

Hoppe, Annette; Ganßauge, Rico; Geißler, Uwe; Henke, Anna-Sophia; Reiß, Norman

Article — Published Version

Untersuchung von Aufmerksamkeitseffekten für die gezielte Gestaltung von Visualisierungsoberflächen für zeitgemäße Mensch-Maschine-Interaktion

Zeitschrift für Arbeitswissenschaft

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Hoppe, Annette; Ganßauge, Rico; Geißler, Uwe; Henke, Anna-Sophia; Reiß, Norman (2022) : Untersuchung von Aufmerksamkeitseffekten für die gezielte Gestaltung von Visualisierungsoberflächen für zeitgemäße Mensch-Maschine-Interaktion, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, ISSN 2366-4681, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 76, Iss. 1, pp. 65-82, <https://doi.org/10.1007/s41449-021-00291-6>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/308983>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Untersuchung von Aufmerksamkeitseffekten für die gezielte Gestaltung von Visualisierungsoberflächen für zeitgemäße Mensch-Maschine-Interaktion

Annette Hoppe¹ · Rico Ganßauge¹ · Uwe Geißler¹ · Anna-Sophia Henke¹ · Norman Reißut¹

Angenommen: 21. Oktober 2021 / Online publiziert: 10. Januar 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung

In der modernen Arbeitswelt besteht eine wachsende Bedeutung von Steuer- und Überwachungstätigkeiten, die heute in Leitwarten und in Zukunft möglicherweise mittels neuer Interaktionsformen ausgeführt werden. Bei diesen Tätigkeiten ist verantwortungsvolles Handeln gefordert, da eine Verpflichtung für die Aufrechterhaltung der Prozesse besteht. Die Mensch-Maschine-Interaktion findet häufig mittels einer komplexen Visualisierung sowie einer Vielzahl an Bildschirmen statt. Dies kann bedeuten, dass sich relevante Information außerhalb der direkten visuellen Wahrnehmung eines Bedieners befinden. Es besteht die Herausforderung, die Aufmerksamkeit durch Signale gezielt zu lenken, damit handlungsleitende Informationen wahrnehmbar werden. Ziel der durchgeführten Untersuchung war es deshalb, Mindestanforderungen für die Erkennung von Signalen im peripheren Blickfeld zu untersuchen. Ausgehend von Vorerkenntnissen wurden in einem Laborexperiment Signale in verschiedenen Leuchtdichtekontrasten und Frequenzen in festgelegten Winkeln des peripheren Blickfeldes untersucht. Diese zeigen die Überlegenheit hoher Leuchtdichtekontraste und Frequenzen für die Erkennung, steigende Winkel verringerten diese. Die aus den Daten abgeleiteten Regressionen gestatten die Abschätzung von Erkennungswahrscheinlichkeit und Reaktionszeiten.

Praktische Relevanz: Die erreichten Ergebnisse geben Entwickler*innen und Anwender*innen von Technik ein Werkzeug für die gezielte Gestaltung von Signalen in der Mensch-Maschine-Interaktion bei komplexen Visualisierungshintergründen an die Hand. Aus den Erkenntnissen können konkrete Maßnahmen abgeleitet werden, die helfen, Sicherheit und Zuverlässigkeit durch eine verbesserte Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion zu unterstützen.

Schlüsselwörter Wahrnehmung · Aufmerksamkeit · Signale · Peripheres Blickfeld · Leitwarte

✉ apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe
hoppe@b-tu.de

¹ Fachgebiet Arbeitswissenschaft/Arbeitspsychologie,
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus, Deutschland

Investigation of attention effects for the targeted design of visualization interfaces for contemporary human-machine interaction

Abstract

In modern workplaces the demand for controlling and monitoring activities is arising significantly. Today these tasks are mostly fulfilled inside control rooms. In the future this might be done with new means of interaction. Due to the obligation to maintain the processes running, the work requires responsible acting. Most of the human-machine-interaction is done by complex visualization and on a large number of screens. Therefore it can happen that relevant information might appear outside the operator's direct field of view. Now the arising challenge consists of guiding the user's attention by signals in a targeted manner, so that action-leading information is well recognizable. Therefore, the aim of the conducted study was to investigate minimum requirements for the detection of signals in the peripheral field of view. Based on prior knowledge a laboratory experiment was designed. Signals with different luminance contrasts and frequencies in defined angles within the peripheral field of view were used. The results show the superiority of high luminance contrasts and frequencies for a better recognition of the signals. Simultaneously higher angles decrease the recognition. The data was used for statistical regressions to estimate probabilities and times for recognizing signals.

Practical Relevance: The outcome of this study provides tools for developers and users who want to create specific signal designs for human-machine-interactions with complexly visualized backgrounds. Specific measures can be derived from our findings and therefore be used to increase safety and reliability by means of an improved human-machine interaction.

Keywords Perception · Attention · Signals · Peripheral Field of View · Control Room

1 Einleitung

1.1 Bedeutung der Tätigkeit in Leitwarten

Steuerungs- und Überwachungstätigkeiten in Leitwarten spielen eine bedeutsame Rolle in der modernen Arbeitswelt. Diese Arbeitsplätze werden üblicherweise mit einer Vielzahl an Bildschirmen, die komplexe Visualisierungen enthalten, durchgeführt. Die einhergehende hohe Verantwortung der Tätigkeit erfordert eine menschengerecht zu gestaltende Interaktion mit der Technik (Hoppe et al. 2019). In den letzten Jahren haben sich in diesem Arbeitsbereich einige laufende Trends weiter fortgesetzt bzw. verstärkt. Das betrifft sowohl die Tätigkeiten im industriellen Kontext, wie z. B. in Kraftwerken, Netzleitstellen, der Prozessindustrie oder Prüfständen (Thomas und Trampert 2019; Tornelli et al. 2017; Haag 2015, S. 59 ff.; VDI/VDE 2013) als auch in anderen Einsatzfeldern, wie den Rettungsleitstellen, Sicherheit und Grenzschutz (Boecker 2017) oder im Gesundheitswesen (Meinecke und Albat 2015). Ebenfalls ist eine verstärkte Tendenz zur Arbeitsverdichtung durch Zentralisierung der Überwachung von mehreren Anlagen oder Bereichen zur selben Zeit zu verzeichnen (Lafrenz und Jeschke 2017). Damit ist von erhöhten Anforderungen an die Bedienenden auszugehen. Zudem werden Veränderungen in der Mensch-Maschine-Interaktion durch neue Technik, wie z. B. durch Touchscreens oder Sprachsteuerung, erwartet. Dabei sind diese neuen Möglichkeiten eher als ergänzend zu den bisherigen zu verstehen, die Grundprinzipien der visuellen Informationsaufnahme werden nach Aussagen der von Lafrenz und Jeschke befragten

Experten*innen mindestens für die kommenden zehn Jahre weiterhin bestehen bleiben. Der Hauptteil der für die Tätigkeit nötigen Informationen wird somit über den visuellen Informationskanal vermittelt. Nach Schlick et al. (2018, S. 354) wird davon ausgegangen, dass dies 80–90 % aller arbeitsbezogenen Informationen sind. In stark visualisierten Arbeitsumgebungen ist anzunehmen, dass sich der Wert eher am oberen Ende dieses Bereiches bewegt. Hauptinteraktionsmittel für die Steuerung und Überwachung der Anlage sind visuelle grafische Benutzeroberflächen. Typische Konfigurationen sind in der Regel mit vielen Bildschirmen versehen, wovon nur ein relativ geringer Teil im Normalbetrieb im Bereich einer „visuellen Komfortzone“ aktiv genutzt wird (Kockrow 2014, S. 146; Kockrow und Hoppe 2016), welche in besonderen Betriebszuständen sowie für Kontroll- und Überblicksdarstellungen jedoch trotzdem notwendig sind. Damit kann es sein, dass sich für die Abschätzung des Prozesszustandes bzw. das Einleiten von Bedienhandlungen wichtige Informationen außerhalb des direkten Blickfeldes der Operator*innen befinden. Sie befinden sich dann im peripheren Blickfeld und werden dort wesentlich schlechter wahrgenommen. Zusätzlich erschwert wird die Erkennung relevanter Signale dadurch, dass laufende Prozesse ein Grundrauschen von Veränderungen auf den Bildschirmen erzeugen. Insgesamt ist die Tätigkeit gekennzeichnet durch hohe Verantwortung für die Aufrechterhaltung des sicheren Betriebes und den hohen Entscheidungsdruck in kritischen Situationen (Hoppe et al. 2019). Üblicherweise bestehen zwar technische Sicherungsmaßnahmen (z. B. DIN EN 61511-1:2019), das Eingreifen ebendieser bedeutet jedoch mindestens Zeitverzögerungen

oder Produktionsverluste und sollte möglichst vermieden werden. Zusätzlich kann diese Tätigkeit durchaus durch Extreme psychischer Belastung und Beanspruchung geprägt sein: eine sehr geringe Belastung in Phasen der Überwachung kann sehr hoher Belastung in kritischen Situationen gegenüberstehen (Kockrow et al. 2016). Umso bedeutsamer erscheint es deshalb, die Informationsdarstellung dynamisch und angemessen zu gestalten, um wenn nötig die Aufmerksamkeit dadurch gezielt lenken zu können.

1.2 Bedeutung für andere moderne Formen der Mensch-Maschine-Interaktion

Diese ursprünglich aus den Überlegungen zur Gestaltung von Leitwarten hervorgegangene Forschung gewinnt nun weitreichend an Bedeutung. So bestehen Ähnlichkeiten einer klassischen Leitwartenumgebung zur Darstellung von Prozessen mittels neuer Formen der Mensch-Maschine-Interaktion, wie beispielsweise der Virtual Reality. Diese wird heute bereits zum Training von Operator*innen in Leitwarten eingesetzt (Turk 2020). Zukünftig ist es dabei durchaus denkbar, dass Teile einer Leitwarte in die Virtual Reality übertragen werden, welche dann im normalen Betrieb als Interaktionsmedium genutzt wird. Das bringt dann die Möglichkeit mit sich, eine bestimmte Information, je nach ihrem Bedeutungszusammenhang, immer an fest definierten Winkeln des Blickfeldes anzuordnen. Ähnlich stellt sich auch die Situation beim autonomen Fahren von Kraftfahrzeugen dar, wo bestimmte Informationen in vergleichbaren Bereichen des Blickfeldes dargeboten werden könnten.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Mensch-Maschine-Interaktion in Leitwarten

Auf Bildschirmgeräten werden üblicherweise unterschiedlich abstrahierte Informationen dargeboten, die von der bedienenden Person wahrgenommen und handlungsleitend interpretiert werden muss. Eine angemessene Gestaltung der Bedienoberfläche und der dortigen Informationsdarstellungen bilden die Grundlage für angemessene Bedienhandlungen und die Vermeidung von Fehlern (Hoppe et al. 2019; Stanton et al. 2009). Dabei sollten die Möglichkeiten und Grenzen des Menschen hinsichtlich seiner kognitiven Kapazitäten von vornherein in den Gestaltungsprozess einfließen und somit ein Ansatz des „Human Centered Design“ vorherrschen (Mentler et al. 2018).

Auch aus neueren Theorien der Embedded Embodied Cognition (Dawson 2014, S. 59 ff.) lässt sich eine große Bedeutung angemessener Informationsdarstellung ableiten. Es wird davon ausgegangen, dass äußere Hinweisreize aktiv genutzt und gezielt in die Entscheidungsfindung einbe-

zogen werden (z. B. Wilson 2004, S. 107; Clark und Chalmers 1998). Damit wird deutlich, dass die Erkennung und Verarbeitung von Informationen im Sinne einer Kognition nicht nur ein innerer Vorgang der Berechnung eines Abbildes der Umgebung und dessen Weiterverarbeitung ist. Vielmehr wird postuliert, dass zum Teil Kognitionsprozesse in die Umgebung „ausgelagert“ werden, um die psychische Belastung und die daraus resultierende Beanspruchung vertretbar zu halten. Für die Situation in der Leitwarte könnte dies bedeuten, dass äußere Hinweisreize auf der Bedienoberfläche gezielt genutzt werden, um Arbeitsgedächtniskapazität einzusparen. So können sich die Operator*innen gezielt Inhalte zentral oder etwas weiter entfernt davon anordnen oder Zusatzinformationen ein- und ausblenden, je nach deren Bedeutung für die aktuellen Arbeitsaufgaben. Die Nutzbarmachung von externen Hinweisreizen für die Handlungssteuerung und die entsprechende Einsparung von kognitiven Ressourcen wurden bereits in Leitwarten des Eisenbahnbetriebes nachgewiesen (Sturman et al. 2019). Letztendlich kann auch die gezielte Aufmerksamkeitslenkung durch angemessene Signale als Entlastung der Operator*innen in diesem Sinne verstanden werden, da hier kognitive Ressourcen erst im Falle des Eintretens einer unerwünschten Veränderung mobilisiert werden müssen.

