

Entwicklung eines Mixed-Mock-Up Simulators für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen

Lorenz Hagenmeyer, Martin Braun, Frank Haselberger
Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
Markstrategieteam Human Engineering, Competence Center Virtual Environments

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Mixed-Mock-Up-Simulators sowie der Nachweis, dass eine solche Vorrichtung die realitätsnahe Simulation eines Arbeitssystems unter Einbeziehung des Menschen mit seiner Wahrnehmung, seinen Reaktionen und Handlungsweisen ermöglicht. Es wird eine Einführung in Inhalte der Arbeitsforschung sowie ein Überblick über VR-Technologien gegeben. Daraufhin wird die Entwicklung eines Versuchsaufbaus mit Mixed-Mock-Up-Ansatz am Beispiel eines Hallenkranes vorgestellt. Schließlich werden die Ergebnisse einer auf diesem Versuchsstand durchgeführten Untersuchung vorgestellt und diskutiert.

Es wird aufgezeigt, wie der Mensch mit seiner Wahrnehmung und seinen Reaktionen bzw. Handlungsweisen in eine rechnergestützte Simulation eines Arbeitssystems eingebunden werden kann.

1 Einleitung

Steigende Rechnerleistungen bei gleichzeitig sinkenden Kosten ermöglichten es, in den letzten Jahren zunehmend komplexe Systeme rechentechnisch zu simulieren. Eine solche Vorgehensweise ermöglicht es, vielschichtige Systeme zu analysieren und z.B. durch Parametervariationen zu optimieren. Sie vereint dabei große Flexibilität mit relativ geringen Kosten. Dementsprechend ist in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsbereichen ein Trend weg von Realversuchen hin zu computergestützten Simulationstechniken zu verzeichnen.

In der Regel werden Systeme bzw. Vorgänge simuliert, deren Eigenschaften und Verhalten mit ausreichender Genauigkeit mathematisch beschrieben werden kann. Dieses Charakteristikum beschränkt den Einsatz von Simulationstechniken in der Arbeitsforschung deutlich, da hier der Mensch eine maßgebliche Komponente von Arbeitssystemen darstellt. Der Mensch ist in seiner subjektiven Wahrnehmung und den daraus resultierenden Reaktionen und Handlungsweisen nur unzureichend parametrisierbar; sein spontanes Verhalten lässt sich daher nur unzulänglich simulieren. Um dennoch die oben genannten Vorteile von Simulationstechniken in der Arbeitsforschung zu nutzen, muss der Mensch in eine Simulation des Arbeitssystems eingebunden werden. In einer solchen „Operator-In-The-Loop“-Konfiguration können zum Beispiel Arbeitssysteme hinsichtlich ihrer Effizienz oder auch hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Störeinflüssen optimiert werden. Zu letzteren gehören zum Beispiel systembedingte Einflüsse einer Gefahrensituation auf den Nutzer, wie auch dessen Möglichkeiten, auf solche Situationen angemessen zu reagieren. Mittels so gearteter Simulationstechniken kann ein Arbeitssystem bereits frühzeitig in seiner Planung an den Menschen angepasst und optimiert werden. Umgekehrt kann durch ein solches Simulationssystem der Mensch besonders effizient und gefahrlos für ein Arbeitssystem geschult werden.

Grundsätzlich stellt sich demnach die Frage, wie der Mensch mit seiner Wahrnehmung, seinen Reaktionen und seinen spontanen Handlungsweisen in eine Computersimulation eingebunden werden kann. Zu diesem Zweck muss eine hinreichende Immersion gegeben sein: Diese beschreibt die objektive Fähigkeit des Simulationssystems, die Sinne des Menschen mit Stimuli zu versorgen. Insbesondere Virtual Reality (VR) Technologien weisen dabei einen hohen Immersionsgrad auf. Kritische Parameter im Kontext der Arbeitsforschung sind bei VR-Simulationen derzeit die unzureichende Detailtreue der Darstellung und die unzulänglich erforschte Abbildung von realitätsnahen Arbeitsbelastungen.

Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war die exemplarische Entwicklung eines Simulators im Rahmen einer Vorstudie, der die Integration der menschlichen Komponente in eine Computersimulation erlaubt. In der Forschung und z.T. auch in der Anwendung sind Simulatoren, die diesen Ansprüchen graduell entsprechen, aus den Bereichen Automobil und Flugzeug bekannt. Entsprechende VR-basierte Anwendungen befinden sich jedoch noch in ihrer Erforschung. Der im Rahmen dieser Forschungsarbeit zu entwickelnde Simulator musste daher zum einen eine hochimmersive Mensch-Maschine-Schnittstelle aufweisen und zum anderen im Rahmen einer standardisierten Arbeitsaufgabe erlauben, die Arbeitsbelastung und -beanspruchung des Nutzers zu bewerten. Dies erlaubte eine Abschätzung der Güte bzw. der Effizienz des virtuellen Kransimulators zu Zwecken von Arbeitssystemanalyse und Schulung. Die oben beschriebene Aufgabe war am Beispiel eines Hallenkranes umzusetzen.

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über Ziele, Methoden und Problemfelder der Arbeitsforschung sowie über VR Technologien und ihre bisherigen Anwendungsbereiche in der Arbeitsforschung gegeben. Dann wird die Entwicklung eines exemplarischen Versuchsaufbaus mit Mixed-Mock-Up-Ansatz vorgestellt, der die oben genannten Kriterien erfüllt. Schließlich werden zur Evaluation desselben die Ergebnisse einer auf diesem Versuchsstand durchgeführten Untersuchung vorgestellt und diskutiert.

2 Arbeitsforschung und -gestaltung

Die Arbeitsforschung hat zum Ziel, durch eine zweckmäßige Analyse und Organisation von Arbeitssystemen unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des arbeitenden Menschen sowie seiner individuellen und sozialen Bedürfnisse ein optimales Zusammenwirken von Mensch, Betriebsmitteln und Arbeitsgegenständen zu erreichen. Die praktische Umsetzung der Erkenntnisse der Arbeitsforschung erfolgt in der Arbeitsgestaltung. Diese trägt durch eine ausgewogene Beanspruchung dazu bei, die Leistungsfähigkeit des arbeitenden Menschen dauerhaft zu erhalten. Neben der Gewährung der Effektivität eines Arbeitssystems ist ein weiteres Gestaltungsziel die Steigerung von Effizienz und Zuverlässigkeit desselben durch Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und durch Beeinflussung des Arbeitsverhaltens. Damit verfolgen Arbeitsforschung und -gestaltung zugleich humane und rationale Ziele (Bullinger 1994). Grundsätzlich ist auch bei der Arbeitsforschung im Rahmen der oben dargestellten Einschränkungen eine Verschiebung von experimentellen Realversuchen hin zu computergestützten Simulationen zu verzeichnen.

3 Virtual Reality

Der Begriff Virtual Reality (VR) bezeichnet synonym mit dem Begriff Virtual Environments (VE) eine Schnittstelle zur räumlichen, multisensorischen und zeitkontinuierlichen Einbindung des Benutzers in eine computergenerierte Umgebung. Ellis definiert eine virtuelle Umgebung als „a

synthetic, interactive illusory environment perceived when a user wears appropriate apparatus, providing a coordinated presentation of sensory information, imitating a physical environment” (Ellis 1995).

VR-Systeme ermöglichen es, Arbeitsumgebungen, Gegenstände und Abläufe räumlich zu visualisieren und diese interaktiv zu manipulieren. Sie können dem Anwender einen realitätsnahen Eindruck der Umgebung vermitteln, der zum Empfinden von Präsenz (Eingebundenheit mit persönlicher Verortung in der virtuellen Umgebung) führen kann.

VR-Technologien unterliegen der grundsätzlichen Einschränkung, dass sie die menschlichen Sinneskanäle nicht konsistent ansprechen. So wird z.B. räumliches Sehen durch die entsprechende Fokussierung der Augen, durch Parallaxe-Effekte und durch den Konvergenzwinkel der Sehstrahlen vermittelt. Systembedingt bleiben die Augen in einer virtuellen Umgebung aber auf die immer gleiche Projektionsebene fokussiert, es entsteht eine Informationsdivergenz. Obwohl das Gehirn solche Divergenzen in gewissem Umfang auszugleichen vermag, können eine Verminderung der Tiefenwahrnehmung oder die Simulatorkrankheit nicht ausgeschlossen werden.

