

Beidäugige Koordination in Sehbedingungen von Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen

· *Blickbewegungen* · *Head-up-Display* · *Vergenz*

Zusammenfassung

Bei der Gestaltung von Instrumenten in Straßenfahrzeugen als Head-up-Display werden die Informationen an anderen Sehentfernungen als bei konventionellen Anzeigeelementen angeboten. Dadurch werden die Anforderungen an die binokulare Koordination gegenüber der herkömmlichen Gestaltung verändert. Es wurde ein Laborexperiment durchgeführt, bei dem die Auswirkungen der unterschiedlichen Sehentfernungen und ihr Zusammenwirken mit unterschiedlichen Anzeigepositionen untersucht werden. Variiert man die vertikale Position des Head-up-Displays, so hat dies einen statistisch signifikanten Einfluss auf die maximale Vergenzgeschwindigkeit; die Größe des Effekts ist jedoch zu gering, um zu ergonomisch vorrangigen Gestaltungshinweisen Anlass zu geben. Eine herkömmliche Anzeige stellt zwar eine höhere Vergenzanforderung, die aber auch eine höhere Vergenzgeschwindigkeit bewirkt als die Situation eines Head-up-Displays.

Praktische Relevanz

Die naheliegende Vermutung, dass in der geringeren Vergenzanforderung ein entscheidender Vorteil der Gestaltung der Geschwindigkeitsanzeige als HUD liegen könnte, kann nicht belegt werden.

Coordination binoculaire des yeux sous des conditions visuelles d'affichage tête haute dans des véhicules routiers

· *Afficheur tête haute* · *mouvement oculaire* · *vergence*

Résumé

A l'aide de l'affichage tête haute dans des véhicules routiers, il est possible de présenter de l'information, telle que la vitesse, à d'autres distances que celles normalement utilisées. Les différentes demandes que cela exige pour la coordination binoculaire des yeux n'ont pas été traitées dans la littérature expérimentale. Ainsi, nous avons conçu une expérience pour étudier les effets de cibles visuelles présentées à la distance d'un affichage tête haute, et d'un tableau de bord traditionnel, sur les mouvements de vergence. La variation de la position verticale de l'affichage tête haute a induit un effet significatif sur la vitesse maximale de vergence, mais la petite taille de l'effet ne soutient pas l'idée que certaines positions sont préférables à d'autres pour la coordination binoculaire. Bien que les demandes sur la vergence étaient plus fortes pour la distance qui correspond à un instrument conventionnel, les vitesses observées étaient aussi plus grandes dans de telles conditions.

Importance Pratique

Il a été démontré que la réduction des demandes sur la vergence à l'aide de l'affichage tête haute dans les véhicules routiers n'est pas une question importante pour le design ergonomique.

Binocular coordination of eye movements in viewing conditions of head-up displays in road vehicles

· *Head-up display · eye movement · vergence*

Summary

Since several years, the automotive industry has promoted the use of head-up displays for the presentation of information in road vehicles. For head-up displays the windscreen is used as a mirror to present information at a virtual location above the vehicle's front end, which is close to the main viewing direction. When head-up displays are used to display the velocity, this information appears at a larger viewing distance than when the conventional location of a speed-indicator is used. These designs can be compared for ergonomic differences. Among the advertised advantages of the head-up display setup it has been supposed that a smaller change in viewing distance relative to the front traffic could reduce the strain of the driver's ocular system by reducing the need for accommodation and vergence. Fast ballistic eye movements (saccades) are usually performed when changing the focus of attention from one object to another. Simultaneously, the vergence angle between the visual axes of the two eyes may have to be changed to adjust for the difference in depth. It has been observed in previous studies that a change in vergence may be facilitated when they are executed in conjunction with saccades, especially when both changes are combined in an ecologically valid way. However, in these previous studies considerably large saccades and near viewing distances have been used, thus the results of the studies cannot be generalized to head-up displays. Therefore, the experiment in our study has been designed to measure the vergence dynamics during fixation changes in head-up display situations. For this reason two conditions were simulated in our experiment: First, moving the eyes from the road traffic to the conventional location of the speed-indicator and back again. Second, moving the eyes from the road traffic to several locations of the head-up display and back again. These locations differed with respect to direction and required saccade size. In our laboratory simulation, the dashboard was located at viewing distance of 60 cm and a downward gaze inclination of 24°. For the head-up display a viewing distance of 2 m was used at various positions in the vertical and horizontal direction relative to the main direction. The main direction consisted of the viewing direction to a screen in a distance of 10 m. This far distance corresponded to the traffic situation. At the far distance a sequence of numbers was presented randomly. After a certain number of digits the letter „S“ indicated to the participant to change gaze from the far distance to either the speed-indicator position or to the head-up display. For the speed-indicator and the head-up display position a simple nonius task was used to assure correct fixation. For each of 8 experimental conditions in 2 replicated sessions, the participants made series of 20 cycles of gaze change between the traffic and instrument positions. The movements of both eyes were recorded using an Eyelink II system with a sampling rate of 500 Hz. The vergence angles were computed as the

difference between the horizontal angles of the two eyes; the maximum velocity of vergence change was computed in the different conditions of convergence (far to near, i. e. from the traffic to instrument position) and divergence (near to far, i. e. from the instrument position to the traffic). The observed maximum vergence velocity was higher for the change between traffic and conventional position of the speed-indicator compared to the change between traffic and head-up display positions; vergence velocity was almost proportional to the difference in vergence demand. For the divergent experimental conditions these velocities were about 30% lower than for the convergent ones. Differences of vergence velocity between the head-up display positions were generally small. No significant difference between the horizontal or vertical directions were observed for equal saccade sizes. For the downward positions of the head-up display the vergence velocity was facilitated with increasing saccade size. This effect was statistically significant, though small. In sum, the time needed for saccade execution was sufficient to converge to the correct vergence angle for both the head-up display and the dashboard positions. Different possible locations of the head-up display appear to have little effect on vergence performance. Our results show that the vergence system is sufficiently prepared to cope with the larger vergence demands of the gaze change to the conventional position of the speed-indicator. If there are no limitations in accommodation the results on vergence facilitation could support the assumption that the accommodation is also facilitated to an appropriate degree, as vergence is a strong stimulus for accommodation.

