

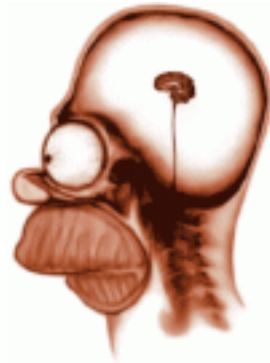
Tierphysiologischer Kurs für Bioinformatiker

Versuch D – Psychophysik, Reflexe und Sensomotorik

Gruppe B2a

Matthias Hannig, Stephan Körner, Thomas Holder

Donnerstag, 24. März 2005



Nicht immer lässt sich in der Sinnesphysiologie die durch einen Reiz verursachte Erregung direkt und objektiv messen. Bei *psychophysischen Untersuchungen* wird ein Proband nach seinen Empfindungen befragt, die ein bestimmter Stimulus auslösen kann. In der folgenden Versuchsreihe wurden Menschen subjektiv auf ihr *Hörvermögen* und ihre *bewusste Reaktionsfähigkeit* untersucht. Außerdem wurden Vergleiche zu unwillkürlich gesteuerten *Reflexen* und sensomotorisch integrierten Reaktionen hergestellt.

Erstellt mit L^AT_EX 2_ε und GNUPlot

Inhaltsverzeichnis

1 Psychophysik	3
1.1 Bestimmung der absoluten Hörschwelle des Menschen	3
1.1.1 Einleitung	3
1.1.2 Methode	3
1.1.3 Ergebnis	3
1.1.4 Diskussion	4
1.2 Akustische Richtungslokalisierung beim Menschen	5
1.2.1 Einleitung	5
1.2.2 Methode	5
1.2.3 Ergebnis	6
1.2.4 Diskussion	6
2 Reflexe – motorische Reaktionen auf Sinneseindrücke	8
2.1 Einleitung	8
2.2 Methode	8
2.3 Ergebnis	8
2.4 Diskussion	9
3 Sensomotorische Integration	11
3.1 Einleitung	11
3.2 Methode	12
3.3 Ergebnis	13
3.3.1 Glatte Augenfolgebewegungen	13
3.3.2 Augenbewegungen beim Lesen	13
3.3.3 Sakkaden	14
3.4 Diskussion	14
Literatur	17

1 Psychophysik

1.1 Bestimmung der absoluten Hörschwelle des Menschen

1.1.1 Einleitung

Das Frequenzspektrum der für einen erwachsenen Menschen wahrnehmbaren Töne reicht von ca. 15 - 20.000 Hz. Der minimale *Schalldruckpegel* bei dem eine Frequenz wahrgenommen werden kann nennt man *absolute Hörschwelle*.

Jene sollten wir im folgenden Versuch experimentell bestimmen.

1.1.2 Methode

Unsere Versuchsperson sollte an der Reizapparatur eigenständig die Lautstärke von Tönen verschiedenster Frequenzen (20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 Hz) einstellen, so dass diese für sie gerade noch gehört werden konnten. Zuerst wurde die absolute Hörschwelle des rechten, daraufhin des linken, und schließlich beider Ohren bestimmt. Die erhaltenen Werte wurden anschließend mit Daten aus der Literatur verglichen.

1.1.3 Ergebnis

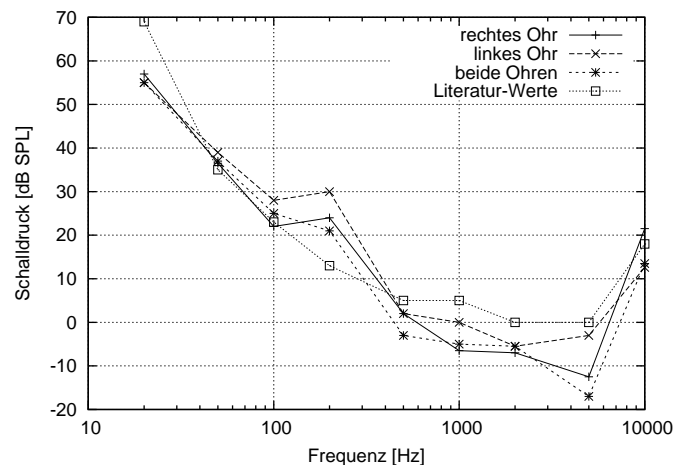


Abbildung 1: Audiogramm unserer Versuchsperson

Tabelle 1: Hörschwellen bei 50 dB SPL

obere Schwelle:	17500 Hz
untere Schwelle:	30 Hz

1.1.4 Diskussion

Deutlich zu erkennen ist, dass im Bereich niedriger Frequenzen (ca. 20-100 Hz) unsere Messdaten recht nahe an den Daten aus der Literatur liegen. Zu stärkeren Abweichungen kommt es erst im Bereich von 100-10000 Hz. Darüberhinaus lässt sich erkennen, dass bei niedrigeren Frequenzen ein höherer Schalldruckpegel benötigt wird als bei niedrigen.

