

Mobiles Eye-Tracking in den angewandten Wissenschaften

Andreas Gegenfurtner*

Marc Philipp Dietrich*

Angelika Stadler*

Armin Eichinger*

Marcus Barkowsky*

Wolfgang Stern*

Richard Latzel*

Alexandra Glufke*

ABSTRACT

Mobiles Eye-Tracking ist als Forschungsmethode beliebter denn je und gewinnt in unterschiedlichen Feldern der angewandten Wissenschaften mehr und mehr an Bedeutung. Dieser Beitrag diskutiert, wie die Aufzeichnung und Analyse von Blickbewegungen in der Mobilität, im Usability Engineering, den Sportwissenschaften, der Augmented Reality/Mixed Reality/Virtual Reality und der Medizin bzw. medizinischen Weiterbildung eingesetzt wird. Der Beitrag gliedert sich dabei in drei Teile: in einem ersten Teil werden Grundzüge des Eye-Trackings erläutert; in einem zweiten Teil wird der Einsatz mobilen Eye-Trackings in ausgewählten Feldern der angewandten Wissenschaften veranschaulicht; und in einem abschließenden dritten Teil werden Potentiale und Risiken sowie zukünftige Forschungslinien skizziert, um die Anwendung mobilen Eye-Trackings als digitale Forschungsmethode weiter zu etablieren.

Mobile eye tracking is gaining more and more in popularity as a method of research and is becoming ever more significant in various areas of applied research. The present article discusses how eye movement recordings and analyses are applied in mobility research, usability engineering, sports sciences, Augmented Reality/Mixed Reality/Virtual Reality, medicine and healthcare professional education. It consists of three parts: in the first part, the fundamentals of eye tracking are outlined; in the second part, the application of mobile eye tracking in selected areas of applied research is exemplified; and the third and final part discusses the potentials, risks and future research lines to further establish mobile eye tracking as a digital research method.

KEYWORDS

Eye-Tracking, Mobilität, Usability Engineering, Sportwissenschaften, Augmented Reality/Mixed Reality/Virtual Reality, Medizin, Weiterbildung

Eye tracking, mobility, usability engineering, sports sciences, augmented reality, mixed reality, virtual reality, medicine, further education

1. Das Messen von Augenbewegungen

Eye-Tracking als Forschungsmethode ist beliebter denn je und gewinnt mehr und mehr an Bedeutung – in so unterschiedlichen Disziplinen wie Mobilität, Verkehr und Luftfahrt, *Usability Engineering*, *Augmented* und *Virtual Reality*, Sport- und Trainingswissenschaften, Medizin und Pflege, sowie der Pädagogik und (pädagogischen) Psychologie. All diese angewandten Wissenschaften haben ein berechtigtes Interesse an den Möglichkeiten und Potentialen, die Eye-Tracking bietet. Einer der Gründe für die stark zunehmende Aufmerksamkeit, die Eye-Tracking als Forschungsmethode genießt, ist die technologische Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Blickbewegungsmessungen: Die Geräte und die technische Ausstattung, die für Eye-Tracking notwendig sind, werden günstiger. Gleichzeitig zum sinkenden Anschaffungspreis

steigt die Benutzerfreundlichkeit der Geräte, so dass Prozesse der Datenerhebung und -auswertung schneller erlernbar sind. Auch deshalb wächst das Interesse an Eye-Tracking-basierten Forschungsarbeiten.

Abbildung 1 zeigt, wie die Zahl wissenschaftlicher Publikationen zu Eye-Tracking gewachsen ist. Die Daten stammen aus einer Suche vom 01. September 2018 in „Scopus“, der größten und umfassendsten interdisziplinären Datenbank für Fachartikel, Bücher und Konferenz-Proceedings. Gesucht wurde nach Beiträgen, die den Suchbegriff „Eye Tracking“ in Titel, Abstract oder Keywords enthielten. Die Zahlen in Abbildung 1 verdeutlichen einen exponentiellen Anstieg an Publikationen startend mit der ersten Publikation im Jahr 1962 hin zu 1765 Publikationen allein im Jahr 2017.

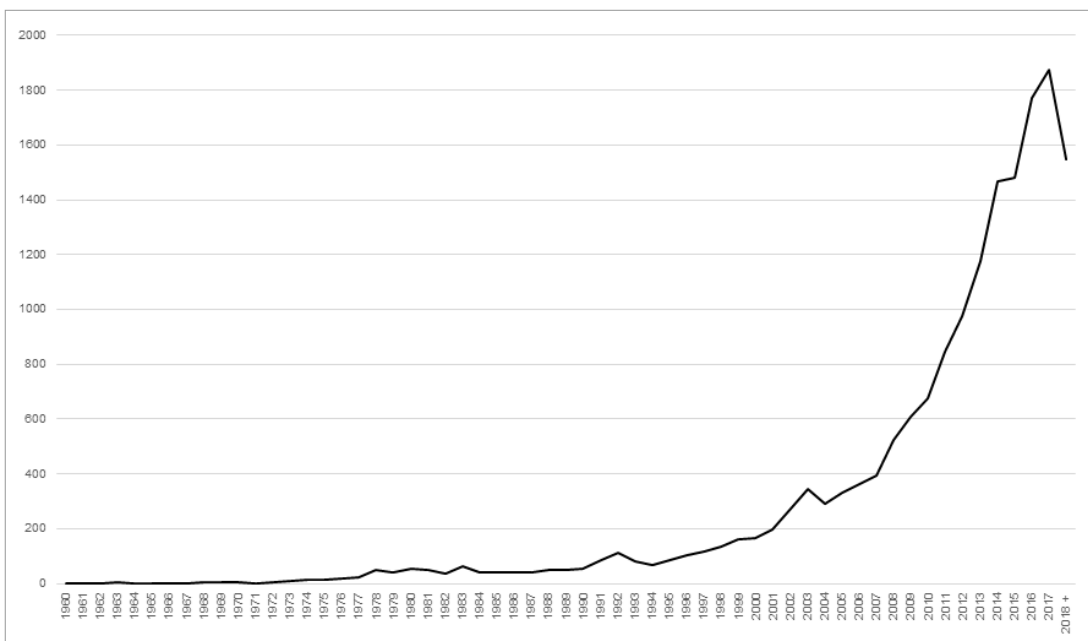


Abbildung 1. Zahl der Publikationen nach Jahr zu „Eye-Tracking“ in der Datenbank Scopus.

Warum ist Eye-Tracking als Methode so beliebt? Holmqvist und Andersson [1, S. 3] schreiben hierzu: “There is no doubt that it is useful to record eye movements, it advances science and leads to technological innovations” (Übersetzung: Es gibt keinen Zweifel daran, dass es nützlich ist, Augenbewegungen aufzuzeichnen, es bringt die Wissenschaft voran und führt zu technischen Innovationen). Und Duchowsky [2, S. 3] hält fest: “Why is eye tracking important? Simply put, we move our eye to bring a particular portion of the visible field of view into high resolution so that we may see

in fine detail whatever is at the central direction of gaze” (Übersetzung: Warum ist Eye-Tracking so bedeutsam? Einfach ausgedrückt bewegen wir unsere Augen, um einen bestimmten Teil des visuellen Feldes hochauflösend zu betrachten, damit wir detailliert sehen können, was immer wir direkt in den Blick nehmen). Durch Eye-Tracking gelingt es, den Blick von Personen und deren Aufmerksamkeitsallokation auf bestimmte Objekte oder Interessensbereiche aufzuzeichnen und für Forschung zugänglich zu machen. Aus diesem Grund installieren immer mehr Hochschulen, Universitäten und die

Industrie angewandte Eye-Tracking-Labore und gründen Forschergruppen für die Analyse von Augenbewegungen.

Dieser Beitrag widmet sich verschiedenen Anwendungen und Beispielen der Eye-Tracking-Forschung. Das Ziel ist dabei, einen Überblick über die Möglichkeiten von Eye-Tracking als Forschungsansatz zu geben. Gleichzeitig soll dabei aber auch der Blick auf die Risiken und Beschränkungen der Blickbewegungsanalyse gerichtet werden; dazu wird in der Diskussion an späterer Stelle dieses Beitrags auch auf das Problemfeld *Privacy* und Datensicherheit eingegangen. Ein besonderes Augenmerk liegt in diesem Beitrag in der Betrachtung des mobilen Eye-Trackings in Form von Brillen, die im Gegensatz zu festinstallierten Geräten im Labor ganz neue Räume für angewandte Eye-Tracking-Forschung im Feld eröffnen.

Der Beitrag gliedert sich in drei Teile: in einem ersten Teil werden Grundzüge des Eye-Trackings erläutert; in einem zweiten Teil wird der Einsatz von Eye-Tracking in ausgewählten Feldern der angewandten Wissenschaften diskutiert; in einem abschließenden dritten Teil werden Potentiale und Risiken, sowie zukünftige Forschungslinien skizziert.

1.1. Mobiles Eye-Tracking

Seit den Anfängen des Eye-Trackings [3] entwickelten sich verschiedene Verfahren zur Aufzeichnung von Blickbewegungen. Im Wesentlichen haben sich zwei Verfahren etabliert. Zum einen die Elektrookulographie (EOG), bei der Elektroden in verschiedener Konstellation um das Auge angebracht werden [4], um Unterschiede im elektrischen Potential zwischen dem corneo-retinalen Potential des Augapfels und der Haut aufzunehmen. Über digitale Signalanalyse kann anhand von Frequenzen, Signalstärke und Magnitude auf die Auslenkung der Augäpfel und damit auf Blickwinkel geschlossen werden [2]. Zum anderen die Cornea-Reflex-Methode, die auch als kamera-basierte oder video-basierte Methode bezeichnet wird. Hier wird mittels Infrarotdioden eine Reflexion auf der Hornhaut erzeugt. Kameras zeichnen sowohl die Augen und deren Infrarotreflexion als auch den Sichtbereich des Benutzers¹ auf. Bildverarbeitende Software extrahiert dann die Pupillen und setzt deren Bewegungen in das Verhältnis zum Gesehenen. Als Ergebnis liegen

hauptsächlich Koordinaten zur Zeitachse vor, sowie darüber hinaus meist auch Informationen zur Pupillenweite, Blinzelfrequenz und Vergenz.

Einen neuen Ansatz des mobilen Eye-Trackings verfolgen Dietrich et al. [5]. Sie nutzen okulare Artefakte im Elektroenzephalogramm (EEG) zur Detektion der Augenpositionen. Diese Methode basiert wie das EOG auf dem corneo-retinalen Potential der Augäpfel, allerdings lässt sich ihre Lösung technisch flexibler in *Head-Mounted Devices (HMDs)* integrieren, da sich die notwendigen Messpunkte nicht auf die Region um das Auge beschränken. Darüber hinaus eröffnen sich neue Möglichkeiten der Interpretation von Augenbewegungen im Zusammenhang mit aktiven Gehirnarealen.

Augenbewegungen lassen sich mittels mobiler und externer Aufnahmegere registrieren [1]. Zu den externen Systemen zählen *Remote*-Geräte, die häufig an Laptops und Desktop-Computern integriert sind und nach erfolgreicher Kalibrierung die Blickbewegungen berührungsfrei via Infrarot messen, sowie Geräte der experimentellen Grundlagenforschung, in denen der Kopf von Versuchsteilnehmenden fixiert wird, um präzisere Aufnahmen der Augenbewegungen mit hoher externer Validität zu generieren [2]. Externe Systeme finden sich häufig in Szenarien der Laborforschung unter Bedingungen strenger experimenteller Kontrolle.

Mobile Aufnahmegere sind häufig in ein Brillengestell integriert, das nur wenige Gramm wiegt und wie eine normale Brille getragen werden kann. Diese mobilen Systeme werden auch als *head-mounted* oder *wearable* Eye-Tracker bezeichnet. In der Regel wird bei mobilen Geräten mit der Cornea-Reflex-Methode via Infrarot eine Reflexion auf der Hornhaut erzeugt. Kameras zeichnen simultan die erzeugte Infrarotreflexion und das Blickfeld der Teilnehmenden auf.

Mobile Eye-Tracker eignen sich besonders für die angewandten Wissenschaften, weil sie nicht auf Laborräume beschränkt sind, sondern Menschen in angewandten Lebenssituationen begleiten können – etwa im Auto [6], im Cockpit eines Flugzeugs [7], beim Sporttraining [8], bei komplexen sozialen Konstellationen in der Notaufnahme [9] oder im Klassenzimmer

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf des Textes alleinig das generische Maskulinum verwendet. Im Verständnis werden hierbei jedoch stets alle Geschlechter impliziert.