Practical Relevance

By use of head-up displays in road vehicles, information such as the velocity indication is presented at a different viewing distance compared to the conventional setup. This induces different demands for the binocular coordination of the eyes under conditions which are not covered yet by the experimental literature. The results of our experiment simulating the conventional speed-indicator position in the car dashboard and various positions of a head-up display suggest that the advantage of the head-up displays for the assistance of binocular eye movement coordination is rather limited. Furthermore, the variation of the vertical position of the head-up display showed a statistical significant effect on the observed maximum vergence velocity. However, the small size of this effect, does not support the notion that specific positions are preferable to others for the matter of binocular coordination. Though the vergence demands were higher for the conventional instrument position, participants were able to compensate these demands by higher vergence velocities. Thus, the reduction of vergence demands at head-up displays in road vehicles seems not to be an ergonomic design issue of primary importance.

1 Einleitung

Besonders beim Führen eines Fahrzeugs im Straßenverkehr ist ständige visuelle Aufmerksamkeit unerlässlich. Gleichzeitig muss oder kann der Fahrer Nebenaufgaben ausführen, die ebenfalls mit Sehansforderungen verbunden sind. Eine typische Situation ist das Ablesen von Instrumentenanzeigen, insbesondere der Geschwindigkeitsanzeige. Neuerdings wird in Betracht gezogen, diese über die Windschutzscheibe in einer Position einzublenken, die in Bezug auf die vertikale Blickrichtung und den Sehabstand näher am Verkehrsgeschehen liegt (Head-up-Display, HUD), anstatt sie wie üblich im Armaturenbrett hinter dem Lenkrad anzuordnen. Zur ergonomischen Beurteilung dieser Gestaltung ist zum einen die Art und Qualität der veränderten Anzeige von Interesse, zum anderen aber auch die durch die HUD-Gestaltung induzierte Verhaltensveränderung des Fahrzeugführers, die sich als Veränderung der Augenbewegungsmuster zeigen kann.

Zur Bewältigung visueller Aufgaben sind häufige Bewegungen der Augen notwendig, da der Bereich des detailreichen Sehens auf der Netzhaut des Auges eng begrenzt ist, nämlich auf die Sehgrube (Fovea), die einen Bereich von etwa 5° Sehwindeldurchmesser umfasst. Auch innerhalb der Fovea ist die Auflösung nicht gleichmäßig, so dass bei anspruchsvollen Sehaufgaben eine Genauigkeit der Fixation von bis zu 20 Winkelminuten, also einem Drittel Grad, erforderlich sein kann. Unterschieden werden solche Augenbewegungen, die der Erfassung neuer Objekte oder zusätzlicher Details dienen und vorwiegend willkürlich ausgeführt werden, während andere vor allem der Stabilisierung des Bildes im Auge und im Gehirn dienen. Dabei werden die ersteren vorwiegend als sehr schnelle Blicksprünge, „Sakkaden“, mit Geschwindigkeiten bis zu mehreren hundert Grad pro Sekunde ausgeführt. Folgebewegungen zur Stabilisierung bei der Fixation eines Objektes werden meist durch die Wahrnehmung geregelt und mit geringerer Geschwindigkeit ausgeführt.

Beim beidäugigen Sehen wirken die beiden Augen als ein Organ zusammen, denn beide Augen werden zusammen

auf ein gemeinsames Ziel ausgerichtet, die von jedem Auge ausgehenden Sehachsen schneiden sich in diesem Zielpunkt. Bei Zielen in unterschiedlicher Sehentfernung bedeutet dies, dass die Sehachsen der beiden Augen unterschiedliche Winkel zueinander bilden, welche als Vergenzwinkel bezeichnet werden. Beim Blickwechsel vom Verkehrsgeschehen zu einem Instrument bewegen sich die Sehachsen aufeinander zu; dies wird als Konvergenz, die umgekehrte Richtung als Divergenz bezeichnet. Die gleichsinnige Augenbewegung zu Sehzielen in verschiedenen Richtungen wird demgegenüber als Version bezeichnet. Zweckmäßigerweise stellt man die Bewegungen der beiden Augen in einem Koordinatensystem dar, das durch eine gemeinsame zweidimensionale Komponente, die horizontale und vertikale Version, und durch die Differenz der oben genannten horizontalen Winkel, die Vergenz, beschrieben wird. Dem entspricht physiologisch, dass Version und Vergenz durch unterschiedliche Steuerungs- und Regelungsmodelle beschrieben werden, deren Zusammenwirken untersucht werden kann. Nicht unmittelbar erkennbar ist, in welcher Geschwindigkeitsklasse Vergenzbewegungen einzuordnen sind. In der Grundlagenliteratur wurden vorwiegend solche Vergenzbewegungen untersucht, die nur durch die Querdisparation in der Netzhautabbildung der betrachteten Objekte veranlasst werden. Unter Querdisparation versteht man die Unterschiedlichkeit der Bilder zwischen den beiden Augen bei gleichzeitig in unterschiedlicher Entfernung gesehenen Objekten, die durch den Augenabstand von etwa 6 cm entsteht. Diese Bewegungen gehören zur langsameren Klasse der Fixationsstabilisierungen. Dementsprechend wurden Vergenzgeschwindigkeiten beobachtet, die 20°/s nicht überschritten. Bei willkürlichen Blicksprüngen, bei denen der Ausführende die Vergenzanforderung antizipieren kann, sind jedoch durchaus andere Ergebnisse möglich.

Bei Blickänderungen zwischen Sehzielen bei gleichem Sehabstand, also unveränderten Vergenzwinkeln, wurde die beidäugige Ausführung von horizontalen und vertikalen sakkadischen Augenbewegungen von Collewijn et al. (1988a, b) ausführlich untersucht. In

diesen Studien zeigten sich Hinweise, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Sakkadausführung mit der Vergenzsteuerung wahrscheinlich ist. Es wurden nämlich trotz gleicher Vergenzanforderung der Ziele temporäre Vergenzänderungen sowohl während vertikaler als auch bei horizontaler Sakkaden beobachtet. Van Leeuwen et al. (1998) untersuchten das Zusammenwirken von Sakkaden und Sehentfernungsänderungen spezifisch, und zwar für verschiedene Kombinationen der vertikalen bzw. horizontalen Versions- und Vergenzanforderung. Für die Fahrzeugsituation ist dabei eine Kombination einer Sakkade nach unten in die Nähe bzw. umgekehrt nach oben in die Ferne relevant; dabei ergab sich, dass für den konvergenten Teil der Bewegung die nötige Vergenz zeitgleich mit der Sakkadenausführung erreicht wurde, für den divergenten Teil jedoch eine langsamere Vergenzanpassung beobachtet wurde. Die verwendeten Sehdistanzen dieser Arbeit waren allerdings 35 cm und 130 cm, die Sakkadengrößen 20° und 30°, so dass die verwendeten Bedingungen zwar den Blickrichtungen, aber nicht den Sehdistanzen im Fahrzeug entsprachen. Gerade die Gestaltungsvariante als HUD zeichnet sich durch deutlich geringere Änderungen der Vergenzanforderung bei geringeren Sakkadenweiten aus.

