

Judith Masseida¹, Jens-Joachim Philipp¹, Carola Wicher² und Wolfgang Jaschinski¹

¹IfADo - Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund; ²Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena, Fachbereich SciTec, Jena

Verschiedene Kenngrößen für die physiologisch günstige Kopfneigung

Schlüsselwörter

Physiologisch günstige Kopfneigung, Bildschirmarbeitsplatz, Kopfbewegungen, Kopfracking

Zusammenfassung

Das Sehen am Bildschirm erfordert die abgestimmte Bewegungskoordination der Augen und des Kopfes. Dabei kann die eingenommene Kopfneigung von Bedeutung sein. Diese Studie untersucht horizontale Kopfbewegungen mithilfe des Trackingverhaltens und weiterer Indikatoren für eine physiologisch günstige Kopfneigung. Die komfortable Kopfneigung, die Probanden spontan in einem Schnelltest selbst einstellen, war korreliert mit zwei weiteren Indikatoren: erstens mit der Kopfneigung, bei der die subjektiv beurteilte Nackenanstrengung minimal war, und zweitens mit der Ruhe-Kopfneigung, auf die sich der Kopf vertikal hinbewegt, wenn der Proband horizontale Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen ausführt. Einige Indikatoren, darunter das Elektromyogramm des Musculus Sternocleidomastoideus und die subjektive Beurteilung von Nackenbeschwerden, zeigten einen ähnlichen Beanspruchungsverlauf als Funktion der vorgegebenen Kopfneigung. Die Bestimmung der komfortablen Kopfneigung und der dazugehörigen komfortablen Blickneigung erscheint als ein einfaches und praxisgerechtes Verfahren, das als Anhaltspunkt für die individuelle Optimierung der vertikalen Bildschirmposition nützlich sein kann.

Praktische Relevanz

Da Muskel-Skelett-Beschwerden während der Arbeit, auch am Bildschirm, weit verbreitet sind, ist eine ergonomische Optimierung des Arbeitsplatzes anzustreben. Das Bestimmen einer physiologisch günstigen Kopfneigung kann nützlich sein, eine individuell richtige Höhenposition des Bildschirms zu finden.

Several indicators of the physiological favourable head inclination

Keywords

Physiologically favourable head tilt, VDT-work-place, head movements, head tracking

Summary

A physiologically favourable head tilt should be adopted at computer work by an ergonomic optimization of the vertical monitor position, in order to reduce musculoskeletal complaints. The aim of this study was to investigate head movements during a horizontal head-tracking task and further indicators for a physiologically favourable head inclination.

First, to find the comfortable head tilt, subjects performed small horizontal head movements with closed eyes in different vertical head positions until they found their individual favorable head tilt. Then, a head-mouse system – designed for computer interaction – was used in a way that subjects performed horizontal head movements to keep a cursor (vertical line) on a target (rectangle) which moved with variable velocity on a 44° wide screen. This was repeated with head tilts of -20°, -10°, 0°, +10°, +20° (Frankfurt line relative to horizontal) and the comfortable head tilt, while the activity of the musculus sternocleidomastoideus was measured by electromyography. For each head tilt, subjects judged the magnitude of perceived neck strain during tracking. The horizontal precision and the vertical deviation of the target position during tracking were measured as a function of head tilt. Further, we measured the resting position of head tilt, defined as the head tilt towards which the head tends to move vertically when performing horizontal head movements with closed eyes.

The results in 16 participants showed a linear increase in tracking precision the more the head was inclined upwards,

but this effect was negligible. Other indicators suggested a favorable condition more or less near a 0° Frankfurt line, specifically a U-shaped function was found for the EMG activity of the musculus sternocleidomastoideus and the subjective judgment of strain in the neck.

Three indicators had significant test-retest-correlations ($r > 0.5$, $p < 0.05$) and showed the following inter-correlations: the comfortable head tilt ($+5.1 \pm 4.2^\circ$) was significantly correlated to the resting head tilt with horizontal head movements ($+4.5 \pm 8.9^\circ$, $r = 0.58$, $p = 0.0093$; both measures used closed eyes to eliminate external stimuli) and to the head tilt of subjectively minimal strain when observing the visual head tracking targets ($-1.6 \pm 9.4^\circ$, $r = 0.50$, $p = 0.0243$); these means and standard deviations refer to Session 2 and the Frankfurt line relative to horizontal; the eye-ear-line is about 11° higher. For practical purposes, the comfortable head tilt and the comfortable gaze inclination can easily be tested at the workplace as starting value to determine the individually favorable vertical monitor position to improve subjective neck comfort and to avoid musculoskeletal strain in the neck.

Practical relevance

At many workplaces, also at computer work, one of the most prevailing concern is musculoskeletal strain that can be reduced by ergonomically optimizing the workplace conditions. The determination of a physiologically favourable head tilt may be useful to find the individually appropriate vertical position of a computer monitor.

1 Einleitung

Monitore für Computerarbeit haben heute durchweg eine gute Bildqualität in Bezug auf Auflösung, Kontrast, Leuchtdichte und Flimmerfreiheit. Doch selbst ein technisch optimaler Bildschirm kann am Arbeitsplatz zu Beanspruchungen und Ermüdung führen, wenn er nicht optimal nach physiologischen Kriterien aufgestellt ist (Jaschinski 1999a; Jaschinski 1999b). Der vorliegende Artikel behandelt die physiologisch günstige Kopfneigung, die für die optimale Höhenposition des Bildschirms von Bedeutung ist. Ein Bildschirm in Augenhöhe führt zu einer eher horizontalen Blickrichtung und aufrechten Kopfhaltung, während ein tief stehender Bildschirm zu einer Abwärtsneigung von Kopf und Augen führt. Dieser Aspekt der Bildschirmergonomie ist in der betrieblichen Praxis oftmals nicht zufrieden stellend gelöst. Nach Fragebogen-Erhebungen gehört die Positionierung von Monitoren zu den Schwachstellen der Bildschirmarbeitsplatz-Gestaltung: Bei 30 % der Befragten ist – entgegen der häufigen Empfehlung – die oberste Zeile des Bildschirms nicht unterhalb der Höhe der Augen; dies zeigte sich unverändert in den Erhebungen von 1995 wie auch von 2006/2007, also ebenso in der Ära der unflexiblen Röhrenmonitore wie auch neuerdings mit verstellbaren Flachbildschirmen (Schäfer et al. 2008). Eine große Feldstudie von Ariëns et al. (2001) mit 1334 Personen aus unterschiedlichen Industrie und Service Branchen zeigte, dass bei Tätigkeiten, bei denen für mehr als 95 % der täglichen Arbeitszeit eine aufrechte Sitzhaltung eingenommen werden muss, ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Beschwerden im Halsbereich besteht (adjustiertes relatives Risiko RR = 2,34). Diese Befunde sprechen für die praktische Relevanz der Höhenpositionierung von Bildschirmen.

Die ergonomischen Bedingungen von Computerarbeit sind heute sehr vielfältig. Einerseits findet man die klassische Konstellation eines Monitors auf dem Schreibtisch, wobei sich durch die baulichen Dimensionen der derzeit kommerziellen Geräte eine Blickneigung von ca. -15° ergibt; negative Vorzeichen bedeuten Blickneigungen und Kopfneigungen nach unten. Andererseits findet Computerarbeit heute nicht mehr nur im Büro statt: Notebooks und Tablet-PCs werden oft unterwegs, aber auch stationär am

Schreibtisch benutzt. Dies führt zu einer deutlichen Absenkung der Blickrichtung auf bis zu ca. -50° . Entsprechend sollte der Monitor nach hinten geneigt sein, um einen möglichst senkrechten Blick auf die Monitorebene zu erzielen und somit Ablesefehler zu vermeiden (Schmidtke 1981).

Durch verstellbare Flachbildschirme und flexible Monitorhalterungen ist es heute möglich, die Bildschirmposition nicht nach der baulichen Größe der Monitore einzurichten, wie es bei Röhrenmonitoren meist üblich war, sondern nach physiologischen Kriterien. Die Höhenposition des Bildschirms betrifft die Kombination von zwei physiologischen Mechanismen, denn eine Absenkung der Blickrichtung relativ zur Horizontalen wird zum einen bewirkt durch eine Absenkung des Kopfes relativ zum Rumpf und zum anderen durch eine Absenkung der Augen relativ zum Kopf. Die Kopfneigung ist der Gegenstand dieses Artikels, während die Augenneigung relativ zum Kopf und die resultierende Blickneigung in einem weiteren Artikel behandelt werden (Masseida et al. 2013).

1.1 Welche Kopfneigung sollte man einnehmen?

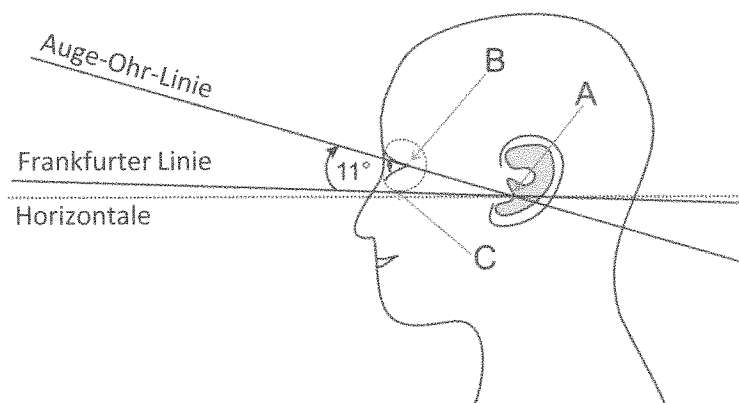
Die folgende Literaturübersicht beschreibt fünf Indikatoren der physiologisch günstigen Kopfneigung, die in dieser Studie aufgegriffen werden. Es handelt sich teilweise um praxiserichte Schnelltest-Verfahren, subjektive Erhe-

bungen, physiologische Messkonzepte oder Kopfbewegungsanalysen. Dabei dient der Begriff der „physiologisch günstigen Kopfneigung“ als Oberbegriff für verschiedene Indikatoren, für die wir verschiedene Begriffe definiert haben, um die jeweilige Messmethode zu beschreiben. Diese Studie untersucht Zusammenhänge zwischen diesen Indikatoren, die bisher meist separat in verschiedenen Studien gemessen wurden. Bei der Beschreibung der Kopfneigung relativ zur Horizontalen werden als anatomische Bezugslinien teils die „Auge-Ohr-Linie“ und teils die „Frankfurter Linie“ verwendet; zwischen beiden liegt im Mittel über Personen ein Winkel von 11° (Bild 1; Menozzi et al. 1996).

1.1.1 Komfortable Kopfneigung

In einigen Untersuchungen wurden Probanden gebeten, durch Abwärts- und Aufwärtsbewegungen des Kopfes eine Neigung einzunehmen, die spontan komfortabel empfunden wurde. Solche Verfahren zur Bestimmung der „komfortablen Kopfneigung“ könnten als Schnelltests in der Praxis nützlich sein, weil sie schnell und ohne Apparaturen einsetzbar sind.

