

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr.1, TUD, Professur für Baumaschinen- und Fördertechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16373 BR/1**

Mensch-Maschine-Interaktion

(Bevilligungszeitraum: 01.02.10 - 31.10.12)

der AiF-Forschungsvereinigung

FG Deutsche Braunkohlen-Industrie e.V. - FDBI

Dresden, 30.01.2013

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil Kunze

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 16373 BR/1

Name und Anschrift der Forschungsstelle

Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinen- und Fördertechnik
Professur Ingenieurpsychologie und Kognitive Ergonomie
01062 Dresden

Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze
Prof. Dr. Boris M. Velichkovsky

Projektleiter

Prof.Dr.-Ing. habil. Günter Kunze

Forschungsthema

Langtitel

**Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion in Bedien- und Leitständen
und Entwicklung von menschenzentrierten Bedienumgebungen**

Kurztitel

MMI Tagebau

Inhaltsverzeichnis

I.	Zusammenfassung.....	4
II.	Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
III.	Ausgangssituation / Stand der Forschung	6
IV.	Forschungsziel	10
V.	Lösungsweg und Ergebnisse	13
1.	Analyse und vorbereitende Felduntersuchungen	13
1.1.	Interviews, Beobachtungen und Analysen von Geräteführern.....	13
1.2.	Analyse von Abläufen, Aufnahme der Bedienungsumgebung	14
1.3.	Aufbereitung und Analyse der Daten.....	16
1.4.	Ergebnisse der Felduntersuchung	16
1.5.	Ableitung von relevanten Szenarien für die Testumgebung	19
2.	Aufbau Simulator.....	20
2.1.	Systemarchitektur	20
2.2.	Hardware Kabineneinrichtung/Bedienelemente	21
2.2.1.	Eye-Tracker	23
2.3.	Maschinenmodell	24
2.4.	Grab/Interaktionsmodell.....	26
2.5.	Modellparameter	27
2.6.	Modellrestriktionen.....	28
3.	Untersuchungen zur MMI im Simulator	29
3.1.	Ziel und Fragestellung der Untersuchung	29
3.2.	Methoden.....	29
3.2.1.	Stichprobe	29
3.2.2.	Virtuelles Szenario und Instruktion der Probanden	29
3.2.3.	Fragebögen.....	30
3.2.4.	Blickbewegungsmessung.....	32
3.2.5.	Untersuchungsdesign	32
3.2.6.	Ablauf der Untersuchung	36
3.2.7.	Datenanalyse	37
3.2.8.	Prozessanalyse.....	41
3.3.	Ergebnisse.....	43
3.3.1.	Fragebögen.....	43

3.3.2.	Verhaltensdaten	50
3.3.3.	Nebenaufgabe	53
3.3.4.	Blickbewegungsdaten.....	54
3.3.5.	Prozessbewertung	59
3.4.	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Untersuchung.....	61
3.5.	Zusätzliche Kontrolluntersuchung.....	64
4.	Bewertung der Methode	66
4.1.	Bewertung VR-Umgebung und Prozessszenario	66
4.2.	Analyse tätigkeitsbezogener und prozessbezogener Maße.....	68
4.3.	Analyse physiologischer und psychologischer Maße	68
4.4.	Zusammenfassende Bewertung und allgemeine Anwendungsmethode	70
5.	Neugestaltung einer Bedienumgebung.....	74
5.1.	Spezifikation für Visualisierungslösung und Eingabegeräte.....	74
5.2.	Gestaltungskonzept einer menschenzentrierten Bedienumgebung	75
5.2.1.	Prinzipien der Displaygestaltung	75
5.2.2.	Gebrauchstauglichkeit.....	79
5.2.3.	Schwingungen	80
6.	VR-Demonstrator.....	81
7.	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	81
8.	Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse insbesondere für KMU....	82
9.	Angaben über gewerbliche Schutzrechte.....	84
VI.	Literatur	85
VII.	Projektbezogene Veröffentlichungen	89
VIII.	Plan zum Ergebnistransfer.....	89

I. Zusammenfassung

Im Mittelpunkt des vorliegenden Projektes stand die Entwicklung einer Methode zur prospektiven Analyse und Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Führerständen von Tagebaugroßgeräten unter dem besonderen Aspekt der situationsgerechten Informationsversorgung des Maschinenführers. Hierfür wurden im Rahmen des Projekts Methoden der virtuellen Realität (VR) und der angewandten Kognitions- und Wahrnehmungsforschung kombiniert und eingesetzt. Mittels VR wurde ein virtuelles Testlabors erstellt, in welchem die Bedienungsumgebung und prototypische Arbeits- bzw. Bedienszenarien eines Schaufelradbaggers implementiert wurden. Für die Erstellung der Simulation waren zuvor umfangreiche Felduntersuchung im Tagebau notwendig. In den Felduntersuchungen wurden alle notwendigen Daten erfasst, die für die technische und prozesseitige Abbildung der Arbeitssituation im Bedienstand eines Schaufelradbaggers als VR erforderlich waren. Darüber hinaus wurden die Geräteführer über mehrere Schichten hinweg im Arbeitsprozess beobachtet und befragt, um typische Arbeitsszenarien zu identifizieren, die Rolle einzelner Anzeigesysteme zu erfassen und Potentiale für Verbesserungen der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) herauszuarbeiten.

Nach dem Aufbau der VR-Umgebung wurden im simulierten Bedienszenario Untersuchungen zur Gestaltung und Bewertung der MMI durchgeführt. Ausgehend von in den Felduntersuchungen festgestellten Problemen hinsichtlich der Positionierung von Informationsanzeigen und der ergonomischen Aufbereitung der darauf dargestellten Informationen wurde die MMI bei Arbeit mit der aktuell vorhandenen Lösungen (original GUI) und einem aus Wahrnehmungsperspektive optimierten Gestaltungskonzept (Redesign GUI) innerhalb einer Untersuchung verglichen. Es wurde geprüft, ob die Neugestaltung der MMI einen signifikanten Einfluss auf objektive (Fördergenauigkeit, Regeltätigkeit, Arbeitsfehler, Wahrnehmungsprozesse) und subjektive (Bewertung und Einstellungen des Bedieners hinsichtlich der Schnittstelle) Parameter des Bedienverhaltens und -erlebens ausüben. Dafür wurden Prozessparameter der VR-Umgebung (z.B. Förderleistung), Blickbewegungsdaten zur Analyse visueller Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitungsprozesse, sowie zahlreiche Fragebogendaten (Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Informationssysteme, sowie Müdigkeit, Belastung und wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit) ausgewertet. Neben der Installation und Integration der Messtechnik (wie z.B. Blickbewegungsmessung) war ein wesentlicher Schritt die Verknüpfung der unterschiedlichen Datenströme und die Entwicklung von Algorithmen, um die Daten sinnvoll zu verwalten, zu integrieren und auszuwerten.

Die Analysen ergaben, dass bei Arbeit mit der Redesign GUI Leistungsvorgaben genauer eingehalten und Prozessfehler besser vermieden werden konnten. Zudem wurde die Gebrauchstauglichkeit des GUI-Redesign als signifikant positiver eingeschätzt und die wahrgenommenen Aufgabenschwierigkeit als leichter bewertet. Anhand der Analyse der Blickbewegungsdaten konnte die Aufmerksamkeitsverteilung während der Aufgabenbearbeitung beschrieben werden.

Aus den Erfahrungen der Untersuchungen wurde im letzten Teil des Projekts ein verallgemeinertes Bewertungsverfahren zur Analyse der MMI abgeleitet und einzelne Verfahren hinsichtlich ihres Einsatzaufwandes und der zu erwartenden Erkenntnisse diskutiert. Darüber hinaus wurden Regeln für eine optimierte Gestaltung von Schnittstellen beschrieben. Schließlich wird ein allgemeines Vorgehen skizziert, mit dem ähnliche Fragestellungen methodisch sinnvoll, strukturiert und vergleichbar bearbeitet werden können.

II. Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Schaufelradbagger als klassische Maschine der Braunkohlenförderung mit ihrem typischen, kontinuierlichen Gewinnungsprinzip sind schon mehr als 100 Jahre im Einsatz. In dieser Zeit wurden nicht nur maschinelle Entwicklungen vorgenommen, sondern auch steuerungs- und regelungstechnische Modernisierungen vorangetrieben. In den letzten Jahren verstärkte sich der Trend zur automatisierten und teilautomatisierten Handhabung von Prozesssteuerung und Fahrbewegungen. Vielfältig bereitgestellte Informationen sollen unterstützend wirken und genauere und gesicherte Aktionen des Bedieners ermöglichen. Das ist begründet in den veränderten technologischen Forderungen weg von einer ständig maximalen Förderleistung hin zu einer variierenden, zeitgebundenen Mengen- und Qualitätsvorgabe. Auch muss der Bediener heute zusätzliche periphere Aufgaben durchführen, wie z.B. die Überwachung weiterer Maschinen und Anlagen des Förderverbundes.

Die Informationsdarbietung zu Betriebsprozessen und Maschinenparametern ist vorrangig visueller Art und werden zunehmend komplexer und dichter. Dadurch steigt der Anspruch an die situations- und bediengerechte Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle für das Bedienen, Beobachten und Führen der Maschine-Prozess-Interaktionen. Sie muss deshalb speziell auf die Bedürfnisse des Menschen in seiner jeweiligen Rolle angepasst sein, um situationsgerecht die für den jeweils aktuellen Prozesszustand relevanten Informationen - und möglichst nur diese - darzustellen. Die Art und Weise der Visualisierung komplexer Vorgänge ist also entscheidend für die Handlungsfähigkeit des Operators und somit auch für die Güte und das Ergebnis des Betriebsführungsprozesses. Bei ungenügender Passung zwischen Schnittstelle und Fähigkeiten des Bedieners kann es sonst trotz, oder gerade aufgrund, größer Informationsverfügbarkeit zu vermehrten Überforderungssituationen und Fehlern im Bedienprozess kommen.

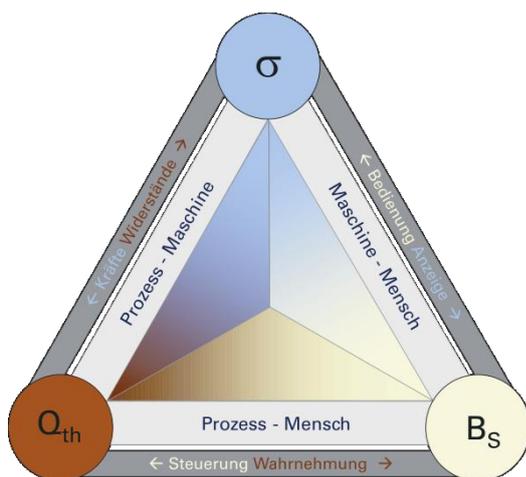


Abbildung 1: Interaktionsschema Mensch-Maschine-Prozess

Die für den Tagebaubetrieb kennzeichnende Kopplung des Systems aus Mensch (Bedienung) - Maschine (Gewinnungsgerät) - Prozess (Gewinnung), siehe Abbildung 1, ist durch eine permanente Wechselwirkung der Systembeteiligten im Sinne von Wirksamkeit und Beanspruchung gekennzeichnet. Funktionserweiterungen einer Seite bedingen daher immer eine Beeinflussung und

Anpassung der anderen Komponenten. Dadurch entstehen auch für die Schnittstellen zwischen Mensch-Maschine und Mensch-Prozess neue Anforderungen und Voraussetzungen.

Bisher gibt es nur eingeschränkt Möglichkeiten zu vergleichenden und qualifizierten Aussagen über die Wirksamkeit und Nutzungsfähigkeit der Bedieneinrichtung in Tagebaugroßgeräten zu kommen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit Verfahren und Vorgehensweisen zu entwickeln, anhand derer der Einfluss technischer Schnittstellen und deren Gestaltung auf die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen sowie das daraus resultierende Verhalten des Bedieners im Arbeitsprozess (vgl. Modell in Abbildung 2) beschrieben und analysiert werden kann. Bisher existieren für den Kontext von Tagebaugroßgeräten kaum Bewertungsmethoden und –kriterien, anhand derer eine valide Beurteilung der Bedienumgebung möglich wird. Darüber hinaus fehlt ein einheitliches Bestimmungsverfahren, mit dem verschiedene Umgebungen und Konfigurationen verglichen werden können. Um sich diesem Untersuchungsgegenstand nähern zu können, sind neuartige Versuchseinrichtung im Sinne (virtueller) Testlabor notwendig, in denen modellhaft signifikante Zusammenhänge zwischen Mensch, Maschine und Prozess untersucht werden können. Solcher Art Versuchsumgebungen sind momentan noch nicht verfügbar, woraus sich Bedarf und Entwicklungsziel des vorliegenden Projekts ableiten lassen.

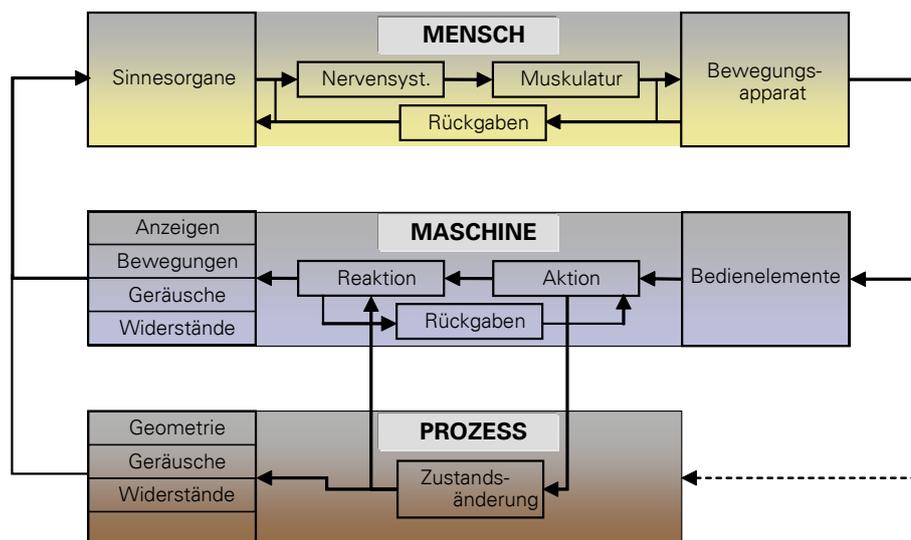


Abbildung 2: Metamodell zur Wahrnehmung und Aktion in der MMI

III. Ausgangssituation / Stand der Forschung

Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Interaktion stehen zunehmend im Mittelpunkt umfassender Forschungsarbeiten verschiedenster Fachrichtungen, insbesondere in Bezug auf den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen in Kraftfahrzeugen [1], [2]. Eine zentrale Frage hierbei ist, inwieweit bestimmte Konfigurationen von Anzeige- und Bedienkonzepten einen spezifischen Einfluss auf die Güte der Fahraufgabe ausüben. Durch eine immer weiter ansteigende Anzahl von den Fahrvorgang unterstützenden Funktionen im Cockpit heutiger Kraftfahrzeuge, müssen auch die Konzepte zur Informationsaufnahme und Informationsübertragung in der Mensch-Maschine-Schnittstelle weiterentwickelt werden. Die immer weitere Hinzufügung von Einzelgeräten (Radio, CD-Spieler, Klimaanlage, Navigation, Telefon, Internet), Anzeigen und Bedienelementen auf dem Armaturenbrett

fürte teilweise zum Eindruck der Überladenheit. Neben dem Platzmangel im Bereich des Fahrerarbeitsplatzes und den immer komplexeren Bedienungsaufgaben besteht ein weiteres Problem in einer größeren Gefahr der Ablenkung durch die neuen Informationsquellen. Es macht die Entwicklung integraler, leicht bedienbarer und zugleich wenig ablenkender Mensch-Maschine-Schnittstellen notwendig. Daher gibt es seit einiger Zeit Bestrebungen Gestaltungskriterien für eine optimierte Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Bedienung technischer Systeme während der Fahrzeugführung zu erarbeiten [3].

Für die Analyse und Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion (z.B. im Bereich der Fahrzeugtechnik) wird zunehmend auch die Messung von Blickbewegungen (sog. Eye-Tracking) eingesetzt. Mittels Eye-Tracking können die Augenbewegungen eines Betrachters gemessen und somit seine visuellen Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitungsprozesse objektiviert und analysiert werden. Eine grundlegende Annahme hierfür bildet die sogenannte „Eye-Mind-Hypothese“ [4]. Vereinfacht besagt sie, dass das, was zu einem bestimmten Zeitpunkt im Fokus des Betrachters liegt auch genau dann mental verarbeitet wird. Eye-Tracking ermöglicht somit, einen Blick auf verschiedene Aspekte menschlicher Informationsverarbeitung zu werfen. Mit der Methode besteht die Möglichkeit ein breites Spektrum sowohl wissenschaftlicher aber auch anwendungsbezogener Fragestellungen zu bearbeiten. In diesem Sinne wird es oft als Werkzeug zur Analyse von Gebrauchstauglichkeit (Usability) in der Mensch-Maschine-Interaktion verwendet und liefert damit praktische Erkenntnisse, um Schnittstellen und Medien in ihrer Funktionsweise zu verbessern. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen Blickbewegungen als Werkzeug zur Diagnose der mentalen Arbeitsbelastung [5] und anderer mentaler Zustände eines Operators (z.B. hinsichtlich Aufmerksamkeit) in intelligenten Assistenzsystemen zu verwenden (siehe auch [1], [6]).

Aus pragmatischen aber auch aus methodischen und sicherheitstechnischen Erwägungen ist häufig eine Untersuchung von MMI in realen Situationen (wie z.B. beim Autofahren) nicht möglich. Deshalb werden neue Prototypen für MMI häufig in künstlichen und /oder laborähnlichen Situationen untersucht. Als besonders fruchtbar hat sich hierbei der Einsatz von **virtueller Realität** (VR) erwiesen. „Virtuell“ steht dabei für den Ersatz gegenständlicher Prototypen durch realistische, rechnerintern repräsentierte aber dennoch mit allen Sinnen (nahezu) realitätsgetreu wahrnehmbare Modelle. Mittels VR lassen sich Untersuchungsmöglichkeiten und -gegenstände erheblich erweitern und ermöglichen zudem die Bearbeitung komplexer Probleme mit neuen Methoden und Werkzeugen. Dabei sind den Anforderungen und Aufgaben entsprechende Interaktionen der Komponenten der virtuellen Prototypen zum menschlichen Benutzer und zur physikalischen Umgebung zu realisieren. In den letzten Jahren sind VR-Systeme sowohl in der Industrie als auch in der Forschung in den Mittelpunkt vieler Arbeiten gerückt [7]. Dabei wird VR jedoch heute noch oft als reines Präsentationswerkzeug verstanden und angewendet. Im Bereich der Fahrzeugentwicklung eingesetzte Anwendungen immersiver VR-Umgebungen bieten dem Benutzer im Allgemeinen die Möglichkeit, die stereoskopische Darstellung einer Szene zu betrachten und in diese einzutauchen. Im Mittelpunkt stehen dabei bspw. die Darstellung der Kinematik von Mehrkörpersystemen, die jeweiligen Bedien- und Anzeigesysteme, das gesamte Fahrzeuginterieur oder die Lichtverteilung moderner Scheinwerfersysteme. Die VR-Umgebungen werden dabei zur intuitiven, rein visuellen Kontrolle eingesetzt (siehe z.B. [8–10]).

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten hat sich VR als Hilfsmittel zur Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle immer mehr etabliert (vgl. [11], [12]). So gibt es bereits spezielle und kommerziell erwerbbar Lösungen für Untersuchungen in Automobil- und Flugzeugbereich, denen

teilweise elaborierten Modellen des Nutzerverhaltens zugrunde liegen. Eine direkte Übertragung der dafür entwickelten Methoden, Modelle und Ansätze auf Tagebaugroßgeräte ist jedoch nicht zulässig, da der Maschinenführer völlig andere Aufgaben als ein Pkw-Fahrer zu bewältigen hat.

Der Einsatz von VR-Applikationen für den Bergbau erfolgt gegenwärtig schwerpunktmäßig unter dem Gesichtspunkt der Abbildung von Arbeitsprozessen mit dem Ziel der Erhöhung der Transparenz in Planungsszenarios [13]. Es wird jedoch auch auf das zunehmende Potenzial des Einsatzes von VR-Simulatoren verwiesen, bei welchen virtuelle Trainingswelten geschaffen werden, um Bedienfunktionen zu schulen. Genannte Anwendungen (siehe z.B. [14]) gehen über die reine Trainingssimulation nicht hinaus. Auch im Rahmen des in [15] beschriebenen Projektes *virtual surface mining* stehen die Aspekte der Entwicklung eines Werkzeugs für die Prozessplanung sowie des Trainings von Mitarbeitern und der Planung konstruktiver Weiterentwicklungen von Tagebaubaggern im Vordergrund.

Andere Quellen [16–19] verweisen auf die Entwicklung Interaktiver Simulatoren im Bereich der Baumaschinenteknik, die auf die Untersuchung und Abbildung des Verhaltens von Maschinen in ihrer Umgebung in Verbindung mit einer Prozesskopplung ausgerichtet sind. Hier stehen nicht die Ausrichtung auf eine Immersion zu Trainingszwecken im Vordergrund, sondern die Aufgaben der Bemessung und Gestaltung von Maschinen und deren Komponenten. Die Arbeiten [20–23] beschäftigen sich mit der Entwicklung von Simulationstechnologien mit dem Ziel der bemessungsgerechten Modellbildung.

Studien, welche den Einsatz von VR als Methode zur Untersuchung der (psychologischen) Belastung und Beanspruchung eines Maschinen-/Geräteführers in Gewinnungsprozessketten verwendet haben, sind bisher nicht bekannt. Für Untersuchungen und Bewertung von Mensch-Maschine-Schnittstellen auf der Ebene des Menschen ist dabei die Einbeziehung von Expertise und Wissen aus Arbeitspsychologie, Kognitiver Ergonomie und der Ingenieurpsychologie zwingend, da sich diese Disziplinen speziell mit dem Bediener in seiner Beziehungswelt zur Maschine und Arbeitsprozess beschäftigen. Ein wesentlicher Inhalt dieser Fachbereiche besteht gerade darin, die Interaktion des Menschen mit technischen Systemen zu analysieren und zu bewerten, um darauf aufbauend neuartige Gestaltungslösungen für Verbesserungen ableiten zu können.

Vor der Erarbeitung von neuen MMI Konzepten steht häufig aber zunächst die Aufgabe, den eigentlichen Arbeitsprozess und die dafür notwendigen Tätigkeiten zu beschreiben und zu erfassen. Im Kontext der (Arbeits- und Ingenieur)psychologischen Forschung sind in der Vergangenheit zahlreiche Modelle und Ansätze zur Strukturierung und Analyse von Tätigkeiten und Handlungen im Arbeitsprozess entwickelt wurden. Viele dieser Modelle gehen von einer hierarchischen-sequentiellen Strukturierung der Tätigkeit aus, wobei je nach Anwendungsfall des Modells mehr oder weniger abstrakte Ebenen vorgesehen sind (z.B. [24], [25]). Üblich ist es auch Tätigkeiten eines Bedieners, wie etwa beim Führen von Fahrzeugen oder Flugzeugen, als ineinander geschachtelte Regelkreise, z.B. aus Planung (*navigation*), Lenkung (*guidance*) und Stabilisierung (*control*) (vgl. z.B. [26–29]), zu betrachten. Solche Modelle und Methoden sollen helfen, den gesamten (manchmal komplexen und für einen Forscher/Entwickler noch unbekanntem) Arbeitsprozess in seine „atomaren“ Bestandteile zu zerlegen. Dazu gehört es zu verstehen, wie ein Nutzer/Bediener seine Arbeitsaufgabe und -ziele intern/mental repräsentiert, welche Informationsquellen während einer Arbeitshandlung notwendig sind und wie die Informationen verarbeitet werden müssen, weiterhin wie, wann und an welchen Stellen Entscheidungen zu treffen sind und schließlich aus welchen

Handlungs- und Aktionenbausteinen (auf unterster Ebene bis hin zu einzelnen Muskel- und Körperbewegungen) eine Tätigkeit besteht.

Um eine zielgerichtete und methodische Herangehensweise zur Erhebung und Beschreibung eines Arbeitsprozesse und seiner Auswirkungen auf den Operateur/Bediener zu ermöglichen, existiert inzwischen ein ganzer Kanon von Verfahren. Dazu gehört z.B. das an der TU-Dresden entwickelte standardisierte, rechnergestützte Verfahren REBA für die Bewertung und Gestaltung von Arbeitstätigkeiten unter Berücksichtigung von Sicherheit und Gesundheitsschutz [30], [31], welches die psychologische Bewertung von Arbeitsinhalten und -bedingungen erlaubt. Zu nennen sind weiterhin die Beanspruchungsmessskalen (BMS - [32]), ein Verfahren bei dem Erleben der untersuchten Person und deren Beanspruchungsfolgen durch die Arbeitstätigkeiten im Mittelpunkt stehen. Anhand des BMS können kurzfristige Beanspruchungsfolgen wie Monotonie, Stress, Psychische Ermüdung und Sättigung erfasst werden.