[10]. Als Methode der Blickbewegungsmessung limitieren sie die Bewegungsfreiheit nur wenig. Dadurch haben entsprechende Versuche im Vergleich zu Laborstudien mit externen Systemen oft eine höhere ökologische und externe Validität.

Eine weitere Möglichkeit, mobile Eye-Tracking-Aufnahmen zu nutzen, sind die sogenannten *Eye Movement Modeling Examples* [11, 12]. Dabei werden Blickbewegungen von erfahrenen Personen (zum Beispiel Profis, unfallfreien Autofahrern, Lehrpersonen o.ä.) auf Video aufgezeichnet und diese Videoaufzeichnung dann unerfahrenen Personen (zum Beispiel Anfängern, Fahrschülern, Studierenden) zur Vorlage gezeigt. Durch das Betrachten der Blickbewegungen von erfahrenen Personen lernen unerfahrene Personen beispielsweise, welche Informationen im Blickfeld potentiell relevant sind und welche perzeptuell ignoriert werden können [11–14].

1.2. Analyse von Blickbewegungen

Die Rohdaten aus der Erhebung von Blickbewegungsmessungen werden typischerweise nach bestimmten Parametern in Fixationen und Sakkaden ausgegeben. Gleichzeitig existiert eine hohe Zahl unterschiedlicher Parameter, die aus den Rohdaten von Blickbewegungsmessungen errechnet werden können, etwa auch Mikrosakkaden und *Smooth Pursuits* (wenn die Augen der Bewegung eines Objekts folgen). Eine umfassende Darstellung unterschiedlichster Parameter ist bei Holmqvist und Andersson [1] nachzulesen. Fixationen sind definiert als Zustand „when the eye remains still over a period of time“ [1, S. 21]. Häufig wird dabei theoretisch angenommen, dass mit einer Fixation – zum Beispiel auf einen Gegenstand oder eine Person – auch Aufmerksamkeit einhergeht, das heißt, wir schauen auf etwas, weil es unsere Aufmerksamkeit erregt hat. Diese Annahme wird auch die *Eye-Mind Hypothesis* genannt [15]. Fixationen lassen sich nach ihrer Häufigkeit und ihrer Dauer charakterisieren.

Neben Fixationen sind Sakkaden gängige Parameter in der Analyse von Eye-Tracking-Daten. Eine Sakkade ist definiert als „rapid motion of the eye from one fixation to another“ [1, S. 23]. Sakkaden sind also Sprünge zwischen zwei Fixationen. Sakkaden können nach ihrer Länge und ihrer Geschwindigkeit beschrieben werden. Wenn wir annehmen, dass Sakkaden die Verschiebung von Aufmerksamkeit auf neue Informationen im Blickfeld implizieren [15], kann die Sakkadenlänge – dabei insbesondere die langer Sakkaden – Aufschluss über das periphere Sehen bzw. die parafoveale Verarbeitung von Informationen am Rande des Blickfelds geben [2, 16].

Die Region im Blickfeld, auf die wir schauen (z. B. eine Person oder ein Gegenstand), wird als *Area of Interest* bezeichnet. Eine *Area of Interest (AOI)* kann – abhängig von der Wahl der Aggregationsebene – ein einzelner Gegenstand (z. B. ein Drehzahlmesser im Auto), der Teil eines Gegenstands (z. B. der Bereich hoher Drehzahlen) oder eine Gruppe an Gegenständen (z. B. das gesamte Cockpit im Auto) sein. Analog dazu kann eine *AOI* eine Person (z. B. eine Patientin), ein Teil einer Person (z. B. eine Wunde) oder eine Gruppe von Personen (z. B. alle am Boden liegenden Personen am Unfallort) sein. Auf diese Weise werden Rückschlüsse über die Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen auf bestimmte, im Sichtfeld befindliche Informationen gezogen [1, 15–17]. *AOI*-Sakkaden werden als Transitionen bezeichnet.

Als grafische Visualisierungen von Fixationen sind in der angewandten Forschung häufig Blickpfade (eng. *scanpaths*) und *Heatmaps* im Einsatz. *Scanpaths* zeigen das Blickfeld der Teilnehmenden inklusive deren Fixationen, symbolisch dargestellt durch Kreise. Kreise mit kleinem Radius signalisieren kurze Fixationsdauern; Kreise mit großem Radius signalisieren lange Fixationsdauern. In *Scanpaths* lässt sich auch die Reihenfolge von Fixationen darstellen, woraus ein Rückschluss über den Ablauf der Aufmerksamkeitsverteilung gezogen werden kann. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel eines *Scanpaths*.



Abbildung 2. Beispiel eines Scanpaths. Darstellung von Tschneider (2017); Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Eye-Tracking#/media/File:Gaze_plot_eye_tracking_on_Wikipedia_with_3_participants.png

Heatmaps färben das Blickfeld der Teilnehmenden zur Auswertung der Blickhäufigkeiten ein. Nach gängiger Konvention wurden rote Bereiche häufiger fixiert (und waren dadurch heißer) als kältere Bereiche in blauer Färbung, die weniger häufig fixiert worden sind. *Heatmaps* lassen auch eine grafische Aggregation der Daten mehrerer Probanden zu, um etwa das Blickverhalten einer Personengruppe zu untersuchen. Die Interpretation

der farblichen Unterschiede im Blickfeld lassen einen Schluss zu über die Verteilung von Aufmerksamkeit auf verschiedene *AOIs*, um etwa die Frage zu beantworten: Was wurde häufiger angeschaut und was weniger häufig. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel einer *Heatmap*. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass neben *Scanpaths* und *Heatmaps* noch weitere Visualisierungen existieren (siehe dazu [18]).



Abbildung 3. Beispiel einer Heatmap. Darstellung von Tschneider (2017); Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye-Tracking_heat_map_Wikipedia.jpg

2. Beispiele aus den angewandten Wissenschaften

Im folgenden Abschnitt werden einige ausgewählte Felder der angewandten Wissenschaften vorgestellt, in denen Eye-Tracking eingesetzt wird. Diese Auswahl ist selektiv und eklektisch; sie erhebt auch aufgrund der enormen Heterogenität in der Gesamtheit aller Anwendungsfelder, in denen mobile Eye-Tracker zum Einsatz kommen, keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die in dieser Übersichtsarbeit vorgestellten und berücksichtigten Disziplinen reflektieren die Schwerpunktthemen Mobilität, Digitalisierung und Gesundheit. Mit Blick auf das in Abbildung 1 dargestellte starke Wachstum der Eye-Tracking-Forschung gerade in den letzten Jahren ist es wahrscheinlich, dass Anwendungen von Blickbewegungsanalysen in zahlreichen weiteren Disziplinen etabliert werden. Die nachfolgend präsentierten Anwendungsbeispiele sind aufgrund ihrer Vielfalt gut in der Lage, die Breite möglicher Einsatzgebiete von mobiler Eye-Tracking-basierter Forschung abzudecken. Die Beispiele stammen aus den Bereichen Mobilität, Usability Engineering, Sportwissenschaften, *Augmented Reality/Mixed Reality/Virtual Reality* und Medizin bzw. medizinische Weiterbildung.

2.1. Mobilität

Mobile Eye-Tracker werden mehr und mehr in der Mobilitätsforschung eingesetzt [19]. Bei Studien zum Blickverhalten von Autofahrerinnen und Autofahrern wird dabei beispielsweise untersucht, wie sich Augenbewegungen bei nächtlichen von Fahrten tagsüber unterscheiden, wie sich Fixationen und Sakkaden von erfahrenen und unerfahrenen Autofahrern unterscheiden und wie die Sicherheit beim autonomen Fahren von Eye-Tracking profitieren kann.

Lebensbedrohliche Unfälle sind bei Nacht häufiger als bei Tag [20], auch aufgrund der geringen Helligkeit bei Nacht. Lichtquellen beim nächtlichen Fahren stammen überwiegend von Verkehrsbeleuchtung wie Straßenlaternen. Brimley und Kollegen [21] haben gezeigt, dass Autofahrer häufig die Lichtkegel von Laternen fixieren und dort nur geringe Sakkadenlängen aufweisen. Tagsüber sind Fixationen und Sakkaden stärker gestreut und weniger auf Lichtquellen bezogen. Dadurch werden Objekte am Straßenrand, etwa Fußgänger oder Wild,

schneller wahrgenommen. Nachts hingegen werden sie eher nur dann fixiert, wenn sie in geographischer Nähe zu Lichtquellen sind. Auch beim Abbiegen an Kreuzungen ändert sich das Blickverhalten bei Nacht. Während tagsüber Fixationen auf beiden Seiten des Fahrzeugs bzw. der Kreuzung auftreten, wird nachts nur die Seite fixiert, in deren Richtung abgebogen wird [22]. Diese Informationen aus Eye-Tracking-Daten können Autobauer und Straßenbauämter dazu nutzen, die nächtliche Illumination durch Straßenbeleuchtung und Scheinwerfersysteme am Auto zu optimieren, um Unfallzahlen zu senken [20–22].

Erfahrene Autofahrer haben im Laufe der Jahre durch die Fahrpraxis ein anderes Blickverhalten erlernt als unerfahrene Autofahrer [23]. In einer Meta-Analyse von elf Studien mit insgesamt 455 Autofahrern konnten Gegenfurtner et al. [11] zeigen, dass erfahrene Autofahrer kürzere Fixationsdauern haben als unerfahrene Autofahrer. Dieser Befund deutet daraufhin, dass erfahrene Autofahrer dank erworbener Gedächtnisstrukturen weniger lang brauchen, um Verkehrssituationen visuell zu verarbeiten. Erfahrene Autofahrer sind in ihrer visuellen Aufmerksamkeit darüber hinaus stärker selektiv als Fahranfänger, was ihnen beim Erkennen von Gefahrensituationen und in der generellen Wachsamkeit in komplexen Verkehrssituationen zu Gute kommt [11, 24, 25].

Eye-Tracking kann auch beim autonomen Fahren eingesetzt werden. Hier übergibt der Autofahrer die Kontrolle an das Fahrzeug und kann dadurch sekundäre Tätigkeiten ausüben oder entspannen. In manchen Situationen kann es jedoch notwendig sein, dass das autonome Fahrsystem die Kontrolle an den Autofahrer zurückgibt, um die Fahrsicherheit zu gewährleisten – etwa dann, wenn das Ende einer Straße erreicht wird oder Fahrbahnmarkierungen verloren werden [26]. In solchen Situationen kann Eye-Tracking dazu dienen, die sogenannte *Take-Over Readiness* des Autofahrers zu bestimmen – also ob der Autofahrer tatsächlich bereit und in der Lage ist, das Fahrzeug wieder eigenständig zu führen oder ob der Autofahrer unaufmerksam ist und das Fahrzeug alternativ selbst anhält. Oft sind die Situationen einer Übergabe der Fahrzeugkontrolle zeitlich dringend; in solchen Fällen kann die Augenbewegungsmessung einen Beitrag zur Sicherheit beim autonomen Fahren leisten [26].

Auch hinsichtlich der Effektivität als Leistungsdimension des Usability Engineering in der Mobilitätsforschung bietet Eye-Tracking Untersuchungspotential. Hier sind es insbesondere Leistungsaspekte, die die Display-vermittelte Interaktion mit dynamischen Systemen betreffen. Das umfasst im Bereich der Mobilität beispielsweise die Interaktion des Fahrers mit Anzeigen von Assistenzsystemen im PKW [27], des Fluglotsen mit Anzeigen der Flugüberwachung [28] oder des Piloten mit dem *Primary Flight Display* [29]. Einen umfassenden Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von Eye-Tracking im Flugumfeld liefert Glaholt [30].

Mobilität wird auch in den Sportwissenschaften thematisiert. Erkenntnisse aus dem Motorsport werden von Automobilherstellern und ihren Zulieferern routinemäßig auf verschiedene Aspekte der Alltagsmobilität übertragen: Sicherheit bei Unfällen (z. B. Verbesserung von Aufprallschutz und Helmen), Sicherheit im Straßenverkehr sowie Verletzungsprävention und -rehabilitation in Motorsport und urbaner Mobilität [31–33]. Generell werden alle möglichen modifizierten oder neuen Materialien im Motorsport unter Extrembedingungen getestet und bei entsprechender Eignung auf die Anforderungen der Alltagsmobilität angepasst und eingesetzt [31, 32, 34].