Aus Sicherheitsgründen ist die Blickabwendungsdauer von Bedeutung, also die Zeit, während der ein Fahrzeugführer seine visuelle Aufmerksamkeit nicht auf das Verkehrsgeschehen richtet.

Aufgrund der physiologischen Literatur ergab eine Abschätzung (Kloke, 2005), dass sich die Blickabwendungsdauern zwischen einem HUD und einem herkömmlichen Instrument im Armaturenbrett nur um etwa 100 ms unterscheiden, wenn man den Zyklus vom Verkehrsgeschehen zur Geschwindigkeitsablesung und zurück berücksichtigt. Hierzu wurden jedoch nur die Sakkadenausführungszeiten zugrunde gelegt und Zeiten für die Vergenzänderung nicht berücksichtigt. Läge die Vergenzgeschwindigkeit bei 5°/s, wäre für eine Vergenzänderung von 5,6°, wie sie der Blickwechsel vom Verkehr zum Armaturenbrett erfordert, mehr als eine Sekunde erforderlich,

während die Sakkadendauern maximal bei 110 ms (nach unten zum Armaturenbrett) liegen. So käme eine sehr lange Blickabwendungsdauer zustande, wenn man die beidäugige Koordination berücksichtigt. Das hier beschriebene Experiment (vgl. Kloke et al., 2007) soll die Frage klären, wie sich das Zusammenwirken von Sakkaden und Vergenzänderung bei den für die ergonomische Beurteilung der HUD maßgeblichen geometrischen Bedingungen verhält. Es stellt sich ferner die Frage, welchen Einfluss die Placierung der HUD-Anzeige im Pkw auf die konkrete Ausführung der Augenbewegungen haben könnte, ob also aufgrund der gefundenen beidäugigen Koordinationsmuster konkrete ergonomische Gestaltungshinweise abgeleitet werden können.

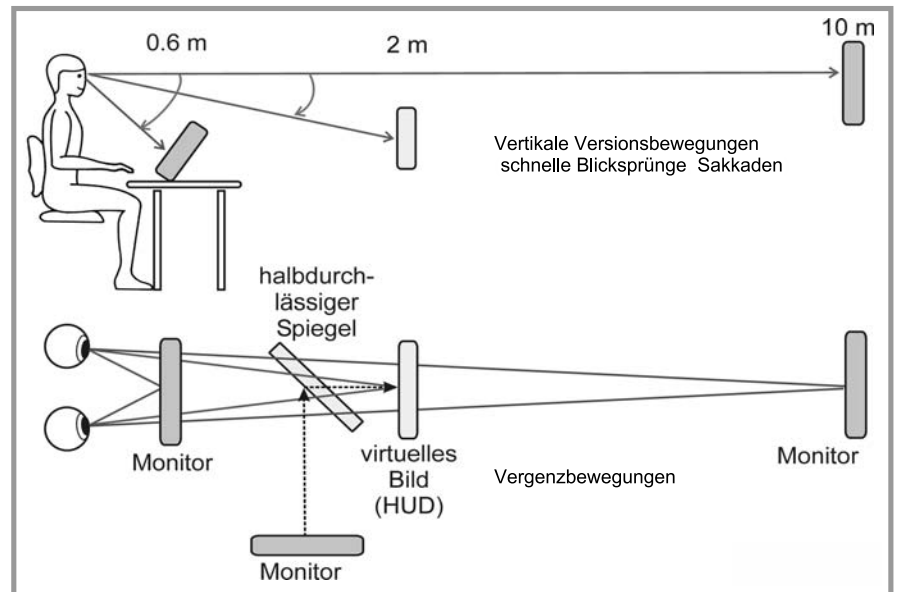


Bild 1: Skizze des Versuchsaufbaus im Labor

Figure 1: Experiment setup

Illustration 1: Le matériel expérimental

2 Methoden

Im Labor wurden Bildschirme so positioniert, dass visuelle Reizmuster an den für die Situation im Fahrzeug typischen Sehentfernungen und -richtungen präsentiert werden konnten (Bild 1), um die Augenbewegungen objektiv und mit ausreichender Genauigkeit zur Vergenzbestimmung messen zu können. Für die Simulation der Sicht in die Ferne wurde die Sehdistanz von 10 m bei waagerechter Blickrichtung als Bezugssystem verwendet. Die Reizmuster für die konventionelle Armaturenbrettposition wurden bei 60 cm Sehentfernung und 24° nach unten präsentiert. Die HUD-Positionen wurden in 2 m Sehentfernung über einen halbdurchlässigen Spiegel eingeblendet. Es wurden 7 unterschiedliche Sehrichtungen des HUD untersucht, nämlich in gleichem Versionswinkel wie das Fernobjekt, und jeweils 2° nach oben, unten, rechts und links zu dieser Sehrichtung. Zusätzlich wurde das HUD bei Winkeln von 4° und 8° unterhalb der Horizontalen dargeboten, so dass für die Positionen nach unten eine quantitative Bestimmung der Effektgröße als Abhängigkeit der Vergenzgeschwindigkeit von der Sakkadenweite möglich wurde (Bild 2). Um die Vergleichbarkeit untereinander und mit den in der Grundlagenliteratur berichteten Experimenten sicherzustellen,

