
Literaturstudie zur
Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen

Dr. Peter Nickel



GAWO e.V.
Achterdiek 50
D – 26131 Oldenburg
<http://www.gawo-ev.de/>
peter.nickel@gawo-ev.de

Bonn, 25.05.2021

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	5
1	Literaturstudie	8
1.1	Zielsetzungen und Abgrenzungen	8
1.2	Hintergrund und relevante Konzepte, Inhalte	9
1.3	Konsequenzen für die Studie, Möglichkeiten und Grenzen	10
2	Methoden	12
2.1	Literaturrecherche	12
2.2	Definition der Fragestellung	12
2.3	Auswahl der Suchbegriffe	13
2.4	Auswahl der Datenbanken	13
2.5	Erarbeitung der Suchstrategie	14
2.6	Bewertung relevanter Literaturquellen	15
2.7	Beschaffung der Literatur	16
2.8	Dokumentation zur Fragestellung	16
3	Belastung durch Techniken der VR und durch Arbeiten in VE	17
3.1	Vorbemerkungen	17
3.2	Beurteilungen für den Arbeitsschutz	18
3.3	Physische Belastung und Wirkung auf Anthropometrie und Biomechanik	19
3.4	Psychische Belastung und Wirkung auf die Wahrnehmung von Informationen	22
3.4.1	Wirkung auf das auditive Sinnessystem	24
3.4.2	Wirkung auf das visuelle Sinnessystem	25
3.4.3	Wirkung auf das vestibuläre Sinnessystem	27
3.4.4	Wirkung auf das taktile Sinnessystem	32
3.5	Psychische Belastung und Wirkung auf das Verarbeiten von Informationen sowie das Umsetzen und Kontrollieren des Handelns	33
3.6	Psychische Belastung und Wirkung auf soziale Interaktionen	34
4	Weitere Erkenntnisse einzelner Studien	35
4.1	Relative Vergleichen zwischen VE und RE	35
4.2	Human Factors/ Ergonomie zu Techniken der VR und zu Arbeitsprozessen in VE	42
5	Strukturierte Analyse, Bewertung und Gestaltung von Techniken der VR und des Arbeitens in VE	49
6	Konsequenzen und Perspektiven für das weitere Vorgehen im Arbeitsschutz	52
7	Literaturverzeichnis	55

Zusammenfassung*

Die vorliegende systematische, qualifizierte Studie von Primär- und Sekundärliteratur beschreibt den aktuellen Stand der Erkenntnisse zum Thema "Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen." Inhaltlich werden virtuelle Räume bzw. virtuelle Umgebungen (VE) als computergestützt modellierte und simulierte dreidimensionale Umgebungen verstanden, die mit Techniken der virtuellen Realität (VR) entwickelt und präsentiert werden, und in die Personen zur Bearbeitung von Aufgaben eintauchen, ihr Vorstellungsvermögen anwenden und in der sie interagieren. Durch den Einsatz von Techniken der VR und die Nutzung von VE in Arbeitsprozessen, die der gesetzlichen Unfallversicherung unterliegen oder dadurch abgedeckt werden können, kommt es zur Belastung als Gesamtheit aller Einwirkungen aus Bedingungen eines Arbeitssystems auf Beschäftigte. Wenn die Belastung durch Techniken der VR und bei der Arbeit in VE spezifiziert werden kann, dann lassen sich nicht nur Unfallgefahren und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren bestimmen, potenzielle Beeinträchtigungen und Gefährdungen von Beschäftigten ermitteln, es können bei Bedarf auch Maßnahmen zur Risikoreduktion orientiert an der Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes abgeleitet werden.

Der Literaturbestand mit Bezug zu Techniken der VR und zu VE ist sehr umfangreich und wächst ständig weiter an. Die Literaturrecherche zum Thema der Literaturstudie mit gezielt abgeleiteten Suchabfragen in relevanten nationalen und internationalen wissenschaftlichen Datenbanken und weiteren Literaturbeständen führte zunächst zu über 6.000 potenziell geeigneten Literaturquellen. Nach dem Analysieren und Bewerten von Titeln, von Kurzfassungen und von Volltexten verblieben 155 Beiträge, die in der vorliegenden Ergebnisdokumentation der Literaturrecherche verarbeitet wurden (vgl. Kapitel 7 Literaturverzeichnis).

Aus der durchgeführten Literaturrecherche liegen relativ viele Studien zu Auswirkungen aus Aktivitäten bzw. Interaktionen in VE vor. Allerdings werden darin nicht immer Ursachen zu Auswirkungen untersucht und in den Studien werden mögliche Ursachen, z. B. Techniken der VR, Gestaltung der VE oder Interaktionen zu Aufgabenstellungen in VE oder im Vergleich zu RE nicht systematisch unterschieden. Nur relativ wenige Untersuchungen haben das Thema der vorliegenden Literaturrecherche explizit zum Gegenstand. Entsprechend lassen sich keine reliablen und validen Erkenntnisse zur Belastung durch den Einsatz von Techniken der VR und durch Arbeiten in VE (z. B. relativ zu RE) ableiten.

Die Recherchen ergeben allerdings sehr viele Hinweise zu bereits durchgeführten Studien und bieten indirekt auch Empfehlungen für das Gestalten von Techniken der VR und des Arbeitens in VE an. Die Ergebnisdokumentation zur Literaturrecherche stellt nach Vorbemerkungen zum Arbeitsschutzkontext sowohl Erkenntnisse als auch Erkenntnislücken zu physischen als auch psychischen Aspekten der Belastung vor. Ergebnisse aus einzelnen Studien werden zu relativen Vergleichen von VE und RE sowie zu Bewertungen aus Human Factors/ Ergonomie beschrieben und schließlich Strategien und Instrumente vorgestellt, mit denen ein Gestaltungszustand von VE umfangreicher eingeschätzt werden können soll. Abschließend werden Perspektiven für das weitere Vorgehen im Arbeitsschutz entwickelt.

Die Literaturrecherchen führten zu einem Human Factors-Konzept (vgl. Kapitel 1.3), das einen differenzierten Gestaltungsprozess zur systematischen Entwicklung von VE beschreibt. Das Konzept ist mit der Arbeitssystemgestaltung verbunden, reicht von Ziel- und Aufgabenanalysen bis hin zur Evaluation und erscheint geeignet um das Gestalten einer arbeitssicheren und gesunden Nutzung von VE im praktischen Arbeitshandeln zu fördern. Überraschend für den Arbeitsschutz ergaben die Recherchen keine Hinweise auf angewendete Risiko- oder Gefährdungsbeurteilungen für Techniken der VR oder das Arbeiten in VE (vgl. Kapitel 3.2). Einzelne Literaturquellen bieten allerdings

bereits grob strukturierte Empfehlungen und damit zunächst wenig detailliert beschriebene, aber relevante Inhalte für Beurteilungen. Erkenntnisse aus einzelnen Literaturquellen können diese Lücken füllen und ergänzend eingebunden werden.

Erkenntnisse zu physischen Aspekten der Belastung beziehen sich auf Themen der Anthropometrie und Biomechanik (vgl. Kapitel 3.3). Für das Gestalten von Anzeigen als Techniken der VR (z.B. Leinwandprojektion, HMD) sind z. B. Informationen einzubeziehen über das Blickfeld, über die Körpergröße und für das Arbeiten in VE erforderliche dynamische Kopf- und Körperbewegungen des Menschen. Darüber hinaus sind auch z. B. Form und Gewicht von Steuerungsgeräten als künstlicher Ersatz für menschliche Gliedmaßen sowie von HMDs an die Voraussetzungen jeweils betroffener Benutzerinnen und Benutzer sowie die jeweils geplanten Arbeiten in VE auszurichten. Dadurch sollen nicht nur Beeinträchtigungen und Gefährdungen vermieden werden. Ist das Ziel von Arbeiten in VE die Vergleichbarkeit zu RE, dann darf der Einsatz von Techniken der VR natürliche Verhaltensweisen nicht beeinflussen. Hat das Arbeiten in VE dagegen den Charakter eines Werkzeuges, dann müssen durch die Gestaltung der Interaktionsprozesse spezifisch für VE anthropometrische und biomechanische Beeinträchtigungen und Gefährdungen abgewendet werden.

Sehr umfangreich sind die Erkenntnisse zu psychischen Aspekten der Belastung, wenn sie auch, gemessen an ihrer Bedeutung für die Modellierung und Simulation von VE, sehr viele Lücken aufweisen (vgl. Kapitel 3.4, 3.5, 3.6). Die Darstellung zur psychischen Belastung folgt dem Prozess der Informationsverarbeitung des Menschen von der Wahrnehmung über das Denken bis hin zur Handlungsumsetzung und schließt darüber hinaus Wirkungen auf soziale Interaktionen ein. Bei Techniken der VR und Arbeiten in VE dominiert die psychische Belastung mit Wirkungen auf das visuelle Sinnessystem. Grundsätzlich sind zunächst alle Anforderungen an eine Gestaltung von Aufgaben-, Interaktions- und Informationsschnittstellen aus Human Factors/ Ergonomie auch in VE gültig. Diese werden mittlerweile durch weitere spezifische Anforderungen an die Gestaltung von Techniken der VR und des Arbeitens in VE ergänzt. Sie beziehen sich z. B. auf die Gestaltung des Blickfeldes beim Einsatz von HMDs zur Visualisierung und auf besondere Anforderungen zur visuellen Tiefenwahrnehmung.

Die psychische Belastung wird durch Ansprache auch weiterer Sinnesmodalitäten in einer VE beeinflusst. Weitere Sinnesmodalitäten fördern in der Modellierung und Simulation dynamischer VE ein realitätsnahes Erleben und Verhalten in Arbeits- und Lebenswelten. So können zur visuellen hinzugefügte auditive Modellierungen das Präsenzepfinden steigern und ähnlich wie in natürlichen Arbeitssituationen von einer Aufgabenbearbeitung ablenken oder soziale Interaktionen unterstützen. Auch in einer VE bestimmen z. B. Schalldruckpegel, Tonqualitäten und Geräuschkonstanten über die psychische Belastung mit.

Informationen bezogen auf das vestibuläre Sinnessystem nehmen einen großen Raum ein, da das Gestalten von VE unerwünschte psychosomatische Effekte visuell induzierter Bewegungskrankheit bei der Betrachtung elektronischer Bilder reduzieren muss. Erklärungsversuche für Symptome und Empfehlungen zur Gestaltung sind umfangreich vorhanden und erste erfolgversprechende Strategien zur Information einer Gefährdungsbeurteilung sind in den Literaturquellen enthalten. Da viele der recherchierten Studien lediglich Symptome zu Beeinträchtigungen berichten, bleiben verursachende Bedingungen vage und werden nicht systematisch aufgearbeitet, z. B. nach bestimmten Techniken der VR, Gestaltungslösungen für VE oder Interaktionserfordernissen während des Arbeitens in VE.

Ebenfalls vorhanden sind einige Erkenntnisse zur Gestaltung von direkten Interaktionen und haptischen Eingabegeräten in VE. Dabei wirkt die psychische Belastung vorrangig auf das taktile Sinnessystem und wird im Prozess der Informationsverarbeitung bei der Handlungsumsetzung und -kontrolle offensichtlich. So stehen etwa Gestaltungsempfehlungen für Techniken der VR zur

Reduzierung von Hitzebelastung zur Verfügung und es können Empfehlungen aus Studien zum Einsatz von haptischen Interaktionsgeräten für Beurteilungen im Arbeitsschutz abgeleitet werden.

Einschränkungen durch Techniken der VR und damit in VE führen aktuell noch meist dazu, dass lediglich Einzelpersonen in VE interagieren können. Das steht im Widerspruch zur Realität, in der häufig mehrere Personen miteinander in einem Arbeitssystem interagieren. In der Konsequenz gibt es auch nur wenige Studien, die psychische (psychosoziale) Belastung durch Gestaltungslösungen mit Techniken der VR und durch soziale Kommunikations- und Interaktionsprozesse zwischen Personen in VE untersuchen. Dennoch konnten wenige Literaturquellen mit Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen zur psychischen Belastung mit ihren Wirkungen auf soziale Interaktionen berichtet werden.

Einige Studien der Literaturrecherche befassen sich mit Vergleichen von VE und RE (*vgl. Kapitel 4.1*). Sie werden hier vorgestellt, um daraus Erkenntnisse und Hinweise zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit, aber auch zur Belastung durch Techniken der VR sowie in VE im Vergleich zu RE abzuleiten. Ein Fazit dazu ist zunächst ernüchternd, da nur von einer begrenzten Übereinstimmung zwischen VE und RE ausgegangen werden kann. Leider werden zu wenige Untersuchungsstrategien eingesetzt, die eine mögliche Vergleichbarkeit reliabel und valide überprüfen lassen. Es entstand darüber hinaus der Eindruck, dass mit ansteigender Anzahl von Studien auch mehr Studien ihre Ergebnisse unkritisch, ohne Nachweis und ungerechtfertigt, aber dennoch selbstverständlich auf reale Arbeitssituationen generalisieren. Dennoch können aus den hier ausgewählten und vorgestellten Studien bei methodenkritischer arbeitswissenschaftlicher Betrachtung auch Hinweise und Erkenntnislücken entnommen werden, die für eine Abschätzung der Belastung und für die Entwicklung von Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen im Kontext hilfreich erscheinen.

Die Literaturrecherche identifizierte darüber hinaus Studien, die sich der Belastung von Techniken der VR und von Arbeiten in VR explizit im Kontext von Human Factors/ Ergonomie und des Arbeitsschutzes annahmen (*vgl. Kapitel 4.2*). Daraus stehen nicht nur Strategien zur Analyse, Bewertung und Gestaltung von Techniken der VR und von Arbeiten in VE zur Verfügung. Mit den Literaturquellen werden auch Gestaltungskonzepte vorgestellt und umfangreich Erkenntnisse zu belastungsoptimierenden Gestaltungsanforderungen und -empfehlungen geboten.

Im abschließenden Kapitel der Dokumentation zu Rechercheergebnissen werden schließlich Strategien, Methodensammlungen und Konzepte zur allgemeinen Bewertung von Techniken der VR und der Nutzung von VE vorgestellt (*vgl. Kapitel 5*). Darin enthalten sind natürlich nicht nur Anforderungen und Empfehlungen zur Gestaltung, sondern auch Inhalte, die in Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen genutzt werden können und insgesamt zur Vermeidung oder zumindest Reduzierung von beeinträchtigenden Folgen der Beanspruchung und Gefährdungen durch Techniken der VR und Arbeiten in VE beitragen.

Zusammenfassend liegen damit bereits sehr umfangreich Erkenntnisse zur Belastung bei Arbeiten in virtuellen Räumen vor. Diese Erkenntnisse sind über die vorgestellten Studien verstreut, noch nicht nach gewünschten Bewertungskategorien systematisiert und müssen jeweils methodenkritisch betrachtet werden, bevor sie für einen intendierten Einsatzzweck zusammengestellt werden. Gleichzeitig werden damit auch viele Erkenntnislücken offensichtlich, die im vorliegenden Kontext des Arbeitsschutzes zweckgerichtet und selektiv aufgegriffen werden sollten. Für das weitere Vorgehen werden abschließend Strategien und Handlungsempfehlungen für die weitere Verwendung der Ergebnisdokumentation zur Literaturrecherche vorgestellt (*vgl. Kapitel 6*).

* [Quellenangaben zu Inhalten der Zusammenfassung befinden sich in den nachfolgenden Kapiteln.]

1 Literaturstudie

1.1 Zielsetzungen und Abgrenzungen

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine qualifizierte wissenschaftliche Literaturstudie auf der Basis von deutsch- und englischsprachiger Primär- und Sekundärliteratur zu Thema "Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen". Neben einer Beschreibung des Erkenntnisstandes aus der Literatur wird das Ziel verfolgt die genannten Komponenten des Themas (hier insbesondere Belastung, Arbeit, virtueller Raum) miteinander in einen inhaltlichen Zusammenhang zu stellen. Dabei sollen Hinweise zur Gestaltung von Arbeiten in virtuellen Welten bezogen auf das Konzept eines Arbeitssystems aus der Human Factors und Ergonomie aufgezeigt werden etwa nach Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel und Arbeitsumgebung und es sollen Schlussfolgerungen für die betriebliche Praxis dargestellt und mögliche Erkenntnislücken für einen arbeitssicheren und gesunden Einsatz von virtuellen Räumen im praktischen Arbeitshandeln aufgedeckt werden.

In diesem Kontext wird unter Belastung die Gesamtheit aller Einwirkungen aus Bedingungen eines Arbeitssystems auf Beschäftigte verstanden (DIN EN ISO 6385:2016, DIN EN ISO 10075-1:2018). Mit dem Fokus auf den Arbeitskontext werden bewusst nicht alle Einsatzsituationen von Aktivitäten in virtuellen Räumen einbezogen. Sie werden stattdessen gezielt auf Aktivitäten begrenzt, die der gesetzlichen Unfallversicherung unterliegen oder dadurch abgedeckt werden können. Somit sind etwa Planungen von Arbeitsbereichen in virtuellen Umgebungen (VE) in einem Unternehmen (z. B. Büro, Montageplatz, Fertigungshalle, Baustelle, Serviceszenario) und die Entwicklung und Nutzung von Techniken virtueller Realität (VR) durch Studierende in einer Schulveranstaltung einbezogen. Hier nicht einbezogen werden private Anwendungen im Rahmen einer spielerischen Nutzung von virtuellen Räumen während Freizeitaktivitäten, einer mit Techniken der VR unterstützten privaten Begehung eines durch einen Architekten geplanten Eigenheims, einer Nutzung von virtuellen Umgebungen zu therapeutischen Zwecken oder einem anderen privaten Einsatz von Techniken der VR oder von VE.

Als virtuelle Räume bzw. Umgebungen (engl. virtual environments, VE) werden hier computergestützt modellierte und simulierte dreidimensionale Umgebungen verstanden, die mit Techniken der virtuellen Realität (engl. virtual reality, VR) entwickelt und präsentiert werden, und in die Personen zur Bearbeitung von Aufgaben eintauchen, ihr Vorstellungsvermögen anwenden und darin interagieren (vgl. Burdea & Coiffet 2022, s. a. Hale & Stanney 2015, Stanney & Cohn 2012). In Studien aus der Literatur werden neben VE auch natürliche Umgebungen (engl. real environments; RE) betrachtet, wobei diese dann häufig als Vorbilder zur Gestaltung von VE dienen oder als Referenz zum Vergleich mit VE herangezogen werden. Mit den Erläuterungen zu Techniken der VR und zu VE soll auch deutlich werden, dass beispielsweise einige so genannte virtuelle Räume zur Veranstaltung von Internet-, Video- oder Telefonkonferenzen oder gelegentlich als VR oder VE titulierte monoskopische oder stereoskopische Darstellungen durch Präsentation von 360 °-Fotos (z.B. virtueller Rundgang im Deutschen Museum) nicht in der oben beschriebenen Definition von Techniken der VR und von VE eingeschlossen und auch nicht in diese Literaturrecherchen einbezogen sind. Ebenso unbeachtet bleiben vereinzelte Umschreibungen zu Virtualität i.S.v. Subjektivität, Fiktion oder Spiritualität, da sie über eine arbeitswissenschaftliche Betrachtung mit Bezug zum Arbeitsschutz hinausgehen.

Unter Techniken der VR werden häufig vereinfacht unterschiedliche Einsatzkonstellationen von 3D-Techniken zur Modellierung und Simulation zusammengefasst (z. B. virtuelle, gemischte oder erweiterte Realität: virtual reality, VR; mixed reality, MR; augmented reality, AR). Auch wenn teilweise ähnliche Softwaresysteme, Visualisierungssysteme und Anzeigeprinzipien für VR, MR und AR (häufig gemeinsam als XR bezeichnet) genutzt werden können, unterscheidet sich die Belas-

tungs- und Beanspruchungsseite während der Entwicklung und Nutzung. Es unterscheiden sich Einwirkungen auf und Auswirkungen bei Beschäftigten bereits allein durch eine realisierte Gestaltung der für die Informationsverarbeitung des Menschen durch ein variierendes Mischverhältnis und einen Wechsel in Überlagerungen von künstlich modellierten und natürlichen Bestandteilen der Arbeitsumgebung bezogen auf multimodale Angebote an realen oder realitätsnahen Informationen, erforderlichen Verarbeitungs- und Vergleichsprozessen sowie jeweils gebotenen Möglichkeiten für Handlungsumsetzung und -kontrolle.

Über die letzten Jahre kann beobachtet werden, dass in wissenschaftlich orientierten Publikationen auf eine Abgrenzung der Techniken bzw. XR-Varianten und ihre zugehörigen Anwendungen hingearbeitet wird. Gleichzeitig wird auch versucht Synergieeffekte der XR-Varianten bezogen beispielsweise auf die Softwareentwicklung zu generieren. Die vorliegende Literaturstudie schließt vorrangig mithilfe von Techniken der VR entwickelte gemischte oder virtuelle Umgebungen (VE) ein. Techniken der AR werden in der vorliegenden Literaturstudie nicht näher betrachtet, da sich Literaturquellen, Funktions- und Wirkungsweisen auf den Menschen und Einsatzszenarien meist deutlich von denen zu Techniken der VR unterscheiden.

1.2 Hintergrund und relevante Konzepte, Inhalte

Die Literaturstudie bezieht sich im engeren Sinne auf die Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen und somit auf Einwirkungen auf eine Person, die in eine virtuelle Umgebung eintaucht, sich ihre künstlich modellierte Umgebung als neue vorstellen kann, darin interagiert und dabei Techniken der VR verwendet (Burdea & Coiffet 2022). Im Vorgriff auf die Ergebnisse der Literaturrecherchen gibt es nur relativ wenige Untersuchungen, die solche Auswirkungen explizit zum Gegenstand haben und aus denen sich tatsächlich valide und reliabel Hinweise zur Belastung durch den Einsatz von Techniken der VR und durch VE ableiten lassen (etwa zu vergleichbaren Aktivitäten in realen Umgebungen).

Relativ viele Studien liegen dagegen vor, in denen Auswirkungen aus Aktivitäten bzw. Interaktionen in VE berichtet werden. Dabei kann aber nur selten unterschieden werden, welcher Anteil durch Techniken der VR oder Interaktionen in VE zu Aufgabenstellungen oder weiteren Zielsetzungen in einem Thema hervorgerufen wird. Bei der Beurteilung von Auswirkungen müsste differenziert werden zwischen den spezifizierten Konstellationen von Techniken der VR (z.B. Visualisierung über eine Leinwandprojektion oder ein HMD (head-mounted display, VR-Brille)), zwischen spezifizierten Arbeitsaufgaben in VE (z.B. Eigenbewegung versus Teleportieren, Schalterbetätigung mit Hand oder Controller, Gefährdungsbeurteilung in unterschiedlichen Arbeitsszenarien) und zwischen solchen Aufgabenstellungen in RE (im Kontrast zu VE). So differenzierte Studien konnten durch die Recherchen nicht ermittelt werden. Das kann allerdings nicht als Hinweis darauf gewertet werden, dass solche Studien oder so differenzierte Aussagen nicht aus Studien abgeleitet werden können. Einerseits könnten solche Studien im Rahmen von Abschlussarbeiten durchgeführt worden sein, wurden dann aber in der vorliegenden Literaturrecherche nicht identifiziert. Andererseits erfordern solche Studien ein methodisch aufwändigeres und damit mehr Zeit, Probanden und Kosten verursachendes Versuchsdesign.

In der meist einfachen Variante, in der Auswirkungen aus Aktivitäten bzw. Interaktionen ermittelt werden, werden VE als Simulationsumgebungen zur Untersuchung von Fragestellungen genutzt. Techniken der VR oder VE dienen dann also als Mittel zum Zweck. Einige Studien ermitteln z. B. Greifräume am virtuellen Arbeitsplatz in VE oder Sicherheitsregeln in einem Arbeitsszenario in VE

sollen erlernt werden, ohne dabei auf mögliche Unterschiede in Arbeitsbedingungen und im Verhalten zwischen virtuellen und realen Umgebungen einzugehen. In solchen Studien scheint es als sollte der Zweck die Mittel heiligen.

Auswirkungen von VE können daher häufig nur implizit aus den Untersuchungen abgeleitet werden. Durch die Ergebnisse solcher Untersuchungen kann meist nicht unterschieden werden, ob Auswirkungen auf die Personen durch die virtuellen Räume als solche oder eine gezielte Variation in Untersuchungsszenarien zustande gekommen sind. Auswirkungen sind dann überlagert oder konfundiert. Handelt es sich bei diesen Untersuchungen um Simulationsstudien, bleibt unklar, ob und inwieweit die ermittelten Erkenntnisse auch ohne virtuelle Welten in der Realität zuverlässig (reliabel) und gültig (valide) sind. Wenn sich Ergebnisse aus letzteren Untersuchungen für die Zielsetzung der Literaturstudie als relevant erweisen, dann werden sie berichtet. Besonderes Interesse kann sich zusätzlich dadurch ergeben, dass Hinweise zu aktuellen Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung oder des Einsatzes virtueller Räume deutlich werden, die als Empfehlungen für eine betriebspraktische Nutzung hilfreich sein könnten.

Soweit notwendig und möglich wird auch unterschieden zwischen virtuellen Räumen als Arbeitsmittel bzw. Werkzeug (z. B. Techniken der VR) und virtuellen Räumen als Arbeitsumwelt, Nutzungskontext bzw. virtueller Umgebung (z. B. VE) als Bestandteil eines Arbeitssystems (DIN EN ISO 6385:2016). Dadurch kann auch die Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen für unterschiedliche Gruppen von beteiligten Personen unterschieden werden. Diejenigen, die virtuelle Räume programmieren und sie währenddessen nutzen, im Vergleich zu andere Personen, die sie in einem anderen Kontext nutzen ohne sie zu programmieren. Letztere Zielgruppe als Nutzer von VE erscheint im vorliegenden Kontext von besonderer Bedeutung. Abhängig vom Einsatzzweck und der Relevanz unterschiedlicher Arbeitsbedingungen für die Arbeitsaufgabe kann sich somit die Belastung für einzelne Personengruppen und sollten sich die Präventionsmaßnahmen unterscheiden.

1.3 Konsequenzen für die Studie, Möglichkeiten und Grenzen

Durch den Einsatz von Techniken der VR und die Nutzung von VE kommt es für verschiedene Personengruppen wegen ihrer jeweiligen Arbeitsaufgaben zu einer unterschiedlichen Belastung. Im Wesentlichen sind zwei Personengruppen zu unterscheiden: Benutzer und Benutzerinnen von VE und Personen, die Software für Techniken der VR nach Vorgaben für einen Nutzungskontext programmieren. Die Belastungssituation der Programmiererinnen und Programmierer unterscheidet sich kaum von Programmiererinnen und Programmierern, die nicht mit Techniken der VR arbeiten. Unterschiede zur letztgenannten Gruppe können sich ergeben durch gelegentliches Testen von Entwürfen und Anwendungen, in denen sie dann kurzzeitig in eine ähnliche Situation wie Benutzer und Benutzerinnen einer VE kommen.

Orientiert an der Struktur eines Arbeitssystems (DIN EN ISO 6385:2016, Schmidtke 2011) umfasst die Belastungssituation für hinreichend qualifizierte Benutzer und Benutzerinnen von VE einen Arbeitsplatz in einer Arbeitsorganisation, an dem sie mithilfe von Arbeitsmitteln in einer Arbeitsumgebung Arbeitsaufgaben bearbeiten. Es geht bei der Belastung in VE somit nicht nur um die Techniken der VR an sich, sondern auch um Anforderungen, die sich auf weitere Dimensionen eines Arbeitssystems neben der Dimension Arbeitsmittel beziehen. Durch den Einsatz von Techniken der VR und die Aufgabenbearbeitung in VE unterscheidet sich die Belastungssituation von der eines Arbeitssystems außerhalb einer Simulationsumgebung.

Für eine zweckgerichtete ergonomische und menschengerecht gestaltete VE förderlich ist zunächst ein Human Factors-Konzept zur strukturierten Entwicklung von VE (Wilson 1997, 1999, Wilson et

al. 2002, Eastgate et al. 2015). Das Konzept wurde ursprünglich für die Entwicklung von Trainings entwickelt, die mit Techniken der VR ergänzt werden, ist aber auch für weitere Anwendungsbereiche von VE geeignet und beinhaltet nachfolgende Entwicklungsstufen zu denen jeweils Anforderungen an die VE und die dafür angemessenen Techniken der VR ausgearbeitet und abgeglichen werden können (vgl. Nickel et al. 2019).

- Projektdefinition (Ziel bzw. Projektaufgabe, Beschreibung, Beteiligte, Möglichkeiten und Grenzen) basierend auf Dokumentationen und Interviews zu konkreter Anwendung und Zielsetzung der VE.
- Anforderungsanalysen (Analysen von Teilaufgaben und Nutzern) basierend auf hierarchischer Aufgabenanalyse und Personas.
- Spezifikationen (Arbeitsszenarien, Storyboards) basierend auf Dokumentationen und Interviews.
- Konzeptdesign (Grundlagenwissen, Szenarienwahl, Mensch-System-Interaktion in VE, Trainingsunterlagen, Reflexionen) basierend auf Dokumentationen und Diskussionen.
- Programmierung für Techniken der VR und von VE (Modellierung, Funktionen, Zusammenhänge) basierend auf Softwareentwicklungsprozess und Usability Studien.
- Umsetzung (von Anwendung und Zielsetzung) basierend auf Beobachtungen, Arbeitsproben und Interviews.
- Evaluation (Untersuchung von Lerneffekten) basierend auf Workshops, Befragungen und Erfassungen zur konkreten Zielerreichung.

Die Entwicklung einer VE nach dem Human Factors-Konzept sollte in einem Projektteam erfolgen, in dem Personen mit Expertise aus Human Factors/ Ergonomie zum Arbeitshandeln und zur Arbeitsanalyse, -bewertung, -gestaltung und -evaluation sowie aus der Softwareprogrammierung beteiligt sind. Weitere Experten müssen zumindest phasenweise während des Prozesses der strukturierten Entwicklung einbezogen werden (z. B. DGUV Information 215-450:2021).