2.2 Softwareergonomische Anforderungen

Aus der handlungsleitenden Funktion von Signalen auf der Interaktionsoberfläche lässt sich die Notwendigkeit ableiten, die Aufmerksamkeit der Operator*innen möglichst gezielt zu lenken. Dies bedeutet im Umkehrschluss, Signale klein zu halten, da sie ansonsten diese Funktion nicht mehr erfüllen könnten. Außerdem sollen sie andere wesentliche Bereiche der Informationsdarstellung nicht überdecken, da daraus wiederum die Gefahr des Nicht-Erkennens von möglicherweise weiteren ebenfalls wichtigen Informationen besteht. Entsprechende Normen existieren für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, wie z. B. DIN EN ISO 9241-112:2017 (S. 13). Für die Informationsdarstellung in Leitwarten existieren zwar keine solchen Vorgaben, jedoch lässt sich dieser Grundsatz auch hier gleichsinnig anwenden.

2.3 Ausdehnung des Gesichts- und Blickfeldes

Als Gesichtsfeld wird der Bereich bezeichnet, in welchem bei ruhendem Kopf und ruhenden Augen Wahrnehmungen möglich sind (Schlick et al. 2018, S. 213). Über Ausdehnung des binokularen Gesichtsfeldes des Menschen existieren verschiedene Angaben. So gibt Bergua (2017, S. 156) einen Bereich von 100° von der Blickachse nach temporal (seitlich außen) sowie 60° nach oben (superior) und 75° nach unten (inferior) an. Andere Autoren sehen die temporale Ausdehnung bei 90° (Brandes et al. 2019, S. 746).

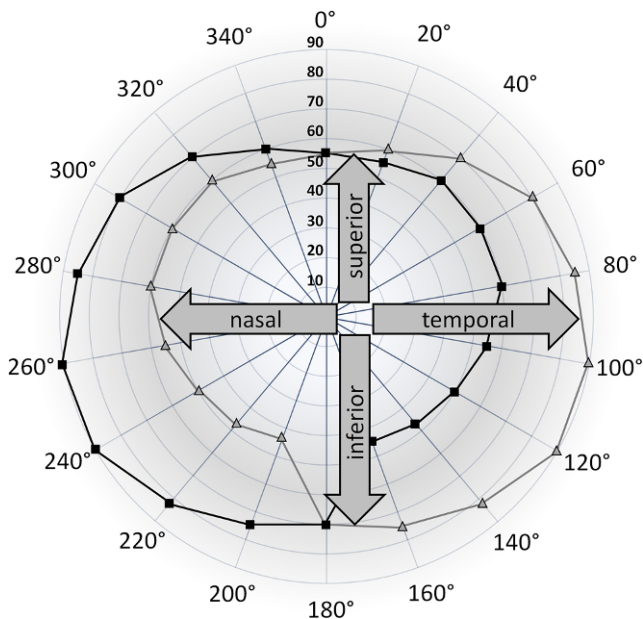


Abb. 1 Ausdehnung des binokularen Gesichtsfeldes mit Verdeutlichung der verwendeten Begriffe am Beispiel des rechten Auges. (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Schlick et al. 2018, S. 214)

Fig. 1 Expansion of the binocular field of view with explanation of the terms used by example of the right eye. (Source: own creation according to Schlick et al. 2018, p. 214)

Die Angaben für die Ausdehnung des superioren Bereiches schwanken dabei stärker. Dies reicht von 55° (Doil und Bindig 1986) bis zu 70° (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014, S. 128). Beispielhaft sind die Ausdehnung sowie die entsprechenden Begriffe in Abb. 1 veranschaulicht.

Für die große Bandbreite von Angaben zur Ausdehnung scheinen inter- und intraindividuelle Unterschiede eine bedeutsame Rolle zu spielen. So werden ontogenetische Gegebenheiten (z. B. Ausprägung der Überaugenwulst/Torus supraorbitalis am Schädel) oder Besonderheiten wie z. B. die oft unbewusste Anspannung oder Entspannung der Muskeln an der Augenpartie als Gründe angeführt. Weiterhin vermindert sich vor allem dieser Bereich auch erheblich mit dem Alter, beginnend ab ca. dem 30. Lebensjahr, während die temporale Ausdehnung keinen so deutlichen Einschränkungen unterliegt wie z. B. Sachsenweger (1971, S. 367) oder Fischer (1950) beschreiben.

2.4 Eigenschaften und abgeleitete Hypothesen

Es existiert nur ein sehr geringer Bereich von etwa 1° um die Sehachse, in dem eine visuelle Auflösung mit maximaler Sehschärfe möglich ist (Schlick et al. 2018, S. 214). Darüber hinaus vermindert sich die Sehschärfe schnell und deutlich (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014, S. 128). Da bei Sehaufgaben in der Regel die Augen bewegt werden, erweitert sich jedoch dieser Bereich. Hier wird sowohl tem-

poral als auch superior und inferior ein Bereich von 15° um die Sehachse als gut erkennbar beschrieben (ebd., S. 130). Alles außerhalb dieses Bereichs bis hin zu den Grenzen des Gesichtsfeldes kann als peripheres Blickfeld bezeichnet werden.

Somit sollte sich die Erkennung von Signalen bei steigendem Winkel ab den beschriebenen ca. 15° um die Sehachse verschlechtern. Dies leitet die Hypothese H1 ab:

H1 Mit steigendem Winkel im peripheren Blickfeld nimmt die Erkennung von Signalen ab.

Trotz abnehmender Sehschärfe werden Bewegungen im peripheren Blickfeld vergleichsweise gut erkannt (Schlick et al. 2018, S. 221; Finlay 1982). Die Bewegungswahrnehmung sollte sich mittels ein- und ausgeblendeter Signale anregen lassen. Daraus ergibt sich die Hypothese H2:

H2 Eine Erhöhung der Wiederholungsfrequenz des Signals sollte dessen Erkennung verbessern.

Bei der Anregung der Bewegungswahrnehmung durch blinkende Signale ist jedoch zu beachten, dass die Frequenzen hier nicht unendlich gesteigert werden können, da auch im peripheren Blickfeld eine Flimmerverschmelzungsfrequenz erreicht wird. Einen Beleg dafür liefert Mester (1988, S. 102). In den dort durchgeführten sportwissenschaftlichen Experimenten mit Testfeldern in einer Ausdehnung von 0,5° des Sehwinkels war die Flimmerverschmelzungsfrequenz deutlich niedriger als im fovealen Bereich, und zwar zwischen ca. 20–30 Hz. Dabei war sie temporal umgekehrt-U-förmig ausgeprägt mit Minima bei ca. 20° und 90° Grad und einem Maximum bei 50°.

Ein weiteres bedeutsames Merkmal des peripheren Blickfeldes ist die in den weiteren Bereichen fehlende Farbwahrnehmung. Diese sind z. B. für blaue Lichtreize bis auf etwa 70°, für rote nur bis auf etwa 50° temporal möglich (Birbaumer und Schmidt 2010, S. 377). Superior und inferior werden ebenfalls nicht die Gesichtsfeldgrenzen für weißes Licht erreicht. Damit fällt die Farbe als ein sinnvoll zu verwendender Einflussfaktor weg, vielmehr muss an den subjektiv empfundenen Helligkeitskontrasten angesetzt werden, was sich durch entsprechende Leuchtdichtekontraste auf den Bildschirmen realisieren lässt. Im äußeren Gesichtsfeld werden nur noch bedeutsame Helligkeitskontraste erkannt (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014, S. 128). Das leitet zur Hypothese H3:

H3 Je größer der Leuchtdichtekontrast des Signals zur Umgebung, desto besser wird das Signal erkannt.

Für die experimentelle Umsetzung ist außerdem die Frage nach der Verteilung dieser eben angesprochenen Eigenschaften im peripheren Blickfeld von Bedeutung, da sich der experimentelle Aufbau daran orientieren muss. Hier gibt es bereits Vorerkenntnisse. So konnte McColgin (1960) zei-

gen, dass die Isogrammlinien der Schwellen für die Erkennung von Bewegungen in der peripheren Ausdehnung des Gesichtsfeldes folgen: Sie sind nasal/temporal etwa doppelt so weit ausgedehnt wie im superioren und inferioren Bereich. Gleiches gilt für die Helligkeits- bzw. Leuchtdichtekontraste, wie z. B. Aulhorn und Harms (1972, S. 102 ff.) oder Mester (1985, S. 329) nachweisen konnten. Eine physiologische Begründung ist durch eine vergleichbare Verringerung der Dichte relevanter Photorezeptoren im peripheren Umfeld der Stelle schärfsten Sehens (Fovea Centralis) in der Retina (Curcio et al. 1990) sowie eine vergleichbare Weiterverarbeitung in den rezeptiven Feldern (Brandes et al. 2019, S. 737 f.) des zentralen Nervensystems gegeben. Insofern können Erkenntnisse, die experimentell in Ausschnitten oder Teilbereichen des peripheren Blickfeldes gewonnen wurden, auf übrige, nicht abgedeckte Bereiche übertragen werden.

3 Methoden

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau und das detaillierte Vorgehen wurde in vorangegangenen Veröffentlichungen (Hoppe et al. 2019; Ganßauge et al. 2020) bereits eingehender beschrieben, weshalb die Darstellung hier eher überblicksartig erfolgt.

Für die Untersuchung wurde im vollklimatisierten Labor des Fachgebiets Arbeitswissenschaft/Arbeitspsychologie an der BTU Cottbus-Senftenberg unter gleichbleibender, standardisierter Beleuchtungssituation ein Laborarbeitsplatz eingerichtet. Dieser orientierte sich im Aufbau an einem Leitwarten-Arbeitsplatz. Dabei wurden die DIN EN ISO 11064-4:2014 zur ergonomischen Gestaltung von Leitzentralen eingehalten. Auf einem stufenlos höhenverstellbaren Tisch wurden fünf Monitore halbkreisförmig angeordnet. Damit war ein gleichbleibender Abstand von 76,6 cm für den Betrachter sichergestellt. Der Tisch und ein vielfältig

einstellbarer Bürostuhl ermöglichten eine ergonomische Sitzhaltung. Für gleichbleibende Bedingungen für rechts- und linkshändige Versuchspersonen sowie zur Vermeidung von Überbeanspruchungen des Hand-Arm-Systems während des Versuchs kam eine ergonomische Rollerm Maus zum Einsatz (Kluth und Keller 2015). Eine Kinnstütze unterstützte die zentrale Ausrichtung und die Vermeidung von Drehungen des Kopfes aus dem zentralen Blickbereich heraus.

In den peripheren Bildschirmen wurde eine komplexe Hintergrundgrafik dargestellt. Diese Grafik orientierte sich an den Schemata für die chemische und petrochemische Industrie (DIN EN ISO 10628-2:2013). Dieser komplexe Hintergrund wurde für eine bessere Prozessnähe mit einem Grundrauschen versehen. Durch veränderliche Zahlen- und Balkenanzeigen innerhalb der Prozessdarstellung wurden Bewegungsmuster generiert, die sich an den Schwellen der Bewegungswahrnehmung im peripheren Bereich (McKee und Nakayama 1984) orientierten und im Vorversuch als wahrnehmbar eingestuft werden konnten. Etwa ein Drittel der über den Bildschirm gleichverteilten Anzeigen änderte sich alle 3 s und erzeugte so das Grundrauschen. Abb. 2 zeigt den Versuchsarbeitsplatz.

3.2 Unabhängige Variablen

Ausgehend von der Zielstellung, Mindestgrößen für die Erzeugung von Aufmerksamkeit zu untersuchen, wurden die Signale als Umrandung einer für den spezifischen Abstand von 76,6 cm normierten und in einer mindestgroßen Schrift mit vier Ziffern bzw. Symbolen dargestellt (DIN 1450:2013; Schmidtke und Jastrzebska-Fraczek 2013, S. 61). Sie waren außen 13,5 mm hoch, 21,5 mm breit und 3 mm dick. Wird die Breite zu Grunde gelegt, umspannten die Signale somit einen Sehwinkel von 1,6°.