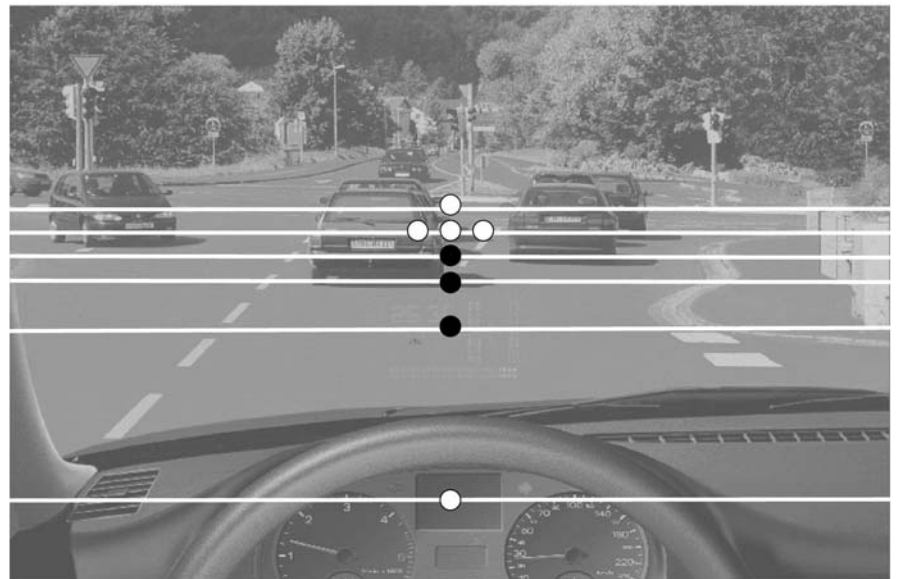


Bild 2: Anordnung der im Experiment verwendeten Sehziele

Figure 2: Target locations in the experiment

Illustration 2: La position des cibles utilisées dans l'expérience

wurden gleichartige Schaufgaben in der Ferne und in der Nähe verwendet.

Die Sehreize wurden folgendermaßen gestaltet, um eine Serie von Blickwechseln zwischen der horizontalen Ferne und einer der Anzeigepositionen (HUD oder Armaturenbrett) zu induzie-

ren. Beginnend bei der Position in der näheren Sehebene wurde als Stimulus für die Blickrichtungsänderung eine Folge von Zahlen gezeigt, auf die zu einem zufälligen Zeitpunkt der Buchstabe „S“ folgte. Bei Erscheinen des „S“ war der Blick aus der Nähe in die Ferne zu ändern, und umgekehrt. In der jeweils anderen Sehposition wurde dann eine

Noniusaufgabe präsentiert, deren Beobachtung eine genaue binokulare Fixation verlangte. Bei der Noniusaufgabe war zu beurteilen, ob der obere von zwei vertikal angeordneten Strichen rechts oder links vom unteren gezeigt war, und die entsprechende Reaktionstaste zu betätigen. Danach folgte der entsprechende Teilversuch für die entgegengesetzte Sehrich- tungsänderung. Alle Darstellungen erfolgten entfernungsabhängig korrigiert als 12' (Winkelminuten) hohe weiße Zeichen mit Leuchtdichte 10 cd/m² vor dunklem Hintergrund in einem entsprechend abgedunkelten Raum. Bei der Noniusaufgabe wurde ein horizontaler Versatz von 1' bei 4' Strichabstand und 3' Strichbreite verwendet. Am Versuch nahmen 11 Probanden teil (8 w, 3 m, Alter 19-23 Jahre). Sie wurden instruiert, die Aufgabe so schnell und genau wie möglich durchzuführen.

Der Versuch wurde für jeden Probanden in 2 Sitzungen mit je 8 Blöcken für jede Versuchsbedingung durchgeführt, jeweils einer mit der Geschwindigkeitsanzeige in konventioneller und je einer der sieben HUD-Positionen. Die Reihenfolge der Versuchsbedingungen wurde randomisiert. In jedem Block wurden 20 divergente und konvergente Blickwechsel verlangt. Die Kopfposition der Probanden wurde mittels einer Kinn- und Schläfenstütze stabilisiert, und die Probanden wurden instruiert, den Kopf möglichst nicht zu bewegen. Zur Messung der Augenbewegungen wurden die Pupillenverfolgungskameras eines Eye-Link-II-Systems verwendet. Die beiden Kameras zur Pupillenbeobachtung unter Infrarotbeleuchtung wurden abweichend vom üblichen Gebrauch nicht am Kopf angebracht, sondern an der Kinnstütze fest montiert. Die horizontalen und vertikalen Bewegungskomponenten beider Augen, die vom Meßsystem durch Berechnung des Schwerpunkts des Pupillenabbilds ermittelt werden, wurden mit einer Abtastrate von 500 Messungen je Sekunde aufgezeichnet. Das Meßsystem wurde vor und nach jedem Block mit Hilfe von 9 Zielpunkten kalibriert, die in einem rechteckigen Gitter über den gesamten Messbereich verteilt waren und über eine Shutterbrille, bei der jeweils die Sicht eines Auges selektiv ausgeschaltet werden kann, für jeweils ein einzelnes Auge präsentiert wurden.

3 Auswertung

Die von Augenbewegungsmeßsystemen bereitgestellten Daten sind mit teilweise zufälligen, teilweise aber auch systematischen Fehlern behaftet. In der Literatur (z.B. Hornof & Halverson 2002) wird vor allem die Auswirkung auf die Bestimmung der Blickziele diskutiert, welche durch das Design im vorliegenden Experiment bereits vorgegeben sind und nicht mehr bestimmt werden müssen. Da die Auswertung dieses Versuchs vor allem an der korrekten Bestimmung der Vergenz interessiert ist, die als Differenz der beiden horizontalen Signale berechnet wird, gelten einige Besonderheiten, die zu einer abweichenden Bewertung der verschiedenen Fehlerquellen führen.

Aus den monokularen Kalibrierungsdaten wurden zunächst die Parameter für die Umrechnung der Gerätekoordinaten in Sehwinkel berechnet. Wenn man grundsätzlich einen linearen Zusammenhang annimmt, sind für jedes Auge 6 Werte relevant: die, jeweils horizontalen und vertikalen, Achsenabschnitte und Verstärkungen, sowie die beiden Multiplikationsfaktoren für die Interaktion vom horizontalen auf den vertikalen Kanal und umgekehrt. Die Bestimmung dieser Werte erfolgte durch robuste lineare Regressionsrechnung (vgl. Venables & Ripley 2000). Dadurch wird der Umstand angemessen berücksichtigt, dass während der Kalibrierung die tatsächlichen Blickrichtungen zeitweise erheblich vom Sollwert abweichen können.