Nach Festlegung der Projektziele mit Bezug zu zentralen Aufgabenstellungen für die Benutzungspopulation sowie auch weiteren Beteiligten werden Analysen zu Teilaufgaben und zugehörigen Benutzergruppen durchgeführt und dokumentiert. Aus letzterem wird die jeweilige Belastung offensichtlich etwa aus den geplanten Arbeitsaufgaben in der VE, zeitlichen Expositionen in VE und Mensch-System-Interaktionen in der VE (z. B. Erprobung einer in VE simulierten Leitzentrale zum Objektschutz eines Sicherheitsdienstleisters). Im weiteren Verlauf der Entwicklung werden für die VE angemessene Techniken der VR ausgewählt, wodurch sich die Belastung durch die eingesetzte Hardware bzw. die Arbeitsmittel in der VE ergibt (z. B. Visualisierung in VE über HMDs und Steuerungsaktivitäten von Interaktionen in der VE mithilfe von VR-Controllern). Nach der programmtechnischen Einbindung verschiedener Arbeitsmittel und Umsetzung der VE können die aus der Belastungssituation resultierenden Auswirkungen ermittelt und bewertet werden. Bereits vorhandene Erkenntnisse zu Auswirkungen der Gestaltung von VE können sowohl bei der Auswahl von Techniken der VR als auch bei Programmierungen zur VE bereits berücksichtigt werden.

2 Methoden

2.1 Literaturrecherche

Zu Literaturrecherchen geben verschiedene Fachdisziplinen und -verbände (z. B. American Psychological Association, APA) Standards und Empfehlungen, die sich auf spezifische Analysemethoden (z. B. Metaanalyse) oder auf ähnliche und allgemein gebräuchliche Bearbeitungsschritte für systematische Literaturanalysen beziehen. Für letztere wird mit Prisma [Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; www.prisma-statement.org] auf ein umfangreich dokumentiertes Beispiel aus den Lebenswissenschaften verwiesen. Diese Bearbeitungsschritte werden in speziellen Verfahren für Reviews (z. B. Scoping Review; von Elm et al. 2019) und auch in der vorliegenden systematischen Literaturrecherche aufgegriffen (siehe Abb. 1) und beziehen sich auf:

- Definition der Fragestellung
- Auswahl der Suchbegriffe
- Auswahl der Datenbanken
- Erarbeitung der Suchstrategie
- Bewertung relevanter Literaturquellen
- Beschaffung der Literatur
- Dokumentationen zur Fragestellung

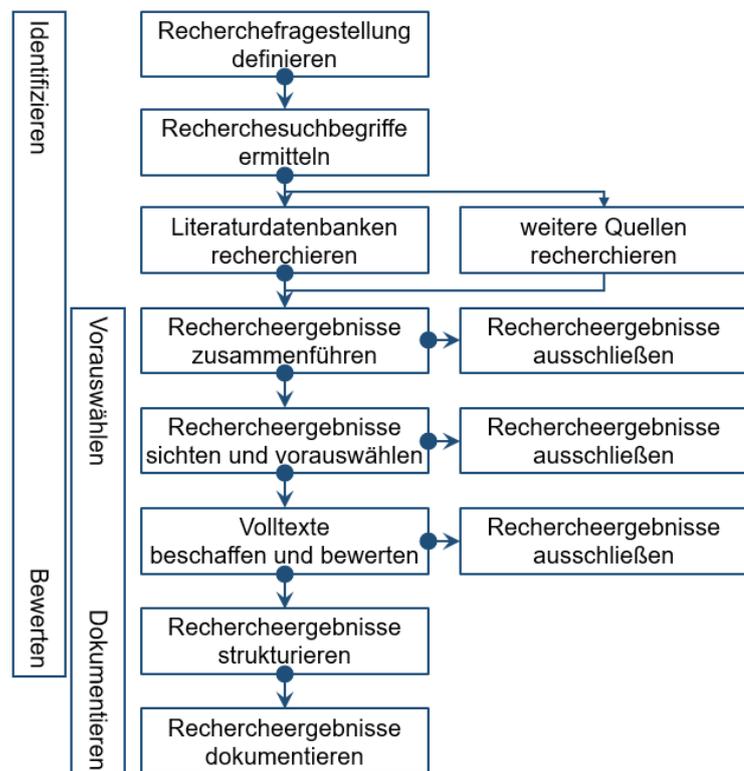


Abb. 1: Bearbeitungsschritte einer systematischen Literaturrecherche (orientiert an Prisma).

2.2 Definition der Fragestellung

Die vorliegende systematische Literaturrecherche geht der Frage der "Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen" nach. Das Ziel der Recherche ist es, den Erkenntnisstand zur Fragestellung zusammenzutragen, Hinweise zur Gestaltung von Arbeiten in virtuellen Welten zu ermitteln, einige Schlussfolgerungen für die betriebliche Praxis aufzuzeigen und mögliche Erkenntnislücken aufzudecken. Der Fokus für die Recherchen bezieht sich auf die Besonderheiten des Arbeitens in virtuellen Umgebungen (z. B. im Kontrast zu realen Umgebungen), insbesondere verursacht durch eine in VE leicht abgewandelten Aufgabenstellung (im Kontrast zu RE, z. B. für das Bestücken eines Bauteils in Kollaboration mit einem Roboter), unter durch VE geänderten Bedingungen zur Bearbeitung der Aufgaben (z. B. Gefährdungsbeurteilung für geplante reale Tätigkeiten mithilfe eines virtuellen oder eines realen Arbeitsplatzmodells) einschließlich des in VE (zusätzlich) erforderlichen Einsatzes von Techniken der VR (z. B. Steuerungseingaben auf einem Touchpad mithilfe eines VR-Controller versus des eigenen Fingers).

2.3 Auswahl der Suchbegriffe

Als Suchbegriffe ergaben sich zunächst Worte der Fragestellung und schlossen sowohl deutsch- als auch englischsprachige Begriffe ein. Dabei wurden Synonyme und konzeptionell naheliegende oder ähnliche Begriffe einbezogen (z. B. Beanspruchung, Stress). Darüber hinaus wurde durch Probelaufe in einschlägigen Datenbanken deutlich, dass Effekte von virtuellen Umgebungen auf den Menschen in Studien aus dem Kontext des Arbeitsschutzes oder Human Factors/ Ergonomie zu finden sind, ohne dass dabei "Belastung" oder ähnliche Begriffe in den zugrundeliegenden Dokumenten verwendet wurde.

Da englischsprachige Begriffe nicht direkt aus den deutschsprachigen Begriffen übersetzt werden können und teilweise auch von ihrer Bedeutung andere Konzepte abdecken (z. B. work load, task load, operator load, human performance), musste der Suchbereich deutlich erweitert werden. Ähnliche Konsequenzen für die Suchbegriffe ergaben sich bei den virtuellen Räumen, die sich entweder in virtueller Realität, virtuellen Welten wiederfinden oder auch hinter stereoskopischen Projektionen und Visualisierungen (z. B. CAVE, HMD) verstecken können. Die gewählten Suchbegriffe sind in den Suchstrings bei der Erarbeitung einer Suchstrategie aufgeführt.

2.4 Auswahl der Datenbanken

Die Auswahl potenziell relevanter Datenbanken ist für die Fragestellung der Literaturrecherche sehr groß, da verschiedene Disziplinen zu relevanten Erkenntnissen beitragen oder aber Studien in virtuellen Räumen verschiedener Anwendungsgebiete durchgeführt werden können (z. B. Psychologie, Informatik, Ergonomie, Wirtschaftswissenschaften). Darüber hinaus sind nicht alle potenziell relevanten deutschsprachigen Studien in internationalen Datenbanken vertreten.

Dadurch wurden zunächst Recherchen in folgenden Datenbanken mit vorrangig deutschsprachigem aber auch englischsprachigem Inhalt durchgeführt:

- Bibliothekskatalog der BAuA
- Bibliothekskatalog der DGUV
- KVK (Karlsruher Virtueller Katalog Deutschland)
- Livivo (ZB MED - Leibniz-Informationszentrum Lebenswissenschaften)
- PubPsych (Internationale Psychologie-Publikationen)
- TIB-Portal (Technische Informationsbibliothek Hannover)

[<https://uv-net.dguv.de/personal/dguv-hochschule/wissensmanagement/recherche-im-internet/index.jsp>]

Für inhaltlich umfangreiche Recherchen wurden folgende internationale Datenbanken mit englischsprachigen und auch einigen anders sprachigen wissenschaftlichen Texten genutzt. Rechercheergebnisse ergaben sich aus den folgenden Datenbanken:

- ACM Full-Text Collection
- APA PsycArticles
- APA PsycInfo
- IEEE Xplore Digital Library
- MEDLINE

- NASA Technical Reports
- PSYINDEX Literature with PSYINDEX Tests
- ScienceDirect
- Springer Nature Journals

Für die Recherche in internationalen Datenbanken wurde das kommerzielle Suchportal der EBSCO Information Services (USA; Regional Office Berlin: EBSCO Information Services GmbH) verwendet, das auch von vielen Hochschulen in Deutschland für Recherchen bezogen wird. Neben der Recherche in einzelnen internationalen Datenbanken bietet EBSCO den Service, dass auf verschiedene (auch nicht EBSCO-eigene) Datenbanken mit Suchanfragen zugegriffen werden kann und Duplikate in Suchergebnissen leichter identifiziert und eliminiert werden können.

2.5 Erarbeitung der Suchstrategie

Die Suchstrategie für die vorliegende Recherche orientierte sich am üblichen Vorgehen, nach dem zunächst mit Zeichenketten von Stichworten und Operationen Abfragen formuliert werden. Die Abfragen werden soweit verfeinert, bis sie zu inhaltlich relevanten Literaturquellen führen, die auch nach ihrer Anzahl noch weiterbearbeitet werden können. Diese Ergebnislisten von Literaturquellen werden anschließend nach ihrem Titel auf Relevanz für die Fragestellung bewertet. Bei Literaturquellen mit potenziell relevanten Titeln wird jeweils anschließend auch das Abstract auf Relevanz bewertet. Alle so ausgewählten Literaturquellen werden dann im Volltext gesichtet, ggf. weiter selektiert und Erkenntnisse aus verbleibenden Quellen dokumentiert.

Die vorliegende systematische Literaturrecherche geht der Frage der "Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen" nach. Dadurch sollen der Erkenntnisstand aus der Literatur beschrieben, Hinweise zur Gestaltung von Arbeiten in virtuellen Welten ermittelt, Schlussfolgerungen für die betriebliche Praxis aufgezeigt und mögliche Erkenntnislücken aufgedeckt werden. Über das Suchportal der EBSCO Information Services wurden Recherchen mit zwei verschiedenen Zeichenfolgen durchgeführt.

Mithilfe der Zeichenfolge

{("virtual reality" OR "virtual environment") AND health AND safety}

konnten insgesamt 1.966 Literaturquellen aus den Jahren zwischen 1992 und 2021 identifiziert werden. Von diesen Quellen waren 1.840 Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften, 55 Bücher, 41 Konferenzmaterialien und die übrigen verteilten sich auf Dissertationen, Abschlussarbeiten und Berichte.

Mithilfe der Zeichenfolge

{[("virtual reality" OR "virtual environment") AND (load OR demand OR effort OR fatigue) TX Gesamter Text] AND ["virtual reality" OR "virtual environment" AB Abstract]}

konnten insgesamt 3.517 Literaturquellen aus den Jahren zwischen 1990 und 2020 identifiziert werden. Hierzu wurde zwar keine Aufteilung der Quellen nach Publikationsarten ausgewiesen, allerdings handelt es sich in den allermeisten Fällen wiederum um Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften und nun gefolgt von Konferenzmaterialien und weiteren Quellen (z. B. Bücher, Dissertationen, Abschlussarbeiten und Berichte).

Begriffe wie z. B. "stress" oder nur "virtual" wurden in den Zeichenfolgen nicht berücksichtigt, da dadurch die Literaturquellen um ein Vielfaches anstiegen. In Literaturrecherchen werden fünfstellige und üblicherweise bereits vierstellige Zahlen für identifizierte Literaturquellen weiter reduziert, bevor sie an nachfolgende Bearbeitungsschritte übergeben werden. Der Begriff "stress" bzw. "work stress" ist zwar eine der offiziellen englischsprachigen Bezeichnungen für Belastung bzw. Arbeitsbelastung (DIN EN ISO 10075-1:2018). Mit diesem Begriff wird aber im Alltagsgebrauch und in einigen Fachdisziplinen sehr unspezifisch auf mögliche beeinträchtigende Auswirkungen von Arbeits- und Lebensbedingungen hingewiesen. Zu letzterem gab es sehr viele Literaturquellen, von denen dann wiederum ein Großteil nicht die Fragestellung der Literaturrecherche adressierten. Die Nutzung des Begriffs "virtual" ohne weitere Zusätze bezieht ebenso mittlerweile alle möglichen nicht realen, nur gedachten, angenommenen, vorgestellten oder digital vermittelten Umstände ein, die nicht im Fokus der vorliegenden Literaturrecherche stehen. Nur durch eine Kombination als "virtual reality" bzw. "virtual environment" konnte mit höherer Treffsicherheit ein Bezug zu Techniken der VR und zu VE hergestellt werden.

Zur Suchstrategie gehören auch Recherchen in genannten deutschsprachigen Datenbanken. Insgesamt 537 Literaturquellen konnten aus diesen Datenbanken mit folgenden Zeichenfolgen identifiziert werden:

```
{("virtuelle Realität" OR "virtuelle Welt" OR "virtuelle Umgebung") AND (Arbeitsschutz OR Gesundheitsschutz OR Arbeitssicherheit)}
```

sowie

```
{("virtuelle Realität" OR "virtuelle Welt" OR "virtuelle Umgebung") AND (Belastung OR Beeinträchtigung OR Auswirkung OR Effekt)}
```

Aus Recherchen in Datenbanken standen damit insgesamt 6.020 Literaturquellen zur Verfügung. Als weiterer Teil der Suchstrategie wurden bereits vorhandene Literaturbestände des Autors dieser Literaturrecherche zu "virtual reality" bzw. "virtual environment" durchgesehen.

2.6 Bewertung relevanter Literaturquellen

Nach Ausschluss doppelter Nennungen und einer Bewertung der Titel reduzierte sich die Anzahl auf 189 relevante Literaturquellen. Diese deutliche Reduzierung ergab sich durch das breite Ergebnisspektrum, das sich trotz enthaltener Stichworte um viele Titel reduzierte, die sich mit anderen Fragestellungen oder Anwendungskontexten beschäftigten, wie etwa "An evolution of virtual reality training designs for children with autism and fetal alcohol spectrum disorders.", "Training software using virtual-reality technology and pre-calculated effective dose data.", "Interactive video game-based approaches improve mobility and mood in older adults: A nonrandomized, controlled trial.", "A review and reframing of participatory urban dashboards.", "Role of childhood aerobic fitness in successful street crossing."

Aus dem Bestand des Autors wurden weitere 59 Literaturquellen zur Überprüfung in die Literatursammlung aufgenommen. Aus den deutschsprachigen Datenbanken kam es nach Bewertung der Titel zu 26 zusätzlichen Aufnahmen. Unter Einbezug von potenziell relevanten Einzelbeiträge aus identifizierten Sammelbänden ergaben sich 316 Literaturquellen zur weiteren Bewertung anhand von Kurzfassungen und Gesamttexten.

2.7 Beschaffung der Literatur

Eine vorläufige Bewertung anhand der Kurzfassungen reduzierte den Bestand auf 155 Quellen für potenziell relevante Beiträge. Diese wiederum deutliche Reduzierung ist auf meist andere als erwartete und relevante Fragestellungen, Inhalte und Anwendungskontexte oder auch begrenzte Aussagekraft der Studien zurückzuführen. Nicht berücksichtigt wurden daher etwa Beiträge zu "Workplace analysis and design using virtual reality techniques.", "Fatigue evaluation in maintenance and assembly operations by digital human simulation in virtual environment.", "The validity of using virtual reality head-mounted display for agility training.", "State of the art of the virtual reality applied to design and manufacturing processes.", "Occupant responses on satisfaction with window size in physical and virtual built environments.", "Extending the desktop workplace by a portable virtual reality system."

Diese verbleibenden Literaturquellen, die auch nach Durchsicht des jeweiligen Abstracts für die Fragestellung der Recherche weiterhin relevant erschienen, wurden als Volltext beschafft und auf einen möglichen inhaltlichen Beitrag zur Fragestellung durchgesehen.

2.8 Dokumentation zur Fragestellung

Für die weitere Bearbeitung der Literaturrecherche und Dokumentation zur Fragestellung wurden die verbleibenden Literaturquellen in ein Literaturdatenverwaltungsprogramm eingepflegt um die weitere Arbeit mit den Quellen zu strukturieren und Informationen aus den Quellen zu dokumentieren.

3 Belastung durch Techniken der VR und durch Arbeiten in VE

3.1 Vorbemerkungen

Direkte Auswirkungen von Techniken der VR auf den Nutzer können sich ergeben durch äußere Einflussfaktoren über z. B. verschiedene Sinnessysteme, physische und psychische Einwirkungen und andere Gesundheitsgefahren (Viirre et al. 2015). Einem üblichen Belastungs-Beanspruchungszusammenhang folgend, können die Auswirkungen abhängig von Intensität, Art und Dynamik der Belastung variieren (Schmidtke 1993, DIN EN ISO 10075-1:2018). So kann die Nutzung einer VR-Brille in einer VE abhängig von Aufbau, Form und Gewicht ohne zeitliche Verzögerung zu einer Fehleinschätzung von Entfernungen führen und nach kurzer Dauer in VE (z. B. von 30 Minuten) eine signifikante Erwärmung der Kopfhaut und Druckstellen darauf erkennen lassen. Ebenso können Interaktionen mit einer Variante von Techniken der VR ohne erkennbare Beeinträchtigungen, mit einer andern Variante aber z. B. Symptome der Simulatorkrankheit auslösen.

Mittlerweile sind in der Literatur viele Erkenntnisse zur Belastung durch Techniken der VR bzw. durch Arbeiten in VE dokumentiert, die gelegentlich nach direkten und indirekten oder auch nach physischen und psychischen Auswirkungen unterschieden werden (z. B. Viirre et al. 2015, Lawson 2015, Stanney & Cohn 2012, ISO 9241-394:2020). Auswirkungen betreffen die Beanspruchung, Folgen der Beanspruchung bzw. das Verhalten von Benutzerinnen und Benutzern und weiteren Beteiligten in VE, und möglicherweise nachfolgend in RE, und beeinflussen ggf. die technischen Einsatzbedingungen und den organisatorischen Rahmen beim Einsatz von Techniken der VR.

Eine große Euphorie zu Techniken der VR Mitte der 1990er Jahre führte in nachfolgenden Jahren zu ernüchternden Bewertungen zu eingesetzten Technologien, entwickelten VE, aufgabenbezogenen Nutzungsmöglichkeiten und Auswirkungen auf Benutzerinnen und Benutzer (vgl. zusammenfassend z. B. Nichols & Patel 2002). Im letzten Jahrzehnt stieg das Interesse an Techniken der VR erneut und jüngst auch umfangreicher durch kommerzielle Angebote forciert besonders durch Computerspiele. Einige der früheren Erfahrungen veranlassten auch zu weiteren Forschungsaktivitäten und technischen Entwicklungen (Wilson 1996) aus denen sich dann für das Gestalten von Interaktionen in und mit VE einige hilfreiche Erkenntnisse entwickeln konnten. Auf frühere Erkenntnisse und Erfahrungen wird allerdings in aktuellen Publikationen eher selten Bezug genommen. Das liegt möglicherweise daran, dass sie zu weit in der Vergangenheit liegen, nicht an vorderster Stelle in Internetrecherchen erscheinen oder positiv über Vorzüge der neuen Technologien berichtet werden soll. Es scheint sich aber auch eine neue Selbstverständlichkeit des Einsatzes von Technologien der VR in der Literatur oder anderen Texten zu entwickeln, bei dem weniger Fragen nach "ob" oder "warum", sondern eher nach dem "wie" in einem vorrangig technischen und funktionalen Sinne im Fokus des Interesses stehen und auch Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung von VE und der Nutzung von VE bestimmen.

Dennoch erscheinen selbst derzeit mangels valider Erkenntnisse zur Belastung durch Techniken der VR kaum Aussagen über allgemeine und unspezifische Auswirkungen von Interaktionen in VE möglich. Das betrifft etwa nicht mögliche Bewertungen bezüglich VE zu einer grundsätzlichen Abschwächung oder Steigerung von Aggressivität und Gewaltbereitschaft (Calvert & Tan 1994) oder von Lernerfolg und Arbeitsmotivation (Hung & Sun 2011). Einzelaussagen dazu sind häufig nicht in dieser vereinzelt gewünschten Form verallgemeinerbar und werden leicht durch andere Studien mit etwas geänderten Techniken der VR, anderer Aufgabenstellung in VE oder geändertem Nutzungskontext in der VE widerlegt oder zumindest relativiert. Allerdings bieten Techniken der VR auch neue Möglichkeiten für Einsatzzwecke wie Simulationen oder Trainingsszenarien und Interaktionserfahrungen in virtuellen Welten. Grundsätzlich und insbesondere beim Einsatz in der Arbeitswelt sollten Techniken der VR und Interaktionen in VE

- Anforderungen des Arbeitsschutzes (als Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz) (z. B. Ciccotelli & Marsot 2005) einschließlich
- Gestaltungsanforderungen aus Human Factors und Ergonomie (z. B. Burkhardt 2003) wie auch
- Anforderungen der Ethik (z. B. Behr et al. 2005, Dixon 2005) genügen.

Darüber hinaus ist es nicht ohne weiteres möglich, die in VE gewonnenen Erkenntnisse einfach auf reale Umwelten (RE; z. B. einen Arbeitsplatz in Realität) zu übertragen. Während das im Einzelfall durchaus möglich sein kann, sind Auswirkungen für RE i.S.v. Ursache-Wirkungs-Beziehungen erneut zu analysieren. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass Simulationen (einschließlich VE) immer eine Reduktion von Realität sind, weshalb sich dann auch Ursache-Wirkungsbeziehungen in der Simulation auf weniger und in der Realität auf mehrere Einzelfaktoren beziehen und damit Effekte verändern können (Nickel & Nachreiner 2010).

Es gibt allerdings Empfehlungen für die Gestaltung von VE, die in der Realität relevante Auswirkungen verbessern können (Wilson et al. 2002, Eastgate et al. 2015). Mithilfe solcher Konzepte aus Human Factors können auch Betrachtungsweisen, Analysen und Gestaltungsansätze limitiert auf Gebrauchstauglichkeit in der Produktgestaltung überwunden werden, indem deutlich wird, dass eine ergonomische Gestaltung über spezifizierte Basisfunktionen und Leistungsanforderungen konzeptionell und inhaltlich hinausgehen (Sharples et al. 2007) und eine Perspektive der Arbeitssystemgestaltung einnehmen. Ein Human Factors Konzept zur systematischen Entwicklung von VE umfasst einen differenzierten Gestaltungsprozess von der Ziel- und Aufgabenanalyse bis hin zur Evaluation von Zielsetzungen im praktischen Arbeitskontext (Eastgate et al. 2015).

3.2 Beurteilungen für den Arbeitsschutz

Obwohl sich seit einigen Jahrzehnten verschiedene Institutionen des Arbeitsschutzes mit Techniken der VR bzw. Arbeiten mit und in VE beschäftigen, existieren weder Risikobeurteilungen noch Gefährdungsbeurteilungen für den Einsatz von Techniken der VR und ihrer Anwendung als VE. Zusammenstellungen in der Literatur sind unvollständig, bleiben allgemein (McCauley Bell 2002, Viirre et al. 2015) und es steht keine Liste von signifikanten Aspekten zur Verfügung, die in Analysen eingezogen werden sollten oder auf die mit Maßnahmen so reagiert werden könnte, dass sie auch am Arbeitsplätzen eingesetzt werden könnten. Aus den späten 1990er Jahren gibt es allerdings Ansätze zur Klassifikation von VE-Umsetzungen (So et al. 2001, Nichols et al. 2000), die zur Bewertung von Auswirkungen von Bedingungskonstellationen zu Techniken der VR auf Sicherheit, Gesundheit und Wohlergehen genutzt werden könnten. Ohne Rechercheergebnisse vorwegzunehmen können allerdings bereits heute viele Erkenntnisse daraus für Arbeitsschutzbeurteilungen herangezogen werden, mögliche inhaltliche Lücken identifiziert und mithilfe spezifischer Recherchen und Studien geschlossen werden.

Selbst in Institutionen des Arbeitsschutzes werden Techniken der VR genutzt als Simulationstechnik oder als Medium zur Unterstützung von Trainingsmaßnahmen. Aussagen zum Thema sind dabei tendenziell positiv und optimistisch. Einen Einblick in mögliche Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbeispielen aus dem Bereich des Arbeitsschutzes bieten z. B. Ciccotelli & Marsot (2005) oder Nickel & Lungfiel (2018), lassen sich aber dadurch erweitern, dass in Übersichtsartikeln zur Anwendung von VE (Hale & Stanney 2015, Stanney & Kennedy 2012) auch Einsatzgebiete genannt werden, bei denen auch durchaus arbeitsschutzrelevante Fragestellungen thematisiert werden könnten.

Systematische Risikobeurteilungen und Gefährdungsbeurteilungen sind dabei grundsätzlich zu empfehlen und sollten von Dritten, nicht intensiv in die Softwareentwicklung einbezogenen Personen, durchgeführt werden können. Prospektive Nutzergruppen sollten in die Nutzung eingewiesen und auf mögliche verbleibende Gefährdungen, die nachweislich nicht durch das Gestalten von Techniken der VR oder von VE reduziert werden können, hingewiesen werden. Während mögliche physische Gefährdungen für einen Außenstehenden noch offensichtlich sein mögen, können sich auch psychische Gefährdungen aus der Nutzung oder der Aufgabenbearbeitung in VE ergeben, die ebenso zu beurteilen sind. Allgemeine Empfehlungen zur Risikominderung wurden von Viirre et al. (2015; s. a. McCauley Bell 2002) gegeben, die eine grundsätzliche Hilfestellung geben (vgl. Tab. 3.3-2; Viirre et al. 2015), aber eine systematische und kontinuierliche Risiko- und Gefährdungsbeurteilung für die tatsächlich verwendeten Techniken der VR oder die tatsächlich zu nutzende VE nicht ersetzen können.

Tabelle 3.3-2: Stufen der Risikoreduktion während der Entwicklung von VE

Stufe	Maßnahme
1	Beauftrage eine Person mit Gefährdungs- und Risikobeurteilungen.
2	Beobachte und beurteile alle von Benutzerinnen und Benutzern geäußerten Unbequemlichkeiten.
3	Beurteile visuelle Reize nach hohen Leuchtdichten und Effekten visueller Bewegung.
4	Untersuche auditive Reize auf Gefahrenpotenzial und Beeinträchtigungsvermögen.
5	Beachte potenzielle Strahlung (z. B. Wärme, ionisierende Strahlung) durch elektronische Bauteile.
6	Beachte Gefährdungen durch Ort und Lage von Leitungen, Kabeln, Befestigungen und anderen Elementen.
7	Beurteile die VE und das Verhalten von Personen in VE nach Gefahrenpotenzialen.

Auf der Basis einer größeren Studie zu beeinträchtigenden Effekten von VE und bezogen auf weitere Studien geben Sharples et al. (2008, s. a. Nichols et al. 2000) folgende Empfehlungen:

- Qualifizieren zu potenziellen Beeinträchtigungen bei VE-Nutzung mit dem Ziel Ängste vor der Erfahrung von beeinträchtigenden Auswirkungen zu mildern.
- Gestalten von VE so, dass möglichst wenige Elemente beeinträchtigende Effekte auslösen können.
- Informieren von Benutzerinnen und Benutzern über in VE angemessene Verhaltensstrategien, die beeinträchtigende Effekte abwenden können.
- Steuern von Bewegungen soweit wie möglich Benutzerinnen und Benutzern überlassen.
- Überwachen von Benutzerinnen und Benutzern in VE und ihnen jederzeit einen Abbruch der Nutzung ermöglichen.
- Qualifizieren von Verantwortlichen für eine sensible Überwachung und präventive Intervention bei Benutzerinnen und Benutzern in VE.

Empfehlungen, wie die von Virre et al. (2015) und Sharples et al. (2008), sind als Übersichten sehr allgemein gehalten, können mittlerweile durch weitere Erkenntnisse aus Studien in VE (siehe nachfolgende Kapitel) sowie zum Prozess menschlicher Informationsverarbeitung (z. B. Goldstein & Brockmole 2021) umfangreich detailliert werden und durch Human Factors-Konzepte zur systematischen Entwicklung von VE (Eastgate et al. 2015) auch von der Struktur an Aufgabenstellungen für Menschen in VE grundlegend ausgelegt werden (Burkhardt 2003, Wickens et al. 2013).

3.3 **Physische Belastung und Wirkung auf Anthropometrie und Biomechanik**

Beim Einsatz von Techniken der VR und der Nutzung von VE spielt auch die Gestaltung der Ausrüstung nach anthropometrischen Anforderungen eine Rolle. Daher sollten Projektionsleinwände in

Positionierung und Größe für die intendierte Population der Benutzerinnen und Benutzer ausgelegt werden, dass die Leinwände selbst wiederum in einer angemessenen Höhe und Breite einsehbar sind. Der Blick auf den zentralen Anzeigebereich sollte in entspannter abgesenkter Kopf- und Augenhaltung möglich sein (vgl. DIN EN 894-2). Mit steigendem Sehabstand sind größere Anzeigen erforderlich, damit das Blickfeld noch vollständig mit Informationen aus dem Anzeigefeld versehen werden kann (Nickel et al. 2010).

Bei dynamischen Kopf- und Körperbewegungen vergrößert sich der erforderliche Anzeigebereich zur Abdeckung des Blickfeldes weiter. Wird das Blickfeld nicht mehr vollständig durch die Präsenzfläche für VE abgedeckt, beeinträchtigt das das Präsenzepfinden (vgl. Kapitel 3.4) und führt in der Konsequenz zu körperlichem Verhalten, das reales Verhalten in vergleichbaren Szenarien nicht mehr repräsentiert. Konsequenzen aus der Abdeckung des Blickfeldes für psychisches Verhalten (z.B. bzgl. Präsenzepfinden und Immersion) werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

Während Projektionen als mögliche Technik der VR zur Visualisierung den Vorteil haben, dass mehrere Personen gleichzeitig in die VE eintauchen und dort auch interagieren können, sind HMD als weitere Technik der VR zur Visualisierung der VE für Einzelpersonen vorgesehen. Interaktionen unter verschiedenen Personen mit jeweils eigenen HMD sind aktuell mit zusätzlicher spezieller Ausstattung mit Techniken der VR für jede Einzelperson und gleichzeitig für das Labor und mit einem erheblichen Mehraufwand für die Entwicklung der VE möglich. Beim Einsatz von HMDs zur Visualisierung von VE für den Einsatz durch eine einzelne Person ergeben sich andere anthropometrische Anforderungen als beim Einsatz von Leinwänden. Meist werden angebotene HMDs mit der Vorgabe "one size fits all" angeboten, bei denen für unterschiedliche Kopfgrößen allenfalls einzelne Elemente je nach Größe gewechselt oder z. B. mit Gurten oder Schiebern dynamisch angepasst werden können. Neben anthropometrischen Anforderungen werden von Baber et al. (1999) insbesondere Aufgaben in VE und daraus resultierende Prozesse der Mensch-System-Interaktion als Kriterien für relevante Anforderungen an die Passung von HMD hervorgehoben, die nach wie vor aktuell erscheinen.