Bei der Darstellung der Signale im peripheren Blickfeld wurde aufgrund der eingangs beschriebenen Schwierigkeiten der inter- und intraindividuell verschiedenen Ausdeh-

Abb. 2 Der experimentelle Arbeitsplatz im Labor. (Quelle: eigene Darstellung)

Fig. 2 The experimental workplace at the laboratory. (Source: own creation)



nung des Gesichtsfeldes superior und inferior sowie dessen vergleichbaren Eigenschaften in allen Bereichen für eine vertikale Anordnung der Bildschirme, die den nasalen und temporalen Bereich bis jeweils 90° abdeckt, entschieden. Das heißt, die Signale wurden entlang der horizontalen Anordnung der Bildschirme variiert dargeboten. Da nun Überdeckungseffekte durch die inter- und intraindividuell unterschiedliche Ausdehnung des Gesichtsfeldes nach oben (superior) bei unterschiedlichen Versuchspersonen keinen Störfaktor mehr darstellen können, wurde damit die interne Validität der experimentellen Ergebnisse unterstützt (Döring und Bortz 2016, S. 206). Ansonsten hätten möglicherweise Signale nicht erkannt werden können, da sich z. B. durch leichte Anspannung bei der Aufgabenlösung und ein unbewusstes leichtes Herunterziehen der Augenbrauen das Gesichtsfeld nach oben hin eingeschränkt und dies die Ergebnisse verzerrt hätte. Die gewählten Winkel α_P für die Einblendung der Signale (15°, 40°, 65° und 90°) können aufgrund der eingangs dargestellten vergleichbaren Eigenschaften im peripheren Blickfeld in die Bereiche von ca. 15°, 28°, 42° und 55° superior übertragen werden, wenn die Grenzen der Ausdehnung nach Doil und Bindig (1986) zugrunde gelegt werden.

Die Frequenz f_B wurde anhand der Richtwerte von üblichen Normen für Warn- und Notsignale festgelegt. Die Bandbreite reichte von $f_B = 0$ Hz (nur einblenden) bis $f_B = 5,0$ Hz (DIN EN 842:2009; Schmidtke und Jastrzebska-Fraczek 2013, S. 38–41; Neudörfer 2014, S. 468–477). Damit hat auch die höchste Frequenzstufe eine ausreichende Distanz von der Flimmerverschmelzungsfrequenz. Die Abstände zwischen den Frequenzstufen wurden festgelegt, indem in den Vorversuchen nach der Methode der direkten Größenschätzung eine Bandbreite von Frequenzen peripher dargeboten und durch Zuordnung eines Zahlenwertes von $N=6$ Teilnehmer*innen klassifiziert wurden. Diejenigen, welche ausgewählt wurden, waren anhand der Skalierung gut unterscheidbar und mit vergleichbaren Abständen wahrgenommen wurden.

Gleiches erfolgte für die Feinermittlung des Leuchtdichtekontrastes auf den Bildschirmen als technische Ausprägung eines wahrgenommenen Helligkeitskontrastes. Als Richtwert diente hierbei der in Normen für Bildschirmdarstellungen (DIN EN ISO 9241-6:2001, S. 18) empfohlene Wert von $C_W = 3$ (mittelgrau, vgl. Tab. 1), dieser wurde

Tab. 1 Stufen der unabhängigen Variablen
Table 1 Levels of the independent variables

Stufe	Winkel α_P [°]	Frequenz f_B [Hz]	Leuchtdichtekontrast C_W
1	15	0	0,34 (hellgrau)
2	40	0,5	2,92 (mittelgrau)
3	65	2,5	7,36 (dunkelgrau)
4	90	5,0	15,12 (schwarz)

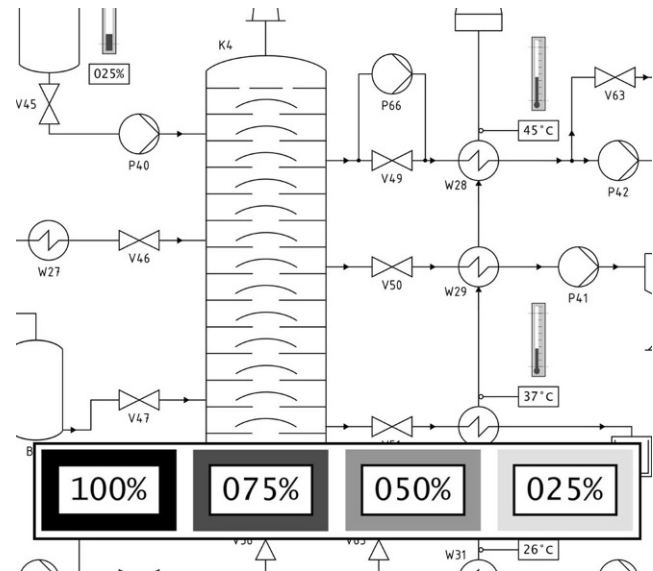


Abb. 3 Der komplexe Hintergrund und die verwendeten Signale in unterschiedlichen Kontraststufen (symbolische Darstellung, keine Originalgröße). (Quelle: eigene Darstellung)

Fig. 3 The complex background and the signals used (symbolic picture, no original size). (Source: own creation)

zusammen mit dem höchsten auf den verwendeten Bildschirmen erreichbaren Wert von $C_W = 15,12$ (schwarz) als Ankerwerte verwendet, welche um eine mittlere sowie eine niedrige Kontrastabstufung ergänzt wurden. Die niedrigste Kontrastabstufung „hellgrau“ wurde mittels Konstanzmethode aufgrund ihrer Nähe zur unteren Wahrnehmungsschwelle peripher ermittelt. Die Zwischenstufe zwischen dem aus der Norm abgeleiteten Wert „mittelgrau“ und dem technisch erreichbaren Maximalwert von „schwarz“, wurde aufgrund der Methode der direkten Größenschätzung als gleichabständig zu diesen Ankerwerten festgelegt. Der Verzicht auf eine farbige Darstellung und die daraus resultierende Verwendung von Graustufen erfolgte aufgrund der eingangs dargestellten fehlenden Farbwahrnehmung des Auges in der Peripherie. Abb. 3 zeigt den komplexen Hintergrund mit einer symbolischen Darstellung der vier Leuchtdichtekontraststufen.

Die Tab. 1 fasst übersichtlich sämtliche Abstufungen für die verwendeten unabhängigen Variablen zusammen. Die Kombination aus diesen Variablen ergab 64 Signale.

3.3 Kontrollvariablen

Als Kontrollvariablen wurden versuchsbegleitend neben den Versuchsdaten weitere subjektive und objektive Daten erfasst. Eine im Voraus durchgeführte Befragung stellte den normal ausgeruhten und durch aufmerksamkeitsverändernde Substanzen unbeeinflussten Zustand der Probanden*innen sicher. Mit einem Blickerfassungssystem (Firma Ergoneers, Typ Dikablis Professional Glasses) wurden die

Blickrichtungen der Versuchspersonen aufgezeichnet, um kontrollieren zu können, ob der Blick tatsächlich wie intendiert im zentralen Bereich verblieben war. Zur Kontrolle auf ein mögliches zu hohes Arousal im Sinne eventueller Schreckreaktionen während der Einblendung von Signalen wurde mittels eines EKG-Systems (Firma BioSign, Typ eMotion Faros 180) die Herzschlagfrequenz aufgezeichnet. Ergänzt wurden die objektiven Maße durch subjektive Skalen, z. B. zur wahrgenommenen Beanspruchung (KAB; Müller und Basler 1993) sowie zum Umgang mit der Rollerm Maus.

3.4 Aufmerksamkeitsbindung zentral

Die Bindung der Aufmerksamkeit im zentralen Blickfeld erfolgte durch die „Tower of London“-Aufgabe (ToL-Aufgabe) aus der PEBL-Testbatterie (Mueller und Piper 2014). Diese stellt eine typische Aufgabe des psychologischen Problemlösens dar. Es sind komplexe Denkprozesse im Sinne von schlussfolgern, antizipieren, planen und ausführen involviert (Ward und Allport 1997). Damit ist sie als ein gutes Abbild einer Problemlösesituation an einem realen Leitstand zu betrachten. Die originale Aufgabe wurde durch Eingriffe in den Quellcode verändert, wodurch zum einen die Helligkeitskontrastverhältnisse der übrigen Umgebung angepasst (Kontrolle von Störfaktoren) und zum anderen die Schwierigkeitsstufen der Aufgabe kontrolliert vorgegeben werden konnten. Dies erfolgte nach dem bei Fimbel et al. (2009) beschriebenen Lösungsalgorithmus. Es existieren Schwierigkeitsstufen von einem bis acht Bearbeitungsschritten für die optimale Lösung. Nach einer Eingewöhnungszeit mit ansteigender Schwierigkeit, um sich mit der Aufgabe vertraut zu machen, wurde im späteren Verlauf nur noch in den höheren Schwierigkeitsstufen (vier bis acht minimale Bearbeitungsschritte) alterniert, um eine ausreichende kognitive Beanspruchung zu erzeugen. Ein weiterer Vorteil dieser Aufgabe war die relativ geringe Ausdehnung auf dem Bildschirm bei gleichzeitig guter Wahrnehmbarkeit ihrer einzelnen Elemente: Die Ausdehnung betrug lediglich ca. 7,5° horizontal und vertikal, sodass sich der Blick während der Aufgabenbearbeitung in einem relativ engen Bereich bewegte.

3.5 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde an zwei Tagen durchgeführt. Unterbrochen von einer 5-minütigen Aktivpause, betrug die Durchführungzeit an einem Tag jeweils zweimal 24 min. In dieser Zeit lösten die Versuchspersonen auf dem zentralen Bildschirm die aufmerksamkeitsbindende ToL-Aufgabe, während auf den peripheren Bildschirmen durchschnittlich alle 90 s ein zu erkennendes Signal angezeigt wurde. Die Variablen Winkel, Leuchtdichtekontrast und Frequenz wa-

ren dabei zufällig verteilt und über die linke und rechte Hälfte der Bildschirme ausbalanciert. Es wurde immer nur ein Signal zur gleichen Zeit für 15 s dargeboten, welches sofort bei Erkennung und ohne eine Kopfbewegung mittels eines Buttons im zentralen Monitor zu quittieren war. Zwischen den einzelnen Signaldarbietungen vergingen mindestens 20 s, um eine Aufmerksamkeitsbindung zur ToL-Aufgabe im zentralen Blickfeld wiederherzustellen. Insgesamt wurden jeder Versuchsperson 64 zu erkennende Signale im peripheren Blickfeld präsentiert. Der Versuchsablauf, die Erholungswirkung der Pausen sowie die Verteilung des Versuches auf zwei Tage wurden getestet und stellten sich sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch als tauglich und wirksam heraus.

4 Ergebnisse

Die erhobene Stichprobe sollte die Beanspruchung bei einer typischen Arbeitspopulation nachbilden, um die externe Validität der Ergebnisse zu unterstützen. Deshalb wurde eine breite Altersverteilung der Versuchspersonen angestrebt. Der Altersdurchschnitt der 52 Proband*innen lag bei 34,1 Jahren mit einer Standardabweichung (*SD*) von 14,7 Jahren. Sie spannte sich von 19 bis 67 Jahren und damit breit über die Altersverteilung von Menschen im Arbeitsleben. Von den Teilnehmenden waren 40,4 % weiblich und 59,6 % männlich. Aus der Stichprobengröße ergaben sich in der Multiplikation mit der Anzahl der jeweils präsentierten Signale 3328 Beobachtungen zur Erkennung als Basis für die spätere statistische Auswertung. Die Proband*innen erhielten eine kleine Aufwandsentschädigung. Die Studie hatte vor ihrer Durchführung ein positives Votum der Ethikkommission der BTU Cottbus-Senftenberg erhalten.

4.1 Ergebnisse der Kontrolltechniken zur Absicherung der Validität

Durch den komplexen Versuchsaufbau und die relativ lange Versuchsdauer wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Ergebnisse passende Gütekriterien aufweisen. Insbesondere auf die Absicherung der Validität wurde großer Wert gelegt. Dazu wurde zunächst sichergestellt, dass die Proband*innen angemessene körperliche Gesundheit und insbesondere Augengesundheit (keine Einschränkungen im Gesichtsfeld, keine degenerativen Augenerkrankungen) aufwiesen. Zusätzlich wurden einige spezielle Kontrolltechniken eingesetzt. Zunächst werden deshalb die Ergebnisse dieses Vorgehens dargestellt, bevor die eigentlichen experimentellen Ergebnisse berichtet werden.