Während der Fahrt mit einem Automobil müssen vom Fahrer viele Sinneseindrücke verarbeitet und die gewonnenen Informationen in entsprechende motorische Aktionen umgesetzt werden. Darrelmann et al. [35] untersuchten Blickbewegungsmuster von Profirennfahrern und Fahranfängern mittels eines auf dem Helm des Fahrers montierten mobilen Eye-Tracking-Systems. Dabei fanden sie heraus, dass die Profirennfahrer im Vergleich zu den unerfahrenen Fahrern längere Fixationszeiten aufwiesen und in Kurven schneller, präziser, und häufiger die relevanten Punkte fixierten. Allerdings konnte bei den unerfahrenen Fahrern ein Lerneffekt dahingehend gefunden werden, dass sie ihren *Scanpath* (Aufeinanderfolgen von Fixationen und Sakkaden) mit zunehmender Rundenzahl dem der erfahrenen Fahrer mehr und mehr angleichen [35].

Van Leeuwen et al. [36] untersuchten ebenfalls Profirennfahrer und verglichen diese mit Fahrern ohne Rennerfahrung. Ihre Probanden

sollten Runden einer Rennstrecke auf einem Fahrsimulator so schnell wie möglich absolvieren, während ihre Augenbewegungen verfolgt wurden. Während die Fahrer ohne Rennerfahrung ihre Blickbewegungsmuster am Scheitelpunkt der Kurven orientierten, fixierten die Profirennfahrer Referenzpunkte hinter den Scheitelpunkten, wobei Entfernung und Richtung dieser Referenzpunkte zum Scheitelpunkt je nach Kurve variierten. Zudem wiesen die Profirennfahrer mehr und markantere Kopfbewegungen auf.

2.2. Usability Engineering

Usability Engineering liefert einen sowohl konzeptuellen als auch operativen Rahmen, um Aspekte der Leistung sowie der Zufriedenstellung bei der Interaktion mit technologischen Produkten zu untersuchen. Um die Rolle des Eye-Tracking in diesem Zusammenhang zu diskutieren, stellt die Definition von *Usability* aus der Normenreihe DIN ISO 9241 einen geeigneten Ausgangspunkt dar. Demnach ist *Usability* das „(...) Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN ISO 9241-11 [37, S. 4]). Eine Evaluation der *Usability*-Dimensionen setzt damit voraus, dass die Perspektive der Benutzer eingenommen und der situative Kontext berücksichtigt wird. Beide Anforderungen können potentiell gut durch mobile Eye-Tracker erfüllt werden. Da diese Systeme örtlich nicht gebunden sind, kann die Datenaufnahme in realistischen Settings erfolgen. Das Problem mangelnder Generalisierbarkeit von Untersuchungsergebnissen durch zu rigide Versuchsbedingungen im Labor kann damit umgangen werden. Den Blickwinkel der Benutzer nehmen mobile Eye-Tracker quasi definitionsgemäß ein.

Es ist aber insbesondere die Operationalisierung der *Usability*-Kriterien, bei der Methoden der Blickuntersuchung Mehrwert liefern. Effizienzmaße im Allgemeinen betreffen den Aufwand an Ressourcen, insbesondere die „psychische oder physische Beanspruchung, Zeit, Material oder monetäre Kosten“ (DIN ISO 9241-11 [37], S. 7). So wird üblicherweise die Effizienz bei der Interaktion mit Produkten über die erforderliche Zeit zur Bearbeitung definierter Szenarien erhoben (DIN ISO 9241-11 [37]). Für die Untersuchung der Interaktion

speziell in dynamischen Umgebungen werden häufig mehrere Aufgaben gleichzeitig durchgeführt; es ist also hier die Ressource *Aufmerksamkeit*, die im Fokus einer Effizienzbetrachtung liegt. Im motorisierten Individualverkehr beispielsweise konkurrieren Primär- (Fahraufgabe), Sekundär- (z. B. Bedienung eines Navigationssystems) und Tertiäraufgaben (z. B. Bedienung eines Infotainmentsystems) um die Aufmerksamkeit der Fahrer. Hier verspricht Eye-Tracking einen geeigneten methodischen Zugang, Aufmerksamkeitszuwendungen zu quantifizieren. Beispielsweise können relevante Blickbereiche für die unterschiedlichen Sekundärsysteme definiert werden. Selbst wenn ein Leistungsmaß der Primäraufgabe, beispielsweise die Güte der Spurhaltung, eine Differenzierung der Sekundärsysteme nicht zulässt, liefert die durchschnittliche Blickzuwendung bzw. Verweildauer auf den *AOIs* ein indirektes Effizienzmaß. Je höher die visuelle Verweildauer bei den Sekundärsystemen, desto weniger effizient erfolgt die Interaktion mit diesen.

Mit zunehmender Auflösungsfähigkeit und Aufzeichnungsfrequenz mobiler Eye-Tracker kann ein weiteres Maß der Interaktionseffizienz erhoben werden. Steigen die Ansprüche an die Informationsverarbeitung der Operateure (z. B. Pilot, Fahrer, Manager) und damit deren kognitive Belastung in herausfordernden Situationen, steigt damit zumeist auch die subjektiv empfundene Beanspruchung (vgl. das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept von Bornemann [38], das Eingang in deutsches und internationales Normenwerk gefunden hat; DIN EN ISO 10075-1 [39]). Diese erhöhte *Workload* hat verschiedene körperliche und physiologische Folgen, die auch über Blickbewegungsmessung registriert werden können. Das sind zum einen diverse Maße in Zusammenhang mit Sakkaden (z. B. Dauer, Geschwindigkeit) bzw. Fixationen (z. B. Dauer, Häufigkeit), zum anderen aber auch Maße der Pupillometrie. So liefert die Pupillendilatation, also der Grad der Pupillenweitung, Informationen zum aktuellen Beanspruchungsniveau [40]. Diesen Zusammenhang zwischen Anstrengung und Pupillendurchmesser konnte Daniel Kahneman schon 1973 feststellen und hinsichtlich seiner Relevanz für das Aufmerksamkeitsmanagement diskutieren [41, 42]. Es existieren diverse Auswertalgorithmen, die die Messungen des

Pupillendurchmessers von lichtabhängigen und emotionalen Einflüssen bereinigen und damit einen leicht interpretierbaren Indikator für die kognitive *Workload* anbieten ([9] vgl. für eine grundlegende Untersuchung zum Thema Schwalm [43]). Gleichzeitig findet Pupillometrie derzeit noch überwiegend in standardisierten Umgebungen im Labor statt, um einen Nullwert bzw. einen Ausgangswert als Baseline zur Messung möglicher Veränderungen zu generieren.

Ein wichtiger Bestandteil einer entsprechenden Leistungsbeobachtung vergleichbarer Tätigkeiten umfasst das Ausmaß, in dem Operateure in der Lage sind, die Situation nachhaltig *wahrzunehmen*, zu *verstehen* und ihre unmittelbare Entwicklung *vorwegzunehmen*. Zusammengefasst werden diese drei Leistungsaspekte einer Interaktion unter dem Begriff „Situationsbewusstsein“ (vgl. Endsley [44, 45]). Für alle drei Ebenen des Situationsbewusstseins – Wahrnehmung, Verständnis, Antizipation – kann Eye-Tracking wertvolle Informationen und Leistungsindikatoren liefern. So *können* Operateure wichtige Elemente einer Situation nicht verstehen, wenn sie sie nicht wahrgenommen haben; das betrifft beispielsweise auch das weite Feld der Gestaltung von Warnmeldungen [46, 47]. Bestimmte Blickmuster können anzeigen, ob Operateure eine Situation verstanden und interpretiert haben. Ändert sich das Blickmuster trotz objektiv veränderter Bedeutung für die Situation nicht, kann auf Verständnisdefizite geschlossen werden.

Für eine Leistungseinschätzung ist es häufig nicht ganz einfach, Kriterien der Effektivität und der Effizienz gegeneinander abzuwägen. Wenn Operateure im Schnitt nur kurz auf eine relevante *AOI* blicken, ist diese kurze Zuwendungszeit Zeichen für effiziente Informationsaufnahme oder für mangelnde Registrierung einer wichtigen Informationsquelle? Vor einer Untersuchung müssen daher konkrete Kriterien definiert werden, die zudem auf einer soliden theoretischen Basis stehen sollten, um damit die Interpretation von Ergebnissen erst zu ermöglichen oder zu erleichtern.

2.3. Sportwissenschaften

In den Sportwissenschaften sind vor allem zwei verschiedene Systeme für das Eye-Tracking verbreitet (vgl. hierzu die Ausführungen in Abschnitt 1.1), mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen: Stationäre Systeme haben den Vorteil, dass sie meist mit einer höheren Auflösung messen können. Teilweise kann zudem der Kopf des Probanden fixiert werden, so dass eine isolierte, exakte Bestimmung der Augenbewegungen erfolgen kann [48]. Allerdings ist die externe Validität der Forschungsergebnisse, die mit Hilfe von stationären Eye-Trackern gewonnen wurden, im Sport wohl kaum gegeben [48]. Mobile Eye-Tracking Systeme haben den offensichtlichen Vorteil, dass sie – zumindest theoretisch – *in situ* messen können. Es offenbaren sich allerdings gerade im Sport die Besonderheiten und Limitationen wissenschaftlicher Datenerhebung: Die häufig deutlich komplexeren, meist kaum standardisierbaren Umweltinteraktionen stellen gerade am Körper getragene Messsysteme vor große Herausforderungen [48–50]. Bezogen auf das Eye-Tracking gilt dies in vielerlei Hinsicht: *Usability* (Limitationen durch Einschränkung des Sichtfeldes; erhöhte Verletzungsgefahr gerade bei Kontakt mit Gegner und/oder Sportgerät etc.); erschwerte Messung auf Grund dynamischer, veränderlicher Bedingungen (freie Bewegung im Raum; Verrutschen der Eye-Tracker bei schnellen, ruckartigen Kopfbewegungen etc.); interne vs. externe Validität (je standardisierter die Datenerhebung, desto vorsichtiger müssen die Daten im Hinblick auf die Sportpraxis interpretiert werden; je freier die Datenerhebung im Feld, desto schwieriger gestaltet sie sich hinsichtlich ihrer Qualität) [48, 49, 51, 52]. Obgleich im Zuge des allgemeinen technischen Fortschritts der Anwendungsbereich des Eye-Tracking stark erweitert werden konnte, werden wahrscheinlich vorerst nicht alle methodischen Limitationen des mobilen Einsatzes dieser Technologie gelöst werden können [48, 49]. Kredel et al. [48] beziehen sich hierbei vor allem auf die Problematik, dass bei allen derzeit verfügbaren mobilen Eye Trackern eine oder mehrere Kameras und Spiegel unmittelbar vor dem Auge des Probanden angebracht werden müssen (meist integriert in eine Brille), um die Bewegungen der Pupillen verfolgen zu können. Die Lösung könnte darin liegen, winzige Kameras und/ oder Bewegungstracker auf einer Kontaktlinse anzubringen, die zudem

den Fokus der Augen übernehmen können. Auch wenn dies mit den derzeit verfügbaren technischen Mitteln nicht möglich ist, wäre es durchaus vorstellbar, dass in der Zukunft eine derartige Lösung entwickelt wird.

Eye-Tracking wird in der Sportwissenschaft bisher vor allem in der Erforschung des Erlernens und Meisterns von Bewegungen und in der Expertiseforschung eingesetzt [53]. Bisher stehen vor allem Zielsportarten (Golf, Bogenschießen etc.) und Zielwurf-, -schuss-, und -schlagbewegungen aus den Spielsportarten (Aufschlag im Volleyball, Elfmeter im Fußball, Korbwurf im Basketball etc.) im Kern des Forschungsinteresses [50, 54–59]. Aber auch in der Erforschung des Entscheidungsverhaltens von Schiedsrichtern und der sporttaktischen Expertise wird Eye-Tracking eingesetzt [60–62]. Überdies findet es sogar in Randsportarten wie Tischtennis, Klettern, Sprungreiten, und Fechten vereinzelt Anwendung [52, 63–65].