Auch bei aktuellen Techniken der VR sind Möglichkeiten der Anpassung an die Anthropometrie des Menschen grundsätzlich begrenzt. Dadurch entstehen Beeinträchtigungen des Tragekomforts, der Informationsdarstellung, Interaktionsmöglichkeiten und der intendierten Aufgabenbearbeitung in VE (Viirre et al. 2015, McCauley Bell 2002, Baber et al. 1999, Nichols 1999). Die Beeinträchtigungen steigen mit der Nutzungszeit an, sind häufig auf mangelnde Anpassung des HMD an die Kopf- und Gesichtsform oder an besondere Anforderungen von Brillenträgern zurückzuführen und beschränken in VE ein physisches und psychisches Verhalten, das mit realen Arbeitssituationen vergleichbar wäre. Ähnliches kann bei angebotenen Eingabegeräten zur Steuerung in der VE auftreten, die mit der Losung "one size fits all" individuellen anthropometrischen Anforderungen ebenso selten oder gar nicht angepasst werden können (Sharples et al. 2007, Patel et al. 2006, Burkhardt 2003, Nichols 1999) und damit vermeidbarer zu einer zusätzlichen Belastung führt.

Wird die VE über eine Projektionsleinwand angezeigt, dann können mehrere Personen gleichzeitig in dieselbe VE eintauchen und tragen dabei jeweils abhängig vom verwendeten Projektionsverfahren eine Brille mit einem so geringen Gewicht, das häufig dem einer Brille zur Korrektur der Sehschärfe nahekommt. Für Interaktionen in VE projiziert über eine Leinwand werden bei Bedarf weitere Marker oder Steuerungsgeräte benötigt, die dann insgesamt ein Zusatzgewicht von wenigen 100 g ausmachen können. Bei Brillenträgern ist immer wieder erneut zu klären, inwieweit eine Kombination beider Brillen möglich ist und ggf. einen Verzicht auf eine Anpassung an die Mindestsehschärfe oder auf das Eintauchen in VE zur Konsequenz haben. Demgegenüber ist das Tragen eines HMD bzw. einer VR-Brille für Personen, die üblicherweise keine Brille tragen, ungewohnt oder wird als schwer und unkomfortabel empfunden.

Während bei VE projiziert über ein HMD das Gewicht des HMD in den 1990er Jahren meist noch bei über 2.000 g lag, konnte das Gewicht bei aktuell weit verbreiteten und auch professionell eingesetzten HMD auf meist unter 1.000 g reduziert werden. Dabei können Funkmodule zur kabellosen Datenübertragung und Marker und Steuerungsgeräte zusätzlich ins Gewicht fallen. Auch wenn sich das Gewicht über die letzten Jahrzehnte etwa halbiert hat, so verändern sich Kopfbewegungen mit HMD durch das Tragegewicht, das zusätzlich zum Kopf bewegt werden muss. Kopfbewegungen ändern sich dadurch auch in ihrer Dynamik und mit steigender Nutzungszeit (vgl. Kollenberg et al. 2009, Penumudi et al. 2020, McCauley Bell 2002). Dadurch ergibt sich wiederum neben zusätzlicher muskuloskelettaler Belastung auch zusätzliche psychische Belastung, da die geforderte Aufgabenbearbeitung in VE auf die geforderte Informationsverarbeitung des Menschen wirkt. Darüber hinaus können manche Aufgaben durch die geänderten Körperdynamiken nicht in VE bearbeitet werden, da sie z. B. zu Ergebnissen führen, die für die Realität irrelevant sind (sofern das das Ziel des VE-Einsatzes gewesen wäre). Beispielhaft lassen sich hier erheblich weitere Winkel für Kopfdrehungen beim Tragen von HMD mit ihren zum natürlichen Blick deutlich begrenzten Sichtfeldern anführen. Dadurch werden dann in VE andere Aufgaben bearbeitet sowie auch Aufgaben anders bearbeitet und können dann durch die Belastungssituation direkt oder indirekt zu besonderen Beeinträchtigungen und Gefährdungen führen, die verändertes physisches und psychisches Verhalten des Menschen nach sich ziehen.

Sind HMD und Stellteile bzw. weiteren Werkzeug zur Visualisierung und auditive Signalisierung in VE nicht ergonomisch gestaltet, dann führt das bei Interaktionen in VE zu im Prinzip zu vermeidenden Belastungskomponenten und darüber zu muskuloskelettalen Beeinträchtigungen und Beschwerden (z. B. Penumudi et al. 2020, Chihara & Seo 2018, Baber et al. 1999, Nichols 1999). So beeinträchtigen HMD und Steuerungsgeräte abhängig von den Interaktionsprozessen in VE entspannte und natürliche Hand-, Kopf- oder Körperhaltungen und führen dadurch zu veränderten Massenschwerpunkten des Körpers, Bewegungsdynamiken des Kopfes und Gelenkmomenten des Nackens, die durch die Benutzerinnen und Benutzer mithilfe zusätzlich erforderlicher Beanspruchung und nur teilweise aktiv kompensiert werden können (Baber et al. 1999, Chihara & Seo 2018, Kim & Shin 2018).

Auch unabhängig von den erforderlichen Interaktionsprozessen werden HMD und Eingabegeräte dauerhaft an den Körperextremitäten getragen und führen dadurch zu Einwirkungen, die mit Schulterbeschwerden und Ermüdung verbunden werden (Penumudi et al. 2020). Kopfgetragene HMD und handgetragene Eingabegeräte führen abhängig von Anwendungen in VE zu Körperbewegungen, die nicht vollständig mit jenen in der Realität übereinstimmen (Nichols 1999, Penumudi et al. 2020). Darüber hinaus kommt es durch die mit Eingabegeräten gegenüber natürlichen Handgreifbewegungen eingeschränkten Interaktionen und durch das gegenüber der Realität eingeschränkte Blickfeld zu veränderten Kopf- und Körperbewegungen. Realistische Arbeitsbedingungen oder realitätsnahe Simulationen sind damit eingeschränkt und Ergebnisse aus Simulationsstudien mit Techniken der VR können mangels Validität nicht oder nur sehr eingeschränkt auf reale Verhältnisse übertragen werden. Darüber hinaus kann es durch veränderte Körperbewegungen und Körperdynamiken in VE bereits zu Beeinträchtigungen und Gefährdungen kommen, die für ähnliche Szenarien in Realität möglicherweise nicht zu erwarten wären.

Die Aufgabenbearbeitung in VE sollte nach Ergebnissen der Untersuchungen von Penumudi et al. (2020) so gestaltet werden, dass übermäßige vertikale Zielpositionen wie z. B. 15 % über und 30 % unter Augenhöhe vermieden werden, um muskuloskelettale Beeinträchtigungen und Beschwerden während Interaktionsprozessen zu reduzieren. Häufig zu betrachtende Informationen sollen in Blickwinkeln zwischen Augenhöhe und 15 % darunter angezeigt werden. Damit werden zwar Empfehlungen für eine möglichst beeinträchtigungsfreie Nutzung in VE gegeben, die allerdings nicht

mit empfohlenen Bewegungen in der Realität vergleichbar sind (z.B. DIN EN 894-2:2009) und daher auch Möglichkeiten der Übertragungen von in VE gewonnenen Erkenntnissen in die Realität einschränken würden.

Ähnliche Effekte werden durch sportwissenschaftliche Studien zu biomechanischen Trainings zur Prävention von Sturz-, Rutsch- und Stolpergefahren deutlich (Weber & Nickel 2020). In einzelnen Studien werden Rutschsituationen für Probanden so modelliert und simuliert und dann in VE mithilfe von HMD visualisiert, dass Szenarien lediglich visuell gekippt (Parijat et al. 2015a,b) oder gedreht (Riem et al. 2018) werden. Anhand allein dieser visuell vermittelten Eindrücke eines Rutschens wurden motorische Anpassungen am Probanden in den Abfangbewegungen registriert. Auch beim Transfer in echte Rutschsituationen wurden anschließend diese veränderten Abfangstrategien festgestellt, obwohl nur in virtuellen Kipp- oder Drehszenarien und nicht in realen Situationen trainiert wurde. Offen bleibt allerdings weiterhin, inwieweit allein visuell vermittelte Eindrücke einer Rutschsituation mit denen in Realität multisensorisch vermittelten Rutschsituationen entsprechen. Multisensorische Analysen und Vergleiche von realen und lediglich optisch vermittelten Rutschsituationen fehlen. Offen bleibt auch, inwieweit sich Effekte aus der VE und beim Transfer in reale Situationen tatsächlich und ausreichend allein anhand von optisch registrierbaren Abfangbewegungen erfassen lassen.

Schließlich gibt es vereinzelt nachvollziehbar begründete Empfehlungen für weitere Gestaltungsaspekte für Techniken der VR. Einflüsse infraroter und elektromagnetischer Strahlung sind ausreichend zu begrenzen, allergieauslösende oder irritierende Materialien sollen für Kontaktbereiche zur Haut vermieden werden, körpergetragene Techniken müssen grundsätzlich und insbesondere bei Personenwechsel gründlich gereinigt und desinfiziert werden um eine Übertragung von Bakterien, Viren und anderen gesundheitlichen Gefahren zu verhindern, bewegliche Teile von Techniken der VR (z. B. für haptische Stellteile) müssen in ihrem Kraftschluss auf sichere Maße für betroffene Körperteile begrenzt werden und darüber hinaus sind insgesamt eine nicht angemessene physische und psychische Belastung zu vermeiden (z. B. Viirre et al. 2015, Vorländer & Shinn-Cunningham 2015).

Damit liegen zur physischen Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen bereits einige Erkenntnisse vor, die mithilfe der recherchierten Literaturquellen detaillierter zusammengestellt und dann in Empfehlungen zur Beurteilung von Arbeitssituationen überführt sowie zur Ableitung von Maßnahmen zur Risikoreduktion genutzt werden könnten.

3.4 Psychische Belastung und Wirkung auf die Wahrnehmung von Informationen

Die Literaturrecherchen ergaben relativ zur großen Bedeutung psychischer Belastung beim Einsatz von Techniken der VR nur wenige spezifische Ergebnisse. Diese beziehen sich meist auf direkte und indirekte Auswirkungen auf Sinnessysteme für Hören, Tasten, Fühlen, Riechen, Gleichgewicht oder andere (nicht visuelle) Sinnessysteme und damit verbunden auf Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung wie Empfinden und Wahrnehmen, Denken und Problemlösen sowie Umsetzung und Kontrolle des Handelns. Hier hilfreiche Hinweise zu Sinnessystemen werden auch vereinzelt in Monographien und Handbüchern aufgegriffen und zusammenfassend dargestellt (z. B. Viirre et al. 2015, Vorländer & Shinn-Cunningham 2015, Dindar et al. 2015, Jones et al. 2015). Hinweise zur psychischen Belastung bezogen auf die Verarbeitung von Informationen sowie des Umsetzens und der Kontrolle werden im nachfolgenden Kapitel 3.5 gegeben. Zur psychischen Belastung im Zusammenhang mit der Wirkung auf das Sozialverhalten berichtet das Kapitel 3.6.

Meist werden in VE mithilfe von Techniken der VR nur visuelle Informationen zur Verfügung gestellt und damit wird nur ein kleiner Teil der multimodalen Sinneseindrücke aus einer natürlichen Umgebung für eine VE modelliert und simuliert. Vom Wahrnehmen über Denken bis Handeln von und mit anderen Personen und Gegenständen sowie Aktivitäten und Funktionen im Raum werden nicht nur visuell, sondern auch ebenso über auditive Hinweise vermittelt. In die menschliche Informationsverarbeitung werden regelmäßig immer akustische Hinweise wie z. B. Stimme, Hall, Geräusche aus variierender Entfernung, Weite und Größe von Räumlichkeiten und Gegenständen, die Ausstattung, verwendete Materialien oder Oberflächenbeschaffenheit einbezogen, obwohl solche im Vergleich zu visuellen Hinweisen weniger beachtet werden. Der Mensch nutzt auditive Informationen tatsächlich sehr häufig, z. B. als Rückmeldungen zu Ereignissen wie das Schließen einer Tür, Verhallen von Schritten, Abschalten einer mobilen Maschine oder Warnungen zu Betriebszuständen. Auditive im Vergleich zu visuellen Informationen sind richtungsunabhängig und können mit unterschiedlichen Kodierungen eingesetzt werden, was sie dann in manchen Situationen und auch zur Verhaltenssteuerung nicht nur relevant, sondern auch signifikant werden lässt (z. B. Goldstein & Brockmole 2021). Wirkungen von Techniken der VR auf das auditive Sinnessystem und darauf bezogene menschliche Informationsverarbeitung werden im nachfolgenden Kapitel 3.4.1 zusammengefasst.

In einer Studie von Lawson et al. (2019) wurden Möglichkeiten und Grenzen von multisensorischen Eindrücken in VE aufgezeigt, die nicht nur visuelle und auditive Sinneseindrücken erzeugen, sondern auch das Temperaturempfinden und den Geruchssinn anregen. In Trainingsszenarien zum Brandschutz und zum Arbeitsschutz in der Motorenmontage wurden Lerneffekte durch Folienpräsentation mit solchen durch VE verglichen. Die vierfache (sehen, hören, spüren, riechen) im Vergleich zu einer in VE bestenfalls genutzten zweifachen (sehen, hören) multisensorischen Stimulierung erhöhte das Risikoempfinden der Trainees und führte eher zu sicherheitsangepassten Arbeitsweisen. Eine etwas weiter gesteigerte Realitätsnähe der VE wurde angenommen, weil Maßnahmen in VE zeitnah und näher an Bedingungen psychischer Belastung umgesetzt wurden, d.h. das Informationsangebot vollständiger und strukturierter war und als Reaktion darauf eher natürlichen Verhaltensweisen angepasst wurden. Engagement und Interesse waren beim Training, in dem auch Techniken der VR zur Unterstützung eingesetzt wurden, deutlich höher als beim Folien-Training. Allerdings führte das Folientraining zu einem signifikant höheren Leistungsniveau beim Wissenstest zum Arbeitsschutz zum Abschluss des Trainings. Das Leistungsniveau senkte sich allerdings bereits nach einer Woche auf ein Niveau ab, das mit dem mit Techniken der VR unterstützten Training vergleichbar war. Es wird abschließend auf Basis des einzelnen Forschungsprojekts geschlossen, dass ein Folien-Training zu einem kurzzeitig umfangreicheren Wissen beitragen kann. Ein multisensorisch unterstütztes Training Trainees vermag mittelfristig besser auf Gefahrensituationen vorbereiten.

Eine geringere Anzahl an spezifischen Studien zu Auswirkungen durch andere als dem visuellen Sinnessystem hängt damit zusammenhängen, dass z. B. auditive, haptische oder olfaktorische Informationen wegen des zusätzlichen Aufwandes und mangels Nachfrage bisher eher selten oder nur ansatzweise in eine VE integriert werden. Modellierung und Simulation beim Einsatz von Techniken der VR konzentriert bzw. beschränkt sich entgegen psychischer Verarbeitungsprozesse in der Realität auf das visuelle Sinnessystem und die damit verbundene Informationsverarbeitung.

Damit liegen ebenso zur psychischen Belastung bei der Arbeit in virtuellen Räumen bereits einige Erkenntnisse vor, die allerdings gemessen am Stellenwert ihrer Bedeutung in VE ein relativ geringes Spektrum abdecken. Dennoch können auch hier auf Basis der recherchierten Literaturquellen erste Empfehlungen zur Beurteilung von Arbeitssituationen und Maßnahmen zur Risikoreduktion abgeleitet werden.

3.4.1 Wirkung auf das auditive Sinnessystem

Während es einfach ist Töne oder Geräusche zu erzeugen, ist es deutlich aufwändiger, solche Sinneindrücke (z. B. als dynamische Geräuschkulisse) auch dreidimensional für dynamische Arbeitspositionen für einen realitätsnahen Eindruck in VE zu modellieren und zu simulieren. Erschwerend kommt hinzu, dass einzelne aus diesen Eindrücken dann auch mit der Modellierung und Simulation der visuellen Eindrücke synchronisiert werden müssen und das in Abhängigkeit davon wie sich eine Person in der VE bewegt oder auch insgesamt verhält. Dasselbe gilt für eine Modellierung und Simulation der Eindrücke von allen anderen Sinnessystemen.

Wie auch an Arbeitsplätzen in der Realität ist auch in VE bei nicht ergonomisch gestalteten Arbeitsbedingungen mit Beeinträchtigungen zu rechnen, die zu vermeiden sind (z. B. durch hohe Schalldruckpegel oder andauernde, hoch repetitive gleichförmige Bewegungen) (z. B. Viirre et al. 2015, McCauley Bell 2002). Letztere wären dann allerdings nicht den Techniken der VR oder der Nutzung von VE selbst, sondern der Gestaltung von Interaktionen in VE zuzuschreiben. Der maximale Schalldruckpegel aus in VE getragenen oder in HMD integrierten Kopfhörern sollte zum Schutz vor Beeinträchtigungen und Gefährdungen technisch begrenzt sein (z. B. Viirre et al. 2015).

Einen Einfluss von visueller mit auditiver Modellierung und Simulation auf das Präsenzepfinden untersuchten Whitelock et al. (2000). Während durch ein verbessertes Audio-Feedback zwar das Präsenzepfinden (i.S.v. Empfinden, an einem Ort selbst präsent und Teil der Umgebung zu sein) gesteigert werden konnte, führte das dann nicht auch zu höheren konzeptionellen Lernwerten der Studenten.

Hörerlebnisse von Musikausschnitten wurden von Schoeffler et al. (2015) in einem Kinosaal und einer Hörkabine jeweils in RE und in VE verglichen. Die Gesamthörerlebnisse für diese Bedingungen waren zwar statistisch nicht signifikant unterschiedlich, sind aber dadurch noch lange nicht die gleichen. In RE waren Bewertungen für die Hörkabine etwas höher als im Kino. In VE benötigten die Probanden mehr Zeit zur Raumorientierung am Anfang und insbesondere für die Einzelbewertungen. Ebenso waren Bewertungen in VE unterhalb der Signifikanzgrenze geringer. Möglicherweise indirekte Effekte für Bewertungsunterschiede ergaben sich etwa aus den unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen in den einzelnen Räumen in RE und VE, wodurch die Instruktionen mit unterschiedlicher Leserlichkeit dargestellt und möglicherweise unterschiedlich interpretiert wurden. Darüber hinaus schienen die Höreindrücke in der Hörkabine höher bewertet als im Kino. Im realen Kino mit einer Lautsprecherplatzierung, die nicht vollständig in VE abgebildet werden konnte, führten das zu nicht äquivalenten Höreindrücken. Die Ergebnisse sollen nach Einschätzung der Autoren zum Abschluss der Studie als Anlass für eine verbesserte Studie genommen werden. Mit dieser Studie wurde darüber hinaus deutlich, dass zur Abbildung von Realität in VE mehr gehört, als nur direkt interessierende oder ausgewählte Effekte. Auch indirekte Effekte und Interaktionseffekte müssen übereinstimmen, um Erkenntnisse aus VE in RE übertragen zu können. Erst daran könnten sich dann Überprüfungen zu Reliabilität und Validität anschließen.

Auswirkungen auf das Präsenzepfinden durch Modellierung und Simulation in VE für das auditive Sinnessystem sind wegen Unterschieden in verwendeten Techniken der VR nicht immer vergleichbar (Kern & Ellermeier 2020). Die Autoren konnten in ihren Untersuchungen einen Einfluss einer Geräuschkulisse aus freier Natur und von Trittschallgeräuschen auf das Präsenzepfinden in VE ermitteln, wobei Trittschallgeräusche mehr als die verwendeten Umgebungsgeräusche auch zur Ablenkungen von anderen Aktivitäten beitragen können.

Nach einer Übersicht von Fox et al. (2009) werden Soundeffekte und Umgebungsgeräusche häufig eingesetzt, um das Empfinden von Immersion der Benutzerinnen und Benutzer in der VE zu verstärken (Västfjäll, 2003). Aus Untersuchungen von Williams et al. (2007) wird deutlich, dass in VE

mit mehreren miteinander interagierenden Personen, die Stimmen der Teilnehmer einen Einfluss auf die Ergebnisse der Aufgaben sowie auf die Wahrnehmung und Bewertung anderer Personen in der VE haben. Menschen nehmen ihre Umwelt über alle Sinnessysteme wahr und stimmen ihr Handeln in der Umwelt auch darauf ab. Auditive Hinweise können das eigene Verhalten und das mit und gegenüber anderen Menschen und Gegenständen erheblich beeinflussen und erscheinen daher für eine reliabel und valide Abbildung in VE ebenso erforderlich wie eine Gestaltung von Hinweisreizen für andere Sinnessysteme.

3.4.2 Wirkung auf das visuelle Sinnessystem

Zur Nutzung von Techniken der VR und in VE ist eine Gestaltung orientiert an den Anforderungen der Benutzerinnen und Benutzer sowie den von ihnen zu bearbeitenden Aufgaben erforderlich. Dazu zählt dann auch, dass abhängig von Augen-, Kopf- und Körperbewegungen die Größe des Blickfeldes variiert. Bei dynamischen Kopf- und Körperbewegungen vergrößert sich der erforderliche Anzeigebereich einer Technik der VR zur Abdeckung des Blickfeldes weiter. Wird das Blickfeld nicht mehr vollständig durch die Präsentationsfläche für VE abgedeckt, beeinträchtigt es das Präsenzzempfinden und führt in der Konsequenz zu physischen und psychischen Verhaltensreaktionen, die reales Verhalten in einem vergleichbaren Kontext nicht mehr repräsentieren.

Sobald im technisch für Benutzerinnen oder Benutzer mithilfe von Techniken der VR generierten Blickfeld Grenzen eines Anzeigefeldes sichtbar werden, wird das Eintauchen (engl. immersion) in die VE unterbrochen oder abgebrochen bzw. ein Auftauchen aus der VE in eine reale Umgebung beeinflusst das geplante Verhalten. Ohne durchgängige Immersion in einer VE verlieren Benutzerinnen und Benutzer den Eindruck ein Teil der VE zu sein, das Präsenzzempfinden geht verloren und Interaktionsprozesse werden denen mit Bildern oder Videos ähnlicher als realitätsnahe und dynamische Handlungen in einem Arbeitsprozess in VE. Ein gehäufte Immersionswechsel zwischen VE und einer realen Umgebung kann das Auftreten der visuell induzierten Bewegungskrankheit fördern. Aufgaben, die für ein hohes Präsenzzempfinden in einer stereoskopisch 3-dimensional dargestellten VE ausgelegt sind (z.B. Bewerten von Abständen, von Prozesszuständen von Maschinen), können unter solchen Bedingungen nicht mehr forderungsgerecht bearbeitet werden und bilden reale Prozesse nicht valide ab.

Wenn ergonomische Erkenntnisse zur und Anforderungen an die Nutzung von Techniken der VR (z. B. Head-Mounted-Display, HMD) oder an die Gestaltung von VE (z. B. Visualisierung 3-dimensionaler Umgebungen) beachtet werden, dann können beeinträchtigende (indirekte) Auswirkungen auf das visuelle System und Gefährdungen vermieden werden. Etwa 1 ‰ der Bevölkerung sind für Lichtblitze als intermittierende Lichtreize oder optische Muster empfindlich, die durch das Auftreten der photoparoxysmalen Reaktion im EEG nachgewiesen werden können und epileptische Anfälle auslösen können (DIN EN ISO 9241-391:2016, Viirre et al. 2015, Quirk et al. 1995, Shoja et al. 2007).

Gestaltungsanforderungen zur Vermeidung solcher photosensitiveren Reize beziehen sich auf Farbe, Leuchtdichte, Wiederholfrequenz usw. der visuell modellierten und simulierten Bestandteile einer VE (z. B. DIN EN ISO 9241-391:2016). Danach sollen potenziell gesundheitsschädigende Lichtblitze und schnelle Änderungen von Bildsequenzen vermieden werden, auch Häufigkeit und Dauer von Einwirkungen sollen begrenzt werden. Schließlich soll, sofern eine umfangreiche Prüfung der Anwendung nicht möglich ist, eine Vorwarnung zu Gefahren und damit verbundenen Risiken erfolgen. Möglicherweise müsste darüber hinaus auch entschieden werden können, dass ein aktueller Gestaltungszustand einer VE nicht weiterverwendet werden darf.

Etwa 20 % der weiblichen und 10 % der männlichen Bevölkerung leiden zumindest gelegentlich unter Migräne (Viirre et al. 2015, Stewart & Lipton 1992). Da Migräneanfälle durch intensive Licht- oder Geräuscheindrücke wie auch Störungen des Gleichgewichtssinns begünstigt werden, wurden Empfehlungen als technische oder organisatorische Maßnahmen entwickelt, um beeinträchtigende Auswirkungen durch VE zu reduzieren (Viirre et al. 2015; vgl. Tab. 3.4-1). Leider würde die Umsetzung mancher der Hinweise aus der Tabelle dazu führen, dass die VE nicht mehr für intendierte Aufgabenstellungen verwendet werden kann (d.h. minimierte Leuchtdichten oder minimierte visuelle Bewegungen bzw. Dynamiken verändern oder deaktivieren eine VE). Die Empfehlungen sollten so umformuliert werden, dass sie Beeinträchtigungen und Gefährdungen während der Aufgabebearbeitung und damit Belastungssituation in VE abwenden können.

Tabelle 3.4-1: Maßnahmen der Gestaltung von VE zur Reduzierung von Migräne

Stimulus	Maßnahme
visuelle Darstellung	minimiere Leuchtdichte, Steuerbarkeit der Leuchtdichte durch Benutzer
visuelle Bewegung	minimiere visuelle Bewegungen, insbesondere solche durch Wechsel der Blickperspektiven
auditive Darstellung	minimiere pulsierende Geräusche
Dauer	minimiere die Dauer, lege Pausen ein, gewähre Steuerbarkeit durch Benutzer

Bei der Gestaltung von VE sind darüber hinaus ergonomische Anforderungen zur Verminderung potentieller Sehbeschwerden und visueller Ermüdung durch stereoskopische Bilder zu berücksichtigen (DIN EN ISO 9241-392:2017). Räumliches Sehen (Stereopsis) entsteht durch die Vereinigung zweier Netzhautbilder im Gehirn des Benutzers. Eine VE entsteht für Benutzerinnen und Benutzer dadurch, dass sie immer diejenigen stereoskopischen Bilder präsentiert bekommen, die sie dann zu einer virtuellen 3-dimensionalen Umgebung zusammenfügen können. Beschriebene Gestaltungsanforderungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Vermeidung möglicher interokularer Unterschiede zwischen den Einzelbilddarstellungen (z. B. Fehlansichtungen, Größe, Leuchtdichten, Farben), die eine Vereinigung zu einer VE beeinträchtigen und zu Sehbeschwerden oder visueller Ermüdung führen würden (DIN EN ISO 9241-392:2017).

Hinweise zur technischen Qualität von Bildschirmgeräten, die in Techniken der VR verbaut werden, können u. a. IEC 63145-21-20:2019 entnommen werden. Für den Einsatz von Techniken der VR und in VE sind jedoch besonders auch Anforderungen an die ergonomische Gestaltung von Aufgaben-, Interaktions- und Informationsschnittstellen im Kontext eines Arbeitssystems zu berücksichtigen (z. B. Schmidtke 2011, Nickel et al. 2020, DGUV Information 215-450:2021), wobei sich auch für diesen Anwendungskontext auf einige spezifische Anforderungen zurückgreifen lässt (z. B. Wickens & Baker 1995, Stanney et al. 2003, Gabbard 2015).

Darüber hinaus sollten durch eine Gestaltung von Techniken der VR und von VE direkte beeinträchtigende Auswirkungen auf das visuelle System (dem eigentlichen Darstellungsmedium für die VE) differenziert werden. Visualisierungen auf Bildschirmgeräten und auf Projektionen können mit einem Abstand von ca. 300 mm (z. B. bei Smartphones) und mehr (z. B. bei Desktop-PC oder Leinwänden) vom Auge aus direkt betrachtet werden. Dahingegen sind die Anzeigen in stereoskopischen, kopfgebundenen Sichtgeräten (Head-Mounted Displays, HMD, VR-Brille) ca. 30 mm entfernt und werden zur Visualisierung von verschiedenen großen Räumen durch eine Linse zwischen Monitor und Auge betrachtet. Trotz der kurzen Distanz muss ein natürliches Blickfeld möglichst weit und ohne Verzerrungen abgedeckt werden.

Zur Tiefenwahrnehmung sind weiterhin zwei aufeinander abgestimmte, unterschiedliche Bilder erforderlich. Dafür werden zwei makellose und ideal zueinanderstehende Augen angenommen (z. B. ohne Hornhautverkrümmung, Brechungsunterschiede, Verzerrungen einzelner Augen), wodurch Personen mit bereits leichten Sehbeeinträchtigungen keine angemessene Visualisierung der VE ermöglicht wird. Manche der Beeinträchtigungen wären zwar unter natürlichen Sehbedingungen

durch menschliche Verhaltensstrategien kompensierbar oder durch technische Hilfsmittel korrigierbar, sind allerdings bisher nicht in die Linsenkonstruktion eines HMD einbezogen. Visualisierungen von VE sind daher manchen Personengruppen nur eingeschränkt möglich (vgl. ähnliche Diskussionen zur Zugänglichkeit von Webangeboten, DGUV FBVW, 2018). Sie können, da sie nicht korrigiert werden, zu visuell induzierter Bewegungskrankheit beitragen (ISO 9241-394:2020; Hyodo et al. 2019; siehe unten). Für einen möglichst großen Personenkreis sollen allerdings ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von HMD umgesetzt sein und damit eine binokulare Parallaxe erzeugen, Benutzerinnen und Benutzern effektive und bequeme Sehbedingungen (z. B. bezogen auf Betrachtungsabstände, Leuchtdichte) bieten und visuelle Ermüdung vermeiden (DIN EN ISO 9241-333:2017).