Jampel & Shi (1992) definierten die neutrale Kopfposition als die Position, bei der die Versuchspersonen kein Bedürfnis haben, Kopfbewegungen auszuführen; dabei lag die Auge-Ohr-Linie im Mittel bei etwa $+15 \pm 4,0^\circ$. Ankrum & Nehmet (2000) ließen 24 Studenten den



- A: Tragus, Knorpelvorsprung (äußerste Spitze)
- B: Äußerer Canthus, äußerer Augenwinkel
- C: Unterer Orbitalrand, knöcherner Rand der Augenhöhle

Bild 1: Anatomische Bezugslinien und -punkte am Kopf zur Messung der Kopfneigung relativ zur Horizontalen

Figure 1: Anatomical reference lines and -points at the head for measuring the head inclination relative to horizontal

Kopf langsam von einer Seite zur anderen drehen, anschließend von unten nach oben neigen und ihre individuelle komfortable Kopfposition herausfinden. Währenddessen sollten die Versuchspersonen die Augen geschlossen halten, um visuelle Umwelteinflüsse auszuschließen. Im Mittel lag hierbei die Auge-Ohr-Linie bei $+7,7 \pm 8,1^\circ$. Jaschinski (2008) fand bei 12 Gleitsichtbrillen-trägern eine mittlere Auge-Ohr-Linie von $+8,2 \pm 3,3^\circ$, indem er die Versuchspersonen bei geschlossenen Augen langsame vertikale Kopfbewegungen ausführen ließ, bis sich ein angenehmes Gefühl im Nacken einstellte. Schulz & Jaschinski (2009) kam bei 22 jungen Versuchspersonen mit der gleichen Methode auf ein Ergebnis von $+16,5 \pm 4,0^\circ$.

1.1.2 Kopfneigung präziser regulatorischer Kopfbewegungen

Das Auge-Kopf-System ist bei Tätigkeiten ständig in Bewegung, beim Lesen werden beispielsweise die Augen- und Kopfbewegungen in einem dynamischen Prozess ständig reguliert. Diese Studie befasst sich mit der Frage, wie regulatorische Bewegungen des Kopfes von der Kopfneigung abhängen, um daraus möglicherweise eine günstige Kopfneigung abzuleiten. Als Messparadigma wird eine Kopftrackingaufgabe gewählt, da Trackingaufgaben vielfach benutzt werden, um die Mechanismen und Eigenschaften der Bewegungskoordination zu untersuchen, wobei als Maß für die Güte der Bewegung die Trackingpräzision benutzt werden kann, also die Standardabweichung der Differenz zwischen dem Zielobjekt und dem nachgeführten Objekt.

Trackingaufgaben wurden z. B. eingesetzt zur Erforschung der Ganzkörper-Standregulation (Oullier et al. 2002) und der manuellen Bewegungskoordination in der Raumfahrt (Manzey et al. 2000). Das methodische Prinzip der vorliegenden Kopftrackingstudie ähnelt der Studie von Willigenburg et al. (2013) zur Bewegungssteuerung des Oberkörpers: bei einer Trackingaufgabe des Oberkörpers nahm die Trackingpräzision ab, wenn der Oberkörper zunehmend vorgeneigt wurde; außerdem war die Trackingpräzision geringer bei Personen mit stärkeren Beschwerden im unteren Rückenbereich. Die genaue motorische Kontrolle kann durch neuromuskuläres Rauschen oder Bewegungsvariabilität begrenzt sein; dies spiegelt sich in

der Trackingpräzision wider, die somit als ein Maß für die Qualität der motorischen Kontrolle gilt (Willigenburg et al. 2013). Entsprechend erwarten wir in dieser Studie bei einer bestimmten Kopfneigung eine bessere Trackingpräzision und geringere Beschwerden, während bei höheren und niedrigeren Kopfneigungen die Trackingfehler und die Beschwerden möglicherweise zunehmen. Das Kopftrackingverhalten wurde bisher kaum erforscht (Fogt & Luthman 2002), insbesondere nicht als Funktion der Kopfneigung. Kopftrackingaufgaben werden auch in der physiotherapeutischen Praxis (Molinari, Dortmund) bei Patienten mit Problemen im muskuloskelettalen Bereich angewendet.

1.1.3 Vertikale Ruhelage des Kopfes

In vielen physiologischen Zusammenhängen gilt die Ruhelage als ein Zustand, den ein Muskelsystem ohne äußere Anforderung einnimmt. In der Ergonomie kann die Ruhelage ein Indikator sein, welche Haltungen für Muskel-Skelett-Systeme während der Arbeit am angenehmsten sind. Für die Hand gibt es z. B. zwischen der gestreckten und der geballten Hand eine entspannte Haltung, die bei der Form von Computermäusen berücksichtigt wird. Im visuellen System kennt man die Akkommodationsruhelage (Krueger et al. 1982), die Vergenzruhelage (Jaschinski 1999a) und die vertikale Stellung der Augen (Schulz & Jaschinski 2009). Ergebnisse von Daye et al. (2012) lassen eine vertikale Ruhelage des Kopfes vermuten. Sie untersuchten Augen- und Kopfbewegungen, wenn sich ein Sehobjekt beispielsweise von links unten nach rechts oben und wieder zurück bewegte. Der Winkel dieser schiefen Trackingrichtung in Bezug auf die Horizontale wurde variiert. Bei sehr hohen bzw. sehr tiefen Zielpositionen folgte der Kopf nicht in vollem Ausmaß, sondern tendierte zu einer mittleren Position, die man als Ruhe-Kopfneigung verstehen kann.

1.1.4 Kopfneigung subjektiv minimaler Nackenanstrengung

Man kann das subjektive Anstrengungsempfinden von Probanden erfragen, nachdem sie eine bestimmte Tätigkeit bei verschiedenen Kopfneigungen durchgeführt haben; daraus lässt sich eine Kopfneigung von minimaler Anstrengung ermitteln. Delleman & Berndsen (2002) untersuchten an acht Versuchspersonen

bei verschiedenen Bildschirmhöhen u. a. das subjektive Empfinden der Beanspruchung bei verschiedenen Textverarbeitungsaufgaben am Bildschirm. Die Versuchspersonen empfanden das Arbeiten bei einer Bildschirmhöhe von 10 cm unterhalb der Augenhöhe am angenehmsten für ihren Nacken. Dabei wurde eine mittlere Kopfneigung von 5° gemessen. Dieser Wert bezog sich auf einen Winkel zwischen der Auge Ohr Linie während der Tätigkeit und der Auge Ohr Linie bei einer Referenzposition. Von Boul (2002) ließ Versuchspersonen mithilfe eines auf dem Kopf montierten Laserpointers den Laserpunkt auf einem Zielpunkt halten, der sich in einer bestimmten vertikalen Position befand. Hierbei sollten sie subjektiv beurteilen, wie anstrengend sie dies bei unterschiedlichen Kopfneigungen empfanden. Im Mittel lag das Anstrengungsminimum bei 8° (Frankfurter Linie rel. zur Horizontalen). Nach Ariëns et al. (2001) liegen Beugungen des Nackens um etwa 20° im physiologisch normalen Bereich und führen im Allgemeinen nicht zu Beschwerden.

1.1.5 Kopfneigung bei geringster Nackenmuskelaktivität (Elektromyogramm)

Durch die Oberflächen-Elektromyographie lässt sich die Muskelbeanspruchung oder Ermüdung während einer Tätigkeit erfassen. Als Maße dienen die EMG Amplitude und das Frequenzspektrum (Luttmann 2001). Sommerich et al. (2000) resümierten mehrere Studien, die elektromyographische Effekte als Funktion der Monitorhöhenposition in der hinteren oberen Hals-Nacken-Region fanden, zumindest bei deutlichen Höhenveränderungen. Sommerich et al. (2001) zeigten bei Computerarbeit eine stärkere EMG-Aktivität mit zunehmendem Abwärtsblick auf -17° , bzw. -35° bei verschiedenen Nacken- und Rückenmuskeln, z. B. beim Musculus Sternocleidomastoideus und bei verschiedenen Extensormuskeln in der Hals-Nacken-Region. Allerdings fand Delleman (2004) kaum eine Erhöhung des EMGs in der Hals-Nacken-Region bis zu einer Absenkung auf -45° . Chaffin & Anderson (1999) fanden keine Änderungen der EMG-Aktivität oder der subjektiv berichteten Muskelermüdung durch eine Kopfabwärtsneigung um 15° , selbst nicht nach 6-stündiger Belastung. Die Befunde waren somit uneinheitlich, auch wegen unterschiedlicher Belastungsarten und verschiedener unter-

suchter Muskelgruppen. Kopfanhebungen wurden kaum untersucht. Weiterhin ließ sich bisher noch nicht klären, welche Indikatoren des Elektromyogramms als objektiv-physiologischem Beanspruchungsmaß mit der subjektiv empfundenen Nackenanstrengung zusammenhängen.

2 Material und Methode

Es werden Kopfbewegungen als Funktion der Kopfneigung in mehreren Parametern untersucht. Die Versuchspersonen werden instruiert, bei einer Kopftrackingaufgabe einen Cursor mithilfe einer Kopfmaus auf einem horizontal bewegten Zielobjekt zu führen, das auf eine Leinwand projiziert wird. Dabei wird die horizontale Präzisionsleistung in Form der horizontalen Standardabweichung der Cursorabweichungen aufgezeichnet sowie der Mittelwert der vertikalen Cursorabweichungen. Als objektives Beanspruchungsmaß während des Trackings dient die EMG Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus und als subjektives Maß die empfundene Anstrengung im Nacken. Im Anschluss an die Trackingaufgabe wird bei jeder Kopfneigung mit geschlossenen Augen getestet, ob der Kopf bei horizontalen Kopfbewegungen in eine bestimmte vertikale Ruhelage strebt.

2.1 Definitionen zur Kopfneigungs-erfassung

Alle Parameter werden in sechs unterschiedlichen Kopfneigungen gemessen: 20°, 10°, 0°, +10°, +20° (Frankfurter Linie relativ zur Horizontalen) und der

Tabelle 1: Experimentelle Bedingungen der Kopfneigung: Frankfurter Linie und Auge-Ohr-Linie, jeweils relativ zur Horizontalen

Table 1: Experimental conditions of head inclination: Frankfurt line and ear-eye-line, both relative to horizontal

Winkel Frankfurter Linie [°]	Winkel Auge-Ohr-Linie [°]
+20	+31
+10	+21
0	+11
-10	+1
-20	-9

zuvor bestimmten individuellen komfortablen Kopfneigung. In dieser Studie liegt eine Kopfneigung von 0° vor, wenn der Winkel zwischen der Horizontalen und der Auge Ohr Linie +11° ergibt. Denn da der Winkel zwischen der Auge-Ohr-Linie und der Frankfurter Linie durchschnittlich ca. +11° beträgt (Jampel & Shi 1992; Menozzi et al. 1996), kann im Mittel über anatomische Unterschiede annähernd gefolgert werden, dass sich in diesem Fall die Frankfurter Linie bei 0° befindet. In Bild 1 und Tabelle 1 sind die entsprechenden anatomischen Bezugslinien und Winkelbeziehungen des Kopfes dargestellt.