In der Arbeitsforschung sind u. a. das Virtual Prototyping, die Usability Simulation sowie Schulung und Training als Anwendungsbereiche der Virtual Reality bekannt (Bullinger et al. 2001).

4 VR-Simulation zur Kransteuerung

4.1 Untersuchungsziel

Aus den vorhergehenden Ausführungen folgen vielversprechende Einsatzmöglichkeiten der VR zur Arbeitsforschung und -gestaltung. Zentrale Frage im arbeitswissenschaftlichen Sinne ist dabei die Möglichkeit, in einer virtuellen Umgebung Belastungen realitätsnah zu simulieren und somit entsprechende Beanspruchungsreaktionen zu erzeugen. Es wurde daher empirisch untersucht, wie sich in einer virtuellen Umgebung aufgaben- und umgebungsbezogene Belastungsfaktoren realitätsnah abbilden lassen¹ und wie sich diese virtuell simulierten Belastungsfaktoren auf die Leistung und die Beanspruchung des in einer virtuellen Umgebung arbeitenden Menschen auswirken.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Versuchsanordnung zur Simulation von Fahr- und Steuertätigkeiten an einem virtuellen Hallen-Brückenkran realisiert. Kennzeichen des Kransimulators sind sein begrenzter Funktionsumfang, der klar strukturiert und auch von ungeübten Nutzern zuverlässig beeinflussbar ist.

Es wurden verschiedene aufgabenbezogene Leistungsanforderungen (d.h. Fahr- und Steueraufgaben, z.T. unter Zeitdruck) sowie umgebungsbezogene Belastungsfaktoren (d.h. Geräusche, Lichteffekte) simuliert und deren Wirkungen auf die Leistungs- und Beanspruchungsparameter von Versuchspersonen (VPN, Sg. VP) untersucht. Anhand der Ergebnisse wurden Potentiale und Grenzen der VR-Anwendung für die Zwecke der Kransimulation ermittelt.

¹ Das den Ausführungen zugrunde liegende Forschungsvorhaben „Panikforschung zur Vermeidung von Unfällen an der Schnittstelle Mensch-fördertechnische Maschine“ wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (Kz. BU 528/21).

4.2 Versuchsaufbau

4.2.1 Mixed-Mock-Up-Steuerstand

Die virtuelle Umgebung wurde im vollimmersiven, würfelförmigen Stereoprojektionsraum *HyPI-6* (Hybrid Personal Immersion System mit 6 Projektionswänden) des Fraunhofer IAO erzeugt. Für diese Untersuchung wurde eine Projektion im Aktiv-Stereo-Modus genutzt, bei der je ein Projektor pro Wand eingesetzt wird, um die beiden Perspektiven für das rechte und linke Auge abwechselnd zu projizieren. Von einem Grafikkomputer des Typs SGI Onyx wurden rechnergenerierte Bilder mit einer



Abbildung 1: Screenshot der Kranhalle mit Koordinatensystem

Auflösung von je 1024x1024 Bildpunkten auf fünf der sechs Raumwände dargestellt. Eine Shutterbrille vermittelte durch die Aufteilung der Perspektiven für das rechte und linke Auge das stereoskopische, also räumliche Sehen. Auf die sonst in VR-Systemen übliche Positionsmessung (Tracking) des Augpunktes konnte verzichtet werden, da die Lage der Augen bzw. des Kopfes durch den im Folgenden beschriebenen Kranfahrersitz festgelegt war.

Simuliert wurde das Abbild einer realen Kranhalle, die auf der Basis bestehender CAD-Datensätze mittels eines 3D-Modellierprogrammes gestaltet und anhand von Fotografien texturiert wurde. In der Halle wurde ein Brückenkran mit Laufkatze, Seil und Lastmagnet dargestellt, der dreiachsiger verfahren werden konnte (vgl. Abbildung 1).

Die Steuerung erfolgte über einen seriengefertigten Kranfahrersitz mit Bedienteilkonsolen, welcher im Eingangsbereich des Projektionsraums ortsfest positioniert wurde. Der rechte Steuerhebel vermittelte die Bewegung in x- und y-Richtung (Verfahren), der linke Steuerhebel die in z-Richtung (Heben/Senken). Der Lastmagnet konnte mit einem Schalter an- und abgeschaltet werden, was dem Bediener das An- und Abschlagen der Last erlaubte. Dieser sog. „Mixed-Mock-Up“ verknüpft reale und virtuelle Elemente; der somit vermittelte haptische Eindruck steigert Immersion und Präsenz.