3.4.3 Wirkung auf das vestibuläre Sinnessystem

Werden VE auf Projektionswänden oder Bildschirmgeräten einschließlich HMDs dargestellt, dann sollten ergonomische Anforderungen zur Reduzierung unerwünschter psychosomatischer Effekte der visuell induzierten Bewegungskrankheit bei der Betrachtung elektronischer Bilder berücksichtigt werden (vgl. ISO 9241-394:2020). Dazu kann es aus einer beschränkten mechanistischen Sichtweise kommen, wenn das zentrale Nervensystem des Menschen sensorische Informationen über Körperorientierung oder Bewegungen erhält, die mit vergangenen Erfahrungen oder aktuellen motorischen Absichten nicht übereinstimmen. Eine mögliche Verursachung geht allerdings weit über vergangene Erfahrungen und motorische Absichten eines Menschen hinaus. Zu einer erhöhten psychischen Belastung kommt es in diesem Kontext dadurch, dass vom Menschen wahrgenommene Informationen und eigenen Handlungen zu Zustand und zur Dynamik des eigenen Körpers und der realen Umgebung sowie der Abbildung des eigenen Körpers und der Umgebung in VE nicht miteinander in Kongruenz gebracht werden können. Dadurch kann es z. B. zu Unsicherheiten in der Bewertung, Steuerung und Umsetzung von beabsichtigtem oder realisiertem Verhalten, zu Kontrollverlust und Angst- und Panikzuständen kommen, die sich abhängig von Intensität und Dauer der psychischen Belastung auch spontan in körperlichen Reaktionen als sogenannte Symptomen der Simulatorkrankheit oder spezifischer auf visuelle Simulationen als sogenannte Symptome der visuell induzierten Bewegungskrankheit (ISO 9241-394:2020) manifestieren.

Damit ist wiederum der gesamte Prozess menschlicher Informationsverarbeitung im Kontext eines Arbeitssystems angesprochen, vom Empfinden und Wahrnehmen, Denken und Problemlösen sowie Umsetzung und Kontrolle des Handelns (z. B. Wickens et al. 2013), der über selektiv ausgewählte unbekannte Erfahrungen oder motorische Körperkontrolle weit hinausgeht. Während ausgewählte spezielle Anforderungen zur möglichen Abwendung von Symptomen in ISO 9241-394:2020 dokumentiert sind (s.a. ISO/TR 9241-393:2020, Descheneaux et al. 2020, Lawson 2015), ist es grundlegend erforderlich, dass

- bei sichtbaren Bewegungseffekten in VE keine Zeitverzögerungen zwischen der Visualisierung und getrackter Bewegungen von Kopf und Stellteilen auftreten,
- das Blickfeld einer virtuellen Kamera mit den präsentierten Bildern auf HMDs bzw. VR-Brillen mit Kopftracking und/oder weitem Blickwinkel konsistent ist und
- Bildbewegungen mit Kopfbewegungen in Richtung und Anzahl konsistent sind.

Darüber hinaus weisen verschiedene Studien darauf hin (z. B. Descheneaux et al. 2020, Lawson 2015), dass zur Vermeidung von visuell induzierter Bewegungskrankheit eine Reihe von potenziell negativen Eigenschaften von Techniken der VR vermieden werden sollen. Darunter ist Vektion genannt, die die Illusion einer Eigenbewegung in VE trotz stehender Position beschreibt, und in jüngerer Zeit auch häufiger beim Einsatz von HMD als Visualisierungstechnik der VR als Ursache für

Krankheitssymptome identifiziert wurde. Eine weitere Ursache wird im verwendeten Blickfeld der HMD gesehen, wobei allerdings eine Vergrößerung nicht unbedingt zur Symptomreduzierung beiträgt, etwa wenn ein Blickfeld in der VE nicht mit dem Blickfeld im HMD übereinstimmt.

Zeitverzögerungen oder Flimmern der Visualisierung in VE werden für Symptomsteigerungen ebenso in jüngeren Studien mit HMD-Techniken der VR berichtet (Stauffert et al. 2018). Eine psychische Belastung dadurch wird beim Einsatz von Techniken der VR nicht nur durch technisch mögliche Wiederholfrquenzen der Anzeigen im HMD, sondern auch von den Verarbeitungskapazitäten für die Generierung von VE auf Rechnern und Grafikkarten beeinflusst. Mittlerweile wird daher auch von Herstellern von Techniken der VR darauf verwiesen, dass eine Nutzung von VE auch für HMD so programmiert werden solle, dass Bildwiederholraten nicht unterhalb von 60 Bildern je Sekunde bleiben (Descheneaux et al. 2020), auch wenn Zeitverzögerungen und Flimmern auch noch bei deutlich höheren Wiederholfrquenzen wahrgenommen werden können. Mit steigender Bewegungsgeschwindigkeit nimmt eine beeinträchtigende Symptomatik zu, wobei das auch in jüngeren Studien noch sowohl für Visualisierungen auf Leinwand als auch auf HMD gezeigt werden konnte (z. B. Kwok et al. 2018).

Auch Unterschiede bzw. Skalierungen zwischen einer möglichen Informationsdarstellung einer VE für ein HMD mit einem beim HMD-Einsatz verfügbaren und ggf. im Vergleich dazu in Realität bekannten Blickfeld führen zu Veränderungen der psychischen Belastung, die zu beeinträchtigenden Folgen psychischer Beanspruchung sowie auch Symptomen einer visuell induzierten Bewegungs-krankheit führen können. Allerdings sind Ergebnisse dazu über verschiedene Studien hinweg nicht einheitlich.

Vermeintlich hilfreiches Streben nach Fotorealismus für eine Visualisierung von VE gilt als ein weiterer möglicher Grund für psychische und physische Beeinträchtigungen, die sich trotz immer performanter werdenden Techniken der VR immer wieder erneut und möglichst grenzwertig ausgeschöpft wird, sich aber beim Streben nach Realismus kaum befriedigen lassen wird. Das ist umso verwunderlicher, da eine fotorealistische VE entgegen weiterhin erhoffter Effekte für realitätsnahes Erleben einer VE nicht besonders bedeutsam ist (Simpson et al. 2015, Burkhardt 2003, Sharples et al. 2007); signifikant für realitätsnahes und aktives Erleben einer VE sind dagegen realitätsnah mögliche Interaktionsprozesse im Aufgabenkontext, sofern sie wesentlich zum Ziel einer Nutzung von VE beitragen. Für ein realitätsnahes und aktives Verhalten sind neben multisensorischer Analyse und Bewertung von Informationen im Aufgabenkontext auch sensomotorische Aktivitäten zur Handlungsumsetzung förderlich, die über eine dominant visuelle Informationsdarstellung hinausgehen.

Eine internationale Norm zu ergonomischen Anforderungen zur Reduzierung von unerwünschten Effekten (ISO 9241-394:2020) kann allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass signifikante Ursachen für eine visuell und über andere Sinnessysteme induzierte Bewegungs-krankheit in ihrem vollen Umfang noch immer nicht bekannt sind und gegebene Empfehlungen nicht generell geeignet sind, beeinträchtigende Folgen psychischer oder physischer Beanspruchung abzustellen oder zu vermeiden. Der Umfang relevanter und signifikanter Inhalte zu Ursachen ist noch nicht vollständig aufgearbeitet und die Empfehlungen können Effekte lediglich abmildern:

- für manche Techniken der VR (z. B. Verzicht auf Fotorealismus zugunsten hoher Wiederholfrquenzen),
- für manche Gestaltungslösungen für VE (z. B. Rückmeldungen zu Eigenbewegungen durch Schatten) oder
- für manche Personengruppen (z. B. Farbwechsel bei Anaglyphenverfahren).

Solche abgemilderten Effekte wurden in Studien mit relativ geringer Belastungsexposition ermittelt. Die Effekte beziehen sich auf Ursachen, die mit menschlichen und in einigen Fällen auch individuellen Symptomen beschrieben werden, die mit den jeweils eingesetzten Techniken der VR zusammenhängen und die sich auf die jeweilige Anwendung und damit die spezifischen Szenarien, die Dynamiken der Interaktionsprozesse und die Expositionsdauer beziehen können (z. B. Barrett 2004, Kennedy et al. 2000, Nichols et al. 1997). Entsprechend vielfältig, dynamisch und auch absolut begrenzt sind mögliche Einzelmaßnahmen der Gestaltung, verbunden mit unterschiedlichen Erfolgsaussichten.

Sowohl direkte als auch indirekte Effekte der Gestaltung von Techniken der VR und von VE können zu beeinträchtigenden Folgen psychischer und physischer Beanspruchung und Gefährdungen von verschiedenen Personengruppen beim Einsatz von VE beitragen. Mögliche Ursachen einer visuell induzierten Bewegungskrankheit oder auch durch die Nutzung von VE hervorgerufenen Symptomen einer Simulatorkrankheit werden in der Literatur weiterhin breit und teilweise kontrovers diskutiert. Das scheint u. a. daran zu liegen, dass

- noch nicht alle Einflussfaktoren aufgedeckt und nach ihrer Relevanz bewertet werden können,
- die Variation technischer Einsatzelemente bei Techniken der VR sehr groß ist und sich laufend erweitert,
- Studien zur systematischen Untersuchung rar sind,
- bei der Mehrzahl von Studien mit VE-Nutzung Symptome nur aus Screenings abgefragt werden,
- stärkere Effekte meist nicht in Bedingungskonstellationen gesucht, sondern bei Einzelpersonen ausgemacht werden, die dann vom weiteren Studienverlauf ausgeschlossen werden,
- der Fokus bisher eher auf einfach benennbaren oder beobachtbaren und offensichtlichen Effekten gelegt wurde, die auf einer symptomatischen und krankheitsbezogenen Ebene von Erklärungsvariablen eingruppiert werden ohne dabei auf mögliche Ursachen auf einer Belastungsebene einzugehen,
- verwendete Symptome von Simulatorkrankheit auf Symptome visuell induzierter Bewegungskrankheit eingeschränkt werden und damit das Spektrum physischer und psychischer Verhaltensreaktionen nicht abbilden,
- zwar Krankheitssymptome benannt werden, tatsächlich aber eher temporäre physische und psychische Beeinträchtigungen gemeint sind, die an sich oder über ihren Rückbildungsprozess auf auslösende Bedingungen rückschließen lassen und
- eine systematische arbeitswissenschaftliche Aufarbeitung von physischer und psychischer Belastung über die Beanspruchung bis hin zu förderlichen oder beeinträchtigenden Folgen der physischen und psychischen Beanspruchung bisher nicht vorgenommen wurde.

Nach einer zusammenfassenden Analyse zu Studienergebnissen durch Wilson (1997) muss davon ausgegangen werden, dass bei etwa 5 % der Benutzerinnen und Benutzer von VE mit stärkeren Ausprägungen von Symptomen einer visuell induzierten Bewegungskrankheit zu rechnen ist. Eine Durchsicht verschiedener Studien mit Techniken der VR (z. B. Nichols et al. 2000) kommt zu dem Ergebnis, dass 70 % aller Probanden einen Anstieg in der Symptomatik einer visuell induzierten Bewegungskrankheit berichteten, wobei ca. 7 % eine Teilnahme in VE innerhalb der ersten 20 Minuten abbrechen und sich vereinzelt auch noch nach 8 Stunden Symptome zeigen. Recherchen von Stanney (1995), die sich auf ganz andere Quellen beziehen, führten zu sehr ähnlichen Ergebnissen bezogen auf Symptomausprägungen, Abbruchraten und Nachwirkungen.

Jüngere Analysen über verschiedene Studien kommen weiterhin zu vergleichbaren Ergebnissen (Sharples et al. 2007). Reviews von Sharples et al. (2008) weisen darüber hinaus auf Unterschiede in der Symptomintensität zwischen Techniken der VR hin. Es zeigen sich zunehmende Symptome

von Desktop-Einsatz über Projektion hin zu HMD. Außerdem werden Unterschiede zwischen Bedingungen fälschlicherweise Personengruppen zugeschrieben werden, wenn damit etwa Gruppen mit unterschiedlich umgesetzter Kontrolle gemeint sind. Mit sinkender Kontrolle über Bewegungen in VE nimmt eine Symptomatik grundsätzlich zu. Eine steigende Beeinträchtigung geht auch mit zunehmender Expositionsdauer einher (Descheneaux et al. 2020, Kennedy et al. 2000, Nichols et al. 2000).

Empfinden Benutzerinnen und Benutzer bereits in den ersten Minuten in VE Schwindel, Unwohlsein oder Gleichgewichtsbeeinträchtigungen, so sollte die Nutzung sofort unterbrochen werden. Eine Nutzung könnte zu einem späteren Zeitpunkt zunächst mit wenig Dynamik in der VE und in sitzender Position getestet werden, um den Personen eine weitergehende Teilnahme zu ermöglichen oder um zugrundeliegende Belastungs-Beanspruchungszusammenhänge weiter aufzuklären. Wenn sich Symptome der (visuell) induzierten Bewegungskrankheit (Simulatorkrankheit) durch Exposition in VE bereits manifestiert haben, ist eine Ruhephase ohne Bewegtbildpräsentation und mit Frischluftzufuhr über mindestens 2 Stunden zu empfehlen. Von einer unbegleiteten Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr wird während des Anhaltens von Symptomen abgeraten und auf das Führen von Fahrzeugen sollte verzichtet werden (z. B. Descheneaux et al. 2020, Nichols et al. 2000). Mögliche Ursachen, Verläufe, Auswirkungen und Symptome für das Auftreten von Simulatorkrankheit sollten als Übersicht zur Verfügung stehen, damit sie in situationsaktuelle Gefährdungsbeurteilungen für den Einsatz von VE einbezogen werden können.

Während eine visuell oder anders induzierte Bewegungskrankheit (Simulatorkrankheit) ein Thema für den Arbeitsschutz ist, ist das auch ein Grund dafür, dass die Techniken der VR nicht in ihrer erwünschten Art, Intensität und Dauer genutzt werden können. Visuell induzierte Bewegungskrankheit führt zu Leistungsbeeinträchtigungen während und nach der Nutzung von VE. Allerdings werden dabei einige Leistungsfunktionen mehr (z. B. visuelle Aufmerksamkeit), andere weniger (z. B. Farbwahrnehmung) beeinträchtigt. Symptome der visuell induzierten Bewegungskrankheit können gefördert sein durch noch nicht vollständig bekannte Eigenschaftskombinationen weniger Personen, auftreten durch Mängel in der Anpassbarkeit der Techniken von VR an sowohl Eigenschaften als auch Verhalten von Benutzerinnen und Benutzern und durch mangelbehaftete Darstellungsqualitäten mit Techniken der VR mit unklaren Anteilen an der Verursachung.

Unabhängig von den Ursachen führt visuell oder anders induzierte Bewegungskrankheit dazu, dass Motivation reduziert, Ermüdung erhöht und Gleichgewichtsstörungen verstärkt werden. Barrett (2004) weist darüber hinaus darauf hin, dass die kognitive Leistungsfähigkeit einschließlich von Prozessen der Aufmerksamkeit, des Gedächtnis und der Mustererkennung durch die Gestaltungs-mängel und die Krankheitssymptome nicht generell und direkt beeinträchtigt sei. Unklar dabei bleibt allerdings, wie umfangreich dazu Studien vorliegen und wie differenziert dabei auf Arten, Intensitäten und Qualitäten von Prozessen menschlicher Informationsverarbeitung und im vorliegenden Kontext relevante Mechanismen der Verhaltensregulation berücksichtigt wurden.

Diese Erkenntnisse gehen auf Übersichten von Barrett (2004) zurück und darunter auch auf Studien von Nichols et al. (1997), in denen Symptome der visuell induzierten Bewegungskrankheit (Simulatorkrankheit) zwar während einer Anwendung von VE anstiegen, aber keine signifikanten Auswirkungen in feinmotorischer Kontrolle und Haltungsstabilität zeigten. Nach Abschluss von Interaktionen in VE wurden allerdings Distanzen in der Realität deutlich unterschätzt. Das könnte darauf hindeuten, dass Interaktionen in VE zu (kurzfristigen) Veränderungen von Beurteilungssystemen in RE führen können. Auch Cobb et al. (1999) stellte trotz steigender Symptomatik der Simulationskrankheit keine Leistungsbeeinträchtigungen in Fein- und Grobmotorik oder kognitiven Leistungsdimensionen fest.

Diese und andere Ergebnisse wiesen zwar darauf hin, dass durch Übungen und Adaptationen die Anfälligkeit für visuell induzierte Bewegungskrankheit abnehmen kann (Barrett 2004). Aus Sicht des Arbeitsschutzes muss es aber weiterhin vorrangiges Ziel sein, die Ursachen für eine visuell oder anders induzierte Bewegungskrankheit bzw. physisch und psychisch beeinträchtigende Folgen der Beanspruchung durch eine veränderte Gestaltung von Techniken der VR oder der Anwendung einer VE gar nicht erst auftreten zu lassen. Im Sinne der Maßnahmenhierarchie könnte ergänzend zu wirksamen Gestaltungslösungen auch versucht werden, Beschäftigte zu trainieren, eine entstehende visuell induzierte Bewegungskrankheit länger bewältigen oder Symptome lediglich abgeschwächt wahrnehmen zu können, sofern ein solches Vorgehen auch ethisch vertreten werden kann. Ein grundsätzlich verändertes Verhalten in VE erscheint nicht erstrebenswert, da das Zielen des Erkenntnisgewinnes für reale Arbeitssituationen grundsätzlich zuwiderlaufen würde.

Während Techniken der VR und die Nutzung einer VE nicht grundsätzlich unsicher sind, so können sich jedoch während ihrer Entwicklung und Nutzung Beeinträchtigungen und Gefährdungen ergeben. Zur Anwendung und Nutzung sollten daher für die Arbeitssituation geeignete Vorkehrungen getroffen werden. Sofern das noch nicht möglich ist, sollten zumindest Erfordernisse an eine Nutzung anderer ähnlicher Arbeitsmittel am Arbeitsplatz zur Abwehr von möglichen Gefahren herangezogen werden. Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen sollten folgende Phasen einschließen:

- die geplante Zielsetzung mit Einsatzszenario,
- die vorgesehene Nutzungspopulation,
- Auswahl von Techniken der VR,
- ihren Einsatz in VE,
- die programmtechnische Entwicklung von VE mit Testphasen vorab,
- eine "Inbetriebnahme" zur Nutzung für Arbeitsaufgaben unter variierenden Ausführungsbedingungen und
- mögliche Beeinträchtigungen durch Nachwirkungen für die Zeit des Übergangs in die Realität bzw. nach der Nutzung der VE.

Bei möglichen Nachwirkungen können solche mit kurzer und längerer Dauer unterschieden werden. Nachwirkungen zeigen sich auch als Beeinträchtigungen einer Hand-Auge-Koordination durch sensorische Störungen nach VE-Nutzung und ebenso nach Erfahrungen in Realität bei Aufnahme einer VE-Nutzung (z. B. DiZio et al. 2015, Kennedy et al. 2015, Rolland et al. 1995).

Mittlerweile tragen die meisten der kommerziell erhältlichen Techniken der VR Sicherheitswarnungen, die auf mögliche physische und psychische Beeinträchtigungen oder Gefährdungen hinweisen (Szpak et al. 2019). Das ist rückblickend sicherlich ein Fortschritt, bezogen auf die Maßnahmenhierarchie im europäischen Arbeitsschutz ist das eine Aktivität auf unterster Stufe. Inwieweit sie sowohl von den Beschaffern der Techniken als auch von allen Nutzern der VE zur Kenntnis genommen werden, ist unklar. Solchen Warnungen schließen auch Beeinträchtigungen und Gefährdungen durch direkte Nachwirkungen der Nutzung von Techniken der VR in VE ein.

Unmittelbar nach Beginn und unmittelbar nach Ende der Nutzung von VE passen sich Benutzerinnen und Benutzer den räumlichen Eigenschaften der virtuellen bzw. realen Umwelt neu an, weil das für Menschen als dynamische Lebewesen in Grenzen möglich und in Grenzfällen erforderlich ist. Währenddessen können Hand-Augen-Koordination, visuelle Wahrnehmung und das Gleichgewicht beeinträchtigt sein. Erforderliche Prozesse von Adaptation und Re-Adaptation können mit Symptomen der visuell induzierten Bewegungskrankheit (Simulatorkrankheit) einhergehen und zu Beeinträchtigungen von Entscheidungszeiten führen (Szpak et al. 2019).

Bisherige Untersuchungsergebnisse weisen auf Zusammenhänge mit einer entkoppelten Akkommodation (Anpassung der Brechkraft der Augenlinse an die Entfernung für scharfes Sehen) von der

Vergenz (entfernungsabhängiges Eindrehen der Augen) während der Interaktion in VE mit einem HMD hin (vgl. auch bereits Wilson 1996). Während Akkommodation und Vergenz in der Realität in der gleichen Tiefe auftreten, erfolgt in VE die Akkommodation in der Bildschirm- oder Linsentiefe und die Vergenz in einer der simulierten Tiefen für jeweilige Blickpunkte. Das Auge des Betrachters akkommodiert auf die Linse im HMD während die beiden präsentierten Abbildungen eine Brechkraft auf die simulierten Tiefenpunkte fordern. Grundsätzlich werden zwar Anpassungen durch Umgewöhnung von Benutzerinnen und Benutzer über die Zeit als möglich erachtet. Es fehlen einerseits spezifische Aussagen über Zeitdauer und erforderlich Anpassungsstrategien und andererseits können sich dadurch Verhaltensweisen in VE ergeben. Dadurch ändern sich allerdings auch die Aufgaben und damit die Belastung und als Konsequenz eine praxisrelevante Nutzung von Ergebnissen mindert. Schließlich können über einen Zeitraum und parallel dazu physischen und psychischen Beeinträchtigungen (z. B. visuell oder anders induzierte Bewegungskrankheit, verringerte Entscheidungszeiten) auftreten, die auch wiederum Anpassungsprozesse beeinträchtigen.

3.4.4 Wirkung auf das taktile Sinnessystem

Das taktile Sinnessystem kann in VE durch Interaktionen mit haptischen Geräten oder direkte Interaktionen einbezogen werden (Haans & Ijsselsteijn 2005). Ähnlich menschlichen Berührungen können virtuelle Berührungen verwendet werden, um auf Objekte in VE Druck auszuüben, sie zu bewegen (Perret 2012), kollaborative Aufgaben zu bearbeiten (Basdogan et al. 2000) oder um mittels Berührungen mit anderen Personen zu kommunizieren und/oder auf Distanz zu bleiben (Bailenson et al. 2007).

Etwas anders gelagert ist die Wirkung auf das taktile Sinnessystem bei direkter und indirekter Belastung durch Temperatur. Durch den Einsatz von Techniken der VR wie einem HMD während Interaktionen in VE kommt es zur Wärmebelastung, die auf den Kopf des Menschen wirkt und Einfluss auf seine Thermoregulation nimmt. In Untersuchungen von McAfee et al. (2020) konnten Anteile auf Konstruktion und Halterung sowie auf die Funktion von HMD bezogen werden. Flächen des Kopfes werden von der Halterung bedeckt und insbesondere Flächen um Augen und Nase stehen für eine natürliche Thermoregulation nicht mehr zur Verfügung. Dadurch und abhängig von der Art des HMD, durch HMD-eigene Energiequellen wie Funksender, Mikrocontroller oder sogar eingeschobene Smartphones entsteht Temperatur- bzw. Wärmebelastung.

Diese Wärmebelastung wird nicht oder nur begrenzt abgeleitet, führt zu einem Wärmestau zwischen HMD und Kopfhaut und beeinträchtigt mit steigender Nutzungsdauer das Komfortempfinden, regt die Schweißabsonderung an und kann dadurch die Linsen im HMD beschlagen lassen. Dadurch kann es zu Sichtbeeinträchtigungen mit dem HMD kommen, wodurch Einblendungen von Bewegungsgrenzen oder andere Informationen zu Warnungen vor Gefahrensituationen im virtuellen Raum übersehen werden können.

In Studien von McAfee et al. (2020) konnten Temperaturanstiege von 2,8 °C an der HMD-Oberfläche durch das Tragen ohne Funktion und von 5,6 °C durch das Tragen während des HMD-Betriebs ermittelt werden. Durch den zusätzlichen Einbau von Kupferflächen zur flächigen Wärmeausbreitung konnten Temperaturen gesenkt und das Komfortempfinden gesteigert werden. Solche Lösungen für eine verbesserte Wärmeleitung sind allerdings nicht standardmäßig in Geräten verbaut. Durch Temperaturveränderungen während des HMD-Einsatzes in VE kann es somit zu beeinträchtigenden Folgen psychischer Beanspruchung kommen, die dann einen Vergleich mit oder eine Vorhersage für Verhalten während Aufgabenbearbeitungen in RE deutlich schmälern würden.

3.5 Psychische Belastung und Wirkung auf das Verarbeiten von Informationen sowie das Umsetzen und Kontrollieren des Handelns

In der Literatur zu Techniken der VR oder zu Mensch-System-Interaktionen in VE wird "Wahrnehmen" (vgl. Kapitel 3.4) als besonderes Merkmal der Gestaltung und als Beginn des Prozesses menschlicher Informationsverarbeitung beschrieben. Ausführungen zu übrigen Prozessstufen der Informationsverarbeitung (Denken und Problemlösen) sowie Handeln (Umsetzung, Kontrolle, Rückmeldung) sind zwar hier weniger umfangreich, aber nicht minder relevant. Einige der relevanten Aspekte psychischer Belastung können implizit aus den Prozessbeginn "Wahrnehmen" abgeleitet oder als Konsequenz daraus ermittelt werden. Weitere Aspekte kommen hinzu, auf die hier nur kurz eingegangen wird um nicht viele der Literaturverweise zu wiederholen und da spezifische Hinweise aus der recherchierten Literatur auf nur das Verarbeiten von Informationen oder nur das Umsetzen und Kontrollieren des Handelns selten vorkommen.

Da es sich bei Simulationen mithilfe von Techniken der VR wie bei jeder anderen Simulation um eine Reduktion der Wirklichkeit handelt, ist die simulierte Realität möglicherweise weniger komplex, weil vereinfacht modelliert und die Anforderungen an die Informationsverarbeitung während Mensch-System-Interaktionen könnten dadurch sinken. Andererseits ändert sich die Belastung durch notwendigerweise unvollständig modellierte und simulierte und daher etwas anders zusammengesetzte und einwirkende VE. Andererseits führen dadurch gesteigerte Unterschiede zur RE dazu, dass gewohnte Verhaltensmuster zur Aufgabenbearbeitung in VE unpassend und nicht mehr zielführend sein könnten.

Wenn etwa in der Realität analoge Prozesse in VE als digitale Prozesse modelliert und simuliert werden, verändern sich dadurch auch meist durch Benutzerinnen und Benutzer geforderte Steuerungseingaben, Rückmeldungen durch das technische System und Zustandsbewertungen durch Personen. In Realität werden analoge Taster mit Tastenhub mit visuell, akustisch und haptisch kodierten Rückmeldungen zum Tastendruck geboten. Dagegen wird ein Taster in VE meist nur visuell repräsentiert, ggf. ist sogar ein Tastenhub visuell sichtbar. Auf eine multisensorisch kodierte Rückmeldung wird meist verzichtet, um den Modellierungsaufwand gering zu halten. Zum Auslösen eines Tasters wird meist ein Zeigegerät oder Controller verwendet, da sich darüber eine direkte Interaktion in der VE technisch weniger aufwändig modellieren lässt, als das mit einer natürlichen Hand- oder Fingerbewegung und einer dafür speziell zu entwickelnden sensorgestützten technischen Lösung der Fall wäre.

Modellierung und Simulation mithilfe von Techniken der VR beziehen sich vorrangig auf beobachtbare physikalische Vorgänge während Interaktionen des Menschen in der VE. Analysen und Modellierungen bezogen auf Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung wie z. B. Wahrnehmen, Denken und Handeln bleiben wenig informiert, assistiert und unterstützt. Da in der Konsequenz psychische Belastung nur wenig realitätsnah abgebildet wird, sind auch Schlussfolgerungen aus VE in ihrer Validität ebenso eingeschränkt wie ihre Relevanz für RE.

Auch bei Bewegungen von Personen in VE erscheinen Vergleiche mit RE grundsätzlich beschränkt, da zur Bewegungsteuerung in Realität sensomotorische Koordinationsleistungen erforderlich sind, die wiederum auf Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung angewiesen sind (z.B. zur Sicht auf Gehbereiche, Überlegungen zur Schrittrichtung oder -weite sowie zur Körperstabilisierung bei der Umsetzung von Schritten). Werden HMD als Techniken der VR verwendet, dann wird aus technischen Gründen der Reichweite oder räumlicher Gegebenheiten der Bewegungsraum beschränkt, der eigene Körper meist zur Vereinfachung nicht modelliert und simuliert. Häufig wird auf technische Steuerungsgeräte zur Ortsveränderung in VE zurückgegriffen, die mit Bewegungen in der Realität und damit verbundenen biomechanischen Körpervorgängen sowie Prozessen der

menschlichen Informationsverarbeitung tatsächlich wenig gemeinsam haben. Es sind vielmehr gelegentlich sehr ungewöhnliche Handhabungen bei Handlungsumsetzung und -kontrolle mit VR-Controllern zur Anwahl von Tastern zu sehen, die auf eine zusätzliche psychische Belastung durch den Einsatz von Techniken der VR hinweisen. Die Bearbeitung von Aufgaben in VE, d. h. einem reduzierten Modell der RE, findet mit anderen kognitiven Strategien und Prozessen der Handlungsumsetzung statt, da sich eine natürliche oder eine vereinfacht modellierte Bewegungssteuerung an anderen Dynamiken orientiert (Stanney 1995). Bei diesen Dynamiken handelt es sich um eine jeweils unterschiedliche Ausführungsbedingung und damit psychische Belastung.

3.6 Psychische Belastung und Wirkung auf soziale Interaktionen

Im vorliegenden Zusammenhang bekommt zwar der psychosozialen Belastung bzw. der Wirkung auf das Sozialverhalten eine besondere Bedeutung zu, allerdings bleibt dieser Aspekt wegen der vorrangigen Nutzung von VE durch Einzelpersonen häufig unberücksichtigt und spiegelt allein deshalb nicht immer realitätsnahe Arbeitssituationen wider.

Verschiedene Situationen zur Aufgabebearbeitung in VE werden auch herangezogen, um die Wirkung der psychischen Belastung in VE auf das Sozialverhalten zu untersuchen. Manche Untersuchungen zielen darüber hinaus auf Vergleiche mit RE ab oder streben diese an. Bei den Studien stehen allerdings *tatsächliche* Ursache-Wirkungsbeziehungen eher weniger im Interesse als viel mehr phänomenologische Betrachtungen von *möglichen* Effekten.