1.2 Akustische Richtungslokalisierung beim Menschen

1.2.1 Einleitung

Durch die Fähigkeit des “Stereo-hörens” ist der Mensch in der Lage Geräusche zu lokalisieren. Dies geschieht in der Horizontal-ebene vornehmlich durch zwei physikalische Phänomene:

- Die *Laufzeitdifferenz*
- Der *Intensitätsunterschied*

Mittels zweier Versuche sollten wir feststellen, wie gering diese Differenzen sein können, bevor keine Abweichung mehr von der “Vorrausrichtung” mehr erkennbar ist. Darüber hinaus sollte geklärt werden, wie die relative Gewichtung jener beiden Parameter für die Richtungsempfindung ist. Bei den Versuchen gingen wir von einer *objektiven* und einer *subjektiven* Mitte aus. Bei der objektiven ist die relative Verzögerung null. Das heisst das Signal kommt zeitgleich aus beiden Kopfhörerlautsprechern, kann aber unter Umständen als nicht mittig empfunden werden. Die subjektive Mitte ist relativ zur objektiven verschoben - Das Signal kommt mit einer zeitlichen Differenz zwischen linkem und rechtem Ohr an, wird aber als mittig empfunden.

1.2.2 Methode

Zur Durchführung des Versuches zum Test der Laufzeitdifferenzen stand uns ein Geräuschgenerator zur Verfügung, welcher die Versuchsperson “Klicks” mit variabler zeitlicher Verzögerung reizte. Über einen mechanischen Wahlhebel konnten wir die Verzögerung des linken Pulses, sowie über eine Digitalschaltung dessen relative Schalldruckpegeldifferenz einstellen. Letztere war bei unserem ersten Versuch null. Der rechte Puls war dabei auf eine Verzögerung von $1000\mu s$ bei einer festen Lautstärke fixiert. Die Versuchsperson wurde nun mit “Klicks” gereizt. Selbige musste nun, ohne langes Überlegen, entscheiden ob im imaginären Raum sich der “Klick” *links* oder *rechts* befand. “Mitte” wurde ausgeschlossen. Es wurden nun die relativen Verzögerungen im Bereich von $-100 - 100 \mu s$ getestet.

Zur Durchführung des Versuches zum Test der Intensitätsunterschiede stand uns die selbe Messapparatur wie oben zur Verfügung. Der Versuchsaufbau wurde ebenso belassen. Es wurden fünf repräsentative relative Verzögerungswerte ($-200, -100, 0, 100, 200 \mu s$) aus der vorherigen Messreihe ausgewählt; bei diesen wurde so lange die Schalldruckpegeldifferenz verändert, bis die Versuchsperson die Geräuschquelle für “mittig” befand. Für jede dieser Verzögerungen wurde der Test fünf mal wiederholt.

1.2.3 Ergebnis

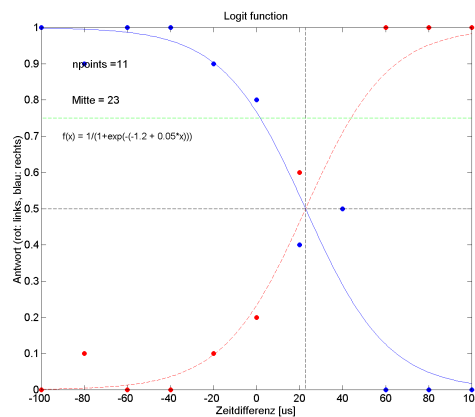


Abbildung 2: Auswertung der Zeitdifferenzschwelle

logistische Funktion: $f(x) = \frac{1}{1+\exp(-(-1.2+0.05x))}$

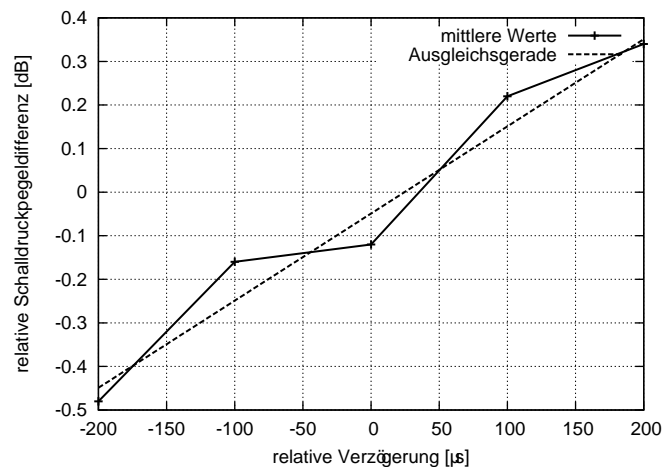


Abbildung 3: Auswertung der Trading-Messung.