Auf Grund der Herausforderungen der Datenerhebung fokussieren sich die meisten Studien dabei auf einfache, relativ leicht kontrollierbare sportartspezifische Bewegungen (*closed skills*) [49]. Entscheidend für die Expertise *in* und den Erfolg von Zielbewegungen im Sport scheint die Dauer und Qualität der letzten Fixierung der Augen auf den optimalen Zielpunkt zu sein (*Quiet Eye*) [53, 58, 59], wobei über fast alle Sportarten hinweg die Experten oder höherklassigen Athleten längere Sakkaden und kürzere Fixationszeiten aufzeigen und häufiger relevante Gegenden im Blickfeld fixieren [16, 56, 58]. Die Entdeckerin des *Quiet Eye*, Joan N. Vickers, sieht in dieser perceptiv-neurokognitiven Fähigkeit gar die Wurzel des *Flow* im Sport [58]. Letzteres Phänomen beschreibt den häufig beobachteten, jedoch bisher von der Wissenschaft nicht eindeutig erklärbaren Zustand eines Athleten, dem für eine begrenzte zeitliche Dauer innerhalb der Ausübung seiner Sportart unabhängig von Zeit-, Gegner-, und Umweltdruck alles zu gelingen scheint [58].

Ein weiteres zukünftiges Anwendungsfeld des Eye-Trackings könnte in der Diagnostik von Sport-induzierten Gehirnerschütterungen liegen. Allerdings ist die derzeitige Forschungslage hierzu noch zu dünn [66].

Trotz methodischer Herausforderungen öffnen mobile Eye-Tracker der Sportwissenschaft interessante neue Forschungsfelder. Inwiefern die Forschungsergebnisse unter Einsatz mobiler Eye-Tracker im Training zur Verbesserung sportartspezifischer Technik und Taktik umgesetzt werden können, muss sich erst noch zeigen – es erscheint aber durchaus nicht unrealistisch [52, 58, 67].

Mit Hilfe von Eye-Trackern konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Profirennfahrer aus dem Motorsport während der Fahrt andere Blickbewegungsmuster als Nicht-Rennfahrer und unerfahrene Fahrer aufweisen. Diese Erkenntnisse könnten jedoch in den unterschiedlichen Zielen von motorsportlicher und urbaner Mobilität liegen [36].

Mobile Eye-Tracker sind in der angewandten Sportwissenschaft hinsichtlich der externen Validität von Studien den stationären Systemen deutlich überlegen [48, 49, 52]. In zukünftigen Forschungsvorhaben sollten daher vermehrt mobile Eye-Tracking-Systeme zum Einsatz kommen, auch wenn die derzeit verfügbaren Systeme mit methodischen Herausforderungen verbunden sind und (noch) nicht in allen sportartspezifischen Situationen angewendet werden können.

2.4. Augmented Reality, Mixed Reality und Virtual Reality

Augmented Reality (AR), *Mixed Reality (MR)* und *Virtual Reality (VR)* haben in den letzten Jahren einen enormen technischen Fortschritt erlebt. Sie bilden die vierte Welle disruptiver Digitaltechnik und haben einen zunehmenden Einfluss auf unser tägliches Leben. Sie verbessern die Arbeitsleistung in Industrie und Medizin. Außerdem profitieren Bildung, Gaming und Entertainment von diesen Innovationen. *Smart Glasses* (z. B. Google Glass, Epson Moverio BT), *Mixed-Reality-Devices* (z. B. Microsoft HoloLens) und *Virtual-Reality-Brillen* (z. B. Oculus Rift, HTC Vive) sind kopfgetragene Geräte (*Head-Mounted-Devices*) und erlauben dem Träger eine räumliche Mobilität, solange das notwendige *Computing-Device* verbunden oder integriert ist.

Eye-Tracking in Verbindung mit *HMDs* bietet neue Möglichkeiten der Untersuchung: Einerseits lassen sich Situationen im freien Feld erforschen, bei dem der Benutzer nicht

an räumliche Gegebenheiten gebunden ist. Andererseits erhält man Erkenntnisse über Aufmerksamkeit und Reaktion des *Users* in erweiterten oder immersiven Realitäten. Darüber hinaus lassen sich Informationen über Augenstellungen und ihre Bewegungen für technische Optimierungen von *HMDs* und deren Applikationen, sowie innovativer Interaktionskonzepte nutzen.

Man hat schon früh begonnen, Eye-Tracking-Anwendungen aus dem 2D-Bereich [68] in den 3D-Bereich zu überführen [69]. Ein besonderer Aspekt von Eye-Tracking in *HMD* liegt in der Möglichkeit, durch binokulares Eye-Tracking und Beobachtung der Vergenz die Entfernung zum Betrachter zu bestimmen. Das erfordert zumeist eine vorhergehende Kalibrierung des Systems, d. h. die Position der Augen in Relation zum Sichtfeld (in der Regel das Display).

In technischer Hinsicht lässt sich der Fokus des menschlichen Betrachters dazu nutzen, Rechenleistung und somit die Energie in mobilen *HMDs* zu reduzieren bei gleichbleibender wahrgenommener *Performance* und Bildqualität. Beim *Foveated Rendering* [70] respektive *Foveated Ray Tracing* [71, 72] wird lediglich der Bildausschnitt gerendert, den der Mensch in seinem Fokus scharf sieht. Der Bildschirminhalt außerhalb des Fokus wird nur teilweise gerendert oder mit einem *Blur*-Effekt versehen [73]. Hillaire et al. gehen noch einen Schritt weiter und verwenden den Fokus zur dynamischen Optimierung der individuellen Kamerafahrten einer virtuellen Szene.

Pfeiffer et al. [74] wenden die Kenntnisse des Eye-Trackings aus dem zweidimensionalen auf den virtuellen dreidimensionalen Bereich an, um Inhalte und Objekte effizienter zu platzieren. Basierend auf Blickinformationen des Auges und der Bestimmung des Bildsegmentes nach Aufmerksamkeit und Interesse können dann Objektinformationen sowie Trigger zur Interaktion und Objektmanipulation eingeblendet und berücksichtigt werden [75]. Aufgrund des eingeschränkten Sichtfeldes der Geräte verwenden Renner und Pfeiffer [76] den peripheren Sehbereich des Nutzers zur Führung von Aufmerksamkeit und Orientierung. Zank und Kunz [77] zeigen darüber hinaus eine Technik, bei der man anhand von Augenbewegungen die (virtuelle) Laufrichtung des Betrachters vorhersagt, um

damit die räumlichen Einschränkungen der Realität gegenüber der virtuellen Welt zu umgehen.

Zur aktiven Interaktion und Manipulation von 3D-Inhalten müssen auch neue Interaktionskonzepte erforscht werden, da herkömmliche Eingabegeräte wie Tastaturen, Controller und Touchscreens nicht zweckmäßig sind und andere Formen wie Sprach- und Gestensteuerung ablenkend oder störend wirken. Eye-Tracking bietet eine Aussicht zur natürlichen, non-intrusiven Art der Interaktion. Chun et al. [78] nutzen z. B. die Blickrichtung zur Auswahl von Objekten, die der Benutzer dann mittels *Brain-Computing-Interfaces* manipulieren kann. Sidorakis et al. [79] zeigen gleich sechs Anwendungsmöglichkeiten des binokularen Eye-Trackings zur Steuerung von Multimedia-Inhalten im virtuellen Raum. Darunter das Verfassen von Emails, das Abspielen von Audio- und Bilddateien, sowie das Interagieren in Games.

Die Erkennung von Augenbewegungen in Verbindung mit Position zur Anzeigefläche kann auch zur automatisierten Interaktion verwendet werden, wie zum Scrollen von Inhalten [80] oder zur Navigation in Kartenmaterial [81]. Das Detektieren bestimmter Bewegungsmuster, wie z. B. Lesen, in Verbindung mit der Aufmerksamkeitsspanne des Benutzers, kann zur Anzeige von Übersetzungen oder Weiterleitung zu anderen Dokumenten und Textpassagen eingesetzt werden [82].

Derzeit werden fast ausschließlich kamera-basierte Lösungen verbaut (z. B. VR-Brille FOVE) oder als Erweiterung von Drittanbietern angeboten (z. B. *Pupil Labs*). Die Kameras können jedoch nur unterhalb oder seitlich der Augen platziert werden, was die Integration in *HMDs* erschwert. Die Elektrookulographie (EOG) bietet in ihrer Messgenauigkeit eine Alternative, ist aber aufgrund der Platzierung der Elektroden (vergleiche López et al. [4]) um das Auge für *HMDs* in der kommerziellen Anwendung unpraktisch.

Auch ohne Kalibrierung der Eye-Tracking-Systeme können die Informationen von Augen und ihren Bewegungen in *HMDs* verwendet werden. Gleichmäßige Augenbewegungen (*smooth pursuits*) etwa, sind nützlich zum Einstellen einer kontinuierlichen Variable, wie beispielsweise der Lautstärke einer

Audioquelle oder der Intensität eines Lichts [83]. Extreme Augenauslenkungen (45° horizontal, 30° vertikal) hingegen eignen sich zum schalten binärer Zustände (z. B. Menü ein- und ausblenden), wobei die zentrierte Augenstellung als neutraler Zustand gilt. Dietrich et al. [5] zeigen, dass sich diese extremen Augenstellungen schon durch vier EEG-Elektroden mit hinreichend guter Wahrscheinlichkeit detektieren lassen.

In kommerziellen Anwendungen bietet der EEG-basierte Ansatz [5] zudem den Vorteil, weder Kameras noch Elektroden an exakten EOG-Positionen platzieren zu müssen. Mit VR-Brillen von LooxidLabs oder Neurable, die bereits EEG-Elektroden integrieren, könnte man dann technisch gesehen auf Eye-Tracking-Kameras verzichten. Unabhängig davon ergeben sich aus der Kombination von Eye-Tracking und EEG weitere neue Untersuchungsfelder. Interessant sind u. a. die Reaktionszeit vom empfangenen Lichtreiz bis zur kognitiven Wahrnehmung, aktive Gehirnareale bei der Verarbeitung des Gesehenen oder etwa das Auftreten von Emotionen in Abhängigkeit von visuellen Stimuli.

Künftige Anwendungsgebiete des Eye-Trackings in *HMDs*, bei denen EEG-Signale wesentlichen Aufschluss geben können, sind z. B. Mensch-Mensch-Kommunikation, nahtlose Interaktion sowie medizinische Diagnostik und Therapie. Roberts et al. [84] und Steptoe et al. [85] zeigen in virtuellen Umgebungen, dass der natürliche Blickkontakt ebenso wichtig für zwischenmenschliche Kommunikation ist, wie Augengesten unerlässlich für eine Übermittlung und Interpretation von Anweisungen sind. Markante Muster von Augenbewegungen, wie etwa bestimmte Formen von Sakkaden, lassen Rückschlüsse auf die gerade ausgeführte Tätigkeit zu, wie z. B. das Suchen oder Lesen von Inhalten. Die psychische Belastung hingegen ergibt sich aus der Pupillenweitung, die in Abhängigkeit von Inhalt und Stimulus unterschiedlich zu interpretieren ist [86].

Kombinationen aus einzelnen Eye-Tracking-Informationen werden mittlerweile auch zu medizinischen Zwecken genutzt. Lahiri et al. [87, 88] analysieren Bereiche der Aufmerksamkeit (*AOIs*) zusammen mit Blinzelfrequenz, Fokus, Pupillendurchmesser und Fixationen für die Entwicklung eines dynamischen und

individuellen Feedbacksystems für soziale Interaktion in virtuellen Räumen für Kinder mit Autismus. VR und Eye-Tracking kann künftig auch bei der Bewertung und Diagnose von neurodegenerativen Erkrankungen und Prüfung ihrer Verwendung in einem klinischen Umfeld unterstützend beitragen [89].

Die Verfolgung der Augenbewegung lässt sich auch in der Optimierung des Anzeigekomforts in VR- und AR-Anwendungen einsetzen. Derzeitige Implementierungen verwenden meist eine Projektionsfläche (Display) pro Auge in einem festen Abstand und erzeugen den binokularen Tiefeneffekt durch relativen Versatz korrespondierender Bildpunkte auf beiden Displays. Hierbei entsteht der sogenannte Akkommodations-Vergenz-Konflikt [90, 91], da die Scharfstellung auf die Position des Displays erfolgen muss, während die Vergenz der Augen sich nach den korrespondierenden Punktpositionen der visualisierten Objekte ausrichtet. Bei der Betrachtung realer Objekte tritt diese Diskrepanz nicht auf. Der Betrachter reagiert auf starke vorübergehende Diskrepanzen mit kurzfristigem Unwohlsein (*Visual Discomfort*), längere Betrachtung auch bei geringen Diskrepanzen führen zu dauerhaften Ermüdungserscheinungen (*Visual Fatigue*; [92]).