In ihrer Übersicht weist Stanney (1995) auf noch nicht umfangreich aufgearbeitete soziale Interaktionen und Konsequenzen durch den Einsatz von Techniken der VR, während und nach dem Arbeiten in VE und bezogen auf verschiedene Effekte für das Individual- und Sozialverhalten hin. Sie empfiehlt soziale Interaktionen gezielt zur realitätsnäheren Gestaltung von VE einzubeziehen um beeinträchtigende Folgen durch VE zu reduzieren. Inwieweit Erkenntnisse daraus dann auch in reale Situationen übertragen werden können, wäre eine weitere Untersuchungsschritt hin zur realitätsnahen Simulation und hin zur Gestaltung von VE für natürlich vorhandenes Sozialverhalten.

In einer Übersicht zu Entwicklungsrichtungen von VE weisen Sharples et al. (2007) darauf hin, dass direkte Interaktionen von Techniken der VR oder Interaktionen in VE häufig mit lediglich einer Person betrachtet werden. Mangels Kommunikationspartnern in VE treten dadurch in VE auch eher keine Kommunikations- und Interaktionsprozessen mit anderen Personen auf. Das begrenzt viele in VE simulierte Arbeitsprozesse nicht nur bezogen auf ihre Realitätsnähe, Effekte des Sozialverhaltens ergeben sich dann auch einfach nicht aus den in ihrer Komplexität modellierten und simulierten Settings, so dass wie weder erfasst noch berichtet werden und auch das Erfordernis ihrer Relevanz in Vergessenheit geraten könnte. Zumindest in Forschungsszenarien ergeben sich für durch Techniken der VR und insbesondere auch mit HMDs bereits Möglichkeiten der Interaktion von mehreren Personen in derselben VE. Dadurch bieten die gestaltbaren und replizierbaren Möglichkeiten einer VE ein geeignetes Setting zur Untersuchung von sozialen Interaktionsprozessen zwischen Personen, aber auch zwischen mehreren Personen und technischen Artefakten oder technischen Anlagen.

Einen Einblick in die Möglichkeiten und Grenzen von VE im sozialwissenschaftlichen Kontext bieten Fox et al. (2009) und gehen dabei auf Techniken der VR, Auswirkungen von VE auf menschlichen Verhalten aber auch auf spezielle Themen wie z. B. Avatare und interaktives, multisensorisches Feedback, nonverbales Verhalten und soziale Interaktion ein. Schließlich werden thematisch relevante Forschungstrends vorgestellt.

4 Weitere Erkenntnisse einzelner Studien

4.1 Relative Vergleichen zwischen VE und RE

Im Folgenden werden Einzelergebnisse aus Studien vorgestellt, in denen Aktivitäten in VE mit solchen in RE verglichen werden. Daraus sollten Erkenntnisse der Vergleichbarkeit, der Übertragbarkeit und auch der Belastung durch Techniken der VR sowie in VE im Vergleich zu RE abgeleitet und auch abgeschätzt werden können, wie reliabel und valide die Ergebnisse sind und inwieweit eine Generalisierbarkeit der Erkenntnisse möglich ist.

In einem Vergleich von Trainings zur Knochensezierung mit realem Gewebe und mit Techniken der VR modelliertem und simuliertem Gewebe wurde während der Trainings mit simuliertem Gewebe anhand von Reaktionszeittests auf eine relativ geringere kognitive Beanspruchung geschlossen (*Anderson et al. 2016*). Ursachen für eine relativ geringere Beanspruchung wurden in etwas strukturierteren Vorgaben zur Sezierung durch die Simulation, durch nur indirekte Eingriffe in das Gewebe beim Bohren und eine geringere Darstellungskomplexität mangels Visualisierung von Blutungen und Knochenstaub vermutet. Das veranlasst die Autoren zu der Empfehlung Trainings in VE solchen in RE voranzustellen, da so insbesondere Novizen relativ beanspruchungsreduziert an die Arbeiten herangeführt werden könnten. Inwieweit die verwendeten Reaktionszeittests tatsächlich valide Aussagen über kognitive Beanspruchung erlauben, kann anhand der Studie nicht nachvollzogen werden. Ebenso gibt es leider auch keine Informationen darüber, inwieweit sich die Trainings in Effekten für die Sezierungsqualität und einem Erkenntnisgewinn durch Training unterscheiden und konnte entsprechend nicht in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden.

Einen Vergleich zwischen VE und RE führten *Duffy und Chan (2002)* zum Einfluss industrieller Beleuchtungsbedingungen auf Augenermüdung und visuelle Leistung durch. Bei vergleichbare visualisierten Arbeitsszenarien und absoluten Leuchtdichten auf einem Bildschirmgerät und in der VE führte eine ausgeschaltete im Vergleich zur eingeschalteten Raumbeleuchtung nur in der VE zu höherem Empfinden von Augenermüdung und zu geringerer visueller Leistung. Eine Visualisierung von Arbeitsbedingungen auf Bildschirmgeräten kann daher nicht einfach auf die Modellierung und Simulation mit Techniken der VR übertragen werden. Ein Einfluss der Raumbeleuchtung in VE ist für intendierte Arbeitsbedingungen zu erfassen und spezifisch für die Nutzung in VE und ggf. auch bezogen auf Arbeitsschutzanforderungen zu gestalten.

Verfahren zur neuropsychologischen Diagnose können als Papierversion, computergestützt oder VE-gestützt präsentiert werden. Eine Meta-Analyse von *Negut et al. (2016)* untersuchte differenzielle Auswirkungen auf Diagnosen bezüglich Gedächtnisfunktionen und exekutiver Aufgabenleistung. Während die Diagnosen auf der Grundlage der VE-gestützten Verfahren grundsätzlich von einer relativ stärkeren Beeinträchtigung ausgehen, führen besonders solche Verfahren zur Analyse von exekutiver Aufgabenleistungen zu schlechteren Ergebnissen. Es wird vermutet, dass eine andere Repräsentation der Aufgaben in VE dazu führen könnte, dass Analysen bezogen auf Aufgabeninhalte und -steuerung andere und höhere Anforderungen an die neuropsychologische Verarbeitung stellen. Mögliche Unterschiede in Gestaltungsvarianten der Verfahren wurde nicht spezifisch analysiert. Hinweise auf letztere wären allerdings erforderlich, um nach einer hier interessierenden Anpassungsgestaltung valide Diagnoseergebnisse auch VE-gestützt präsentierte Verfahren zur neuropsychologischen Diagnostik erhalten zu können.

Inwieweit sich Studienergebnisse von VE in RE übertragen lassen, war die Ausgangsfrage der Untersuchungen von *Hu et al. (2011)*. Während Beschäftigte aus der industriellen Fertigung Bohraufgaben an einem industriellen Arbeitsplatz in RE und in VE bearbeiteten, wurden die Tätigkeiten nach ergonomischen Anforderungen analysiert. In VE kam es zu relativ höheren Beeinträchtigungen be-

zogen auf das Komfortempfinden und das Anstrengungsempfinden sowie zu stärker beeinträchtigenden Körperhaltungen, weniger kraftschonenden Arbeitsweisen und längeren Bearbeitungszeiten. In der Studie wurden einerseits Vorteile des Einsatzes von VE etwa in der prospektiven Gestaltung von Arbeitsplätzen und für ergonomische Analysen herausgestellt, aber andererseits auf Probleme eines unkritischen Transfers von Ergebnissen aus VE nach RE und insbesondere der dadurch möglichen kontraindikativen Konsequenzen für die Beschäftigten hingewiesen.

Mögliche differenzielle Auswirkungen der Aufgabenbearbeitung mit handgehaltenen Anzeigen und mit kopfgetragenen Anzeigen (z. B. Tablets und HMD) wurden in Studien von *Pfendler und Widdel (2004)* untersucht. Dabei ergaben sich für virtuelle Darstellungen über das HMD durchgängig höhere Bearbeitungszeiten, eine schlechtere Bearbeitungsqualität und höhere Bewertung von Symptomen der visuell induzierten Bewegungskrankheit während der Aufgaben zur militärischen Analyse von simulierten Gefahrenlagen. Für die Effekte werden auch Unterschiede in der Aufgabenbearbeitung (z. B. Intensität der Einbindung) durch die Techniken vermutet, was darauf hinweist, dass sich zwar nicht die Aufgaben, aber die Bedingungen zur Bearbeitung der Aufgaben in Form von unterschiedlichen Arbeitsmitteln (z. B. Tablets und HMD) sowie auch damit einhergehenden Prozessen der Informationsverarbeitung (z. B. Auswahl eines Anzeigebereichs) unterscheiden. Eine Übertragung von Erkenntnissen, die aus unterschiedlichen Bedingungen zur Aufgabenbearbeitung gewonnen werden, können nicht unbedingt übertragen werden.

In einer Studie zur Belastungsdauer untersuchten *Shen et al. (2019)* Büroarbeit in RE und in VE über jeweils 8 Stunden. Leistungsergebnisse aus einem psychomotorischen Vigilanztest werden als Anstiege für beeinträchtigende Folgen psychischer Beanspruchung (z. B. Formen psychischer Ermüdung) im Verlauf über Abschnitte der Bearbeitung von vier einfachen Büroaufgaben interpretiert. Die Autoren vermuten anhand der Ergebnisse auch, dass das Beeinträchtigungsniveau durch regelmäßige Arbeitsunterbrechungen positiv beeinflusst werden kann. Eine Bewertung der methodischen Umsetzung der Studie sowie der ermittelten Ergebnisse und vorgenommenen Interpretationen kann leider nicht erfolgen, da sie mangels ausreichend detaillierter Informationen nicht möglich ist.

Eine Analyse von potenziellen Mängeln der ergonomischen Gestaltung von Bildschirmarbeit wurde in der Studie von *Gude (2004)* mithilfe unterschiedlicher Techniken der VR zur Visualisierung durchgeführt. Verglichen wurden Analyseergebnisse für Simulationen von Szenarien zu ergonomischer Gestaltung von Bildschirmarbeit mithilfe einer stereoskopischen Visualisierung mit einem Projektionstisch, einer Brille und einem HMD. Zusätzlich wurden diese Analysen mit dem Einsatz in RE verglichen. Die Beurteilungsleistungen anhand einer Checkliste waren über alle Bedingungen der VE und RE ähnlich hoch. Zur Bearbeitung der Checkliste in RE wurde relativ weniger Zeit benötigt als in den VE. Die Beurteilungszeiten unterschieden sich zwischen den VE-Bedingungen immer dann, wenn ein Mangel der ergonomischen Gestaltung von Bildschirmarbeit tatsächlich vorhanden aber nicht sehr offensichtlich war. In solchen Situationen wurde möglicherweise zur Absicherung von Beurteilungen eine genauere und zeitlich umfangreichere Inspektion durchgeführt als das in RE erforderlich war. Für solche Situationen wurde vom HMD über die VR-Brille bis hin zum Projektionstisch mehr Zeit zur Beurteilung aufgewendet. Beurteilungen klarer und offensichtlicher Gestaltungslösungen nach Anforderungen aus der Checkliste wurden über die VE etwa vergleichbar schnell bearbeitet; wenn auch etwas langsamer als in RE. *Gude (2004)* weist abschließend nicht nur darauf hin, dass zeitliche Vorteile von RE gegenüber VE offensichtlich sind. Er fügt auch hinzu, dass ein zeitlicher Mehraufwand während der o.g. Nutzung von Techniken der VR einen Teil der zeitlichen Vorteile dieser Techniken für die digitalisierte Modellierung und Simulation in der prospektiven Gestaltung aufzehrt. [Oder umgekehrt, zeitliche Vorteile einer prospektiven Gestaltung mithilfe von Techniken der VR durch längere Beurteilungszeiten mithilfe von Techniken der VR reduziert werden.]

In industriellen Arbeitsszenarien wurde das Palettieren von Beschäftigten in RE und in VE verglichen und dabei festgestellt, dass die Bearbeitung nur hinsichtlich einiger Bewegungen, nicht aber bezogen auf Bewegungsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen verglichen werden konnten (Whitman et al. 2004). Letztere erwiesen sich in VE als deutlich niedriger als in RE. Ursachen wurden in technischen Leistungsgrenzen der verwendeten Techniken der VR und der Bewegungsdetektion sowie in einer ungleichen Gestaltung von sensorischem Feedback in RE im Vergleich zu dem in VE gesehen.

In einer Studie zur Unterstützung des Physikunterrichts durch Techniken der VR (Crosier et al. 2000) zeigten sich nicht die erwarteten Auswirkungen in einer Unterrichtssituation mit Schülerinnen und Schülern, da zwar eine erwünschte, aber nicht eine didaktisch geeignete Nutzung von VE während des Gestaltungsprozesses entwickelt wurde. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass lediglich der Teil der Schülerinnen und Schülern, die bereits Strategien zum freien Erarbeiten von Inhalten erworben hatten, von der VE-gestützten Unterrichtssituation profitieren konnten. Beide Aspekte wurden für eine Überarbeitung der VE priorisiert und trugen auch zur Entwicklung eines Human Factors-Konzepts zur strukturierten Entwicklung von VE bei (Eastgate et al. 2015).

Auch wenn VE häufig auf visuelle Simulationen fokussiert, können sensomotorische Fertigkeiten des Golfspielens in VE vergleichbar wie in RE erlernt und einige erworbene Fertigkeiten auch nach RE transferiert werden (aber nicht unbedingt umgekehrt) (Harris et al. 2020c). Nicht erfahrene Golfspieler konnten sich erste spezifische Fertigkeiten in VE aneignen und in RE transferieren. Bei erfahrenen Golfspielern gelang das nicht, möglicherweise, da ein Großteil ihrer sensomotorischen Fertigkeiten bereits auf einem höheren Niveau liegen, sie sehr sensibel auf kleine Unterschiede zwischen RE und VE reagieren und auch die Gefahr für negativen Transfer bestehen kann. Das kann passieren, wenn sich z. B. durch Einbau von Sensorik in den Schläger das Schlägergewicht verändert und dadurch eine geänderte sensomotorische Kontrolle der Bewegungssteuerung durch die Spielerin bzw. den Spieler erforderlich wird. Harris et al. (2020c) empfehlen vor intendierten Fertigkeitstrainings in VE mit Transferabsicht Analysen zu detaillierten Bestandteilen von Aufgaben und Bearbeitungsprozessen, die über allgemeine oberflächliche Anforderungen und Augenscheinvalidität hinausgehen müssen (Harris et al. 2019). Detaillierte Analysen von Arbeitsaufgaben und Bedingungen zu ihrer Ausführung im Kontext eines Arbeitssystems sollten somit für Entwicklungen von VE vorausgesetzt werden, damit eine Grundlage für mögliche Transfereffekte in RE geschaffen werden kann (vgl. auch Eastgate et al. 2015).

Zwei Gruppen von unerfahrenen Schweißern trainierten zu 50% in VE oder zu 100% in RE erforderliches Wissen und Fertigkeiten in 80 Stunden über zwei Wochen für ein mögliches Zertifikat (Stone et al. 2011). Die VE-Gruppe konnte für eine begrenzte Zeit innerhalb des Trainings einen speziellen Schweißsimulator nutzen. Aus dieser Gruppe schlossen ca. 40% mehr als aus der RE-Gruppe mit einem Zertifikat ab. Das Zertifikat bezog sich auf positive Bewertungen verschiedener Aufgabenstellungen des realen Schweißens. Die Erfolge in der Studie werden von den Autoren zwar generell einem VE-Training zugeschrieben, allerdings wird auch angedeutet, dass das eingesetzte und mit Techniken der VR unterstützte Trainingssystem zum Schweißen spezielle Techniken besonders förderte. Solche Hinweise und eine kritische Durchsicht des methodischen Aufbaus der Studie legen allerdings nahe, dass die Schweißer in der RE-Gruppe und jene in der VE-Gruppe nicht vergleichbar gefördert wurden. Eine Interpretation der Ergebnisse als Nachweis eines besseren VE-Trainings im Vergleich zum RE-Training, ist somit nicht möglich, da es sich ja tatsächlich um inhaltlich unterschiedliche Trainings handelte. Die Anlage der Studie von Stone et al. (2011) ist methodisch nicht zur Untersuchung der Fragestellung geeignet und die ermittelten Ergebnisse sind weder valide noch plausibel.

Mit dem Ziel potenzielle Ermüdung durch Gesten während Interaktionen in VE zu bewerten, stellen *Ahmed et al. (2017)* mögliche Dimensionen aus internationalen Standards und Methoden zur biomechanischen Analyse und zum subjektiven Bewegungsempfinden zusammen. Daten werden mithilfe dieser Methoden in VE und in RE ermittelt und verglichen. Die Stichprobe zeigte insgesamt eine höhere Dauer der Aktivitäten in VE und weist auch auf eine höhere Ermüdung durch Gesten in VE hin. Nach erfolgloser Suche für mögliche Ursachen vermuten die Autoren unbekannte Unterschiede in der Abbildung der RE in der VE. Auch wenn die Einschätzungen zur empfundenen Ermüdung auf eine eher hohe Übereinstimmung zwischen RE und VE hindeuten, zeigen sich nur geringe Übereinstimmungen der biomechanisch orientierten Analysenverfahren für vergleichbare Aktivitäten in VE und in RE, die auf eine mangelnde Vergleichbarkeit von VE und RE hinweisen könnten. Eine systematische Validierung des Vorgehens wurde allerdings noch nicht durchgeführt und insofern sind auch noch keine aussagekräftigen Bewertungen zu den präsentierten Vergleichen möglich. Nachfolgende Untersuchungen zur Ursachenidentifikation möglicher Unterschiede zwischen RE und VE wären dann auch für eine sichere und gesunde Gestaltung von VE relevant, die sich aber nicht auf offensichtliche Unterschiede beschränken sollte, sondern auch jeweils Verhaltenskonsequenzen für die Betroffenen einbeziehen sollte, sofern wie bei *Ahmed et al. (2017)* Formen der Ermüdung als beeinträchtigende Folgen der Beanspruchung erfasst werden sollen.

Inwieweit durch VE auch emotionale Reaktionen erzeugt werden können, ist Gegenstand der Studie von *Alsina-Jurnet et al. (2007)* zu Prüfungsangst, gegen die zukünftig Interventionsmaßnahmen entwickelt werden sollen, die auch in der Realität wirksam sein sollen. Zwei mit niedriger bzw. hoher Prüfungsangst diagnostizierte Studentengruppen wurden nach den Diagnosen unterschiedlichen VE ausgesetzt (z. B. eigene Wohnung, U-Bahn, Hörsaal für Prüfungen), die Prüfungsangst auslösende Elemente beinhalteten. Nach den Expositionen zeigten sich erwartungskonform niedrige und hohe Ausprägungen für Angst und Depressionen für die beiden Gruppen. Die Aussagekraft der Studie erscheint offen, selbst wenn von Prüfungsangst nicht als Persönlichkeitseigenschaft, sondern als zeitlich oder situativ variierendem Zustand ausgegangen wird. Die Studie könnte wie von *Alsina-Jurnet et al. (2007)* geplant zur Entwicklung einer Therapie unterstützt durch Techniken der VR zur Behandlung von Prüfungsangst mit weiteren in die VE integrierten Elementen hilfreich sein.

Untersuchungen von *Arthur et al. (1997)* gehen der Frage nach, ob sich räumliche Repräsentationen in VE für Menschen ähnlich darstellen wie in RE oder ob sie möglicherweise anders wahrgenommen und damit repräsentiert werden müssen, damit sie mit RE vergleichbar sind. Eine räumliche Konstellation von Objekten konnte in RE sowie monokular und binokular in VE betrachtet werden, bevor relative Abstände zwischen den Objekten zu bewerten waren. Da das Situationsmodell aus der Interaktion in VE zu keinen anderen Einschätzungen wie aus Interaktion mit realen Objekten führte, sich wohl aber von den monokularen Betrachtungsbedingungen unterschied, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass räumliche Repräsentationen in VE mit denen in RE grundsätzlich vergleichbar sind.

Beim Schätzen von Entfernung, Größe und Form in VE und in RE, wie sie z. B. für zielsicheres Greifen, für das Navigieren in engeren Räumen oder allgemein zur Raumorientierung erforderlich sind, kommt es im egozentrischen Bereich zu stärkeren Überschätzungen in VE als in RE (*Bingham et al. 2001*). Wesentliche Komponenten beim Schätzen sind Sichtkontakt, Bewegung zum Ziel mit Beobachtung der Bewegung sowie visuelles und haptisches Feedback während des Prozesses. Durch die Studien konnte die wichtige Rolle der Vergenz für eine sensomotorische Steuerung und als wesentliche Ursache für Schätzfehler in VE wegen des Akkommodations-Vergenz-Konflikts ermittelt werden.

Bei Vergleichen von RE und VE wiesen *de Kort et al. (2003)* auf einige Aspekte hin, die zwischen beiden Umgebungen kompatibel sind und auf andere Aspekte hin, die inkompatibel sind. Auch in ihren Untersuchungen zeigte sich eine Überschätzung von egozentrischen Entfernungsschätzungen

in VE. Darüber hinaus wiesen sie auf eine relativ ungenauere mentale Repräsentation in der VE hin, die auch Orientierung und Navigation in VE beeinträchtigen kann. Als ursächlich vermuten sie eine in VE durch Steuerungsgeräte unterstützte Raumnavigation sowie ein eingeschränktes Sichtfeld in VE durch HMD. Navigation und Sicht sind in RE freier und können deutlich weniger eingeschränkt und direkt erfolgen. Insgesamt kann daher nicht immer davon ausgegangen werden, dass durch Untersuchungen in VE auch tatsächlich RE valide repräsentiert werden.

Untersuchungen von *Deng und Interrante (2019)* konnten empirisch zeigen, dass natürliche Interaktionsprozesse in VE beeinträchtigt werden, wenn etwa HMDs in VE nicht für die Körperhöhe der Benutzerinnen und Benutzer kalibriert sind. Toleranzgrenzen sind grundsätzlich nach oben geringer als nach unten, variieren abhängig von Detektionsmethoden und sind insbesondere abhängig von Aufgabenstellungen in VE.

Differenzielle Beurteilungen von Produkteigenschaften in RE und in VE wurde von *Felip et al. (2020)* vorgenommen. Probanden wurden gebeten verschiedene Stühle mit Armlehnen mit Adjektiven (z. B. schön, langweilig, schwer) in RE und in VE zu bewerten. Trotz sehr ähnlicher Ergebnisse für RE und VE werden die Ergebnisse so interpretiert, dass es zu positiveren Bewertungen der Produkte in VE gekommen ist. Einschränkend wird auf die kleine, junge Stichprobe von Probanden ohne Erfahrung mit VE hingewiesen. In der vorgelegten Studie von *Felip et al. (2020)* kann vermutet werden, dass die Faszination der Probandenstichprobe für die VE die Produktbewertung beeinflusste. Zusätzlich verdeutlichen die Illustrationen in der Publikation, dass mit den Produkten in RE ganz andere Interaktionsprozesse (z. B. sitzen, anfassen) als in VE möglich waren, ein Vergleich der realen und virtuellen Repräsentationen auf unterschiedlichen Bewertungsmaßstäben beruhen würden und die Studie daher weder methodisch den intendierten Fragestellungen angemessen umgesetzt ist noch valide Ergebnisse liefert und damit auch nicht aussagekräftig ist.

Informationsverarbeitungsprozesse des Menschen werden in VE durch nicht im HMD individuell angepassten Pupillenabstand beeinträchtigt. *Kim und Interrante (2017)* konnten zeigen, dass ein zu klein bzw. zu groß eingestellter Millimeterabstand zu größer bzw. deutlich kleiner eingeschätzten Objektgrößen führte. Allerdings wurde in der VE keine Interaktion mit der eingestellten Augenhöhe offensichtlich, die bei zu geringen Höhen zu einer Überschätzung egozentrischer Entfernungen führt.

In Studien von *Ng et al. (2012)* wurde der Einfluss von Industrierobotern auf menschliches Verhalten in VE und in RE untersucht, das etwa bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten auch sicherheitsrelevant werden kann. Vergleichbar für Arbeitsszenarien in VE und in RE waren Einschätzungen zu Stillstandszeiten von Robotern, während denen dann auch Wartungsarbeiten in einer Roboterzelle am Roboter durchgeführt werden konnten. Deutliche Unterschiede ergaben sich allerdings bei den Einschätzungen zur maximalen Reichweite von Roboterarmen. Dieses Ergebnis entspricht bisherigen Erkenntnissen, nach denen egozentrische Entfernungen zu Objekten sowohl in VE als auch in RE unterschätzt werden, aber die Fehler in VE größer ausfallen als in RE.

In Untersuchungen von *Nickel (2020; siehe auch Nickel et al. 2012a,b)* wurden absolute und relative Einschätzungen zu Objektgrößen, Farben und Graustufen in Roboterzellen in VE und in RE untersucht. Für VE und RE ergaben sich Schätzfehler für Farben und Größen. Fehleinschätzungen zu Farbunterschieden stiegen dabei von Primär-, über Sekundär- zu Tertiärfarbvergleichen an, waren aber in VE deutlich stärker ausgeprägt. Ein vergleichbares Ergebnis lieferten Fehleinschätzungen zu Graubstufungen von 30 % und mehr, 20 %, sowie unter 10 %. Die absoluten und relativen Größeneinschätzungen waren vergleichbar schlecht für Objekte unterschiedlicher Proportionen aus Länge, Höhe und Breite (Holzlatten) sowohl in VE als auch in RE. Bei größeren Volumenkörpern (z. B. Raum, Roboter, Kisten) ergaben sich zwar auch wieder in VE und in RE Schätzfehler. Fehleinschätzungen waren dafür aber höher ausgeprägt in VE und für relative Einschätzungen nochmal

größer als für absolute Einschätzungen. Grundsätzlich wurden die Einschätzungen in VE als beanspruchender empfunden als in RE, was zumindest teilweise auf ein erhöhtes Frustrationsempfinden bei misslingenden Einschätzungen in VE zurückgeführt werden konnte. Weitere Ursachen der für VE und RE unterschiedlichen Ergebnisse könnten auch in weiteren Faktoren psychischer Belastung wie etwa der Qualität der Informationsdarstellung zu finden sein (z. B. Auflösung, Bildschärfe, geringere absolute bei vergleichbarer relativer Leuchtdichte). Von einer unkritischen Übertragung von Erkenntnissen aus VE in RE wird abgeraten und eine genaue Analyse beider Umgebungen angeraten um Unterschiede aufzudecken.

Unterschiedliche Automatisierungsgrade der Aufgabenbearbeitung in Kombination mit verschiedenen Modi zur Signalisierung von Anforderungen für die Interaktion zwischen einem einzelnen menschlichen Beschäftigten und zwei simulierten Industrierobotern wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Aufgabenerfüllung und psychische Arbeitsbeanspruchung von *Kaufeld und Nickel (2019)* untersucht. Die Industrieroboter forderten entweder Interaktion an, wenn dies erforderlich war oder passten solche Aufforderungen zur Interaktion an Leerlaufzeiten zwischen einzelnen Aufgaben der Beschäftigten an. Die Aufforderung zur Interaktion wurde entweder audiovisuell angezeigt oder nicht. Angezeigte und an den Prozess der Aufgabenbearbeitung angepasste Interaktionen führten zu einer relativ geringen Ablenkung von der Aufgabenerfüllung und zu einer relativ geringeren Arbeitsbeanspruchung. Durch diese Studie in VE kann von einer verbesserten Mensch-Roboter-Interaktion ausgegangen werden, wenn Interaktion audiovisuell angezeigt werden und die Interaktionen mit technischen Anlagen an Prozesse der Aufgabenbearbeitung von Beschäftigten angepasst werden. Grundsätzlich ähnliche Ergebnisse können zwar auch für reale Arbeitssituationen erwartet werden, das wurde aber in der Studie von Kaufeld und Nickel (2019) nicht untersucht.

Untersuchungen in VE wurden durchgeführt, um potenziell gefährliche Arbeitsprozesse zu untersuchen. So wurde der Einfluss von unterschiedlicher Distanz zu einem Roboter und Geschwindigkeit eines Roboters und Vorhersehbarkeit von Bewegungsbahnen des Roboters auf die Aufgabenbearbeitung von Beschäftigten an so genannten Mensch-Roboter-Kollaborationen untersucht und Auswirkungen auf die Aufgabenbearbeitungsleistung sowie psychische Beanspruchung ermittelt (*Naber et al. 2013, 2014, Koppborg et al. 2017*). Dadurch ergaben sich erste Grenzbereiche für Distanzen, Geschwindigkeiten und für die Autonomie von Roboterbewegungen in Arbeitsszenarien in VE. Dass es auch unter realen Arbeitsbedingungen Grenzbereiche für diese Parameter geben wird, erscheint wahrscheinlich. Inwieweit sie in RE in ähnlichen Bereichen liegen, wurde in den genannten Studien nicht ermittelt.

Eine Übersicht von *Paljic (2017)* stellt verschiedene Untersuchungen zum Thema der ökologischen Validität bei Vergleichen von VE und RE vor. Ökologische Validität entspricht häufig einer Vergleichbarkeit der Umwelt, der Außensicht oder des Augenscheins und wird in Studien mit Techniken der VR genutzt, um die realitätsnähe und ggf. Übertragbarkeit von Erkenntnissen nahezulegen. Entwicklungen von VE orientieren sich meist an realen Vorbildern und legen damit bereits ökologische Validität nahe. Ökologische Validität sollte aber auf der Basis von Vergleichsmethoden abgeschätzt werden. Da Dimensionen, auf denen sich Vergleichbarkeit abbilden kann, nicht vereinheitlicht sind, sind auch Aussagen über ökologische Validität wenig aussagekräftig, da jeweils neu und willkürlich festgelegte Kriterien genutzt werden. Es dürfte grundsätzlich hilfreich sein, Kriterien mit Prädiktoren zur Bewertung von VE vor ihrer Entwicklung zu definieren. Damit wäre nach der Nutzung auch die Bewertung der ökologischen Validität möglich, wenn auch eine Generalisierung der Bewertungsergebnisse weiterhin offenbleiben dürfte.

Es scheint zwar möglich zu sein, räumliches Wissen aus Aktivitäten in VE nach RE zu übertragen und einiges davon auch abhängig von den geplanten Interaktionen in VE und RE zu erfassen. Unklar erscheint dabei allerdings noch unter welchen Bedingungen welche Aspekte übertragen und dann tatsächlich vergleichbar genutzt werden (*Péruch et al. 2000*).