4.1.1 Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung (KAB; Müller und Basler 1993)

Da im gewählten Versuchsaufbau die Bedingungen recht komprimiert dargeboten wurden, war sicherzustellen, dass die Versuchspersonen keine psychische Überbeanspruchung, sondern vielmehr ein mit Arbeitstätigkeiten vergleichbares angemessenes Beanspruchungsniveau erlebten. Ansonsten könnten die erreichten Ergebnisse nicht auf übliche Arbeitssituationen übertragen werden. Die externe Validität der Beanspruchungsbeurteilung wäre mithin gefährdet (Döring und Bortz 2016, S. 104). Um dies messbar zu machen, wurde der KAB eingesetzt. Er verfügt über angemessene Gütekriterien hinsichtlich Objektivität, Reliabilität und Validität. Das momentane Beanspruchungserleben ist als eindimensional-bipolares Konstrukt beschrieben und wird auf insgesamt sechs Items eingeschätzt. Jedes Item kann wiederum in sechs Stufen angekreuzt werden. Die Items sind unterschiedlich gepolt, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Für die weitere Auswertung wurden alle positiven Pole mit dem Wert „1“ codiert und alle negativen mit dem Wert „6“. Werte nahe bei „1“ deuten somit auf ein sehr gelassenes, entspanntes und behagliches Befinden hin. Werte nahe bei „6“ stehen dagegen für ein sehr angespanntes, unruhiges und unwohltes Befinden. Der KAB wurde jeweils vor und nach einer Versuchsdurchführung von 24 min dargeboten, somit existieren acht Messzeitpunkte (Abb. 4).

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte indem zunächst gemäß dem Manual des KAB die Mittelwerte der sechs Items für jeden Messzeitpunkt berechnet wurden. Diese wurden anschließend mittels einer Varianzanalyse mit Messwiederholung (Weiß 2019, S. 180) verglichen. Die zusätzliche Bedingung welche bei statistischen Verfahren mit Messwiederholungen gemacht werden sollte, besteht in der Zirkularitätsannahme (Sphärizität). Verletzungen der

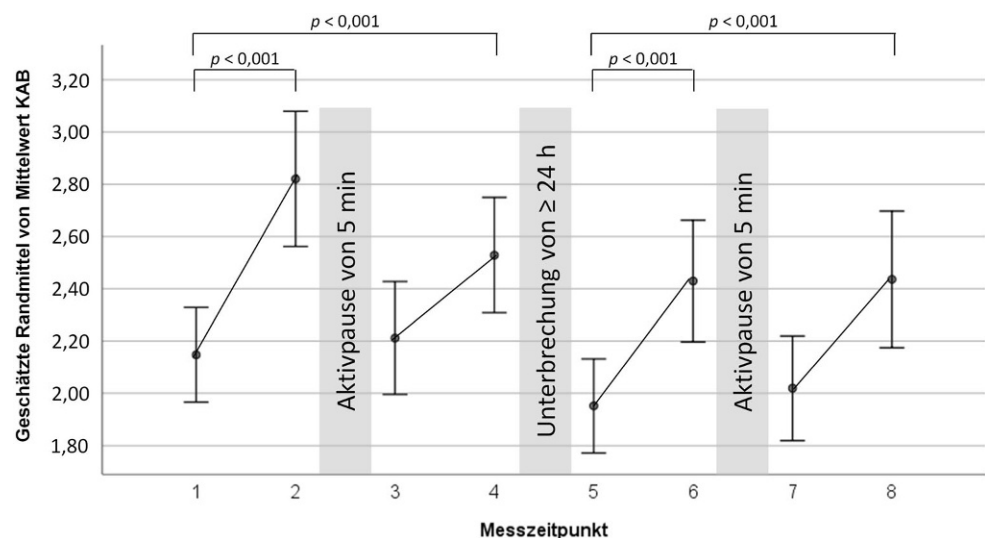
Zirkularitätsannahme liegen vor, wenn heterogene Korrelationen zwischen den Messungen unsystematisch variieren (Bortz und Schuster 2010, S. 301). Diese Bedingung der Sphärizität war nicht gegeben, weswegen eine Korrektur nach Greenhouse-Geisser erfolgte ($F[3,56; 51]=17,97$; $p<0,001$; partielles $\eta^2=0,26$; $N=52$). Es zeigte sich ein hochsignifikanter Haupteffekt. In den anschließenden Bonferroni-korrigierten paarweisen Vergleichen zeigen sich die Erholungswirkung der Pausen und der Unterbrechung von mindestens einem Tag zwischen den Versuchsdurchführungen, da kein signifikanter Unterschied zum Ausgangszustand mehr erkennbar wird. Die Wirkung der experimentellen Aufgabe wird durch hochsignifikante Unterschiede nach den Versuchsdurchführungen gegenüber den Ausgangswerten des jeweiligen Tages (Abb. 4) sichtbar. Alle geschätzten Randmittel jedes Messzeitpunktes liegen im 95 %-Konfidenzintervall sämtlich in der positiven Hälfte der Beschreibungsdimension (Werte $<3,5$). Folglich ist hier von einer angemessenen Beanspruchung auszugehen. Die erreichten Ergebnisse können somit von diesem Aspekt her extern valide betrachtet und auf reale Arbeitssituationen übertragen werden.

4.1.2 Aufgabe zur Aufmerksamkeitsbindung im zentralen Blickfeld

Die Auswertung der zur Bindung der Aufmerksamkeit im zentralen Blickfeld eingesetzten ToL-Aufgabe erbrachte, dass im Durchschnitt über alle Versuchspersonen und die gesamte Dauer des Experiments (96 min) ein Bearbeitungsschritt (BS) je 3,1 s durchgeführt wurde. Die mittleren Erkennungsraten (M) sowie die Standardabweichungen (SD) sind in Tab. 2 dargestellt.

Jede der unterschiedlichen Schwierigkeitsstufen der Aufgabe kann in einer definierten Mindestanzahl ($BS_{\min}$) von eins bis acht Schritten gelöst werden. Die Ergebnisse zei-

Abb. 4 Ergebnisse des KAB. Fehlerbalken zeigen 95 %-Konfidenzintervall. (Quelle: eigene Darstellung)
Fig. 4 Results of the KAB. Error bars showing 90 %-CI. (Source: own creation)



Tab. 2 Deskriptive Statistik der ToL-Aufgabe**Table 2** Descriptive Statistics of the ToL-task

	BS/min [Anzahl]	BS > BS _{min} [%]
<i>M</i>	19,5	24,3
<i>SD</i>	6,9	15,0

gen, dass im Mittel etwa ein Viertel mehr BS als minimal nötig durchgeführt wurden. Für diesen Test existieren keine Normwerte. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Lösung erst bei einer sehr großen Anzahl über BS_{min} durch bloßes ausprobierendes Klicken und weniger geistige Auseinandersetzung mit der Aufgabe gefunden wurde. Die relativ geringe Anzahl über dem Optimum lässt dagegen auf eine geistige Auseinandersetzung mit der Aufgabe rückschließen, so wie es experimentell intendiert war.

4.1.3 Blickerfassung zur Prüfung der Aufmerksamkeitsbindung zentral

Eine zusätzliche Kontrolle für die zentrale Aufmerksamkeitsbindung stellte die Blickerfassung dar. Diese zeigte, dass der überwiegende Teil der Blickbewegungen im intendierten Bereich der ToL-Aufgabe stattfand. Die Auswertung mittels D-Lab-Software zeigte bei lediglich 0,99 % der zufällig eingespielten Signale eine vorherige Blickbewegung außerhalb des zentralen Monitors in Signalrichtung. In diesen Fällen konnte eine tatsächlich periphere Erkennung nicht angenommen werden. In 4,59 % der Zeitabschnitte der experimentellen Durchführung waren aus technischen Gründen keine Blickerfassungsdaten auswertbar. Da beides zusammengekommen somit in nur sehr wenigen Fällen und außerdem unsystematisch sowie für die Versuchspersonen nicht erkennbar auftrat, wurden die fehlenden Werte für die Erkennung aus dem übrigen Datensatz statistisch imputiert. Dies erfolgte anhand einer multiplen automatischen Imputation, bei welcher seitens des verwendeten Statistikprogrammes die bestmögliche Passung aus verschiedenen Möglichkeiten gewählt wird. Damit verbessern sich die Auswertungsmöglichkeiten mittels inferenzstatistischer Verfahren.

4.1.4 Umgang mit der Rollerm Maus

Durch die Nutzung der Rollerm Maus konnten gleiche Bedingungen bezüglich der Bedienbarkeit für rechts- und linkshändige Menschen ermöglicht werden. Es war aber sicherzustellen, dass durch den Umgang mit der ergonomischen, jedoch für die Proband*innen ungewohnten Rollerm Maus keine Fehlbedienungen geschehen. Deshalb wurde im Anschluss eines jeweiligen Versuchstages eine Kurzbefragung mit drei fünfstufigen Likert-skalierten Items

(Döring und Bortz 2016, S. 234) zum Umgang mit der Rollerm Maus nachgeschaltet. Die Fragen bezogen sich auf die Bedienbarkeit und Reaktionsschnelle im Vergleich zu einer üblichen Computerm Maus sowie die subjektiv wahrgenommene Häufigkeit von Fehlbedienungen.

Nach dem ersten Tag der Versuchsdurchführung gaben die Probanden Werte an, die deutlich im positiven Bereich der Skala liegen ($M = 3,89$; $SD = 0,87$; positives Maximum bei Wert „5“). Die Probanden schätzten damit die Bedienbarkeit und Reaktionszeit als kaum unterschiedlich im Vergleich zu einer üblichen Computerm Maus ein und die Fehleranzahl stieg wahrgenommen dadurch ebenfalls kaum an. Nach dem zweiten Tag der Versuchsdurchführung zeigte sich ein vergleichbares Bild ($M = 3,69$; $SD = 0,97$). Durch die in der späteren Auswertung mithilfe der Blickerfassung durchgeführte Bereinigung der Reaktionszeit um die Bewegungszeit konnten diese Ergebnisse stichprobenartig bestätigt werden.

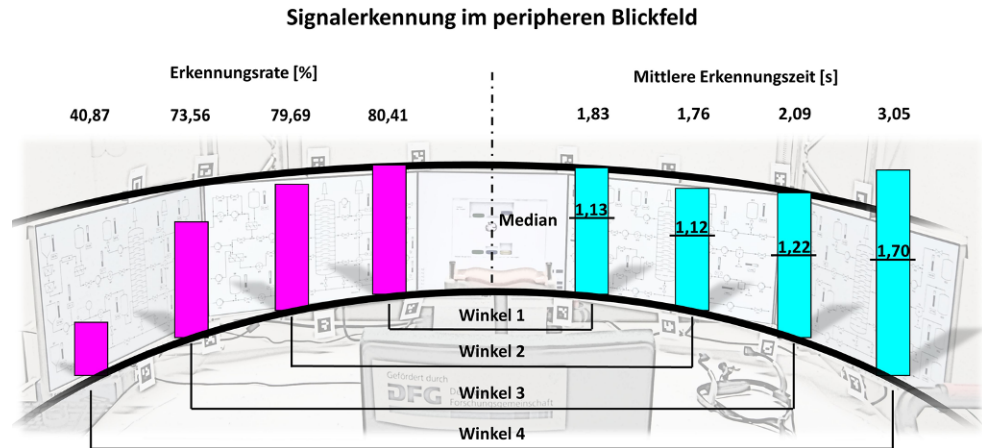
4.1.5 Verhinderung übermäßig starken Arousals durch die peripheren Signale

Mit der Aufzeichnung der Herzschlagfrequenz (HF) sollte sichergestellt werden, dass die Versuchspersonen durch die Einblendung des Signals nicht plötzlich stark im Sinne einer Schreckreaktion/Startle Reflex abgelenkt wurden. Bei einer Schreckreaktion steigt die HF üblicherweise innerhalb von ca. 10 s nach dem Reiz um bis zu 10 Schläge pro Minute an (Birbaumer und Schmidt 2010, S. 504; Holand et al. 1999). Ausgehend von diesem Zusammenhang wurden somit die Mittelwerte der 10 s vor und 10 s nach Einblenden des Signals verglichen. Bei keinem der durchgeführten Unterschiedstests zeigte sich eine signifikante Steigerung der HF. In der Nachbefragung wurde zusätzlich auf einer fünfstufigen Skala nach subjektiv empfundenen Schreckreaktionen gefragt. Der positive Pol der Skala („trifft gar nicht zu“ bei der Frage nach dem Erschrecken) befand sich beim Wert von „1“. Die erreichten Werte betrugen $M = 1,35$ $SD = 0,56$ nach dem ersten und $M = 1,37$ und $SD = 0,77$ nach dem zweiten Versuchstag. Sowohl seitens des subjektiven Erlebens als auch seitens der objektiven Daten ergeben sich somit keinerlei Hinweise auf eine Schreckreaktion. Die Ergebnisse bestätigen damit auch die Erkenntnisse aus den Vorversuchen, wo dies ebenfalls bereits geprüft worden war.