Da häufig bestehende Verfahren (wie z.B. REBA) für bestimmte Einsatzzwecke konzipiert und entwickelt wurden, ist es jedoch meist unerlässlich bei neuen Untersuchungsfeldern/-situationen, wie es z.B. die Großgeräte im Braunkohletagbaus darstellen, auf weniger spezifische Methoden zurückzugreifen. Dazu zählen strukturierte Interviews und teilnehmende Beobachtungen, welche es ermöglichen, flexibel und systematisch Informationen in einem spezifischen Sachgebiet zu erfassen. Der Interviewer arbeitet mit bestimmten Leitfragen oder -themen, die dann aufgrund des Gesprächsverlaufs untersetzt werden können. Die Teilnahme am Arbeitsprozess erlaubt es zudem, etwaige Fragen direkt vor Ort und vor allem in bestimmten Situationen zu klären.

Anpassungen der MMI sind meist mit dem Ziel einer Verbesserung von Sicherheit und Leistungsfähigkeit insbesondere bei kritischen Systemzuständen verbunden. Die Interviewtechnik der *Kritischen Ereignisse* (Critical Incidents – [33]) dient dazu, solche besonders hervorstechenden (gefährlichen und kritischen) Arbeitssituationen zusammen mit dem Arbeiter/Bediener zu analysieren. Das Verfahren kann genutzt werden, um einen genaueren Einblick in mögliche Schwachstellen und Entwicklungspotential bei der MMI heraus zu arbeiten.

Die Möglichkeiten und Verfügbarkeit heutiger Multimediatechnologien erlauben zudem die Aufzeichnungen der Tätigkeitsabläufe und Arbeitssituation durch (Mehrkamera-) Videosysteme. Zwar ist die Analyse solcher Videodaten immer noch eine relativ arbeitsaufwendige Angelegenheit, allerdings lassen sich Arbeitsschritte im Nachhinein mit relativ feiner zeitlicher Auflösung zergliedern. Zusammen mit Tonaufnahmen, sind sie zudem ein effektiver Datenspeicher und entlasten die Tätigkeit des Interviewers, da nicht alles bis ins Detail schriftlich festgehalten werden muss.

IV. Forschungsziel

Angestrebte Forschungsergebnisse

Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung einer Methode zur prospektiven Analyse und Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Führerständen von Tagebaugroßgeräten unter besonderer Berücksichtigung einer situationsgerechten, den Maschinenführer unterstützenden, Informationsaufbereitung. Neben einer Methodik zur Bewertung sollen darüber hinaus Regeln und Prinzipien genereller Art für die Gestaltung menschenzentrierter Bedienumgebungen entstehen. Anhand der zu entwickelnden Bewertungsmethode soll es möglich werden, die Integrationsfähigkeit neuer Funktionalitäten in der Betriebsführung zu prüfen, ohne das im tatsächlichen Tagebaugeschehen ein Verlust an Effizienz und Prozesssicherheit in Kauf genommen werden muss.

Die Notwendigkeit für die Entwicklung einer solchen methodischen Vorgehensweise ergibt z.T. sich aus immer steigenden Arbeitsanforderungen an den Maschinenführer in Tagebaugroßgeräten. Diese resultieren aus einer stärkeren Einbindung und Verflechtung seiner Tätigkeit in den komplexen Gesamtprozess des Tagebaus, woraus ein vielfältiges, flexibleres und z.T. zeitlich dichteres Agieren im unmittelbaren Gewinnungsvorgang notwendig wird. Hinzu kommt ein immer größeres Ausmaß an Bedien-, Informations- und Assistenzsystemen, die dem Gerätführer in der Kabine zur Verfügung stehen und die er überwachen muss.

Die Technologie der virtuellen Realität (VR) ermöglicht es, die zahlreichen sowohl methodischen als auch inhaltlichen (Arbeitsanforderungen und MMI-Gestaltung) Aspekte, die für Entwicklung des angedachten Bewertungstools notwendig sind, umzusetzen. Die VR liefert dabei die Untersuch- und Experimentierumgebung. Gleichzeitig ist sie aber wesentlicher Bestandteil der Methodenentwicklung an sich. Die Vorteile von VR als Untersuchungswerkzeug sind vielfältig. Eine realitätsnahe Darstellung von *virtuellen* Objekten, in welche der Bediener „eintauchen“ kann (Immersion), macht die VR-Umgebung zu einem quasi-realen Experimentierfeld. Die Verwendung eines solchen virtuellen Testlabors spart aufwändige Untersuchungen an Realgeräten, welche besonders im geplanten Tagebaumfeld nur im sehr begrenzten Umfang möglich sind. Des Weiteren bietet sich eine Nutzung von VR im Rahmen von Reihenuntersuchungen mit Versuchspersonen an. Bei solchen Anwendungen kann in kurzer Zeit eine große Anzahl von Versuchsanordnungen getestet werden, was mit realen Prototypen nicht durchführbar wäre. VR ist daher insbesondere für die Beantwortung spezifischer Fragestellungen zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine geeignet, da alternative Bedienkonzepte oder auch ganz neue Möglichkeiten der Gestaltung getestet werden können, deren Umsetzung in realen Führerständen nur mit hohem Aufwand möglich wäre. Der Einsatz von VR ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit vergleichbarer Untersuchungsbedingungen. Zudem können gezielt verschiedene Parametervariationen getestet werden, selbst solche, die unter realen Bedingungen nicht oder nicht ohne weiteres durchführbar wären.

Die geplanten physiologischen Messmethoden wie z.B. *Eye-Tracking* lassen sich in einer VR-Umgebung effektiver und störungsfreier einsetzen als in realen Maschinen. Anhand der Analyse von Augenbewegungen können sehr präzise und zeitlich genaue Erkenntnisse über die Verarbeitung

visueller Inhalte ermittelt werden, was einen detaillierten Blick auf Prozesse der Informationsverarbeitung während der Arbeitsaufgabe ermöglicht.

Bisher existieren nur sehr eingeschränkte VR-Modelle von Tagebaugroßgeräten. Auch eine systematische Analyse von Arbeitsvorgängen und -situationen in Tagebaugroßgeräte fehlt. Als erstes soll im Rahmen des Projekts durch Felduntersuchungen eine Bestandaufnahme und realistische Beschreibung charakteristischer Arbeitssituation eines Maschinenführers erfolgen. Dazu sind Bedienhandlungen, Informationsflüsse, Kommunikationsmittel sowie sicherheitsrelevante Situationen zu erfassen und zu beschreiben. Auf dieser Grundlage dieser Erhebung können in einem interaktiven Simulator (VR-Testlabor, siehe **Abbildung 3**~~Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.~~) relevante Szenarien nachgebildet und simuliert werden.



Abbildung 3: Interaktiver Simulator der TU Dresden mit Beispielen zum Einbau unterschiedlicher Fahrerinnen

Insgesamt lassen sich die geplanten Forschungsarbeiten zur Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion und der Entwicklung einer Bewertungsmethode in drei Phasen gliedern.

Phase 1 (Prozessanalyse -segmentierung der Informationsaufnahme) stellt die zuvor genannten Felduntersuchungen dar. Anhand dieser werden die notwendigen Untersuchungsszenarien, Einsatzprofile und Prozessdaten für die VR-Testumgebung abgeleitet. Als Ergebnis soll eine realistische Abbildung eines komplexen Arbeitsablaufs eines Tagebaugroßgerätes als interaktiver Simulator (VR-Testlabor) umgesetzt werden.

In der *Phase 2 (Analyse von Nutzungsverhalten und Informationsaufnahme)* werden Versuche im VR-Testlabor durchgeführt. Auf der Basis theoretischer und praktischer Erwägungen (abgeleitet aus den Ergebnissen der Feldstudie in Phase 1) werden neue Gestaltungslösungen für spezifische Einsatzszenarien im Simulator implementiert und getestet. Verschiedene Varianten (IST –Zustand des

MMI-Design vs. optimierte Designlösungen) werden hinsichtlich der eingesetzten Bewertungsdimensionen (wie Bedienverhalten und Genauigkeit, Blickbewegungen, subjektive Einschätzungen) verglichen. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Angaben zu Optimierungsmöglichkeiten bei der Gestaltung von Bedienungsumgebung (z.B. Anordnung der Eingabegeräte, Menüführung, Szenarien für sicherheitsrelevante Situationen).

In *Phase 3 (menschengerechte Visualisierung und Anpassung von Bedienelementen)* erfolgt die Integration und Evaluation der eingesetzten Methoden bzw. derer Ergebnisse im Hinblick auf Nützlichkeit und Effizienz für die Untersuchung von MMI Fragestellungen. Am Ende des Prozesses soll ein verallgemeinertes Modell einer Bewertungsmethode zur Beurteilung von MMI stehen, die für die Evaluation zukünftiger Gestaltungslösungen herangezogen werden kann. Es sollen außerdem Vorschläge für eine optimierte Gestaltung von Bedienungsumgebungen an einem konkreten Beispiel demonstriert werden.

Folgende, in die Wirtschaft transferierbare, Ergebnisse und Leistungen sollen im Projekt entstehen. Durch Verwendung von VR-Technologien und einer strukturierten methodischen Herangehensweise soll eine vergleich- und reproduzierbare wissenschaftliche Untersuchung von Führerständen und Steuerungskonzepten bereits in frühen Entwicklungsphasen ermöglicht werden. Der Einsatz einer solchen Analyse- und Bewertungsmethode für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen ermöglicht es Herstellern und Ausrüstern von Automatisierungslösungen ihre technischen Lösungen wesentlich zu verbessern und damit die Marktchancen für den Einsatz ihrer Produkte deutlich zu erhöhen. Das betrifft vor allem KMUs, welche als Lieferanten im Automatisierungsumfeld eingesetzt werden. Besonders in diesen Unternehmen besteht neben der Forderung der ständigen Verbesserung der Funktionen der Produkte auch deren Anwendbarkeit ständig zu verbessern und die Eingabe- und Visualisierungslösungen innovativer und flexibler zu gestalten. Diese Unternehmen werden durch die Beschleunigung und Verbesserung ihrer Entwicklungsleistungen ihre Wettbewerbssituation massiv stärken und ausbauen können. Das wird insbesondere durch die Nutzung der *virtuellen Funktionstests* garantiert. Besonders bei der Entwicklung von Produkten und Komponenten mit hoher anwendungsspezifischer Charakteristik ergeben sich durch der Einsatz der VR-Technologie Potential wertvolle Entwicklungszeit und -kosten einzusparen, indem eventuelle Fehler in frühen Phasen vermieden werden und nicht erst in der Einbauphase beim Kunden aufwändig beseitigt werden müssen.

Darüber hinaus wird auch im unmittelbaren Einsatzgebiet der Rohstoffgewinnung ein direkter Nutzen der Ergebnisse hinsichtlich Produktivitätssteigerungen und Systemsicherheit erwartet. Menschengerecht gestaltete Bedienungsumgebungen sollten dazu beitragen, Effizienzpotentiale in der Produktion besser auszuschöpfen. Volkswirtschaftlich kann somit auf dem sehr relevanten Gebiet der Energieerzeugung ein wichtiger Beitrag zu einer effizienteren und somit ressourcensparenden Produktion geleistet werden.

V. Lösungsweg und Ergebnisse

1. Analyse und vorbereitende Felduntersuchungen

Die Vorbereitung der Felduntersuchung erforderte mehrere Treffen zwischen den Projektpartnern der TU-Dresden und der Vattenfall Mining AG. Dabei wurden Inhalte und Abläufe der Untersuchungen besprochen. Hierzu gehörten die Auswahl eines für die Untersuchung geeigneten Gerätetyps (SRs 1301 – Schaufelradbagger), die Gewinnung von Geräteführern für die Teilnahme an der Felduntersuchung sowie die Klärung weiterer logistischer und administrativer Fragen. Im Vorfeld der Felduntersuchung erfolgte außerdem eine Tagebau- und Gerätebegehung in der Grube Nochten der Vattenfall Mining AG um die Gesamtabläufe im Tagebaubetrieb besser kennenzulernen und einen ersten Überblick über Arbeitsplatz und -tätigkeit der Geräteführer im SRs 1301 zu gewinnen. Eine weitere Begehung war erforderlich um die Aufzeichnungstechnik und Herangehensweise für die geplante Felduntersuchung zu testen. Als besondere Schwierigkeit stellte sich dabei z.B. die andauernde Schwingung der Baggerkabine heraus, die handschriftliche Notizen im laufenden Betrieb sehr erschwerte. Unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten wurde das Versuchsmaterial modifiziert bzw. erweitert.

Die Felduntersuchung wurde an zwei Tagen durchgeführt. Es wurden sowohl eine Früh- als auch eine Spätschicht beobachtet, da erfahrungsgemäß die Lichtverhältnisse im Tagebau stark von der Tageszeit abhängen. Ausführliche Befragungen, Beobachtungen und Videoaufzeichnungen wurden an unterschiedlichen Geräteführern durchgeführt. Darüber hinaus bestand informeller Kontakt zu weiteren Mitgliedern der Baggerbesetzungen.

1.1. Interviews, Beobachtungen und Analysen von Geräteführern

Über die jeweils gesamte Schichtdauer hinweg wurden Video- und Audioaufzeichnungen angefertigt. Das Videoaufzeichnungssystem bestand aus vier in der Baggerkabine angebrachten Kameras, die drei Innenraumperspektiven und eine Ansicht des Schaufelrads (siehe Abbildung 4) lieferten. Zusätzlich kamen ein Deckenmikrofon, ein Laptop und ein Festplattenrekorder zum Einsatz. Die medialen Datenströme wurden mit Hilfe einer speziellen Software direkt integriert und als Split-Screen-Aufnahmen gespeichert. Die Videodaten ermöglichten es retrospektive eine inhaltliche und zeitliche Feinanalyse von Arbeitsabläufen vorzunehmen sowie die dafür notwendigen Bedienhandlungen und Informationsaufnahmeprozesse des Geräteführers näher zu analysieren. So konnten repräsentative Zeitstichproben aus dem Gesamtbestand der Videoaufzeichnungen gemacht werden, um bestimmte Verhaltensweise, wie etwa die Nutzungshäufigkeit der Displays, quantitativ zu erfassen. Die Audioaufzeichnungen waren zur Ergänzung der handschriftlichen Aufzeichnungen und zum Nachbilden der auditiven Kulisse in der VR-Umgebung vorgesehen.

Zusätzlich wurden die interviewten Geräteführer gebeten Fragenbögen zur subjektiven Befindlichkeit (BMS – Beanspruchungsmessskalen [32]) zu Beginn und Ende einer Schicht über die Dauer einer Woche auszufüllen. Diese Fragebögen sollten Informationen dazu liefern, ob und welchem Maße die Geräteführer ihre Tätigkeit im Laufe einer Schicht als beanspruchend erleben.

Die strukturierten Beobachtungsinterviews waren so konzipiert, dass Aspekte auf mehreren Ebenen erfasst werden konnten. Zunächst stand das Kennenlernen der Tätigkeit und des Arbeitsumfelds der Geräteführer im Vordergrund, um eine gemeinsame kommunikative Basis zu schaffen. Weiterhin gab es Themenbereiche, die auf eine genaue Beschreibung der Arbeitsabläufe (inkl. Teiltätigkeiten), das Identifizieren kritischer Ereignisse im Förderprozess und eine Beschreibung von Informationsflüssen aus psychologischer und technischer Sicht abzielten. Ein wichtiges Ziel war, zu klären, welche der verfügbaren Informationen aus Sicht der Geräteführer tatsächlich relevante Aspekte des Arbeitsprozess abbilden. Die Geräteführer wurden über den Interviewleitfaden hinaus ermuntert, während ihrer Tätigkeit laut zu denken und aktuelles Handeln zu kommentieren.



Abbildung 4: Aufbau der Felduntersuchung, die vier verwendeten Kameras bilden die Display-Systeme (l.o.), Geräteführer aus Perspektive der Displaysysteme (r.o.), Blick auf das Schaufelrad (l.u.) und die Gesamtansicht Gegenseite (r.u.) ab

1.2. Analyse von Abläufen, Aufnahme der Bedienungsumgebung

Die verfügbaren Displays wurden zunächst anhand von Position und Häufigkeit der Nutzung und den gewonnenen Beobachtungsdaten klassifiziert und auf die für den Abbauprozess wesentlichen Anzeigen beschränkt. Die Anzeigemasken wurden anhand von Usability-Richtlinien und psychologischer Fachliteratur hinsichtlich ihrer Gestaltung und Benutzbarkeit evaluiert. Als Grundlage dafür kamen modifizierte Varianten von Normen zur Beurteilung der Informationsdarbietung auf Displays (ISO 9241/12) und zur standardisierten Softwarebeurteilung (ISO 9241/10) zum Einsatz und wurden in Bezug zu den Aussagen der Geräteführer bewertet.

Weiterhin wurden sämtliche für den Förderprozess genutzten Steuerelemente (Joysticks, Potis, Pulte, Keyboard, Trackball) in ihrer Handhabung und Funktionsweise erfasst und in die Tätigkeitsbeschreibung integriert. Als Ziel der VR-Modellierungen von Bedienstand, Maschine und Prozess sollte eine realitätsnahe aber auch variationsfähige Versuchsumgebung entstehen. Um das abzubildende System technisch zu erfassen, wurde sich auf 3 Schwerpunkte konzentriert:

1. Messungen der Schwingbewegungen der Kabine

Die Schwingbelastung des Fahrers ist ein entscheidendes Kriterium für die Sichtwahrnehmung von Anzeigen und Umgebung. Die Messung direkt in der Kabine sichert die Erfassung von Schwingungsdaten ohne aufwendige und fehlerbehaftete Rückrechnung an anderen Orten des Maschinensystems. Die Kabine ist gedämpft gelagert und würde so Berechnungen aus Messungen, z.B. direkt am Ausleger, erschweren. Die gemessenen Schwingungen in der Kabine lassen sich als Daten direkt in das Bewegungssystem des Simulators einspeisen oder über mathematische Modellierung nachbilden. Nach Abbildung 5 wurde an 2 Orten in der Kabine mit 3-D-Beschleunigungsaufnehmern in nicht überdeckenden Koordinatenachsen gemessen, so dass die Kabinenbewegung in Bezug auf das Koordinatensystem des Fahrersitzes berechnet werden kann. Die Messungen erfolgten während der gesamten Felduntersuchung und vorbereitend in einem Testlauf.

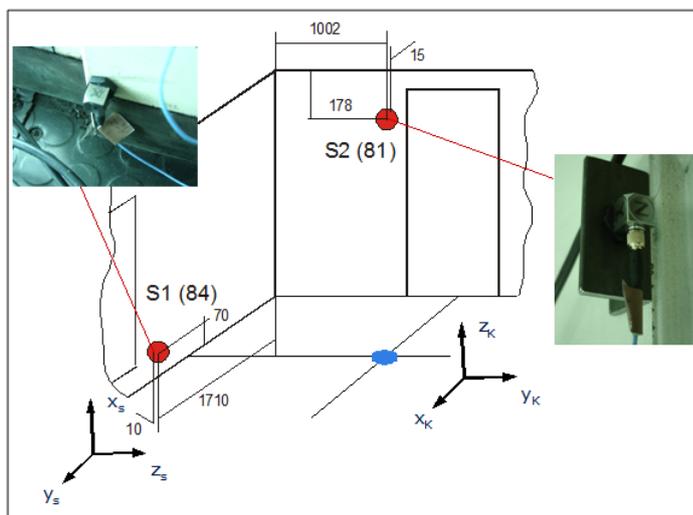


Abbildung 5: Position der Beschleunigungsaufnehmer zur Erfassung der zeitlich veränderlichen, räumlichen Kabinenbewegung

2. Erfassung der Prozessdaten

Die elementare Prozessgröße ist die Förderleistung. Zur Erfassung wird in der Maschine mittels Bandwaage die Durchflussmenge je Zeiteinheit (Log-Daten) bestimmt und mit der Gutdichte verrechnet. Der örtliche Abstand der Waage vom Schaufelrad (Gewinnungsort) erfordert einen weiteren Rechnungsschritt, so dass dann ein Bezug zwischen Stromaufnahme des Schaufelrades und Förderleistung hergestellt werden kann.

3. Maschinendaten

Aus den Log-Daten der Maschine sind verfügbar:

- Stromaufnahme und Drehzahl des Schaufelrads
- Stromaufnahme und Drehzahl des Antriebs vom Radband
- Stromaufnahme und Drehzahl des Antriebs vom Brecher
- Stromaufnahme und Drehzahl des Antriebs vom Verladeband
- Stromaufnahme, Drehzahl und Drehwinkel des Drehwerks

Dadurch konnten wesentliche Parameter des Gutstroms im Schaufelradbagger erfasst werden.

1.3. Aufbereitung und Analyse der Daten

Als unmittelbare Ergebnisse der Erhebung lagen folgende Rohdaten vor: ca. 16 Stunden Video- bzw. Tonmaterial, 12 ausgefüllte BMS-Fragebögen, Notizen zur Beobachtung, Interviewdaten, Messdaten zur Kabinenbeschleunigung, Prozessdaten, Betriebsdaten der Anlage. Die Rohdaten wurden gesichtet und systematisiert. Videomaterial wurde genutzt, um Lücken in den schriftlichen Aufzeichnungen zu füllen. Auf Grundlage des Videomaterials wurde eine empirische Häufigkeitsanalyse bzgl. der Aufmerksamkeitszuwendungen des GF zu den Informationssystemen durchgeführt. Die Daten wurden nach Kerntechnologie getrennt erfasst und sämtliche handschriftlichen Notizen weitgehend digitalisiert und thematisch systematisiert.

Durch Analyse der aufgezeichneten Bewegungsdaten der Kabine wurden der Bewegungsraum und die lokalen Bewegungsänderungen untersucht und für die weiteren Tests in der VR-Umgebung in Bewegungsvorgaben gewandelt. Anhand von Vergleichen mit Kontrollfrequenzen bestätigte sich die Richtigkeit der aufgezeichneten Daten. Mit der Wandlung in Daten zur Ansteuerung des Simulatorbewegungssystems, Transformation von Zeichnungsinformationen und Maschinenparametern in modellgerechte Daten (Geometrie und Bewegungen der Maschine, Geometrie des Bodens) entstand die technische Basis der VR-Systemgestaltung.

1.4. Ergebnisse der Felduntersuchung

Die Tätigkeit der Geräteführer wurde zunächst auf deskriptiver Ebene analysiert. Innerhalb des Untersuchungszeitraumes beobachteten wir die sog. Kerntechnologien *Kohlegewinnung*, *Planumsbaggern* und *Einschnitt* (nur in der Voruntersuchung). Prozessbedingt nimmt die Kohlegewinnung den größten Zeitanteil während einer Schicht ein und stellt auch aus Sicht der Maschinenbelastung und des Energieaufwands die wesentlichste Tätigkeit eines Geräteführers dar.

Die Arbeitsweise zum Abbau des Fördergutes (Kohlegewinnung) wird ausführlich z.B. in [34] beschrieben. Kennzeichnend ist der Abbau gegen die Böschung durch Schwenken des sich drehenden Schaufelrades. Das verwendete Abbauprinzip ist der Terrassenschnitt.

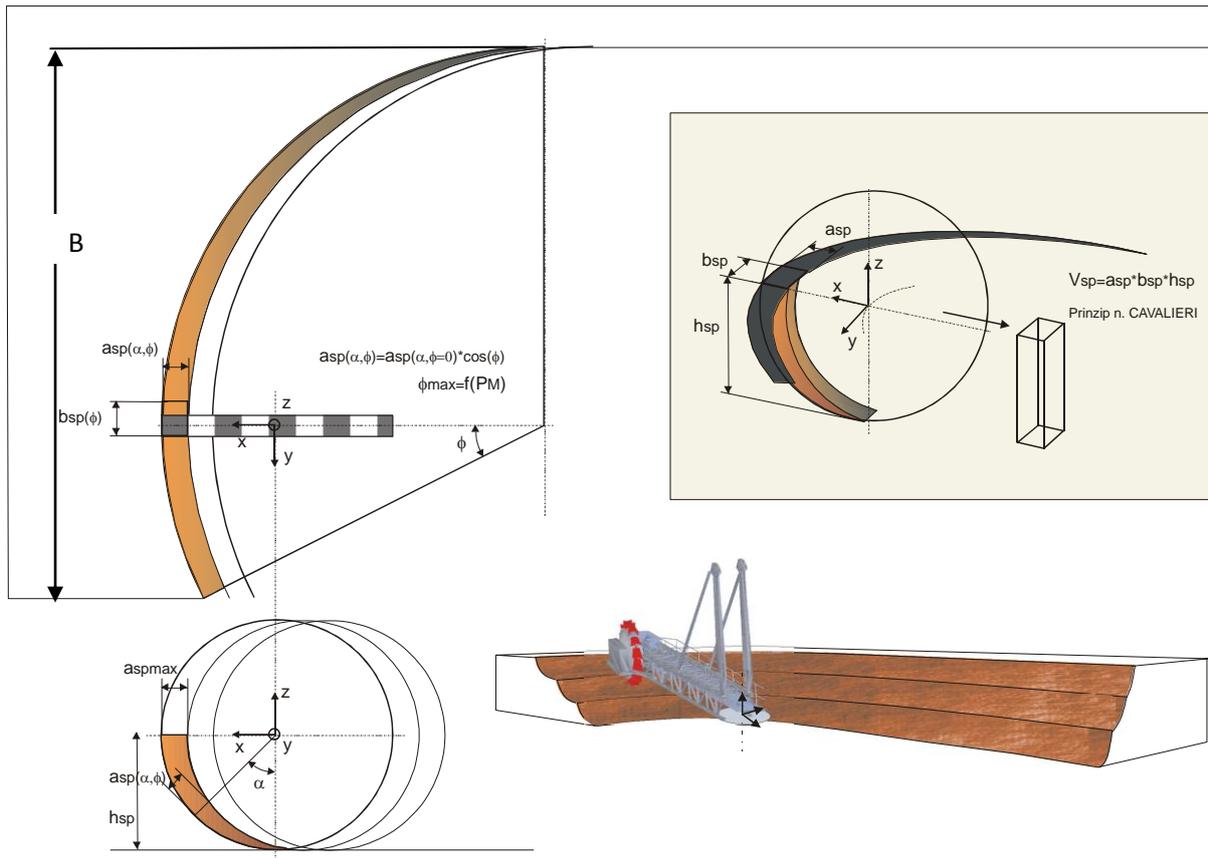


Abbildung 6: Arbeitsweise Schaufelradbagger: Kopfblockverhieb, Terrassenschnitt

Nach Abbildung 6 sind die bestimmenden Größen:

- Mittelpunkt des Schwenkkreises (in der Schwenkachse des Oberbaus)
- Blockbreite B (Breite der geschnittenen Terasse)
- Schwenkwinkel α
- Spanvolumen V_{sp} aus der projizierten Schnittsichel
- Fördervolumen Q aus dem Querschnitt der Schnittsichel und der Schwenkgeschwindigkeit

Die Bedienung des Schaufelradbaggers erfolgt über zwei Joystick-Drehregler-Kombinationen, die Richtung und Geschwindigkeit für jeweils Fahr- und Schwenkwerk vorgeben. Die Joysticks sind in der Endposition gerastet, so dass nach Festlegung der Bewegungsrichtung die Bewegungsmanipulation nur noch über die Drehregler (Potentiometer) erfolgt.