Mithilfe von ausgewählten elektroenzephalographischen Daten und anderen psychophysiologischen Parametern sollten Verbindungen zwischen Hirnströmen und zielgerichtetem Verhalten im Abfahrtski in RE und in VE mit HMD, 2D-Simulation und mit Desktop untersucht werden (Petukhov et al. 2020). Dazu wurden während einer Reihe von Skifahrelementen (z. B. Geradeaus- und Kurvenfahrt) Daten aufgezeichnet und miteinander verglichen. In einem Szenario mit zielgerichtetem Verhalten konnten ähnliche EEG-Aktivitäten mit HMD-VE und RE ermittelt werden und das wird zum Anlass genommen, dass die verwendete Technik der VR realitätsnahes Verhalten anregt. Leider ist der Gegenstand der Untersuchung von Petukhov et al. (2020) nicht klar beschrieben, Methoden sind nicht darauf bezogen und die Ergebnisse erscheinen willkürlich und selektiv ausgewählt und interpretiert, so dass die Aussagen der Studie nicht nachvollziehbar sind und offenbleiben.

In Studien von Roberts et al. (2019) wurde VE als Untersuchungsumgebung zum Einsatz psychologischer Testverfahren ausgebaut. Vergleiche von Testungen in RE und VE zeigten vergleichbare Ergebnisse, die neben Anstrengungen zur Repräsentation der RE in der VE als Hinweis darauf gewertet wurden, dass sich die VE als Testszenario für computergestützte psychologische Testungen eignet. Eine Entkopplung von Effekten aus Techniken der VR und der VE wird allerdings als notwendig erachtet, um psychologische Testungen in VE ortsunabhängiger und systematischer anzuwenden. In der Studie von Roberts et al. (2019) wurden der psychologische Test auf einem Computerbildschirm, der PC, der Arbeitsplatz und der Arbeitsraum in dem der Test in RE durchgeführt wurde offensichtlich vergleichbar in VE modelliert und simuliert. Dieses Vorgehen erscheint für einen grundsätzlichen Vergleich von VE mit RE durchaus hilfreich, ist allerdings für die grundsätzliche inhaltliche Aussagekraft des eingesetzten Tests weniger aussagekräftig, da dazu eine psychologische Testentwicklungsstrategie entwickelt und umgesetzt werden müsste.

Menschliche Informationsverarbeitungsprozesse zu Höhenangst wurden in Studien von Simeonov et al. (2005) mithilfe von psychophysiologischen und biomechanischen Parametern sowie subjektiven Empfindungen verglichen. Einige in RE dokumentierte Effekte von Höhenangst (z. B. Veränderungen im Hautleitwiderstand, in der Herzfrequenz, in der Standfestigkeit, im empfundenen Absturzrisiko) konnten auch, wenn auch abgeschwächt, in VE erfasst werden. Daher wurde die Simulation mit Techniken der VR von Simeonov et al. (2005) als grundsätzlich unterstützend für die Entwicklung von Präventionsmaßnahmen im Arbeitsschutz eingeschätzt. Damit wird allerdings nicht gesagt, dass sich der Einsatz von Techniken der VR bei Präventionsmaßnahmen im Arbeitsschutz positiv auswirken könnten.

Insgesamt ist positiv zu beurteilen, dass einige Studien im Themengebiet Aktivitäten in VE mit solchen in RE vergleichen und versuchen, daraus Erkenntnisse für die Gestaltung von VE oder den adressierten Inhalt der Studie abzuleiten. Allerdings kann selbst aus den hier bereits mehrfach anhand von Relevanz und Qualität selektierten Quellen noch kein optimistisches Fazit gezogen werden. Weder sind VE und RE grundsätzlich vergleichbar, noch werden Untersuchungsstrategien angewandt mit denen eine mögliche Vergleichbarkeit reliabel und valide überprüft werden könnte.

Leider setzen sehr viel mehr und insbesondere mehr jüngere Studien VE (ohne Vergleiche mit RE) direkt als Untersuchungsszenario ein und stellen Ergebnisse so dar, als seien sie in jeder Art von Umgebung gültig, d.h. in VE mit jeglicher Kombination von Techniken der VR als auch in RE. Bei den in der vorliegenden Literaturrecherche ausgewählten und hier vorstellten Studien zeigt sich in einigen Fällen zusätzlich, dass der Wunsch nach einem sehr guten Ergebnis für die VE die Entwicklung, Durchführung, Auswertung und Ergebnisinterpretation leitete, d.h. einige Studienergebnisse sind bereits mangels Validität der Untersuchungsanlage nicht aussagekräftig. Aus der Mehrzahl der

in diesem Abschnitt vorgestellten Studien können jedoch bei methodenkritischer arbeitswissenschaftlicher Betrachtung hilfreiche Anregungen für Erkenntnislücken und Anforderungen an zukünftige Untersuchungen abgeleitet werden.

4.2 Human Factors/ Ergonomie zu Techniken der VR und zu Arbeitsprozessen in VE

Das Human Factors Konzept zur strukturierten Entwicklung von VE (vgl. *Kapitel 1.3*, siehe auch Eastgate et al. 2015) wird nicht nur seiner Bezeichnung gerecht. Es erlaubt auch Bezüge zu einer Arbeitssystemgestaltung, die sich am Primat der Aufgabengestaltung orientiert und den Prozess der Systementwicklung von der Analyse, über die Bewertung und Gestaltung sowie Evaluation des Systems einschließlich der Mensch-System-Interaktionen daraus ableitet. So sieht das Konzept erst im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess eine Auswahl möglicher Techniken der VR vor, u. a. um für die jeweiligen Aufgabenstellungen (z. B. Design-Review) auch solche Visualisierungstechniken auswählen zu können, die vorab spezifizierte Bewertungsprozesse tatsächlich unterstützen. In der Arbeitssystemgestaltung wird eine Arbeitsmittelwahl der Aufgabengestaltung nachgeordnet. Daher sollten Visualisierungstechniken nicht nur auf Techniken der VR beschränkt werden. Mit der Zielsetzung der recherchierten Literaturquellen geht es allerdings um Techniken der VR, so dass hier allein dadurch bereits ein alternativer Arbeitsmitteleinsatz wenig thematisiert wird. Zu manchen der vorgestellten Studien (vgl. *Kapitel 4.1*) wurde bereits angemerkt, dass die Wahl von Techniken der VR zu wenig oder gar nicht mehr kritisch diskutiert wird und damit die Gefahr besteht, einem sogenannten Kartoffel-Theorem (Breitenstein 1974) aufzusitzen. Eine Literaturrecherche zur Belastung durch den Einsatz von Techniken der VR und durch VE anhand von arbeitswissenschaftlichen Konzepten kann Möglichkeit einer mensch-zentrierten Gestaltung und einer aufgabenangemessenen Nutzung auch für den Arbeitsschutz aufzeigen.

In einer Übersicht stellt *Stanney (1995)* Anforderungen aus Human Factors/ Ergonomics an Techniken der VR zusammen, die auf zu bearbeitende Aufgaben, die menschliche Leistungsfähigkeit und den Arbeitsschutz bei Interaktionen in VE bezogen werden. Als Voraussetzung für den Einsatz von VE rät die Autorin dazu, anhand von Analysen zu geplanten Aufgaben möglichst früh festzustellen, inwieweit eine Aufgabebearbeitung durch Techniken der VR unterstützt werden kann. Bezogen auf menschliche Leistungsfähigkeit sollte dann z. B. auf die Erfahrung mit Techniken der VR und auf mögliche Einschränkungen durch Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit (z. B. Unterschiedsschwellen) geachtet werden. Prozesse visueller Informationsverarbeitung werden z. B. durch künstliche Begrenzungen des Blickwinkels mit HMD beeinträchtigt, auditive sowie haptische Informationsverarbeitung können mangels angemessener technischer Repräsentationen und Gestaltung bisher nur rudimentär unterstützt werden. Bezogen auf den weiteren Prozess der Informationsverarbeitung des Menschen kann auch davon ausgegangen werden, dass Aufgaben in RE und in VE mit unterschiedlichen kognitiven Strategien und Prozessen bearbeitet werden, die sich an einer natürlichen oder an einer vereinfacht modellierten Bewegungssteuerung mit anderen Dynamiken orientieren muss. Umsetzungen zu realitätsnaher multimodaler Repräsentation sollte ausgebaut werden. In der Übersicht beziehen sich Arbeitsschutzaspekte auf direkte und indirekte Beeinträchtigungen durch die Nutzung von VE (z. B. Krämpfe durch Flimmern, Phobien, überhöhte Schalldruckpegel, Zwangshaltungen, Verletzungen durch Blindbewegung mit HMD, Nachwirkungen, visuell induzierte Bewegungskrankheit). Schließlich verweist die Autorin der Übersicht auf noch nicht aufgearbeitete soziale Auswirkungen von VE (z. B. Verhaltenskonsequenzen während und nach Nutzung, Effekte für Individual- und Sozialverhalten; siehe auch *Kapitel 3.6*), die in die Analyse und Gestaltung von Techniken der VR als auch von VE einbezogen werden sollten.

Kognitive Faktoren beziehen sich bei Techniken der VR und dem Einsatz von VE auf Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung während Mensch-System-Interaktionen (*Wickens & Baker 1995*). Die Qualität von Techniken der VR und einer VE kann anhand der Faktoren Dimensionalität, Bewegung, deren Dynamik, Interaktion, Referenzrahmen und Multimodalität beschrieben werden. Mit den detaillierten Erläuterungen wird klar, dass sich dadurch gleichzeitig Ansatzpunkte für Analyse, Gestaltung und Evaluation von VE ergeben. Nicht alles muss neu entwickelt werden, denn viele Erkenntnisse, Empfehlungen und Erfahrungen aus Human Factors sind vorhanden, die wiederum zielgerichtet für die Entwicklung von Problemlösungen der integriert werden können. Grundsätzlich wird zu einer Zusammensetzung oder Entwicklung von VE erst nach durchgeführten Aufgabenanalysen mit ihren informatorischen Bestandteilen (Wahrnehmung, Denken und Entscheiden, Handlungsumsetzung und -kontrolle, Rückmeldung) geraten, da so eine zielgerichtete Gestaltung zu Inhalten der präsentierten Faktoren möglich ist und auch einer gezielten Evaluation zugänglich gemacht werden kann. Abschließend verweisen Wickens und Baker (1995) darauf, dass etwa äußerlicher Fotorealismus bei der Visualisierung grundsätzlich wenig Bedeutung hat, insbesondere dann, wenn im Interesse der Aufgabenstellung andere kognitive Faktoren, wie z.B. Abstraktion, zielführend sind. Als Strategie für zukünftige Vorgehensweisen leiten sich folgende Gestaltungsbereiche ab:

- Analyse der Ausgangssituation und Human Factors-Entwicklungsstrategie
- Gestaltung und Evaluation von Techniken der VR, die für die Nutzung in VE vorgesehen sind.
- Analyse, Gestaltung und Evaluation der erforderlichen Simulationstreue (bzgl. Aufgabe, Ausführungsbedingungen und Arbeitsabläufe) und ihrer Validität für die interessierende Fragestellung
- Analyse und Bewertung von Validität (und deren Grenzen) des Einsatzes der VE (und des Szenarios) für den beabsichtigten Zweck
- Abschätzung der Effektivität und Effizienz des Einsatzes der VE bezogen auf Ausgangssituation und Zielsetzungen

Als kognitive Aspekte von Techniken der VR und von VE stellt *McLellan (1998)* verschiedene Konzepte vor, die zu verbesserten Gestaltungslösungen beitragen können. Dazu präsentiert sie auch weitere Differenzierungen (z. B. zu Intelligenz, Präsenzempfinden, Realismus), mit denen Auswirkungen zu VE auf spezifizierte Konzepte bezogen und mit denen Inkonsistenzen wegen zu allgemeiner Fragestellungen vermieden werden können. Abschließend stellt sie Gestaltungsempfehlungen zusammen, die kognitive Prozesse unterstützen und bezieht sich dabei unter anderem auf Ausführungen von Wickens und Baker (1995).

"The media table holds a rich feast, but the meal is larded with cheap data calories and informational cholesterol. It is frequently filling but often unsatisfying. It is not as good for you as it should be. Too much of one medium or not enough of another can cause cognitive malnutrition. Information that is consumed is not necessarily digested. In reality, many media dishes are recipes for misunderstanding and confusion no matter how prettily they are served." (*McLellan 1998, 175*)

Zu ergonomischen Aspekte von VE werden von *Ahasan und Väyrynen (1999)* allgemeine Aussagen und unspezifische Anforderungen und Empfehlungen zusammengestellt. Hinweise auf konkrete Einsatzgebiete oder Gestaltungslösungen werden nicht gegeben.

In einer Studie von *Bruder et al. (2015)* wird untersucht inwieweit eine in VE-Studien in manchen Fällen genutzte Alternative zum geradlinigen Gehen, das umgelenkte Gehen, weitere kognitive Prozesse während Interaktionen in VE beeinträchtigt. Beim umgelenkten Gehen werden Probanden im HMD Bewegungspfade vorgegeben, die visuell noch geradlinig erscheinen, während des realen Ge-

hens aber tatsächlich eine leichte Umlenkung nach rechts oder links veranlassen. In VE wird Bewegung meistens als noch geradlinig empfunden, wenn sie auf dem Segment eines Kreises von 22 m Radius stattfindet (*Steinecke et al. 2010*). In physisch kleineren Räumen wird mit HMD häufig das umgelenkte Gehen eingesetzt, bei dem nur gelegentlich Manipulationen spürbar sind. Das umgelenkte Gehen beeinflusst allerdings verbale und räumliche Arbeitsgedächtnisaufgaben und darüber auch das Gehverhalten. Dieser Einfluss bleibt deutlich unter einer Raumgröße von 10 m x 10 m, so dass umgelenktes Gehen in kleineren Räumen nicht empfohlen werden kann (*Bruder et al. 2015*).

Eine Übersicht zu Transfereffekten von Trainings in VE zu RE geben *Champney et al. (2015)*. Sie präsentieren Erkenntnisse aus der Transferforschung und informieren über die Anlage von geeigneten Evaluationsstudien. Dabei weisen sie auch darauf hin, dass die bisherige Forschung zu Techniken der VR im Arbeitsschutz und in VE nicht notwendigerweise zu Erkenntnissen im Arbeitsschutz für RE beitragen. In diesem Bereich können manche Transferstudien u. a. wegen der hohen Unfallgefahr in RE nur bedingt und damit mangels realer Transferumgebung durchgeführt werden. Allerdings wird ein möglicher Transfer von Erkenntnissen oder sogar ein Transfer in reale Arbeits- und Lebensverhältnisse nur selten bei der Studienplanung in VE einbezogen. Grundsätzlich reichen Aussagen über Analysen zur ökologische Validität oder Augenscheinvalidität nicht aus, um von Erkenntnissen aus VE auf Auswirkungen in RE schließen zu können. In der Konsequenz erscheint es daher zunächst förderlich, auf gemeinsame Elemente und Beziehungen zwischen Situationen hinzuweisen, die eine Grundlage für Analysen zu Möglichkeiten und Grenzen von Transfer sein sollten.

Damit Techniken der VR und VE für Training oder für psychologische Experimente nützlich sein können, muss zunächst festgestellt werden, ob und inwieweit mit VE grundlegende und relevante Merkmale der realen Aufgabe, ihrer Ausführungsbedingungen und weiteren Umgebung erfasst und realistische Verhaltensweisen hervorgerufen werden (*Harris et al. 2020b*). Dabei werden aber häufig Darstellung und Funktion verwechselt und solche oberflächlichen visuellen Merkmale bevorzugt, die in der Regel nicht die Schlüsselfaktoren für erfolgreiche Trainingsergebnisse (z. B. kognitive Prozesse und Handlungen) und für Transferförderung sind. Neben einer Abstufung zu Fidelität und Validität werden praktische Methoden zur Überprüfung von VE für Training vorgestellt. Für das Ziel des Transfers von Gelerntem in reale Aufgabensituationen grundsätzlich förderlich sind jeweils zu spezifizierende Inhalte zu psychologischer, affektiver und ergonomischer Wiedergabetreue bzw. zu den jeweils relevanten Bedingungen (z.B. *Kozlowski & DeShon 2004*), die Transfer hin zu realen Verhaltensweisen des Menschen fördern.

In vielen der von *Lanier et al. (2019)* ausgewählten 61 wissenschaftlichen Artikel zur methodischen Qualität von Studien zu Techniken der VR und zur Nutzung von VE kommt es zu Fehlerhäufungen in statistischen Darstellungen und einige der jeweils in den Artikeln enthaltenen Hinweise zu Studiendaten bleiben unklar. Es wird daher für mehr Transparenz in der Datenanalyse, eine erhöhte statistische Aussagekraft und eine sorgfältigere Berichterstattung statistischer Ergebnisse geworben. Dadurch kann das methodische Niveau der Untersuchungen verbessert und Studien reproduziert werden, was schließlich zu mehr Struktur in Ergebnissen der Forschung zu Techniken der VR und Nutzung in VE führen sollte. Diese Situation könnte leicht verbessert werden, da das methodische Instrumentarium etwa aus der psychologischen Methodenlehre (z. B. Versuchsdesign, Evaluation, Statistik) einschließlich ihrer praktischen Anwendung vorhanden ist.

Empfehlungen, mit denen die Zusammenarbeit von Interessengruppen für die Nutzung von VE (z. B. für Programmierer und Benutzer) bereits während der Planungsphase verbessert werden können, stellen *Rankin et al. (2011)* zusammen. Neben einer Orientierung an erforderlichen Szenarien empfehlen sie eine umfangreiche Ideensammlung während Iterationen für Storyboards und groben Prototypen. Dadurch können Anforderungen an den Gebrauch umfangreich gesammelt und zusam-

mengestellt, abgeglichen, diskutiert und umgesetzt werden. Das von Rankin et al. (2011) vorgestellte Vorgehen kann in das Human Factors-Konzept der strukturierten Entwicklung von VE (Eastgate et al. 2015) integriert werden und in den Anfangsphasen hilfreich ergänzen.

Einige Auswirkungen von Techniken der VR zur Fortbewegung (z. B. "beamen") auf Prozesse der Informationsverarbeitung werden von *Suma et al. (2010)* untersucht. Demnach ist eine virtuelle Fortbewegung dann ein relativ akzeptabler Ersatz für das reale Gehen, wenn zwischen Wegalternativen zu wählen ist und wenn mithilfe von Informationen in der VE gelernt oder Entscheidungen getroffen werden sollen. Das reale Gehen sollte dagegen bevorzugt werden, wenn schnell und effizient navigiert oder realitätsnahes Verhalten gefordert ist. Damit deutet sich durch die Studie von *Suma et al. (2010)* an, dass eine Entscheidung für technisch unterstützte Fortbewegung und natürliches Gehen in VE abhängig gemacht werden sollte, von der Bedeutung der Bewegung für die Fragestellung sowie von der Bedeutung der Bewegungsart für die Aufgabenstellung.

In ihrer Übersicht weisen *Vasser und Aru (2020)* auf eine schnell steigende Anzahl an Publikationen zu "virtual reality" hin. Nach ihrer Einschätzung steigt dadurch auch die Vielfalt eingesetzter Techniken der VR und verwendeter Untersuchungsmethodiken. Dadurch werden wiederum Aussagen über Reliabilität und Validität der einzelnen Studien und über die Studien hinweg beeinträchtigt. Auch wenn in vielen Publikationen von einer immersiven VE berichtet wird, können Aussagen zu Präsenzepfinden, Entscheidungen zur Auswahl von Hardware und Software, Wiedergabetreue usw. nicht verallgemeinert werden. Sie können auch nicht reproduziert werden, da dafür die erforderlichen Informationen aus den Studien nur selten verfügbar sind. Abschließende praktische Empfehlungen sollen zu einer Systematisierung in der psychologischen Forschung zu VE beigetragen.

Mit einem Anstieg psychologischer Forschung zu Techniken der VR und zu VE gehen nach *Wilson und Soranzo (2015)* eine Systematisierung und methodische Verbesserung einher. Dabei sollte allerdings bedacht werden, dass neben Unterschieden zwischen Immersion und Präsenzepfinden auch bei Verwendung jüngerer Techniken der VR physische und psychische Nebenwirkungen durch die Exposition gegenüber Techniken der VR (z. B. visuell induzierte Bewegungskrankheit) weiterhin einen starken Einfluss haben dürften. Schließlich sollte auch durch die Nutzung von Techniken der VR in der Sehforschung deutlich werden, dass noch nicht alle Faktoren aufgedeckt sind, die einer realitätstreuen Abbildung visueller Eindrücke in VE weiterhin entgegenstehen. Höhere Immersion und Wiedergabetreue führen nicht notwendigerweise zu Präsenz oder rufen "realistische" psychologische Reaktionen in allen Prozessstufen der Informationsverarbeitung des Menschen (Wahrnehmen, Denken, Handeln) hervor.

Durch ihr Review zu Techniken der VR und ihren Einsatz in computergestützten Therapieformen weisen *Yellowlees et al. (2012)* darauf hin, dass ethische und legale Anforderungen an VE grundsätzlich mit Probandenstudien in RE vergleichbar sind. Ethische und rechtliche Richtlinien wurden für VE zu folgenden Themen vorgeschlagen: zur Authentifizierung von Anbietern und Patienten, Einverständniserklärungen, Vertraulichkeit und Wohlbefinden der Patienten, Kompetenz der Versuchsleiter, Ausbildung und Versicherung von Anbietern, therapeutische Umgebung und Notfälle.

Untersuchungen bezogen auf eine ergonomische Gestaltung haben die Techniken der VR und die Nutzung von VE verbessert (*Wilson 1999*). Herausforderungen ergeben sich darüber hinaus auch für die Entwicklung von Gestaltungslösungen für verschiedene Anwendungsbereiche. Das Human Factors-Konzept zur strukturierten Entwicklung von VE für den Trainingseinsatz und Untersuchungen zur partizipativen Neugestaltung von Arbeitsplätzen geben dafür weitere Hilfestellungen.

In einer Untersuchung von *Conradi und Alexander (2008)* wurden Präsentationsmedien von VE (Desktop-Monitor, Projektionswand, HMD) miteinander auf ihre differenzielle Gebrauchstauglichkeit untersucht. Für das virtuelle Szenario mit Orientierungs- und Navigationsaufgaben ergaben sich

für die drei Medien weder Unterschiede in der Leistung noch in Symptomen einer Simulatorkrankheit. Die empfundene Beanspruchung war für das Medium Desktop am niedrigsten und für HMD am höchsten. Es wird daher empfohlen bei der Medienauswahl Anforderungen der Benutzerinnen und Benutzer und ihre Erfahrungen zu berücksichtigen. Leider berichtet die Studie von Conradi und Alexander (2008) keine konkreten Erkenntnisse. Daher können Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen nicht entnommen werden und es bleibt auch unklar, ob eine berichtete relativ höhere Beanspruchung bei Nutzung von HMDs nicht doch eher auf die Möglichkeiten und Grenzen der Aufgabenbearbeitung mit HMD im Vergleich zu Desktops als mit einer hier wenig nachvollziehbaren Prädispositionen von Probanden zu tun haben.

Untersuchungen zum Einfluss von Trainings in VE auf solche in RE wurden von *Lackey et al. (2016)* bezogen auf Aufgabenleistung, empfundene Beanspruchung und Stressreaktion ermittelt. Positives Erleben und Erfahrungen mit Trainings in VE beeinflussten das Training in RE so, dass tendenziell weniger Stressreaktionen und ein tendenziell geringeres Beanspruchungsempfinden in der RE auftraten. Eine moderierende Rolle der Aufgabenleistung konnte nicht aufgedeckt werden. Mithilfe von in VE vorangestellten Trainings können Voraussetzungen für Trainingsmaßnahmen in RE positiv beeinflusst und möglicherweise beeinträchtigende Faktoren, die Trainees von einer Auseinandersetzung mit Trainingsinhalten ablenken, gesenkt werden. Inwieweit sich in der Praxis die Notwendigkeit ergibt, Trainings zunächst in VE und erst anschließend in RE mit der Zielsetzung reduzierter psychischer Anspannung durchzuführen, bleibt abzuwarten.

Eine Studie von *Moline (1995)* fasst Erkenntnisse zu Techniken der VR und zu VE aus dem Gesundheitswesen zusammen. Als Einsatzbereiche werden genannt: chirurgische Eingriffe (Fernchirurgie oder Telepräsenz, erweiterte oder verbesserte Chirurgie und Planung und Simulation von Eingriffen vor der Operation); medizinische Therapie; Präventivmedizin und Patientenaufklärung; medizinische Aus- und Weiterbildung; Visualisierung umfangreicher medizinischer Datenbanken; Verbesserung von Fähigkeiten und Rehabilitation sowie architektonisches Design für Einrichtungen des Gesundheitswesens. Damit wird deutlich, dass VE im Gesundheitswesen sehr weit verbreitet ist und mittlerweile sehr umfangreich mit Simulationen, Visualisierungen und Trainings vertreten ist.

In VE können Benutzerinnen und Benutzer in Rollen eines Avatares schlüpfen, wodurch sich je nach Sichtweise veränderte Eigentums- und Vertretungsverhältnissen für den eigenen oder für einen anderen Körper ergeben können. *Hoyet et al. (2016)* untersuchen Auswirkungen auf das Verhalten des Menschen anhand einer virtuellen Hand mit sechs Fingern. Fragen wie es zum Eindruck kommt, dass die virtuelle Hand die eigene ist oder wie diese Hand dann gesteuert werden kann, werden untersucht, um Hinweise auf veränderte Rollenstrukturen zu erhalten. In einer VE visualisiert über ein HMD ahmen die Probanden in einem ersten Schritt Bewegungen der sechs Finger nach und in einem zweiten Schritt sehen sie, wie sie mit einem Pinsel über den Finger gestrichen bekommen, wobei der Versuchsleiter parallel unsichtbar aber spürbar für die Probanden auch tatsächlich über ihren Finger streicht. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe bewerten die Probanden mit sechs Fingern Eigentums- und Vertretungsverhältnissen für die vermeintlich eigene Hand höher. Die Ergebnisse geben nach Einschätzung der Autoren Hinweise darüber, wie Avatare mit strukturellen Unterschieden (Hand mit sechs Fingern) das Empfinden von Eigentum und Handlungsfähigkeit beeinflussen können.

Während Modernisierungsprojekten der finnischen Stahlindustrie konnte *Määttä (2007, s. a. Määttä 2003)* mithilfe von Sicherheitsanalysen mit VE Gefährdungen und Risiken an Arbeitsplätzen identifizieren und Maßnahmen zur Risikominderung ableiten. Als vorteilhaft erwies sich der Einsatz von VE zur prospektiven Arbeitsgestaltung, mit dem einerseits verschiedene Beteiligte in den Planungsprozess einbezogen werden konnten und andererseits bereits während der Planungsphase Maschinen und technische Anlagen an ergonomische Anforderungen der Gestaltung angepasst werden können.

Mit dem Ziel der Verbesserung des Arbeitsschutzes modellierten und simulierten *Marc et al. (2007)* einen Arbeitsprozess an einer Maschine zum Abkanten von Stahlblechen in VE. Anhand von Leistungsmaßen bezogen auf die Genauigkeit der Platzierung von Blechen in der virtuellen Maschine durch einen realen Werker sowie die Qualität der virtuell gekanteten Bleche konnte die stereoskopische Visualisierung für die Werker als eine von vier Varianten identifiziert werden, mit dem die Mensch-System-Interaktionen in VE zu ausreichend realitätsnahen Ergebnissen führte. Auf Basis der so entwickelten VE sollen zukünftig mit der Simulation in VE verschiedene Möglichkeiten für den Einsatz von Schutzeinrichtungen und Schutzmaßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit an der Maschine untersucht werden.

In einer Pilotstudie wurde der Gebrauchstauglichkeit von Techniken der VR in einem dazu neu eingerichteten Labor nachgegangen (*Nickel et al. 2010*). Dazu wurde die ergonomische Gestaltung insgesamt zunächst anhand einer Checkliste analysiert und bewertet. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit sich diese Techniken der VR zur Untersuchung von Mensch-System-Interaktionen eignen. Das wurde anhand von Interaktionsprozessen zwischen Mensch und Roboter in variierenden Schwierigkeitsgraden mithilfe von Parametern der Psychophysiologie, der Leistung und des Empfindens erfasst. Die Ergebnisse der Checkliste lieferten Hinweise zur Modifikation der Beleuchtungsbedingungen. Die Nutzung der VE führte während der Untersuchungen zu keinen relevanten Symptomausprägungen der visuell induzierten Bewegungskrankheit. Das Präsenzempfinden wurde von den Probanden als relativ hoch bewertet. Die Variation der Schwierigkeit in der Aufgabe zur Mensch-Roboter-Interaktion spiegelte sich zwar in den Ergebnissen zur Leistung in der Aufgabebearbeitung und in der empfundenen Beanspruchung, nicht jedoch in den psychophysiologischen Parametern zur Beanspruchungserfassung wider. Die Ergebnisse hatte aber wegen des Pilotcharakters der Studie lediglich orientierende Aussagekraft. Grundsätzlich erschien damit das mit Techniken der VR ausgestattete Labor für geplante zukünftige Untersuchungen zur physischen und psychischen Belastung während Mensch-System-Interaktionen funktional geeignet und die Pilotstudie lieferte Hinweise zu Gestaltungsmerkmalen für nachfolgende Studien der Mensch-System-Interaktion in VE.

Angestoßen von hohen Unfallzahlen bei der Arbeit mit fahrbaren Hubarbeitsbühnen, zielte eine Studie von *Nickel et al. (2013)* zunächst darauf ab, mögliche geeignete Elemente für Untersuchungsszenarien und Simulationsmöglichkeiten für Gefahrensituationen zu erproben. Eine in gemischter Realität entwickelte fahrbare Hubarbeitsbühne wurde durch Hubarbeitsbühnenführer zur Bearbeitung von Inspektions- und Fahraufgaben in normalen und gefährlichen Arbeitssituationen genutzt. Hohe Bewertungen für Immersion und Präsenz in VE deuteten auf eine eher realitätsnahe Umsetzung von Szenarien hin. Während die Bearbeitungsleistung für die Fahr- und Inspektionsaufgaben hoch war, variierte das Beanspruchungsempfinden je nach potenziellen Gefahren. Die Risikowahrnehmung in virtuellen Gefahrensituationen erschien allerdings im Vergleich zu realen Arbeitssituationen eher abgeschwächt. Möglicherweise empfanden die Probanden in virtuellen Gefahrensituationen eine Gefährdung nur kurzzeitig. Bereits während des Bewertungsprozesses wurden die virtuellen Situation bereits rational ohne reale Konsequenzen und daher abgemildert bewertet (*McGrath 1976, Nachreiner 1980*). Die Studie bot insgesamt aber eine gute Ausgangsbasis zur Untersuchung Schutzmaßnahmen gegen Unfallgefahren mit fahrbaren Hubarbeitsbühnen.