Eye-Tracking ermöglicht die Detektion unangenehmer Bildinhalte, zum Beispiel durch kontinuierliche Korrelation der Disparität der dargestellten Sequenzen mit der Blickrichtung des Betrachters. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich über die Frequenz des Blinzeln auf die wahrgenommene Bewegung und das empfundene akute Unwohlsein in einer Videosequenz schließen lässt [93]. Ein weiterer Ansatzpunkt liegt in der dynamischen Anpassung des Bildinhalts. Durch selektives Hinzufügen von Unschärfe in Tiefenregionen nicht-fokussierter Objekte lässt sich der Akkommodations-Vergenz-Konflikt verringern und der Tiefeneffekt verstärken [94]. Falls Blickrichtung und Vergenz des Betrachters, beispielsweise durch EEG-basiertes Eye-Tracking, zur Verfügung stehen, können Bildbereiche, die weiter entfernt oder näher am Betrachter liegen, unscharf dargestellt werden. Zusätzlich kann die Disparität des betrachteten Objekts in Richtung des Disparitäts-Nullpunkts verschoben werden, um den Akkommodations-Vergenz-Konflikt zu minimieren.

2.5. Medizin und medizinische Weiterbildung

Eye-Tracking hat in der Medizin eine lange Geschichte, nicht nur zur Bestimmung von Krankheitsbildern, sondern insbesondere auch in der Analyse von Blickbewegungsmustern erfahrener Ärzte und Therapeuten [95–97]. Diese Analyse findet häufig in zwei Bereichen ihre Anwendung: bei der Interpretation bildgebender Verfahren der menschlichen Anatomie und ihrer Funktionen (wie etwa Röntgenbilder, Positronenemissionstomographien oder Ultraschallaufnahmen) und bei der Schulung von Blickbewegungen bei Medizinstudierenden durch die eingangs erwähnten *Eye Movement Modeling Examples*.

Bei der Interpretation bildgebender Verfahren lassen sich mittels Eye-Tracking klare Unterschiede zwischen Experten und Nicht-Experten identifizieren. Beispielsweise untersuchten Gegenfurtner und Seppänen [98], wie sich Nuklearmediziner und Radiologen in der Diagnose dreidimensionaler, dynamischer Modelle des menschlichen Körpers und ihrer Funktionen, die durch die Fusion von Positronenemissionstomographie und Computertomographie generiert wurden, hinsichtlich der Zahl und Dauer ihrer Fixationen auf diagnoserelevante und diagnoseredundante Informationen unterschieden. Replizierbare Expertiseunterschiede finden sich auch in der mikroskopischen Pathologie [99, 100], der Kardiologie [101], der Laparoskopie [102], der Chirurgie [103], der Nuklearmedizin [104] und der Notfallmedizin [105, 106]. Übersichtsarbeiten über diese Belege visueller Expertiseunterschiede – die systematische Vorteile von Experten in der Detektion von Auffälligkeiten und in der Diagnose von Symptomen dank herausragender visueller Informationsverarbeitungsprozesse belegen – finden sich beispielsweise bei Kundel [97], Gegenfurtner et al. [95], sowie Gegenfurtner und Van Merriënboer [107].

Der Einsatz mobiler Eye-Tracker bietet mittlerweile die Möglichkeit, das Blickverhalten von Ärzten und klinischem Pflegepersonal in ihrer gewohnten Arbeitsumgebung aufzuzeichnen. So können ganz neue Aufnahmen von Augenbewegungen generiert werden, in denen die Komplexität und Dynamik alltäglicher Arbeitssituationen etwa in Notfallaufnahmen oder im Operationssaal abgebildet werden kann [108]. Auch in Simulationen, in denen die klinische Kompetenz unter realistischen

Bedingungen nachgestellt und trainiert werden kann, lassen sich mobile Eye-Tracker einsetzen. So konnten Szulewski und Kollegen [105] im Kontext der Notfallmedizin zeigen, dass das Blickverhalten von Personen, die in einer Facharztausbildung sind, signifikant mit der diagnostischen Leistung in simulierten Notaufnahmen korreliert. Solche komplexen und wirklichkeitsnahen Szenarien, wie sie Simulationslabors ermöglichen, bieten neue und vielfältige Chancen, Blickverhalten von klinischem Fachpersonal zu analysieren.

Neben der Analyse von Augenbewegungen können Eye-Tracking-Daten aber auch für die Weiterbildung und Schulung genutzt werden und auf diese Weise die (visuelle) Expertiseentwicklung begünstigen. Ein didaktisches Modell, das vielfach eingesetzt und auf seine Wirksamkeit hin erprobt worden ist, bietet die Weiterbildung durch *Eye Movement Modeling Examples*. Dahinter steckt das Lernen durch Beispiele bzw. die Annahme, dass Personen mit geringem Vorwissen bzw. Expertise durch das Beobachten von Personen mit hoher Expertise lernen können, wie domänenspezifische Lösungsschritte aussehen [11] (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 1.1). Oft ist es nur schwer möglich, Experten bei der Lösung komplexer Probleme zu beobachten, insbesondere dann, wenn die Lösungsschritte internal („im Kopf“) ablaufen und nur schwer von außen beobachtbar sind [109]. Augenbewegungen sind ein Beispiel für solche internalen Prozesse. Eye-Tracking bietet hier die Möglichkeit, die Augenbewegungen von Experten während der Lösung eines Problems – etwa der Diagnose eines Röntgenbildes – aufzuzeichnen und die internalen Prozesse der Informationsverarbeitung zu externalisieren.

Diese videobasierte Externalisierung von Augenbewegungen kann auf zwei Arten für Zwecke der Weiterbildung genutzt werden. Einerseits kann das Video des Blickverhaltens eines Experten Personen mit noch geringer Erfahrung (etwa Studierende) vorgespielt werden. Auf diese Weise erhalten Studierende wertvolle Einblicke in die Mechanismen und Strategien, die von Experten bei Problemlösungen genutzt werden. Konkret können Studierende dabei lernen, in welcher Reihenfolge Experten bestimmte Bereiche fixieren, welche Bereiche bzw. Informationen häufig und stark fokussiert werden und welche

Bereiche redundant sind und potentiell ignoriert werden können [12]. Andererseits kann das Video des Blickverhaltens eines Experten dem Experten selbst vorgespielt werden. Dadurch erhalten Experten die Möglichkeit einer Rückmeldung der eigenen Augenbewegungen, die ohne Eye-Tracking nicht zur Verfügung stünde [106]. Es ergeben sich hier unmittelbar Chancen des Feedbacks und der Reflexion der eigenen beruflichen Praxis, die für die Fortbildung und Weiterentwicklung der eigenen Expertise genutzt werden können.

Diese Szenarien werden national und international bereits eingesetzt und erprobt, in Bereichen wie etwa der Notfallmedizin [108], der Nuklearmedizin [13] und der Radiologie [12]. Insbesondere der Kontext simulationsbasierter Lern- und Trainingsumgebungen scheint sich für den Einsatz von *Eye Movement Modeling Examples* zur Optimierung des Blickverhaltens und der *Agency* in komplexen medizinischen Situationen zu geben [106, 108, 110–112]. Weitere Anwendungsfelder in Medizin und Pflege müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten prüfen, inwieweit die Wirksamkeit von *Eye Movement Modeling Examples* unter veränderten Bedingungen und mit unterschiedlichen klinischen Diagnoseszenarien besteht und wie Feedbackmechanismen und das Beobachten von Experten didaktisch am besten in Curricula der beruflichen Aus- und Weiterbildung implementiert werden können.

3. Chancen und Risiken mobilen Eye-Trackings

Das Ziel dieses Beitrags war, einen Überblick über die Möglichkeiten von Eye-Tracking als Forschungsansatz zu geben. Dabei wurden verschiedene Beispiele aus den angewandten Wissenschaften präsentiert, in denen mobiles Eye-Tracking eingesetzt werden kann oder auch bereits intensiv genutzt wird. Diese konkreten Anwendungsbeispiele aus der Automobilität, des *Usability Engineerings*, der Sportwissenschaften, der *Augmented Reality/Mixed Reality/Virtual Reality* und der Medizin bzw. medizinischen Weiterbildung dokumentieren die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, die eine Analyse von Blickbewegungen bietet. In diesem Abschnitt sollen zusammenfassend die Chancen und Risiken abgewogen werden; ein Ausblick auf zukünftige Forschung rundet den Beitrag ab.

Die Chancen des mobilen Eye-Trackings liegen in mehreren Bereichen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Externalisierung internaler Prozesse der Informationsverarbeitung, auch in komplexen und dynamischen Arbeitsfeldern
- Präzise Analyse von Blickbewegungen und *AOIs*
- Einschätzung des Situationsbewusstseins in komplexen Szenarien
- Eingehenderes Verständnis der Verarbeitungsprozesse des Gehirns in Zusammenhang mit visuellen Reizen
- Training zur Verbesserung sportartspezifischer Technik und Taktik
- Kontaktlose Steuerung von Endgeräten und technologischen Innovationen durch Fokus und Blickbewegung
- Warnsysteme bei Unaufmerksamkeit etwa in der Automobilität und im Verkehr
- Video von Augenbewegungen in Form von *Eye Movement Modeling Examples* für Zwecke von Reflexion, Feedback sowie Aus- und Weiterbildung
- Im Falle von Studien mit mobilen Eye-Tracking-Systemen hohe externe Validität
- Langzeitbeobachtungen zur neurologischen und medizinischen Diagnostik und Therapie
- Augenbewegungen sind intuitiv und müssen im Gegensatz zu anderen Interaktionsmodellen nicht erlernt werden
- Augenbewegungen sind bei motorisch eingeschränkten Personen oft die einzige Möglichkeit der Kommunikation

Neben diesen Chancen bestehen aber auch einige Grenzen und Herausforderungen, die beim Einsatz von Blickbewegungsanalysen nicht außer Acht gelassen werden sollten. Dazu zählen etwa:

- Finanzielle Ressourcen für Anschaffung und Instandhaltung der Geräte
- Aufwendige und unflexible Integration kamera-basierter Systeme in *HMDs*
- Stark schwankende Unterschiede in Qualität (Genauigkeit, Latenz) und Verlässlichkeit der Hardware
- Notwendiges Knowhow für die Erhebung, Auswertung und Interpretation von Augenpositions- und Blickbewegungsdaten
- Schwierigkeit des intrapersonellen Vergleichs von Daten und Mustern aufgrund individueller Sehleistung (Visus, Vergenz, Akkommodation)

und physischer Gegebenheiten (Augenabstand, Motorik, Krankheit)

- Problematische interne Validität und experimentelle Kontrolle in Studien mit mobilen Eye-Trackern
- Probleme der Fixierung der Eye-Tracking-Brille in Situationen hoher körperlicher Agilität
- Individuelle Langzeit-Kalibrierung des Messsystems
- Notwendige Formulierung von Kriterien der Effektivität und der Effizienz als Analyserahmen der aufgezeichneten Daten
- Herausforderungen des Datenschutzes bei der Aufnahme von (möglicherweise unbeteiligten) Personen über die Eye-Tracking-Kameras in realistischen Szenarien
- Mögliche Verletzung des individuellen Persönlichkeitsrechts durch (permanente/wiederholte) Iris- und Retinascans
- Didaktische Implementierung von *Eye Movement Modeling Examples* in existierende Curricula
- Vernachlässigung anderer kognitiver Indikatoren, die jedoch zur Triangulation der Dateninterpretation hilfreich (und vielleicht notwendig) sind
- *Midas-Touch*-Problem (Die Nutzung von Augenbewegungen zur Interaktion im Mensch-Maschine-Kontext führt zu ständigen, auch ungewollten Aktionen)

Die hier aufgelisteten Risiken mobilen Eye-Trackings können in zukünftigen Forschungsarbeiten adressiert werden. Dabei scheint vor allem eine interdisziplinäre Zusammenarbeit hilfreich, in denen die Kompetenzen und die Expertise unterschiedlicher Fachbereiche und Praxispartner der Industrie gebündelt werden können. Gerade die angewandten Wissenschaften haben hier eine besondere Stärke, weil sie in einem Zusammenspiel hoher Praxisorientierung unter gleichzeitiger Berücksichtigung hoher wissenschaftlicher Standards neues, anwendbares Wissen generieren. Dabei lassen sich mobile Eye-Tracker auch hervorragend in Strategien der Digitalisierung integrieren, weil die digital genutzten Daten für digitale Situationen in Alltag, Beruf und Weiterbildung neue Horizonte eröffnen können, wenn die internalen Prozesse der visuellen Informationsverarbeitung dank Eye-Tracking sichtbar und damit auch für neue Anwendungen nutzbar gemacht werden.