Auf der Basis der am Fraunhofer IAO entwickelten VR-Software *Lightning* wurde eine Simulationsanwendung entwickelt, um den Hallenkran und seine Umgebung zu visualisieren und die erforderlichen Funktionalitäten bereitzustellen. Hierzu wurden die Bedienteile der Steuerkonsole als Eingabegeräte einbezogen. Das Schwingungsverhalten von Seil und Magnet wurde physikalisch naturgetreu abgebildet. Zudem wurde eine Kollisionserkennung des Kranhakens integriert.

Zur Auralisation wurden Umgebungsgeräusche eines realen Kranbetriebs aufgenommen und innerhalb der Simulationsanwendung den entsprechenden Fahrbewegungen des virtuellen Kranes zugeordnet. Zur Darstellung dieser Audiokulisse wurden zwei schräg hinter dem Kranführersitz

angeordnete, aktive Studiolautsprecher sowie ein aktiver Subwoofer eingesetzt. Abbildung 2 veranschaulicht die räumliche Anordnung des Versuchsaufbaus.



Abbildung 2: Übersicht über den Versuchsaufbau

4.2.2 Steueraufgabe

Als Versuchsaufgabe wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2194 (VDI 1995) zur Ausbildung von Kranfahrern eine Fahr- und Steuertätigkeit mit steigendem Schwierigkeitsgrad ausgewählt. Die Aufgabe wurde so gestaltet, dass sie zum einen mit und ohne zusätzliche Belastungsfaktoren dargeboten werden konnte und zum anderen eine kontinuierliche Leistungsmessung zuließ. Inhalt der in drei aufeinanderfolgende Abschnitte gegliederten Aufgabe war das slalomartige Umfahren von Säulen mit einer Last, das „Überspringen“ von Mauern sowie eine Kombination aus diesen Aufgaben, wie in Abbildung 3 visualisiert.

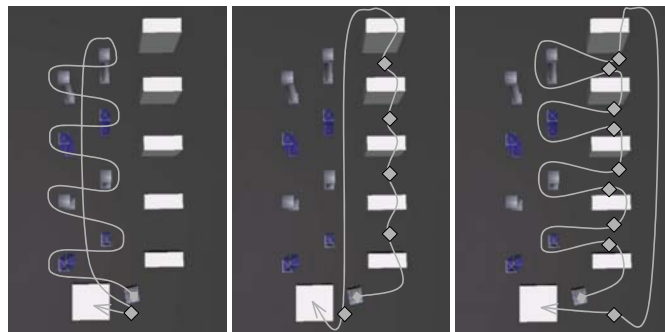


Abbildung 3: Die drei Teilabschnitte der Steueraufgabe.

4.3 Versuchsp Parameter und Messgrößen

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau wurden Belastungs-, Leistungs- und Beanspruchungsgrößen des arbeitenden Menschen untersucht.

Zur Messung und Bewertung dieser Größen eignen sich objektive und subjektive Parameter. In diesem Sinne objektiv sind solche Parameter, die die VP nicht oder nur wenig gezielt beeinflussen kann.

Zur Messung der Arbeitsleistung wurden die Arbeitsgeschwindigkeit, welche als Anzahl erfüllter Teilaufgaben pro Zeiteinheit definiert ist, und die Fehlerrate während der Versuchsdurchführung manuell erfasst. Der Quotient dieser beiden Größen repräsentiert die Arbeitseffizienz und damit den sog. *Speed-Accuracy-Trade-Off* (SATO, *Relation von Geschwindigkeit und Genauigkeit*). Dieser ist als grundlegende Größe bei Aufgaben unter Zeitdruck bekannt. Er dient hier als zentrale Leistungsgröße.

Um die aus der Arbeitsbelastung resultierende Beanspruchung zu quantifizieren wurden psychophysiologische, biochemische und subjektive Parameter erfasst:

Zur ersten Kategorie gehören hier Blutdruck und Herzfrequenz. Der Blutdruck wurde in dieser Untersuchung durch ein halbautomatisches Gerät mit Speicherfunktion nach der Methode von Riva-Rocci gemessen. Die Herzfrequenz wurde durch einen Brustgurt abgenommen und von einem handelsüblichen Pulschronometer erfasst.