Feedback über die Steuerung des Grabprozesses bekommt der GF über direkten Blick auf das Schaufelrad sowie weitere Maschinen- und Prozessinformationen. Diese werden mithilfe eines computerbasierten Informationssystems – der Prozessvisualisierung – auf zwei Monitoren dargeboten. Ein dritter Monitor ist für ein Kamerabild reserviert, welcher das Schaufelrad von der (für den GF verdeckten) Gegenseite zeigt. Die Monitore sind in einem Winkel von etwa 100° linksseitig über Kopfhöhe des Geräteführers in einem Abstand von ca. 1 m angebracht. Softwareseitig besteht das Informationssystem aus ca. 25 Ansichten, von denen jeweils 2 gleichzeitig angezeigt

werden können. Laut Angaben der Geräteführer werden auf den beiden Monitoren in der Regel das Flözmodell (linker Monitor) sowie die Systemübersicht des Schaufelradbaggers (rechter Monitor) angezeigt. Das Übersichtsdisplay zeigt eine schematische Darstellung des Gesamtsystems sowie eine Vielzahl von für den Abbauprozess wesentlichen Werten. Im Fall von Systemfehlern werden diese auf der Übersicht farblich kodiert dargestellt. Ein weiteres Kommunikationsmittel ist der Funkkontakt zum Einweiser (wichtig beim Planumsbaggern), zum Verladeausleger und zum Tagebauleitstand.

Neben der Prozessvisualisierung kann über die Monitore auch die Baggerprogrammsteuerung (BPS) aktiviert werden. Damit können bestimmte Teilabläufe (Schwenks) automatisiert abgefahren werden. Nicht alle Funktionen der Automatisierung waren zum Zeitpunkt der Felduntersuchung in vollem Umfang nutzbar. Insgesamt wurden die Automatisierungsfunktionen von den Geräteführern nur eingeschränkt verwendet. Da die Arbeitstätigkeit der GF bereits häufig ereignisarme Arbeitsphasen aufweist, ist eine zunehmende Automatisierung der Prozesse auch nicht uneingeschränkt zu empfehlen. Durch Automatisierung wird die Arbeitshandlung u.U. auf reine Überwachungstätigkeiten reduziert. Dies kann auf Dauer zu Monotonie und stärkere Ermüdung führen. Im Ernstfall kann dies bedeuten, dass man nicht optimalen aktiviert ist, um auf Gefahrensituationen schnell und richtig reagieren zu können (siehe dazu [35]). Auch die Einschätzungen der Geräteführer in den Interviews bestätigen diesen Eindruck.

Die Tätigkeitsanalyse in Zusammenschau mit Interview, Beobachtungsdaten und quantitativer Videoanalyse erbrachte einige wesentliche Befunde, die auf Optimierungsmöglichkeiten der MMI hindeuten. So zeigte sich, dass die Geräteführer im Durchschnitt drei- bis sechsmal (abhängig von der Technologie) auf das Informationssystem blicken, wobei es nötig ist, den Kopf entsprechend einzudrehen, was von allen GF als ergonomisch ungünstig bewertet wurde. Weiterhin zeigte sich, dass nur ein Teil der im Informationssystem dargestellten Werte wesentlich für die primäre Steuerung des Grabprozesses sind. Zu den 10 unmittelbar wichtigen Werten gehören: Leistungsaufnahme Schaufelrad, Leistungsaufnahme Schwenkwerk, aktuelle Förderleistung, aktuelle Sollleistung, aktueller Schwenkwinkel, Fahrwerksgeschwindigkeit, Fahrwerk längsneigung, Fahrwerk querneigung, Raupensteuerung und Status der Baggerprogrammsteuerung. Diese Informationen werden zusammen mit vielen eher unwichtigen Informationen dargeboten, so dass ein schnelles Extrahieren der Werte ein hohes Maß an Expertise voraussetzt.

Neben der Relevanz der einzelnen Informationen wurde auch die Benutzerfreundlichkeit und ergonomische Gestaltung der verwendeten Bildschirmmasken auf den Prüfstand gestellt. Hinsichtlich einer Reihe von Bewertungskriterien wurden Möglichkeiten und Potential für eine optimierte Gestaltung festgestellt. Kritikpunkte betreffen Einschränkungen bei Lesbarkeit von Schrift und Zahlen, Verletzung hinsichtlich Prinzipien der Erwartungskonformität und Sparsamkeit bei Schnittstellenelemente, unklare Beschriftung von Interaktionselementen, Verletzung des natürlichen Mapping von Anzeigeelementen und teils nichtkonforme und inkonsistente Verwendung von Farbkodierungen. Die Ergebnisse wurden detailliert im Arbeitskreis vorgestellt und ein Konzept zur verbesserten Gestaltung diskutiert.

Weder die Befragung der Geräteführer noch die Beobachtung ihrer Tätigkeit lieferte Hinweise hinsichtlich des Auftretens kritische Ereignisse im Förderprozess. Damit sind Vorfälle gemeint, die bei falschem Handeln eine Bedrohung für Mensch oder Maschine darstellen. Allerdings konnten durchaus kritische Ereignisse im weiteren Sinne beobachtet bzw. erfragt werden: Störungen durch Überlastung des Schaufelrads, Dreh- oder Brechwerks, Beschädigung des stromzuführenden

Starkstromkabeln oder der Bandanlage durch zu weites Schwenken des Auslegers, Verunreinigungen im Flöz (z.B. quarzhaltige Kohle), Gefahr der Entstehung von Brandherden oder Feuer.

1.5. Ableitung von relevanten Szenarien für die Testumgebung

Nach Auswerten der Feldversuche wurde Szenarien erarbeitet, die wesentliche Aspekte der Geräteführertätigkeit in der VR-Umgebung nachbilden. Für die Szenarien waren die Klassierung nach Prozessschritten, die Ableitung von Schwingspielen nach Prozessmustern, die Beschreibung der Maschinen- und Werkzeugbewegungen, die Festlegung der Funktionalitäten der Versuchseinrichtung, die Datenvorbereitung der Visualisierung und der Entwurf einer Versuchsmethodik erforderlich. Bei den Überlegungen waren technische Umsetzbarkeit, experimentelle Variierbarkeit und realistische Nachbildung der Abläufe von Bedeutung.

Mit der Erarbeitung von repräsentativen Szenarien entstanden referenzierbare Bedien- und Arbeitssequenzen, die technisch wiederholbar exakte Untersuchungen der jeweiligen Prozesse zulassen. Von den beobachteten Kerntechnologien wurde der Prozess des eigentlichen Kohleförderns als Szenario für eine Umsetzung als VR-Umgebung ausgewählt. Diese ist die wichtigste und zugleich am häufigsten gefahrene Technologie, und erlaubt eine klare Definition von Leistungsparametern (bzgl. Performanzanalyse). Die Analysen ergaben außerdem Probleme hinsichtlich der Gestaltung und Anordnung der Informationssysteme in der derzeitigen realen Maschine. Diese Aspekte sollen wesentliche Merkmale für die Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Interaktion darstellen.

Die Analyse der Informationssysteme im realen Tagebau ließ drei wesentliche Schlüsse zu. Erstens sind die Monitore ungünstig angebracht. Es ist daher mit Aufwand (zeitlich, kognitiv und physisch) verbunden, Informationen von dort einzuholen. Zweitens sind die Informationen umfassend, aber nur ein Bruchteil davon wird für den eigentlichen Förderprozess benötigt. So sind bspw. Zustände bestimmter Subsysteme für den Geräteführer nicht von Belang, solange sie sich im Normalzustand befinden. Sie sind aber zusammen mit relevanten Parametern auf der Übersichtsanzeige abgebildet und erschweren daher das Auffinden der gewünschten Informationen. Drittens ist nicht nur die Menge der abgebildeten Werte, sondern auch deren Aufbereitung nicht optimal umgesetzt und verletzen Prinzipien des Display-Designs. Diese Faktoren sollten im Simulator variiert, und auf ihre Auswirkungen auf Empfinden und Leistung der Geräteführer untersucht werden. Prämissen für eine prototypische Umgestaltung waren also ein zentrales Display zu schaffen, das keine Kopfbewegungen erfordert, und auf dem nur relevante Parameter komprimiert und benutzerfreundlich abgebildet werden.

Die Untersuchungen weisen außerdem auf einen Verbesserungsbedarf bei der zeitlichen Kopplung von Grabprozess und maschinenbezogenem Prozessfeedback hin. Die Möglichkeiten einer Verbesserung sowie deren Auswirkung auf die Prozessleistung stellen einen weiteren Ansatz für die Untersuchungen in der VR-Umgebung dar.

2. Aufbau Simulator

Der Simulator der TU Dresden besteht aus einer Kabine, welche auf einem Bewegungssystem (Hexapod) montiert ist (siehe Abbildung 7). In die Simulatorkabine lassen sich reale Führerhäuser/Bedienumgebungen mit originalen oder prototypischen Bedien- und Anzeigeelementen verschiedener Maschinentypen einbauen. Videobeamer projizieren computergenerierte Darstellungen der Arbeitsumgebung einschließlich sichtbarer Maschinenteile auf eine gewölbte Wand. Über ein Soundsystem können zugehörige Maschinen oder Prozessgeräusche eingespielt werden. Die beim Fahren und Arbeiten auftretenden Bewegungen, Beschleunigungen und Maschinenschwingungen werden über das Bewegungssystem nachgebildet. Somit kann ein Maschinenführer die virtuelle Arbeitsmaschine über seine Sinne für Sehen, Hören, Gleichgewicht und Fühlen erleben. Durch die Interaktion mit der Maschine und der Umwelt bestimmt er den Arbeitsprozess und das Maschinen- sowie Umweltverhalten mit.

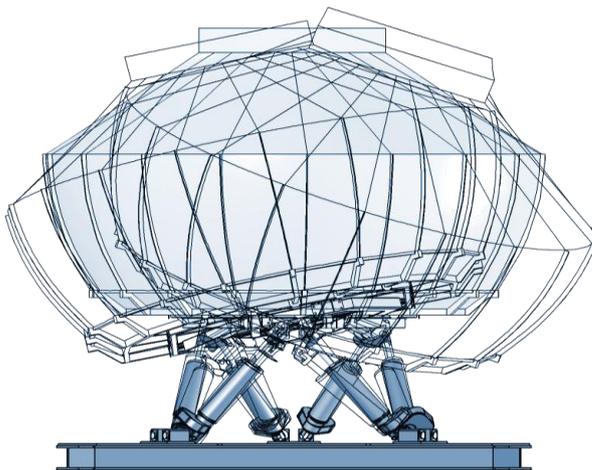


Abbildung 7: Interaktiver Simulator, Übersicht, verschiedene Bewegungspositionen

Alle Modellumsetzungen basieren auf dem an der TU Dresden entwickelten Softwaresystem SARTURIS [18]. SARTURIS ist kein abgeschlossenes Simulationsprogramm, sondern bildet den Rahmen für individuelle Softwarekomponenten. Alle Komponenten (Maschinenmodell, Ansteuerung der Bedienelemente, Bewegungsmodell, Visualisierung Sichtsystem, Visualisierung Monitore, Prozess, Sound, Bedienoberfläche Operator, Datenlogger) mussten für den Anwendungsfall der Schaufelradbaggersimulation speziell entwickelt, programmiert und angepasst werden.

2.1. Systemarchitektur

Im Schema nach Abbildung 8 ist der modulare Aufbau des Simulationssystems verdeutlicht. Alle Komponenten des Simulators lassen individuell sich an die jeweilige Anforderungen einer Simulationsaufgabe anpassen. Der Bedienstand (siehe Abschnitt 2.2) musste für die Simulationsanwendung Schaufelradbagger neu entwickelt und angefertigt werden, da aus

logistischen (Größe und Verfügbarkeit einer Baggerkabine) nicht auf ein vorhandenes Exemplar zurückgegriffen werden konnte.

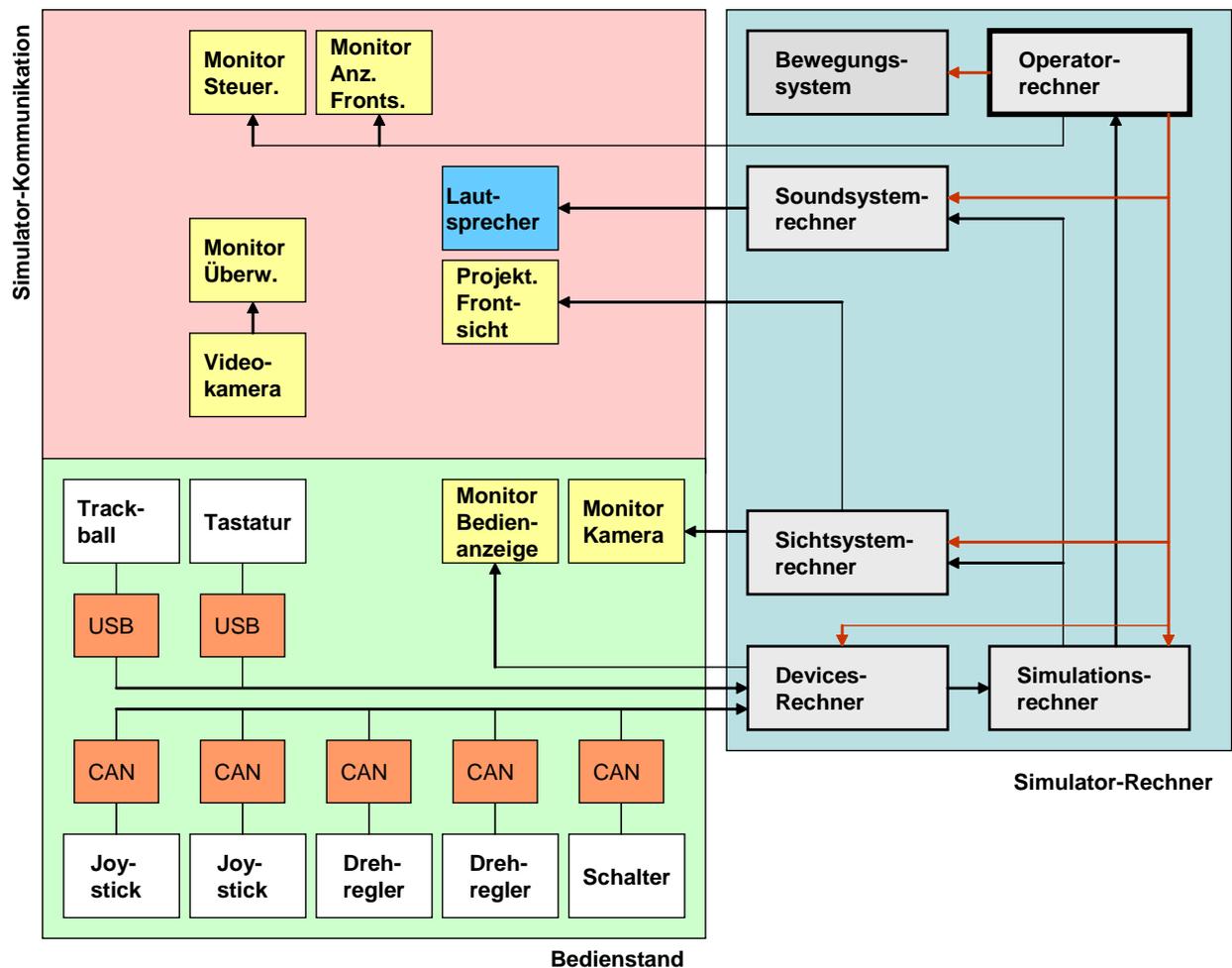


Abbildung 8: Schema der Hardwarekonfiguration

2.2. Hardware Kabineneinrichtung/Bedienelemente

Die Bedieneinrichtung ist die wesentliche Schnittstelle der Interaktion des Bedieners mit der Maschine und dem Prozess. Vorgabe für die Umsetzung war die Kabinenausstattung eines SRs 1301. Alle Konstruktionsmaße und die Konfiguration der Bedienelemente wurden übernommen. Wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 zu erkennen, besteht die Einrichtung aus dem Grundrahmen mit Blechabdeckung (1), dem Monitorhalter (2), dem Sitz (3) und dem Unterwagen (4) für die Befestigung in der Kabine. Die Sitzposition, die Position der Monitore und der Bedienelemente sind verstellbar, so dass verschiedene Versuchsanordnungen getestet werden können.

Als Bedienelemente wurden verwendet:

- Joysticks: Gessmann Verbundantrieb V8 (li: I-Kulisse, re: Stern-Kulisse, Endrastung)
- Potentiometer: Distrelec A 25 20/50 060
- Tastatur: Gett MF-2 Basic Line
- Trackball: Gett TKH-TB50
- Monitor: LG Flatron E 1910P-SN

Die für CAN-Umsetzung erfolgte mittels MicroControl μ CAN4.ai-SNAP.

Die Ansteuerung/Auslesen der Bedienelemente in der Simulation erfolgte über das Framework zur CAN-Adaption [36]. Im entsprechenden Modul des Framworks lassen sich Joystickpositionen und Reglergeschwindigkeiten in rotatorische und translatorische Bewegungen für das Maschinenmodell übersetzen.

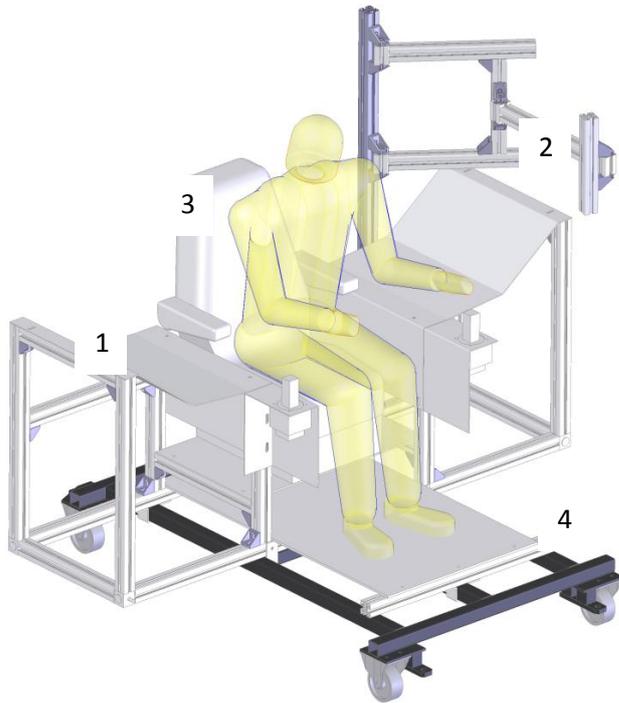


Abbildung 9: Übersicht Bedieneinrichtung mit Fahrerposition



Abbildung 11: EyeLink II Eyetracking System (links), Proband im VR-Simulator (rechts)

Hardwareseitig besteht das System aus der Blickkamera, einem PC für die Aufzeichnung der Blickbewegung, einem PC für die Aufzeichnung der Szenenvideos und zusätzlichen Komponenten für die Szenenvideoübertragung. Alle Teile des Systems müssen während der Untersuchung in der Simulatorkabine untergebracht werden. Da die räumlichen Gegebenheiten im Simulator begrenzt sind, musste eine kompakte (platzsparend) und flexible (schnell abbaubar) Lösung gewählt werden. Eine zusätzliche Anforderung besteht darin, dass zum Beginn einer Messung eine Kalibrierung durchgeführt werden muss, wofür ein Monitor im Abstand von 60 cm zum Kopf des Probanden benötigt wird. Die Kalibrierung sorgt dafür, dass räumliche Blickpositionen und Szenenvideokoordinaten übereinstimmen und aufeinander beziehbar sind.

Um die Zweckmäßigkeit und Robustheit des Setup zu testen, wurde die Konfiguration in einer Studie mit 12 Probanden getestet. Zu diesem Zweck wurde ein geprüftes Szenario einer mobilen Arbeitsmaschine verwendet. Dabei wurde das Bewegungssystem des Simulators vielseitig beansprucht, was auch im Hinblick auf die Robustheit der Blickbewegungsmessung von Belang war. Die Testung dauerte ca. 25 min. Anschließend wurden die Blickbewegungsdaten ausgewertet und bzgl. fehlender Werte und anderer Auffälligkeiten in den Daten geprüft. Die Daten konnten insgesamt als valide angesehen werden. Für eine frühe Entwicklungsstufe des virtuellen Schaufelradbaggers wurde zudem getestet, ob die Robustheit der Blickbewegungsmessung auch bei anderen Schwing- und Vibrationsverhalten des Bewegungssystems (höhere Frequenzen, aber niedrigere Amplituden) gewährleistet werden kann. Diese Tests verliefen ebenfalls zufriedenstellend.

2.3. Maschinenmodell

Nach Tests und auf Grund von Erfahrungen aus anderen Simulationsanwendungen wurde sich für ein kinematisches Maschinenmodell mit überlagerter Kabinenbewegung (aus Messdaten der Feldversuche approximiertes Schwingverhalten) entschieden. Die beiden Modellkomponenten sind Folgenden näher beschrieben:

Kinematisches Maschinenmodell:

In Abbildung 12 sind Fahr- und Drehbewegungen des abstrahierten Maschinenmodells in den bezeichneten Koordinatensystemen einschließlich ihrer Grenzwerte angegeben. Das Maschinenmodell ist so gestaltet, dass es über den für die Simulation notwendigen und beabsichtigten Bewegungsumfang verfügt. Die einzelnen Bewegungsfreiheitsgrade des Modells sind in der Abbildung folgendermaßen bezeichnet:

Kabinenbewegung:

Die Beschleunigungen bezogen auf das Kabinenursprungskordinatensystem werden wie folgt approximiert:

$$a_k = A \cdot \sin(C \cdot t) + B \cdot \sin(D \cdot t)$$

mit (Baggermodus):

	A	B	C	D
rot_x	0,005	0,0	21	0,6
rot_y	0,005	0,001	21	0,6
rot_z	0,05	0,001	21	0,6
trans_x	0,5	0,005	21	0,6
trans_y	1,5	0,005	21	0,6
trans_z	2,5	0,01	21	0,6

mit (Maschinenbewegung):

	A	B	C	D
rot_x	0,0	0,0	21	0,6
rot_y	0,05	0,001	21	0,6
rot_z	0,005	0,001	21	0,6
trans_x	0,7	0,0	21	0,6
trans_y	0,001	0,001	21	0,6
trans_z	1,0	0,002	21	0,6

Die festgelegten Parameter (rot/trans), berechneten Geschwindigkeiten (rot/trans) und Rotationen werden an das Bewegungssystem weitergegeben und dort in reale Bewegungen umgesetzt.

2.4. Grab/Interaktionsmodell

Der Grabprozess ist durch eine wesentliche Größe gekennzeichnet: das Spanvolumen. Es resultiert aus der momentanen Durchdringung des Schaufelrades mit dem Fördergut. Ausgehend von einem festen Gut (Kohle) mit einer hohen Scherfestigkeit auf Grund des vorher ungebrochenen Zustandes resultiert der Füllungsvorgang vorrangig aus dem gewonnenen Schnittvolumen. Rieselndes und nachfallendes Gut wird hier vernachlässigt. Für den zu untersuchenden Bedienvorgang ist ein aktiver Bezug von Zustellbewegung zu Grabvorgang mit den verbundenen Restriktionen abzusichern. Das bedeutet, der Bediener muss eine für ihn nachvollziehbare und wiederholbare Einflussnahme auf den Grabvorgang ausführen können. Der Grabvorgang ist dabei technisch modellhaft mit seinem Durchdringungs- und Gewinnungsvorgang des Werkzeuges abzubilden. Auf Grund der Maschinendimension und der gedämpften Lagerung der Kabine erfolgt die Wahrnehmung in einem Schaufelradbagger weniger über die direkte Wirkung der aktuellen Grabkräfte, wie z.B. in einem Mobilbagger, sondern über Sicht (Volumen) und Kontrollanzeigen. Grenzzustände erkennt der Bediener am Systemstillstand. Für die Simulation sind daher die aus den Grab- und Füllzuständen resultierenden Kräfte vor allem in den Grenzbereichen Überlastung/Überfüllung relevant.

