wird in [Vertegaal u. a. 1997] mit dem 'GAZE Groupware System' ein Kooperations-system für mehrere Teilnehmer entworfen, das durch Anwendung von Eyetracking-Daten die visuelle Aufmerksamkeit der Benutzer abbilden kann. In dem System wird die Metapher eines dreidimensionalen Konferenzraums angewandt, in dem die Teilnehmer auf dreidimensionalen Darstellungsflächen repräsentiert sind (siehe Abbildung 4.4). Farbige Lichtpunkte auf einem virtuellen Konferenztisch und auf gemeinsam zu bearbeitenden Dokumenten zeigen den visuellen Aufmerksamkeitsfokus der Anwender an.

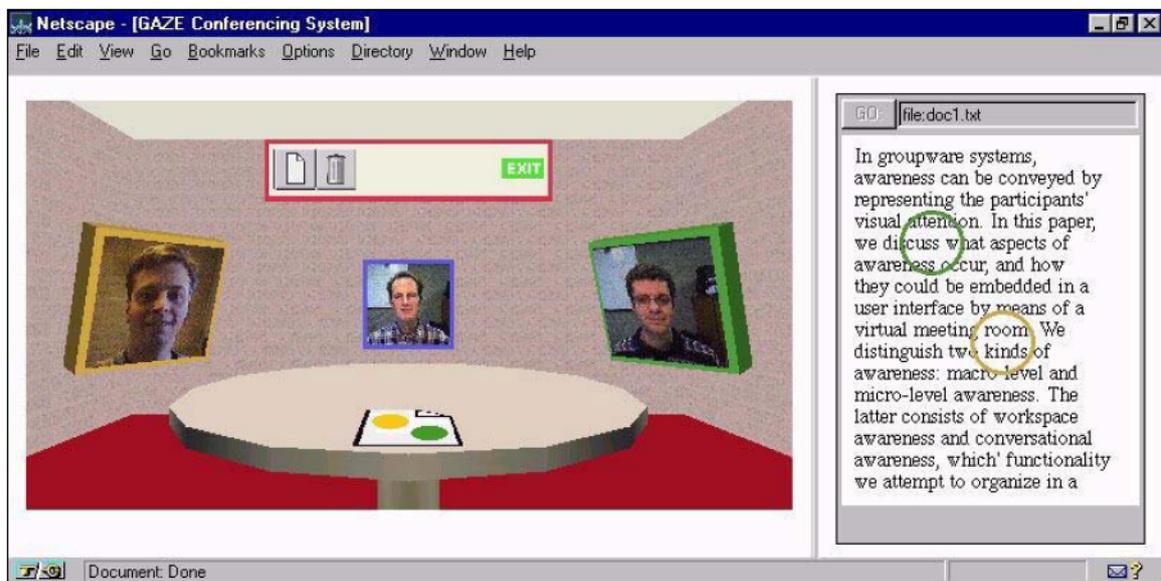


Abbildung 4.4: Der virtuelle Konferenzraum des GAZE-Systems [Vertegaal u. a. 1997]

# 5 Probleme

In diesem Kapitel geht es um Probleme, die sich aus Anwendersicht bei der Nutzung von Eyetracking als Eingabegerät ergeben. Die Ungenauigkeit der Eyetracking-Daten und wie diese Daten trotzdem als Eingabeinformation genutzt werden können ist ein weiteres Thema.