Ausgleichsgerade: $f(x) = 0.211x - 0.49$

1.2.4 Diskussion

Aus dem Diagramm (Abbildung: 2) konnten wir die subjektive Mitte bestimmen: Diese liegt bei unserer Versuchsperson bei einer relativen Verzögerung von $23 \mu s$. (Die Verzögerung ist relativ zur *objektiven Mitte*.) Die naheliegendste Erklärung für dieses Phänomen ist das (wahrscheinlich stark) unterschiedliche Hörvermögen der Ohren unserer Versuchsperson. Um den kleinst möglichen Winkel bestimmen zu können, den unsere

Versuchsperson durch verzögertes auftreten von Schall unterscheiden kann, benutzen wir folgende Formel:

$$\sin\alpha = \frac{d}{\Delta t * c} \quad (1)$$

Dabei ist:

- Δt die Zeitdifferenz zwischen subjektiver Mitte und 75%: ca. $24\mu s$
- c die Schallgeschwindigkeit: $330m/s$
- d der Abstand der Ohren: ca. $21cm$

Daraus errechnete sich ein minimaler Winkel von: **2.16°**
Literaturwerte liegen bei ca. 3° - Die Abweichung zu erklären ist jedoch schwierig, da die üblichen Störungsfaktoren das Ergebnis eigentlich negativ beeinflusst haben sollten.

Aus Abbildung 3 konnten wir erkennen, dass je größer die Zeitdifferenz des Signales ist, desto größer muss auch die Differenz des relativen Schalldruckpegels sein, um durch Kompensation den Höreindruck einer mittigen Geräuschquelle vermitteln zu können. Dadurch ergab sich eine lineare Ausgleichgerade mit einer Steigung von $0.021dB/\mu s$. Dies ergab ein Tradingratio von $50\mu s/dB$.

2 Reflexe – motorische Reaktionen auf Sinneseindrücke

2.1 Einleitung

Alle Arten von Bewegungen erfordern eine koordinierte Aktivität von zahlreichen Muskeln. Selbst einfache Handlungen, wie das Austrecken nach einem Gegenstand erfordern eine Kontraktion von dutzenden von Muskeln. Sowohl die Muskeln in der Hand um den Gegenstand zu fassen werden aktiv, aber auch zahlreiche Muskeln im Rumpf und in den Beinen sind nötig um den Körper in einer stabilen Lage zu halten. Dieses miteinander Wirken von vielen unabhängigen Muskeln nennt man *motorische Koordination*. Die elementarste Form einer solchen Koordination bezeichnet man als Reflex. Reflexe reagieren auf einen externen Reiz und laufen dann normalerweise automatisch ab, sind unwillkürlich und stereotyp. Das heißt ein bestimmter Reiz ruft immer den gleichen Reflex hervor, bis zur Ermüdung. Man unterscheidet die Reflexe in *Eigenreflex* und *Fremdreflexe*. Eigenreflex bedeutet, dass Rezeptor und Effektor im selben Organ liegen und die Reaktionszeit sehr kurz ist. Im Gegensatz dazu liegen Rezeptor und Effektor beim Fremdreflex in verschiedenen Organen und die Reaktionszeit ist etwas länger. Er ist in der Regel polysynaptisch. Der **Reizort** bestimmt welche Muskeln sich kontrahieren und die **Reizstärke** die Amplitude der Reaktion. In folgender Versuchsreihe behandeln wir einen der einfachsten Reflexe überhaupt: **Der Dehnreflex**. Der Dehnungsreflex (siehe Abbildung 2.4) hängt ausschließlich von den monosynaptischen Verschaltungen zwischen primären afferenten Fasern aus Muskelspindeln (siehe Abbildung 2.4) und Motoneuronen ab, die denselben Muskel innervieren. Andere Reflexe sind häufig von polysynaptischen Verschaltungen abhängig und deshalb um einiges komplizierter zu erläutern.

2.2 Methode

Zur Durchführung der Versuche sitzt eine Person mit hochgezogener Hose und ohne Socken auf eine Tisch. Die Ferse wird mit Elektronen Leitpaste bestrichen und berührt einen Kontaktsensor. Zudem wird die Versuchsperson geerdet. Kontaktsensor und Hammer sind beide mit einem Timer verbunden. Wenn nun der Hammer das Knie berührt wird die Zeit angefangen zu messen, bis die Ferse den Kontaktsensor nicht mehr berührt. Man kann also die Bruttoreflexzeit messen. In der ersten Versuchsreihe schließt die Testperson ihre Augen und muss den Fuß heben wenn der Hammer sie seitlich am Knie berührt. Es wird die Reaktionszeit gemessen einer willkürlichen Bewegung. Beim nächsten Durchgang kontrahiert die Testperson ihre Oberkörpermuskeln, der Kniesehenreflex wird ausgelöst und die Bruttoreflexzeit abgelesen. Beim letzten Durchgang sitzt die Versuchsperson entspannt da, es wird wiederum der Kniesehenreflex ausgelöst und die Bruttoreflexzeit gemessen. Der Versuch soll zeigen, dass die Reaktionszeit deutlich über der Bruttoreflexzeit liegt und die Bruttoreflexzeit im angespannten Zustand leicht unter der normalen Bruttoreflexzeit.