Die Achsenabschnitte unterliegen dabei verhältnismäßig bedeutend größeren Fehlern, zeitlichen Schwankungen und interindividuellen Streuungen als die übrigen Parameter, da sie vom Winkel der Kopfhaltung in der Sagittal- bzw. Horizontalebene bestimmt sind, welches die häufiger variierenden Bewegungsfreiheitsgrade des Kopfes sind. Die Verstärkungen dagegen sind praktisch nur vom Abstand zwischen Augenoberfläche und Sensor abhängig, die beiden Interaktionsparameter von einer Änderung der aufrechten Kopfhaltung in der Frontalebene, welche weniger wahrscheinlich ist. Für die Differenz der Horizontalwerte zwischen den Augen gleichen sich daher die Schwankungen der Achsenabschnitte im Zeitverlauf aus. Im Gegensatz dazu

führen fehlerhafte Bestimmungen der Verstärkungsfaktoren, vor allem wenn sie ungleichmäßig für beide Augen ermittelt werden, zu erheblichen Fehlern bei der Vergenzberechnung, weil in diesem Fall ein großer Anteil der Versionskomponente im Differenzsignal enthalten bleibt. Da für die HUD-Bedingung der vertikale Versionsbereich 10° beträgt, die Vergenzänderung aber nur 1,4°, würde bereits ein Kompensationsfehler von 15% dazu führen, dass das überlagerte Versionssignal ebenso groß wird wie das zu messende Signal.

Bei der Untersuchung der Kalibrierungsdaten über alle Versuchsblöcke zeigte sich, dass in der vorliegenden Untersuchung eine erhebliche Interaktion zwischen horizontalen und vertikalen Rohmessdaten vorhanden war, und zwar entsprachen die Daten entgegengesetzt gerichteten Drehungen der beiden Augen um 2° bzw. 7° gegenüber dem Versuchsbezugssystem. Unter diesen Umständen ist die isolierte Kalibrierung im einzelnen Versuchsblock nicht zuverlässig genug, da es zu den Eigenschaften der Regressionsrechnung gehört, dass Steigungen unterschätzt werden. Durch eine Korrektur dieses systematischen Fehlers vor Ausführung der individuellen Kalibrierung der Einzelversuche wurden die dadurch verursachten Verzerrungen beseitigt.

Im Mittel wurde die Sakkade von den Probanden eine Sekunde nach dem Beginn des Startsignals ausgeführt. In den einzelnen Versuchen wurde daher die erreichte Vergenzänderung bestimmt als Differenz der 20%-getrimmten Mittelwerte des Vergenzzustands in der Sekunde nach dem Startsignal und der folgenden Sekunde. Bei dieser Trimmung werden die 20% höchsten und niedrigsten Werte aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen. Damit wird vermieden, dass die Werte der Bewegungsphase in die Mittelung einbezogen werden. Die Vergenzgeschwindigkeit in dem Zeitraum von 2 Sekunden nach dem Startsignalbeginn wurde mittels eines kombinierten Tiefpass- und Differentiations-Filters bestimmt, als Filterkoeffizienten wurden dabei 101 Abtastwerte einer einmal differenzierten Gaußkurve mit Standardabweichung 10 ms verwendet, und es wurde der Maximalwert in diesem Zeitraum bestimmt.

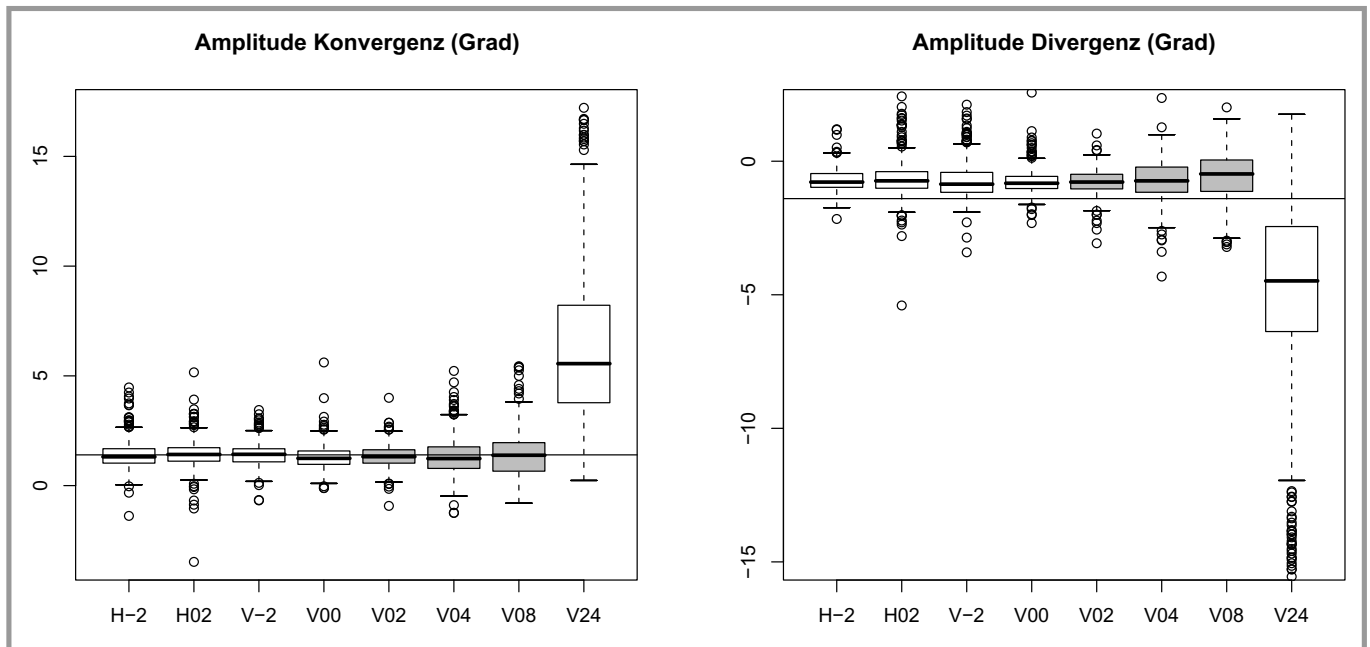


Bild 3: Erreichte Konvergenz und Divergenz in Grad nach Versuchsbedingungen, links die Versuchsbedingungen in HUD-Entfernung, von links nach rechts zuerst die horizontalen nach links (H-2) und rechts (H02), danach von oben nach unten die vertikalen Bedingungen (V-2 bis V08), die Armaturenbrettbedingung (V24) ganz rechts. Die Linie markiert den Sollwert der Vergenzänderung von 1,4°.