So ist es zulässig, den volumetrischen Füllvorgang als Aufgabe der Bedienung zu benutzen und den Überlastfall aus gemessenen Beziehungen zwischen Förderstrom und Stromaufnahme des Schaufelradantriebes über eine Kennlinie abzubilden.

Eine Echtzeitsimulation stellt hohe Forderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit der zu berechnenden Maschine-Boden-Interaktion. Zur Darstellung der Bodenänderung wurde der Textur-Mapping-Generator der Grafikkarte genutzt. Der entwickelte Algorithmus bestimmt die Durchdringung zwischen Werkzeug und Bodenoberfläche und erzeugt eine kontaktgerechte neue Darstellung der veränderten Bodenoberfläche (s. Abbildung 13). Der Durchdringungswert wird an das System zurückgegeben und für weitere Berechnungen (aktuelles Sichelvolumen) verwendet.

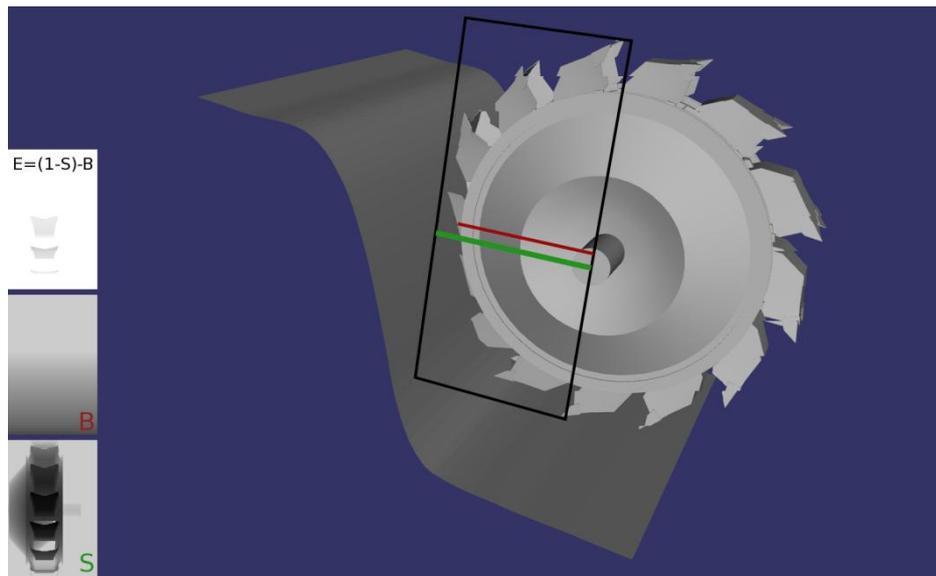


Abbildung 13: Durchdringungsmodell des Bodenkontaktes

2.5. Modellparameter

Während der Durchführung der Untersuchungen wurden verschiedene Werte und Parameter des Maschinenmodells, des (Grab)Prozesses und anderer untersuchungsrelevanter Faktoren des Simulationssystem aufgezeichnet:

Maschine

- Startzeit
- Rotationsgeschwindigkeit SR in rad/s
- Translationsgeschwindigkeit in x, y-Richtung SR in m/s
- Rotationsgeschwindigkeit um y in rad/s (Höhe)
- Rotationsgeschwindigkeit um z in rad/s (SW)
- Position Kabine m
- Strom SR in A
- SW in Grad
- Höhe SR in m
- Position Joystick links, Code
- Position Joystick rechts, Code
- Bewegungssystem FunktWerte a_x, a_y, a_z

- Bewegungssystem FunktWerte a1_x, a1_y, a1_z
- Bewegungssystem FunktWerte a_a, a_b, a_g
- Bewegungssystem FunktWerte a1_a, a1_b, a1_g
- Poti_klein-Wert in V
- Poti_gross-Wert in V
- Sound ein/aus

Prozess

- Foerderleistung_IST in t/h, gemittelt
- Foerderleistung_SOLL in t/h, gemittelt
- Eindringtiefe in m, gemittelt
- Baggerstatus

Symbol

- ObjektID
- Gui-Form
- x,y-Position Symbol
- Symbol Color-R, G, B
- Gui Ein/Aus (Monitor/Sicht)
- Symbolerkennung in V

2.6. Modellrestriktionen

Nicht beabsichtigt sind Untersuchungen zu Maschinenbelastungen und Lastannahmen in Form von Bestimmungen von Grabkräften. Es wird somit ein idealisierter Grabprozess angenommen, der lokale Zahneingriffe und Kraftwechselwirkungen mit dem Boden unberücksichtigt lässt. Der Boden wird als ungebrochen vor dem Grabvorgang betrachtet, Nachrutschungen sind nicht modelliert.

3. Untersuchungen zur MMI im Simulator

3.1. Ziel und Fragestellung der Untersuchung

Mehrere Schwerpunkte sind zu nennen:

1. Aufbau und Anwendungsfähigkeit einer VR-Umgebung für Untersuchungen des Bedienverhaltens in Tagebaugroßgeräten
2. Test von Methoden und Werkzeugen in VR-Umgebungen zur Beurteilung des Bedienverhaltens
3. Zusammenhang zwischen der Präsentation von Informationen über den Grabprozess und der Fähigkeit Prozessvorgaben einzuhalten
4. Erfassung des Blickverhaltens eines Bedieners bei der Bewältigung referenzierter Bedienvorgänge in Tagebaugroßgeräten

3.2. Methoden

3.2.1. Stichprobe

An der Untersuchung nahmen 12 Probanden im durchschnittlichen Alter von 30 Jahren ($SD = 6.7$) teil. Alle Teilnehmer hatten vorherige Erfahrung mit virtuellen Umgebungen, zwei der Teilnehmer waren bereits mit einer Vorabversion des erstellten Szenarios vertraut. Einer der Teilnehmer verfügte bereits über Erfahrung mit der realen Situation eines Schaufelradbaggers, welche im virtuellen Szenario simuliert wurde. Alle Teilnehmer waren über den Ablauf der Untersuchung (2 Untersuchungstermine mit unterschiedlichen Simulator Konfigurationen) informiert, kannten aber das genau Ziel der Untersuchung nicht.

3.2.2. Virtuelles Szenario und Instruktion der Probanden

Auf Basis der Felduntersuchungen im Bedienstand eines Schaufelradbaggers wurde für die Virtualisierung die Arbeitstechnologie „Kohle Fördern“ innerhalb einer Scheibe (beschreibt eine Abbaulage innerhalb eines Kohleflözes) als Szenario ausgewählt. Im Szenario sollte die kontinuierliche Steuerung und Kontrolle eines prototypischen Arbeitsprozesses abgebildet werden. Gleichzeitig sollte eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Arbeitsabläufe (mit potentieller Übertragbarkeit auf andere Geräteklassen) gegeben sein. Der Arbeitsprozess selbst ist durch zwei Subprozesse charakterisiert, den Schwenk des Armauslegers und das Vorfahren des Fahrwerks (Vorschub) am Ende eines Schwenks. Beim Schwenk des Schaufelradauslegers durch die Scheibe wird bei entsprechender Eindringtiefe des Schaufelrads Kohle gefördert. Die Fördermenge entspricht dem Produkt aus dem Querschnitt der Schnittsichel und der Schwenkgeschwindigkeit des Schaufelradauslegers (s. Abschnitt 1.4). Durch Regulation der Schwenkgeschwindigkeit wird die aktuelle Fördermenge innerhalb eines Schwenks beeinflusst. Im simulierten Szenario bestand die

SSS (Ermüdung)

Die Stanford Sleepiness Scale (SSS; [37]) ist ein effizientes Verfahren zur Ermittlung des aktuellen Grads der Ermüdung. Sie besteht aus nur einem Frageitem, wobei eine von sieben verbalen Beschreibungen auszuwählen ist, welche den aktuellen mentalen Wachheitszustand am besten widerspiegelt.

NASA-TLX (Aufgabenschwierigkeit)

Der NASA-TLX (NASA Task Load Index; [38]) beschreibt die subjektiv wahrgenommene Arbeitsbelastung einer durchgeführten Aufgabe. Dabei müssen sechs verschiedene Aspekte der Aufgabenbearbeitung (geistige, körperliche, zeitliche Anforderungen, Leistung, Anstrengung und Frustration) auf einer 20-stufigen Skala eingeschätzt werden, wobei höhere Werte eine stärkere Arbeitsbelastung bedeuten.

KAB (erlebte Beanspruchung)

Der Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung (KAB, [39]) misst Beanspruchung als Teilaspekt des momentan erlebten Befindens. Der Fragebogen besteht aus jeweils sechs polar angeordneten positiven und negativen Adjektiven, die eine sechsstufige Ratingskala begrenzen (Jetzt fühle ich mich: angespannt/gelassen, beklommen/gelöst, unbekümmert/besorgt, unruhig/entspannt, skeptisch/vertrauensvoll, behaglich/unwohl).

Usability(Gebrauchstauglichkeit)

Ein wesentlicher Aspekt zur Bewertung von MMI besteht in der Analyse der Gebrauchstauglichkeit (Usability) der graphischen Nutzeroberflächen, da diese die Bedienung eines Systems sowie die Erfassung, das Monitoring und die Kontrolle von Systeminformation und -zuständen in komplexen technischen Systemen, wie dem eines Schaufelradbaggers, erst ermöglichen. Für die Bewertung der Usability wurden in den vergangenen 20 Jahren eine Reihe von Richtlinien und Ansätzen entwickelt, die ein strukturiertes und methodisches Vorgehen unterstützen sollen (vgl. [40]). Diese, meist in Fragebogenform abgefassten, Instrumente wurden jedoch häufig für die Bewertung von mehr oder weniger komplexen Softwareanwendungen entwickelt; daher liegt bei diesen Verfahren in der Regel ein starker Fokus auf der Bewertung der Interaktion mit dem Programm/der Software. Die Entwickler haben dabei als typisches Szenario oft Office-Pakete o.ä. im Hinterkopf, wo die Eingabe mittels Mausclicks und das Navigieren in Menüs eine wesentliche Rolle spielt.

In der hier dargestellten Untersuchung musste jedoch die graphische Nutzeroberfläche bewertet werden, bei der Interaktionen in Form einer klassischen Computereingabe nicht vorkommen. Daher sind viele Aspekte, die in Fragebögen zur Erfassung von Usability thematisiert werden, für den aktuellen Untersuchungsgegenstand ungeeignet. Es wurde daher ein Fragebogen entwickelt, der stark auf die Untersuchungsbedürfnisse abgestimmt ist und bei dem in eklektischer Form Themen verschiedener bestehender Verfahren (insbesondere ISONORM 9241/10) und allgemeiner Prinzipien zur Displaygestaltung aufgegriffen werden. Dies sind mehrheitlich Fragen zur Gestaltung der dargestellten Informationen aus perzeptiver, kognitiver und ergonomischer Sicht. Mit den Items wurden Aspekte der Erkennbarkeit, der Verständlichkeit, der Orientierung und Komplexität, des Ablenkungspotential, der Lernförderlichkeit und der Ästhetik erfasst. Darüber hinaus sollten die Probanden auch die Positionierung der GUI-Typen bewerten. Insgesamt bestand der Fragebogen aus

28 Aussagen zu den genannten Themen. Alle Aussagen waren auf einer 4-stufigen Ratingskala (mit den Polen „stimme ich zu“ und „trifft überhaupt nicht zu“) zu bewerten.

SSQ – Simulatorkrankheit

Das Phänomen der Simulatorkrankheit ist seit dem Einsatz der ersten Hubschraubersimulatoren Mitte der 1950-iger Jahre bekannt [41]. Es beschreibt körperliche Anzeichen ähnlich denen der Bewegungskrankheit (Motion Sickness - z.B. Seekrankheit) und wird durch widersprüchliche und inkonsistente Sinneseindrücke vor allem zwischen visuellem und vestibulärem System hervorgerufen. Da diese Diskrepanz häufig in Simulatoren oder virtuellen Umgebungen auftritt, bezeichnet man das Phänomen auch als simulatorinduzierte Bewegungskrankheit. Typische Symptomgruppen der Simulatorkrankheit sind Übelkeit, Desorientierung sowie visuelle Symptome. Das verbreitetste Instrument zur Erfassung solcher Symptome ist der Simulation Sickness Questionnaire (SSQ; [42]). Der SSQ besteht aus einer Liste von 16 Symptomen deren momentane Ausprägung auf einer vierstufigen Skala (gar nicht, leicht, mittelmäßig, stark) eingeschätzt wird.

Bewertung VR-Umgebung

Mit Hilfe dieses Fragebogens sollte eine qualitative Bewertung der VR-Umgebung hinsichtlich der Aspekte Realitätsgrad, Umsetzung, Steuerbarkeit sowie Immersion- und Präsenzerlebens erreicht werden. Darüber hinaus sollte die Schwierigkeit der simulierten Aufgabe und der Erfolg des zu Beginn durchgeführten Trainingsdurchgangs bewertet werden. Ein Großteil der Aussagen (Items) wurde dem Präsenz-Fragenbogen von Witmer und Singer [43] entnommen. Präsenz wird dabei als das subjektive Erleben beschrieben, sich in einer Umgebung zu befinden, obwohl man sich real woanders befindet. Die Effektivität einer virtuellen Umgebung wird häufig mit dem von Nutzern erlebten Präsenzerleben in Zusammenhang gebracht, wobei Aufmerksamkeitsprozesse, die durch die Interaktion aus sensorischen Informationen und Umweltfaktoren entstehen, wesentliche Auslöser sind, um Involviertheit zu fördern, Immersion (Vertiefung) zu ermöglichen und die interne Tendenz zu verstärken, sich in die künstliche Umgebung und Aufgabe hinein zu versetzen. Das Erleben von Präsenz und Immersion bildet also einen wesentlichen Aspekt, um Vergleichbarkeit zwischen simulierter und realer Welt herstellen und bewerten zu können. Insgesamt bestand der Fragebogen aus 35 Aussagen zu den anfangs genannten Themenbereichen, die auf einer sieben-stufigen Skala eingeschätzt werden sollten.

3.2.4. Blickbewegungsmessung

Für die Blickbewegungsmessung wurde ein EYELINK II System der Firma SR Research eingesetzt (siehe Abschnitt 2.2.1 für genaue Spezifikationen).

3.2.5. Untersuchungsdesign

In der Untersuchung wurde die Wirkung von drei Einflussfaktoren auf verschiedene Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion evaluiert. Die drei Faktoren sind im Folgenden näher erläutert.

GUI-Versionen

Im Zuge der Felduntersuchungen wurden drei Kriterien für die Optimierung der MMI im Leitstand des Schaufelradbaggers herausgearbeitet. Erstens fiel die räumliche Anordnung der

Informationsdisplays als ergonomisch ungünstig auf und sollte verbessert werden. Zweitens enthalten die Displays zahlreiche Informationen, die für die primäre Arbeitsaufgabe (Kohle fördern) nicht unmittelbar relevant sind und lediglich bei Systemstörungen benötigt werden. Durch Beschränkung auf relevante Informationen ließe sich der generelle Platzbedarf des Displays verringern. Drittens ergab sich bzgl. der Aufbereitung der Informationen hinsichtlich perzeptiver und kognitiver Aspekte ein deutliches Optimierungspotential. Insgesamt war zu erwarten, dass Verbesserungen des Gestaltungskonzepts zu einer Verbesserung der MMI führen sollten.

Es wurde eine neues Gestaltungskonzept für das Informationsdisplay (im Folgenden bezeichnet als GUI - *Graphical User Interface*) erarbeitet. Kennzeichen der überarbeiteten, neue GUI-Version waren eine reduzierte Anzahl von Informationen, die aus kognitiver und wahrnehmungstheoretischer Sicht optimierte Gestaltung der Informationen und eine veränderte räumliche Positionierung, wodurch sich die GUI näher an der zentralen Hauptsehachse des Gerätführers befand. Um den Effekt der Neugestaltung zu analysieren, wurde die Arbeitsweise mit der neuen GUI-Version und der mit der Original-GUI (IST-Zustand SRS 1301) einander gegenübergestellt.

Für die Umsetzung der Original-GUI wurden visuelles Layout und Erscheinung der aktuell verwendeten GUI möglichst detailgetreu nachgebildet. Dazu wurde ein Screenshot vom Display des realen Schaufelradbaggers erstellt, nachbearbeitet und als Hintergrundmaske in der Anzeige verwendet. Dynamische und veränderliche Anzeigeelemente (d.h. Parameter, die in der VR-Umgebung simulierbar waren), wurden dem Hintergrundbild als Textfeld oder Diagrammbalken überlagert. Das Ergebnis ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Anzeige wurden auf einem 19-Zoll-Monitor (Auflösung von 1280 × 1024 Pixel) 90° links vom Probanden in ca. 1 m Entfernung angebracht. Darüber war ein zweiter Monitor gleicher Art angebracht, der (wie auch im realen Tagebaugerät) das Kamerabild der Schaufelradgegenseite darstellte.

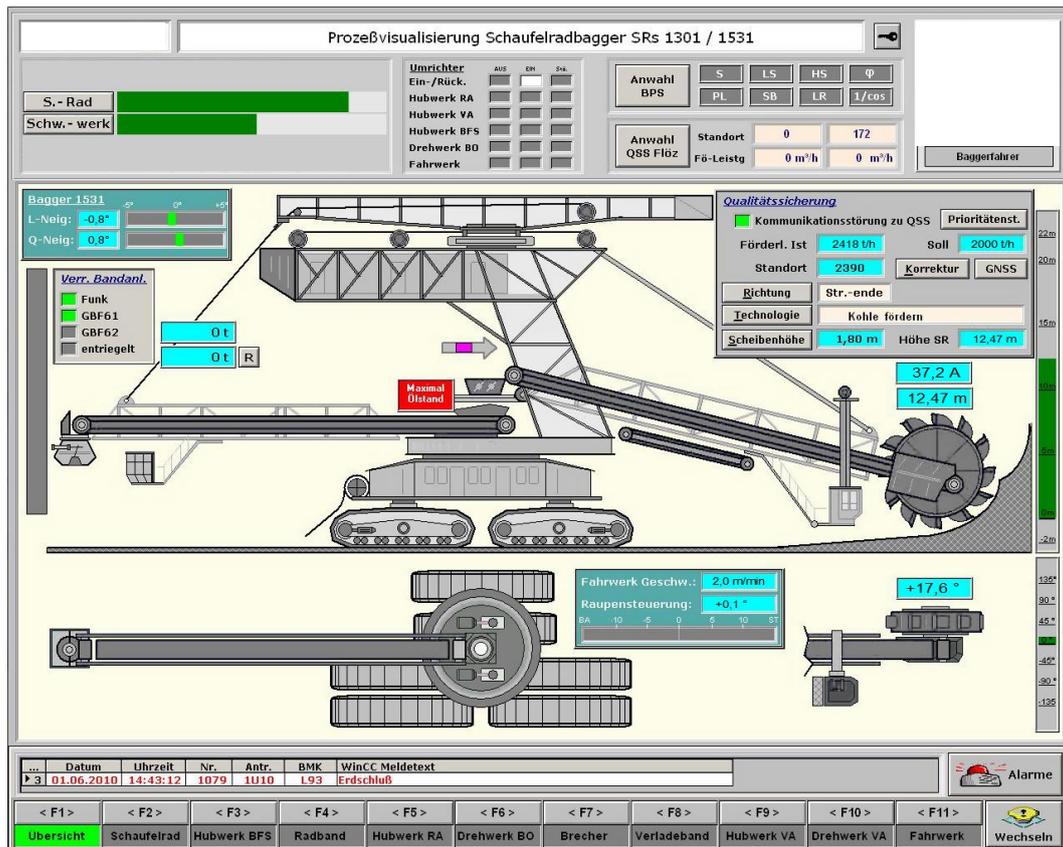


Abbildung 15: Reimplementierung der originalen GUI, wie sie im Schaufelradbagger SRs 1301 Verwendung findet

Im **neuen Gestaltungskonzept** sollte lediglich *ein* zentral angebrachter Bildschirm verwendet werden, auf dem ausschließlich *abbauprozess-relevante* Parameter abgebildet werden. Dazu gehören:

- Förderleistung IST
- Förderleistung SOLL
- Leistungsaufnahme Schaufelrad
- Leistungsaufnahme Schwenkwerk
- Schwenkwinkel
- Höhe Schaufelrad
- Raupensteuerung
- Fahrwerkklängsneigung
- Fahrwerkquerneigung
- Fahrwerkgeschwindigkeit

Die Visualisierung der Parameter erfolgte so, dass die GUI ein schnelles und unmissverständliches Erfassen der relevanten Informationen ermöglichte. Das Ergebnis der Neugestaltung ist in Abbildung 16 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der vorgenommenen Gestaltungsmaßnahmen und resultierenden Elemente sind Abschnitt 5.1 zu entnehmen. Letztlich ist zu beachten, dass alle veränderlichen Werte in beiden GUI-Varianten dargestellt wurden, lediglich Kontext und Aufbereitung der Darstellung unterschied sich zwischen den Versuchsbedingungen.

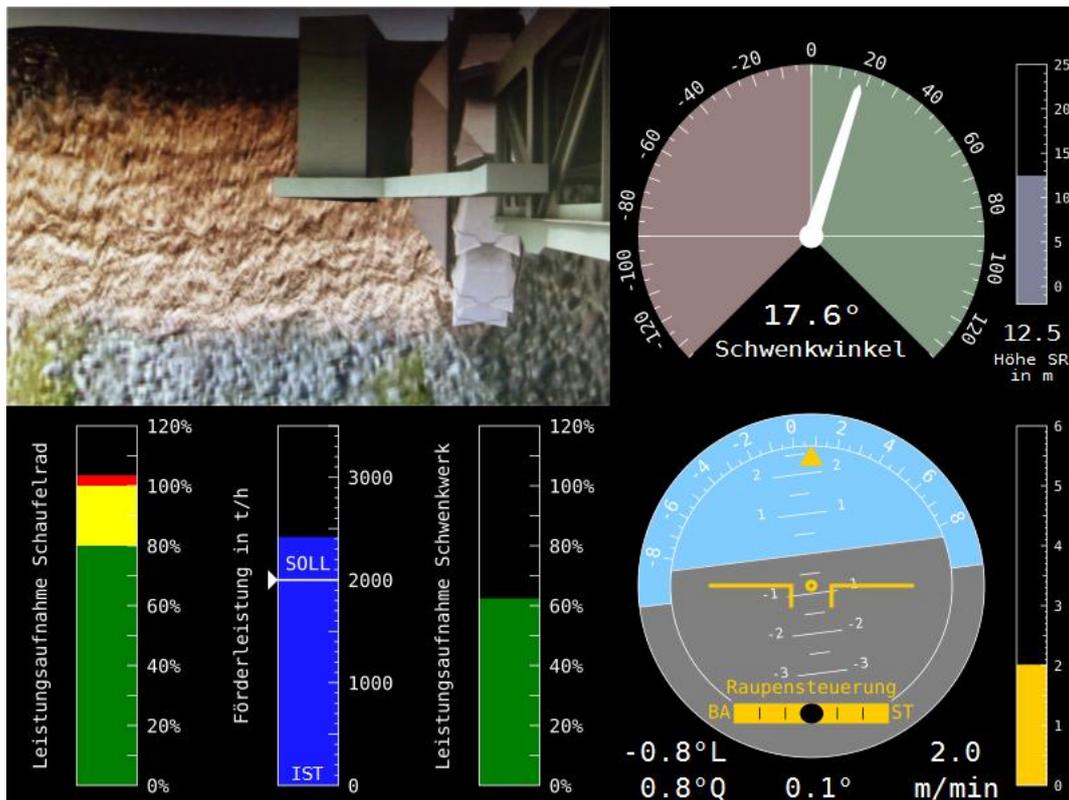


Abbildung 16: Ergebnis der Neugestaltung der GUI

Aufgabenanforderung

Als zweiter Faktor wurde in den Versuchsdurchgängen die Aufgabenanforderung variiert. Die Teilnehmer sollten so genau wie möglich die Vorgabe der Förderleistung von 1000 oder 2000 t erreichen. Die Vorgabe von 2000 t stellt dabei die größere Anforderung dar, da zum Erreichen des Ziel i.d.R. schneller geschwenkt und somit auch die Schwenkgeschwindigkeit dynamischer reguliert werden musste. Darüber hinaus bestand bei der Vorgabe von 2000 t ein höheres Risiko eine Überlastsituation durch kurzzeitige Überschreitung der maximalen Fördermenge von 3500 t zu auszulösen.

Nebenaufgabe

Eine Simulation kann reale Gegebenheiten zwar in wesentlichen Bereichen detailgetreu nachbilden, an die gesamte Komplexität der realen Welt reicht der Umfang aber nie heran. Daher wurde eine Nebenaufgabe eingeführt, die als Stellvertreter für alle möglichen plötzlich auftretenden Ereignisse und Gefahrensituationen fungiert. Dadurch wird beim Probanden eine zusätzliche Aufmerksamkeitsbelastung hervorgerufen. Es sollte geprüft werden, inwiefern diese Zusatzaufgabe einen generellen Einfluss auf die Ausführung der Hauptaufgabe hat und ob eine verbesserte MMI-Gestaltungskonzept eine negative (leistungs-mindernde) Wirkung der Nebenaufgabe abschwächen kann. Weiterhin sollte untersucht werden, ob durch das GUI-Design Ort und Charakteristik der visuellen Aufmerksamkeit und somit die Fähigkeit auf externe Ereignisse wie z.B. möglicher Gefahren, angemessen zu reagieren, verändert werden kann. Dies könnte z.B. durch unterschiedliche Blickbewegungsmuster [44] oder eine Veränderung des *useful field of views* [45] hervorgerufen werden.