2.3 Ergebnis

Unsere Messergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsreihe zum Partellar-Sehnen-Reflex

Durchgänge	Reaktionszeit in[ms]		
	willentlich	angespannt	entspannt
1	489	90	111
2	313	74	82
3	289	82	94
4	314	99	91
5	295	118	93
6	295	74	93
7	257	101	103
8	304	71	95
9	261	78	93
10	230	89	91
11	307	88	93
12	328	90	93
13	280	87	127
14	300	84	100
15	310	89	85
16	277	111	86
Mittelwert	303,1	89,1	95,6
Standartabweichung	53,8	12,6	10,5

2.4 Diskussion

Die errechneten Mittelwerte zeigen schön, dass die Bruttoreflexzeit bei einer vorge-spannten Körperhaltung geringer ist wie die normale Bruttoreflexzeit. Diese geringere Bruttoreflexzeit liegt daran, dass die Empfindlichkeit der Muskelspindel durch γ -motoneurone zentralgesteuert werden kann. Sofern der Muskel passiv gedehnt wird, und zu gleicher Zeit das γ -Motoneuron aktiviert wird, verstärkt sich die Dehnungsantwort der Muskelspindel. Die kleineren Latenzzeiten des Kniesehnenreflexes unter einhergehender Belastung der Oberkörpermuskulatur lassen sich durch Erhöhung des Muskeltonus des Körpers erklären, hervorgerufen durch die Belastung der Oberkörpermuskulatur. Die Erhöhung des Muskeltonus führt zu einer leichteren Erregbarkeit der motorischen Einheiten. Die Werte bei einer willentlichen Bewegung sind deutlich höher. Das liegt daran, dass eine solche Bewegung über das Gehirn abläuft und somit die Verarbeitungszeit viel länger ist, und mehrere Synapsen zwischengeschaltet sind in der Bahn des Rezeptors zum Effektor. Nun wurde mit Hilfe des Wilcoxon-Testes ermittelt, ob sich die beiden gemessenen Zeiten im angespannten und entspannten Zustand signifikant unterscheiden. Dazu wurden die Rangsummen der beiden Versuchsreihen gebildet. Diese beträgt 210 im angespannten Zustand und 318 im entspannten Zustand. Somit unterscheiden sich

unsere Messreihen in der 5%-Tabelle signifikant, leider jedoch nicht in der 1%-Tabelle.

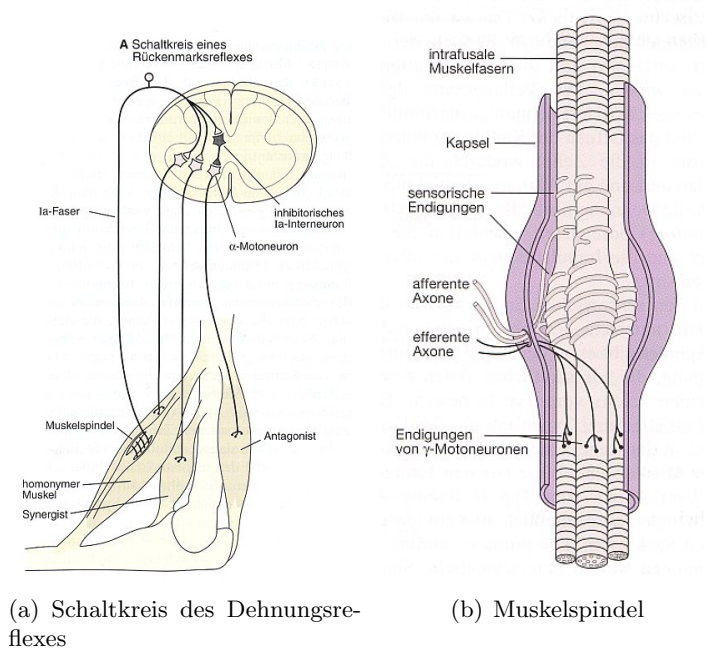


Abbildung 4: Schaltkreis & Muskelspindel (Quelle: [KANDEL et al. 1995])

3 Sensomotorische Integration

3.1 Einleitung

Die Augenbewegungen eines Menschen können funktional in zwei Kategorien klassifiziert werden. Zum einen **blickführende** und zum anderen **blickstabilisierende** Bewegungen. Ziel von beiden ist es, ein Bild in der *Fovea centralis* — dem Punkt des schärfsten Sehens auf der Retina — zu fokussieren.

Betrachten wir ein größeres Objekt, so müssen wir es in vielen kleinen Einzelbildern „abschannen“. Wir führen unseren Blick unbewusst in vielen kleinen ruckartigen (blickführenden) Augenbewegungen über das Bild, so dass nacheinander einzelne Mosaikbausteine in die *Fovea centralis* fallen. Charakteristisch kann dieses Phänomen beim Lesen eines Textes untersucht werden, bei dem wir Einzelfragmente von max. 8 Buchstaben auf einmal lesen können. Für die blickführende Bewegung können wir den Augapfel willkürlich um die Horizontal- und Vertikalachse drehen. Für beide Achsen greifen jeweils zwei Muskeln (Agonist und Antagonist) am Augapfel an (Vertikal: *M. rectus superior* und *M. rectus inferior*; Horizontal: *M. rectus lateralis* und *M. rectus medialis*; vgl. Abb. 5).