Figure 3: Observed convergence and divergence amplitude for experimental conditions. On the left the horizontal conditions to left (H-2) and right (H02), the vertical HUD conditions (V-2 to V08) are sorted in order from top to bottom, rightmost the conventional position V24. The line indicates the vergence demand of 1.4°.

Illustration 3: L'amplitude de la convergence et de la divergence en fonction des conditions expérimentales. A gauche, les conditions horizontales pour la gauche (H-2) et la droite (H02), les conditions verticales d'affichage tête haute (V-2 à V08) sont organisées de haut en bas, et à droite se trouve la position conventionnelle V24. La ligne indique une demande de vergence de 1.4°.

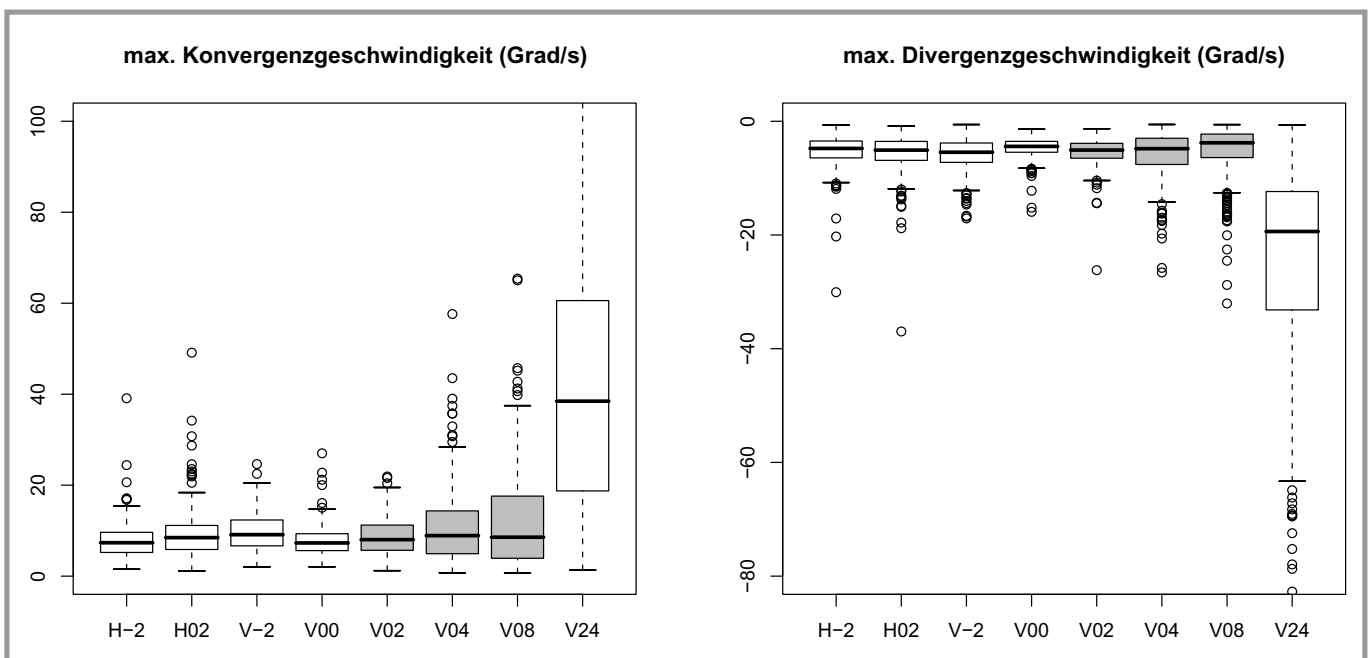


Bild 4: Maximale Konvergenz- und Divergenzgeschwindigkeiten in °/s für alle Einzelblickbewegungen. Die in der statistischen Auswertung einbezogenen Bedingungen sind grau unterlegt.

Figure 4: Maximum convergence and divergence velocities for all trials. The conditions used for statistical evaluation are marked.

Illustration 4: Vitesse maximale de convergence et de divergence pour tous les essais. Les conditions utilisées pour l'analyse statistique sont indiquées.

4 Ergebnisse

In Bild 3 wird die Gesamtheit der beobachteten Vergenzänderungen bei den einzelnen konvergenten und divergenten Blickbewegungen als Boxplots je Versuchsbedingung dargestellt. Die Box stellt jeweils die beiden mittleren Quartile der Daten dar, die „Whisker“ den Bereich von Daten, die bei Normalverteilung nicht als Ausreißer betrachtet würden, sowie die Kreise die außerhalb liegenden Einzelbeobachtungen. Es zeigt sich, dass die Vergenzanforderung sowohl bei den HUD-Bedingungen als auch bei der Armaturenbrettbedingung im Median im konvergenten Fall gut erfüllt werden; im divergenten Fall wird jedoch bei Messung in demselben Zeitraum die Solldivergenz zu etwa einem halben Grad unterschritten. Es wird angenommen, dass die Solldivergenz später, also außerhalb des hier betrachteten Auswertzeitraums, erreicht wird. Die Streuung der Werte nimmt unter den Versuchen in den HUD-Bedingungen mit größerer Sakkadenweite geringfügig zu.