Die Nebenaufgabe kam immer erst im zweiten Teil der Untersuchung (Versuchsdurchgang 3 und 4) zusätzlich zur Hauptaufgabe zum Einsatz. Probanden sollten während des Grabvorgangs das Auftauchen von abstrakten Symbolen verfolgen. Dies konnten entweder rote Kreise oder Dreiecke sein, die entweder auf der GUI oder auf der simulierten Weltsicht im Bereich des Schaufelrads dargeboten wurden. Die Probanden hatten die Aufgabe, so schnell wie möglich auf das Auftauchen eines Kreises (nicht aber eines Dreiecks) durch Auslösen eines Fußtasters (rechter Fuß) zu reagieren. Der Ort der Darstellung (GUI vs. Sicht) und die genaue Position am Darstellungsort (also z.B. innerhalb der GUI) wurden randomisiert. Die Symbole hatten eine Größe von etwa 1 Grad Sehwinkel und wurden zufällig alle 5 bis 15 s für eine Dauer von jeweils 1 s dargeboten.

3.2.6. Ablauf der Untersuchung

Die gesamte Untersuchung verteilte sich über mehrere Untersuchungstermine, an denen die beiden GUI-Typen getrennt voneinander getestet wurden. Die Testreihenfolge für die beiden GUI Versionen war quasi-randomisiert, d.h. eine Hälfte der Probanden begann mit der originalen GUI und die andere mit der neugestalteten GUI-Version. Zwischen den beiden Testterminen lagen für die Probanden jeweils 1 bis 3 Wochen. Jeder Versuchstermin bestand aus einer Vorbefragung, einer Trainingssession zum Erklären und Üben in der Simulation, den Versuchsdurchgängen 1 und 2, einer Zwischenbefragung, den Versuchsdurchgängen 3 und 4 sowie einer abschließenden Nachbefragung.

In der Vorbefragung des ersten Termins, wurden verschiedene allgemeine Angaben zur Person und bisherige Erfahrungen mit virtuellen Umgebungen (Fahrsimulationen, Computerspiele) ermittelt sowie eine erste Erhebung von SSS, KAB und des SSQ durchgeführt.

Im Training wurden Szenario, Bedienelemente und graphischen Schnittstelle (GUI) erklärt sowie die Bedienung des SR-Simulators geübt. Darüber hinaus wurden den Probanden Strategien für eine optimale Aufgabenbearbeitung und Restriktionen des Szenarios erläutert und demonstriert (maximale Vorschubdauer, maximale Eindringtiefe, maximale Förderleistung, Schwenkwinkelbereich mit maximaler Förderleistung, Verhalten bei Erzeugen einer Systemüberlastung usw.). Das Training wurde solange fortgesetzt, bis sich die Probanden mit der Bedienung sicher fühlten und keine Unklarheiten mehr bestanden.

Vor dem ersten Versuchsdurchgang wurde zunächst der Eye-Tracker aufgesetzt, eingerichtet und kalibriert. Zwischen den Versuchsdurchgängen wurde die Blickbewegungsmessung unterbrochen und die Messgenauigkeit überprüft. Bei jedem Versuchsdurchgang erfolgte ein Neustart der Simulation, um gleiche Ausgangsbedingungen zu gewährleisten, d.h. zu Beginn eines Versuchsdurchgangs musste eine immer gleiche Startposition für das Arbeitsszenario angefahren werden (Schaufelrad auf Höhe 12 m stellen, Schwenkwerkausrichtung auf -10° stellen und mit Fahrwerk solange vorwärtsfahren bis das Schaufelrad Kontakt mit dem Flöz hatte). Innerhalb von Versuchsdurchgang 1 und 2 bestand das Ziel des Probanden darin, die vorgegebene SOLL-Förderleistung so genau wie möglich einzuhalten (im ersten Versuchsteil war dies immer 1000 t/h und im zweiten 2000 t/h), wobei eine „virtuelle“ Überlastung des Systems vermieden werden sollte. Am Ende von Durchgang 2 wurde die Blickkamera abgenommen und eine Zwischenbefragung (SSS, KAB und NASA-TLX) durchgeführt. Im Anschluss wurde den Probanden die Nebenaufgabe, die in den folgenden zwei Versuchsdurchgängen zusätzlich zu bearbeiten war, erklärt (siehe Kapitel 3.2.5). Danach wurde der Eye-Tracker wieder aufgesetzt und neu eingerichtet und die Simulation wurde neu gestartet. Die Förderleistungsvorgabe in Durchgang 3

und 4 war wieder 1000 bzw. 2000 t/h, wobei über die Probanden hinweg ausbalanciert war, mit welcher der beiden Anforderungen begonnen wurde.

Die Untersuchung endete mit einer Nachbefragung, bestehend aus SSS, KAB, NASA-TLX, SSQ, Usability- und VR-Bewertung. Insgesamt dauert der erste Versuchstermin ca. 1,5 Stunden/Proband, der zweite Durchgang war ca. 15 min kürzer (in den Befragungen wurde auf Angaben zur Person, sowie die Fragebögen SSQ und VR-Bewertung verzichtet, das Training ließ sich ebenfalls in etwas kürzerer Zeit durchführen).

3.2.7. Datenanalyse

Fragebögen

NASA-TLX Für jeden Untersuchungszeitpunkt wurde ein Gesamtwert aus den sechs Skalen berechnet. Auf eine Gewichtung der einzelnen Skalen wurde verzichtet, da alle Probanden eine annähernd gleiche Versuchsanordnung und Aufgabe in der Untersuchung zu bearbeiten hatten.

KAB Für jeden Versuchsdurchgang wurde ein Gesamtmittelwert berechnet, wobei Items 1, 3 und 5 umgepolt wurden.

Die Werte für **SSS**, **NASA-TLX** und **KAB** wurden mittels Varianzanalyse für Messwiederholung mit den Faktoren Zeitpunkt (3-stufig, Vor-, Zwischen- und Nachbefragung) und GUI Typ (original vs. neugestaltete GUI) ausgewertet.

Fragebogen zur Bewertung der VR Die Items des Fragebogens wurden zu den Aspekten Immersion, Kontrollierbarkeit/Steuerbarkeit, Umsetzung/Realitätsgrad auf perzeptueller Ebene und Trainingserfolg zusammengefasst. Einzelne Items wurden umgepolt, so dass hohe Werte in den Subskalen für inhaltlich hohe Ausprägungen bzw. eine positive Bewertung des entsprechenden Aspektes wiedergeben. Neben diesen Items gab es Fragen zur Aufgabe und der Funktion bestimmter Informationen für die Aufgabenbewältigung. Zusätzlich zum quantitativen Vergleich der Subskalen zwischen den GUI-Typen (T-Test für unabhängige Stichproben) wurde auf qualitativer Ebene geprüft, ob Aussagen einzelner Items (positiv oder negativ) spezifisches Gewicht für die Einschätzung der VR-Umgebung haben.

SSQ Die Auswertung des Fragebogens zur Simulatorkrankheit erfolgte entsprechend den Empfehlungen der Autoren [42] für die Subskalen Übelkeit, okulomotorische Beschwerden, Desorientierung sowie für den Gesamtscore. Das Item „Kopfdruck“ wurde nicht berücksichtigt, da durch das Tragen des Blickerfassungssystems von fast allen Probanden über Symptome dieser Art berichtet wurden. Da der Fragebogen jedoch eine Bewertung der VR-Simulation und nicht der begleitenden Testmethoden widerspiegeln sollte, wurde es für die Einschätzung von Symptomen der Simulatorkrankheit nicht berücksichtigt. Es wurde geprüft, ob es zwischen Vor- zu Nachbefragung zu einer signifikanten Veränderung der Symptomausprägungen kam. Zudem wurden die erhobenen Werte der SSQ-Skalen mit Vergleichsuntersuchungen in anderen Simulatoren verglichen.

Usability Fragebogen Die Aussagen der Fragen zur Gebrauchstauglichkeit wurden zu sieben inhaltlichen Kategorien zusammengefasst (Erkennbarkeit, Verständlichkeit, Orientierung/ Komplexität, Ablenkungspotential, räumliche Position, Ästhetik und Lernförderlichkeit). Mittels T-

Test für abhängige Stichproben wurde geprüft, ob sich die Bewertung der einzelnen Items in Abhängigkeit von den GUI-Typen signifikant unterscheidet.

Verhaltensdaten/Simulatorprotokoll

Die Logdatei der Simulation besteht aus einer Reihe von Variablen, s. Abschnitt 2.5, die den Systemzustand des Simulators im Abstand von jeweils 20 ms erfassen. Die Daten werden am Ende eines Versuchsdurchgangs abgespeichert. Aus der resultierenden Logdatei sind für jeden Zeitpunkt eindeutig Maschinenstatus, Versuchsbedingungen und die aktuelle Bedientätigkeit ermittelbar. Anhand des Protokolls können Versuchsbedingungen zugeordnet, Analysebereiche oder -ereignisse definiert und entsprechende Variablen analysiert werden. Zunächst wurden Verfahren entwickelt, um die anfallenden Daten so zu integrieren und in ein csv-konformes Format zu überführen, so dass gängige Statistikpakete die Daten lesen können. Die ungefilterten Rohdaten umfassten ca. 1,8 Mio Zeilen mit jeweils Datenpunkte von über 40 Variablen. Dieser Grundbestand wurde zunächst gefiltert und mit den Daten aus der Blickbewegungsmessung (s.u.) verknüpft.

Förderleistung Bei der Bewertung der erzielten Förderleistung lag der Fokus auf dem möglichst exakten Einhalten der Fördervorgabe. Die Fördermenge ist dabei wichtig, um eine möglichst effiziente Planung im Tagebau zu gewährleisten; auftretende Schwankungen der gleichen wirken sich negativ auf die Lebensdauer der Maschine aus. Es ist wünschenswert, möglichst nah an der Fördervorgabe zu arbeiten und dabei möglichst wenige Leistungsschwankungen zu produzieren. Daher wurden zur Evaluierung der Förderleistung zwei Parameter herangezogen: einerseits die mittlere Differenz zur jeweiligen Vorgabe (gemittelt als Median zwischen den einzelnen Datenpunkten), andererseits die Standardabweichung als Streumaß.

Eine weiterführende Analyse der Prozessparameter mit Bezug auf die technische Prozessbewertung durch den Bedieneinfluss ist in Abschnitt 3.2.8 zu finden.

Prozessfehler/Systemüberlast Zu Überlastsituationen kommt es im Schaufelradbagger immer dann, wenn Schwenk- oder Drehwerk während des Grabprozesses Schwellwerte für die maximale zulässige Stromaufnahme überschreiten. Der Bagger wird dann aus Sicherheitsgründen abgeschaltet. Um das System wieder anzufahren, muss der Geräteführer den Fehler durch eine Eingabe quittieren und die Motoren nach und nach wieder einschalten. Letztlich sind bei diesen Situationen zwei Punkte von zentraler Bedeutung: zum einen wird die Maschine starken Belastungen ausgesetzt und zum anderen führt die Überlast zu einem Zeitverlust im Grabprozess.

In der Simulation konnte eine Überlastung während des Grabprozesses durch punktuelle Überschreitung der maximalen Fördermenge (>3500 t) oder der Überschreitung der maximalen Eindringtiefe des Schaufelrads entstehen. Beim Auftreten einer Überlast stoppte die Drehung des Schaufelrads und die Funktion des Schwenkwerks (bzw. des rechten Bedienhebels) wurde ausgesetzt. Das eigentliche Beheben der Störung wurde in der Simulation vereinfacht umgesetzt. Um das Schwenkwerk wieder bedienen zu können, musste das Fahrwerk soweit zurückfahren werden, bis sich das Schaufelrad nicht mehr im Flöz befand und sich wieder zu drehen begann. Gleichzeitig wurden Schwenkwerkbewegungen wieder freigeschaltet. Im Anschluss musste das SR wieder ins Flöz hineingefahren werden und der Schwenk konnte an gleicher Stelle fortgesetzt werden. Für den Bediener bestand die Schwierigkeit darin, richtig abzuschätzen, wie tief hinein gefahren werden kann, sodass nicht gleich wieder eine Überlast auftritt (zu tief) oder aufgrund zu geringer

Eindringtiefe die Förderleistung nicht mehr eingehalten werden kann (nicht tief genug). Als Hilfe wurde den Probanden geraten, die Dauer des Herausfahrens mitzuzählen und dann eine etwas verkürzte Zeit wieder hineinzufahren. Das Eintreten einer Überlastepisode ist in der Logdatei durch eine Statusvariable des Schwenkwerks kodiert. Das Ende der Überlastepisode wurde als Wiederaufnahme des Schwenks (Veränderung des Schwenkwinkels) definiert. In der Auswertung wurde die Anzahl der Überlastfälle pro Versuchsdurchgang berechnet.

Nebenaufgabe

Mit der Durchführung der Nebenaufgabe wurden zwei Ziele verfolgt. Einerseits wurde geprüft, ob ein signifikanter Einfluss der Nebenaufgabe auf Ausführung der Hauptaufgabe (z.B. Förderleistungsabweichung) sowie auf Aspekte der Aufmerksamkeitsausrichtung (gemessen anhand von Blickbewegungen) feststellen lässt. Darüber hinaus konnte die Performance in der Nebenaufgabe an sich, in Abhängigkeit verschiedener Aufgabenparameter (GUI-Typ, Aufgabenanforderung, Darstellungsort der Zielreize), bewertet werden. Hierfür wurden die **Sensitivität** bei der Zielreizerkennung und die **Reaktionsgeschwindigkeit** berechnet. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob durch Neugestaltung und Anordnung der GUI auch eine verbesserte Reaktion auf relevante Ereignisse in der GUI und in der „Umwelt“ erzielt werden kann. Als Parameter für die Sensitivität wird üblicherweise der Parameter d' verwendet. Dieser ergibt sich als Quotient aus der z-transformierten Treffer-Rate und der z-transformierten Falscher-Alarm-Rate. Die Reaktionsgeschwindigkeit errechnete sich als Zeit vom Auftauchen eines Zielreizes bis zur Reaktion auf dem Fußtaster. Reaktionen kürzer als 100 ms und länger als 3000 ms wurden nicht berücksichtigt.

Blickbewegungsdaten

Kategorisierungssoftware FixCat Eine weit verbreitete Schwierigkeit beim Analysieren von Blickbewegungsdaten besteht im Umgang mit dynamischen Szenarien. Immer dann, wenn von Interesse ist, wohin ein Proband zu einem bestimmten Zeitpunkt fixiert hat, ist eine Zuordnung zwischen den Koordinaten des Blickortes und der Position eines Objektes oder einer Region notwendig. Wenngleich diese Zuordnung in statischen Szenarien mit etwas Aufwand automatisiert verarbeitet werden kann, so ist dies in dynamischen Settings wie dem VR-Simulator, nicht ohne weiteres möglich, das sich auch das Zuordnungssystem fortlaufend verändert. Eine bestimmte Kombination von Blickkoordinaten (z.B. x: 468, y: 233) kann sich also zu einem Zeitpunkt auf das Schaukelrad beziehen, zu einem anderen aber schon wieder auf einen der Monitore. Die Zuordnung ist also jeweils auch abhängig von der aktuellen Kopfposition der Versuchsperson. Das EyeLink-II-System zeichnet daher zusätzlich zur Augenposition ein Szenenvideo mittels einer an der Stirn befestigten Szenenkamera auf, das später mit den Blickkoordinaten überlagert werden kann.

Im Rahmen dieses Projektes und im Kontext der VR-Simulation war es aber wünschenswert, die Blickpositionen im Nachhinein kategorisieren zu können. Damit sollten quantitative Aussagen über alle Aufzeichnungszeitpunkte hinweg möglich werden (und nicht für einzelne exemplarische Passagen). Um dies zu leisten musste eine Auswertesoftware entwickelt werden, die, speziell angepasst für den VR-Simulator, eine solche Zuordnung ermöglicht. Die Benutzeroberfläche der in der Programmiersprache Python realisierten Analysesoftware FixCat ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Screenshot der entstandenen Software FixCat, Videostandbild mit überlagerter Blickposition (links) und Referenzbild zur Kategorisierung (rechts)

FixCat integriert zunächst die Blickbewegungsdaten (vorliegend als ascii-Datei) mit den Szenenvideos der Kopfkamera. Die aktuelle Blickposition wird dabei als Cursor-Overlay dargestellt. Um die Genauigkeit der Überlagerung weiter zu verbessern, wurde die Möglichkeit zur manuellen Korrektur der Position bzgl. einzelner Bildbereiche und deren Interpolation auf Basis von Voronoi-Zellen implementiert. Das führte zu einer deutlichen Verbesserung der Datenqualität, da typische Defizite videobasierter Eye-Tracking-Systeme (wie höhere Ungenauigkeit im Randbereich) teilweise ausgeglichen werden können. Weiterhin macht sich die Software die Tatsache zunutze, dass sich während einer Fixation das Blickziel nicht verändert. Dies ermöglichte es, im Video neben einer Frame-zu-Frame-Navigation, auch eine Fixation-zu-Fixation-Navigation zu implementieren, was einer erheblichen Zeitersparnis bei der Auswertung gleichkommt.

Jede Fixation kann auf zweierlei Arten kategorisiert werden. Einerseits kann durch Tastendruck eine vorher definierte Kategorie vergeben werden (z.B. Region Schaufelrad durch Drücken der Taste „s“); eine andere Möglichkeit besteht darin, den Blickort mittels Mausklick auf der integrativen Referenzabbildung (rechter Teil auf Abbildung 17) zu lokalisieren. Letztes ermöglicht eine wesentlich flexiblere Datenweiterverarbeitung im Nachhinein. Statt Labels zu vergeben werden bei dieser Variante für jede Fixation Koordinaten auf dem Referenzbild gespeichert. Dies macht eine Zuordnung eines Blickortes zu sogenannten *Regions-Of-Interest* (ROIs) möglich, aber auch das Erstellen von sogenannten *Fixation-Maps* (siehe unten). Voraussetzung für dieses Vorgehen sind allerdings eine relativ feste Kopfposition, bzw. eine relativ begrenzter Wirkraum im VR- Simulator. So kann keine Bewegungsparallaxe (Verschiebung der Objekte gegeneinander aus Perspektive des Betrachters) entstehen, die das Abbilden des Versuchsszenarios auf einem einzigen Standbild unmöglich machen würde.

Für die durchgeführten Auswertungen wurde die zweite Methode (Zuordnung mittels Referenzbild) verwendet. Erfahrungsgemäß benötigt man zur Kategorisierung ca. die zehnfache Zeitdauer der Dauer des Originalvideos. Der Aufwand ist also immer noch als *sehr hoch* einzustufen; ohne entsprechende Software und/oder bei frameweisem Durchspringen der Szenenvideos wäre eine Analyse mit der hier vorliegenden Genauigkeit wohl nahezu undurchführbar.

Blickhäufigkeiten Durch die Analyse mit FixCat konnte jeder Fixation eine XY-Koordinate auf dem Referenzbild zugeordnet werden. Diese Koordinaten wurden anschließend genutzt, um die Blickpositionen gegen vorher definierte Polygone zu testen. Diese Polygone entsprechen dabei sogenannten *Regions-Of-Interest*. Mit diesem Vorgehen kann jede Fixation (XY-Koordinate) einer benennbaren Region (d.h. einem Objekt im Raum) zugeordnet und somit der jeweilige Blickort genau klassifiziert werden. Die verwendete feine Aufteilung in ROIs bezogen auf das verwendete Referenzbild sind in Abbildung 18 zu sehen. Ziel dieses Verfahrens ist es, Häufigkeitsstatistiken zu erstellen, um eine quantitative Auswertung der Blick- und Aufmerksamkeitsverteilung über alle Ereignisse hinweg zu ermöglichen.

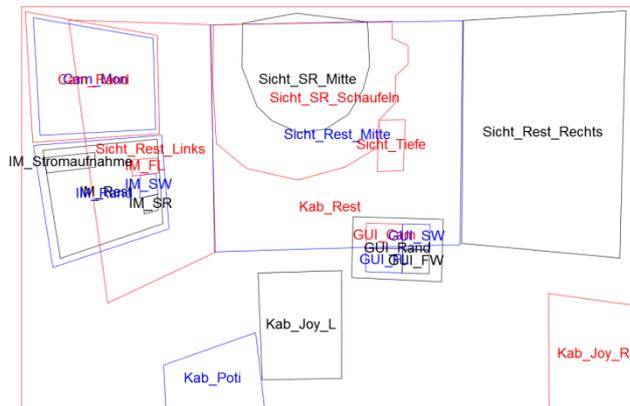


Abbildung 18: Regions-Of-Interest, die zur Kategorisierung von Fixationen verwendet wurden.

Fixation-Maps Fixationskarten wurden von Velichkovsky und Kollegen [46] zur Illustration und Auswertung der Verteilung visueller Aufmerksamkeit vorgestellt. Sie werden berechnet, indem an jedem Fixationsort auf einem Bild eine gaußsche Glockenfunktion auf der dritten Dimension abgetragen wird. Über die Gesamtbetrachtungsdauer eines Bildes entsteht daraus eine Art Hügellandschaft. Wird zusätzlich die Höhe der Verteilung mit der Dauer der jeweiligen Fixation gewichtet, ist eine Interpretation als Aufmerksamkeitslandschaft möglich. So wird unmittelbar ersichtlich, wie die Betrachtungsdauer im Bezug zur jeweiligen Bildregion steht. Diese Methodik wurde ursprünglich zur Analyse von Experimenten bei statischer Bild- bzw. Szenenwahrnehmung verwendet. Durch die manuelle Verarbeitung der Fixationen bzgl. des oben beschriebenen Referenzbildes, das den gesamten Versuchsaufbau umfasst, ist es gelungen, diese Methodik auch auf Daten aus der dynamischen Simulatorumgebung anzuwenden.

Die Fixationskarten wurden zunächst für jede Versuchsperson und jede Bedingungskombination einzeln erstellt. Danach wurden die resultierenden Matrizen normalisiert und anschließend über die Versuchspersonen hinweg gemittelt, sodass Karten durchschnittlicher Blickzuwendungen entstanden. Zur Mittelwertbildung wurde der Median benutzt, der als besonders robust gegenüber Ausreißern gilt.

3.2.8. Prozessanalyse

An dieser Stelle sollen der Einfluss des Bedieners auf die Förderleistung und das Regelverhalten unter dem Aspekt eines Bewertungsparameters betrachtet werden. Der gezeigte Zusammenhang zwischen Informationsdarstellung und Einhaltung der Förderleistung legt nahe, Größen einzuführen, die diesen quantifizieren. Das ist mit der Absicht verbunden, einen Parameter mit hohem Aussagegehalt über

die Schwankungsbreite des durchgeführten Prozesses und die Bedienstabilität vorzugeben. So soll eine vergleichende Betrachtung ähnlicher Aufgaben prozessgebundener Bedienaktivitäten ermöglicht werden.

Es werden definiert:

Prozessgenauigkeit P_G

Als elementarer Führungsparameter dient bei Förderprozessen die Förderleistung. Der Bezug der Förderleistung FL_{IST} [t/h] zur Sollvorgabe FL_{SOLL} [t/h] liefert einen normierten Wert P_{G1} , der mit dem Wert $P_{G1} = 1$ das Erreichen der Vorgabe angibt. Eine Verschiebung aller Werte um den Wert -1, ergibt einen Grenzwert $P_{G0} = 0$ (Erreichen der Vorgabe), $P_{G0} < 0$ bedeutet eine Unterschreitung mit $P_{G0} = -1$ als absolutes Minimum und $P_{G0} > 0$ eine Überschreitung mit $P_{G0} = 2$ als Maximum.

$$P_{G0} = (FL_{IST}/FL_{SOLL}) - 1$$

Von Interesse ist nun die Häufigkeit, mit der der Wert $P_{G0} = 0$ während eines Zeitraumes erreicht wurde. Dazu werden alle Messwerte im Zeitraum klassiert. Für die Datenbereiche d_B werden folgende Grenzen festgelegt:

$$d_{B,0-8} = -2; -1; -0,2; -0,1; 0; 0,1; 0,2; 1; 2$$

Als erfolgreich gelten alle Werte P_{G0} zwischen $d_{B=4}$ und $d_{B=5}$, d.h. zwischen -0,1 ... 0 und 0 ... 0,1. Die absolute Klassenhäufigkeit n_B entspricht der Summe aller Werte in einer Klasse. Da die Prozessgenauigkeit ein Maß für den Grabvorgang sein soll, werden die Werte der Klasse $n_{B=0}$ nicht berücksichtigt (keine oder nur unwesentliche Schaufeleingriffe).