Bei der blickstabilisierenden Bewegung bewegt sich einer (oder beide) der Bezugspunkte (das Bild oder der Kopf), zum Beispiel beim Laufen. Um den Focus in der *Fovea* zu behalten, dreht sich das Auge — nun nicht mehr ruckartig, sondern an die Bewegung angepasst — mit. Hierfür kann sich das Auge, zusätzlich zu den bereits erwähnten Bewegungsrichtungen, unwillkürlich um eine dritte Achse — die Längsachse — um einen gewissen Winkel drehen (mit dem *M. obliquus superior* und dem *M. obliquus inferior*).

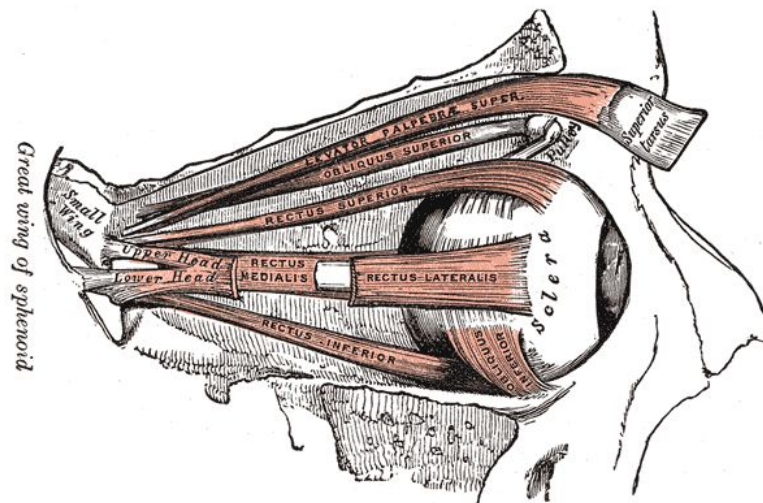


Abbildung 5: Äußere Augenmuskeln (Quelle: [<http://de.wikipedia.org/wiki/Augenmuskeln>] bzw. [GRAY's Anatomy of the Human body, 1918])

Eine eher klassische, phänomenologisch betrachtete Einteilung der Augenbewegungen teilt diese in 5 verschiedenen Klassen ein, wobei jede einer der bereits erwähnten zwei

funktionalen Klassen zugeordnet werden kann (teilweise auch kombiniert).

- Sakkaden
- Glatte Augenfolgebewegungen
- Vestibulo–okulärer Reflex (VOR)
- Optokinetischer Reflex (OKR)
- Vergenzbewegungen

Im Versuch sollten **Sakkaden** und **glatte Augenfolgebewegungen** (GAFB) untersucht und verglichen werden. Sakkaden sind schnelle, ruckartige Augenbewegungen, die den Blick von einem zum anderen Fixationsziel bringen. Sie werden auch als „visueller Greifreflex“ bezeichnet. GAFB sind in ihrer Geschwindigkeit exakt an die Geschwindigkeit eines bewegten Objekts angepasst, so dass das retinale Bild des Objekts stationär in der Fovea zentralis ruht.

3.2 Methode

Zur Aufzeichnung der horizontalen Augenbewegung unserer Versuchsperson wurde ein Infrarot–Messsystem (IRIS) verwendet, bei welchem infrarotes Licht auf das Auge gestrahlt, und aus der Intensität der Reflexion an zwei verschiedenen Punkten die Position des Blickes bestimmt werden kann. Die Methode wird auch als *Cornea Reflex Methode* bezeichnet. Damit der Kopf der Versuchsperson sich nicht bewegen konnte, wurde dieser mit einer Kinnaufklappe und einem Stirnbrett immobilisiert (vgl. Abb. 6). In 57cm Entfernung vom Auge war ein Bildschirm angebracht, 1cm auf dem Bildschirm entsprach also 1° Augenbewegung. Der Ausgang des IRIS–Systems war einmal mit dem Oszilloskop und gleichzeitig mit dem Analog–Digital–Konverter eines Computers verbunden.

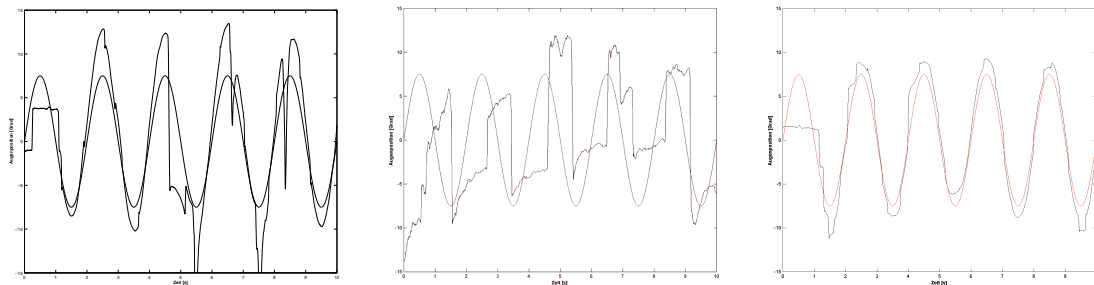


Abbildung 6: Apparatur für die *Cornea Reflex Methode*, bei welcher Blickbewegungen mit Hilfe von Infrarotreflexionen auf der Hornhaut bestimmt werden