2.2 Versuchsaufbau und Geräte

Die Versuchspersonen sitzen zentral mit einem horizontalen Sehabstand von 80 cm vor einer Rückprojektionsleinwand (114 cm breit, 105 cm hoch, Mitte 106 cm über dem Boden), die um 20° nach hinten geneigt ist. Ein modifizierter, höhenverstellbarer Autositz ermöglicht eine aufrechte Sitzhaltung, mit einer Abstützung im Lendenwirbelbereich und im Schulterbereich. Durch eine Höhenverstellung beträgt die einheitliche Augenhöhe über dem Boden 1,4 m. Die horizontale Beleuchtungsstärke liegt bei einem Abstand zur Leinwand von 0,8 m bei 350 lx (0,75 m vom Boden). Die Leuchtdichte der Rückprojektion mit einem Acer X1230PS Projector (Pixelabstand 1,3 mm) beträgt bei einer Höhe von 1,40 m vom Boden im Mittel 110 ± 10 cd/m².

Der Neigungssensor SCA 100T D02 wird auf dem Kopf befestigt und erfasst mit entsprechender Software die Kopfneigung ca. 15 mal in der Sekunde. Zur Positionierung des Kopfes in einem vorbestimmten Winkel der Auge Ohr Linie (+31°, +21°, +11°, +1°, 9°, vgl. Tabelle 1) hält der Versuchsleiter das handliche digitale Neigungsmessgerät S-Digit mini (geo-Fennel GmbH) so, dass seine Kante in Übereinstimmung erscheint mit der Linie von der Spitze des Tragus am Ohr der Versuchsperson bis zum äußeren Augenwinkel. Der Neigungswinkel dieser Auge-Ohr-Linie dient zur Kalibrierung des Neigungssensors.

Eine Infrarot-Kamera des Kopfmaussystems SmartNAV (Fa. Natural Point) oberhalb der Leinwand erfasst eine Reflexionskugel am Neigungssensor auf dem Kopf des Probanden. Durch Kopfbewegungen ändert sich die Position des Reflexionspunktes im Kamerabild,

sodass mithilfe der SmartNAV-Software durch Kopfbewegungen die Cursorposition im projizierten Bild beeinflusst wird.

Zur Elektromyographie wird das CE-zertifizierte Gerät PS 11 UD der Firma Thumedi mit einer Abtastfrequenz von 2048 Hz verwendet. Es werden gleichzeitig vier bipolare Elektromyogramme abgeleitet; für jede Ableitung werden zwei Silberchlorid-Oberflächenelektroden Ambu®Blue Sensor N (Sensorfläche: 15 mm²) mit Leitgel auf die Haut aufgebracht.

2.3 Definitionen der Messgrößen und ihre Messmethoden

A) Komfortable Kopfneigung

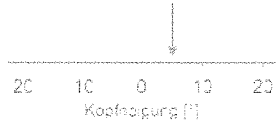
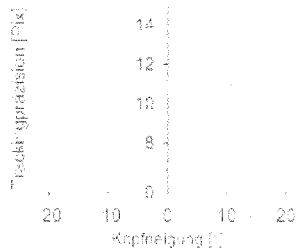
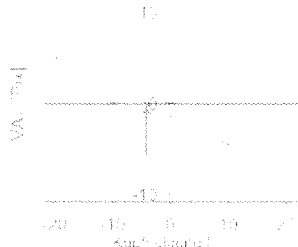
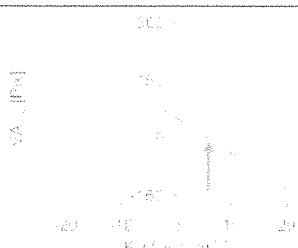
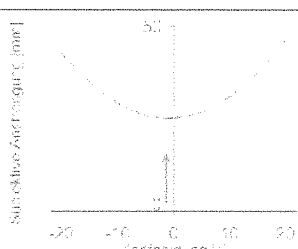
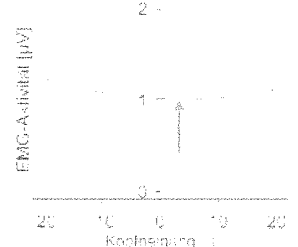
Die Versuchspersonen werden gebeten, den Kopf im entspannten Zustand nach rechts und links zu bewegen, und zwar mit fließenden Übergängen zwischen aufrechtem, angehobenem und gesenktem Kopf. Dabei sind die Augen geschlossen, um äußere visuelle Reize auszuschließen. Die Versuchspersonen werden angewiesen, diejenige Kopfposition zu erreichen, die ihnen subjektiv am angenehmsten für ihren Nacken erscheint. Die entsprechende Kopfneigung wird mit dem Neigungssensor erfasst. Der gesamte Vorgang wird dreimal durchgeführt und anschließend der Median als *Komfortable Kopfneigung* verwendet (vgl. Tabelle 2 A).

B) Trackingverhalten

In dieser Studie wird ein computergestütztes Kopf-Tracking verwendet, um die Präzision der Kopfbewegungen bei verschiedenen Kopfneigungen zu vermessen. Hierbei haben die Versuchspersonen die Aufgabe, durch horizontale Kopfbewegungen auf einer Projektionswand einen Cursor auf einem horizontal bewegten Zielobjekt zu führen (Bild 2 und 3). Der Cursor besteht aus einem vertikalen roten Strich von 1 mm Breite und 125 mm Höhe. Als Zielobjekt dient ein waagerechter blauer Balken von 50 mm Breite und 12 mm Höhe. Wenn die Versuchsperson den Strich nicht innerhalb der Balkenbreite halten kann, ertönt ein Signalton als negatives Feedback. Vertikale Abweichungen um bis zu einer halben Cursorlänge können in Kauf genommen werden. Solche vertikalen Abweichungen werden bei der Auswertung als Maß dafür herangezogen, dass sich der Kopf aus der Ausgangslage in Richtung auf eine mögliche Ruhelage zubewegt, die höher oder tiefer sein

Tabelle 2: Zusammenfassende Übersicht über die verwendeten Messparameter und ihre Definitionen, sowie die Test-Retest-Reliabilität (Korrelation zwischen den Sitzungen und einseitige p-Werte) und Ergebnisse (Gruppenmittelwerte, n=16) von Sitzung 2. Für die EMG-Aktivität gelten die Mittelwerte aus beiden Sitzungen (n=8). Die Pfeile symbolisieren die Mittelwerte, Nulldurchgänge, bzw. Minima der jeweiligen Messgrößen, bzw. gemittelten Funktionsverläufe

Table 2: Summary of the measured parameters and definitions, as well as the test-retest-reliability and results from Session 2 (mean values, n=16). For the EMG-activity, the mean of both sessions is presented (n=8). The arrows represent the mean values, zero-crossings, or minima of the mean functions for each parameter

	Messgröße	Definitionen	Retestreliaibilität	Gruppenmittelwerte von Sitzung 2
A	Komfortable Kopfneigung	Bei horizontalen Kopfbewegungen findet die Versuchsperson die für den Nacken angenehmste Kopfneigung (mit geschlossenen Augen)	$r = 0,68$ $p = 0,0019$	
B	Optimale Tracking-Kopfneigung	Beste Trackingpräzision = geringste Standardabweichung (SD) der horizontalen Cursorabweichungen	$r = 0,4205$ $p = 0,053$	
C	Ruhekopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen	(a) Beim Tracking: Geringste vertikale Abweichung VAT_r , ausgehend von verschiedenen Kopfneigungen	$r = 0,06$ $p = 0,4126$	
		(b) Mit geschlossenen Augen: Geringste vertikale Abweichung VA_{os} , ausgehend von verschiedenen Kopfneigungen	$r = 0,55$ $p = 0,0137$	
D	Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung	Geringste subjektive Anstrengung = geringste subjektive Einschätzung der Nackenanstrengung beim Tracking	$r = 0,45$ $p = 0,0401$	
E	Kopfneigung bei minimalem EMG	Geringste EMG-Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus beim Tracking	N. A.	

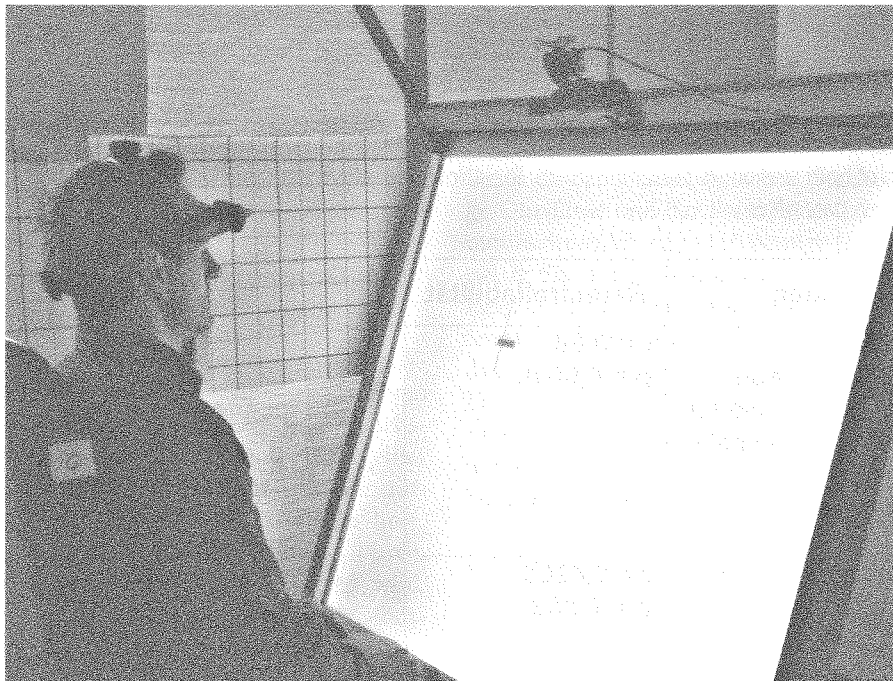


Bild 2: Versuchsperson beim Tracking: Auf einer Rückprojektionswand ist der Cursor (vertikaler Strich) durch Kopfbewegungen auf dem Zielobjekt (horizontaler Balken) zu führen. Dazu dient ein Kopfmaussystem mit einer Kamera oberhalb der Projektionswand

Figure 2: Subject during the tracking task: On a back projection screen, the cursor (vertical line) has to be kept on the target object (horizontal bar). This is made my means of a head mouse system

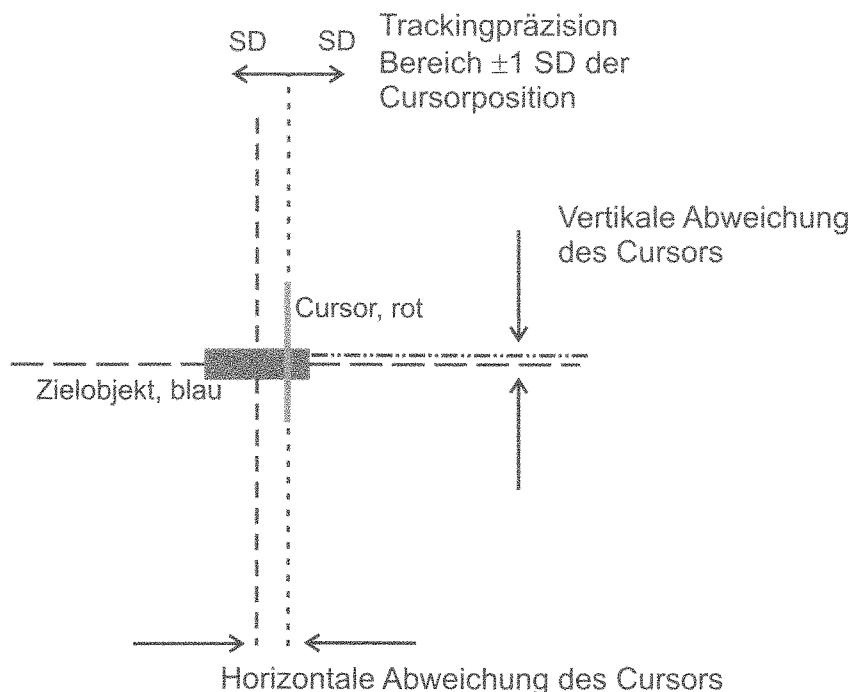


Bild 3: Schematische Darstellung der Cursorabweichung vom Mittelpunkt des Zielobjektes mit den spezifischen Messparametern

Figure 3: Display of the cursor deviation from the centre of the target object with specific parameters

kann. Die Länge des Cursors ist jedoch bewusst so gewählt, dass sie nicht in den Bereich einer anderen experimentell vorgegebenen Kopfneigung hineinragt.