Die Prozessgenauigkeit P_G ergibt sich somit zu:

$$P_G = (3n_{B(4-5)}) / (3n_{B(1-8)}) \cong 100 \text{ [\%]}$$

Bedienaktivität B_A

Die Bedienaktivität ist ein Maß für die Bedienhandlung zum Erreichen der Prozessvorgabe FL_{SOLL} [t/h]. Die motorische Aktivität des Bedieners zeigt sich direkt im Betätigen des Geschwindigkeitsreglers für den Schwenkvorgang. Es wird also vorgeschlagen, die Rotationsbeschleunigung des Reglers b_R in [$^\circ/s^2$] (andere Regleraktivitäten in vergleichbaren Maschinen können so auch beschrieben werden) zu verwenden.

Messtechnisch liegt ein Spannungswert für die aktuelle Winkelposition des Reglers vor. Dieser wird durch die Positions-Spannungs-Kennlinie in eine Winkelposition übertragen und daraus über die Zeitgröße die Rotationsbeschleunigung b_R bestimmt.

Als Aussageziel dient ebenfalls die Häufigkeit der Bedienhandlung im Erfassungszeitraum. Für die Bestimmung wird folgender Datenbereich gewählt:

$$d_{B,0-8} = -2; -1; -0,5; -0,1; 0; 0,1; 0,5; 1; 2$$

Erkennbar sind hier die Bereiche außerhalb einer Toleranzschwelle um den Null-Punkt von Interesse, um eine Aktivität erfassen zu können. Gewählt wurden die Bereiche zwischen $d_{B=0-3}$ und $d_{B=6-8}$.

Die Bedienaktivität lässt sich also beschreiben mit:

$$B_A = (3n_{B(0-3)} + 3n_{B(6-8)}) / (3n_{B(0-8)}) \cong 100 \text{ [%]}$$

3.3. Ergebnisse

3.3.1. Fragebögen

Ermüdung (SSS), aktuelle Beanspruchung (KAB) und Aufgabenschwierigkeit (NASA-TLX)

Die Auswertung der SSS-Scores mittels Varianzanalyse für Messwiederholung mit den Faktoren Erhebungszeitpunkt (Vor-, Zwischen- bzw. Nachbefragung) und GUI-Typ (original vs. redesign) ergab einen signifikanten Effekt für den Faktor Zeitpunkt, $F(2,22) = 9.06$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.46$.

Einzelvergleiche zwischen den Erhebungszeiten im Experiment ergaben einen signifikanten Anstieg der Ermüdung von der Vor- zur Nachbefragung, wobei sich die Zwischenbefragung nicht von den beiden andern unterschied (vgl. Abbildung 19 links). Das Ausmaß des Anstiegs der Ermüdung kann als eher klein bewertet werden, d.h. während die Probanden sich in der Vorbefragung im Mittel als „bin voll da, jedoch nicht auf dem Höhepunkt; kann mich konzentrieren“ einschätzten, lag die Bewertung in der Nachbefragung nur etwa eine halben Skalenpunkt darüber, d.h. zwischen „bin voll da, ...“ und „entspannt wach; nicht voll aufmerksam; ansprechbar“.

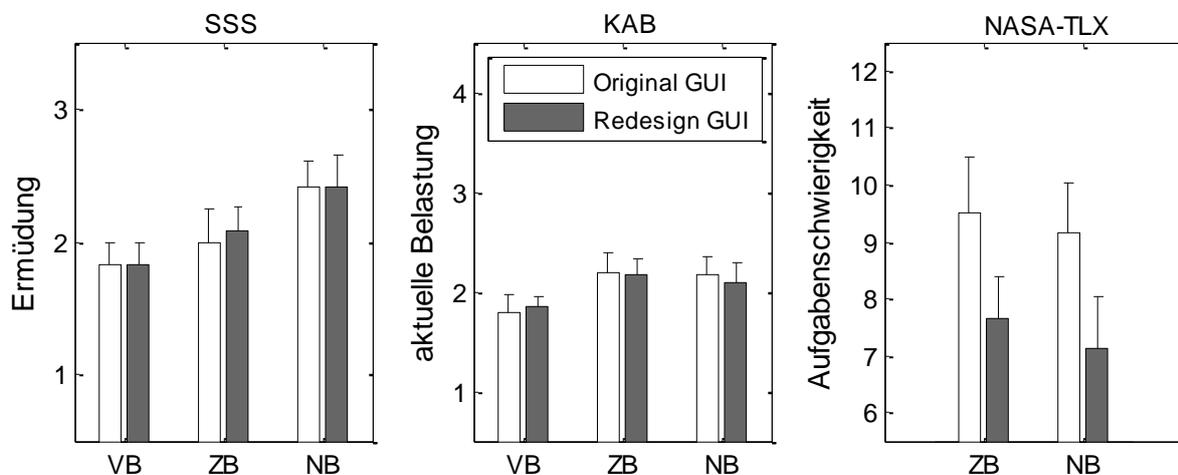


Abbildung 19. Anstieg von Ermüdung (SSS), aktueller Beanspruchung (KAB) und Aufgabenschwierigkeit (NASA-TLX) in Abhängigkeit von GUI-Typ (weiß = alte GUI, grau = neue GUI) und Erhebungszeitpunkt im Experiment. Höhere Werte auf den Skalen bedeuten höher Ermüdung, Beanspruchung und Ausgabenschwierigkeit. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts. Erläuterungen: VB, ZB, NB = Vor, Zwischen- bzw. Nachbefragung

Auch für die aktuelle Beanspruchung ergab die Varianzanalyse (Zeitpunkt x GUI-Typ) einen signifikanten Anstieg der Beanspruchung über die Zeit, $F(2,22) = 10.32$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.48$. Anhand von Einzelvergleichen kann dies auf einen Anstieg von der Vorbefragung zu Zwischen- und Nachbefragung zurückgeführt werden. Zwischen den GUI-Typen ließ sich kein Unterschied in der aktuellen Beanspruchung aufzeigen, erwartungsgemäß führte aber das Bearbeiten der eigentlichen Aufgabe zu einem Anstieg der aktuellen Belastung.

Bei der Analyse der erlebten Aufgabenschwierigkeit zeigte sich ein anderes Muster. Hier ergab die Varianzanalyse (Zeitpunkt x GUI-Typ) keinen Effekt für die Zeit, sondern Unterschiede zwischen den GUI-Typen, $F(1,11) = 14.8$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.57$. Beim Arbeiten mit der neugestalteten GUI wurde die Aufgabenschwierigkeit also als weniger hoch eingeschätzt als mit der originalen GUI. Das Gestaltungskonzept der neuen GUI scheint also die Aufgabenbearbeitung zu unterstützen und möglicherweise zu erleichtern, was sich in einer geringeren wahrgenommenen Aufgabenschwierigkeit widerspiegelt.

Simulatorkrankheit – SSQ

Die Bewertung der Simulatorkrankheit erfolgte, indem das Symptomausmaß für die drei Subskalen Nausea (Übelkeit), Oculomotor (visuelle Beeinträchtigungen) und Desorientierung sowie der Gesamtwert (Total) zwischen Vorbefragung und Nachbefragung mittels T-Test für abhängige Stichproben verglichen wurden. Die anhand der Berechnungsvorschrift ermittelten Werte sind in Abbildung 20 dargestellt. Weder für die drei Subskalen noch für den Gesamtwert konnten Unterschiede zwischen Vor- und Nachbefragung festgestellt werden, d.h. die Erfahrung und Durchführung der Aufgabe in der Simulation führte nicht zu einer signifikanten Verschlechterung der Symptomatik, die mit dem Auftreten von Simulatorkrankheit assoziiert sind. Auffällig ist jedoch, dass bereits während der Vorbefragung Symptome vorhanden waren, die nicht auf eine Simulatorwirkung zurückzuführen waren. Eine genauere Betrachtung ergab, dass dies vor allem auf Symptome wie Schwitzen, überanstrengte Augen, Ermüdung und Konzentrationsprobleme zurückführbar war. Aus methodischer Sicht spricht dies dafür immer eine Vorerhebung bei Messung mit dem SSQ einzuplanen, um Ergebnisse, die durch eine Simulation erzeugt wurden, besser von alltäglichen Schwankungen dieser Symptome abgrenzen zu können.

Neben einer Vorher/Nachher-Betrachtung der Symptomatik, kann auch ein Vergleich zu vergangenen Studien gezogen werden, in denen der SSQ als Messinstrument eingesetzt wurde. Vergleichsdaten finden sich z.B. in der Untersuchung von Kennedy und Kollegen [42]. In Abbildung 20 sind Daten einer Studie mit besonders ungünstiger VR-Konfiguration, die zu einer sehr starken Symptomatik führte (rot Striche), und Mittelwerte der SSQ-Skalen aus allen von Kennedy verglichenen VR-Studien zu finden. Einerseits ist ersichtlich, dass die Werte der vorliegenden Schaufelradbaggersimulation im Wesentlichen noch unter den Mittelwerten aus früheren Studien liegen. Andererseits ist auffällig, dass bereits in der Vorbefragung Anzeichen berichtet werden, die im Bereich einer Studie mit mittlerer Symptomausprägung liegen (z.B. Subskala Oculomotor). Dies verdeutlicht noch einmal, dass für eine valide Bewertung der SSQ Ergebnisse eine Vorerhebung eine sinnvolle Maßnahme darstellen kann.

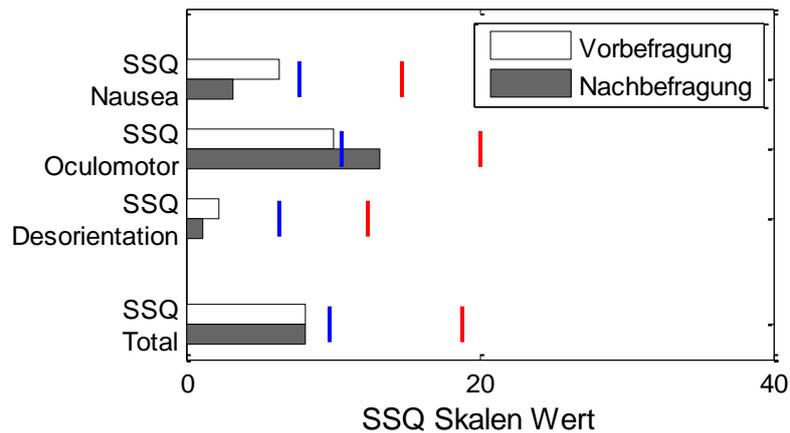


Abbildung 20. Probandenratings auf den Subskalen des SSQ (Nausea, Oculomotor, Desorientation) sowie der Gesamtwert (Total) für Vorbefragung (weiß) und Nachbefragung (grau) während des ersten Testtermins. Zusätzlich eingetragen sind Werte einer Normtabelle aus [42]. Die roten Balken kennzeichnen Werte eine VR-Simulation mit ungünstiger VR-Konfiguration bei der hohe Ausprägungen von Symptomen auftraten. Blaue Balken kennzeichnen die Bewertung auf den SSQ Skalen, die laut [42] im Mittel bei Untersuchungen mit Flugsimulatoren erreicht wurden.

Usability

Die Antworttendenzen für die einzelnen Items des Usability-Fragebogens sind in Abbildung 21 dargestellt. Inhaltlich zusammengehörende Items sind durch farbige Rahmen markiert. Bei fast allen Items konnten statistisch signifikante Unterschiede in der Bewertung der GUI-Versionen nachgewiesen werden. Die Probanden gaben an, dass die Informationen auf der neugestalteten GUI besser erkennbar und die Information verständlicher aufbereitet waren. Die Darstellung wurde als weniger komplex und daher übersichtlicher und weniger ablenkend empfunden. Zudem wurde die Gestaltung als ästhetisch ansprechender und die Positionierung der GUI als günstiger eingeschätzt. Auch hinsichtlich der Lernförderlichkeit wurde die neue GUI-Version als besser erachtet. Lediglich bei zwei der achtundzwanzig Items zeigten sich keine Unterschiede. So zogen beide GUI-Versionen bei der Aufgabenbearbeitung ein ähnliches Ausmaß an Aufmerksamkeit auf sich und die Erkennbarkeit der Symbole aus der Nebenaufgabe wurde für beide GUI-Versionen als vergleichbar gut eingeschätzt. Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die Neugestaltung der GUI bei den Probanden zu einer positiveren Bewertung hinsichtlich verschiedener MMI-relevanter Merkmale führte.



Abbildung 21. Antworttendenzen für alle Items des Usability-Fragebogens in Abhängigkeit von der GUI-Version. Für die Darstellung wurden die Items inhaltlich nach sieben Kategorien (gekennzeichnet durch farbige Rahmen – Bezeichnungen der Kategorien siehe Legende unten links) sortiert. Bei überlappenden Rahmen können die entsprechenden Items inhaltlich auch zwei Kategorien zugeordnet werden. Die Markierungen am linken Rand des Balkendiagramms kennzeichnen die Stärke des statistischen Unterschieds (*, **, *** entsprechen jeweils $p < 0.05, 0.01, 0.001$)

VR-Bewertung

Immersion Die einzelnen Aspekte des Fragebogens zur Bewertung von Immersion sind in Abbildung 22 abgebildet. Nur beim Item 1 war ein Trend für einen statistischen Unterschied zwischen den GUI-Typen feststellbar. Insgesamt zeigten sich jedoch keine Unterschiede zwischen den GUI-Typen.

Vier Frage-Items (1, 2, 5 und insbesondere 10) stechen in ihrer Antworttendenz inhaltlich heraus. Bei diesen Items lag mindestens für einen GUI-Typen (i.d.R. für die originale GUI-Version) die Bewertung unterhalb des Skalenmittels. Damit ist bei diesen Inhalten nicht oder nur von einer geringen immersiven Wirkung auszugehen. Die Antworten auf Frage 10 („In welchem Maße fühlten Sie sich am Anfang, in den Pausen und am Ende des Experiments verwirrt oder orientierungslos?“) sind besonders niedrig. Wir gehen jedoch davon aus, dass die Frage von unseren Probanden Missverstanden wurde. Vermutlich wurde dies so interpretiert, dass nach einer in und durch die VR-Umgebung erzeugten Verwirrung gefragt wurde, tatsächlich soll mit der Frage inhaltlich erfasst werden, wie sehr der Wechsel zwischen Virtuellem und Realem zu einer kurzen Desorientierung führt, vergleichbar zum Erleben das man hat, wenn man aus einem Traum aufwacht und eine kurze Zeit benötigt, um sich zu orientieren.

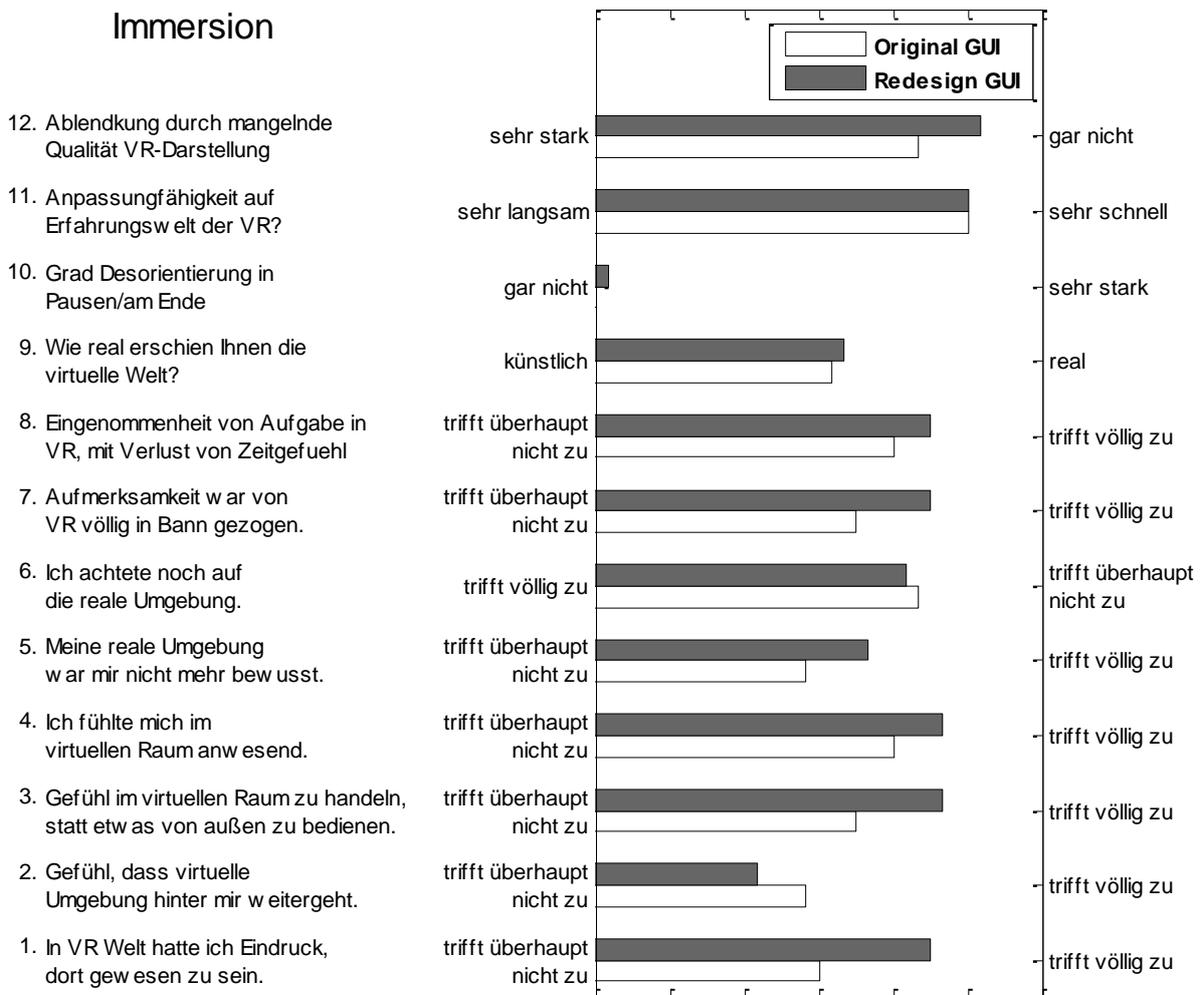


Abbildung 22. Ergebnisse des Fragebogens zur VR-Bewertung mit immersions-spezifischen Inhalten in Abhängigkeit von der GUI-Nutzung. Die rechte Seite der Skala indiziert ein höheres Ausmaß an Immersion.

Insgesamt, zeigen die Fragen zur Immersion, dass sich die Probanden durchaus in die Simulation und die Aufgabe herein versetzt fühlten. Der Wert des Fragebogens bemisst sich vor allem daran, dass in Folgestudien die Weiterentwicklung und Verbesserung des Simulators anhand der Veränderung der Immersionswerte evaluiert werden kann. Auch spezifische Verbesserungsmaßnahmen können zum Teil abgeleitet werden. So deuten die Bewertungen für Frage 2 darauf hin, dass ein realerer Kabinenaufbau die immersive Funktion unterstützen könnte.

Kontrollierbarkeit/Steuerbarkeit Auch hinsichtlich der Items zur Kontrollierbarkeit der Simulation zeigten sich keine Unterschiede zwischen den GUI-Typen. Wie in Abbildung 23 zu erkennen, wurden für alle vier Fragen positive Bewertung der Steuerbarkeit und Interaktion mit der VR-Umgebung abgegeben. Bei genauerer Betrachtung der Ratings einzelner Skalen waren nur für 2 Probanden und nur bei Item 3 Hinweise auf Schwierigkeiten hinsichtlich der Steuerbarkeit zu finden. Diese könnten aber möglicherweise mit geringerer Erfahrung mit virtuellen Umgebungen bzw. der Steuerung „träger technischer Systeme“ – wie es der Schaufelradbagger darstellt - zu tun haben.

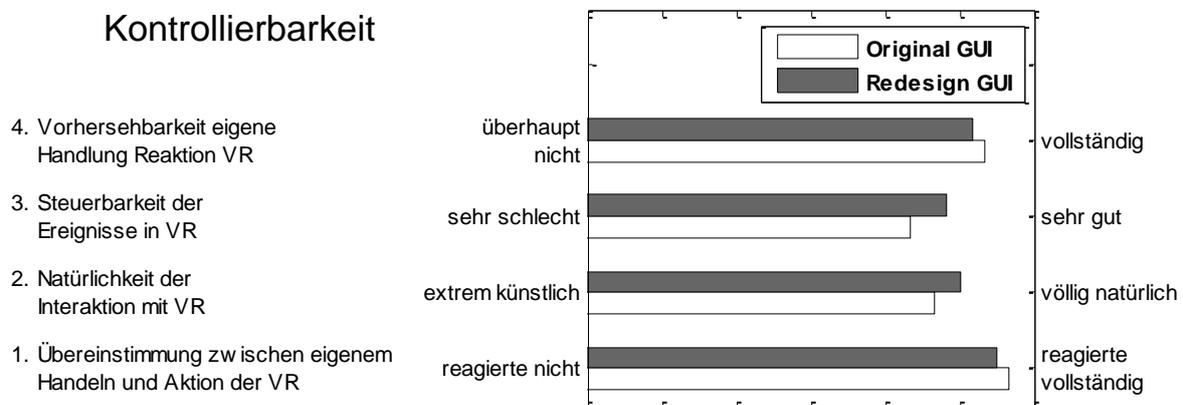


Abbildung 23. Antworttendenzen der Items zu Kontrollierbarkeit und Steuerbarkeit VR-Simulation in Abhängigkeit von der GUI-Nutzung. Die rechte Seite der Skala steht für eine größere wahrgenommene Kontrollierbarkeit.

Perzeptuelle Umsetzung In Abbildung 24 sind die Bewertungen hinsichtlich der Umsetzung bestimmter perzeptueller Merkmale der VR-Umgebung dargestellt. Insgesamt zeigte die statistische Analyse zwischen den GUI-Typen einen insgesamt schwachen Trend für eine bessere Bewertung der perzeptuellen Merkmale, wenn die VR-Simulation beim ersten Untersuchungstermin mit der neugestalteten GUI durchgeführt wurde, $t(10) = 2.21, p = 0.052$. Am deutlichsten war dieser Trend bei Item 1. Mit neuer GUI wurde der Realitätsgrad der VR-Umgebung als signifikant besser eingeschätzt als ohne.

Dies stellt ein eher unerwartetes Ergebnis dar, da ja die eigentliche Umsetzung der VR unter beiden Bedingungen gleich und nur die verwendeten GUI-Versionen unterschiedlich waren. Eine mögliche Erklärung könnte eine unterschiedliche Wirkung der GUI-Typen auf die Aufmerksamkeit des Benutzers darstellen. So könnte die neue GUI mehr Aufmerksamkeit auf sich gezogen haben, sodass der Rest der Umgebung ausblendet wurde. Weiterhin ist es möglich, dass eine positivere Einstellung gegenüber der visuellen Umsetzung der neuen GUI zu einer positiveren Einstellung bei anderen Merkmalen der VR führte, allerdings hätte sich dies dann auch in den anderen Kategorien des Fragebogens deutlicher umschlagen sollen.

Perzeptuelle Umsetzung

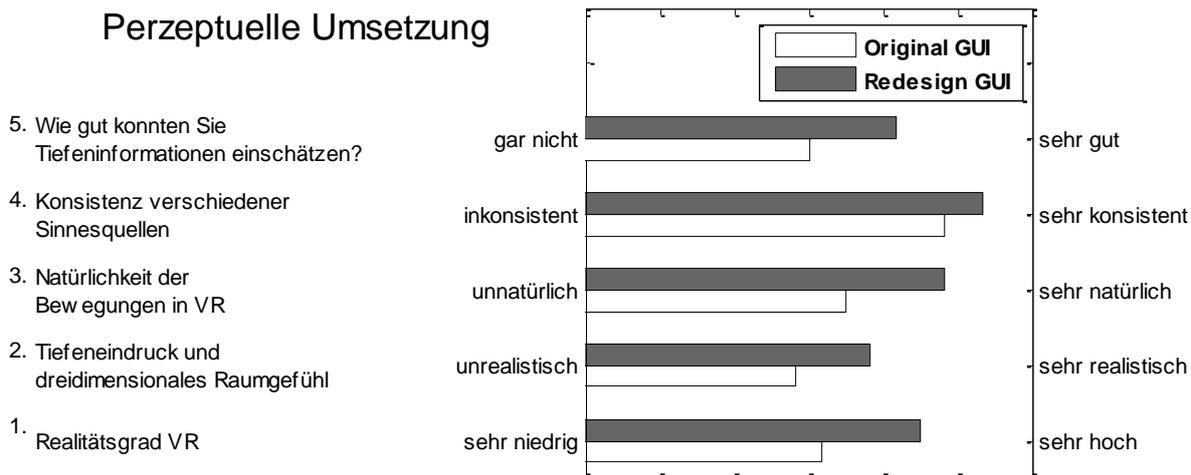


Abbildung 24. Antworttendenzen der Items zur Umsetzung bestimmter perzeptueller Merkmale in der VR-Simulation in Abhängigkeit von der GUI-Nutzung. Die rechte Seite der Skala steht für eine bessere/realistischere Einschätzung des jeweiligen Merkmals.