Unfalluntersuchungen bleiben eine Herausforderung, da über retrospektive Analysen auf unvollständigen Informationen und mit begrenztem Zugang zu Informationen über den Ereignisverlauf in der Vergangenheit ermittelt wird. Während verschiedener Untersuchungen zur Wirksamkeit von ergänzenden Schutzmaßnahmen an Hubarbeitsbühnen ereigneten sich virtuelle Kollisionen des Fahrers und der mobilen Hubarbeitsbühne mit Objekten in der Umgebung (*Nickel et al. 2014, 2017*). Zu Kollisionen, die in der Realität ähnlich auftraten, konnten durchgeführte Simulationen in VE aus einer vergangenen Studie im Ablauf nachgebildet werden und so ein möglicher Unfallhergang parallel zu Bewegungen und Steuerungseingriffe von Hubarbeitsbühnenführern rekonstruiert werden.

Beobachtungen aus variablen virtuellen Standorten und Blickwinkeln deckten mögliche Beeinträchtigungen menschlicher Informationsverarbeitung durch die Systemgestaltung bei der Mensch-System-Interaktion auf. So bewegt sich durch den Steuerungseingriff zum Ablassen eines Korbes einer Teleskoparmbühne der Korb tatsächlich nicht nur nach unten, sondern in einem Kreisbogen nach unten und hinten. Insbesondere beim Ausfahren aus Engstellen kann es zu seitlichen Kollisionen kommen, die nicht erwartet werden. Möglichkeiten zur alternativen Steuerung von Hubarbeitsbühnen in RE konnten auf dieser Basis als eine technische Maßnahme zur Risikominderung neben anderen Ideen auf der Basis der Simulationen in VE diskutiert werden.

Eine Studie von Lacko (2020) vergleicht ein Arbeitsschutztraining und seine Effektivität in VE mit einem Training mithilfe eines Videos. Nach Aussagen von Lacko (2020) begeistert und motiviert die Trainees VE stärker als das Video. Direkt nach dem Training sowie auch nach einem Monat soll die VE-Gruppe bei einer Befragung etwa 10 % bzw. 20 % mehr korrekte Antworten gegeben haben als die Video-Gruppe. Die berichteten Ergebnisse und Interpretationen von Lacko (2020) bleiben sehr fragwürdig, da in der VE-Gruppe mit 32 Trainees etwa 12 % weniger als in der Video-Gruppe mit 37 Trainees verbleiben. Obwohl es bei ca. 12 % der Trainees aus der VE-Gruppe zu manifesten Symptomen der visuell induzierten Bewegungskrankheit und damit Abbruch des Trainings kam, wird von der o.g. Steigerung korrekter Antworten berichtet und darauf hingewiesen, dass verschiedene technische Erweiterungen des Trainings vorgesehen seien und das Training für den weiteren Einsatz im Arbeitsschutz empfohlen wird. Da es sich hier um eine Studie im Kontext des Arbeitsschutzes handelt, erscheint die Dokumentation und Interpretation der Ergebnisse wegen der potenziell damit verbundenen beeinträchtigenden Konsequenzen für zukünftige Beschäftigte wenig seriös.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Studien verweisen auf Strategien, Gestaltungsmerkmale und Erkenntnisse, die für den Einsatz von Techniken der VR oder die Nutzung von VE auch im Kontext von Human Factors/ Ergonomie und des Arbeitsschutzes förderlich sind. Daraus lassen sich sowohl Anforderungen als auch Empfehlungen zur belastungsoptimierten Gestaltung von Techniken der VR entnehmen, die für die Prävention im Arbeitsschutz sowie als Maßnahmen als auch als Instrumente geeignet erscheinen.

5 Strukturierte Analyse, Bewertung und Gestaltung von Techniken der VR und des Arbeitens in VE

Ergänzend zu den Übersichten zu belastungsoptimierenden Gestaltungsanforderungen und -empfehlungen aus Human Factors/ Ergonomie von Burkhardt (2003, Eastgate et al. (2015), Stanney (1995) sowie Wickens und Baker (1995) aus dem Kapitel 4.2 werden nachfolgend Strategien, Methodensammlungen und Konzepte zur allgemeinen Bewertung von Techniken der VR und der Nutzung von VE vorgestellt.

Das Literaturreview von *Stanney et al. (1998)* stellt Inhalte aus Human Factors für Techniken der VR und für VE heraus. Im Zusammenhang mit menschlicher Leistungsfähigkeit in VE geht es um Aufgaben, Benutzereigenschaften, Sensomotorik, multimodale Interaktionen und Gestaltungsstrukturen. Darüber hinaus werden Arbeitsschutzthemen wie visuell induzierte Bewegungskrankheit und verschiedene andere Wirkungen nach Abschluss einer Nutzung von VE diskutiert. Schließlich werden soziale Auswirkungen der Technologie thematisiert. Dadurch werden Antworthinweise für folgende zentrale Fragen skizziert:

- für welche Aufgabenstellungen sich VE überhaupt für Interaktionen mit Personen eignen,
- für welche Charakteristika von Personen Techniken der VR wie gestaltet werden müssen,
- welche Gestaltungsmerkmale von Techniken der VR noch mit Prozessen der Informationsverarbeitung des Menschen inkompatibel und technisch zu verbessern sind,
- welche multi-modalen Inhalte für eine realitätsnahe Abbildung in VE erforderlich sind,
- welche Strategien der technischen Gestaltung aus einer Perspektive von Human Factors zielführend erscheinen,
- welche Gestaltungsaufgaben für VE anstehen, damit sie Anforderungen des Arbeitsschutzes gerecht werden kann und
- welche sozialen Einflüsse aus dem Einsatz von Techniken der VR und der Nutzung von VE entstehen und welche Anpassungsmöglichkeiten der technischen Gestaltung geeignet sind.

Mit MAUVE (Multi-criteria Assessment of Usability for Virtual Environments) entwickelten *Stanney et al. (2003)* einen strukturieren Ansatz zum Gestalten von gebrauchstauglichen Techniken der VR und von VE. Dadurch kann auf spezielle Anforderungen von VE eingegangen werden, wie z. B. Techniken zur und (multi-)modalen Umsetzungen von VE zur Navigation, Objektauswahl und -manipulation und multimodalen Interaktionen. Als Gestaltungskriterien werden auch Immersion, Präsenzepfinden und das Vermeiden von visuell induzierter Bewegungskrankheit einbezogen.

In der Übersicht von *Bowman et al. (2002)* versuchen sich die Autoren einer Usability-Evaluation von VE zu nähern. Dazu werden herkömmliche Inhalte zu Gestaltungsanforderungen für 2-dimensionale Anzeigen mit solchen für VE verglichen. Zu besonderen Eigenschaften für eine Evaluation von VE zählen physische Umgebung (z. B. HMD, Einzelnutzer, Simulation der Simulation statt Videoanalyse), das Evaluationsteam (z. B. Präsenzepfinden ist störanfälliger, multimodale Verhaltensdokumentation), Benutzeraspekte (z. B. Expertenidentifikation, visuell induzierte Bewegungs-krankheit). Zusätzlich geht es auch um Besonderheiten für Methoden zur Evaluation (neue Heuristiken erforderlich, Standardverfahren für Variantenvielfalt zu Techniken der VR) und weitere Aspekte (z. B. VE-Niveau ist relativ niedriger als bei Bildschirmgeräten, dynamische Innovationen). Einige auf VE angepasste Methoden zur Evaluation sind bereits vorhanden (z. B. Cognitive Walkthrough, Post-hoc Questionnaire). Solche Methoden können auch klassifiziert werden, je nachdem, ob ein Betrachtungsgegenstand entweder eine empfundene oder eine tatsächliche Gestaltung mit Ergebniskonsequenzen für beide Gestaltungsaspekte ist, wie weit die Methoden Aufgaben- und Zielsetzungen der Produkte einbeziehen, in wieweit die Methoden repräsentative Benutzerinnen und Benutzer einbeziehen, welchen Evaluationskontext sie nutzen und welche Art von Ergebnissen sie erzielen. Schließlich werden verschiedene Strategien zur Evaluation von VE vorgestellt. Da sich

Usability-Evaluationen in der Literaturquelle eher auf Arbeitsmittel selbst, d.h. eine Technik der VR, begrenzen, beziehen sich Anforderungen und Empfehlungen auf Gestaltungsverbesserungen im gegebenen Kontext und bleiben ihrem Analyse- und Gestaltungsumfang hinter dem Konzept eines Arbeitssystems zurück, das Anforderungen und Empfehlungen aus Arbeitsaufgaben, -organisation oder -umgebung einbeziehen kann.

Mithilfe der Virtual Environment Performance Assessment Battery (VEPAB) von *Lampton et al. (1994)* sollen Techniken der VR und VE für Trainings für die zukünftige Nutzung gefördert werden. Die VEPAB erfasst die menschliche Leistungsfähigkeit in VE zum Sehen, Fortbewegen, Verfolgen, Objekte manipulieren und Reagieren. Die Testergebnisse sollen auf Interaktionsqualitäten in VEs hinweisen und über den Kompetenzerwerb informieren. Über Systeme von Techniken der VR können Aufgabenleistung, Neben- und Nachwirkungen und Reaktionszeiten verglichen werden. VEPAB wird anhand von zwei Fallstudien vorgestellt, in denen einerseits die Sensitivität von Testaufgaben für Unterschiede zwischen den Eingabegeräten und andererseits Übungeffekte nach einem Training ermittelt werden.

In seinem Übersichtsbeitrag zum Usability-Engineering von VE stellt *Gabbard (2015)* verschiedene Methoden zum Usability Engineering in VE vor (Aufgabenanalyse, Expertenbewertung, formative und summative Evaluation) und wendet einige dieser Methoden in Fallstudien an. In der ersten Fallstudie Dragon geht es um eine effiziente Bearbeitung von Aufgaben (z. B. beobachten, managen, navigieren) mithilfe der Visualisierung eines militärischen Schlachtfeldes in VE. In der zweiten Fallstudie BARS ist das militärische Schlachtfeld in der Realität simuliert und Soldaten als Bodentruppen und in mobilen Gefechtseinheiten werden mit Techniken der AR (augmented reality) unterstützt. Für beide Fallstudien werden einige Ergebnisse der Evaluationen und Empfehlungen für zukünftiges Vorgehen vorgestellt.

Zur Untersuchung psychischer Faktoren durch die Nutzung von VE adaptierten Harris et al. (2020a) einen bekannten Fragebogen zur Erfassung des Beanspruchungsempfindens. Anhand von Ergebnissen aus experimentell variierten virtuellen Szenarien verweisen die Autoren auf die Sensitivität des neuen Instruments zur Beurteilung der Aufgabenbelastung in VE. Da es sich beim Original um ein international häufig eingesetztes Befragungsinstrument handelt, kann erwartet werden, dass es auch in der VE-Version oft zum Einsatz kommt. Leider wurden keine Vergleiche mit realen Szenarien untersucht, so dass die Spezifität des Instruments für VE unklar bleibt.

Mit dem Ziel der vergleichenden Bewertung der Qualität von User Experience (UX) bei verschiedenen VR-Brillen entwickelten *Yu et al. (2019)* einen Fragebogen mit 9 Fragen zur Hardware und mit 10 Fragen zur VE. Dabei gelten die Hardware-Fragen als wesentlicher Prädiktor für eine interaktive Bearbeitungsleistung mit der VR-Brille und die Anwendungs-Fragen in engem Zusammenhang mit möglichen Beeinträchtigungen durch visuell induzierte Bewegungskrankheit.

Für eine nachfragegerechte Versorgung von Interessenten an Techniken der VR und einem hohen ROI (Return on Investments) für Unternehmen ist eine hohe Technikakzeptanz für Techniken der VR hilfreich. *Manis und Choi (2019)* passten daher Modelle zur Technikakzeptanz für Techniken der VR an und konnten das Modell um empfundenes Vergnügen erweitern und anstelle von Nützlichkeit aus bisherigen Modellen nun in das Zentrum der Bewertung stellen. Zusätzlich konnten die Faktoren Alter, bisherige Erfahrung, Neugier und Bereitschaft zur Zahlung eines bestimmten Kaufpreises für die Akzeptanz von Virtual-Reality-Hardware einbezogen werden und tragen zur Vorhersage der zukünftigen Nutzung und Kaufabsicht bei.

Ergonomische Bewertungen und Empfehlungen zur Gestaltung von VE einschließlich gemischter Realität sind die Themen des Beitrags von *Bach und Scapin (2004)*. Dabei diskutieren sie verwandte Themengebiete aus denen Kriterien zu Bewertung und Gestaltung entnommen und Methoden, die für eine Evaluation im Einsatzgebiet von gemischter Realität genutzt werden können.

Aus den späten 1990er Jahren gibt es auch Ansätze zur Klassifikation von VE-Umsetzungen (*So et al. 2001, Nichols et al. 2000*), die zur Bewertung von Auswirkungen von Bedingungskonstellationen zu Techniken der VR auf Sicherheit, Gesundheit und Wohlergehen genutzt werden könnten. Die Empfehlungen sind eher allgemein gehalten und vorsichtig formuliert. Konkretere Hinweise können den recherchierten Literaturquellen direkt entnommen werden.

6 Konsequenzen und Perspektiven für das weitere Vorgehen im Arbeitsschutz

Die vorliegende Literaturstudie zur Belastung bei der Arbeit in VE einschließlich des Einsatzes von Techniken der VR konnte viele Erkenntnisse dokumentieren und darüber hinaus auch direkt und indirekt auf bestehende Erkenntnislücken aufmerksam machen. Die Ergebnisdokumentation macht aber auch deutlich, dass derzeit keine validen differenziellen Aussagen über Auswirkungen des Einsatzes von Techniken der VR, der VE selbst, der Aufgabenstellungen in der VE und des Arbeitens in VE, ggf. auch relativ zu RE, möglich sind. Das stellt die Prävention im Arbeitsschutz vor große Herausforderungen. Sie sollte mangels hinreichenden Kenntnissen zu Ursachen dennoch für potenziell beeinträchtigende Folgen der Beanspruchung und Gefährdungen geeignete Maßnahmen zur Risikoreduktion orientiert an der Maßnahmenhierarchie des Arbeitsschutzes empfehlen können.

Tatsächlich sind allerdings relevante Erkenntnisse verstreut über die vorgestellten Studien vorhanden. Zur Entwicklung von Lösungsansätzen der Prävention im Arbeitsschutz sollten diese Erkenntnisse nach erforderlichen Bewertungskategorien systematisiert und methodenkritisch bewertet und für einen jeweils spezifizierten Einsatzzweck zusammengestellt werden. Für den Arbeitsschutz können folgende Perspektiven aufgezeigt und Handlungsempfehlungen gegeben werden:

- Anwendung des Human-Factors-Konzepts zur systematischen Entwicklung von VE (*vgl. Kapitel 1.3*)
 - in einem Projekt, in dem z. B. die Prävention im Arbeitsschutz durch das Arbeiten in VE unterstützt werden soll,
 - mögliche Beiträge des Konzepts für eine arbeitssichere und gesunde Gestaltung von VE herausgearbeitet, analysiert und bewertet werden,
 - Möglichkeiten und Grenzen für die Übertragung des Vorgehens auf andere Anwendungen ermittelt und dokumentiert werden und
 - zukünftigen betrieblichen Anwendern Inhalte aus dem Human Factors-Konzepts für den Einsatz von Techniken der VR und der Nutzung von VE für eine arbeitssichere und gesunde Gestaltung empfohlen werden.
- Vorhandene Methoden und Systeme zur Analyse und Bewertung von Techniken der VR sowie des Arbeitens in VE (*vgl. Kapitel 5*)
 - zusammenstellen und nach Nutzungsvoraussetzung und Zielen differenzieren,
 - Methoden und Systeme miteinander vergleichen,
 - Methoden und Systeme möglichst auf ein vorhandenes VE-unterstütztes Projekt anwenden,
 - Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung für die Prävention im Arbeitsschutz bewerten,
 - ggf. Handlungsempfehlungen vorschlagen bzw. Anpassungen umsetzen und
 - zukünftigen betrieblichen Anwendern zur Nutzung empfehlen.
- Entwicklung eines Baukastensystems für Gefährdungsbeurteilungen zu Arbeiten in VE im Aufgabenkontext (einschließlich Gestaltungsanforderungen für Techniken der VR) (*vgl. Kapitel 1.3*)
 - Identifikation und Beschreibung unterschiedlicher Anwendungs- und Einsatzszenarien,
 - Konzeptentwurf für ein Baukastensystem einer Gefährdungsbeurteilung,
 - Identifikation und Zuordnung vorliegender Ergebnisse der Literaturrecherche,
 - Analyse und Dokumentation von Erkenntnislücken,
 - Entwürfe für Studien zum Füllen der aufgedeckten Erkenntnislücken,
 - Einsatz von Gefährdungsbeurteilungen im Nutzungskontext und
 - Evaluation und ggf. Anpassung der Musterbeurteilungen.

- Entwicklung eines Baukastensystems für Risikobeurteilungen zu Techniken der VR im Aufgabenkontext (einschließlich Gestaltungsanforderungen für Arbeiten in VE) (vgl. Kapitel 1.3)
 - ähnliches Vorgehen wie beim Baukastensystem zur Gefährdungsbeurteilung.
- Entwicklung eines Demonstrators für Gefährdungsbeurteilungen zum Einsatz von Techniken der VR und zu Arbeiten in VE im Anwendungsbereich Bürogebäudegestaltung (vgl. Kapitel 3.3, 3.4, 3.5, 3.6)
 - Identifikation und Auswahl von relevanten Gestaltungsdimensionen mit einem Schwerpunkt auf Aspekten psychischer Belastung,
 - Ermittlung von Alternativen zu Gestaltungslösungen bezogen auf Aufgabenstellungen für Arbeitsprozesse und Themengruppen mit zugehörigen Bestandteilen von Gebäuden,
 - Entwicklung von Prozessen der Analyse, Bewertung, und Gestaltung und
 - Demonstration und Dokumentation von erzielten Gestaltungslösungen.
- Überblick zum aktuellen und geplanten Einsatz von Techniken der VR und zu Arbeiten in VE (vgl. Kapitel 4.1, 4.2)
 - Recherchen in und Dokumentationen zu unfallversicherten Organisationen sowie in nationalen und internationalen Organisationen des Arbeitsschutzes (Umfrage, Leitfadengestützte Interviews, ggf. Analysen vor Ort),
 - Ermittlung von Herausforderungen in der Nutzung sowie zum Anwendungszweck (z. B. Forschung, Beratung, Prüfung, Werkzeug am Arbeitsplatz),
 - Sammlung von Hinweisen zum Nutzungskontext (z. B. Aufgabenstellungen, Techniken, Anzahl der Betroffenen, Expositionen, potenzielle Beeinträchtigungen und Gefährdungen),
 - Sammlung von Informationen zur Gefährdungsbeurteilung,
 - Abgleich mit Erkenntnissen aus Literaturrecherche,
 - Ableitung von Handlungserfordernissen für die Prävention im Arbeitsschutz.
- Studien zur differenziellen Belastung durch Techniken der VR und des Arbeitens in VE (vgl. Kapitel 1.2)
 - Entwicklung eines Projekts, das durch Arbeiten in VE unterstützt werden soll,
 - Konzeption eines Versuchsdesigns zur differenziellen Erfassung der Belastung
 - durch Techniken der VR
 - durch gestaltete VE
 - durch Aufgabenstellung
 - durch Arbeiten in VE
 - durch Transfer bzw. Abweichungen zu RE
 - bezogen auf die Art, Intensität, Dauer sowie Dynamik der Belastung
- Zusammenstellung von Handlungsempfehlungen zur Nutzung von VE (vgl. Kapitel 4.2)
 - Anwendungsszenarien entwickeln,
 - Erkenntnisse aus Literaturrecherche zusammenstellen und
 - Empfehlungen dokumentieren (z. B. FB aktuell).
- Gestalten von Dienstleistungsprozessen unterstützen mit VE (vgl. Kapitel 3.6)
 - Projektkonzeption, -durchführung und -evaluation,
 - Gestaltungs- und Präventionsansätze ermitteln und
 - Möglichkeiten und Grenzen von Wirkungen auf soziale Interaktionen einbeziehen.

- Einsatz von Techniken der VR und zu Arbeiten in VE in den Branchen der VGB (vgl. Kapitel 4.2)
 - Entwicklung von belastungsoptimierten Präventionsmaßnahmen des Arbeitsschutzes und Anforderungen an Gestaltungslösungen mit Branchenbezug (z. B. ÖPNV/Bahnen, Sicherheitsdienstleistungen, Call Center, Gebäudemanagement, Ingenieure, Architekten, Bauplaner, Bildungseinrichtungen, Forschungsinstitute usw.)
 - Zielstellungen und Anwendungsszenarien entwickeln,
 - Erkenntnisse aus Literaturrecherche zusammenstellen
 - Human-Factors-Konzepts zur systematischen Entwicklung von VE
 - Präventionsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen ableiten.

- Anwendungsschwerpunkte von VE (z. B. mediale Unterstützung im Training, Simulation für Usability-Evaluationen, Visualisierung komplexer Systemen) (vgl. Kapitel 4.1)
 - Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zusammenstellen und
 - Ermittlung von Möglichkeiten und Grenzen für die Prävention im Arbeitsschutz durch den Einsatz von VE im jeweiligen Anwendungsschwerpunkt (z.B. bereits heute das Arbeitssystem der Zukunft beurteilen oder barrierefreie Gestaltung im Arbeitsprozess).

- Qualifizierung, Unterweisung und Information im Arbeitsschutz durch VE unterstützen (vgl. Kapitel 4.2)
 - Systematische Vergleichsstudien zu unterschiedlichen Formaten (z. B. Präsenz, CBT, VE) und medialer Unterstützung (z. B. passive 3D-Monitore, HMD, Projektion)
 - Berücksichtigung von Zielen, Inhalten, Behalten und Nutzung im praktischen Arbeitshandeln.

- Studien zum Einsatz von VE in zukünftigen Arbeits- und Lebenswelten (vgl. Kapitel 4.2)
 - Belastung durch multimodale Interaktionen und multimodales Feedback in VE: Nutzen und Gestaltungsanforderungen für den Arbeitsschutz,
 - VE-gestützte Arbeitsprozesse mit Remote-Kollaborationen in der Büro- und Verwaltungsarbeit (z. B. bezogen auf Branchen der VBG),
 - Einsatz von Avataren z.B. bei virtuellen Meetings (hier unterstützt mit Techniken der VR) und beim Wechsel zwischen realen und virtuellen Umgebungen,
 - Prävention des Arbeitsschutzes für Arbeiten in hybriden Teams,
 - Gestalten von Teamarbeit durch VE unterstützen,
 - Individualprävention mithilfe von VE,
 - Anforderungen des Arbeitsschutzes an Gestensteuerung in Arbeitsprozessen und
 - individuelle und kollektive Gesundheitsförderung unterstützt durch VE.

7 Literaturverzeichnis

* mit (*) gekennzeichnete Literatur ist nicht Bestandteil der Rechercheergebnisse

- Ahasan, M. R., & Väyrynen, S. (1999). Ergonomic aspects of a virtual environment. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 5(1), 125-134.
doi:10.1080/10803548.1999.11076415
- Ahmed, S., Leroy, L., & Bouaniche, A. (2017). Questioning the use of virtual reality in the assessment of the physical impacts of real-task gestures and tasks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM 2017) (Oct 31 - Nov 4, 2017, Dublin, Ireland)* (pp. 1-10). New York: IEEE.
- Alsina-Jurnet, I., Carvallo-Beciu, C., & Gutiérrez-Maldonado, J. (2007). Validity of virtual reality as a method of exposure in the treatment of test anxiety. *Behavioural Research Methods*, 39(4), 844-851.
doi:10.3758/bf03192977
- Andersen, S. A. W., Mikkelsen, P. T., Konge, L., Cayé-Thomasen, P., & Sørensen, M. S. (2016). Cognitive Load in Mastoidectomy Skills Training: Virtual Reality Simulation and Traditional Dissection Compared. *Journal of Surgical Education*, 73(1), 45-50.
doi:10.1016/j.jsurg.2015.09.010
- Arthur, E. J., Hancock, P. A., & Chrysler, S. T. (1997). The perception of spatial layout in real and virtual worlds. *Ergonomics*, 40(1), 69-77.
doi:10.1080/001401397188387
- Baber, C., Knight, J., Haniff, D., & Cooper, L. (1999). Ergonomics of wearable computers. *Mobile Networks and Applications*, 4(1), 15-21.
doi:10.1023/A:1019165908249
- Bach, C., & Scapin, D. L. (2004). Obstacles and Perspectives for Evaluating Mixed Reality Usability. In E. Dubois, P. Gry, D. Trevisan, & J. Vanderdonck (Eds.), *Proceedings of the IUI-CA-DUI*04 Workshop on Exploring the Design and Engineering of Mixed Reality Systems (MIXER) (Jan 13, 2004, Funchal, Portugal) (Vol. 91)*. Funchal: CEUR.
- Bailenson, J. N., Yee, N., Brave, S., Merget, D., & Koslow, D. (2007). Virtual Interpersonal Touch: Expressing and Recognizing Emotions Through Haptic Devices. *Human-Computer Interaction*, 22(3), 325-353.
doi:10.1080/07370020701493509
- Barrett, J. (2004). *Side Effects of Virtual Environments: A Review of the Literature (DSTO-TR-1419)*. Edinburgh South Australia, Australia: DSTO Information Sciences Laboratory.
- Basdogan, C., Ho, C.-H., Srinivasan, M. A., & Slater, M. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7(4), 443-460.
doi:10.1145/365058.365082
- Behr, K.-M., Nosper, A., Klimmt, C., & Hartmann, T. (2005). Some practical considerations of ethical issues in VR research. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(6), 668-676.
doi:10.1162/105474605775196535
- Bingham, G. P., Bradley, A., Bailey, M., & Vinner, R. (2001). Accommodation, occlusion, and disparity matching are used to guide reaching: a comparison of actual versus virtual environments. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 27(6), 1314-1334.
doi:10.1037/0096-1523.27.6.1314
- Bowman, D. A., Gabbard, J. L., & Hix, D. (2002). A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 404-424.
doi:10.1162/105474602760204309

- *Breitenstein, R. (1974). *Das Kartoffel-Theorem. Der wahre Zusammenhang von Produktion und Verbrauch in unserer Wirtschaft, oder: Was auf den Tisch kommt, wird auch gegessen.* Düsseldorf: Econ Verlag.
- Bruder, G., Lubos, P., & Steinicke, F. (2015). Cognitive Resource Demands of Redirected Walking. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(4), 539-544.
doi:10.1109/TVCG.2015.2391864
- Bruder, G., Argelaguet, F., Olivier, A.-H., & Lécuyer, A. (2016). Cave size matters: Effects of screen distance and parallax on distance estimation in large immersive display setups. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 25(1), 1–16.
doi:10.1162/PRES_a_00241
- Burdea, G.C. & Coiffet, P. (2022). *Virtual Reality Technology* (3rd ed.). New York: Wiley.
- Burkhardt, J.-M. (2003). *Réalité virtuelle et ergonomie: Quelques apports réciproques.* *Le Travail Humain*, 66(1), 65-91.
doi:10.3917/th.661.0065
- Calvert, S. L., & Tan, S.-L. (1994). Impact of virtual reality on young adults' physiological arousal and aggressive thoughts: Interaction versus observation. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 15(1), 125-139.
doi:10.1016/0193-3973(94)90009-4
- Champney, R. K., Carroll, M., Surpris, G., & Cohn, J. V. (2015). Conducting training transfer studies in virtual environments. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications.* (pp. 781-795). Boca Raton: CRC Press.
- Chihara, T., & Seo, A. (2018). Evaluation of physical workload affected by mass and center of mass of head-mounted display. *Applied Ergonomics*, 68, 204-212.
doi:10.1016/j.apergo.2017.11.016
- Ciccotelli, J., & Marsot, J. (2005). *Réalité virtuelle et prévention - Apports et tendances.* *Hygiène et sécurité du travail*, 2005(199), 99-111.
- Cobb, S. V. G., Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 169-186.
doi:10.1162/105474699566152
- Conradi, J., & Alexander, T. (2008). Display Devices for Virtual Environments: Impact on Performance, Workload, and Simulator Sickness. In R. van Liere & B. Mohler (Eds.), *Proceedings of the 14th Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE 2008)* (pp. 103-109). Geneva: The Eurographics Association.
- Crosier, J. K., Cobb, S. V. G., & Wilson, J. R. (2000). Experimental Comparison of Virtual Reality with Traditional Teaching Methods for Teaching Radioactivity. *Education and Information Technologies*, 5(4), 329-343.
doi:10.1023/A:1012009725532
- Das, S., Maiti, J., & Krishna, O. B. (2020). Assessing mental workload in virtual reality based EOT crane operations: A multi-measure approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 80, 103017.
doi:10.1016/j.ergon.2020.103017
- de Kort, Y. A. W., IJsselsteijn, W. A., Kooijman, J. o., & Schuurmans, Y. (2003). Virtual Laboratories: Comparability of Real and Virtual Environments for Environmental Psychology. *Presence*, 12(4), 360-373.
doi:10.1162/105474603322391604
- Deng, Z., & Interrante, V. (2019). Am I Floating or Not? : Sensitivity to Eye Height Manipulations in HMD-based Immersive Virtual Environments. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception (SAP 2019)* (Sept 19-20, 2019, Barcelona, Spain) (pp. Article 14). New York: Association for Computing Machinery.