## 5.1 'Midas-Touch'-Problem

Der naive Ansatz, die Blickposition als direkten Maus-Ersatz zu verwenden, (eine Änderung der Blickposition hat eine Maus-Zeiger-Bewegung zur Folge) hat sich als nicht brauchbar und sogar störend herausgestellt [Jacob 1991]. Anwender sind es nicht gewöhnt, nur durch Augenbewegungen Geräte zu bedienen. Sie erwarten, Objekte ansehen zu können, ohne sofort mit ihnen zu interagieren ('Midas-Touch'-Problem). Es ist daher ein unbrauchbarer Ansatz, mit jeder Augenbewegung einen Befehl auszulösen. Normalerweise betrachtet und versteht der Anwender eine Schaltfläche, bevor er den Maus-Zeiger über sie bewegt und eine Aktion auslöst. Um die Blickposition als Eingabegerät nutzen zu können, ist es also notwendig, zwischen Augenbewegung und Aufmerksamkeit zu unterscheiden. Dies kann durch Hinzunahme eines oder mehrerer Eingabemedien erfolgen. Bei den oben beschriebenen Anwendungen wurde die Tastatur eingesetzt, um mit dem fixierten Objekt zu interagieren. Es ist auch vorstellbar, statt der Tastatur Spracheingaben zu nutzen.

## 5.2 Sakkaden- und Fixations-Erkennung

Während einer Fixation ist das Auge nicht absolut bewegungslos. Es vollzieht unbewußte Bewegungen wie Drift, Tremor und Mikrosakkaden (siehe Abschnitt [2.2.3](#)). Zusammen mit dem Messfehler des Systems ergibt sich ein verrauschtes Eyetracking-Signal. Trotzdem sicher unterscheiden zu können, ob der aktuelle Blickpunkt der Beginn einer Sakkade, die Fortsetzung der laufenden Fixation oder einfach ein 'Ausreißer' ist, ist Gegenstand aktueller Forschung [Kumar u. a. 2007a].

### 5.3 Auge-Hand-Koordination

Im Abschnitt 4.1 wurden Techniken vorgestellt, die Tastatur- und Eyetracking-Eingaben kombinieren, um Schaltfläche oder andere Objekte zu steuern. Bei dieser Kombination kann es passieren, daß der Anwender den 'Hotkey' betätigt, bevor oder nachdem er das Zielobjekt fixiert hat ('Early-Trigger'- bzw. 'Late-Trigger'-Fehler). 'Early-Trigger'-Fehler werden verursacht durch die Verzögerungszeit, die sich durch die Verarbeitung der Blickdaten durch das Eyetracking-System ergibt oder durch den Anwender, der das Zielobjekt noch nicht fixiert, sondern erst im äußeren Blickfeld wahrgenommen hatte. Zum 'Late-Trigger'-Fehler kann es z.B. kommen, wenn der Anwender bereits das nächste Zielobjekt anvisiert, bevor er den 'Hotkey' betätigt.

# Literaturverzeichnis

- [Carpenter 1988] CARPENTER, R.H.S.: *Movements of the eyes*. 2nd Edition. London : Pion Limited, 1988
- [Crane und Steele 1978] CRANE, H.D. ; STEELE, C.M.: Accurate three-dimensional eye-tracker. In: *Applied Optics* 17 (1978), Nr. 5, S. 691 – 7050
- [Galley 2001] GALLEY, N.: Physiologische Grundlagen und Meßmethoden der okulomotorischen Aktivität. In: RÖSLER, Frank (Hrsg.): *Grundlagen und Methoden der Psychophysiologie*. Göttingen, Bern [u.a.] : Hogrefe, Verl. für Psychologie, 2001. – ISBN 3-8017-0551-X
- [Grüsser und Grüsser-Cornehls 1990] GRÜSSER, O.-J. ; GRÜSSER-CORNEHLS, U.: Gesichtssinn. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 24. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 1990
- [Hyrskykari u. a. 2000] HYRSKYKARI, Aulikki ; MAJARANTA, Päivi ; AALTONEN, Antti ; RÄIHÄ, Kari-Jouko: Design issues of iDICT: a gaze-assisted translation aid. In: *Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research and applications*. New York : ACM Press, 2000, S. 9 – 14
- [Jacob 1991] JACOB, Robert J. K.: The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get. In: *ACM Transactions on Information Systems* Bd. 9. New York : ACM Press, 1991, S. 152 – 169
- [Joos u. a. 2003] JOOS, Markus ; RÖTTING, Matthias ; VELICHKOVSKY, Boris M.: Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen. In: RICKHEIT, G. (Hrsg.) ; HERRMANN, T. (Hrsg.) ; DEUTSCH, W. (Hrsg.): *Psycholinguistik*. Berlin : De Gruyter, 2003, S. 142–168
- [Just und Carpenter 1976] JUST, Marcel A. ; CARPENTER, Patricia A.: Eye fixations and cognitive processes. In: *Cognitive Psychology* 8 (1976), Nr. 4, S. 441–480
- [Kumar u. a. 2007a] KUMAR, Manu ; KLINGNER, Jeff ; PURANIK, Rohan ; WINOGRAD, Terry ; PAEPCKE, Andreas: *Improving the Accuracy of Gaze Input*. Stanford Human-Computer Interaction Group. 2007. – URL