Subjektive Bewertung der Bedeutung einzelner Information für die Arbeitsaufgabe In einem weiteren Teil des Fragebogens zur VR-Bewertung wurde von den Probanden erfragt, welche Informationen für die Durchführung der Aufgabe am relevantesten waren. Gefragt wurde nach Bedeutung von 3D-Tiefeninformationen generell, Informationen aus der Umgebung (Flöz, Kabine, Schaufelrad), dem Informationsdisplay (GUI), der Kameraansicht und dem Tiefenindikator. Die Antworttendenzen zu diesen Items sind in Abbildung 25 dargestellt. Nur bei Item 5 war ein signifikanter Unterschied zwischen den GUI-Version feststellbar. Beim Arbeiten mit der originalen GUI, wurde die Information des Tiefenindikators als wichtiger eingeschätzt. Wenig überraschend, wurden vor allem die Informationen der GUI (Item 3) als „sehr wichtig“ eingeschätzt. Darüber hinaus, gaben die Probanden aber auch an, dass 3D-Tiefeninformationen (Item 1) wichtig seien. Am wenigsten wichtig schien den Probanden die Darstellung der Schaufelradrückansicht. Zusammen mit Item 2 war dies jedoch auch das Rating, bei dem die Urteile zwischen den Probanden am deutlichsten streuten. Dies deutet darauf hin, dass einzelne Informationen von den Teilnehmern auch unterschiedlich für die Aufgabebearbeitung verwendet wurden.

Bedeutung Informationen

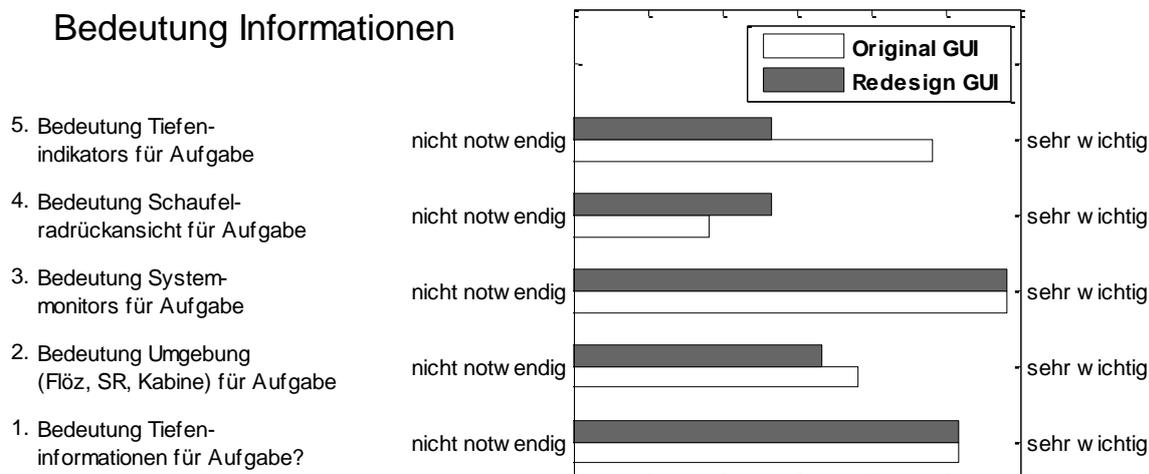


Abbildung 25. Subjektive Bedeutung einzelner Informationen für die Aufgabendurchführung in Abhängigkeit von der GUI-Version.

Aufgabenbewertung und Rückmeldung zur Trainingssession Schließlich wurde mit zwei Items erfasst, wie gut die Probanden mit der Aufgabe generell zurechtkamen¹, und mit weiteren 6 Fragen, inwiefern im Training alle relevanten Informationen vermittelt wurden². Die Probanden gaben an, dass Sie die Bedienung der Simulation als überwiegend einfach empfanden und dass sie sich am Ende der Untersuchung überwiegend sicher im Umgang mit dem Schaufelradsimulator fühlten. Das Training wurde von allen Probanden sowohl unter zeitlichen als auch inhaltlichen Aspekte als ausreichend bewertet, um ein Verständnis für Situation, Prozess und Bedienung zu erlangen. Es gab keine GUI-bedingten Unterschiede für die Bewertung der Aufgabe und des Trainings. Letzteres spricht dafür, dass alle Teilnehmer eine annähernd gleiche Ausgangsbedingung für die Durchführung der Aufgabe hatten.

3.3.2. Verhaltensdaten

Förderleistung

Die Differenz zwischen aktuellen Förderleistung (Ist) und Fördervorgabe (Soll) wurde wie in 3.2.7 beschrieben gefiltert und aggregiert. Die Auswertung berücksichtigt dabei folgende Faktoren: *Fördervorgabe* (niedrig/hoch), *GUI-Typ* (original/redesign) und *Nebenaufgabe* (ohne/mit). Als inferenzstatistisches Verfahren wurde eine multifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt.

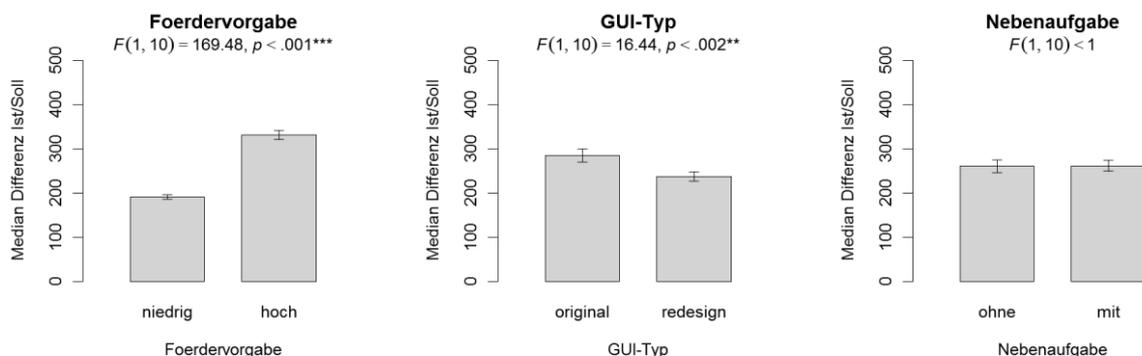


Abbildung 26: Förderleistungsgüte als mittleren Ist/Soll-Differenz in Abhängigkeit von Fördervorgabe, GUI-Typ und Nebenaufgabe.

Erwartungsgemäß ergab sich ein hoch signifikanter Unterschied zwischen niedriger und hoher Vorgabe bzgl. der Abweichung von der Fördervorgabe. Eine hohe Vorgabe ist demnach schwieriger einzuhalten und führt zu größeren Abweichungen als eine niedrige. Ebenso führte das Arbeiten mit der neuartigen GUI zu einer geringeren Differenz, als das Arbeiten mit der originalen GUI. Die Gestaltung der Informationsaufbereitung trägt also statistisch gesichert zu einem besseren Einhalten

¹ 1. Als wie schwierig würden Sie die Bedienung und Steuerung der Schaufelradbaggersimulation bewerten?;
² 2. Wie geübt im Umgang mit dem virtuellen Schaufelradsimulator fühlten sie sich am Ende der Untersuchung?
² 1. Das Training war inhaltlich und zeitlich ausreichend, um ein Verständnis der Funktion des Schaufelradsimulators aufzubauen; 2. Das Training war inhaltlich und zeitlich ausreichend, um ein Verständnis für die Aufgabe und Situation eines Geräteführers im Schaufelradbagger zu entwickeln; 3. Nach dem Training waren mir die Funktionen der Bedienelemente (Steuerknüppel, Regler, etc.) klar; 4. Nach dem Training hatte ich das Gefühl, die Schaufelradsimulation steuern zu können; 5. Nach dem Training wusste ich, was meine Aufgabe in der Simulationsumgebung war und wie ich diese umsetzen konnte; 6. Nach dem Training wusste ich, welche Anzeigenelemente mir wichtige Informationen zum Prozess und meiner Aufgabe liefern.

der Vorgabe bei. Kein Unterschied konnte hingegen zwischen den Versuchsdurchgängen mit und ohne Nebenaufgabe gezeigt werden. Erwartungsgemäß hätte das Hinzunehmen der Nebenaufgabe zu einer Verschlechterung der Leistung führen sollen, da dessen Ausführung einen erhöhten Aufwand mentaler Ressourcen mit sich bringt und so kognitive Kosten bei der Bearbeitung der Hauptaufgabe verursacht. Eine naheliegende Erklärung für das Fehlen dieses Befunds liefern möglicherweise Reihenfolgeeffekte im Versuchsdesign. Da die Nebenaufgabe immer erst in Versuchsdurchgang 3 und 4 auszuführen war, könnte es zu Lerneffekten gekommen sein, die eine Verschlechterung in der Förderleistung überlagert haben.

Die Interaktionseffekte bzgl. der Förderleistungsgüte sind in Abbildung 27 dargestellt. Nur für die Wechselwirkung zwischen Fördervorgabe und GUI-Typ zeigte sich ein tendenzieller Einfluss; ein positiver Einfluss der neuen GUI-Variante scheint insbesondere bei hoher Fördervorgabe einzutreten, während bei niedriger Vorgabe kaum ein Unterschied auszumachen ist.

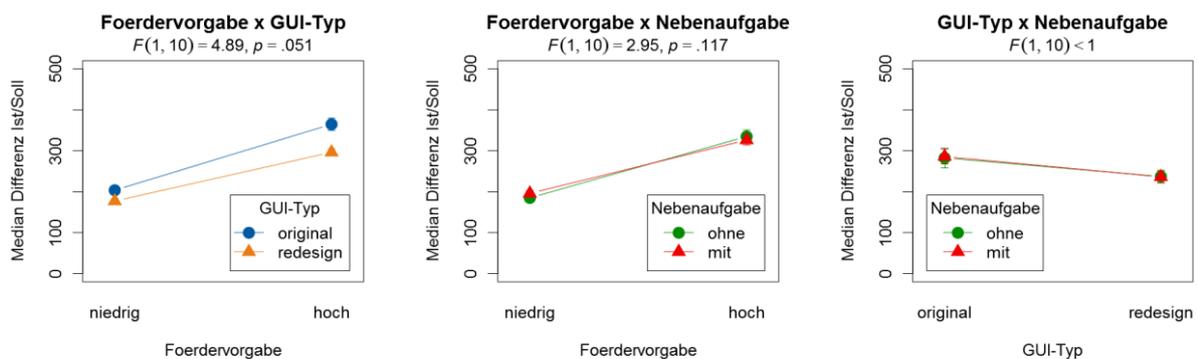


Abbildung 27: Interaktionseffekte zwischen Fördervorgabe, GUI-Typ und Nebenaufgabe hinsichtlich der Förderleistungsgüte (mittleren Ist/Soll-Differenz).

Die Ergebnisse des Parameters Standardabweichung der Differenz zur Fördervorgabe (vgl. Abschnitt 3.2.7) weisen auf allen Faktoren sehr ähnliche Ausprägungen aus. Sie unterstreichen damit die hier aufgezeigten Befund, wurden aber aufgrund dieser Redundanz aus der Ergebnisdarstellung ausgespart.

Überlast

Abbildung 28 zeigt die durchschnittliche Anzahl von Überlastfällen in Abhängigkeit von Fördervorgabe, GUI-Typ und Nebenaufgabe. Deutliche statistische Unterschiede finden sich in Abhängigkeit von der Fördervorgabe: bei niedrigen Anforderungen kam es fast nie zu Überlastfällen, bei hoher Vorgabe hingegen wurden nahezu zwei pro Versuchsdurchgang beobachtet. Der Unterschied zwischen den GUI-Typen war ebenfalls statistisch bedeutsam; bei der Arbeit mit der neu gestalteten Display-Variante wurden signifikant weniger Überlastfehler gemacht, als mit der originalen GUI. Die Präsenz der Nebenaufgabe hatte keinen Einfluss. Unerwartet hierbei jedoch war, dass ein Trend zu weniger Überlastfällen bei Präsenz der Nebenaufgabe bestand. Eine Erklärung hierfür könnten Lerneffekte darstellen, da die Bedingung ohne Nebenaufgabe immer zuerst durchgeführt werden musste. Signifikante Interaktionen (Abbildung 29) traten bei dieser Analyse nicht auf.

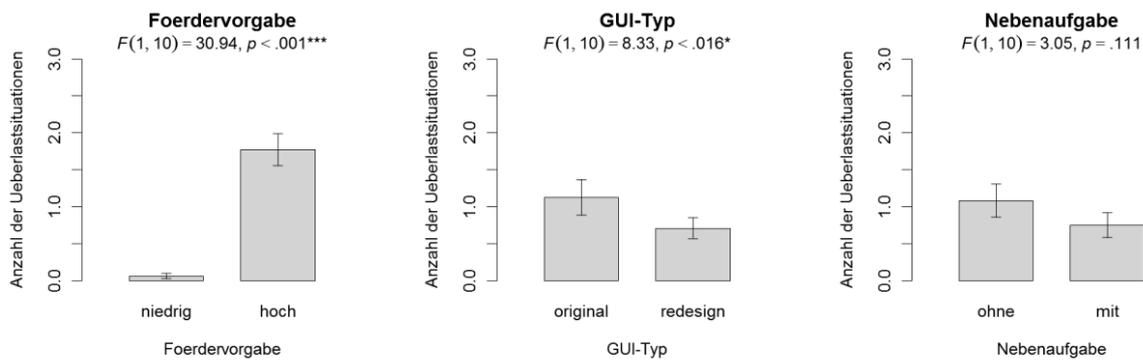


Abbildung 28: Haupteffekte der Anzahl von Überlasten als Funktion von Vorgabe, GUI-Typ und Präsenz der Nebenaufgabe

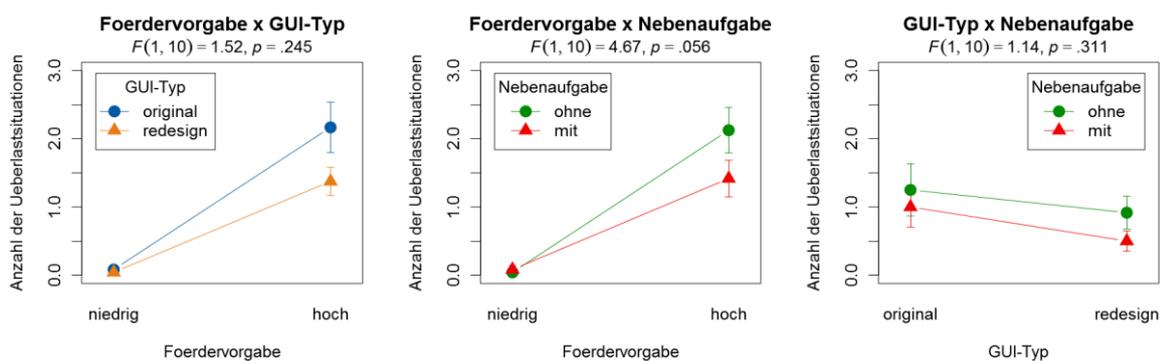


Abbildung 29: Interaktionen bzgl. der Anzahl von Überlasten im Förderprozess

3.3.3. Nebenaufgabe

Sensitivität

Zur Bewertung der Leistung in der Nebenaufgabe wurde das sogenannte Sensitivitätsmaß d' aus der Differenz der z-transformierten relativen Häufigkeiten von Treffern und falschen Alarmen gemäß $d' = z(\text{Treffer}) - z(\text{falscher Alarm})$ berechnet. Ein Sensitivitätsmaß von null würde demnach ein zufälliges Reagieren ungeachtet der Identität (Dreieck bzw. Kreis) eines Zielreizes bedeuten. Die Skala ist nach oben hin offen, Werte > 1 werden aber allgemein hin als gute, Werte > 2 als sehr gute diagnostische Leistung angesehen. Haupteffekte der multifaktoriellen Varianzanalyse sind in Abbildung 30 dargestellt.

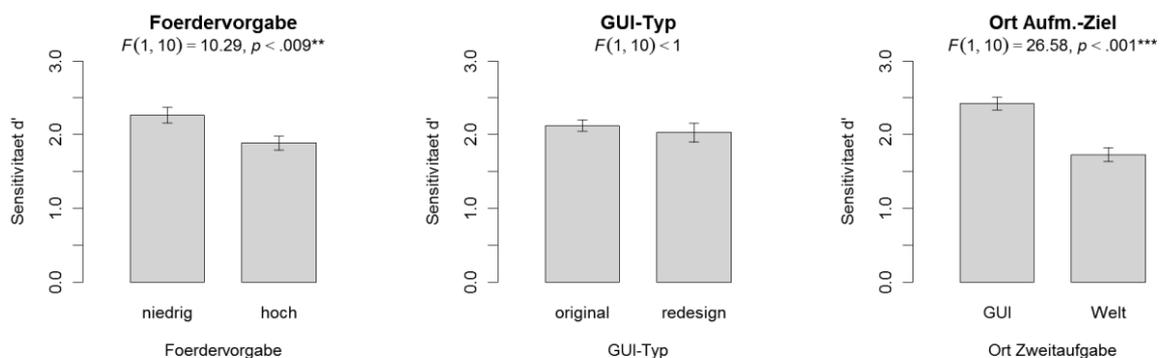


Abbildung 30: Leistung in der Nebenaufgabe (Sensitivitätsmaßes d') in Abhängigkeit von Fördervorgabe, GUI-Typ und Ort der Aufmerksamkeitsziele.

Das Fördern mit hoher Vorgabe führte zu Kosten bei der Entdeckungsgüte von Symbolen in der Nebenaufgabe. Demnach werden hier kognitive Ressourcen gebunden, die sonst zum aufmerksamen Erfassen der Umwelt beitragen. Außerdem war es für die Teilnehmer leichter, Symbole der Nebenaufgabe auf der GUI selbst zu entdecken, als wenn diese in der (simulierten) Außenwelt erschienen. Die Entdeckungsleistung der Probanden hing nicht vom verwendeten GUI-Typen ab.

Es zeigte sich weiterhin, dass der Abfall der Sensitivität bei hoher Förderleistung für beide GUI-Typen etwa gleich war. Signifikante Interaktionen ergaben sich jedoch zwischen dem Ort der Aufmerksamkeitsziele und der Fördervorgabe (siehe Abbildung 31). So führte eine hohe Fördervorgabe zu einem Abfall der Sensitivität vor allem, wenn die Aufmerksamkeitsziele auf der GUI erschienen, in der Außenwelt blieb die Erkennungsrate annähernd gleich. Noch interessanter ist jedoch die Interaktion zwischen GUI-Typ und Ort der Aufmerksamkeit; Symbole direkt auf der GUI-Oberfläche wurden zwar mit der neuen (im Vergleich zur originalen) Gestaltungsvariante besser, in der Außenwelt jedoch signifikant schlechter wahrgenommen. Das bedeutet, dass das neue GUI-Design im Arbeitsprozess mehr Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen scheint. Die positive Wirkung (bessere Erkennung Zielreize auf GUI und genauere Förderleistung) werden jedoch u.U. mit negativen Konsequenzen für die Informationsaufnahme aus der Umwelt erkaufte. Eine weitere mögliche Erklärung für diesen Befund stellt eine spezifische Sichtfeldeinschränkung durch Tragen des Eye-Trackers dar, die sich bei der neu gestalteten GUI stärker auswirkte als bei der originalen wodurch Symbole in der simulierten Außenwelt teilweise verdeckt waren. Zur Klärung dieses

Befundes wurde eine zusätzliche Testreihe durchgeführt. Ergebnisse dieser Kontrolluntersuchung sind in Abschnitt 3.5 zu finden.

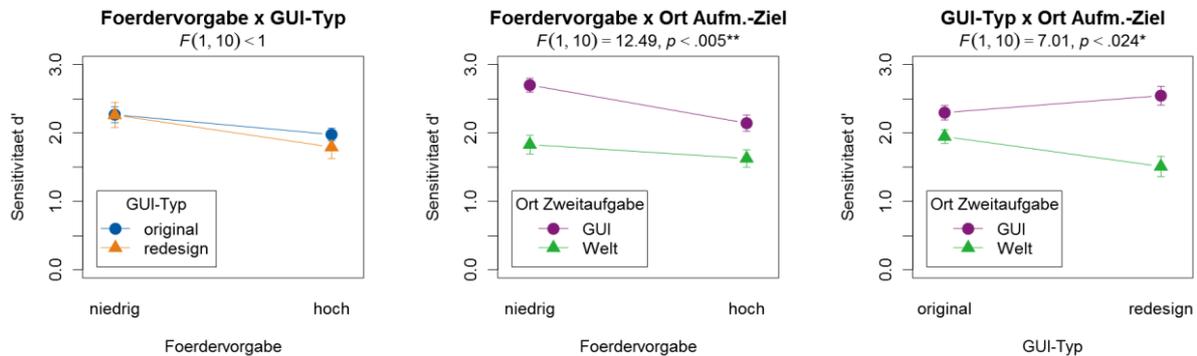


Abbildung 31: Darstellung der Interaktionseffekte zwischen Fördervorgabe, GUI-Typ und Ort der Aufmerksamkeitsziele für das Sensitivitätsmaßes d' .

Reaktionsgeschwindigkeit

Die Reaktionsgeschwindigkeit beschreibt die Dauer zwischen Erscheinen eines Zielreizes und dem Fußtasterdruck des Probanden. Im Mittel über die gesamte Versuchsreihe betrug sie 1.27 Sekunden (SD = 0.20). Die statistische Auswertung erfolgte in Analogie zu den oben beschriebenen Analysen zur Sensitivität. Bis auf eine Ausnahme fanden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen. Nur der Ort der Zielvergabe war für die Reaktionszeiten von Bedeutung. Symbole auf der GUI wurden durchschnittlich 142 Millisekunden früher entdeckt, als wenn diese in der Welt erschienen, $F = 24.93, p < 0.001$. Im Zusammenhang mit den Blickbewegungsanalysen (vgl. Abschnitt 3.3.4) lässt sich dieser Befund darauf zurückführen, dass die Versuchspersonen häufiger auf der GUI fixierten und deshalb dort schneller auf plötzliche Veränderungen reagieren konnten.

3.3.4. Blickbewegungsdaten

Relative Blickhäufigkeiten

Für diese Analyse wurden zunächst die zuvor ermittelten Regions-Of-Interest (vgl. Kapitel 3.2.7 - Blickbewegung) soweit zusammengefasst, dass nur zwischen den Blickorten *Welt* (simulierte Weltsicht des Simulators einschl. Tiefenanzeige), *GUI* (alle Anzeigen einschl. Kamerabild) und *Kabine* (Steuerelemente, Interieur bzw. Restkategorie) unterteilt wird. Die Blickverweildauern auf der ROI Kabine waren insgesamt sehr gering, daher kann man davon ausgehen, dass sich die Regionen Welt und GUI nahezu zu 100% ergänzen. Die Darstellung der Ergebnisse bleibt daher auf die Region GUI beschränkt (die Analysen zur Region Welt sind in weiten Teilen redundant).

Abbildung 32 zeigt, dass die Verweildauer auf der GUI (und im Umkehrschluss damit auch auf der simulierten Weltsicht) ungeachtet von GUI-Typ, der Präsenz der Nebenaufgabe und Vorgabemenge stabil bei ca. 60% bleibt. Weiterhin gab es keine Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren des Versuchsplans.

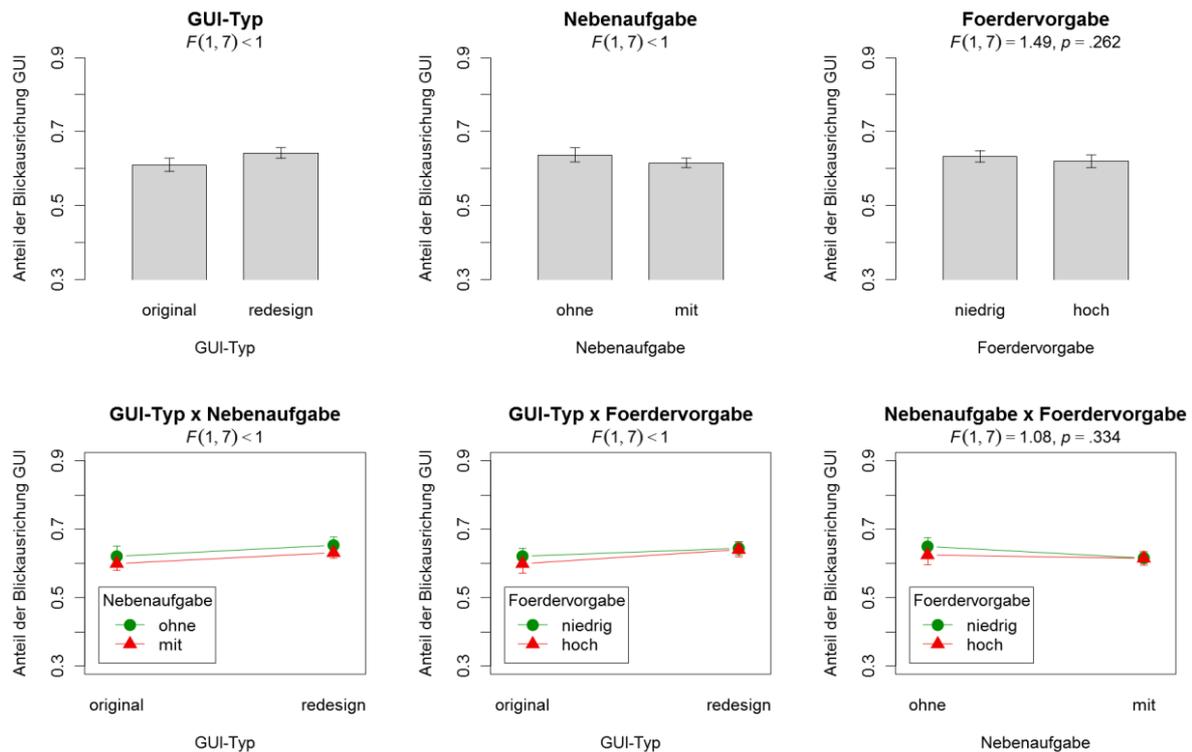


Abbildung 32: Relative Blickdauer auf der GUI-Region als Funktion von GUI-Typ, Nebenaufgabe und Fördervorgabe sowie deren Interaktionen.