Die zweite Kategorie schließt den Konzentrationslevel verschiedener Hormone im Blut ein, die bei Beanspruchung ausgeschüttet werden. Diese Änderungen der Hormonkonzentration können nur im Blut bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden den VPN zu Ruhezeitpunkten und während der Versuchsdurchläufe alle 5 min. über eine Venenverweilkanüle insgesamt 12 Blutproben à 10 ml entnommen. Eine detaillierte Darstellung der Zeitpunkte der Blutentnahme ist in Abbildung 4 gegeben. Die Blutproben wurden vor Ort zentrifugiert und das gewonnene Plasma eingefroren. Eine Auswertung der Konzentrationswerte von Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol wurde später in einem medizinischen Labor durchgeführt.

Aus der dritten Kategorie wurden in den hier beschriebenen Versuchen zwei standardisierte psychologische Instrumente und eine Analogskala eingesetzt: Zur standardisierten Erfassung der subjektiven Beanspruchung wurde die State-Skala des State-Trait-Angstinventars (STAI) nach Laux et al. (1981) eingesetzt. Ebenso wurde das Präsenzempfinden der VPN mit einer adaptierten Form des IPQ-Presence-Questionnaires (Schubert et al. 1995) erfasst. In Abbildung 4 sind die hier zugehörigen Zeitpunkte als „Befragung“ gekennzeichnet. Schließlich gaben die VPN während der Versuchsdurchführung ihr subjektiv empfundenes Beanspruchungsniveau auf einer Analogskala zwischen 1 und 100 an; hierzu wurden sie alle Minute durch ein Reizwort zu einer Selbsteinschätzung aufgefordert, deren Ergebnis die VPN aural mitteilten.

4.4 Versuchsdurchführung

In die Vorstudie wurden $N = 24$ VPN einbezogen. Das Alter der VPN lag zwischen 20 und 50 Jahren und betrug im Mittel $M = 28$ Jahre. 20 Personen waren männlichen Geschlechts, 4 Personen waren weiblich. Alle VPN waren hinsichtlich Fahr- und Steuertätigkeiten am Kran ungeübt.

Nach einer ausführlichen Einweisung, einem 5-minütigen Probekranfahren und der medizinischen Anamnese wurde ein erster Datensatz der medizinischen und selbstbeschreibenden Parameter aufgenommen. Nach einer 10-minütigen Ruhephase absolvierten 14 VPN einen ersten Durchlauf des oben beschriebenen Versuchsparcours. Nach einer weiteren 15-minütigen Ruhephase durchliefen die VPN den Parcours erneut, diesmal wurde jedoch der durchschnittliche Schalldruckpegel von 67 dB(A) auf 76 dB(A) angehoben sowie zusätzliche Belastungsfaktoren eingespielt. Zu diesen gehörten Stöße von weißem Rauschen (1-3s, 95 dB(A)), Netzbrummen und hektische Funksprüche in englischer Sprache auf der auditiven Ebene. Auf der visuellen Ebene wurden ein Beleuchtungsausfall mit schlechten Sichtbedingungen und ein von der virtuellen Hallendecke auf die VP zufallendes Gitter dargeboten. Des Weiteren wurde ein Zeitcounter eingeblendet, der die verbleibende Zeit zur Lösung der Aufgabe anzeigte sowie eine Verringerung der Entlohnung proportional zur Fehlerrate eingeführt. Die Belastungsfaktoren waren diskret mit der Versuchszeit verknüpft um eine standardisierte Versuchsdurchführung zu gewährleisten. Eine schematische Darstellung des Versuchsablaufs findet sich in Abbildung 4.