Der Balken wandert entsprechend einer linearen Bewegung, die von zwei sinusförmigen Bewegungen überlagert ist. Dadurch bewegt sich der Balken nicht

mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts, sondern zwischendurch auch nach links und manchmal auch schneller nach rechts. Die Bewegung des Zielobjektes wird durch folgende Funktion beschrieben:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \\ &= -32\text{cm} + 2\frac{\text{cm}}{\text{s}} \times t + 3,7\text{cm} \times \sin \\ &\quad (2 \times \pi \times 0,1 \times t) + 3,7\text{cm} \times \sin(2 \times \pi \times 0,3 \times t) \end{aligned}$$

x_0 : Anfangsposition: 32 cm links von der Leinwandmitte

x_1 : lineare Bewegung nach rechts

x_2 : Überlagerte Sinusfunktion der Frequenz 0,1 Hz

x_3 : Überlagerte Sinusfunktion der Frequenz 0,3 Hz

Entsprechend dieser Funktion wird beim Tracking dreimal hintereinander von links nach rechts ein Winkel von 44° auf der Projektionswand durchlaufen.

Aus Bild 3 ist ersichtlich, mit welchem Vorzeichen und Betrag der Cursor vom Balken entfernt war. Ein negatives Vorzeichen bedeutet eine zu gering ausgeführte horizontale Kopfbewegung – der Cursor befindet sich links vom Ziel – oder eine abgesenkte vertikale Cursor- bzw. Kopfposition. Bei einem positiven Vorzeichen liegt eine überschießende horizontale Kopfbewegung vor – der Cursor ist zu weit rechts – oder eine angehobene vertikale Cursor- bzw. Kopfposition.

Die Messparameter der Trackingaufgabe sind die horizontale Standardabweichung (=Trackingpräzision) und die mittlere vertikale Cursorabweichung, beide in Abhängigkeit von der Ausgangs-Kopfneigung. Es wird zunächst vermutet, dass es eine bestimmte Kopfneigung gibt, in der die höchste Trackingpräzision vorliegt; dies ist die *optimale Tracking-Kopfneigung* (vgl. Tabelle 2 B). Weiterhin wird geprüft, ob der Kopf sich während der Trackingaufgabe auf eine Ruhelage zubewegt, nämlich die *Ruhe-Kopfneigung beim Tracking* (vgl. Tabelle 2 C a). Diese entspricht dem Nulldurchgang der Funktion der vertikalen Abweichungen (VA_{T_0}) in Abhängigkeit von der Ausgangs-Kopfneigung.

C) Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen

Dieser Test prüft die Hypothese, ob ein stark angehobener oder abgesenkter Kopf spontan in eine bestimmte da-

zwischenliegende Neigung strebt, wenn man leichte Kopfbewegungen nach rechts und links ausübt. Dazu wird nach dem Tracking die jeweils bestehende Kopfneigung beibehalten, also -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$ oder $+20^\circ$. Es erscheint ein Schriftzug mit der Anweisung: „Mit geschlossenen Augen Kopf im Tonrhythmus drehen“. Anschließend folgen zehn Signaltöne in einem Abstand von 1,3 Sekunden. Die Versuchspersonen haben die Aufgabe, in diesem Tonrhythmus den Kopf nach rechts und links zu drehen. Die Augen sind bei diesem Test geschlossen, damit die Projektionswand mit ihrem Rahmen keinen Einfluss auf die eingenommene Kopfneigung hat. Über die vertikalen Kopfpositionen der letzten fünf Sekunden dieses Testes wird der Mittelwert gebildet. Die mittlere Differenz von der Ausgangsposition dient als vertikale Abweichung des Kopfes ohne Sehreiz (VA_{OS}). Es wird erwartet, dass sich der Kopf durch die horizontalen Kopfbewegungen bei stark angehobener Ausgangsposition (z. B. $+20^\circ$) nach unten neigt und bei stark abgesenkter Ausgangsposition (z. B. -20°) nach oben; diese vertikalen Abweichungen werden gemessen, um aus einer Regressionsrechnung diejenige Kopfneigung zu bestimmen, bei der sich der Kopf vertikal nicht verstellt. Dieser Zustand wird als *Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen* bezeichnet (vgl. Tabelle 2 C b).

D) Subjektive Anstrengung

Die Versuchspersonen beurteilen die empfundene Beanspruchung nach jedem Trackingdurchgang bei der jeweiligen Kopfneigung auf einer visuellen Analogskala von 10 cm Länge; die Extrempunkte der Skala tragen die Bezeichnungen „Für den Nacken überhaupt nicht anstrengend“ und „Für den Nacken sehr anstrengend“. Diese Angaben tragen die Versuchspersonen auf einem Formblatt mit neun Skalen ein, sodass ihnen ihre Beurteilungen der vorherigen Versuchsbedingungen ersichtlich sind. Dies hilft bei der Ausbildung relativer Urteile. Parabelanpassungen an die subjektiven Beurteilungen der Anstrengung bei den fünf Kopfneigungen ergeben ein Minimum, das als *Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung* bezeichnet wird.

E) Elektromyographische Aktivität (EMG) Während des Trackings wird die Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus erfasst. Der Halsmuskel befindet

sich symmetrisch auf beiden Körperhälften und ist überwiegend für die Drehung des Kopfes nach rechts und links und - je nach Kopfdrehung - in geringem Maße auch für die Hebung und Senkung des Kopfes zuständig. Die zwei Oberflächenelektroden werden auf die Haut über dem Muskel entlang der Muskelfaserrichtung geklebt. Zusätzlich zu den vier Elektroden wird eine Referenzelektrode auf die Haut einer knöchernen Stelle, hier dem siebten Halswirbel (C7) angebracht. Die Aktivität des Halsmuskels wird anschließend als Funktion der Kopfneigung dargestellt. Vermutet wird, dass es eine Kopfneigung gibt, die die geringste Aktivität des Halsmuskels zeigt. Sie wird als *Kopfneigung bei minimalem EMG* definiert (vgl. Tabelle 2 E).

F) Komfortable Blickneigung

Die komfortable Blickneigung wird bei jedem Durchgang bestimmt, damit gewährleistet ist, dass sich die Augen bei vorgegebener Kopfneigung während des Trackings in einer angenehmen vertikalen Position befinden. Die komfortable Blickneigung wird bestimmt, indem die Versuchspersonen die Augen schließen, in entspanntem Zustand mit den Augen einige horizontale Bewegungen ausführen und dabei eine angenehme vertikale Augenposition erreichen. Nach den Augenbewegungen öffnen die Versuchspersonen die Augen und nennen spontan die Zahl auf einer vertikalen Zahlenskala, die sie als erstes wahrnehmen. Für das Tracking wird der Mauszeiger an diese vertikale Position auf der Skala verschoben.

2.4 Versuchspersonen

Es nahmen 21 Personen teil, überwiegend Studenten, Doktoranten und Mitarbeiter des Institutes, im Alter von 25 ± 3 Jahren (Bereich 20 bis 33 Jahre), davon waren 12 weiblich und 9 männlich. Die Probanden gaben eine schriftliche Einverständniserklärung ab, nachdem sie über die Untersuchungsmethoden informiert worden waren. Diese Untersuchungen waren Teil eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes (DFG JA 747/5-1), das von der Ethikkommission des IfADo befürwortet wurde.

Von den ursprünglich 21 Teilnehmern wurden 5 Probanden aus folgenden Gründen nicht in die statistische Analyse einbezogen. Bei einer Versuchsperson traten Messungenauigkeiten durch technische Probleme mit dem

Neigungssensor auf, eine weitere (nicht-deutschsprachige) Person hatte deutliche Verständnisprobleme. Der Versuch musste zusätzlich bei einer Versuchsperson bereits in der ersten Sitzung wegen Druckempfindlichkeit im Bereich des Kopfes abgebrochen werden. Im Mittel wiesen die verbleibenden 18 Versuchspersonen in der Entfernung von 80 cm ohne Sehhilfen einen binokularen Visus von $0,20 \pm 0,09$ LogMAR (Visus $1,58 \pm 0,9$ Visusstufen) auf. Zwei weitere Personen zeigten auffällige Daten der Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen. Deren Regressionsgeraden der vertikalen Abweichungen (Tabelle 2 C b) ergaben Schnittpunkte mit der x-Achse von 31° bzw. -172° , die nach dem Ausreißerkriterium von Dixon (Sachs, 1999) signifikant ($p < 0,05$) von der Verteilung der übrigen Probanden abwichen, die ansonsten Ruhe-Kopfneigungen zwischen -17° und $+17^\circ$ aufwiesen. Der Grund für diese abweichenden Daten könnte in Verständnisproblemen oder orthopädischen Auffälligkeiten liegen. Es verbleibt somit eine Gruppe von 16 Probanden mit einem vollständigen Datensatz aller abhängigen Variablen; dies ist erforderlich, um die Interkorrelationen zwischen den Indikatoren zu analysieren. Das EMG des Musculus Sternocleidomastoideus wurde in einer Teilstichprobe von 8 Probanden in beiden Sitzungen gemessen.

2.5 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf begann mit einem Probedurchgang in 0° -Kopfneigung, gefolgt von drei Lerndurchgängen in 0° -Kopfneigung. Erst danach wurde die angestrebte Variation der Kopfneigung vorgenommen, mit sechs Durchgängen in zufälliger Reihenfolge bei den vorbestimmten Kopfneigungen von -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, sowie bei der vorab bestimmten komfortablen Kopfneigung. Zwischen den Durchgängen hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, in einer Pause von maximal zwei Minuten den Nacken zu entspannen. Dieser Versuchsablauf fand für jede Versuchsperson zweimal im Abstand von ca. einer Woche statt.

3 Ergebnisse

3.1 Ziel und Strategie der Datenanalyse und darstellung

Gegenstand dieser Studie ist die physiologisch günstige Kopfneigung. Jedoch weniger mit dem Ziel, eine bestimm-

te feste Winkelstellung des Kopfes als quantitativen Optimalwert anzugeben. Dies ist schon deshalb nur eingeschränkt möglich, weil die für Messungen notwendigen Bezugslinien am Kopf (Auge-Ohr-Linie, Frankfurter Linie) zwischen Personen wegen individueller anatomischer Gegebenheiten variieren, was aber keine muskelphysiologische Bedeutung hat. Das Ziel besteht vielmehr in der Beschreibung physiologisch bedingter Funktionsverläufe in Abhängigkeit von der Kopfneigung. So werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Gibt es eine Kopfneigung von optimaler Trackinggenauigkeit?
- Strebt der Kopf bei horizontalen Kopfbewegungen in eine bestimmte Neigung?
- Gibt es eine Kopfneigung, bei der die Nackenanspannung subjektiv am geringsten eingeschätzt wird?
- Lässt sich eine Kopfneigung mit minimaler EMG-Aktivität bestimmen?