Die berechneten maximalen Vergenzgeschwindigkeiten liegen im 10%-ge-

trimmten Mittel für die Armaturenbrettbedingung bei 40°/s im konvergenten, bei 22°/s im divergenten Fall. Die entsprechenden Werte für die Gesamtheit der HUD-Bedingungen sind 8,6°/s bzw. 4,9°/s. Wegen der beobachteten Streuung in der erreichten Vergenz ist eine entsprechende Streuung der erreichten Geschwindigkeiten zu erwarten. Tatsächlich zeigt sich in den Boxplots der Maximalgeschwindigkeiten (Bild 4) praktisch kein Unterschied zwischen den HUD-Bedingungen. Wenn man diejenigen Blickbewegungen selektiert, bei denen die Abweichung der beobachteten Vergenzänderung vom Sollwert geringer als ein halbes Grad ist, wird eine Abhängigkeit der Maximalvergenzgeschwindigkeit von der Versuchsbedingung im Boxplot sichtbar (Bild 5). Für die quantitativ abgestuften HUD-Bedingungen (2°, 4° und 8° nach unten) wurde der Einfluss der Sakkadenweite auf die Maximalgeschwindigkeit mit einem Mixed-effects-Modell quantitativ bestimmt (Tabelle 1) und auf Signifikanz geprüft. Die maximale Konvergenzgeschwindigkeit nimmt demnach mit der Sakkadenweite auf 1%-Niveau signifikant zu. Im Fall der Divergenzgeschwindigkeit wird ein Signifikanzniveau von 3% erst erreicht,

wenn die Fälle, wie oben begründet, nach erreichter Divergenz selektiert werden (Tabelle 1).

5 Diskussion

Das Ziel unserer Untersuchung war es, das Zusammenwirken von Sehrichtungs- und Sehentfernungsänderungen für die Bedingungen im Fahrzeug experimentell zu erforschen. Dazu wurden die Vergenzbewegungen der Augen bei repräsentativen Blickbewegungen aufgezeichnet sowie die Vergenzgenauigkeit und die maximale Vergenzgeschwindigkeit bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass bei einer Aufgabenstellung, bei der die Sehentfernungsänderung willkürlich und in ökologisch validem Zusammenhang mit einer Sehrichtungsänderung erfolgt, Vergenzänderungen etwas schneller erfolgen als bei reinen Querdisparationsreizen. Die maximale Vergenzgeschwindigkeit in der Armaturenbrettbedingung beträgt, bei 4facher Vergenzanforderung, etwa das 4fache der HUD-Bedingungen. Im Ver-

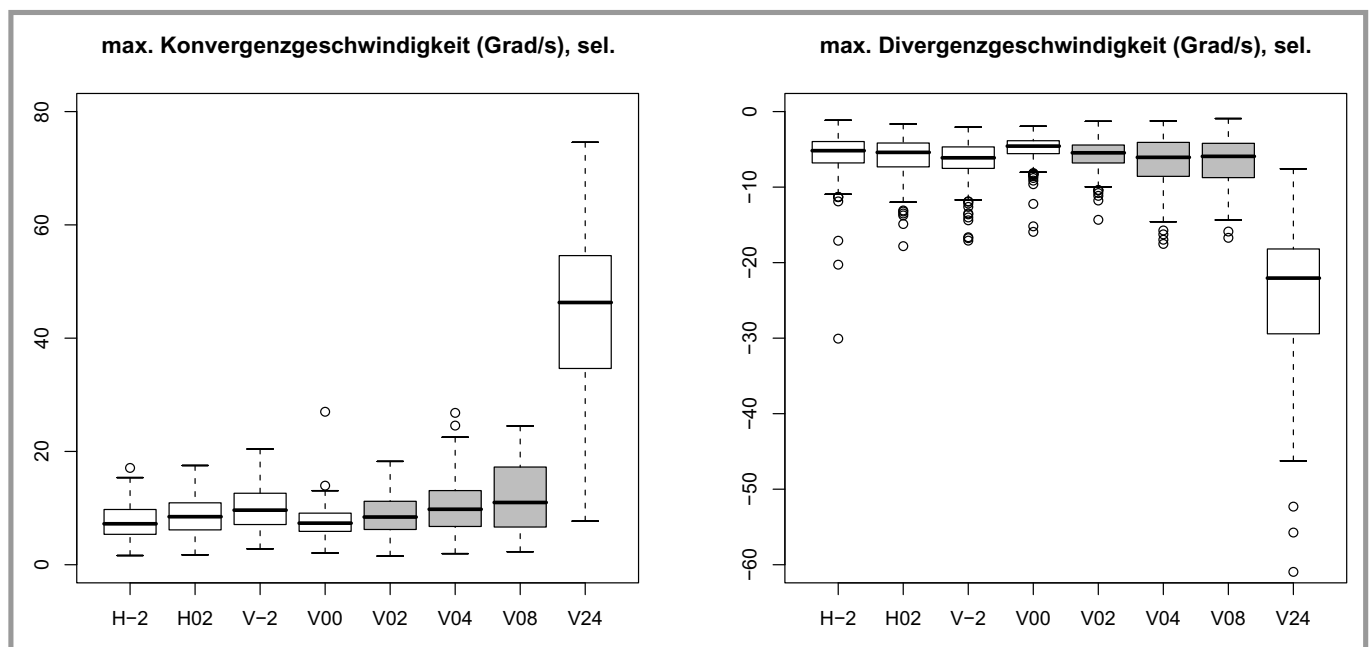


Bild 5: Maximale Konvergenz- und Divergenzgeschwindigkeiten für Versuche mit erreichter Vergenzgenauigkeit besser als 1/2 Grad

Figure 5: Maximum convergence and divergence velocities for trials with vergence amplitude within 1/2° bound of vergence demand

Illustration 5: Vitesse maximale de convergence et de divergence pour les essais avec des amplitudes de vergence qui se trouvent à moins de 1/2° de la vergence requise

Tabelle 1: Statistische Ergebnisse zur maximalen Vergenzgeschwindigkeit unter den Versuchsbedingungen 2° - 8° nach unten in HUD-Entfernung

Table 1: Statistical results on the saccade width dependency of maximum vergence velocity for conditions 2°, 4° and 8° to below in HUD viewing distance