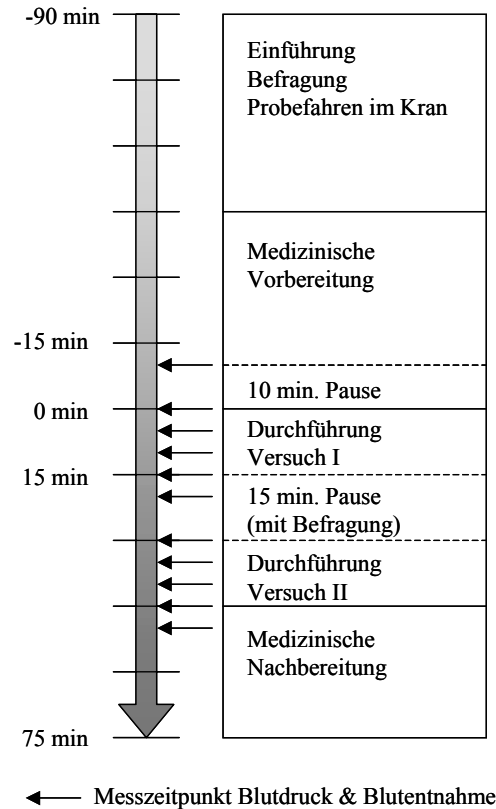


Abbildung 4: Überblick Versuchsablauf

Zehn weitere VPN absolvierten randomisiert den oben beschriebenen Versuchsablauf in der virtuellen Umgebung in umgekehrter Reihenfolge, d.h. zunächst einen Durchlauf mit zusätzlichen Belastungsfaktoren, danach einen Durchlauf ohne dieselben. Da sich in einer Vorauswertung der ersten Versuchsreihe bereits eine hohe Korrelation der biochemischen Parameter mit den übrigen Parametern zeigte, wurde auf die zeitaufwändige und kostenintensive Erhebung derselben verzichtet.

4.5 Ergebnisse und Diskussion

Der Simulator konnte mit voller Funktionalität der Steuerung in einer Mixed-Mock-Up-Konfiguration technisch verwirklicht werden. So konnte eine hohe Immersion der VPN erreicht werden. Es war mit gutem Erfolg möglich, Fahr- und Steuertätigkeiten interaktiv zu simulieren. Einige VPN klagten allerdings über eine unzureichende Tiefenauflösung; diese ist jedoch technisch bedingt und beim derzeitigen Stand der Technik nicht grundsätzlich zu vermeiden.

Eine Methodik zur Leistungs- und Beanspruchungsmessung in virtuellen Umgebungen wurde erarbeitet und konnte mit gutem Erfolg unter den gegebenen Versuchsbedingungen angewendet werden.

Die einzelnen Messwerte wurden durch Bildung der arithmetischen Mittel zu Metavariablen zusammengefasst, welche die jeweiligen Zustände der VPN bei Ruhe- bzw. Belastungsphasen ab wie in Tabelle 1 dargestellt, zeigen.

Bezeichnung	Kürzel	Einbezogene Messzeitpunkte [min. rel. zum Versuchsbeginn]
Vor den Versuchen bzw. Ruhephase	V	-10, 0, 30, 75
Zu Versuch I (ohne zus. Belastungsparameter)	I	5, 10, 15
Zu Versuch II (mit zus. Belastungsparametern)	II	35, 40, 45

Tabelle 1: Bildung der Metavariablen durch Mittelwerte verschiedener Zeitpunkte

Eine deskriptive Statistik dieser Metavariablen zeigt Tabelle 2:

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Herzfrequenz-Ruhe	24	61,33	100,67	73,33	9,679
Herzfrequenz-Versuch I	22	62,67	96,50	76,02	8,912
Herzfrequenz-Versuch II	20	64,67	106,67	79,63	12,484
Systolischer Blutdruck-Ruhe	24	108,67	178,25	131,61	15,399
Systolischer Blutdruck-Versuch I	21	111,67	191,33	137,87	18,625
Systolischer Blutdruck-Versuch II	16	120,33	184,50	144,62	16,611
Diastolischer Blutdruck-Ruhe	24	67,00	111,75	84,50	9,868
Diastolischer Blutdruck-Versuch I	21	67,50	129,33	91,23	13,343
Diastolischer Blutdruck-Versuch II	17	76,00	123,50	92,66	11,154
Noradrenalin-Ruhe	13	1,53	3,95	2,66	,727
Noradrenalin-Versuch I	13	1,95	4,40	3,04	,637
Noradrenalin-Versuch II	13	1,64	4,53	3,05	,729
Adrenalin-Ruhe	13	,13	,66	,35	,154
Adrenalin-Versuch I	13	,19	,99	,58	,243
Adrenalin-Versuch II	13	,13	1,44	,63	,345
STAI-Ruhe	24	1,20	2,70	1,76	,358
STAI-Versuch I	24	1,25	3,50	2,07	,569
STAI-Versuch II	24	1,50	3,55	2,16	,476
Analogskala-Versuch I	22	10,00	61,67	27,73	9,679
Analogskala-Versuch II	23	21,07	72,67	39,56	8,912
Leistungsquotient-Versuch I	24	,60	2,83	1,27	12,484
Leistungsquotient-Versuch II	24	,90	3,20	1,91	15,399
Präsenz-Versuch I	24	1,73	3,00	2,29	18,625
Präsenz-Versuch II	24	1,93	3,00	2,35	16,611