Für diese Funktionen erwarten wir einen günstigen Wert zwischen den Extrempositionen eines stark angehobenen, bzw. stark abgesenkten Kopfes. Eine solche vergleichende Darstellung von Funktionsverläufen ist in diesem Forschungsfeld neu und dient als Basis dafür, Schnelltestverfahren für die ergonomische Praxis vorzuschlagen, die den Beschäftigten eine eigene Erfahrung der persönlich angenehmen Kopfneigung vermitteln. Vor diesem Hintergrund sind gewisse Toleranzen in den Messmethoden und Untersuchungsverfahren akzeptabel. In den Experimenten geben wir verschiedene Kopfneigungswerte vor, jedoch nicht in dem Sinne, dass diese Werte gradgenau eingehalten werden. Wir lassen bewusst bei der Trackingaufgabe einen vertikalen Bewegungsspielraum durch die Länge des Cursorstriches, um so erfassen zu können, ob der Kopf in eine vertikale Ruhelage strebt. Insofern sind die verwendeten Kopfneigungsstufen von -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$ lediglich die anfangs eingestellten Werte; im Laufe des Versuchs kann die Kopfneigung um bis zu $\pm 4,5^\circ$ (entsprechend der Cursorlänge) abweichen. Gewisse unvermeidliche Streuungen in den Daten sind auch darauf zurückzuführen, dass die Kopfneigung bei freiem Kopf durch Anpeilen des Neigungsmessers und der Auge-Ohr-Linie eingestellt wurde und der Neigungssensor bei jeder Kopfneigungsstufe neu auf dem Kopf positioniert und entsprechend kalibriert wurde. Da diese Messvaria-

bilitäten zwischen Bedingungen und Personen schwanken, verwenden wir in der Datenanalyse und darstellung vereinfachend die Kopfneigungsstufen von -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$, was für die Beschreibung der angestrebten Funktionsverläufe hinreichend ist.

3.2 Betrachtung der einzelnen Messgrößen

Nachfolgend werden die Messergebnisse von 16 Versuchspersonen dargestellt. Neben den Test-Retest-Korrelationen werden die Ergebnisse, Mittelwerte und Standardabweichungen von Sitzung 2 dargestellt, da hier der Lerneffekt insbesondere bei der Trackingpräzision geringer ist und somit davon ausgegangen wird, dass die Daten konsistenter sind. Denn dieser Versuch beinhaltete eine Vielzahl von ungewöhnlichen Anforderungen, die die Versuchspersonen erst im Lauf der gesamten Sitzung 1 kennenlernten.

A) Komfortable Kopfneigung

Die individuellen Messwerte der komfortablen Kopfneigung wiesen eine gute Test-Retest-Korrelation ($R^2 = 0,46$, $r = 0,68$, $p = 0,0019$) zwischen beiden Sitzungen auf. Im Mittel lag die komfortable Kopfneigung in Sitzung 2 bei $+5,1 \pm 4,2^\circ$ (vgl. Tabelle 2 A). Die komfortable Kopfneigung wurde vor dem Trackingversuch von der Versuchsperson direkt eingestellt, unabhängig von den beim Tracking vorgegebenen Kopfneigungsstufen; somit ergibt sich für die komfortable Kopfneigung kein Funktionsverlauf.

B) Optimale Tracking-Kopfneigung

Die Trackingpräzision ist für jede Kopfposition (-20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$) in Tabelle 2 B dargestellt. Die resultierende Funktion entspricht jedoch nicht einer hypothesengerechten Parabel; individuelle Parabelanpassungen ergaben für den quadratischen Koeffizienten einen Mittelwert von $0,00005 \pm 0,004$, der nicht signifikant von Null abwich ($t(15) = 0,05$, $p = 0,95$, zweiseitig). Der Funktionsverlauf der Gruppenmittelwerte entspricht einer Geraden mit einer negative Steigung. Die individuellen Steigungen waren meist negativ mit einem Mittelwert von $0,026 \pm 0,038$; diese Verteilung wich signifikant vom Nullwert ab ($t(15) = 2,7$, $p = 0,015$ zweiseitig). Weiterhin betrug die Test-Retest-Korrelation zwischen den individuellen Steigungen $r = 0,4205$ ($p = 0,05265$). Damit wurde das Signifikanzniveau knapp verfehlt, es

konnte nur eine tendenzielle intraindividuelle Stabilität des Kopfneigungseffektes der Präzisionsleistung zwischen beiden Sitzungen nachgewiesen werden. Die optimale Tracking Kopfneigung (geringste horizontale Standardabweichung der Cursorabweichung) würde demnach bei einem angehobenen Kopf von $+20^\circ$ liegen (vgl. Tabelle 2, B).

C) Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen

a) Beim Tracking

Die gemittelten vertikalen Abweichungen beim Tracking als Funktion der Kopfneigung zeigten eine lineare Funktion der vorgegebenen Kopfneigungen von -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$; es ergab sich ein Nulldurchgang bei $-4,1^\circ$ (Tabelle 2 C a). Diese Mittelwertskurve bedeutet, dass bei diesem Winkel im Mittel die Kopfneigung über die Trackingdauer konstant blieb. Wie erwartet wich der Kopf bei höheren Ausgangspositionen nach unten ab und bei tieferen Ausgangspositionen nach oben. Jedoch erstreckten sich die individuellen Nulldurchgänge über einen Bereich von -50° bis $+43^\circ$ mit einer Standardabweichung von 24° ; somit lag der individuelle Nulldurchgang bei vielen Probanden außerhalb des Messbereiches von $+20^\circ$ bis -20° . Weiterhin bestand nur eine vernachlässigbare Test-Retest-Korrelation zwischen den Sitzungen ($r = 0,06$; $p = 0,4126$), sodass sich keine zuverlässigen individuellen Nulldurchgänge ergaben. Offenbar verhindert die Ausübung der Trackingaufgabe, dass die Probanden konsistent zu ihrer Ruhe-Kopfneigung tendierten.

b) Beim Test mit geschlossenen Augen

Bei dem im Anschluss an das Tracking durchgeführten Test bewegten die Probanden mit geschlossenen Augen den Kopf hin und her, ausgehend von der jeweiligen vorgegebenen Kopfneigung von -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$. Die resultierenden mittleren vertikalen Abweichungen wurden in Abhängigkeit von der vorgegebenen Kopfneigung dargestellt: sie zeigten einen deutlich linearen Zusammenhang (vgl. Tabelle 2 C b). Wie erwartet ergaben sich bei horizontalen Kopfbewegungen mit angehobenem Kopf Abweichungen nach unten, bei gesenktem Kopf jedoch nach oben. Der Nulldurchgang der resultierenden Geraden in Tabelle 2 C gibt die Kopfneigung an, bei der im Gruppenmittelwert der Sitzung 2 keine vertikale Abweichung auftrat; dies ist die Position der mittlere

ren Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen. Es ergab sich eine signifikante Test-Retest-Korrelation zwischen den individuellen Nulldurchgängen von Sitzung 1 und Sitzung 2 ($R^2 = 0,30$, $r = 0,55$, $p = 0,0137$). Der Gruppenmittelwert der 2. Sitzung betrug $+4,5 \pm 8,9^\circ$.

D) Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung

Relativ zur Kopfneigung von 0° stieg die subjektiv skalierte Nackenanstrengung beim Absenken und Anheben des Kopfes in gleichem Maße an (vgl. Tabelle 2 D). Individuelle Parabelanpassungen führten zu einem Mittelwert des quadratischen Koeffizienten von $0,0505 \pm 0,0525$, der signifikant von Null abweicht ($t(15) = 3,85$, $p = 0,0016$, zweiseitig). Nur für zwei Probanden lagen die Minima der subjektiven Einschätzung außerhalb des Messbereichs von $\pm 20^\circ$, da in diesen Einzelfällen die Daten keiner Parabel entsprechen. Bei diesen Versuchspersonen wurde anstelle des Parabelminimums der tiefste Punkt innerhalb des Messbereiches als Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung gewertet. Die individuellen Minima waren zwischen beiden Sitzungen signifikant korreliert ($R^2 = 0,20$, $r = 0,45$, $p = 0,0401$). In Sitzung 2 lag der Mittelwert der individuellen Minima der subjektiven Anstrengung bei einer Kopfneigung von $-1,6 \pm 9,4^\circ$.

E) Kopfneigung bei minimalem

Nacken-EMG während des Trackings
Die Absolutwerte der EMG-Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus (Mittelwert der Aktivität des rechten und linken Teils des Muskelpaares) wurden durch die Referenzaktivität bei der 0° Kopfneigung dividiert. Die Ergebnisse zeigten einen parabelförmigen Verlauf: der Mittelwert der individuellen quadratischen Koeffizienten betrug $0,00054 \pm 0,00058$, was signifikant von Null abwich ($t(7) = 2,61$, $p = 0,035$ zweiseitig, berechnet aus dem Mittelwert beider Sitzungen bei 8 Probanden). Die individuellen Minima der Muskelaktivität ergaben eine mittlere Kopfneigung von $+3,6 \pm 11,4^\circ$ (vgl. Tabelle 2 E). Relativ zur Referenzbedingung bei 0° bestand eine signifikant höhere EMG-Aktivität bei extrem angehobenem Kopf ($+20^\circ$: $p = 0,012$, zweiseitig), wobei jeweils der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewendet und das Signifikanzniveau ($p < 0,05$) nach Bonferroni-Holms adjustiert wurde. In den Gruppenmittelwerten von

Sitzung 1, wo mit 13 Versuchspersonen eine größere Stichprobe vorlag, war dieser parabelförmige Zusammenhang tendenziell ebenso sichtbar.