3.3 Ergebnis

3.3.1 Glatte Augenfolgebewegungen

Um glatte Augenfolgebewegungen zu erreichen, wurde der Versuchsperson ein sich gleichmäßig sinusförmig hin- und herbewegender Punkt auf dem Bildschirm vorgespielt, welcher permanent fixiert werden sollte (Abb. 7(a)). Der Punkt bewegte sich mit einer Frequenz von $0,5\text{Hz}$ bei einer Amplitude von 8cm (8° Augenbewegung). Es war zu erkennen, dass die Versuchsperson den Punkt sehr genau verfolgen konnte. Anschließend sollte die Versuchsperson die Bewegung wiederholen, allerdings ohne einen Punkt als Anhaltspunkt auf dem Bildschirm zu sehen (Abb. 7(b)). Das Ergebnis war wesentlich ungleichmäßiger und sprunghafter als beim Versuch zuvor. Für eine letzte glatte Augenbewegung sollte ein wie beim ersten Mal bewegter Punkt verfolgt werden, diesmal aber auf einem strukturierten Hintergrund (Abb. 7(c)). Das Ergebnis war analog zu dem Versuch ohne Hintergrund, der Punkt konnte also souverän fixiert und glatt verfolgt werden.



(a) gleichmäßig bewegter Punkt auf schwarzem Hintergrund

(b) freies Bewegung ohne Anhaltspunkt (schwarzer Bildschirm)

(c) gleichmäßig bewegter Punkt auf strukturiertem Hintergrund

Abbildung 7: Glatte Augenfolgebewegungen

3.3.2 Augenbewegungen beim Lesen

Wie genau wir einzelne Buchstaben und Wörter beim Lesen eines Textes erfassen müssen, um den Inhalt (die Semantik) des Textes zu verstehen, hängt stark davon ab, wie vertraut uns die verwendete Sprache in Bezug auf Satzstellung und Vokabular ist. Im folgenden Versuchsteil sollte die Versuchsperson zuerst einen bekannten Text („Biene Maja“-Song) lesen (Abb. 8(a)), dann den selben Text in „randomisierter“ Form, also mit im Wort vertauschten Buchstaben (Abb. 8(b)), und schließlich noch einen schweren englischen Text, der mit dem ersten nichts zu tun hatte (Abb. 8(c)). In den Abbildungen läuft die Zeitachse von oben nach unten, die Augenposition ist vertikal dargestellt (so, dass man die abgedruckten Textzeilen auch normal von links nach rechts lesen kann :-)). Der bekannte Text wurde mit der schnellsten Frequenz und den längsten Sakkadensprüngen gelesen, ein wenig langsamer und gleichmäßiger der englische Text, und am langsamsten der randomisierte Text.