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Metavariablen

Die oben beschriebenen Variablen wurden mittels *t*-Tests für abhängige Stichproben hinsichtlich der Signifikanz ihrer Unterschiedlichkeit verglichen. Sowohl die physiologischen, wie auch die biochemischen und psychologischen Messwerte zeigen einheitlich, dass eine Arbeitsbelastung in der virtuellen Umgebung realitätsnah abgebildet werden kann. Dies wird im Folgenden am Beispiel der Daten der State-Skala des STAI, welcher subjektive Beanspruchung misst, dargestellt: Die VPN wiesen ein niedriges Beanspruchungsmaß zu den Ruhezeiten auf (arithmetisches

Mittel $M = 1.76$), welches sowohl zur Testphase ohne zusätzliche Beanspruchungsparameter signifikant anstieg ($M = 2.07$, $t(23) = 3.48$, $p < .001$), als auch zur Testphase mit zusätzlichen Beanspruchungsparametern ($M = 2.16$, $t(23) = 5.48$, $p < .001$), wobei t den entsprechenden Wert in der t -Verteilung repräsentiert, der Wert in Klammern die Zahl der Freiheitsgrade angibt und p die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit wiedergibt. So sind in allen Parametern signifikante Anstiege von der Ruhephase zu den Versuchsphasen zu verzeichnen, was auf einen signifikanten Anstieg der Beanspruchung der VPN schließen lässt. Dieses Ergebnis, wie auch die Resultate der Präsenz-Erhebung zeigen, dass die VPN mit gutem Erfolg in die rechnergestützte Simulation eingebunden werden können.

Zwischen der Testphase mit und derjenigen ohne zusätzliche Beanspruchungsparameter kann nicht in allen Messgrößen konsistent und/oder signifikant ein Unterschied nachgewiesen werden. So ist zum Beispiel der Unterschied der Messwerte für die State-Skala des STAI zwischen der Testphase ohne zusätzliche Belastungsparameter ($M = 2.07$) und derjenigen mit solchen ($M = 2.16$) nicht signifikant ($t(23) = 1.12$, $p = .26$). Es kann für diese Untersuchung nicht klar abgeleitet werden, dass durch zusätzliche Belastungsparameter auch eine zusätzliche Beanspruchung induziert wird. Die Ergebnisse des Versuchsablaufs in umgekehrter Reihenfolge weisen jedoch darauf hin, dass der Effekt der zusätzlichen Belastungsfaktoren durch Habituations- und Übungseffekte ausgeglichen wird. Dieser Befund wird von den Leistungsparametern gestützt und deckt sich mit den nicht operationalisierten Beobachtungen der Versuchsleiter: unabhängig von den zusätzlichen Belastungsfaktoren zeigt sich ein signifikanter und deutlicher Anstieg der Arbeitseffizienz aller VPN von einem Mittelwert $M = 1.71$ zu $M = 1.91$ mit $t(23) = 5.15$, $p < .001$. Die VPN zeigen also alle ausgeprägte Lerneffekte. Um eine vergleichbare Leistungsmessung zu garantieren wurden die zusätzlichen Beanspruchungsparameter von der eigentlichen Fahr- und Steuertätigkeit entkoppelt. Da die VPN sich stark auf die Erfüllung der Ihnen gestellten Aufgabe konzentrierten, was u.a. durch die hohe Präsenz nachgewiesen wurde (s.o.), ist es allerdings möglich, dass die VPN diese Parameter ausblendeten.