F) Vergleichende Analysen

Hier werden diejenigen Indikatoren miteinander verglichen, die insofern reliabel waren, als sie signifikante Test-Retest-Korrelationen ergaben (Tabelle 2 A, C b und D). In Bezug auf die Mittelwerte

war die Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung beim Tracking ($-1,6 \pm 9,4^\circ$) signifikant niedriger im Vergleich sowohl zur komfortablen Kopfneigung ($5,1 \pm 4,2^\circ$; $t(15) = 3,25$; $p = 0,0028$, zweiseitig), als auch zur Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Augenneigungen mit geschlossenen Augen ($4,5 \pm 8,9^\circ$; $t(15) = 2,27$; $p = 0,0385$, zweiseitig). Die letzten beiden Indikatoren unterschieden sich nicht signifikant und waren beide mit

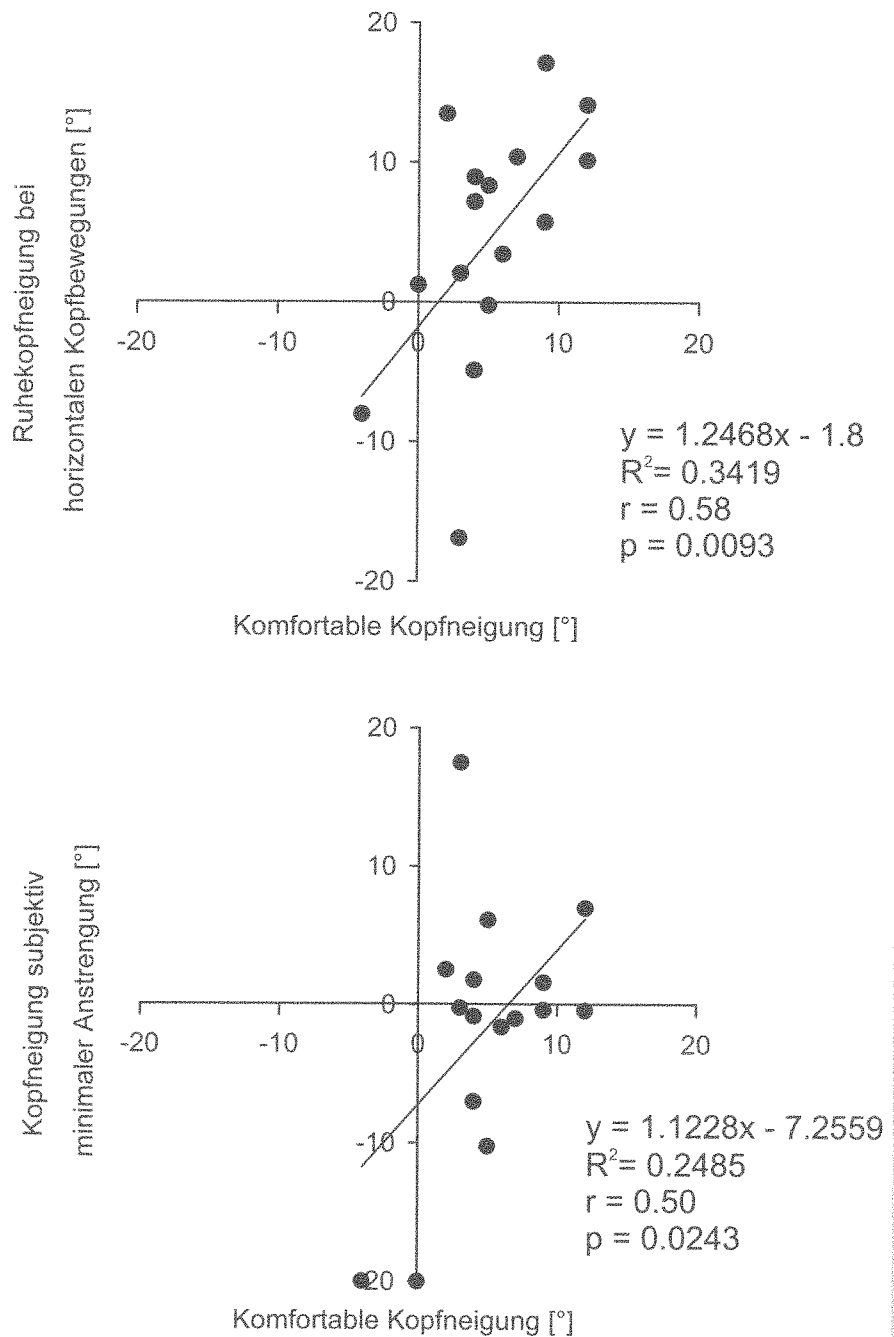


Bild 4: Korrelation zwischen der komfortablen Kopfneigung und zwei anderen Indikatoren der physiologisch günstigen Kopfneigung: (1) Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Augenbewegungen mit geschlossenen Augen und (2) Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung. (Sitzung 2, 16 Probanden)

Figure 4: Correlation between the comfortable head inclination and two other indicators of the physiologically favorable head inclination: (1) resting head inclination with horizontal head movements and closed eyes and (2) head inclination of subjectively minimal strain. (Session 2, 16 subjects)

geschlossenen Augen gemessen worden, um externe visuelle Einflüsse auszuschließen. Die günstige Kopfneigung war somit im Mittel bei geschlossenen Augen um etwa $6,5^\circ$ höher, als wenn beim Tracking die Sehreize auf dem Projektionsschirm beobachtet wurden.

Trotz dieser Mittelwertunterschiede bestehen die in Bild 4 dargestellten individuellen Unterschiede und Interkorrelationen. Die vor dem Versuch bestimmte komfortable Kopfneigung war signifikant korreliert mit der Ruhe-Kopfneigungen bei horizontalen Augenbewegungen ($r = 0,58$; $p = 0,0093$, einseitig); die Regressionsgerade weicht nicht wesentlich von der Identitätlinie $y = x$ ab; beide Messgrößen wurden mit geschlossenen Augen erhoben. Weiterhin ist die komfortable Kopfneigung signifikant mit der Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung korreliert ($R^2 = 0,25$, $r = 0,50$, $p = 0,0243$, einseitig); hier weicht die Regressionsgerade von der Identitätlinie $y=x$ ab, was den Mittelwertunterschied zwischen beiden Maßen widerspiegelt. Hingegen besteht keine signifikante Korrelation zwischen der Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung und der Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Augenbewegungen mit geschlossenen Augen ($R^2 = 0,10$, $r = 0,31$, $p = 0,1213$, einseitig).

4 Diskussion

Die Ergebnisse der horizontalen Trackingpräzision zeigten, dass die Trackingaufgabe umso genauer ausgeführt wurde, je mehr der Kopf angehoben war. Eine mögliche Erklärung bietet die physiologische Kokontraktion, bei der gleichzeitig antagonistische Muskeln aktiviert sind. Für Armbewegungen wurde z. B. beschrieben, dass sich die Kokontraktion und die Bewegungspräzision bei kleineren, also schwierigeren Zielobjekten erhöhten (Bennett et al. 1992; Song et al. 2013; Gribble et al. 2003). In der vorliegenden Studie haben die Versuchspersonen möglicherweise auf die ungewohnte, komplexe Bewegung des Trackingziels, insbesondere bei extrem angehobener Kopfhaltung von $+20^\circ$, mit stärkerer Kokontraktion reagiert und dadurch eine bessere horizontale Trackingpräzision erzielt. Jedoch war die Änderung der Trackingpräzision mit der Kopfneigung vom Betrag her sehr klein, nämlich 1 Pixel, entsprechend einem Winkel von ca. $0,09^\circ$. Dies kann in keinem Fall eine Bedeutung für die

Arbeit am Bildschirm oder bei anderen beruflichen Tätigkeiten haben. Somit ergab sich – entgegen der Erwartung – aus der horizontalen Trackingleistung keine Funktion, die im mittleren Bereich ein Optimum und bei extremen Kopfneigungen nach oben und unten ungünstigere Werte lieferte, so wie dies bei den anderen Indikatoren der Fall war. Eine physiologisch günstige Kopfneigung kann demnach nicht aus den Ergebnissen der Trackinggenauigkeit ermittelt werden.

Das konzeptionelle Ziel dieser Studie bestand darin, die physiologisch günstige Kopfneigung aus verschiedenen Indikatoren zu ermitteln. Insbesondere ging es um solche Messgrößen, die funktionell von der Kopfneigung abhängen. So konnte gezeigt werden, dass der Kopf – ausgehend von höheren oder tieferen Kopfneigungen – bei horizontalen Bewegungen mit geschlossenen Augen in eine bestimmte Neigung strebte; relativ zu dieser Ruhe-Kopfneigung wurden höhere und niedrigere Kopfneigungen bei der Trackingaufgabe zunehmend anstrengend im Nacken empfunden und führten auch zu höherer Aktivität im Musculus Sternocleidomastoideus. Die ermittelten U-förmigen Beanspruchungskurven (Tabelle 2 D und E) erwiesen sich hier als symmetrisch in Richtung einer Kopfanhebung und Kopfablenkung; entsprechend erscheinen die Regressionsgeraden der vertikalen Kopfablenkung bei der Messung der Ruhe-Kopfneigung (Tabelle 2 C) wie Ableitungen der Parabelfunktionen (Tabelle D und E). Bei Kopfanhebungen und Kopfablenkungen kommt es somit zu einem quantitativ ähnlich starken Anstieg der Beanspruchung. Jedoch könnten die zugrundeliegenden Mechanismen unterschiedlich sein. Bei zunehmender Absenkung des Kopfes verlagert sich der Schwerpunkt des Kopfes nach vorne und tendenziell vor den Hals, sodass durch die Schwerkraft ein zunehmendes Drehmoment von der Nackenmuskulatur aufgenommen werden muss; eine Anhebung des Kopfes muss gegen die Steifheit der Muskel-Skelett-Strukturen ausgeübt werden, auch wenn der Schwerpunkt des Kopfes über dem Hals bleibt (Straker et al. 2009). Trotz dieser unterschiedlichen Mechanismen für die Kopfanhebung und Kopfablenkung erscheinen die Beanspruchungskurven in Tabelle 2 symmetrisch.

Die Beschreibung solcher Beanspruchungskurven ist zunächst sinnvoll,

um abschätzen zu können, wie deutlich die Beanspruchung zunimmt, wenn ein Muskelsystem aus dem Beanspruchungsminimum ausgelenkt wird. Wir finden für die Kopfneigung noch keine signifikante Zunahme der subjektiv empfundenen Nackenanstrengung beim Auslenken des Kopfes um 10° nach oben oder unten. Weiterhin können Beanspruchungskurven verschiedener Muskelsysteme überlagert werden, um die kombinierte Beanspruchung abschätzen zu können. Zum Beispiel führt eine bestimmte Monitorhöhenposition zu einer Kombination von vertikalen Auslenkungen des Kopfes und der Augen; für beide Mechanismen bestehen separate Beanspruchungskurven (Menozzi et al. 1994, von Buol 2002, Maseida et al. 2013). Weitere Beanspruchungsfunktionen sind die Änderung der Vergenzruhelage, der beidäugigen Koordination und der Akkommodation mit der Kopf- bzw. Augenneigung (Ripple 1952; Jaschinski et al. 1998) oder die Funktion der Schärfbereiche bei Gleitsichtbrillen (König & Jaschinski 2009). Alle diese Funktionsverläufe können für die resultierende Gesamtbeanspruchung von Bedeutung sein. Ein theoretisches Optimum wäre ein gleichzeitiges Minimum der verschiedenen Beanspruchungsfunktionen. Das ist jedoch wegen gegenläufiger Beanspruchungsfunktionen nicht möglich: mit zunehmendem Abwärtsblick verbessern sich z. B. die beschriebenen Sehfunktionen, während die hier dargestellte Kopfneigungsbeanspruchung zunimmt. Eine Analyse solcher teilweise gegenläufigen Beanspruchungsfunktionen beschrieben Heuer et al. (1991) für die Augenneigung und die damit verbundene Nahverschiebung der Ruhe-Konvergenzstellung. Die Kenntnis von Beanspruchungsfunktionen kann somit nützlich sein, um zu beurteilen, welche physiologischen Mechanismen bei bestimmten Arbeitsplatzbedingungen überbeansprucht werden, bzw. wie groß die Toleranzbereiche für die jeweiligen Funktionen sind. Innerhalb dieser Toleranzbereiche ist eine normale Variabilität der Augen-, Kopf- und Körperhaltung sinnvoll. Denn unsere physiologischen Systeme sind für dynamische Veränderungen ausgelegt: auch eine optimierte Haltung sollte nicht über Stunden statisch beibehalten werden.