4. Literatur

- [1] Holmqvist, Kenneth; Andersson, Richard (2017): Eye tracking. A comprehensive guide to methods, paradigms and measures. Second edition. Lund, Sweden: Lund Eye-Tracking Research Institute.
- [2] Duchowski, Andrew T. (2017): Eye tracking methodology. Theory and practice. Third edition. New York, USA: Springer.
- [3] Yarbus, Alfred L. (1967): Eye movements and vision. New York: Plenum.
- [4] López, A.; Ferrero, F. J.; Valledor, M.; Campo, J. C.; Postolache, O. (2016): A study on electrode placement in EOG systems for medical applications. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), S. 1–5.
- [5] Dietrich, Marc-Philipp; Winterfeldt, Götz; Mammen, S. von (2017): Towards EEG-Based Eye-Tracking for Interaction Design in Head-Mounted Devices. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) [3-6 September, 2017; Berlin].
- [6] Sodhi, Manbir; Reimer, Bryan; Llamazares, Ignacio (2002): Glance analysis of driver eye movements to evaluate distraction. In: *Behavior Research Methods* 34 (4), S. 529–538.
- [7] Eichinger, Armin (2011): Bewertung von Benutzerschnittstellen für Cockpits hochagiler Flugzeuge. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Philosophischen Fakultät II (Psychologie, Pädagogik und Sportwissenschaft) der Universität Regensburg. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.
- [8] Latzel, Richard; Hoos, Olaf; Stier, Sebastian; Kaufmann, Sebastian; Fresz, Volker; Reim, Dominik; Beneke, Ralph (2018): Energetic Profile of the Basketball Exercise Simulation Test in Junior Elite Players. In: *International Journal of Sports Physiology and Performance* 13 (6), S. 810–815.
- [9] Szulewski, Adam; Gegenfurtner, Andreas; Howes, Daniel; Sivilotti, Marco L.A.; van Merriënboer, Jeroen J.G. (2017): Measuring physician cognitive load: Validity evidence for a physiologic and a psychometric tool. In: *Advances in Health Sciences Education - Theory and Practice* 22 (4), S. 951–968.
- [10] McIntyre, Nora Ann (2018): Teach at first sight: Expert teacher gaze across two cultural settings. PhD thesis. University of York, York, England.
- [11] van Gog, Tamara; Jarodzka, Halszka; Scheiter, Katharina; Gerjets, Peter; Paas, Fred (2009): Attention guidance during example study via the model's eye movements. In: *Computers in Human Behavior* 25 (3), S. 785–791.
- [12] Seppänen, Marko; Gegenfurtner, Andreas (2012): Seeing through a teacher's eyes improves students' imaging interpretation. In: *Medical Education* 46 (11), S. 1113–1114.
- [13] Gegenfurtner, Andreas; Lehtinen, Erno; Jarodzka, Halszka; Säljö, Roger (2017): Effects of eye movement modeling examples on adaptive expertise in medical image diagnosis. In: *Computers & Education* 113 (1), S. 212–225.
- [14] Mason, Lucia; Pluchino, Patrik; Tornatora, Maria Caterina (2015): Eye movement modeling of integrative reading of an illustrated text: Effects on processing and learning. In: *Contemporary Educational Psychology* 41 (April), S. 172–187.
- [15] Just, Marcel A.; Carpenter, Patricia A. (1984): Using eye fixations to study reading comprehension. In: David E. Kieras und Marcel A. Just (Hg.): *New methods in reading comprehension research*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates, S. 151–182.
- [16] Gegenfurtner, Andreas; Lehtinen, Erno; Säljö, Roger (2011): Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. In: *Educational Psychology Review* 23 (4), S. 523–552.
- [17] Eichinger, Armin; Kellerer, Johannes (2013): Between Laboratory and Simulator: A Cognitive Approach to Evaluating Cockpit Interfaces by Manipulating Informatory Context. In: *Cognition, Technology & Work* 16 (3), S. 417–427.

- [18] Blaschek, Tanja; Kurzhals, Kuno; Raschke, Michael; Burch, Michael; Weiskopf, Daniel; Thomas, Ertl (2017): Visualization of eye tracking data: A taxonomy and survey. In: *Computer Graphics Forum* 36 (8), S. 260–284.
- [19] Grüner, Markus; Ansoerge, Ulrich (2017): Mobile eye tracking during real-world night driving: A selective review of findings and recommendations for future research. In: *Journal of Eye Movement Research* 10 (2), S. 1–18.
- [20] Williams, Allan F. (2013): Teenage drivers: Patterns of risk. In: *Journal of Safety Research* 34 (1), S. 5–15.
- [21] Brimley, Bradford K.; Carlson, Paul J.; Hawkins, H. G. (2014): Use of fixation heat maps to evaluate visual behavior of unfamiliar drivers on horizontal curves. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2458 (1), S. 16–26.
- [22] Higgins, Laura L.; Ko, Myunghoon; Chrysler, Susan T. (2009): Driver eye- scanning behavior at intersections at night. Research Report 169111-1. College Station, TX, USA: Texas Transportation Institute.
- [23] Konstantopoulos, Panagiotis (2009): Investigating drivers' visual search strategies: Towards an efficient training intervention. PhD thesis. University of Nottingham, Nottingham, England.
- [24] Chapman, Peter R.; Underwood, Geoffrey (1998): Visual Search of Driving Situations: Danger and Experience. In: *Perception* 27 (8), S. 951–964.
- [25] Underwood, Geoffrey; Crundall, David; Chapman, Peter R. (2002): Selective searching while driving: The role of experience in hazard detection and general surveillance. In: *Ergonomics* 45 (1), S. 1–12.
- [26] Braunagel, Christian; Kasneci, Enkelejda; Stolzmann, Wolfgang; Rosenstiel, Wolfgang (2015): Driver-activity recognition in the context of conditionally autonomous driving. In: Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (15. – 18.9.2015, Washington DC, USA), S. 1652–1657.
- [27] Vicente, Francisco; Huang, Zehua; Xiong, Xuehan; De la Torre, Fernando; Zhang, Wende; Levi, Dan (2015): Driver gaze tracking and eyes off the road detection system. In: *Proceedings of the IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (4), S. 2014–2027.
- [28] Hasse, Catrin; Grasshoff, Dietrich; Bruder, Carmen (2012): How to measure monitoring performance of pilots and air traffic controllers. In: Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications (28.-30.03.2012, Santa Barbara, USA), S. 409–412.
- [29] Yu, Chung-San; Wang, Eric M.-Y.; Li, Wen-Chin; Braithwaite, Graham (2014): Pilots' visual scan patterns and situation awareness in flight operations. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 85 (7), S. 708–714.
- [30] Glaholt, Mackenzie G. (2014): Eye tracking in the cockpit: A review of the relationships between eye movements and the aviators' cognitive state. Toronto, Canada: Defense Research And Development.
- [31] Barry, Ben (2018): Virtually autonomous. In: *AUTO: International Journal of the FIA* 22 (1), S. 56–59.
- [32] Cutler, Marc (2018): Strong Standards. In: *AUTO: International Journal of the FIA* 22 (1), S. 24–27.
- [33] FIA Foundation (2016): From Track to Road – How Motor Sport Safety Inspires Road Safety Innovation. Online verfügbar unter <https://www.fiafoundation.org/media/224071/from-track-to-road-lr-spreads.pdf>, zuletzt geprüft am August 2018.
- [34] Schaeffler AG: Motorsport in their Genes – in any Powertrain Architecture. Online verfügbar unter <https://www.schaeffler.com/content.schaeffler.com/en/innovation/motorsport/motorsport.jsp>, zuletzt geprüft am 15.08.2018.
- [35] Darrelmann, Benedikt G.; Richard, Gisbert; Schwartz, Raphael (2010): Blickbewegungsmuster erfahrener und unerfahrener Fahrer im Automobilsport. In: *Der Ophthalmologe* 107 (2), S. 136–142.
- [36] Van Leeuwen, Peter M.; Groot, Stefan de; Happee, Riender; de Winter, Joost C.F. (2017): Differences between racing and non-racing drivers: A simulator study using eye-tracking. In: *PLoS One* 12 (11).
- [37] DIN EN ISO 9241-11. Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit (1998). Berlin.

- [38] Bornemann, Ernst (1959): Untersuchungen über den Grad der geistigen Beanspruchung. Meisenheim/Glan: Hain.
- [39] DIN EN ISO 10075-1. Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeines und Begriffe (2000). Berlin.
- [40] Marshall, Sandra P. (2002): The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload. In: Proceedings of the 7th IEEE Conference on human factors and power plants, S. 7.
- [41] Kahneman, Daniel (1973): Attention and effort. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall.
- [42] Kahneman, Daniel (2011): Thinking, fast and slow. New York, USA.
- [43] Schwalm, Maximilian (2009): Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext. Dissertationsschrift. Universität Saarbrücken, Saarbrücken.
- [44] Endsley, Mica R. (1995): Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. In: *Human Factors* 37 (1), S. 32–64.
- [45] Endsley, Mica R.; Jones, Debra G. (2011): Designing for situation awareness. An approach to user-centered design. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [46] Fecher, Norbert; Hoffmann, Jens (2015): Fahrerwarnenelemente. In: Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer (Hg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer, S. 375–685.
- [47] Lee, John D.; Wickens, Christopher D.; Liu, Yili; Boyle, Linda Ng (2017): Designing for people. An introduction to human factors engineering. Charleston, SC, USA: CreateSpace.
- [48] Kredel, Ralf; Vater, Christian; Klostermann, André; Hossner, Ernst-Joachim (2017): Eye-tracking technology and the dynamics of natural gaze behavior in sports: A systematic review of 40 years of research. In: *Frontiers in Psychology* 8, S. 1845.
- [49] Discombe, Russell; Cotterill, Stewart (2015): Eye tracking in sport: A guide for new and aspiring researchers. In: *Sport and Exercise Psychology Review* 11 (2), S. 49–58.
- [50] Panchuk, Derek; Vickers, Joan N. (2015): Gaze behaviors of goaltenders under spatial-temporal constraints. In: *Journal of Human Movement Science* 25 (6), S. 733–752.
- [51] Roberts, Claire-Marie; Tabano, James G.; Hunvalfay, Melissa (2016): Wearing Eye-Tracking Technology during Batting Practice: Assessing the Experiences of Professional Baseball Athletes. In: *International Journal of Sports Science* 6 (3), S. 125–132.
- [52] Zeuwts, Linus; Debuyck, Gijs; Vansteenkiste, Pieter; Lenoir, Matthieu (2013): Is there a difference in visual search patterns between watching video clips of fencers on a computer screen or on a life-sized screen? Conference Paper.
- [53] Grushko, Alyona I.; Leonov, Sergey V.; Veraksa, Aleksander N. (2015): Eye-tracking in sport psychology. In: Esther S. Linton (Hg.): Advances in sports research. New York, USA: Nova Science Publishers (Sports and athletics preparation, performance, and psychology), S. 61–80.
- [54] Fegatelli, Dario; Giancamilli, Francesco; Mallia, Luca; Chirico, Andrea; Lucidi, Fabio (2016): The use of eye tracking (ET) in targeting sports: A review of the studies on Quiet Eye (QE). In: Giuseppe de Pietro, Luigi Gallo, Robert J. Howlett, L. C. Jain und Ljubo Vlacic (Hg.): Intelligent interactive multimedia systems and services. Proceedings of 2018 conference. New York, USA: Springer (Smart Innovation, Systems and Technologies, volume 98), S. 715–730.
- [55] Gegenfurtner, Andreas; Szulewski, A. (2016): Visual expertise and the Quiet Eye in sports. Comment on Vickers. In: *Current Issues in Sport Science* 1 (1), S. 108.
- [56] Savelsbergh, Geert J.P.; Williams, A. Mark; Van der Kamp, John; Ward, Paul (2002): Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. In: *Journal of Sports Science* 20 (3), S. 279–287.
- [57] Paeglis, Robert; Bluss, Kristaps; Rudzitis, Andris; Spunde, Andris; Brice, Tamara; Nitiss, Edgars (2012): NIR tracking assists sports medicine in junior basketball training. In: H. Sterenborg und I. Vitkin (Hg.): Novel Biophotonic Techniques and Applications. Proceedings of SPIE-OSA Biomedical Optics (Optical Society of America, 2011), Paper 80900T (Vol. 8090).