4.2 Ergebnisse der Erkennung im peripheren Blickfeld

Die Ergebnisse der Wirkung der unabhängigen Variablen werden zunächst allgemein deskriptiv dargelegt und später mittels inferenzstatistischer Verfahren abgesichert.

Abb. 5 Deskriptive Statistik der Erkennungsrate und Reaktionszeit in den Winkelbereichen. (Quelle: eigene Darstellung)
Fig. 5 Descriptive Statistics of the recognition rates and times in the angular ranges



4.2.1 Deskriptive Darstellung der Erkennung im gesamten peripheren Blickfeld

In Abb. 5 sind die Erkennungsraten der Signale (links) und die mittlere Erkennungszeit und der Median (rechts) in Abhängigkeit von den vier untersuchten peripheren Winkeln dargestellt.

Dabei wird die mit steigendem Peripheriewinkel sinkende Erkennungsrate sehr deutlich. Die mittlere Erkennungszeit erhöht sich tendenziell jedoch mit steigendem Winkel. Die nachfolgenden Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS® Statistics 26 durchgeführt.

4.2.2 Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit von Frequenz und Leuchtdichtekontrast

Bevor die anschließenden Analysen die detaillierte Wirkung aller Einflussfaktoren aufzeigen, soll zunächst die Wirkung von Frequenz und Leuchtdichtekontrast unter Zusammenfassung der vier Winkelstufen erfolgen. Damit ist ein erster anschaulicher Überblick der Erkennungsraten der 16 Signalkombinationen aus Frequenz und Leuchtdichtekontrast bei den $N = 52$ Versuchsteilnehmer*innen möglich (Abb. 6). Dies kann unter anderem auch von Bedeutung sein, wenn der genaue Winkel im peripheren Blickfeld nicht kontrolliert werden kann, so wie das beispielsweise an bisher typischen Leitwartenarbeitsplätzen der Fall ist. Die später folgenden Auswertungen beziehen dann alle unabhängigen Variablen (also auch den Winkel im peripheren Blickfeld) mit ein und untersuchen ebenfalls mögliche Interaktionseffekte.

Hier zeigt sich, dass die Erkennungsrate mit steigender Frequenz und höheren Leuchtdichtekontrasten hypothesenkonform anstieg. Die Auswertung mittels Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen signifikanten Haupteffekt zwischen den einzelnen Messzeitpunkten ($F[15, 52] = 134,2$; $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,73$; auf Grund des signifikanten Mauchly-Tests erfolgte eine Sphärizitätskorrektur

nach Greenhouse-Geisser auf $df = 7,29$). In den anschließenden Tests der Innersubjektkontraste mit Bonferroni-Korrektur kristallisierte sich eine Gruppe der fünf am besten erkannten Signale heraus, die sich nicht signifikant voneinander unterschieden und folglich als gleich gut erkannt gelten können. Die mittleren Erkennungszeiten sowie die Standardabweichungen sind in Tab. 3 dargestellt.

Diese Gruppe ist in Tab. 3 kursiv dargestellt. Alle übrigen Signale unterschieden sich signifikant und wurden somit überzufällig schlechter erkannt. Die dargestellten Werte basieren auf den geschätzten Randmitteln als Post-Hoc-Test. Daraus ergibt sich ein erster Hinweis in Richtung besserer Erkennung mit steigender Frequenz und steigendem Helligkeitskontrast. Um die Effekte der drei unabhängigen Variablen im Sinne der Hypothesen jedoch gemeinsam zu analysieren, wurde anschließend eine binär-logistische Regression der Erkennung sowie eine lineare Regression der

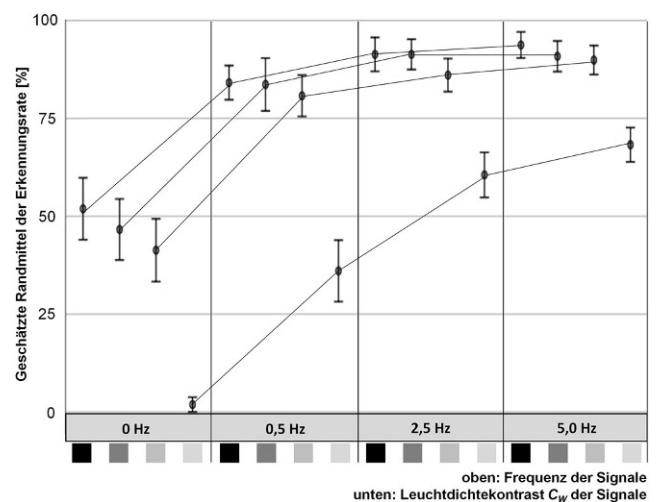


Abb. 6 Erkennungsraten der Signale in Abhängigkeit von den Variablen Frequenz und Leuchtdichtekontrast C_W . Fehlerbalken: 95 % Konfidenzintervall. (Quelle: eigene Darstellung)

Fig. 6 Recognition rates depending on their frequency and illuminance contrast. Error bars: 95 % CI. (Source: own creation)

Tab. 3 Inferenzstatistische Maße der Erkennungsraten
Table 3 Inference statistical measures of the recognition rates

Signale	M [%]	SD [%]	Mittlere Differenz zu 5,0 Hz; schwarz [%]	Standardfehler der Differenz [%]	p
5,0 Hz; schwarz	93,75	11,99	–	–	–
2,5 Hz; schwarz	91,35	15,57	2,40	1,57	1,00
2,5 Hz; dunkelgrau	91,35	13,90	2,40	1,72	1,00
5,0 Hz; dunkelgrau	90,87	14,03	2,88	1,48	1,00
5,0 Hz; mittelgrau	89,90	13,34	3,85	1,59	1,00
2,5 Hz; mittelgrau	86,06	15,19	7,70	2,01	0,04*
0,5 Hz; schwarz	84,13	15,68	9,63	2,29	0,01*
0,5 Hz; dunkelgrau	83,65	24,20	10,10	2,50	0,02*
0,5 Hz; mittelgrau	80,77	18,93	12,98	2,70	0,00*
5,0 Hz; hellgrau	68,27	15,75	25,48	2,43	0,00*
2,5 Hz; hellgrau	60,58	20,62	33,18	2,63	0,00*
0 Hz; schwarz	51,92	28,37	41,83	3,99	0,00*
0 Hz; dunkelgrau	46,63	28,02	47,13	3,86	0,00*
0 Hz; mittelgrau	41,35	28,82	52,40	3,84	0,00*
0,5 Hz; hellgrau	36,06	28,19	57,70	3,73	0,00*
0 Hz; hellgrau	1,92	6,73	91,83	1,78	0,00*

*Die mittlere Differenz ist auf dem 0,05-Niveau signifikant

Reaktionszeiten gut erkannter Signale (vgl. Abschn. 4.2.3 und 4.2.4) durchgeführt.

Während der Versuchsdurchführung gab es insgesamt 66 Zeitabschnitte von mindestens 20 s Länge, in denen falsche Alarmer (Betätigung des Erkennungsbuttons ohne Erscheinen eines Signals) erzeugt werden konnten. Somit entstanden über alle Versuchspersonen 3432 Zeitabschnitte. Die falschen Alarmer kamen bis auf einige wenige Ausreißer bei den Teilnehmenden sehr selten vor. Die Hälfte der Versuchspersonen hatte lediglich einen oder gar keinen falschen Alarm. Im Mittel über die 52 teilnehmenden Proband*innen waren es 4,1.

4.2.3 Binäre logistische Regression der Signalerkennung

Analog der theoretischen Vorerkenntnisse waren Hypothesen formuliert worden. So wurde bei steigender Frequenz und steigendem Leuchtdichtekontrast von einer verbesserten Erkennungsrate ausgegangen. Bei höheren Winkeln im peripheren Blickfeld sollten jedoch die Erkennungsraten absinken. Um diese Hypothesen zu prüfen, wurde eine binär-logistische Regression der Erkennungswahrscheinlich-

keit mittels Einschlussmethode durchgeführt (Weiß 2019, S. 188 ff.). Als Stufen der drei unabhängigen Variablen wurden die Abstufungen nach der erlebten subjektiven Gleichabständigkeit gewählt, die in Tab. 1 dargestellt sind. Zusätzlich wurde ein Interaktionsterm eingefügt, um mögliche Effekte diesbezüglich zu prüfen. Die Analyse mittels Einschlussmethode erbrachte einen hochsignifikanten Effekt für das gesamte Modell ($X^2 [4] = 1347,34$; $p < 0,001$; auf Basis der $N = 3328$ Beobachtungen bei den 52 Teilnehmer*innen). Eine ausführliche Darstellung enthält die Tab. 4.

Da der Interaktionsterm $\alpha_P \cdot f_B \cdot C_W$ ebenfalls eine Signifikanz erreichte, wurde eine detaillierte Analyse nachgeschaltet. Diese sollte zeigen, welche der drei möglichen Faktorkombinationen signifikante Interaktionen aufweisen. Es ergab sich, dass die Kombination Winkel α_P * Frequenz f_B ($\beta = -0,630$; $p = 0,000$) sowie jene von Frequenz f_B und Leuchtdichtekontrast C_W ($\beta = 0,176$; $p = 0,001$) interagierten. Zur Interpretation der Art der Interaktion wurden Interaktionsdiagramme erstellt (Abb. 6).

Die Interaktion zwischen Winkel und Frequenz zeigt, dass diese Faktoren nicht vollständig additiv wirken. Viel-

Tab. 4 Inferenzstatistische Maße der binär-logistischen Regression der Signalerkennung
Table 4 Inference-statistical measures of the binary logistic regression of signal recognition

Unabhängige Variable	Koeffizient β	Standardfehler	Wald-Statistik	df	p	$\text{Exp}(\beta)$	95 % CI für $\text{Exp}(\beta)$	
							Unterer Wert	Oberer Wert
Winkel α_P	-0,910	0,048	362,295	1	0,000	0,402	0,366	0,442
Frequenz f_B	1,149	0,051	512,452	1	0,000	3,154	2,855	3,484
L.-kontrast C_W	0,863	0,047	333,000	1	0,000	2,371	2,161	2,601
(Konstante)	-1,472	0,182	65,505	1	0,000	0,229	–	–

mehr unterscheidet sich ihre Wirkung in Abhängigkeit von der Ausprägung (Döring und Bortz 2016, S. 712). Das zeigen die beiden Interaktionsdiagramme in Abb. 7 b) links und rechts. In diesen verlaufen die Graphen zwar gleichsinnig, jedoch nicht parallel. Auch zeigen sich für einzelne Faktorstufen nur geringe Unterschiede. So sind vor allem die Erkennungsraten bei Frequenzen von 2,5 und 5,0 Hz über alle Winkel recht eng beieinander, ebenso ist die Erkennung bei den niedrigsten Winkeln von 15 und 40° über alle Frequenzen recht ähnlich, erst bei höheren Stufen von 65 und 90° fällt die Erkennung relativ stark ab. Letztendlich weist der erwähnte gleichsinnige Verlauf auf eine ordinale Interaktion hin. Dies spricht wiederum für die globale Interpretation der Haupteffekte von Winkel und Frequenz (Döring und Bortz 2016, S. 713). Ebenso zeigt die Interaktion zwischen Leuchtdichte- und Frequenz, dass auch diese Faktoren nicht vollständig additiv wirken (vgl.

Abb. 7 a) links und rechts). Auch hier verlaufen die Graphen zwar gleichsinnig, jedoch nicht vollständig parallel. Ebenso unterscheiden sich einzelne Faktorstufen nur wenig. So sind vor allem die Erkennung bei Frequenzen von 2,5 und 5,0 Hz über alle Leuchtdichte- und Kontraststufen recht eng beieinander, ebenso werden vor allem Signale mit den beiden höchsten Stufen des Leuchtdichte-Kontrastes („dunkelgrau“ und „schwarz“) über alle Frequenzen hin nahezu gleich gut erkannt. Der gleichsinnige Verlauf der Graphen weist ebenso auf eine ordinale Interaktion hin, was wiederum für die globale Interpretation der beiden Haupteffekte von Leuchtdichte- und Frequenz spricht. Letztendlich ist der Einfluss des Interaktionsterms jedoch vergleichsweise gering, da das 95 %-Konfidenzintervall nur knapp außerhalb des Wertes von „1“ liegt, welcher auf keinen Einfluss hinweist (Tab. 4).