Auch die EMG-Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus zeigte bei den hier untersuchten horizontalen Tracking-Kopfbewegungen im Mittel einen

parabelförmigen Verlauf mit einem Minimum bei $+3,6^\circ$. Dies entspricht tendenziell dem Befund von Sommerich et al. (2001), die bei Computerarbeit eine stärkere EMG-Aktivität mit zunehmendem Abwärtsblick auf -17° , bzw. -35° bei verschiedenen Nacken- und Rückenmuskeln feststellten, z. B. beim Musculus Sternocleidomastoideus und bei verschiedenen Extensormuskeln in der Hals-Nacken-Region. Delleman (2004) beschrieb eine Studie von Lee et al. (1986), in der erst Kopfabwärtsneigungen um mehr als 45° zu einem deutlichen Anstieg der EMG-Aktivität in der Hals-Nacken-Region führten. Chaffin et al. (1999) fanden, dass Kopfablenkungen um 15° auch nach 6 Stunden keine subjektiven Beschwerden oder erhöhte EMG-Aktivitäten bewirken. Die Literaturbefunde sind somit uneinheitlich in Bezug auf die Kopfablenkung und unvollständig, was die Kopfanhebung angeht. Straker et al. (2009) analysierten in einem biomechanischen Modell die komplexen Interaktionen verschiedener Muskelgruppen, die an der Kopfneigung unter Schwerkrafteinfluss beteiligt sind: sie betonen die Bedeutung der tiefer liegenden Muskulatur im oberen Teil der Halswirbelsäule und insbesondere diesbezügliche individuelle Unterschiede. Zwar erlauben die EMG-Befunde der vorliegenden Studie noch keine differenzierten muskelphysiologischen Bewertungen, zumindest finden wir jedoch im Gruppenmittel bei horizontalem Kopftracking einen ähnlichen parabelförmigen Verlauf der Aktivität des Musculus Sternocleidomastoideus und der subjektiven Anstrengung.

Bei synoptischer Betrachtung der Ergebnisse aus Tabelle 2 wird deutlich, dass die meisten Indikatoren eine günstige Kopfneigung ergaben, die etwa in der Mitte des Untersuchungsbereiches von 20° bis $+20^\circ$ lag (relativ zur Frankfurter Linie). Reliable Ergebnisse (mit signifikanten Test-Retest-Korrelation) ergaben sich für die komfortable Kopfneigung (Gruppenmittelwert: $+5,1^\circ$), die Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen ($+4,5^\circ$) und die Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung beim Tracking ($-1,6^\circ$). Dabei deuten die Daten darauf hin, dass es eine Rolle spielen könnte, ob bei diesen Tests ein Sehreiz präsentiert wird oder nicht. Denn bei der Kopftrackingaufgabe - mit visuellem Reiz - war die subjektive Anstrengung bei einer mittleren Kopfneigung

von $-1,6^\circ$ minimal; dies ist um etwa 6° niedriger, als wenn die Augen geschlossen waren, nämlich bei der komfortablen Kopfneigung ($+5,1^\circ$), bzw. bei der Ruhe-Kopfneigung bei horizontalen Kopfbewegungen ($+4,5^\circ$). Dies würde unseren parallelen Ergebnissen zur Ruhe-Augenneigung bei fester komfortabler Kopfneigung entsprechen (Masseida et al. 2013): auch die dabei resultierende günstige Blickneigung war um 5° niedriger, wenn ein visueller Reiz beurteilt wurde, als wenn zur Erzielung einer Augenmuskelruhelage kein Sehreiz präsent war. Daraus lässt sich zumindest die Hypothese ableiten, dass ohne visuelle Reize die Kopf- und Augenneigung solche Zustände einnehmen, die allein durch die jeweiligen Muskelruhelagen bestimmt werden und dass durch visuell vermittelte Reize und Aufgaben niedrigere Augen- und Kopfneigungen induziert werden. Dies ist bemerkenswert, da die Sehabstände bei diesen Tests mit 80 cm etwa der Ruhelage der Akkommodation und Konvergenz entsprechen, wo die Beanspruchung dieser Augensysteme minimal ist (Jaschinski 1999a). Erst bei geringeren Sehabständen von 40 cm oder näher kann eine Absenkung der Augen bzw. des Kopfes dazu beitragen, diese Augensysteme zu entlasten (Jaschinski et al. 1998). Dieser Mechanismus könnte sich im Laufe der Evolution entwickelt haben, da das Nahsehen typischerweise mit einem Abwärtsblick verbunden ist.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie gelten zunächst für eine aufrechte Sitzhaltung, die die Probanden einnahmen. Im Büroalltag ist jedoch das dynamische Sitzen vorteilhaft, also ein Wechsel zwischen zurückgelehnter, aufrechter und vorgeneigter Sitzhaltung (BGI 650). Carter & Banister (1994) verglichen diese Sitzpositionen und kamen zu dem Schluss, dass alle drei Sitzhaltungen wichtige Vorteile haben, aber auch mit Nachteilen verbunden sind. Das Zurücklehnen ist vorteilhaft, weil dabei der Druck auf die Bandscheiben und auch die isometrische Beanspruchung der Rückenmuskeln geringer sind (Grandjean et al. 1983); beim Blick auf den Monitor wird dann jedoch der Kopf stärker vorgeneigt und entsprechend der Nacken angespannt (Carter & Banister 1994). Ein Wechsel der Sitzhaltung ist daher anzustreben. Die gewählte Sitzhaltung wirkt sich auf die eingenommene Kopfhaltung aus. Gray et al. (1966) ließen Probanden auf einem Hocker ohne Rückenlehne nach eigenem Empfinden die „möglichst komfortable“ Sitzhaltung, die „beste“ Sitzhaltung und die „höchste“ Sitzhaltung einnehmen, es ergaben sich entsprechende Kopfneigungen von 0° , 15° und 14° (umgerechnet auf die Frankfurter Linie). Unter Bürobedingungen bei typischer Computerarbeit fanden Delleman & Berndsen (2002) jedoch eher geringe Unterschiede in der eingenommenen Kopfneigung, wenn Probanden eine aufrechte oder um 15° zurückgelehnte Sitzhaltung einnahmen. Dennoch kann die Sitzhaltung - neben anderen Experimentalbedingungen - dazu beitragen, dass verschiedene Studien sich in den Befunden zur günstigen Kopfneigung unterscheiden.

Die Mittelwerte dieser Studie sollen nun Befunden früherer Studien gegenübergestellt werden, in denen jeweils eine aufrechte Sitzhaltung mit Rückenabstützung angewendet wurde. Zur Vergleichbarkeit ist jeweils die Frankfurter Linie angegeben; die Auge-Ohr-Linie ist im Mittel um 11° positiver, d. h. höher. Jampel & Shi (1992) beschrieben etwa $+4^\circ$ (bei aufrechtem Kopf und Geradeausblick). Ein Verfahren entsprechend der oben beschriebenen komfortablen Kopfneigung ergab eine Neigung von -3° bei 24 jungen Erwachsenen (Ankrum & Nehmet 2000), eine Neigung von $-4,5^\circ$ bei 8 alterssichtigen Gleitsichtbrillenträgern (Jaschinski 2008), jedoch eine höhere Neigung von $5,5$ Grad bei 16 jungen Erwachsenen (Schulz & Jaschinski 2009). Von Buol (2002) fand bei 22 Probanden ein Anstrengungsminimum beim kopfgeführten Ausrichten eines Laserstrahls bei einer Kopfneigung von -8° . Die Gründe für Unterschiede zwischen den Befunden könnten in den jeweiligen Seh- und Testbedingungen liegen und auch in individuellen Unterschieden angesichts der teils kleineren Stichproben; nach Gray et al. (1966) haben Männer eher eine höhere Kopfneigung als Frauen. Angesichts all dieser Einflussgrößen kann ein Mittelwert zwar eine grobe Richtschnur geben, für den einzelnen kommt es angesichts individueller Unterschiede jedoch darauf an, das persönliche Optimum zu finden. Diese Studie belegt individuelle Unterschiede in drei Messgrößen (Bild 4): die im Schnelltest erhobene komfortable Kopfneigung ist korreliert mit zwei weiteren Indikatoren, nämlich (1) mit der Kopfneigung subjektiv minimaler Anstrengung bei Tracking und (2) mit der Ruhe-Kopfneigung, die keine Neigungs-

änderungen bei horizontalen Kopfbewegungen mit geschlossenen Augen induzierten. Diese drei Indikatoren wurden in verschiedenartigen Testsituationen erhoben, was auf eine Validität hinweist, die über eine einzelne Testbedingung hinausreicht. Diese Messgrößen des Kopfbewegungsverhaltens und deren subjektive Bewertung könnten in der weiteren Forschung - auch mit größeren Stichproben - eine Ausgangsbasis sein, um Bezüge zu muskelphysiologischen Maßen zu untersuchen. So betonen auch Straker et al. (2009) in ihren muskelphysiologischen Modellierungen die Bedeutung von individuellen Unterschieden.

Bei der ergonomischen Höhenpositionierung von Monitoren bei Computerarbeit können die hier und in Masseida et al. (2013) beschriebenen Tests den Beschäftigten eine unmittelbare Erfahrung davon vermitteln, dass Menschen sich in der komfortablen Neigung des Kopfes und auch der Neigung der Augen relativ zum Kopf unterscheiden. Masseida et al. (2013) zeigten weiterhin, dass offenbar die günstige Blickneigung von verschiedenen äußeren Bedingungen abhängig ist. Bei eher geringen Abständen zum Bildschirm und bei hohen visuellen Anforderungen empfehlen sich tiefer aufgestellte Monitore, um dadurch die Akkommodation und Konvergenz zu unterstützen. Die Schnellteste für die komfortable Kopf- bzw. Blickneigung (Masseida et al. 2013) beziehen sich auf eine Situation mit geschlossenen Augen, also ohne wirksamen visuellen Reiz: die Befunde sprechen dafür, die Schnelltestergebnisse sowohl für die Kopfneigung als auch für die Blickneigung jeweils um etwa 5° nach unten zu korrigieren, um den visuellen Bedingungen am Arbeitsplatz zu entsprechen.

Daraus resultiert im Mittel eine günstige Blickneigung von etwa -20° relativ zur Horizontalen, mit einem inter-individuellen Bereich zwischen etwa -10° und -30°. Die Befunde dieser Laborstudien entsprechen der Literaturrecherche von Allie et al. (2005), den biomechanischen Modellierungen von Straker et al. (2009) und werden durch Feldstudien bestätigt, in denen entsprechende Höhenpositionen von frei verstellbaren Bildschirmen von den Nutzern bevorzugt werden (Allie et al. 2010; König & Jaschinski 2012; Meinert et al. 2013).

Aber auch in anderen Bereichen taucht die Frage nach einer günstigen Kopfneigung auf, z. B. bei der Verwendung von

Kamerahaltesystemen in der Chirurgie, welche u. a. durch Kopfbewegungen des Chirurgen gesteuert werden (Bolbach et al. 2010). Bei der Zentrierung von Gleitsichtbrillen ist die natürliche Kopf- und Körperhaltung wichtig für das exakte Bestimmen der Durchblickpunkte im Gleitsichtbrillenglas (Wesemann 2009; Brunner & Schlemmer 2010). Abschließend sei erwähnt, dass Muskel-Skelett-Beschwerden trotz einer ergonomischen Optimierung möglicherweise fortbestehen können; dann sollte ein Arbeitsmediziner oder Orthopäde zu Rate gezogen werden.