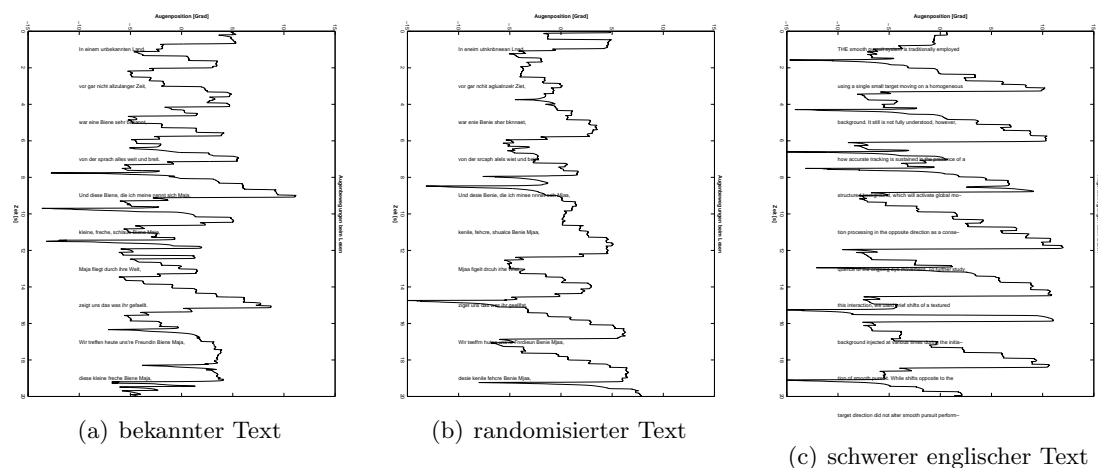


Abbildung 8: Augenbewegungen beim Lesen

3.3.3 Sakkaden

Um Augenbewegungen in Form von Sakkaden — also schnelle ruckartige Bewegungen (vgl. Abschnitt „3.1 Einleitung“) — zu erzwingen, wurden der Versuchsperson 5 Minuten lang Blickziele in 4 verschiedenen Positionen (-10° , -5° , $+5^\circ$ und $+10^\circ$ von der Mitte entfernt) im Wechsel am Bildschirm vorgespielt. Abb. 9 zeigt den Verlauf der Augenbewegung nach Änderung des Blickzieles. Alle Blickverläufe sind übereinander dargestellt, die Zieländerung war jeweils nach 200ms (roter Balken, Rückstellung des Zieles ist nicht im Diagramm dargestellt). Eine genaue Statistik der Auswertungen wurde vom Computer mit Hilfe des Programms MATLAB® erstellt, der „Output“ ist in Tabelle 3 dargestellt. Außerdem konnte mit Hilfe des selben Programms ein Diagramm erstellt werden, welches die Genauigkeit der Sakkaden in Abhängigkeit vom Änderungswinkel des Blickzieles darstellt (vgl. Abb. 10).

3.4 Diskussion

Deutlich zu erkennen war, dass ein sich **gleichmäßig bewogender Gegenstand** sehr genau mit **glatten Augenbewegungen** in der Fovea festgehalten werden kann. Im Vergleich von Abb. 7(a) und 7(c) konnten wir außerdem feststellen, dass die glatten Augenfolgebewegungen unabhängig sind von der Struktur des Hintergrundes. Abgesehen von der nicht identischen Kalibrierung der Apparatur sind die Ergebnisse auf beiden Diagrammen gleichwertig. Was offensichtlich nicht möglich ist, ist eine glatte Bewegung der Augen ohne einen Anhaltspunkt. Auf Abb. 7(b) war zu erkennen, dass die Versuchsperson die Augen sprunghaft, also viel mehr in Form von Sakkaden, von rechts nach links bewegt hat.

Sehr interessant war zu beobachten, wie die Versuchsperson mit den **verschiedenen Texten** umgegangen ist. Bei dem bekannten „Biene Maja“ Text wurde im Durchschnitt jedes Wort einmal anfokussiert, einige Zeilen wurden sogar regelrecht überflogen, bei

```

=====hier kommen die Latenzen=====
Zielposition -10, anzahl 23, mw 173 (+-56) ms, median 160 ms
Zielposition -5, anzahl 30, mw 152 (+-37) ms, median 150 ms
Zielposition 5, anzahl 21, mw 173 (+-40) ms, median 185 ms
Zielposition 10, anzahl 24, mw 205 (+-66) ms, median 195 ms
ANOVA1 p = 0.00600
ueber alles: MW 174.4, STD 53.8, n=98
Scheffe test:
      -10      -5       5       10
-10.0  1.00   0.60   1.00   0.26
-5.0   0.60   1.00   0.73   0.01
5.0    1.00   0.73   1.00   0.19
10.0   0.26   0.01   0.19   1.00
=====hier kommen die Korrektur Sakkaden=====
"Latenz" der Korrektursakkade: 117 (+-32) ms (n=32)
Mittl. Amplitude der Korrektursakkade (Absolutbetrag): 2.1 deg(n=32)
-10.0:      14 Korrektursakkade, mittl. Amplitude -1.47 Grad
-5.0:       12 Korrektursakkade, mittl. Amplitude -2.83 Grad
5.0:        3 Korrektursakkade, mittl. Amplitude 2.40 Grad
10.0:       3 Korrektursakkade, mittl. Amplitude 0.50 Grad
===== hier kommt der Gain =====
-10:        Mittelwert 1.321
-5:         Mittelwert 1.144
5:          Mittelwert 1.083
10:         Mittelwert 0.970
    
```

Tabelle 3: Ausgabe von MATLAB® zur Sakkadenstatistik

anderen musste „nachgehakt“ werden, die Versuchsperson musste also ein Wort zwei mal lesen. Ein ähnliches Bild ist bei dem unbekanntem englischen Text zu erkennen, unsere Versuchsperson scheint also ein geübter Englischleser zu sein. Die Geschwindigkeit ist jedoch gleichmäßiger und etwas langsamer als beim bekannten deutschen Text, und es wurden keine Zeilen überflogen. Ein deutlich anderes Bild ist beim „randomisierten“ Text zu erkennen. Er wurde nicht mal halb so schnell gelesen wie die anderen beiden Texte, und die Sakkaden waren zumindest zu Beginn des Textes deutlich kleiner, was auf ein buchstäbliches Entziffern der Wörter schließen lässt. Gegen Ende des Textes hatte sich die Person offensichtlich an die Sinnfreiheit der Wörter gewöhnt und sich folglich nicht mehr die Mühe zum Entziffern gemacht, wodurch die Sakkaden und die Lese­geschwindigkeit wieder größer wurden (vgl. Abb. 8).

Aus den Ergebnissen konnten wir schließen, dass beim Lesen eines „normalen“ Textes offensichtlich nicht jeder Buchstabe wirklich als solcher gelesen wird, sondern vielmehr die Form bekannter „Wortpatterns“ in der Fovea aufgeschnappt und vom Gehirn in Abhängigkeit vom Kontext des Gelesenen sinnvoll verarbeitet wird.