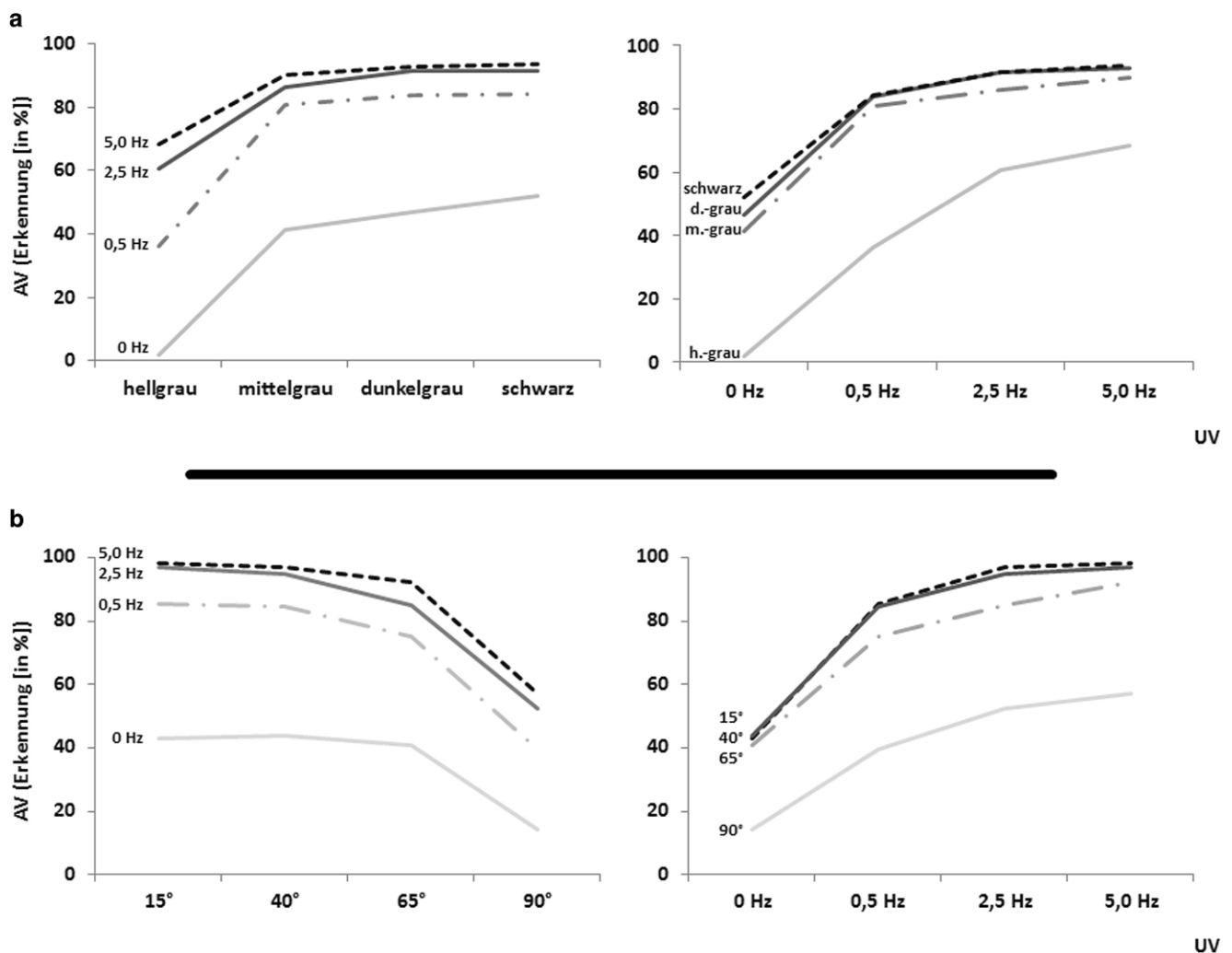


Abb. 7 Interaktionsdiagramme für die jeweils vier Stufen der Faktoren Leuchtdichte- und Frequenz [a) linke Seite] sowie die jeweils vier Stufen der Faktoren Winkel [b) linke Seite] und Frequenz [b) rechte Seite]. (Quelle: eigene Darstellung)

Fig. 7 Interaction diagrams for each of the four levels of the factors luminance contrast [a) left side] and frequency [a) right side] and each of the four levels of the factors angle [b) left side] and frequency [b) right side]. (Source: own creation)

Unter Beachtung der Interaktion weisen die drei unabhängigen Variablen hochsignifikante Effekte in der erwarteten Richtung auf. Der Regressionskoeffizient β erreichte für Leuchtdichtekontrast und die Frequenz positive Werte, steigende Stufen ermöglichen eine bessere Erkennung. Der Winkel wies einen negativen Koeffizienten auf. Bei steigender Stufe verschlechterte sich somit die Erkennung.

Aus dem $\text{Exp}(\beta)$ in der Tab. 4, vermindert um den Wert „1“ und multipliziert mit 100, um prozentuale Werte zu erreichen, lässt sich die Veränderung der relativen Wahrscheinlichkeit direkt ablesen (Backhaus et al. 2018, S. 293): Steigt der Winkel um eine Einheit, vermindert dies die relative Erkennungswahrscheinlichkeit um 43,3 %. Steigt die Frequenz um eine Einheit, erhöht dies die relative Erkennungswahrscheinlichkeit um 267,0 %. Steigt der Leuchtdichtekontrast um eine Einheit, erhöht dies die relative Wahrscheinlichkeit der Erkennung um 174,0 %. Der Interaktionsterm senkt die Erkennung geringfügig um

2,3 % je steigender Einheit. In einer Regressionsfunktion ausgedrückt, ergibt sich:

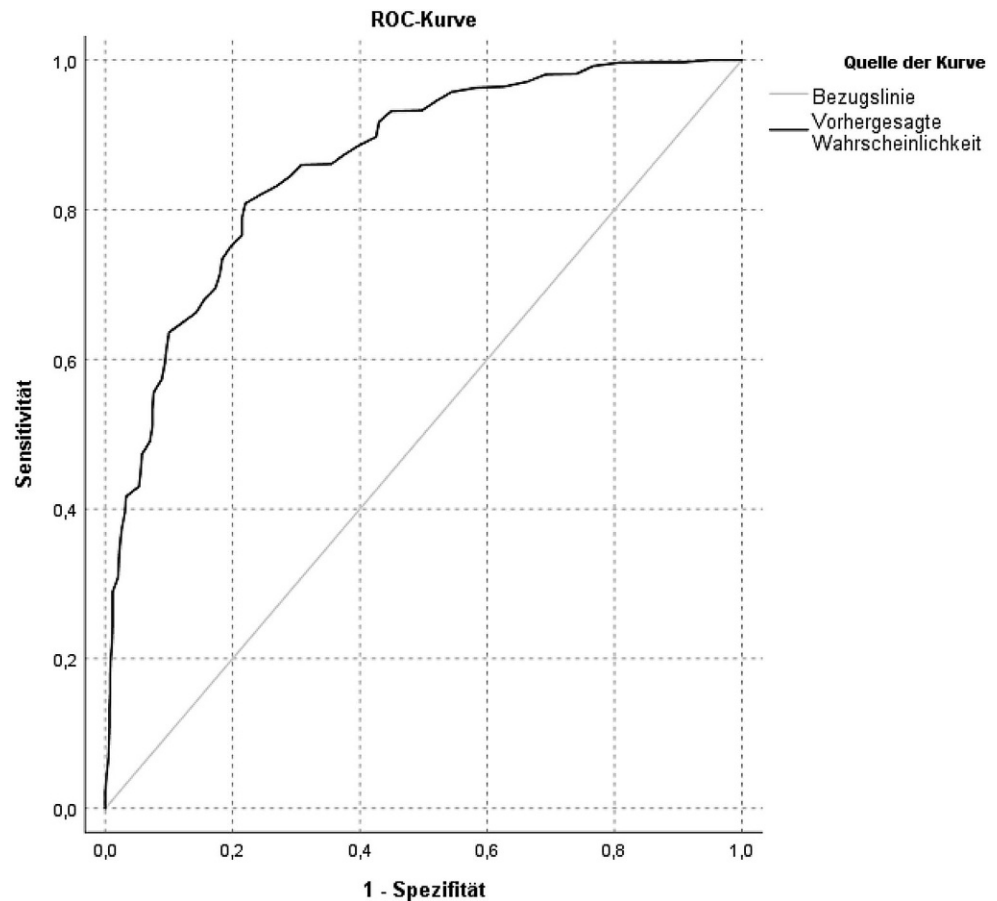
$$P(\text{Erkennung} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(1,668 - 0,815 \cdot \alpha_P + 1,300 \cdot f_B + 1,008 \cdot C_W - 0,023 \cdot (\alpha_P \cdot f_B \cdot C_W))}}$$

Für die Bestimmung der Vorhersagegüte des zugrundeliegenden mathematischen Modells kann das Nagelkerke- R^2 verwendet sowie eine ROC-Kurve erstellt werden (Backhaus et al. 2018, S. 299, 306). Eine ROC-Kurve verdeutlicht die Sensitivität (Wahrscheinlichkeit eines vorhergesagten positiven Ergebnisses, wenn das Ergebnis tatsächlich positiv ist) und Spezifität (Wahrscheinlichkeit eines vorhergesagten negativen Ergebnisses, wenn das Ergebnis tatsächlich negativ ist). Die ROC-Kurve des in Tab. 4 dargestellten Modells weist mit einem hochsignifikanten Wert von 0,86 einen großen Flächeninhalt nahe „1“ auf, was für eine starke Vorhersagegüte spricht (Abb. 8).

Das aus dem Bestimmtheitsmaß errechnete Nagelkerke- R^2 hat einen Wert von 0,47. Dies entspricht umgerechnet in die standardisierte Effektstärke f nach Cohen (1992), einem Wert von 0,93, was als starker Effekt zu klassifizieren ist. Die Vorhersagegüte beträgt insgesamt 79,7 %.

Abb. 8 ROC-Kurve der binären logistischen Regression der Erkennungswahrscheinlichkeit. Graue Diagonale: Bezugslinie, Schwarze Linie: vorhergesagte Wahrscheinlichkeit. (Quelle: eigene Darstellung)

Fig. 8 ROC curve of the binary logistic regression of recognition probability. Grey diagonal: reference line, black line: predicted probability. (Source: own creation)



4.2.4 Regression der Reaktionszeiten

Zum Hypothesenkomplex zählt die Frage, ob es einen Einfluss der drei im Experiment genutzten unabhängigen Variablen auf die Erkennung des Signals gibt. Das schließt somit nicht nur die Erkennung an sich, sondern auch die Reaktionszeit t_R ein. Die im Experiment eingesetzte Blickerfassung gestattete es dabei, die Bewegungszeit für das Anklicken des Buttons aus der computerisiert erfassten Betätigungszeit herauszurechnen. Da die Betätigungszeit durch andere Einflüsse (z.B. gerade vorliegender Abstand des Mauszeigers zum Betätigungsbutton) schwanken kann, wurden nur die bereinigten Reaktionszeiten in die Regression einbezogen, um diesen Störeinfluss zu eliminieren. Theoretische Vorüberlegungen sowie die empirische Analyse der Reaktionszeiten t_R zeigten eine linksipflige Verteilung. Um auf der Normalverteilungsannahme basierende statistische Verfahren einsetzen zu können, wurden die Werte deshalb mit dem natürlichen Logarithmus umgeformt (Weiß 2019, S. 102). Da die Reaktionszeiten durch die maximale Darbietung der Signale von 15 s nach oben hin begrenzt waren, war damit auch das Problem statistischer Ausreißer weniger bedeutsam. Da weiterhin leichte Abweichungen von der Normalverteilung zu konstatieren waren, wurden nur Signale in die Analyse einbezogen, die mindestens 20 Reaktionszeiten aufwiesen. Das heißt, dass das dargebotene Signal von mindestens 20 Versuchspersonen erkannt und quittiert wurde. Die Normalverteilungsannahme dieser Variable als Voraussetzung der Regression fällt ab dieser Größe weniger ins Gewicht (Weiß 2019, S. 104). Außerdem kann der Ausschluss logisch damit begründet werden, dass schlecht erkannte Signale ohnehin nicht für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion in Frage kommen sollten und es somit nicht sinnvoll ist, für diese eine Reaktionszeit vorherzusagen. Vielmehr können diese zwar relativ wenigen, eher zufällig erkannten Signale die Regression der Übrigen gut erkannten, ungünstig beeinflussen. Aufgrund dessen wurden die schlecht erkannten Signale der Frequenzstufe 1 (nur einblenden), hellgrau für sämtliche Winkel und im Winkelbereich 4 zusätzlich die mittel-, dunkelgrauen und schwarzen Signale ausgeschlossen. Weiterhin betraf dies im Winkelbereich 4 die hellgrauen Signale der Frequenzstufen 2 (0,5 Hz), 3 (2,5 Hz) und