- [58] Vickers, Joan N. (2016): Origins and current issues in Quiet Eye-research. In: *Current Issues in Sport Science* 1, S. 101 ff.
- [59] Wilson, Mark R.; Pearcy, Richard C. (2009): Visuomotor control of straight and breaking golf putts. In: *Perceptual and Motor Skills* 109 (2), S. 555–562.
- [60] Spitz, Jochim; Put, Koen; Wagemans, Johan; Williams, A. Mark; Helsen, Werner F. (2016): Visual search behaviors of association football referees during assessment of foul play situations. In: *Cognitive Research: Principles and Implications* 1 (12).
- [61] del Campo, Vicente Luis; Canelo, Aitor; Morenas, Jesus; Gómez-Valadés, Juan Miguel; Gómez, Juan (2015): Referees visual behavior during offside situations in football. In: *International Journal of Medicine and Science of Physical Activity and Sport* 15 (58), S. 325–338.
- [62] Martell, Stephen G.; Vickers, Joan N. (2002): Gaze characteristics of elite and near-elite athletes in ice hockey defensive tactics. In: *Journal of Human Movement Science* 22 (6), S. 689–712.
- [63] Ripoll, Hubert (1989): Uncertainty and visual strategies in table tennis. In: *Perceptual and Motor Skills* 68 (2), S. 507–512.
- [64] Grushko, Alyona I.; Leonov, Sergey V. (2014): The usage of eye-tracking technologies in rock-climbing. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 146 (August), S. 169–174.
- [65] Hall, Carol; Varley, Ian; Kay, Rachel; Crundall, David (2014): Keeping your eye on the rail: Gaze behaviour of horse riders approaching a jump. In: *PLoS One* 9 (5), S. e97345.
- [66] Snegireva, Nadja (2017): Eye-tracking as a sports concussion assessment tool: a meta-analytic review. Conference paper.
- [67] Spaniol, Frank; Alves, M.; Erichsen, O.; Lawson, T. (2015): Visual skills of elite brazilian soccer players. Conference paper.
- [68] Kaufman, A. E.; Bandopadhyay, Amit; Shaviv, B. D. (1993): An eye tracking computer user interface. In: *Proceedings of the IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality* (October 23-26, 1993, San Jose, California), S. 120–121.
- [69] Colombo, C.; Del Bimbo, Alberto; Magistris, Silvio de; Cantoni, Virginio (1995): Human-computer interaction based on eye movement tracking. In: *Proceedings of Conference on Computer Architectures for Machine Perception*, S. 258–263.
- [70] Springer, Christoph (2016): SMI zeigt funktionierendes Foveated Rendering. Online verfügbar unter <https://www.vrnerds.de/smi-zeigt-funktionierendes-foveated-rendering/>.
- [71] Roth, Thorsten; Weier, Martin; Hinkenjann, Andre; Li, Yongmin; Slusallek, Philipp (2016): An analysis of eye-tracking data in foveated ray tracing. In: *Proceedings of the 2016 IEEE Second Workshop on Eye Tracking and Visualization (ETVIS)*, S. 69–73.
- [72] Stengel, Michael; Grogorick, Steve; Eisemann, Martin; Eisemann, Elmar; Magnor, Marcus (2015): Non-obscuring binocular eye tracking for wide field-of-view head-mounted-displays. In: *Proceedings of the 2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 357–358.
- [73] Hillaire, Sebastien; Lecuyer, Anatole; Cozot, Remi; Casiez, Gery (2008): Using an Eye-Tracking System to Improve Camera Motions and Depth-of-Field Blur Effects in Virtual Environments. In: *Proceedings of the 2008 IEEE Virtual Reality Conference*, S. 47–50.
- [74] Pfeiffer, Thies (2012): 3D Attention Volumes for usability studies in virtual reality. In: *Proceedings of the 2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW)*, S. 117–118.
- [75] Swaminathan, Ashwin; Ramachandran, Mahesh (2018): Enabling augmented reality using eye gaze tracking. Veröffentlichungsnr: US9996150B2. 12.06.2018.
- [76] Renner, Patrick; Pfeiffer, Thies (2017): Attention guiding techniques using peripheral vision and eye tracking for feedback in augmented-reality-based assistance systems. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, S. 186–194.
- [77] Zank, Markus; Kunz, Andreas (2016): Eye tracking for locomotion prediction in redirected walking. In: *Proceedings of the 2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, S. 49–58.

- [78] Chun, Jinsung; Bae, Byeonguk; Jo, Sungho: BCI based hybrid interface for 3D object control in virtual reality. In: Proceedings of the 2016 4th International Winter Conference on Brain-Computer Interface (BCI): 2016, S. 1–4.
- [79] Sidorakis, Nikolaos; Koulieris, George Alex; Mania, Katerina (2015): Binocular eye-tracking for the control of a 3D immersive multimedia user interface. In: Proceedings of the 2015 IEEE 1st Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR), S. 15–18.
- [80] Peck, Charles C.; Mackay, John D. (2005): Eye gaze control of dynamic information presentation. Veröffentlichungsnr: US6886137B2. 26.04.2005.
- [81] Atrey, Tarun; Gupta, Prakhar; Atrey, Pradeep K. (2012): Unobtrusive map navigation using eye tracking. In: Proceedings of the 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (29.4. – 2.5.2012, Montreal, Kanada), S. 1–4.
- [82] Toyama, Takumi; Dengel, Andreas; Suzuki, Wakana; Kise, Koichi (2013): Wearable Reading Assist System: Augmented Reality Document Combining Document Retrieval and Eye Tracking. In: Proceedings of the 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, S. 30–34.
- [83] Kangas, Jari; Špakov, Oleg; Isokoski, Poika; Akkil, Deepak; Rantala, Jussi; Raisamo, Roope: Feedback for Smooth Pursuit Gaze Tracking Based Control. In: Proceedings of the 7th AH Augmented Human International Conference · AH 2016, S. 1–8.
- [84] Roberts, David; Wolff, Robin; Rae, John; Steed, Anthony; Aspin, Rob; McIntyre, Moira et al.: Communicating Eye-gaze Across a Distance: Comparing an Eye-gaze enabled Immersive Collaborative Virtual Environment, Aligned Video Conferencing, and Being Together. In: Proceedings of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference, S. 135–142.
- [85] Steptoe, Will; Oyekoya, Oyewolo; Murgia, Alessio; Wolff, Robin; Rae, John; Guimaraes, Estefania et al. (2009): Eye Tracking for Avatar Eye Gaze Control During Object-Focused Multiparty Interaction in Immersive Collaborative Virtual Environments. In: Proceedings of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference, S. 83–90.
- [86] Köles, Máté; Hámornik, Balász; Lógó, Emma; Hercegfi, Károly; Tóvölgyi, Sarolta (2014): Experiences of a combined psychophysiology and eye-tracking study in VR. In: Proceedings of the 014 5th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), S. 391–395.
- [87] Lahiri, Uttama; Warren, Zachary; Sarkar, Nilanjan (2011): Design of a Gaze-Sensitive Virtual Social Interactive System for Children With Autism. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 19 (4), S. 443–452.
- [88] Lahiri, Uttama; Bekele, Esube; Dohrmann, Elizabeth; Warren, Zachary; Sarkar, Nilanjan (2013): Design of a Virtual Reality Based Adaptive Response Technology for Children With Autism. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 21 (21), S. 55–64.
- [89] Orlosky, Jason; Itoh, Yuta; Ranchet, Maud; Kiyokawa, Kiyoshi; Morgan, John; Devos, Hannes (2017): Emulation of Physician Tasks in Eye-Tracked Virtual Reality for Remote Diagnosis of Neurodegenerative Disease. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23 (4), S. 1302–1311.
- [90] Hoffmann, David M.; Girshick, Ahna; Akeley, Kurt; Banks, Martin S. (2008): Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. In: *Journal of Vision* 8 (3), S. 1–30.
- [91] Lambooi, Marc T.M.; Ijsselstein, Wijnand A.; Heynderickx, Ingrid (2007): Visual discomfort in stereoscopic displays: A review. In: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE) (Hg.): Proceedings of SPIE Volume 6490: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV (Electronic Imaging 2007, 2007, San Jose, CA, United States).
- [92] Urvoy, Matthieu; Barkowsky, Marcus; Le Callet, Patrick (2013): How visual fatigue and discomfort impact 3D-TV quality of experience: a comprehensive review of technological, psychophysical, and psychological factors. In: *Annales de Télécommunications* 68 (11-12), S. 641–655.
- [93] Cho, Sang-Hyun; Kang, Hang-Bong (2013): Eye-movement analysis for measuring visual discomfort caused from watching stereoscopic 3D video. In: Proceedings of World Congress on Multimedia and Computer Science ACEEE.

- [94] Wang, Junle; Barkowsky, Marcus; Ricordel, Vincent; Le Callet, Patrick (2011): Quantifying how the combination of blur and disparity affects the perceived depth. In: Bernice Ellen Rogowitz und Thrasyloulos N. Pappas (Hg.): Human Vision and Electronic Imaging XVI. 24-27 January 2011, San Francisco, California, United States. Bellingham, Wash., Springfield, Va.: SPIE; IS&T (Proceedings of SPIE, Vol. 7865).
- [95] Gegenfurtner, Andreas (2013): Transitions of expertise. In: Jürgen Seifried und Eveline Wuttke (Hg.): Transitions in vocational education. 1. Auflage. Opladen: Verlag Barbara Budrich, S. 305–319.
- [96] Gegenfurtner, Andreas; Kok, Ellen; van Geel, Koos; Bruin, Anique de; Jarodzka, Halszka; Szulewski, Adam; van Merriënboer, Jeroen J.G. (2017): The challenges of studying visual expertise in medical image diagnosis. In: *Medical Education* 51 (1), S. 97–104.
- [97] Kundel, Harold L.; Nodine, Calvin F.; Conant, Emily F.; Weinstein, Susan P. (2007): Holistic component of image perception in mammogram interpretation: Gaze-tracking study. In: *Radiology* 242 (2), S. 396–402.
- [98] Gegenfurtner, Andreas; Seppänen, Marko (2013): Transfer of expertise: An eye-tracking and think-aloud study using dynamic medical visualizations. In: *Computers & Education* 63 (1), S. 393–403.
- [99] Helle, Laura; Nivala, Markus; Kronqvist, Pauliina; Gegenfurtner, Andreas; Björk, Pasi; Säljö, Roger (2011): Traditional microscopy instruction versus process-oriented virtual microscopy instruction: A naturalistic experiment with control group. In: *Diagnostic Pathology* 6 (S1), S. S81-S89.
- [100] Krupinski, Elizabeth; Tillack, Allison A.; Richter, Lynne; Henderson, Jeffrey; Bhattacharyya, Achyut; Scott, Katherine M.; et al. (2006): Eye-movement study and human performance using telepathology virtual slides. Implications for medical education and differences with experience. In: *Human Pathology* 37 (12), S. 1543–1556.
- [101] Augustyniak, Piotr; Tadeusiewicz, Ryszard (2006): Assessment of electrocardiogram visual interpretation strategy based on scanpath analysis. In: *Physiological Measurement* 27 (7), S. 597–608.
- [102] Wilson, Mark R.; McGrath, John S.; Vine, Samuel; Brewer, James P.; Defriend, David; Masters, Richard S. (2010): Psychomotor control in a virtual laparoscopic surgery training environment: Gaze control parameters differentiate novices from experts. In: *Surgical Endoscopy* 24 (10), S. 2458–2464.
- [103] Kok, Ellen; De Bruin, Anique B.; van Geel, Koos; Gegenfurtner, Andreas; Heylingers, Ide; Sorger, Bettina (2018): The neural implementation of surgical expertise within the mirror-neuron system: An fMRI study. In: *Frontiers in Human Neuroscience* 12 (July), S. 291 ff.
- [104] Gegenfurtner, Andreas; Nivala, Markus; Säljö, Roger; Lehtinen, Erno (2009): Capturing individual and institutional change: Exploring horizontal versus vertical transitions in technology-rich environments. In: U. Cress, V. Dimitrova und M. Specht (Hg.): Learning in the synergy of multiple disciplines. Proceedings of the 4th European Conference on Technology Enhanced Learning [EC-TEL] 2009, Nice, France, September 29-October 2nd 2009. Berlin, New York: Springer (Lecture notes in computer science, 5794), S. 676–681.
- [105] Szulewski, Adam; Egan, Rylan; Gegenfurtner, Andreas; Howes, Daniel; Dashi, Gerhard; McGraw, Nick C.J. et al. (2018): A new way to look at simulation-based assessment: the relationship between gaze-tracking and exam performance. In: *Canadian Journal of Emergency Medicine* (In Press).
- [106] White, Matthew R.; Braund, Heather; Howes, Daniel; Egan, Rylan; Gegenfurtner, Andreas; van Merriënboer, J.J.G.; Szulewski, Adam (2018): Getting inside the expert's head: An analysis of physician cognitive processes during trauma resuscitations. In: *Annals of Emergency Medicine* 72 (3), S. 289–298.
- [107] Gegenfurtner, Andreas; van Merriënboer, Jeroen J.G. (2017): Methodologies for studying visual expertise. In: *Frontline Learning Research* 5 (3), S. 1–13.
- [108] Szulewski, Adam; Braund, Heather; Egan, Rylan; Hall, Andrew K.; Dagnone, Jeffrey Damon; Gegenfurtner, Andreas; van Merriënboer, Jeroen J.G. (2018): Through the Learner's Lens: Eye-Tracking Augmented Debriefing in Medical Simulation. In: *Journal of Graduate Medical Education* 10 (3), S. 340–341.