<http://hci.stanford.edu/research/GUIDe/publications/StanfordCSTR2007-12-ImprovingtheAccuracyofGazeInput.pdf>

- [Kumar u. a. 2007b] KUMAR, Manu ; PAEPCKE, Andreas ; WINOGRAD, Terry: *EyeExposé: Switching Applications with Your Eyes*. Stanford Human-Computer Interaction Group. 2007. – URL [hci.stanford.edu/cstr/reports/2007-02.pdf](http://hci.stanford.edu/cstr/reports/2007-02.pdf)
- [Kumar u. a. 2007c] KUMAR, Manu ; PAEPCKE, Andreas ; WINOGRAD, Terry: *EyePoint: Practical Pointing and Selection Using Gaze and Keyboard*. In: *Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York : ACM Press, 2007
- [Kumar und Winograd 2007] KUMAR, Manu ; WINOGRAD, Terry: *Gaze-enhanced scrolling techniques*. In: *Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York : ACM Press, 2007, S. 2531 – 2536
- [Land und Furneaux 1997] LAND, Michael F. ; FURNEAUX, Sophie: *The knowledge base of the oculomotor system*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences* 382 (1997), S. 1231–1239
- [Laurentius 1938] LAURENTIUS, Andreas: *A Discourse of the Preservation of the Sight: of melancholike Disiseases; of Rheumes, and of Old Age*. Oxford University Press, 1938
- [Mickasch und Haack 1986] MICKASCH, H.D. ; HAACK, J.: *Blickbewegungsforschung - Einführung in die physiologischen Grundlagen, Techniken und in die Problem- und Anwendungsbereiche*. In: ISSING, L.J. (Hrsg.) ; MICKASCH, H.D. (Hrsg.) ; HAACK, J. (Hrsg.): *Blickbewegung und Bildverarbeitung*. Frankfurt am Main : Peter Lang, 1986
- [Morimoto u. a. 1998] MORIMOTO, C. ; KOONS, D. ; AMIR, A. ; FLICKNER, M.: *Pupil Detection and Tracking Using Multiple Light Sources*. In: *Fifth European Conference on Computer Vision*. 1998
- [Schandry 1989] SCHANDRY, R.: *Lehrbuch Psychophysiologie*. 2. Auflage. München, Weinheim : Psychologie Verlags Union, 1989
- [Velichkovsky und Hansen 1996] VELICHKOVSKY, Boris M. ; HANSEN, John P.: *New technological windows into mind: there is more in eyes and brains for human-computer interaction*. In: *Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York : ACM Press, 1996, S. 496 – 503
- [Vertegaal u. a. 1997] VERTEGAAL, R. ; VELICHKOVSKY, B.M. ; VEER, G. V. der: *Catching the eye: Management of joint attention in teleconferencing and cooperative work*. In: *ACM SIGCHI Bulletin* Bd. 29. New York : ACM Press, 1997, S. 87 – 92