Fernerhin wurde eine spielerische bzw. trial-and-error-Herangehensweise an die Fahraufgabe bei den VPN beobachtet, die in einer realen Umgebung zur Beschädigung des Inventars geführt hätte. Starke emotionale Reaktionen, wie z.B. akute Beanspruchungs- oder Stresszustände mit Leistungseinbrüchen, die im realen Kranbetrieb auftreten können, konnten nicht abgebildet werden. Von nicht VR-basierten Simulatoren sind Unterschiede in der Beanspruchung der VPN zwischen Realsetting und Simulation bekannt. So zeigte z.B. Jorna (1993) eine Differenz der Herzfrequenz bei Flugschülern zwischen einem realen Flug und einem Flug im Simulator von 15-33 Herzschlägen pro Minute. Aus obigen Ausführungen folgt, dass auch in einem VR-basierten, hochimmersiven Simulator dieser Effekt nicht zu vermeiden ist. Hier zeigen sich die Grenzen, aber auch Chancen der VR-Simulation: den VPN war die Virtualität ihrer Umgebung stets bewusst, auch wenn durch Fragebögen ein gleichbleibendes Präsenzniveau nachgewiesen werden konnte. Nach Hacker (1997) kann aber gerade durch einen solchen „spielerischen“ Umgang mit Gefahrensituationen ein nachhaltiger Übungseffekt im Sinne einer Schulung bzw. Verhaltensprävention erzielt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Mixed-Mock-Up-Simulator eines Hallenkranes wurde betriebsfähig entwickelt, aufgebaut und in einer arbeitswissenschaftlichen Versuchsreihe eingesetzt. Es wurde gezeigt, dass es mit diesem Simulator möglich ist, die Belastungsstimuli bei ausgewählten Fahr- und Steuertätigkeiten so realitätsnah abzubilden, dass entsprechende Beanspruchungsreaktionen auftreten. Die For-

schungsergebnisse lassen darauf schließen, dass es prinzipiell möglich ist, weitere Arbeitssysteme hinsichtlich Ihrer Auswirkungen auf den Menschen ausreichend realitätsnah zu simulieren und somit vor ihrer eigentlichen Implementierung auch zu analysieren und optimieren. Die beobachteten Lerneffekte weisen darauf hin, dass ein solcher Simulator prinzipiell geeignet ist, um auf spezielle Arbeitssysteme bezogene Schulungen mit hoher Effizienz durchzuführen.

In weiterer Forschungsarbeit ist nun zu klären, wo die Grenzen einer solchen „Operator-In-The-Loop“-Simulation hinsichtlich der Analyse und Optimierung komplexer Arbeitssysteme, wie auch der Schulung liegen.

Literatur

- Bullinger, H. J. (1994): *Ergonomie*. Stuttgart: Teubner, 1994.
- Bullinger, H.-J.; Breining, R.; Braun, M. (2001): Virtual Reality for Industrial Engineering: Applications for immersive Virtual Environments. In: Salvendy, G. (Hrsg.): *Handbook of Industrial Engineering*, 3. aktualisierte Auflage. New York: Wiley, 2001, S. 2494-2520.
- Ellis, S. (1995): Human Engineering in Virtual Environments. In: *Virtual Reality World '95*, Konferenzdokumentation, Stuttgart, 21.-23. Februar 1995, S. 295-301.
- Hacker, W. (1997): Lernen. In: Luczak, H.; Volpert, W. (Hrsg.): *Handbuch der Arbeitswissenschaft*. Stuttgart: Schäffer-Pöschel, S. 439-443.
- Jorna, P.G.A.M. (1993): Heart rate and workload variations in actual and simulated flight. In: *Ergonomics* 36 (1993), S. 1043-1054.
- Laux, L.; Glanzmann, P.; Schaffner, P.; Spielberger, C. D. (1981): *State-Trait-Angstinventar*. Weinheim: Beltz.
- Schubert, T. et al. (2002): *I-Group Presence Questionnaire (IPQ)*. I-Group, Internet: <http://www.igroup.org>. Stand 1.5.2002
- VDI (1995): Richtlinie VDI 2194 „Auswahl und Ausbildung von Kranführern“. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Berlin: Beuth.