Die von unserem Probanden produzierten **Sakkaden** waren sehr zielgenau, vereinzelt sind Korrektursakkaden zu erkennen. Soweit auf dem doch etwas wirren Diagramm (Abb. 9) zu erkennen war, wurde eine Sakkade niemals „über das Ziel hinaus geschossen“, sondern „griff“ eher zu kurz als zu weit, und wurde dann eben im Bedarfsfall durch eine kleine Korrektursakkade mit kurzer Latenz korrigiert. Der mit dem Computer erstellten Statistik war zu entnehmen, dass mit zunehmender Entfernung von der Mitte sowohl die Latenz der Sakkaden, als auch die Standardabweichung zugenommen hat.

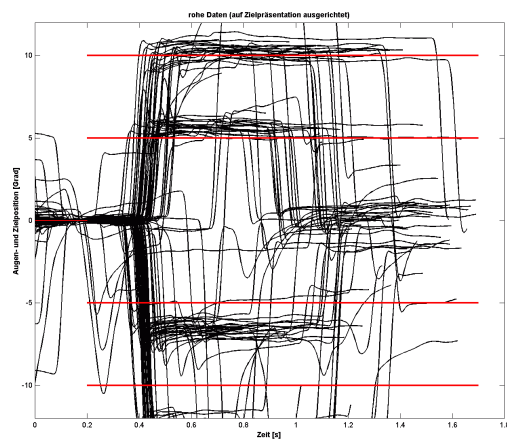


Abbildung 9: Rohdaten der Sakkaden beim Verfolgen des Punktes am Bildschirm

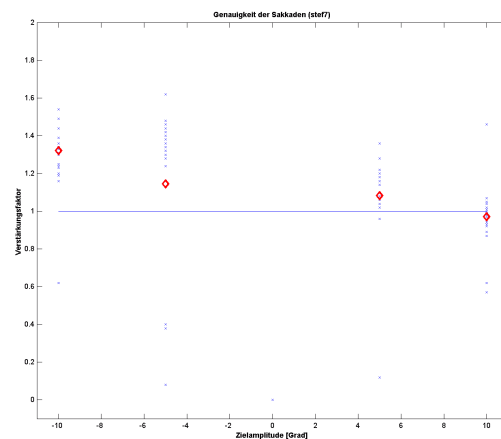


Abbildung 10: Computerauswertung der Sakkadengenauigkeit

Literaturangaben¹ zufolge ist jedoch die Sakkadenlatenz keine Funktion der Zeit, die Differenz von ca. 5–7% zwischen 5° und 10° (zu beiden Seiten) in unserer Versuchsreihe ist also entweder auf Messungenauigkeiten oder auf „Zufall“ zurückzuführen. Zu erklären ist die Zunahme der Standardabweichung mit der Verteilung der Photorezeptoren auf der Retina. In zunehmendem Abstand von der Fovea centralis nimmt die Dichte der Stäbchen (Zapfen gibt es in der Peripherie sowieso keine) ab, die Auflösung wird also immer schlechter. Bei der Verteilung der Korrektursakkaden ist kaum eine Abhängigkeit zum Abstand von der Mitte, sondern vielmehr ein Links–Rechts Gradient zu erkennen. In der linken Blickfeldhälfte musste die Versuchsperson viel öfters korrigieren als in der Rechten.

Vergleicht man die **Latenz der Augenbewegung** mit der **Latenz beim Patellarsehnenreflex**, so scheint auf den ersten Blick kein großer Unterschied zu bestehen (100ms versus 175ms). Berücksichtigt man jedoch, dass es sich beim Patellarsehnenreflex um einen monosynaptischen Reflexbogen handelt, beim Auge dagegen auf dem Weg von der Retina übers Gehirn zu den Augenmuskeln sehr viele Synapsen passiert werden, kann nicht allein die Anzahl der Synapsen für die Latenz eines Reflexes verantwortlich sein. Zum einen ist die Strecke vom Knie bis ins Rückenmark etwas länger als die vom Auge ins Gehirn, was bei Leitungsgeschwindigkeiten zwischen 10 und 40 $\frac{m}{s}$ durchaus ins Gewicht fällt. Zum anderen ist natürlich die Trägheit des Beines viel größer als die des Augapfels, was durch die eher simple Apparatur (elektrischer Kontakt an der Achillessehne) nicht kompensiert wird. Würde man die Latenzzeit beim Patellarsehnenreflex statt dessen mit in den Muskel eingestochenen Mikroelektroden ableiten, so wäre diese erheblich kürzer.

¹[LG 2003]

Literatur

[ILG 2003] ILG, UWE (2003). *Grundlagen sensomotorischer Integration*. Powerpoint-Folien zur Vorlesung, Universität Tübingen.

[KANDEL et al. 1995] KANDEL, ERIC R., J. H. SCHWARTZ und T. M. JESSELL (1995). *Neurowissenschaften, Eine Einführung*. Spektrum Akademischer Verlag.

[Wikipedia] WIKIPEDIA. *Die freize Enzyklopädie*. Internet.
<http://de.wikipedia.org/wiki/>.