- Descheneaux, C. R., Reinerman-Jones, L., Moss, J., Krum, D., & Hudson, I. (2020). Negative Effects Associated with HMDs in Augmented and Virtual Reality. In J. Y. C. Chen & G. Fragnomeni (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction (HCII 2020, LNCS 12190)* (pp. 410-428). Cham: Springer International Publishing.
- DGUV FBVW (2018). *Webangebot für alle zugänglich machen. Barrierefreie Webauftritte umsetzen und selbst prüfen (Fachbereich Aktuell, FBVW-101, Sachgebiet Barrierefreie Arbeitsgestaltung)*. Berlin: DGUV Fachbereich Verwaltung.
- *DGUV Information 215-450 (2021). *Softwareergonomie*. Berlin: DGUV.
- *DIN EN 894-2 (2009). *Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen*. Berlin: DGUV.
- *DIN EN ISO 6385 (2016). *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2016)*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-333. (2017). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 333: Stereoskopische Displays unter Verwendung von Brillen (ISO 9241-333:2017)*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-391. (2016). *Ergonomics of human-system interaction — Part 391: Requirements, analysis and compliance test methods for the reduction of photosensitive seizures (ISO 9241-391:2016)*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-392. (2017). *Ergonomics of human-system interaction — Part 392: Ergonomic recommendations for the reduction of visual fatigue from stereoscopic images (ISO 9241-392:2015)*. Berlin: Beuth.
- *DIN EN ISO 10075-1 (2018). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe (ISO 10075-1:2017)*. Berlin: Beuth.
- Dindar, N., Tekalp, A. M., & Basdogan, C. (2015). *Dynamic Haptic Interaction with Video*. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 115-130). Boca Raton: CRC Press.
- DiZio, P., Lackner, J. R., & Champney, R. K. (2015). *Proprioceptive adaptation and aftereffects*. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 835-856). Boca Raton: CRC Press.
- Duffy, V. G., & Chan, A. H. S. (2002). *Effects of virtual lighting on visual performance and eye fatigue*. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 12(2), 193-209. doi:10.1002/hfm.10008
- Eastgate, R. M., Wilson, J. R., & D'Cruz, M. (2015). *Structured development of virtual environments*. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 353-389). Boca Raton: CRC Press.
- Farmani, Y., & Teather, R. J. (2020). *Evaluating discrete viewpoint control to reduce cybersickness in virtual reality*. *Virtual Reality*, 24(4), 645-664. doi:10.1007/s10055-020-00425-x
- Feldstein, I. T., Kölsch, F. M., & Konrad, R. (2020). *Egocentric Distance Perception: A Comparative Study Investigating Differences Between Real and Virtual Environments*. *Perception*, 49(9), 940-967. doi:10.1177/0301006620951997
- Felip, F., Galán, J., García-García, C., & Mulet, E. (2020). *Influence of presentation means on industrial product evaluations with potential users: a first study by comparing tangible virtual reality and presenting a product in a real setting*. *Virtual Reality*, 24(3), 439-451. doi:10.1007/s10055-019-00406-9
- Fox, J., Arena, D., & Bailenson, J. N. (2009). *Virtual reality: A survival guide for the social scientist*. *Journal of Media Psychology: Theories, Methods, and Applications*, 21(3), 95-113. doi:10.1027/1864-1105.21.3.95

- Gabbard, J. L. (2015). Usability engineering of virtual environments. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 721-747). Boca Raton: CRC Press.
- *Goldstein, E.B. & Brockmole, J.R. (2021). *Sensation and Perception*. Boston: Cengage Learning.
- Gude, D. (2004). Prospektive Ergonomie beim Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz – Unterstützungspotential virtueller Realität. *Zentralblatt Arbeitsmedizin*, 54(2004), 326-334.
- Haans, A., & Ijsselstein, W. (2006). Mediated social touch: a review of current research and future directions. *Virtual Reality*, 9(2), 149-159.
doi:10.1007/s10055-005-0014-2
- Hale, K. S., & Stanney, K. M. (Eds.). (2015). *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications*. (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Harris, D. J., Buckingham, G., Wilson, M. R., Brookes, J., Mushtaq, F., Mon-Williams, M., & Vine, S. J. (2019). Testing the fidelity and validity of a virtual reality golf putting simulator. *PsyArXiv*, 3, 1-20.
- Harris, D. J., Wilson, M., & Vine, S. (2020a). Development and validation of a simulation workload measure: the simulation task load index (SIM-TLX). *Virtual Reality*, 24(4), 557-566.
doi:10.1007/s10055-019-00422-9
- Harris, D. J., Bird, J. M., Smart, P. A., Wilson, M. R., & Vine, S. J. (2020b). A Framework for the Testing and Validation of Simulated Environments in Experimentation and Training. *Frontiers in Psychology*, 11(605).
doi:10.3389/fpsyg.2020.00605
- Harris, D. J., Buckingham, G., Wilson, M. R., Brookes, J., Mushtaq, F., Mon-Williams, M., & Vine, S. J. (2020c). The effect of a virtual reality environment on gaze behaviour and motor skill learning. *Psychology of Sport and Exercise*, 50, 101721.
doi:10.1016/j.psychsport.2020.101721
- Hoyet, L., Argelaguet, F., Nicole, C., & Lécuyer, A. (2016). “Wow! I Have Six Fingers!”: Would You Accept Structural Changes of Your Hand in VR? *Frontiers in Robotics and AI*, 3(27).
doi:10.3389/frobt.2016.00027
- Hu, B., Ma, L., Zhang, W., Salvendy, G., Chablat, D., & Bennis, F. (2011). Predicting real-world ergonomic measurements by simulation in a virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), 64-71.
doi:10.1016/j.ergon.2010.10.001
- Hung, T.-M., & Sun, T.-L. (2011). Investigating Mental Workload of VR Training versus Serious Game Training on Shoot Operation Training. *International Journal of Psychological and Behavioral Sciences*, 5(10), 1262-1265.
doi:10.5281/zenodo.1075168
- Hyodo, K., Ujike, H., & Tada, M. (2019). Standardization activities for Head-Mounted Displays from ergonomic aspects. In *Proceedings of the International Display Workshops (IDW '19)* (Nov 27-29, 2019, Sapporo Convention Center, Japan) (Vol. 26). Sapporo: IDW.
doi:10.36463/idw.2019.1299
- IEC 63145-21-20 ED1 Eyewear display - Part 21-20: Specific measuring methods for VR type - Image quality
- ISO/TR 9241-393. (2020). *Ergonomics of human-system interaction - Part 393: Structured literature review of visually induced motion sickness during watching electronic images (ISO/TR 9241-393:2020-03)*. Geneva: ISO.
- ISO 9241-394. (2020). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 394: Ergonomische Anforderungen zur Reduzierung unerwünschter biomedizinischer Effekte der visuell induzierten Bewegungskrankheit bei der Betrachtung elektronischer Bilder (ISO 9241-394:2020)*. Geneva: ISO.

- Jones, D. L., Dechmerowski, S., Oden, R., Lugo, V., Wang-Costello, J., & Pike, W. (2015). Olfactory Interfaces. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 131-162). Boca Raton: CRC Press.
- Kaufeld, M., & Nickel, P. (2019). Level of Robot Autonomy and Information Aids in Human-Robot Interaction Affect Human Mental Workload – An Investigation in Virtual Reality. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 11581, 278-291.
doi:10.1007/978-3-030-22216-1_21
- Kennedy, R. S., Stanney, K. M., & Dunlap, W. P. (2000). Duration and Exposure to Virtual Environments: Sickness Curves During and Across Sessions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5), 463–472.
doi:10.1162/105474600566952
- Kennedy, R. S., Kennedy, R. C., Kennedy, K. E., Wasula, C., & Bartlett, K. M. (2015). Virtual environments and product liability. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 505-518). Boca Raton: CRC Press.
- Kern, A. C., & Ellermeier, W. (2020). Audio in VR: Effects of a Soundscape and Movement-Triggered Step Sounds on Presence. *Frontiers in Robotics and AI*, 7(20).
doi:10.3389/frobt.2020.00020
- Kim, E., & Shin, G. (2018). Head Rotation and Muscle Activity When Conducting Document Editing Tasks with a Head-Mounted Display. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 952-955.
doi:10.1177/1541931218621219
- Kim, J., & Interrante, V. (2017). Dwarf or Giant: The Influence of Interpupillary Distance and Eye Height on Size Perception in Virtual Environments. In R. W. Lindeman, G. Bruder, & D. Iwai (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE 2017)* (pp. 153-160). New York: The Eurographics Association (ACM).
- Koppenborg, M., Nickel, P., Naber, B., Lungfiel, A., & Huelke, M. (2017). Effects of movement speed and predictability in human–robot collaboration. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(4), 197-209.
doi:10.1002/hfm.20703
- Kozlowski, S. W. J., & DeShon, R. P. (2004). A Psychological Fidelity Approach to Simulation-Based Training: Theory, Research, and Principles. In E. Salas, L. R. Elliot, S. G. Schflett, & M. D. Coovert (Eds.), *Scaled Worlds: Development, validation, and applications* (pp. 75-99). Burlington: Ashgate Publishing.
- Kwok, K. K. K., Ng, A. K. T., & Lau, H. Y. K. (2018, 16-20 Oct. 2018). Effect of Navigation Speed and VR Devices on Cybersickness. Paper presented at the 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct).
- Lackey, S. J., Salcedo, J. N., Szalma, J. L., & Hancock, P. A. (2016). The stress and workload of virtual reality training: the effects of presence, immersion and flow. *Ergonomics*, 59(8), 1060-1072.
doi:10.1080/00140139.2015.1122234
- Lacko, J. (2020). Health Safety Training for Industry in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2020 Cybernetics & Informatics (K&I) (Jan 29 - Feb 1, 2020, Velke Karlovice, Czech Republic)* (pp. 1-5). New York: IEEE.
- Lampton, D. R., Knerr, B. W., Goldberg, S. L., Bliss, J. P., Moshell, J. M., & Blau, B. S. (1994). The Virtual Environment Performance Assessment Battery (VEPAB): Development and Evaluation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 145-157.
doi:10.1162/pres.1994.3.2.145

- Lampton, D. R., Knerr, B. W., Goldberg, S. L., Bliss, J. P., Moshell, J. M., & Blau, B. S. (1995). *The Virtual Environment Performance Assessment Battery: Development and Evaluation* (Technical Report 1029). Orlando: US Army Research Institute for the Behavioural and Social Sciences.
- Lanier, M. K., Waddell, T. F., Elson, M., Tamul, D. J., Ivory, J. D., & Przybylski, A. K. (2019). Virtual reality check: Statistical power, reported results, and the validity of research on the psychology of virtual reality and immersive environments. *Computers in Human Behavior*, 100, 70-78.
doi:10.1016/j.chb.2019.06.015
- Lathan, C. E., Tracey, M. R., Sebrechts, M. M., Clawson, D. M., & Higgis, G. A. (2002). Using virtual environments as training simulators: Measuring transfer. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications*. (pp. 403-414). Mahwah: LEA.
- Lawson, B. D. (2015). Motion Sickness Symptomatology and Origins. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications*. (pp. 531-600). Mahwah: LEA.
- Lawson, B. D., Graeber, D. A., Mead, A. M., & Muth, E. R. (2002). Signs and symptoms of human syndromes associated with synthetic experiences. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications*. (pp. 589-616). Mahwah: LEA.
- Lawson, B. D., & Riecke, B. E. (2015). The Perception of Body Motion. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 163-195). Boca Raton: CRC Press.
- Lawson, G., Shaw, E., Roper, T., Nilsson, T., Bajorunaite, L., Batool, A. (2019). Immersive virtual worlds: Multi-sensory virtual environments for health and safety training (Research summary). Wigston: IOSH.
- Luong, T., Argelaguet, F., Martin, N., & Lecuyer, A. (2020). Introducing Mental Workload Assessment for the Design of Virtual Reality Training Scenarios. Paper presented at the 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR, 22-26 March 2020).
- Määttä, T. (2003). *Virtual environments in machinery safety analysis* (VTT Publications 516). Espoo: VTT Publications.
- Määttä, T. (2007). Virtual environments in machinery safety analysis and participatory ergonomics. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17(5), 435-443.
doi:10.1002/hfm.20084
- Manis, K. T., & Choi, D. (2019). The virtual reality hardware acceptance model (VR-HAM): Extending and individuating the technology acceptance model (TAM) for virtual reality hardware. *Journal of Business Research*, 100, 503-513.
doi:10.1016/j.jbusres.2018.10.021
- Marc, J., Belkacem, N., & Marsot, J. (2007). Virtual reality: A design tool for enhanced consideration of usability "validation elements". *Safety Science*, 45(5), 589-601.
doi:10.1016/j.ssci.2007.01.004
- McAfee, R., Haxton, C., Harrison, M., & Gess, J. (2020). Thermal Characterization of a Virtual Reality Headset during Transient and Resting Operation. In 36th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM) (Mar 16-20, 2020, San Jose, USA) (pp. 131-136). New York: IEEE.
- McCauley Bell, P. R. (2002). Ergonomics in Virtual Environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications*. (pp. 807-826). Mahwah: LEA.
- McGrath, J. E. (1976). Stress and behavior in organizations. In: M. D. Dunette (Ed.), *Handbook of industrial and organizational psychology* (pp. 1351-1395). Chicago: Rand McNally.

- McLellan, H. (1998). Cognitive Issues in Virtual Reality. *Journal of Visual Literacy*, 18(2), 175-199.
doi:10.1080/23796529.1998.11674538
- Moline, J. (1995). *Virtual environment for health care (NISTIR 5740)*. Gaithersburg: US Department of Commerce.
- Naber, B., Lungfiel, A., Nickel, P., & Huelke, M. (2013). Human Factors zu Robotergeschwindigkeit und -distanz in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration. In G. e.V. (Ed.), *Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen* (pp. 421–424). Dortmund: GfA-Press.
- Naber, B., Koppenborg, M., Nickel, P., Lungfiel, A., & Huelke, M. (2014). Effects of movement speed, movement predictability and distance in human-robot-collaboration. In XX World Congress on Safety and Health at Work 2014 'Sharing a Vision for Sustainable Prevention' (pp. Forum for Prevention, F02.26). Frankfurt: ILO, ISSA, DGUV.
- Nachreiner, F. (1980). Zur Artefaktproblematik in der Arbeits- und Betriebspsychologie. In: W. Bungard (Hrsg.), *Die "gute" Versuchsperson denkt nicht*. München: Urban & Schwarzenberg.
- Neguț, A., Matu, S.-A., Sava, F. A., & David, D. (2016). Task difficulty of virtual reality-based assessment tools compared to classical paper-and-pencil or computerized measures: A meta-analytic approach. *Computers in Human Behavior*, 54, 414-424.
doi:10.1016/j.chb.2015.08.029
- Ng, P. P. W., Duffy, V. G., & Yucel, G. (2012). Impact of dynamic virtual and real robots on perceived safe waiting time and maximum reach of robot arms. *International Journal of Production Research*, 50(1), 161-176.
doi:10.1080/00207543.2011.571452
- Nichols, S. (1999). Physical ergonomics of virtual environment use. *Applied Ergonomics*, 30(1), 79-90.
doi:10.1016/S0003-6870(98)00045-3
- Nichols, S., Cobb, S. V. G., & Wilson, J. R. (1997). Health and Safety Implications of Virtual Environments: Measurement Issues. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 667-675.
doi:10.1162/pres.1997.6.6.667
- Nichols, S., & Patel, H. (2002). Health and safety implications of virtual reality: a review of empirical evidence. *Applied Ergonomics*, 33(3), 251-271.
doi:10.1016/s0003-6870(02)00020-0
- Nichols, S., Ramsey, A., Cobb, S. V. G., Neale, H., D'Cruz, M., & Wilson, J. R. (2000). *Incidence of virtual reality induced symptoms and effects (VRISE) in desktop and projection screen display systems*. Sudbury: HSE Books.
- Nickel, P. (2020). Depth and Colour Perception in Real and Virtual Robot Cells in the Context of Occupational Safety and Health. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 12198, 228-242.
doi:10.1007/978-3-030-49904-4_17
- Nickel, P., & Lungfiel, A. (2018). Improving Occupational Safety and Health (OSH) in Human-System Interaction (HSI) Through Applications in Virtual Environments. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 10917, 85-96.
doi:10.1007/978-3-319-91397-1_8
- Nickel, P., & Nachreiner, F. (2010). Evaluation arbeitspsychologischer Interventionen. In U. Kleinbeck & K.-H. Schmidt (Eds.), *Arbeitspsychologie (Enzyklopädie der Psychologie, D-III-1)* (pp. 1003-1038). Göttingen: Hogrefe.
- Nickel, P., Lungfiel, A., Nischalke-Fehn, G., Pappachan, P., Huelke, M., & Schaefer, M. (2010). Evaluation of virtual reality for usability studies in occupational safety and health. In VTT (Ed.),

- Proceedings of the 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2010) (June 14-15, 2010, Tampere, Finland) (pp. 1-6). Tampere: VTT.
- Nickel, P., Lungfiel, A., Huelke, M., & Schaefer, M. (2012a). Evaluationsstudien zur Tiefenwahrnehmung in realer und virtueller Roboterzelle. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA) (Ed.), *Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme - Wege zur gesunden, effizienten und sicheren Arbeit* (pp. 243-247). Dortmund: GfA-Press.
- Nickel, P., Lungfiel, A., Huelke, M., & Schaefer, M. (2012b). Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung in realer und virtueller Roboterzelle. In G. Athanassiou, S. Schreiber-Costa, & O. Sträter (Eds.), *Sichere und gesunde Arbeit erfolgreich gestalten - Forschung und Umsetzung in der Praxis* (pp. 177-180). Kröning: Asanger.
- Nickel, P., Lungfiel, A., Nischalke-Fehn, G., & Trabold, R.-J. (2013). A virtual reality pilot study towards elevating work platform safety and usability in accident prevention. *Safety Science Monitor*, 17(2013), 2/1-2/10.
- Nickel, P., Lungfiel, A., Trabold, R.-J., Bömer, T., & Koppenborg, M. (2014). Prospektive Evaluation einer technischen Schutzmaßnahme zur Verhütung von Unfällen mit Hubarbeitsbühnen. In: M. Eigenstetter, T. Kunz, R. Portuné & R. Trimpopp (Hrsg.), *Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit – Psychologie der gesunden Arbeit* (18. Workshop 2014) (59-62). Kröning: Asanger.
- Nickel, P., Lungfiel, A., & Trabold, R.-J. (2017). Reconstruction of Near Misses and Accidents for Analyses from Virtual Reality Usability Study. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 10700, 182-191.
doi:10.1007/978-3-319-72323-5_12
- Nickel, P., Bärenz, P., Radandt, S., Wichtl, M., Kaufmann, U., Monica, L., Bischoff, H.-J. & Nelutla, M. (2020). Human-system interaction design requirements to improve machinery and systems safety. *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)* 969, 3-13.
doi.org/10.1007/978-3-030-20497-6_1
- Parijat, P., Lockhart, T. E., & Liu, J. (2015a). Effects of Perturbation-Based Slip Training Using a Virtual Reality Environment on Slip-induced Falls. *Annals of Biomedical Engineering*, 43(4), 958-967.
doi:10.1007/s10439-014-1128-z
- Parijat, P., Lockhart, T. E., & Liu, J. (2015b). EMG and Kinematic Responses to Unexpected Slips After Slip Training in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(2), 593-599.
doi:10.1109/TBME.2014.2361324
- Paljic, A. (2017). Ecological Validity of Virtual Reality: Three Use Cases. In Workshop on "Natural human-computer interaction and ecological perception in immersive virtual and augmented reality" (Sep 2017, Catane, Italy) (pp. 301-310). Cham: Springer International Publishing.
- Patel, H., Stefani, O., Sharples, S., Hoffmann, H., Karaseitanidis, I., & Amditis, A. (2006). Human centred design of 3-D interaction devices to control virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(3), 207-220.
doi:10.1016/j.ijhcs.2005.08.010
- Perret, J. (2012). Industrial applications of haptic devices. In VR-OOS Workshop 2012 (9./10. Oktober 2012, DLR Oberpfaffenhofen). Oberpfaffenhofen: DLR.
- Péruch, P., Belingard, L., & Thinus-Blanc, C. (2000). Transfer of Spatial Knowledge from Virtual to Real Environments. In C. Freksa, C. Habel, W. Brauer, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition II: Integrating Abstract Theories, Empirical Studies, Formal Methods, and Practical Applications* (pp. 253-264). Berlin: Springer.

- Petukhov, I. V., Glazyrin, A. E., Gorokhov, A. V., Steshina, L. A., & Tanryverdiev, I. O. (2020). Being present in a real or virtual world: A EEG study. *International Journal of Medical Informatics*, 136, 103977.
doi:10.1016/j.ijmedinf.2019.103977
- Pfendler, C., & Widdel, H. (2004). Psychological Effects Of Work With A Helmet-mounted Display. In K. Morgan, C. A. Brebbia, J. Sanchez, & A. Voiskounsky (Eds.), *Human Perspectives in the Internet Society: Culture, Psychology and Gender* (pp. 83-91). Ashurst: WIT Press.
- Quirk, J. A., Fish, D. R., Smith, S. J. M., Sander, J. W. A. S., Shorvon, S. D., & Allen, P. J. (1995). Incidence of photosensitive epilepsy: a prospective national study. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 95(4), 260-267.
doi:10.1016/0013-4694(95)00118-I
- Rankin, A., Field, J., Kovordanyi, R., Morin, M., Jenvald, J., & Eriksson, H. (2011). Training systems design: bridging the gap between users and developers using storyboards. In *Proceedings of the 29th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics* (Rostock, Germany) (pp. 205–212). New York: Association for Computing Machinery (ACM).
- Riem, L., Dehy, J. V., Onushko, T., & Beardsley, S. (2018). Inducing Compensatory Changes in Gait Similar to External Perturbations Using an Immersive Head Mounted Display. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (128-135). New York: IEEE.
doi:10.1109/VR.2018.8446432
- Roberts, A. C., Yeap, Y. W., Seah, H. S., Chan, E., Soh, C.-K., & Christopoulos, G. I. (2019). Assessing the suitability of virtual reality for psychological testing. *Psychological Assessment*, 31(3), 318-328.
doi:10.1037/pas0000663
- Rolland, J. P., Biocca, F. A., Barlow, T., & Kancherla, A. (1995). Quantification of adaptation to virtual-eye location in see-thru head-mounted displays. In: *Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS '95)* (March 11-15, 1995, Research Triangle Park, North Carolina, USA) (pp. 56-66). New York: IEEE.
doi: 10.1109/VRAIS.1995.512480
- *Schmidtke, H. (1993). Mentale Beanspruchung durch informatorische Belastung. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie* (143-160). München: Hanser.
- *Schmidtke, H. (2011). *Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden* (Ergänzungslieferung 9/2011). Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung.
- Schoeffler, M., Gernert, J. L., Neumayer, M., Westphal, S., & Herre, J. (2015). On the validity of virtual reality-based auditory experiments: a case study about ratings of the overall listening experience. *Virtual Reality*, 19(3), 181-200.
doi:10.1007/s10055-015-0270-8
- Sharples, S., Cobb, S. V. G., Moody, A., & Wilson, J. R. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2), 58-69.
doi:10.1016/j.displa.2007.09.005
- Sharples, S., Stedmon, A. W., D'Cruz, M., Patel, H., Cobb, S. V. G., Yates, T., ... Wilson, J. R. (2007). Human Factors of Virtual Reality - Where are We Now? In R. N. Pikaar, E. A. P. Koningsveld, & P. J. M. Settels (Eds.), *Meeting diversity in ergonomics* (Proceedings of the IEA 2007) (pp. 173-186). Amsterdam: Elsevier.
- Shen, R., Weng, D., Chen, S., Guo, J., & Fang, H. (2019). Mental Fatigue of Long-Term Office Tasks in Virtual Environment. In *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* (Oct 10-18, 2019) (pp. 124-127). New York: IEEE.

- Shoja, M. M., Tubbs, R. S., Malekian, A., Jafari Rouhi, A. H., Barzgar, M., & Oakes, W. J. (2007). Video game epilepsy in the twentieth century: a review. *Child's Nervous System*, 23(3), 265-267.
doi:10.1007/s00381-006-0285-2
- Simeonov, P. I., Hsiao, H., Dotson, B. W., & Ammons, D. E. (2005). Height effects in real and virtual environments. *Human Factors*, 47(2), 430-438.
doi:10.1518/0018720054679506
- Simpson, B. D., Cowgill, J. L., Gilkey, R. H., & Weisenberger, J. M. (2015). Technological considerations in the design of multisensory virtual environments. How real does it need to be? In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 313-333). Boca Raton: CRC Press.
- So, R. H. Y., Ho, A., & Lo, W. T. (2001). A Metric to Quantify Virtual Scene Movement for the Study of Cybersickness: Definition, Implementation, and Verification. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(2), 193-215.
doi:10.1162/105474601750216803
- Stanney, K. M. (1995). Realizing the full potential of virtual reality: human factors issues that could stand in the way. In *Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium 1995* (Mar 11-15, 1995, Research Triangle Park, USA) (pp. 28-34). New York: IEEE.
- Stanney, K. M., & Cohn, J. V. (2012). Virtual Environments. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (2nd ed., pp. 1031-1056). Hoboken: Wiley.
- Stanney, K. M., Mourant, R. R., & Kennedy, R. S. (1998). Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(4), 327-351.
doi:10.1162/105474698565767
- Stanney, K. M., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R., & Graeber, D. A. (2003). Usability engineering of virtual environments (VEs): identifying multiple criteria that drive effective VE system design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(4), 447-481.
doi:10.1016/S1071-5819(03)00015-6
- Stanney, K., Fidopiastis, C., & Foster, L. (2020). Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be. *Frontiers in Robotics and AI*, 7(4).
doi:10.3389/frobt.2020.00004
- Stauffert, J.-P., Niebling, F., & Latoschik, M. E. (2018, 18-22 March 2018). Effects of Latency Jitter on Simulator Sickness in a Search Task. Paper presented at the 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR).
- Steinicke, F., Bruder, G., Jerald, J., Frenz, H., & Lappe, M. (2010). Estimation of Detection Thresholds for Redirected Walking Techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(1), 17-27.
doi:10.1109/TVCG.2009.62
- Stewart, W. F., Lipton, R. B., Celentano, D. D., & Reed, M. L. (1992). Prevalence of migraine headache in the United States. Relation to age, income, race, and other sociodemographic factors. *Jama*, 267(1), 64-69.
- Stone, R. T., Watts, K. P., Zhong, P., & Wei, C.-S. (2011). Physical and Cognitive Effects of Virtual Reality Integrated Training. *Human Factors*, 53(5), 558-572.
doi:10.1177/0018720811413389
- Suma, E., Finkelstein, S., Reid, M., Babu, S., Ulinski, A., & Hodges, L. F. (2010). Evaluation of the Cognitive Effects of Travel Technique in Complex Real and Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(4), 690-702.
doi:10.1109/tvcg.2009.93

- Szpak, A., Michalski, S. C., Saredakis, D., Chen, C. S., & Loetscher, T. (2019). Beyond Feeling Sick: The Visual and Cognitive Aftereffects of Virtual Reality. *IEEE Access*, 7, 130883-130892. doi:10.1109/ACCESS.2019.2940073
- *von Elm, E., Schreiber, G. Haupt, C.C. (2019). Methodische Anleitung für Scoping Reviews (JBI-Methodologie). *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen* 143, 1-7. doi: 10.1016/j.zefq.2019.05.004
- Vasser, M., & Aru, J. (2020). Guidelines for immersive virtual reality in psychological research. *Current Opinion in Psychology*, 36, 71-76. doi:10.1016/j.copsy.2020.04.010
- Västfjäll, D. (2003). The Subjective Sense of Presence, Emotion Recognition, and Experienced Emotions in Auditory Virtual Environments. *CyberPsychology & Behavior*, 6(2), 181-188. doi:10.1089/109493103321640374
- Viirre, E., & Bush, D. (2002). Direct effects of virtual environments on users. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications* (pp. 581-588). Mahwah: LEA.
- Viirre, E., Price, B. J., & Chase, B. (2015). Direct effects of virtual environments on users. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications* (pp. 521-529). Mahwah: LEA.
- Vorländer, M., & Shinn-Cunningham, B. (2015). Virtual Auditory Displays. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. (pp. 87-114). Boca Raton: CRC Press.
- Weber, A., & Nickel, P. (2020). Prävention von Stolpern, Rutschen und Stürzen (SRS). Betriebspraktische und sportwissenschaftliche Trainingsprogramme mit virtuellen Umgebungen. *ASU Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin*, 55(10), 610-613.
- Whitlock, D., Romano, D., Jelfs, A., & Brna, P. (2000). Perfect presence: What does this mean for the design of virtual learning environments? *Education and Information Technologies*, 5(4), 277-289. doi:10.1023/A:1012001523715
- Whitman, L. E., Jorgensen, M., Hathiari, K., & Malzahn, D. (2004). Virtual reality: its usefulness for ergonomic analysis. In *Proceedings of the 36th Conference on Winter Simulation (WSC 2004)* (Dec 5-8, 2004, Washington, USA) (Vol. 2, pp. 1740-1745). New York: Association for Computing Machinery (ACM).
- Wickens, C. D., & Baker, P. (1995). Cognitive issues in virtual reality. In W. Barfield & T. A. Furness (Eds.), *Virtual environments and advanced interface design* (pp. 514-541). New York: Oxford University Press.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2013). *Engineering Psychology and Human Performance*. Upper Saddle River: Pearson.
- Williams, D., Caplan, S., & Xiong, L. (2007). Can You Hear Me Now? The Impact of Voice in an Online Gaming Community. *Human Communication Research*, 33(4), 427-449. doi:10.1111/j.1468-2958.2007.00306.x
- Wilson, J. R. (1996). Effects of participating in virtual environments a review of current knowledge. *Safety Science*, 23(1), 39-51. doi:10.1016/0925-7535(96)00026-4
- Wilson, J. R. (1997). Virtual environments and ergonomics: Needs and opportunities. *Ergonomics*, 40(10), 1057-1077. doi:10.1080/001401397187603
- Wilson, J. R. (1999). Virtual environments applications and applied ergonomics. *Applied Ergonomics*, 30(1), 3-9. doi:10.1016/S0003-6870(98)00040-4

- Wilson, J. R., & D'Cruz, M. (2006). Virtual and interactive environments for work of the future. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(3), 158-169.
doi:10.1016/j.ijhcs.2005.08.007
- Wilson, C. J., & Soranzo, A. (2015). The Use of Virtual Reality in Psychology: A Case Study in Visual Perception. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, 1-7 (Article ID 151702).
doi:10.1155/2015/151702
- Wilson, J. R., Eastgate, R. M., & D'Cruz, M. (2002). Structured development of virtual environments. In K. M. Stanney (Ed.), *Handbook of Virtual Environments. Design, Implementation, and Applications* (pp. 353-378). Mahwah: LEA.
- Yellowlees, P. M., Holloway, K. M., & Burke Parish, M. (2012). Therapy in virtual environments - clinical and ethical issues. *Telemedicine and e-Health*, 18(7), 558-564.
doi:10.1089/tmj.2011.0195
- Yu, M., Zhou, R., Wang, H., & Zhao, W. (2019). An evaluation for VR glasses system user experience: The influence factors of interactive operation and motion sickness. *Applied Ergonomics*, 74, 206-213.
doi:10.1016/j.apergo.2018.08.012