4 (5 Hz), sodass insgesamt zehn von 64 Signalen von der Analyse ausgeschlossen wurden. Eine anwendungsorientierte Nutzung der Regression ist somit nur für die übrigen, gut erkannten Signale sinnvoll. Die Analyse zeigt, dass das Regressionsmodell insgesamt mit einem $F(4,2226)=66,78$ und $p<0,001$ für die Anzahl von $N=2227$ Beobachtungen hochsignifikant ist. Die Interaktion der Variablen wurde mittels Einfügung eines Interaktionsterms ($\alpha_P \cdot f_B \cdot C_W$) überprüft und zeigt keinen signifikanten Effekt ($\beta=0,004$; $T=1,326$; $p=0,185$), somit können die Faktoren Winkel, Frequenz und Leuchtdichtekontrast hier als unabhängig betrachtet werden. Anschließend wurde deshalb das Regressionsmodell ohne den Interaktionsterm berechnet. Die Vorhersagegüte des Modells lässt sich aus dem Bestimmtheitsmaß R^2 ablesen. Je näher dessen Wert zu der Zahl „1“ tendiert, desto besser ist die Vorhersagegüte. Das korrigierte R^2 beträgt 0,107. Wird dies nach den Empfehlungen von Cohen (1992) in eine Effektstärke umgerechnet, so ergibt sich ein Wert von 0,12, was als schwacher Effekt zu klassifizieren ist. Die β -Koeffizienten aller Einflussfaktoren sind ebenfalls hochsignifikant. Einen Überblick gibt die Tab. 5.

Die Voraussetzungen für die Berechnung der Regression können in allen wesentlichen Punkten als erfüllt angesehen werden. So besteht eine Unabhängigkeit der Regressionsresiduen, da der durchgeführte Durbin-Watson-Test mit einem Wert von 1,69 gut innerhalb der Empfehlungen von Field (2013, S. 311) liegt. Multikollinearität ist ebenfalls nicht anzunehmen, da alle VIF-Werte <5 sind (bis auf jenen der nicht-signifikanten Interaktion) und der größte Wert des Konditionsindex weit unter 30 liegt (Field 2013, S. 325).

Die multiple Regressionsanalyse zeigt somit, dass die Stufen (bzw. interpolierte Zwischenstufen) der unabhängigen Variablen Winkel α_P , Frequenz f_B und Leuchtdichtekontrast C_W einen Einfluss auf die Reaktionszeit t_R bei gut erkannten Signalen haben. Der mathematische Zusammenhang der Variablen lässt sich durch die Formel

$$\log_e(t_R) = 7,76 + 0,163\alpha_P - 0,143f_B - 0,174C_W$$

ausdrücken. Um daraus die Reaktionszeit t_R in ms zu berechnen, wird die Exponentialfunktion als Umkehrfunktion

Tab. 5 Inferenzstatistische Maße der multiplen Regression der Reaktionszeiten
Table 5 Inference statistical measures of the response times multiple regression

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisiertes β	T	p	Kollinearitätsstatistik	
	Regressionskoeffizient β	Std.-Fehler				Toleranz	VIF
Winkel α_P	0,071	0,007	0,215	10,597	0,000	0,976	1,025
Frequenz f_B	-0,062	0,007	-0,185	-9,133	0,000	0,979	1,022
L.-Kontrast C_W	-0,076	0,007	-0,234	-11,501	0,000	0,968	1,033
(Konstante)	3,370	0,030	–	111,180	0,000	–	–

dieser logarithmierten Werte genutzt, indem der erhaltende Wert als Exponent eingesetzt wird.

5 Ableitungen und Fazit

Ziel der durchgeführten Untersuchung war es, Mindestanforderungen für die Erkennung von Signalen im peripheren Blickfeld zu untersuchen. Aus diesem Grund sowie aus softwareergonomischen Überlegungen wurde eine kleine Signalgröße gewählt und die unabhängigen Variablen Winkel im peripheren Blickfeld, Frequenz des Aufblinkens und Leuchtdichtekontrast zur Umgebung gestuft variiert. Die Auswahl dieser Variablen erfolgte aufgrund der in Abschn. 2.4 dargelegten Vermutung, die Wahrnehmung im peripheren Blickfeld anregen zu können.

Die dazu aufgestellten Hypothesen konnten bestätigt werden. Das zeigte sich in der Auswertung der Erkennungsrate mittels binär-logistischer Regression. Diese wies einen starken Einfluss der drei Variablen in der erwarteten Richtung nach. Insbesondere nahm die Erkennung der Signale bei steigendem Winkel im horizontalen peripheren Blickfeld deutlich ab, was als Übereinstimmung mit den dargelegten Erkenntnissen zur verringerten Sehschärfe (vgl. Abschn. 2.4) gewertet werden kann. Höhere Frequenzen, welche aufgrund der Vorerkenntnisse zur vergleichsweise guten Bewegungswahrnehmung im peripheren Blickfeld untersucht wurden (vgl. ebd.) zeigten einen positiven Einfluss auf die Erkennung. Ebenso war dies der Fall bei höheren Leuchtdichtekontrasten, von denen im Vorfeld angenommen worden war, dass peripher nur hohe Kontraste gut erkannt werden würden. In einzelnen der gewählten Abstufungen der unabhängigen Variablen Winkel, Frequenz und Leuchtdichte-Kontrast kam es jedoch zu Interaktionseffekten im Sinne einer nicht vollständig additiven Wirkung dieser Faktoren. So interagieren Winkel und Frequenz. Außerdem sind die Erkennungsraten von Signalen mit einer Frequenz von 2,5 und 5,0 Hz über alle Winkel recht eng beieinander, ebenso ist die Erkennung aller Frequenzstufen bei den niedrigen Winkeln von 15 und 40° ähnlich gut ausgeprägt. Auch gibt es eine Interaktion zwischen Kontrast und Frequenz. Hier werden die Signale mit den Frequenzen von 2,5 und 5,0 Hz über alle Stufen des Leuchtdichte-Kontrastes ähnlich gut erkannt, ebenso unterscheiden sich die dunkelgrauen und schwarzen Stufen des Leuchtdichtekontrastes kaum in ihrer Erkennung. Hier zeigt sich deutlich, dass die in den Vortests im peripheren Blickfeld als subjektiv gut unterscheidbar wahrgenommenen Abstufungen im Sinne der (unbewussten) Anregung der Aufmerksamkeit peripher teilweise recht geringe Unterschiede aufweisen. Insgesamt können die auftretenden Interaktionen als „ordinal“ beschrieben werden (Döring und Bortz 2016, S. 713): die

Wirkung der Faktoren ist zwar nicht über alle Faktorstufen-Kombinationen gleich stark, jedoch global vorhanden.

Die multiple Regression der Reaktionszeiten von gut erkannten Signalen erbrachte einen signifikanten (wenn auch schwächeren) Einfluss von Winkel, Frequenz und Leuchtdichtekontrast im Sinne der Hypothesen. Die globale Richtung des Einflusses der Variablen deckte sich dabei mit jenen aus der binär-logistischen Regression der Erkennung. Da hier keine signifikanten Interaktionen auftraten spricht dies wiederum dafür, dass Signale mit höheren Frequenzen und Kontrasten in niedrigeren Winkeln, wenn auch nicht in jedem Falle insgesamt besser, jedoch zumindest etwas schneller erkannt werden.

Somit kann diese Forschung einige Belege für die Gültigkeit der eingangs dargelegten wahrnehmungstheoretischen Zusammenhänge zur Sehschärfe, Bewegungs- und Kontrastwahrnehmung im peripheren Blickfeld liefern (vgl. Abschn. 2.4) und diese für die Arbeitswelt und mögliche Praxisanwendungen konkretisieren. Weiterhin können aus den Ergebnissen Hinweise für die Gestaltung von Technik abgeleitet und Anwender*innen an die Hand gegeben werden, die zeigen, wie die Entdeckungswahrscheinlichkeit erhöht und die Reaktionszeit t_R verkürzt werden können. Erstens kann das Signal je nach Bedeutung in angemessenen Bereichen im peripheren Blickfeld platziert werden, falls dieser Winkel kontrollierbar ist. Dies könnte vor allem bei modernen Interaktionsformen, wie z.B. kopfgetragene Augmented-Reality-Anwendungen, der Fall sein. Im Gegensatz zur klassischen Arbeitsumgebung der Leitwarte können die ermittelten Erkennungswahrscheinlichkeiten und Reaktionszeiten gezielt genutzt werden, um Signale adäquat zu positionieren. Zweitens zeigt die Anregung der Bewegungswahrnehmung durch das Ein- und Ausblenden des Signals (Variable „Frequenz“) einen starken positiven Einfluss auf die Erkennungswahrscheinlichkeit. Wenn hier angemessene Ausprägungen gewählt werden, ist von guter peripherer Erkennbarkeit auszugehen. Frequenzen im Bereich von 2,5–5,0 Hz erbrachten im Experiment die besten Ergebnisse, zeigten jedoch einen sich abschwächenden Effekt. Höhere Frequenzen wurden nicht untersucht. Aus den Erkenntnissen von den Vorversuchen zur Festlegung der Abstufungen der Frequenz ist jedoch davon auszugehen, dass sich damit keine wesentlich besseren Ergebnisse erzielen lassen. Eher ist zu vermuten, dass höhere Frequenzen bei diesen kleinen Signalen in der Peripherie schnell zu dicht an die Flimmerverschmelzungsfrequenz heranreichen und somit keine Vorteile einer noch stärkeren Anregung der Bewegungswahrnehmung bestehen.

Drittens zeigt der Leuchtdichtekontrast ebenfalls einen starken Einfluss. Nach Möglichkeit sollte über die für das zentrale Blickfeld empfohlenen Werte (DIN EN ISO 9241-6:2001) hinausgegangen werden. Damit ließen sich in der vorliegenden Untersuchung in der Laborumgebung die

höchsten Erkennungsraten realisieren, was eine entsprechende Praxisempfehlung sinnvoll erscheinen lässt.

Die Ergebnisse gestatten es auch je nach Anforderung, passende Kombinationen aus den Variablen zu verwenden. So könnten beispielsweise, falls sich höhere Leuchtdichtekontraste nicht realisieren lassen, die Frequenzen erhöht oder die Signale (falls möglich) näher an den Hauptarbeitsbereich herangerückt werden. Dann kann die Größe des Signals auch vergleichsweise klein gewählt werden und sich an der Mindestgröße für Schriftdarstellungen (DIN 1450:2013 2013; Schmidtke und Jastrzebska-Fraczek 2013, S. 61) orientieren. Die Größe des Signals war im vorliegenden Experiment konstant und aus den geschilderten Gründen der Softwareergonomie (mögliche Überdeckung anderer, relevanter Bereiche) mit 13,5 mm Höhe, 21,5 mm Breite und der Strichstärke von 3 mm relativ klein gewählt. Obwohl dieser Sachverhalt nicht konkret untersucht wurde, kann aufgrund des wahrnehmungstheoretischen Hintergrundes davon ausgegangen werden, dass auch eine Variation hin zur Steigerung der Größe positive Ergebnisse zeigen sollte. Das kann einen Nutzen bei der Gestaltung haben, falls es die softwareergonomischen Gegebenheiten zulassen und bildet somit einen möglichen Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen. Außerdem könnte auch eine Kombination mit akustischer Signalisierung untersucht werden. Dies wurde hier ebenfalls nicht betrachtet. Die Stichprobe war bewusst so gewählt, dass die Erkenntnisse auf eine Arbeitspopulation übertragbar waren. In detaillierten altersbezogenen Auswertungen zeigten sich hier Unterschiede hinsichtlich schlechterer Erkennbarkeit bei den höheren Altersgruppen. Bereits heute ist etwa jeder dritte Beschäftigte 55 Jahre und älter (Bundesagentur für Arbeit 2019, S. 17). Durch veränderte Regelungen der Sozialgesetzgebung ist davon auszugehen, dass der Anteil weiterhin zunehmen wird. Somit erscheint weitere Forschung hier besonders angebracht.