Danksagung

Die Autoren danken Prof. Dr. M Fritz, PD Dr. M. Jäger und Prof. Dr. A. Luttmann für die Unterstützung bei den EMG-Analyse und Dipl.-Stat. M. T. Meckert für Teile der statistischen Analysen.

Literaturverzeichnis

Allie, P.; Purvis, C.; Kokot, D.: Computer display viewing angles: is it time to shed a few degrees? Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 49th annual meeting, 798-802, 2005

Allie, P.; Bartha, M. C.; Kokot, D.; Purvis, C.: A field observation of display placement requirements for presbyopic and prepresbyopic computer users. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 54th annual meeting, 709-713, 2010

BildscharbV (Bildschirmarbeitsverordnung): Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten. Anhang über an Bildschirmarbeitsplätze zu stellende Anforderungen. In Kraft getreten am 20.12.1996

Ankrum, D.; Nemeth, K.: Head and neck posture at computer workstations - What's neutral? Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association. 5, 565-568, 2000

Ariëns, G. A. M.; Bongers, P. M.; Douwesa, M.; Miedema, M. C.; Hoogendoorn, W. E.; van der Wal, G.; Bouterb, L.M.; van Mechelen, W.: Are neck flexion, neck rotation, and sitting at work risk factors for neck pain? Results of a prospective cohort study. Occupational and Environmental Medicine 58, 200-207, 2001

Bennett, D. J.; Hollerbach, J. M.; Xu Y.; Hunter, I. W.: Time-varying stiffness of human elbow joint during cyclic voluntary movement. Experimental Brain Research 88, 433-442, 1992

Bolbach, U.; Orth, S.; Do, M.; Kreutzer, N.; Kress, A.; Klimmer, F.; Luttmann, A.; Stolzenburg, J. U.; Truß, M.: Einsatz eines Roboter-Kamerahaltesystems im Vergleich zum menschlichen Kameraassistenten bei der EERPE - eine prospektive Studie (V19). 56. Kongress der Nordrhein-Westfälischen Gesellschaft für Urologie. N.-W. G. f. U. e. V. Dortmund, 2010

Brunner, O.; Schlemmer, F.: Von der statischen zur dynamischen Messung: Das Dymeter-Verfahren zur vertikalen Zentrierung. Deutsche Optikerzeitung 2, 32-38, 2010.

Carter, J. B.; Banister, E. W.: Musculoskeletal problems in VDT work: a review. Ergonomics 37, 1623-1648, 1994

Chaffin, D. B.: Localized muscle fatigue--definition and measurement. Journal of Occupational Medicine 15, 346-354, 1973

Chaffin, D. B.; Andersson, G. B. J.; Martin B. J.: Occupational Biomechanics. New York: Wiley & Sons Inc, 1999

Daye, P. M.; Blohm, G.; Lefevre, P.: Target motion direction influence on tracking performance and head tracking strategies in head-unrestrained conditions. Journal of Vision 12, 2012

Delleman, N. J.; Haslegrave, C. M.; Chaffin, D. B.: Working Postures and Movements. Boca Raton USA: CRC Press 2004

Delleman, N. J.; Berndsen, M. B.: Touch-typing VDU operation: workstation adjustment, working posture and workers' perceptions. Ergonomics 45, 514-535, 2002

Fogt, N.; Luthman, N.: Ocular Fixation During Eye and Head Tracking With and Without a Visual Cue to Head Position. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 73, 1031-1037, 2002

Gesetzliche Unfallversicherung (VBG): BGI 650: Bildschirm- und Büroarbeitsplätze - Leitfaden für die Gestaltung. Version 2.0/2012-08, 2012

Grandjean, E.; Hünting, W.; Piderman, M.: VDT workstation design: preferred settings and their effects, Human Factors 25, 161-175, 1983

Gray, F. E.; Hanson, J. A.; Jones, F. P.: Postural Aspects of Neck Muscle Tension. Ergonomics 9, 245-256, 1966

Gribble, P. L.; Mullin, L. I.; Cothros, N.; Mattar, A.: Role of Cocontraction in Arm Movement Accuracy. Journal of Neurophysiology 89, 2396-2405, 2003

Heuer, H.; Brüwer, M.; Römer, T.; Kröger, H.; Knapp, H.: Preferred vertical gaze direction and observation distance. Ergonomics 34, 379-392, 1991

Jampel, R. S.; Shi, D. X.: The primary position of the eyes, the resetting saccade, and the transverse visual head plane. Head movements around the cervical joints. Investigative Ophthalmology & Visual Science 33, 2501-2510, 1992

Jaschinski, W.: Die Bedeutung von Sehabstand und Blickneigung für individuelle Sehfunktionen und visuelle Ermüdung am Bildschirmarbeitsplatz. Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin 34, 225-230, 1999a

Jaschinski, W.: Zur individuellen ergonomischen Gestaltung am Bildschirmarbeitsplatz: Sehabstand und Blickneigungswinkel. Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin 34, 277-281, 1999b

Jaschinski, W.: Niedrig aufgestellte Flachbildschirme erleichtern die Benutzung von Universal-Gleitsichtbrillen am Bildschirmarbeitsplatz. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 58, 172-180, 2008

Jaschinski, W.; Koitcheva, V.; Heuer, H.: Fixation disparity, accommodation, dark vergence and dark focus during inclined gaze. Ophthalmic and Physiological Optics 18, 351-359, 1998

- Jaschinski, W.; Heuer, H.; Kylian, H.:** A procedure to determine the individually comfortable position of visual displays relative to the eyes. *Ergonomics* 42, 535-549, 1999
- König, M.; Jaschinski, W.:** Eine Feldstudie zur individuellen Bildschirmpositionierung für Brillenträger der Generation 40plus. Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme. 58. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. G. f. A. e. V. Universität Kassel, Gfa-Press: 419-422, 2012
- König, M.; Jaschinski, W.:** Individuelle Gestaltung des Bildschirmarbeitsplatzes für die Generation 40 plus - ein Beratungskonzept. *Angewandte Arbeitswissenschaft* 44-59, 2009
- Krueger, H.; Hessen, J.; Zülch, J.:** Bedeutung der Akkommodation für das Sehen am Arbeitsplatz. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 36, 159-163, 1982
- Lee, K.; Waiker, A. M.; Aghazadeh, F.; Tandon, S.:** An electromyographic investigation of neck angles for microscopists. *Human Factors Society 30th Annual Meeting, Santa Monica, Human Factors Society, 1986*
- Luttmann, A.:** Untersuchung von Muskelbeanspruchung und -ermüdung mithilfe der Oberflächen-Elektromyographie - Teil 1: Physiologische Grundlagen und EMG-Kenngrößen. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* 51, 426-442, 2001
- Masseida, J.; Perske, F.; Jaschinski, W.:** Messmethoden und Eigenschaften der physiologisch günstigen Blickneigung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 67, 221-231, 2013
- Meinert, M.; König, M.; Jaschinski, W.:** Web-based office ergonomic intervention on work-related complaints: a field study. *Ergonomics*, published online: 30. September 2013.
- Menozzi, M.; von Buol, A.; Itschner, L.; Saluz, L.; Krueger, H.:** Die Eignung verschiedener cephalometrischer Bezugslinien für die Bestimmung der vertikalen Ausrichtung des Kopfes. *Z Morphol Anthropol* 81 205-215, 1996
- Menozzi, M.; V. Boul, A.; Krueger, H.; Miège, Ch.:** Direction of gaze and comfort: discovering the relation for the ergonomic optimization of visual tasks. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 14, 393 - 399, 1994
- Oullier, O.; Bardy, B. G.; Stoffregen, T. A.; Bootsma, R. J.:** Postural coordination in looking and tracking tasks. *Human Movement Science* 21, 147-167, 2002
- Ripple, P. H.:** Variation of accommodation in vertical direction of gaze. *American Journal of Ophthalmology* 35,1630-1634, 1952
- Sachs, L.:** *Angewandte Statistik*. Berlin: Springer, 1999
- Song, R.; Tong, K.-Y.; Hu, X.; Li, L.; Sun, R.:** Arm-eye coordination test to objectively quantify motor performance and muscles activation in persons after stroke undergoing robot-aided rehabilitation training: a pilot study. *Experimental Brain Research* 2013 Feb 1. [Epub ahead of print]
- Schäfer, A.; Klusmann, A.; Lang, K. H.; Gebhardt, H.:** Veränderungen an Bildschirmarbeitsplätzen von 1995 bis heute: Eine Auswertung von Erhebungen mit dem Bildschirmarbeitsplatz-Fragebogen „BiFra“. *Produkt- und Produktions-Ergonomie - Aufgabe für Entwickler und Planer*. 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. G. f. A. e. V. Technische Universität München, Gfa-Press: 474-478, 2008
- Schmidtke, H.:** *Lehrbuch der Ergonomie*. München: Carl Hanser Verlag 1981
- Schulz, F.; Jaschinski, W.:** Objektive und subjektive Messungen zur bequemen vertikalen Blickneigung. In: *Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert: Bericht zum 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 4.-6. März 2009, Dortmund (S. 739-742) / hrsg. von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.; Schriftlgt.: Martin Schütte. Dortmund: GfA-Press, 2009*
- Sommerich, C. M.; Joines, S. M. B.; Hermans, V.; Moon, S. D.:** Use of surface electromyography to estimate neck muscle activity. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 10, 377-398, 2000
- Sommerich, C. M.; Joines, S. M.; Psihogios, J. P.:** Effects of computer monitor viewing angle and related factors on strain, performance, and preference outcomes. *Human factors* 43, 39-55, 2001
- Song, R.; Tong, K.-Y.; Hu, X.; Li, L.; Sun, R.:** Arm-eye coordination test to objectively quantify motor performance and muscles activation in persons after stroke undergoing robot-aided rehabilitation training: a pilot study. *Experimental Brain Research* 2013 Feb 1. [Epub ahead of print]
- Straker, L.; Skoss, S.; Burnett, A.; Burgess-Limerick, R.:** Effect of visual display height on modelled upper and lower cervical gravitational moment, muscle capacity and relative strain. *Ergonomics* 52, 204-221, 2009
- Von Buol, A.:** *Der Einfluss von Gleitsichtbrillen auf Kopf- und Augenbewegungen*. Dissertation, Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, 2002
- Wesemann, W.:** *Moderne Videozentriersysteme und Pupillometer im Vergleich, Teil 1*. Deutsche Optikerzeitung 6, 2009
- Willigenburg, N. W.; Kingma, I.; Hoozemans, M. J. M.; van Dieën, J. H.:** Precision control of trunk movement in low back pain patients. *Human Movement Science*,32(1), 228-239, 2013

Anschrift der Verfasser

M. Sc. Judith Masseida

IfAdo - Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund
Ardeystr. 67
D-44139 Dortmund

Dipl.-Phys. Jens-Joachim Philipp
Dr. rer. nat. Carola Wicher
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena
Fachbereich SciTec
Carl-Zeiss-Promenade 2
D-07745 Jena

Dr.-Ing. Wolfgang Jaschinski
IfAdo - Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund,
Ardeystr. 67
D-44139 Dortmund