- [109] Gegenfurtner, Andreas; Kok, Ellen; van Geel, Koos; Bruin, Anique B.H. de; Sorger, Bettina (2017): Neural correlates of visual perceptual expertise: Evidence from cognitive neuroscience using functional neuroimaging. In: *Frontline Learning Research* 5 (3), S. 14–30.
- [110] Damşa, Crina I.; Froehlich, Dominik E.; Gegenfurtner, Andreas (2017): Reflections on empirical and methodological accounts of agency at work. In: M. Goller und S. Paloniemi (Hg.): *Agency at work: An agentic perspective on professional learning and development*: Springer International Publishing (Professional and practice-based learning, Volume 20), S. 445–461.
- [111] Knogler, Maximilian; Gegenfurtner, Andreas; Quesada Pallarès, Carla (2013): Social design in digital simulations: Effects of single versus multi-player simulations on efficacy beliefs and transfer. In: N. Rummel, M. Kapur, M. Nathan und S. Puntambekar (Hg.): *To See the World and a Grain of Sand: Learning across Levels of Space, Time, and Scale* (Proceedings of the 10th International Conference on Computer Supported Collaborative Learning [CSCL], University of Wisconsin - Madison, June 15th-19th 2013) (Vol. 2), S. 293–294.
- [112] Siewiorek, Anna; Gegenfurtner, Andreas (2010): Leading to win: The influence of leadership style on team performance during a computer game training. In: K. Gomez, L. Lyons und J. Radinsky (Hg.): *Learning in the disciplines* (Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences [ICLS 2010], Vol. 1). Chicago, IL, USA, S. 524–531.



Dr. Andreas Gegenfurtner

Andreas Gegenfurtner studierte Pädagogik, Psychologie und Soziologie an der Universität Regensburg. Er promovierte 2011 an der Universität Turku (Finnland) im Fach Erziehungswissenschaften. Von 2012 bis 2014 war er Post-Doc an der TU München und Gastprofessor an der Universität Cambridge (England). Von 2014 bis 2016 war er Juniorprofessor an der Universität Maastricht (Niederlande). Im Jahr 2016 kehrte er in seine Heimatstadt Deggendorf zurück und arbeitet seitdem als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Institut für Qualität und Weiterbildung (IQW) an der THD. Seine Forschung fokussiert auf digitale Lernumgebungen, Expertiseforschung, Motivationspsychologie und Lerntransfer in Weiterbildungen.

Andreas Gegenfurtner studied Pedagogy, Psychology and Sociology at the University of Regensburg. He obtained his doctorate in Educational Science at the University of Turku (Finland) in 2011. Between 2012 and 2014, he was a post-doc at the Technical University of Munich and a visiting professor to the University of Cambridge (England). Moreover, he held a junior professorship at the University of Maastricht (The Netherlands) from 2014 until 2016. In 2016, he returned to his hometown Deggendorf and has, ever since, been working as a scientist and project manager at DIT's Further Education Center IQW. His research concentrates on digital learning environments, expertise research, motivational psychology and transfer of training in further education.

Kontakt / Contact

✉ andreas.gegenfurtner@th-deg.de

Prof. Dr. Armin Eichinger

Armin Eichinger studierte Psychologie und Informatik in Regensburg. Er promovierte im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion in der Luftfahrt. Seit 2014 ist er Professor an der TH Deggendorf. Er forscht und lehrt in den Bereichen Usability Engineering, Wirtschaftsinformatik sowie Wirtschaftspsychologie.

Armin Eichinger studied psychology and computer science in Regensburg. In 2011, he received his doctorate on the subject of human-machine interaction in aviation. He was appointed professor at DIT in 2014. He teaches and researches in the fields of usability engineering, business informatics as well as organizational and economic psychology.

Kontakt / Contact

✉ armin.eichinger@th-deg.de



Dr. Richard Latzel

Dr. Richard Latzel arbeitete nach seinem Lehramtsstudium in Würzburg (Sport und Englisch) viele Jahre im Leistungssport (Basketball) als Sportwissenschaftler, Trainer und Athletiktrainer. Da kognitiv-perzeptuelle Fähigkeiten gerade im Spilsport auf mehreren Ebenen (v.a. in den Bereichen Technik und Taktik) eine große Rolle einnehmen, rückte das Eye-Tracking in den letzten Jahren zunehmend in das Interesse angewandter sportwissenschaftlicher Forschung.

Richard Latzel, who studied to become a teacher of Physical Education and English in Würzburg, has for many years worked as a sport scientist, head coach, and strength and athletics coach in high-performance sports (basketball). Cognitive and perceptual abilities play a major role in sports performance, especially in game sports, and on many levels, particularly in technique and tactics. Hence, eye-tracking is receiving increasing attention in applied sports sciences research.

Kontakt / Contact

✉ richard.latzel@th-deg.de



Dipl.-Ing. (FH) Marc Philipp Dietrich, MBA

Marc Philipp Dietrich studierte Medientechnik mit Schwerpunkt Medieninformatik an der Technischen Hochschule Deggendorf, an der er auch seinen MBA absolvierte. Seit 2015 ist er dort wissenschaftlicher Mitarbeiter und promoviert seit 2018 an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Schwerpunktmäßig beschäftigt er sich mit Elektrookulografie, Braincomputing-Interfaces und Head-Mounted Devices.

Marc Philipp Dietrich studied Media Technology with the focus on Media Informatics at Deggendorf Institute of Technology, where he also received his MBA. He has been working as a research assistant at DIT since 2015. Since 2018, he is doing his doctorate at the Julius-Maximilians-University Würzburg. His research activities are focussed on electrooculography, brain computing interfaces and head-mounted devices.

Kontakt / Contact

✉ marc.dietrich@th-deg.de



Prof. Dr.-Ing. Marcus Barkowsky

Marcus Barkowsky promovierte 2009 am Lehrstuhl für Multimediakommunikation und Signalverarbeitung der Universität Erlangen-Nürnberg. Er forschte von 2010 bis 2018 an der Universität Nantes als Associated Professor an der Messung und Erhöhung von visuellem Komfort bei 3D Darstellungen. 2018 wurde er an die THD auf die Professur für Interaktive Systeme und Internet of Things berufen. Die Charakterisierung von Interaktionen in der Extended Reality mittels psychophysikalischen Methoden, sowie die Modellierung örtlicher und zeitlicher Effekte der menschlichen Perzeption bilden seinen Forschungsschwerpunkt. Aktuell ist er Mitvorsitzender der „Joint Effort Group Hybrid“ der Video Quality Experts Group (VQEG).

Marcus Barkowsky received the Dr. Eng. degree at the Chair of Multimedia Communications and Signal Processing of the University of Erlangen-Nuremberg in 2009. He subsequently joined the University of Nantes and was promoted to associate professor in 2010. In Nantes, he did research on measuring and improving the visual comfort of 3D displays. In 2018, he was appointed Professor of Interactive Systems and Internet of Things at Deggendorf Institute of Technology. His core research activities range from designing 3D interaction and measuring visual discomfort using psychometric measurements to the computational modeling of spatial and temporal effects of the human perception. He currently co-chairs the VQEG “Joint Effort Group Hybrid” activities.

Kontakt / Contact

✉ marcus.barkowsky@th-deg.de



Alexandra Glufke, M. A.

Alexandra Glufke M.A. studierte Allgemeine und Vergleichende Medienwissenschaft an der Universität Regensburg. Während ihres Studiums absolvierte sie ein Volontariat in Mediengestaltung. Seit 2011 ist Alexandra Glufke als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Hochschule Deggendorf in verschiedenen Forschungsprojekten mit dem Schwerpunkt Usability und User Experience tätig. Seit Mai 2018 ist sie wissenschaftliche Projektkoordinatorin des Forschungsprojekts „Dein Haus 4.0“.

Alexandra Glufke M.A. studied General and Comparative Media Studies at the University of Regensburg. During her studies, she completed a traineeship in media design.

Since 2011, Alexandra Glufke has been working as a research assistant at Deggendorf Institute of Technology in various research projects focusing on usability and user experience. Since May 2018, she has been the scientific coordinator of the research project “Dein Haus 4.0” (Your House 4.0).

Kontakt / Contact

✉ alexandra.glufke@th-deg.de



Angelika Stadler, M.Sc.

Angelika Stadler M.Sc. studierte Psychologie an der Freien Universität (FU) Berlin und Human Factors an der Technischen Universität (TU) Berlin. Seit 2017 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Weiterbildungszentrum der Technischen Hochschule Deggendorf.

Angelika Stadler M.Sc. studied Psychology at the Free University (FU) of Berlin and Human Factors at the Technical University (TU) of Berlin. She has been a scientific employee at the Further Education Center IQW of Deggendorf Institute of Technology since 2017.

Kontakt / Contact

✉ angelika.stadler@th-deg.de



Wolfgang Stern

Wolfgang Stern studierte Nachrichtentechnik an der Fachhochschule Regensburg. Zusätzlich erwarb er berufsbegleitend den Bachelor of Information Systems and Management sowie einen Master of Business Administration an der THD. Von 1998 bis 2001 war er in IT-Projekten der Deutschen Telekom tätig. Seit 2001 ist er an der Technischen Hochschule Deggendorf beschäftigt. Er leitet dort das Institut für Qualität und Weiterbildung (IQW). Als Institutsleiter verantwortet er die Bereiche Weiterbildung, Qualitätsmanagement und E-Learning sowie mehrere Projekte der Lehre. Im Nebenamt unterrichtete er als Lehrbeauftragter die Fächer Betriebssysteme und Wirtschaftsinformatik. Seit 2013 vertritt er die nichtwissenschaftlichen Mitarbeiter der Hochschule in Senat und Hochschulrat.

Wolfgang Stern studied Telecommunications Engineering at the University of Applied Sciences in Regensburg. In addition, he earned a Bachelor's degree in Information Systems and Management as well as a Master's degree in Business Administration at DIT while working full-time. He was engaged in IT projects at Deutsche Telekom AG from 1998 until 2001. Ever since 2001, he has been employed at DIT where he runs the Further Education Center IQW. As head of department he is responsible for several areas, including further training and development, quality management, E-learning, and multiple projects dedicated to teaching. Furthermore, he is a lecturer in operating systems and business informatics. Since 2013, he has been representing DIT's non-scientific staff in the senate and the council.

Kontakt / Contact

✉ wolfgang.stern@th-deg.de