Die Problemlöseaufgabe sowie das Einspielen der zu erkennenden Signale erfolgten im Nahbereich der Proband*innen. Dies sollte die interne Validität der Ergebnisse unterstützen. In realen Leitwarten können zu überwachende Visualisierungsmittel jedoch auch sehr viel weiter entfernt vorhanden sein. Während die Übertragbarkeit in die nicht abgedeckten Bereiche des peripheren Blickfeldes angenommen werden kann (aufgrund der zuvor in Abschn. 2.4 geschilderten Erkenntnisse zur Vergleichbarkeit der Kontrast- und Bewegungswahrnehmung, z. B. McCoolin 1960; Aulhorn und Harms 1972, S. 102 ff.; Mester 1985, S. 329), ist die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Sehentfernungen in dieser Studie nicht untersucht worden. Werden die Erkenntnisse für praktische Ableitungen verwendet, sollte hinsichtlich der Größe der Signale eine äquivalente Anpassung vorgenommen und möglicherweise auch ein Sicherheitsfaktor einkalkuliert werden, falls die Visualisierungsmittel weiter entfernt sind. Ebenso sollte

sichergestellt werden, dass die Leuchtdichten der benutzten Visualisierungsmittel angeglichen werden und somit die Kontrastverhältnisse wie im Nahbereich nachvollzogen werden. Es bleibt jedoch trotz dessen die Frage, ob sich die Erkenntnisse vollständig auf größere Sehentfernungen über den verwendeten, normgerechten Abstand hin, übertragen lassen. Da bei Akkomodation des menschlichen Auges an weite Entfernungen, der periphere Bereich jedoch ebenfalls optisch unscharf abgebildet wird, kann vermutet werden, dass sich die gewonnenen Erkenntnisse weitestgehend übertragen lassen sollten. Eine solide empirisch abgesicherte Aussage ist hier jedoch nur möglich, wenn entsprechende Labor- oder Praxisstudien durchgeführt werden, zumal mit steigender Entfernung auch mögliche räumliche Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung zunehmen. Eine weitere Limitation ist die Fokussierung der Studie auf ein fortgesetztes Problemlösen im zentralen Blickfeld, um die Aufmerksamkeit zu binden. Es wurde davon ausgegangen, dass diese Problemlöseanforderung die stärkste Bindung an einen eng begrenzten Punkt herbeiführt. In einer realen Leitwartentätigkeit ist jedoch eher zu vermuten, dass Aufmerksamkeit nicht über den, im Experiment gewählten relativ langen Zeitraum, ununterbrochen in einem solch engen Bereich gebunden wird. Vielmehr ist beim Problemlösen in der Praxis mit Blickabwendungen durch Nachdenken, Kommunikation mit Kollegen sowie sonstigen Reizen (z. B. akustische Einflüsse) zu rechnen. Das komplexe Zusammenwirken mit diesen und anderen Faktoren konnte im Rahmen dieser Studie nicht geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Aus methodischer Sicht hat sich der Versuchsaufbau bewährt. Lediglich die verwendete kopfgetragene Blickerfassung war mit ca. 220 g relativ schwer und im vergleichsweise langen Versuchszeitraum etwas unkomfortabel zu tragen. So ist nicht auszuschließen, dass ein Teil der durch die Werte des KAB belegten leichten, jedoch nicht kritischen Befindensbeeinträchtigung nach dem Versuch, auf das verwendete Blickerfassungssystem zurückgeht. Möglicherweise sollten spätere Versuche diese Lösung durch ein stationäres, nicht kopfgetragenes System ersetzen. Zusätzlicher Vorteil wäre die meist einfachere Justierung dieser Systeme, die die Gesamtdauer des Versuches senken sollte.

Förderung Die Durchführung dieses Projekts wurde durch Mittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ermöglicht. Die Förderung erfolgte unter der Projektnummer 358406233.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link

zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Aulhorn E, Harms H (1972) Visual Perimetry. In: Jameson D, Hurvic L (Hrsg) Visual Psychophysics, Bd. 4. Springer, Berlin
- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2018) Multivariate Analysemethoden. Springer, Berlin
- Bergua A (2017) Das menschliche Auge in Zahlen. Springer, Berlin
- Birbaumer N, Schmidt R (2010) Biologische Psychologie. Springer, Berlin
- Boecker M (2017) Increasing control room effectiveness and security through proximity-based interaction technologies. In: Nunes I (Hrsg) Advances in human factors and system interactions. Advances in Intelligent Systems and Computing, Bd. 497. Springer, Cham
- Bortz J, Schuster C (2010) Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler Bd. 7. Springer, Berlin, Heidelberg
- Brandes R, Lang F, Schmidt R (2019) Physiologie des Menschen. Springer, Berlin
- Bundesagentur für Arbeit (2019) Blickpunkt Arbeitsmarkt: MINT-Berufe. Statistik der Bundesagentur für Arbeit, Nürnberg
- Clark A, Chalmers D (1998) The extended mind. Analysis 58:7–19
- Cohen J (1992) A power primer. Psychol Bull 112(1):155–159
- Curcio C, Sloan K, Kalina R, Hendrickson A (1990) Human photoreceptor topography. J Comp Neurol 292:497–523
- Dawson M (2014) Embedded and situated cognition. In: Shapiro L (Hrsg) The Routledge handbook of embodied cognition. Routledge, New York, S 59–67
- DIN EN 61511-1:2019-02 Funktionale Sicherheit – PLT-Sicherheitseinrichtungen für die Prozessindustrie – Teil 1: Allgemeines, Begriffe, Anforderungen an Systeme, Hardware und Anwendungsprogrammierung. Berlin: Beuth
- DIN EN 842:2009 Sicherheit von Maschinen – Optische Gefahrensignale – Allgemeine Anforderungen, Gestaltung und Prüfung. Berlin: Beuth
- DIN EN ISO 10628-2:2013 Schemata für die chemische und petrochemische Industrie – Teil 2: Graphische Symbole. Berlin: Beuth
- DIN EN ISO 11064-4:2014 Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen – Teil 4: Auslegung und Maße von Arbeitsplätzen. Berlin: Beuth
- DIN EN ISO 9241-112:2017 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 112: Grundsätze der Informationsdarstellung. Berlin: Beuth
- DIN EN ISO 9241-6:2001 Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 6: Leitsätze für die Arbeitsumgebung. Berlin: Beuth
- DIN 1450:2013 Schriften – Leserlichkeit. Berlin: Beuth
- Doil W, Bindig M (1986) Peripheres Sehen als Voraussetzung für die Orientierung in Sportspielen. Med Sport 26(2):55–58
- Döring N, Bortz J (2016) Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin
- Field A (2013) Discovering statistics using IBM SPSS statistics. SAGE, Thousand Oaks
- Fimbel E, Lauzon S, Rainville C (2009) Performance of humans vs. exploration algorithms on the tower of London test. Plos One 4(9):1–11
- Finlay D (1982) Motion perception in the peripheral visual field. Perception 11(4):457–462
- Fischer H (1950) Die physiologischen Grenzen der horizontalen Augenbewegungen. Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 150: 144–156
- Ganßauge R, Hoppe A, Henke A, Reßut N (2020) Risk avoidance through reliable attention management at control room workstations. In: Ahram T, Karwowski W, Pickl S, Taiar R (Hrsg) Human systems engineering and design II. IHSED 2019. Advances in intelligent systems and computing, Bd. 1026. Springer, Cham
- Haag M (2015) Kollaboratives Arbeiten mit Robotern – Vision und realistische Perspektive. In: Botthof A, Hartmann E (Hrsg) Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Springer Vieweg, Heidelberg
- Holand S, Girard A, Laude D, Meyer-Bisch C, Elghozi J (1999) Effects of an auditory startle stimulus on blood pressure and heart rate in humans. J Hypertens 17:1893–1897
- Hoppe A, Reßut N, Henke A, Ganßauge R (2019) Aufmerksamkeitslenkung an stark visualisierten Arbeitsplätzen mit komplexen Bildschirmdarstellungen. In: Gf A (Hrsg) Tagungsband des Frühjahrskongresses 2019 Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten. Beitrag A 7.4. GfA Press, Dortmund
- Kluth K, Keller E (2015) Rollerbar mouse as an ergonomic alternative to a standard computer mouse. OER 12:33–48
- Kockrow R (2014) Eye-Tracking Studien in Leitwarten – Evaluation einer ‚Visuellen Komfortzone‘ für Operatortätigkeiten. Shaker, Dören
- Kockrow R, Hoppe A (2016) Visualisierungsmitteldichte in Kraftwerksleitwarten – Gestaltungsempfehlungen als Ableitung aus Blickverlaufsstudien. Z Arb Wiss 70(3):142–150
- Kockrow R, Hoppe A, Binkowski S, Schwedt V, Ganßauge R (2016) Das Awip-Bewertungskonzept: Ganzheitlicher Ansatz für Arbeitssystemanalysen am Beispiel von Leitwarten. In: Gf A (Hrsg) Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?! Tagungsband des 62. GfA-Frühjahrskongress Aachen, 02.03.–04.03.2016
- Lafrenz B, Jeschke P (2017) Moderne IKT zur Visualisierung und Strukturierung von Informationen in Leitwarten. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth e.V.,
- McColgin F (1960) Movement thresholds in peripheral vision. J Opt Soc Am 50:774–779
- McKee S, Nakayama K (1984) The detection of motion in the peripheral visual field. Vision Res 24(1):25–32
- Meinecke S, Albat D (2015) Gebündelt und transparent. Prozessorientierte Krankenhaus-Leitwarte erleichtert effiziente Ressourcenplanung. KU Gesundheitsmanag 5(84):56–58
- Mentler T, Rasim T, Müßiggang M, Herzog M (2018) Ensuring usability of future smart energy control room systems. Energy Informatics 1(26):167–182
- Mester J (1985) Zur sportartspezifischen Diagnostik im Bereich der Sinnesorgane. Habilitationsschrift. Ruhr-Universität, Bochum
- Mester J (1988) Diagnostik von Wahrnehmung und Koordination im Sport – Lernen von sportlichen Bewegungen. Hofmann, Schorn-dorf
- Mueller S, Piper B (2014) The psychology experiment building language (PEBL) and PEBL test battery. J Neurosci Methods 222:250–259
- Müller B, Basler H (1993) Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung. Beltz, Weinheim
- Neudörfer A (2014) Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Serie VDI-Buch.. Springer, Berlin
- Sachsenweger R (1971) Altern und Auge – ein Handbuch der Gerontologie und Geriatrie des menschlichen Sehorgans. GTL, Leipzig
- Schlick C, Bruder R, Luczak H (2018) Arbeitswissenschaft. Springer Vieweg, Berlin

- Schmauder M, Spanner-Ulmer B (2014) *Ergonomie – Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. Hanser, München
- Schmidtke H, Jastrzebska-Fraczek I (2013) *Ergonomie – Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen*. Hanser, München
- Stanton N, Salmon P, Walker G, Jenkins D (2009) *Human factors in the design and evaluation of central control room operations*. CRC Press, Boca Raton
- Sturman D, Wiggins M, Auton J, Loft S, Helton W, Westbrook J, Braithwaite J (2019) Control room operators' cue utilization predicts cognitive resource consumption during regular operational tasks. *Frontiers Psychol* 10:1967
- Thomas C, Trampert S (2019) Informationsmanagement in Prüffeldern. In: *ATZ Extra „Big Data“*, S 26–31
- Tornelli S, Zuelli R, Marinelli M, Morch A, Cornez L (2017) Requirements for future control room and visualisation features in the Web-of-Cells framework defined in the ELECTRA project. *CIREN Open Access Proc J* 1:1425–1428
- Turk M (2020) Optimizing Olefin plant operations to reduce energy consumption. In: *Conference records of the 16th PCIC europe annual electrical and automation knowledge sharing event* <https://doi.org/10.23919/PCICEurope46863.2019.9011566>
- VDI, VDE (2013) *Automation 2020*. VDI, Düsseldorf
- Ward G, Allport A (1997) Planning and problem solving using the five disc tower of London task. *Q J Exp Psychol* 50A(1):49–78
- Weiß C (2019) *Basiswissen medizinische Statistik*. Springer, Heidelberg
- Wilson R (2004) *Boundaries of the mind: the individual in the fragile sciences: cognition*. Cambridge University Press, Cambridge