Tableau 1: Vitesse maximale de vergence moyenne pour les conditions d'affichage tête haute 2°, 4° et 8° vers le bas. La quatrième colonne contient le taux de changement par rapport à la largeur de saccades verticaux

	n	2° Sakk.	4° Sakk.	8° Sakk.	Anstieg je ° Sakk.
		° / s	° / s	° / s	°/s / °
konvergent alle	1260	8,67	10,88	11,52	0,43
konvergent selektiert	655	8,55	10,15	11,48	0,49
divergent alle	1260	5,30	5,84	5,17	-0,04
divergent selektiert	413	6,27	8,22	8,07	0,21

gleich zu den Versuchsbedingungen, die van Leeuwen et al. (1998) gewählt hatten, ist die Zunahme der Vergenzgeschwindigkeit durch die gleichzeitige Blickrichtungsänderung in dem hier diskutierten Experiment mit kleineren Sakkadengrößen und größeren Sehentfernungen, deutlich weniger ausgeprägt. Ein Einfluss der Sakkadenweite auf die maximale Vergenzgeschwindigkeit ist beobachtbar, aber quantitativ zu gering, um als ergonomisch relevant angesehen werden zu können. Wie auch aus anderen Forschungen (vgl. Hung et al. 1997) bekannt ist, erfolgt die Vergenzänderung bei der Rückkehr zur weiteren Sehentfernung in den vorliegenden Daten deutlich langsamer als beim Blickwechsel in die Nähe. Bei der Bewertung dieser Beobachtung ist allerdings zu berücksichtigen, dass dieser Blickwechsel in realistischen Situationen meist mit Wechsel vom fovealen Sehen zu peripherem verbunden ist, bei welchem zunächst durchaus eine geringere Präzision bei der fovealen Fixation verlangt wird.

Bezüglich der beidäugigen Koordination können weder zwischen den Gestaltungsvarianten Armaturenbrett und Head-up-Display noch innerhalb der verschiedenen untersuchten Positionen für das HUD ergonomisch deutliche Vor- oder Nachteile erkannt werden. Dieser Befund stützt somit nicht die oft angestellte Vermutung, dass Anzeigen, die ins Gesichtsfeld projiziert werden, eine geringere Blickabwendungsdauer haben als konventio-

nelle Anzeigen in der Konsole des Kraftfahrzeugs.

6 Ausblick

Neben der von uns untersuchten Vergenz ist die geringere Akkommodationsanforderung des HUD ebenfalls ein mögliches Argument, das für eine Geschwindigkeitsanzeige im Head-up-Display spräche. Da eine Vergenzänderung einen starken Reiz für die Auslösung der Akkommodationsänderung darstellt (Hung & Semmlow 1982), ist eine gut ausgeprägte Vergenzreaktion auch unter diesem Gesichtspunkt ein Vorteil, sowohl bei der geringeren Akkommodation am HUD wie auch bei der größeren am Armaturenbrett. Bezüglich der Akkommodation können Head-up-Displays bei nachlassender Akkommodationsfähigkeit im höheren Lebensalter von Vorteil sein. Ein nachteiliger Effekt in dieser Hinsicht ist durch die geringere Bildschärfe und den geringeren Kontrast von HUDs zu erwarten. Die Abwägung dieser Vor- und Nachteile bedarf noch genauerer empirischer Untersuchungen.

Weiterhin ist die Benutzung der Rückspiegel eine für die Fahrsicherheit wichtige Funktion. Dabei liegt zwar an sich keine hinsichtlich der Vergenz- und

Akkommodationsanforderung bedeutende Sehentfernungsänderung vor, dennoch kann es dabei zu Vergenzbewegungen kommen, die in Zukunft untersucht werden sollten. Außer Betracht mussten bisher auch reflexhafte Augenbewegungen wie der vestibulo-okuläre Reflex bleiben, obwohl gerade in der Situation im Fahrzeug die dadurch ausgelösten Augenbewegungen eine große Rolle spielen dürften.

Nicht zuletzt sollten auch die Auswirkungen der Gestaltung von Anzeigen unter dem Gesichtspunkt der Aufmerksamkeitsforschung bedacht werden. In Situationen, in denen die Aufmerksamkeit auf mehrere unterschiedliche Informationen aufgeteilt werden muss, ist es von Vorteil, wenn diese Informationen in räumlicher Nähe arrangiert werden. Es hängt allerdings von der Komplexität der Aufgabe und der Komplexität der Inhalte des Head-up-Displays ab, ob diese Form der Darstellung Aufmerksamkeitsprozesse eher unterstützt oder sich eher nachteilig auswirken kann (für eine Übersicht siehe Wickens & Hollands 2000, p. 90ff).

Literatur

- Collewijn, H.; Erkelens, C. J.; Steinman, R. M.:** Binocular co-ordination of human horizontal saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 404, 157-182, 1988a
- Collewijn, H.; Erkelens, C. J.; Steinman, R. M.:** Binocular co-ordination of human vertical saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 404, 183-197, 1988b
- Hornof, A. J.; Halverson, T.:** Cleaning up systematic error in eye-tracking data by using required fixation locations, *Behaviour Research Methods, Instruments & Computers*, 24(4), 592-604, 2002
- Hung, G. K.; Semmlow, J. L.:** A Quantitative Theory of Control Sharing Between Accommodative and Vergence Controllers, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering BME-29*, Nr. 5, p. 364-370, 1982

Hung, G. K.; Semmlow, J. L.; Rosenfield, M.: Convergence and divergence exhibit different response characteristics to symmetric stimuli, *Vision Research* 37, 1197-1205, 1997

Kloke, W. B.: Zur Bedeutung der Blickabwendungsdauer bei Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Jhr. 59 Nr. 3, 291-295, 2005

Kloke, W. B.; Jaschinski, W.; Rinkenauer, G.: Beidäugige Blickbewegungen an Head-up-Displays. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Schütte M (Schriftltg): Kompetenz-*

entwicklung in realen und virtuellen Arbeitssystemen. 53. Kongreß der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Otto-von-Guericke-Univ., Fraunhofer – IFF Magdeburg, 28.02.-02.03. 2007 (S 383-386). Dortmund: GfA-Press, 2007

van Leeuwen, A. F.; Collewyn, H.; Erkelens, C.: Dynamics of horizontal vergence movements: interaction with horizontal and vertical saccades and relation with monocular preferences, *Vision Research* 38, 3943-3954, 1998

Venables, W. N.; Ripley, B. D.: *Modern Applied statistics with S-PLUS*, Springer, New York, 1999

Wickens, C. D.; Hollands, J. G.: *Engineering psychology and human performance*, Prentice Hall, New Jersey, 2000

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Math. Wilhelm Bernhard Kloke

Dr. Wolfgang Jaschinski

PD Dr. Gerhard Rinkenauer

Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität
Dortmund

Ardeystraße 67

D-44129 Dortmund

E-Mail: kloke@ifado.de