Um visuelle Erfordernisse zu verschiedenen Phasen im Förderprozess gegenüberstellen zu können, wurde die Schwenkrichtung (mit den vier Stufen Schwenkwechsel linksseitig *R2L*, Schwenk nach rechts *R*, Schwenk nach links *L* und Schwenkwechsel rechtsseitig *L2R*) als zusätzlicher Faktor in das Modell aufgenommen. Die Daten wurden wieder mittels einer multifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt.

Insgesamt ist der Hauptblickfokus der Probanden stark abhängig vom jeweilig gefahrenen Subprozess der Fördertätigkeit. So liegt das Augenmerk beim direkten Fördern (Faktorstufen *L* und *R*) zu ca. 75 % auf der GUI, während beim Schwenkwechsel bzw. Vorsetzen der Maschine der Fokus eher auf der Umwelt liegt. Das gilt insbesondere für Schwenkwechsel linksseitig vom Kohleflöz.

Eine detailreichere Betrachtung liefern die Interaktionseffekte der Schwenkrichtung mit den anderen Faktoren. Die Interaktion mit dem GUI-Typen zeigt, dass die Blickausrichtung nahezu unabhängig vom verwendeten Display ist, lediglich beim Schwenkwechsel von rechts nach links gibt es einen signifikanten Unterschied. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass beim Einfahren in den Flöz die Kameraansicht von großer Bedeutung ist und die Position bei der neuen GUI-Variante deutlich zugänglicher gestaltet ist, so dass ein Blickwechsel zwischen Umwelt und Kamerabild mit weniger Kosten verbunden ist. Die gefundenen Unterschiede in den Performanzparametern Förderleistung und Überlastfehler (vgl. 3.3.2) lassen sich somit nicht damit begründen, dass die Neugestaltung der GUI slicht öfter betrachtet wurde (z.B. aufgrund der zentralen Anbringung). Stattdessen muss man in Zusammenschau mit den vorliegenden Blickbewegungsdaten davon ausgehen, dass allein die Aufbereitung der Informationen für die Verbesserungen in den Probandenleistungen verantwortlich ist.

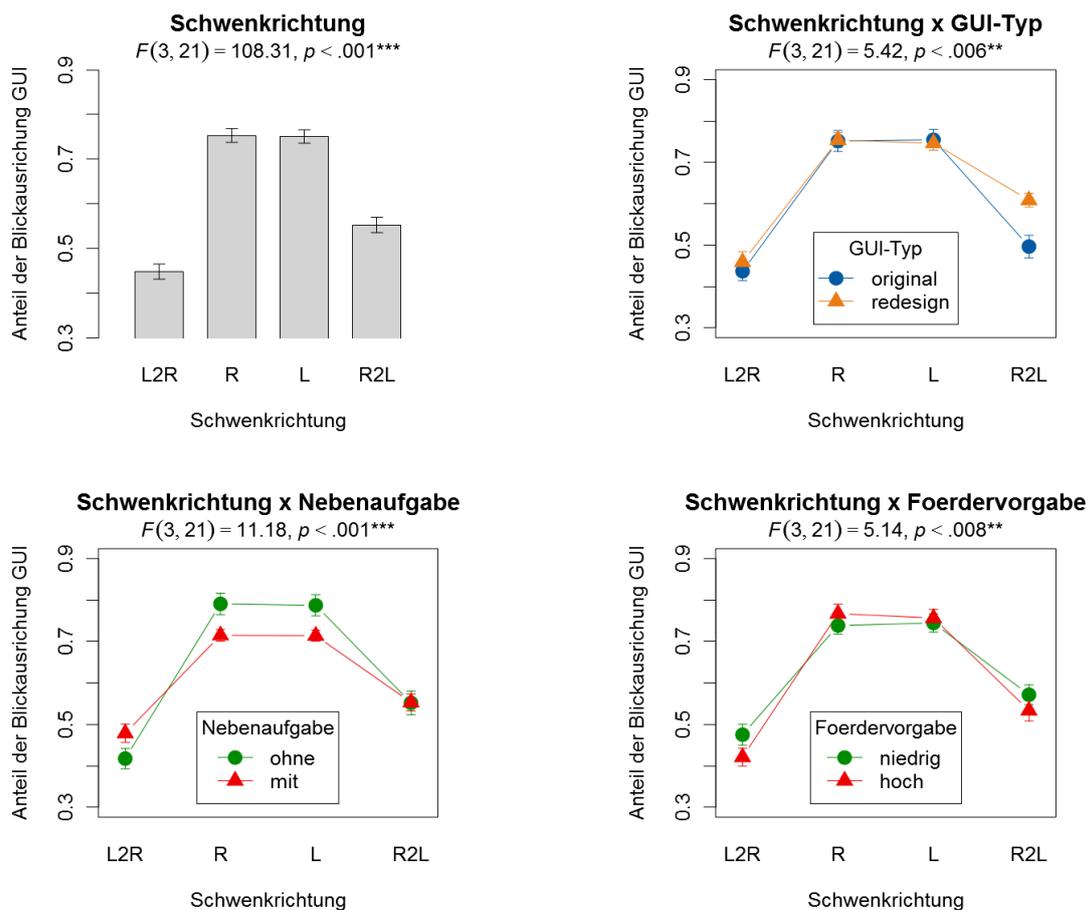


Abbildung 33: Relative Blickdauer auf der GUI-Region als Funktion von der Schwenkrichtung und die Interaktionen mit den anderen Faktoren.

Die Interaktion mit dem Faktor Nebenaufgabe zeigt deutlich, dass während der Schwenks die Aufmerksamkeit durch die Nebenaufgabe von der GUI auf die Weltsicht abgezogen wurde. Der Blick wurde in diesen Phasen ca. 10% mehr Zeit auf die Außenwelt als potentieller Ort von Aufmerksamkeitssymbolen gerichtet. Beim Schwenkwechsel trifft das nicht zu. Hier zeigt sich kein Unterschied (R2L) oder sogar der gegensätzliche Befund.

Ein ähnlicher Effekt tritt beim der Wechselwirkung mit der Fördervorgabe auf. Bei hoher Fördervorgabe scheint das Neuausrichten des Tagebaugerätes von besonderer Wichtigkeit zu sein. Die Probanden schauen hier weniger auf die GUI (und somit mehr auf die Außenwelt), als bei niedriger Vorgabe. Bei Schwenks nach links gibt es keinen Unterschied. Bei Rechtsschwenks hingegen, wird bei hoher Fördervorgabe etwas mehr auf die GUI fokussiert. Ein Grund hierfür mag die Tatsache sein, dass beim Schwenken nach rechts, das Flözende nicht durch eine physische Kante vorgegeben ist, sondern aus dem Schwenkwinkel abgelesen werden muss, der auf der GUI dargestellt wird.

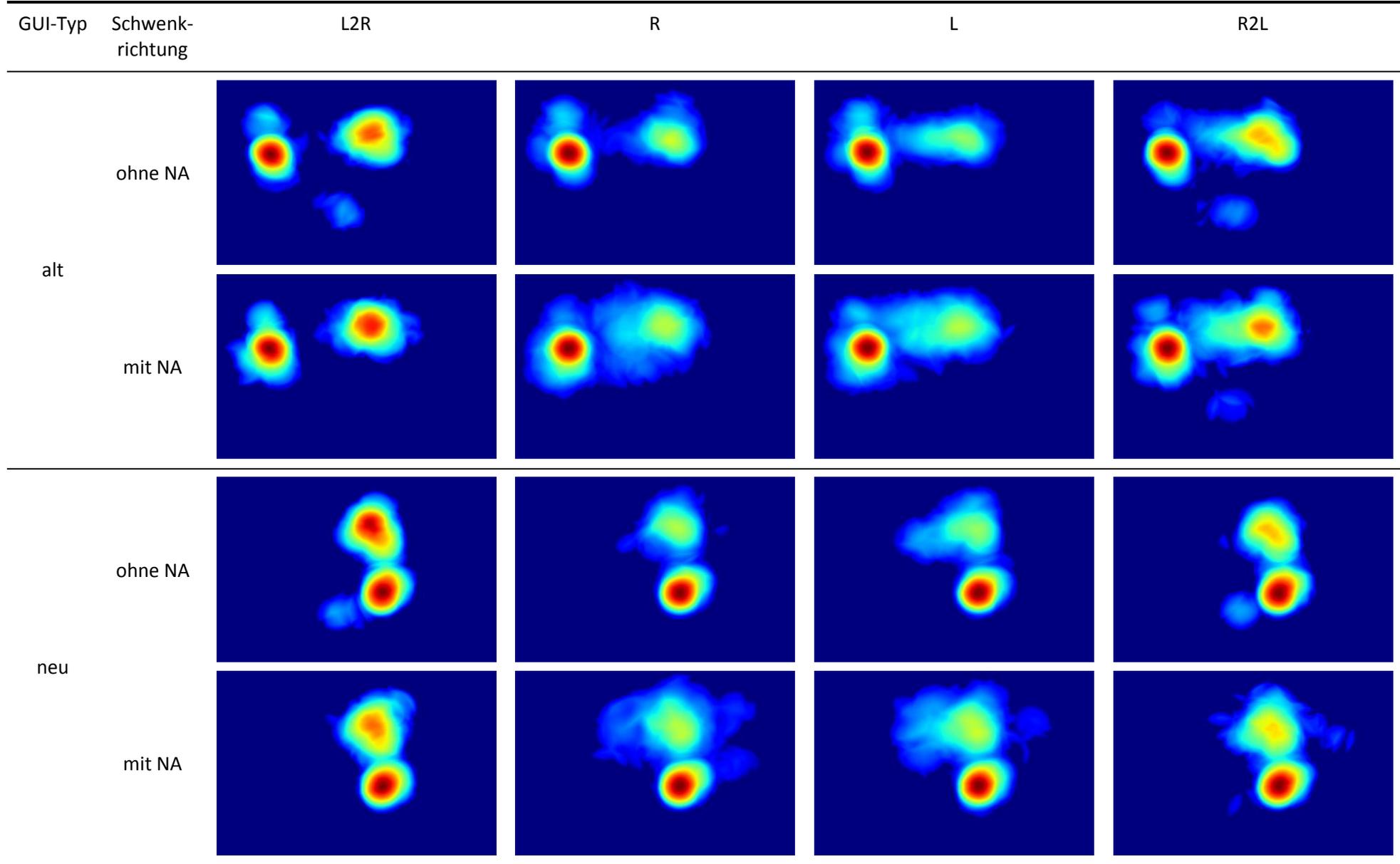
Fixation-Maps

Fixation-Maps [46] stellen eine Möglichkeit dar, die Verteilung von visueller Aufmerksamkeit in einem statischen Bild oder einer dynamischen Szenen zu illustrieren (vgl. Kapitel 3.2.7 - Blickbewegungsdaten). Die bereits vorklassifizierten Blickorte wurden bzgl. der Experimentalbedingungen gefiltert und aus den resultierenden Positionsdaten bzgl. des Referenzbildes konnten Fixation-Maps errechnet werden. In den entstandenen Abbildungen zeigte sich, dass der Fokus der Betrachter sehr stark auf die jeweilige Region der GUI konzentriert war. Um die Bedeutung und die Verteilung des Blicks auf anderen Regionen hervorzuheben, wurden die Fixationskarten mit der Funktion \sqrt{x} transformiert (dadurch werden wenig fixierte Bereich der Fixationsverteilungen besser sichtbar). Das Verfahren wurde für jeden Probanden in jeder Bedingungskombination wiederholt. Die resultierenden Karten wurden am Schluss über alle Probanden gemittelt (Median). Die so entstanden Aufmerksamkeitslandschaften spiegeln das durchschnittliche Blickverhalten der Versuchsteilnehmer als Funktion der jeweiligen Bedingungen wider. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Insgesamt lassen sich jeweils zwei Regionen erkennen, die bei der Arbeit in der VR-Umgebung vorzugsweise betrachtet wurden. Zum einen ist es die jeweilige GUI, welche entweder linksseitig oder mittig, etwas nach unten versetzt, angebracht war. Zum anderen ist es die Weltsicht des Simulators mit starkem Gewicht auf der Region um das Schaufelrad und die Tiefenanzeige. Innerhalb eines Schwenks (Faktorstufen L und R) wurde diese Region weniger häufig betrachtet als beim Schwenkwechsel (Faktorstufen L2R und R2L). Das unterstreicht die Analyse der Blickhäufigkeiten (s.o.). Es ergaben sich zudem Unterschiede in Abhängigkeit von der Präsenz der Nebenaufgabe. Mit Nebenaufgabe (2. und 4. Zeile) war die Blickausrichtung auf die Außenwelt deutlich breiter gefächert, was das Wahrnehmen der Symbole an zufälligen Positionen erst ermöglichte. Ohne die Nebenaufgabe hingegen war der Fokus enger auf Schaufelrad und Tiefenanzeige konzentriert.

Beim Schwenkwechsel wird die Außenwelt nahezu genauso stark frequentiert, wie die jeweilige GUI. Das gilt insbesondere für Schwenkwechsel auf der linken Seite (Faktorstufe L2R). Ebenso sind hier Blicke auf den linken Steuerhebel zu erkennen, wenngleich diese Art der Aufmerksamkeitszuwendung im Gesamtkontext nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt.

Tabelle 1: Fixation Maps als Ausdruck visueller Aufmerksamkeit in Abhängigkeit der Versuchsbedingungen



3.3.5. Prozessbewertung

Im Fokus der Prozessbewertung lässt sich nach Abbildung 34 ein Verlauf einer Grabbewegung eines Schaufelradbaggers zeigen. Es sind für einen Schwenkvorgang die Größen P_{GO} und b_R dargestellt sowie die Signale der Nebenaufgabe (GuiObj-Symbolanzeige Monitor, SichtObj-Symboanzeige Frontsicht, FussTaster-Betätigung Taster).

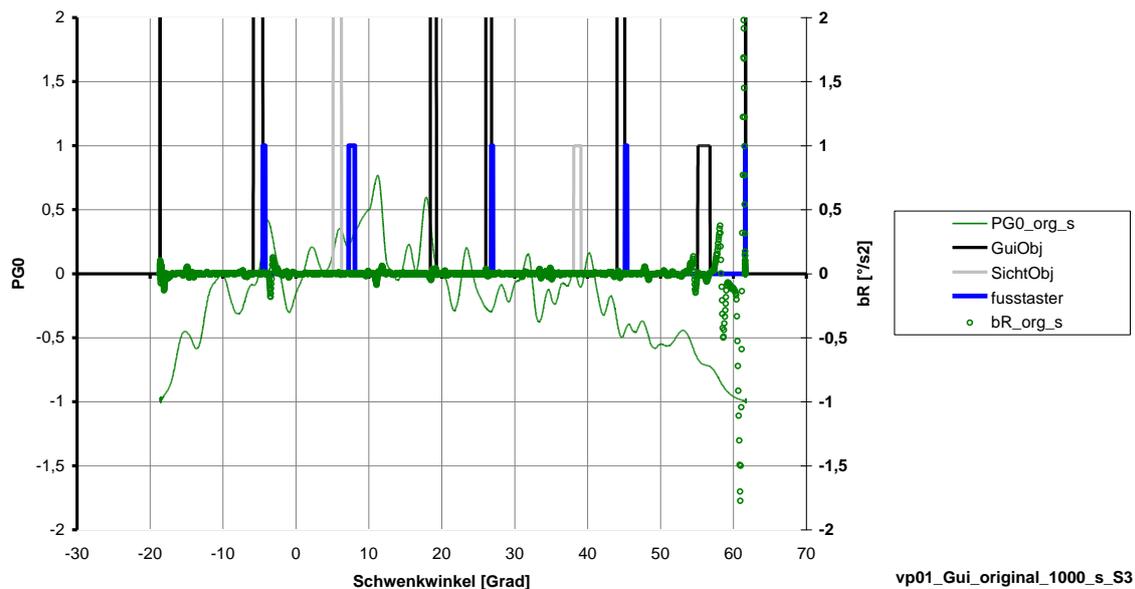


Abbildung 34: Verlauf der Größen P_{GO} und b_R über den Schwenkwinkel (Versuchsperson 1, Gui-Original, FL_Soll 1000 N, mit Nebenaufgabe, Schwenk 3 li-re)

In der Einzelbetrachtung lässt sich das Bedienverhalten in seiner direkten Wirkung auf den Grab-/Förderprozess ablesen. Auf Über- oder Unterschreitungen der Sollvorgabe folgen Korrekturregelungen. Die Zunahme der Reglerbetätigungen in den Grenzbereichen des Schwenks ist Folge der geometrisch bedingten Abnahme/Zunahme der Förderleistung durch Änderung der Grabtiefe auf Grund der Durchdringungsänderung des Schwenkkreises. Vor allem in der Schwenkumkehr rechts zeigt sich erst der Versuch, durch erhöhte Schwenkgeschwindigkeit den Förderverlust auf Grund des Austritts aus dem Bodenkontakt auszugleichen, gefolgt von der schnellen Abregelung, um nach einem kurzen Vorschub durch erneutes Beschleunigen einen schnellen Wiedereintritt zu erreichen.

Die Bewältigung der Nebenaufgabe ist ebenfalls gut erkennbar. Auf das wechselnde Erscheinen der Symbole entweder auf dem Monitor oder der Frontsicht wird in den meisten Fällen mit einer Tasterbetätigung reagiert.

Weitere Einflüsse ergeben sich in den Gegenüberstellungen der Abbildung 35.

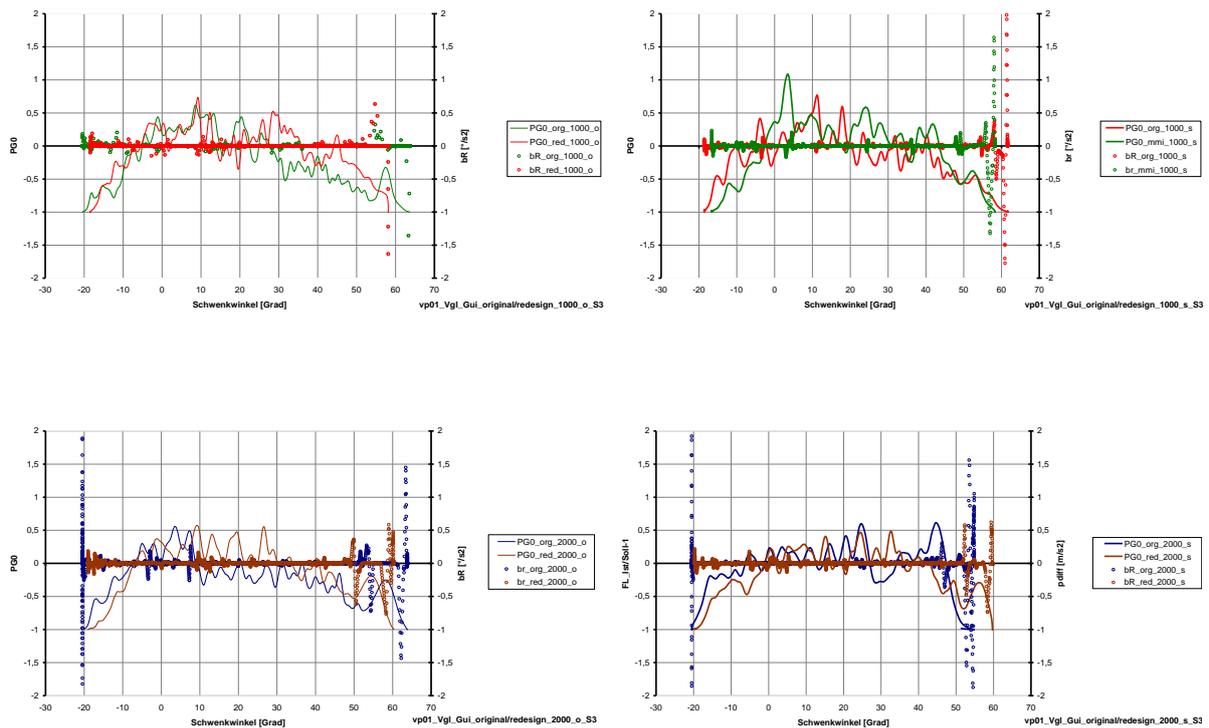


Abbildung 35: Verlauf der Größen PGO und bR über den Schwenkwinkel (Versuchsperson 1, Gui-Varianten, FL_Soll 1000/2000 N, ohne/mit Nebenaufgabe, Schwenk 3 li-re)

Diese Darstellungen eines Schwenkvorganges mit verschiedenen Parametern zeigen deutlich das aktuelle Bedienverhalten und die Reaktionen auf die veränderlichen Prozessbedingungen. Hier kann sehr gut z.B. eine Momentansituation beobachtet und analysiert werden. Für eine wertende Aussage ist es aber dienlicher, die Größen Prozessgenauigkeit PG und Bedienaktivität BA heranzuziehen.

Die Auswertung von PA und BA über die Fördervorgabe, den Gui-Typ und die Nebenaufgabe zeigen deutlich den tendenziellen Einfluss der Versuchsbedingungen. In Korrelation zu Abbildung 26 und zu den da getroffenen Feststellungen lassen sich folgende Einflüsse erkennen:

Einfluss Gui-Typ/Fördervorgabe

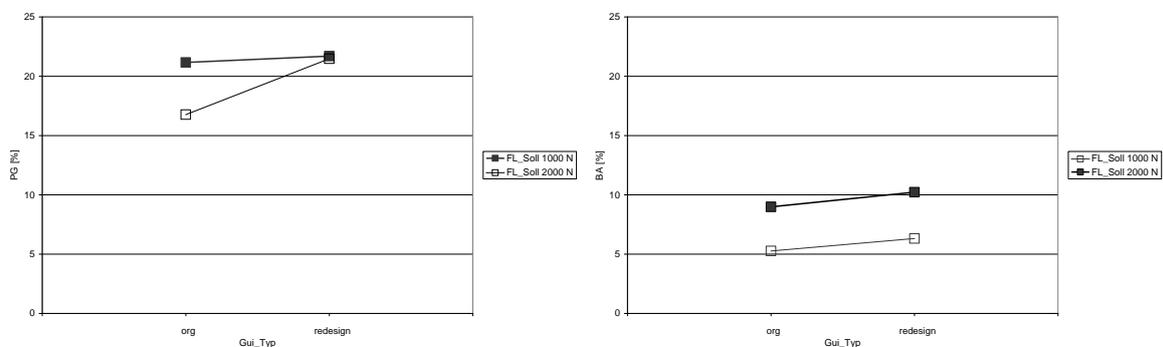


Abbildung 36: Prozessgenauigkeit PG und Bedienaktivität BA als Funktion des Gui-Typs und der Förderleistungsvorgabe FL_Soll [N]

Nach Abbildung 36 nimmt allgemein mit zunehmender Soll-Wertvorgabe die Fähigkeit, den Vorgabewert einzuhalten, ab. Das ergibt sich aus der technisch bedingt erschwerten sensitiven Steuerungsfähigkeit des Grabvorganges. Große Förderleistungen benötigen hinsichtlich Grabtiefe und Schwenkgeschwindigkeit extreme Werte, was auf Grund der maschinellen Trägheiten ein Übersteuern fördert. Die Überlastfälle nehmen zu. Der neue Anzeigetyp wird mit zunehmender Prozessaktivität immer wirksamer. Die Performance nimmt zu. Bei Problemen mit größerer Leistungsvorgabe sind so deutlich Verbesserungen erzielbar.

In der Bedienaktivität ist der erhöhte Regelaufwand mit Zunahme der Sollvorgabe abzulesen. Ebenfalls steigt die Bedienaktivität mit dem Gui-Typ redesign, was seine Ursache in einer genaueren Regelbarkeit hat, vom Bediener also intensiver und effizienter gearbeitet werden kann.

Einfluss Gui-Typ/Nebenaufgabe

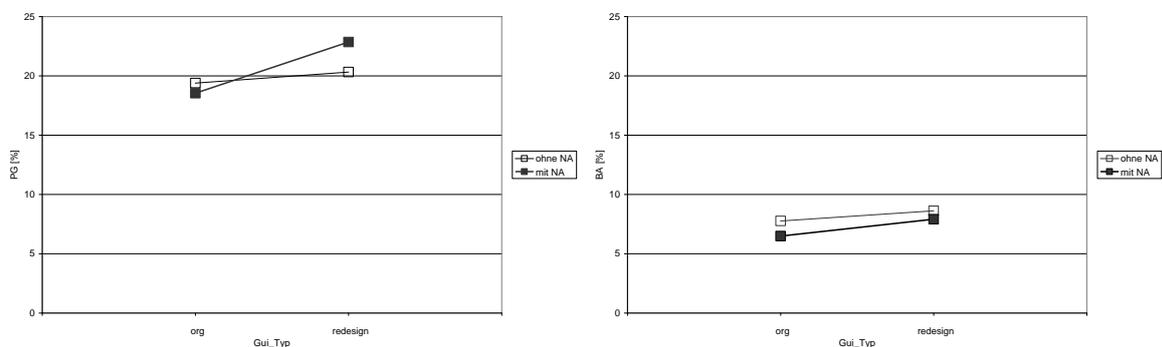


Abbildung 37: Prozessgenauigkeit PG und Bedienaktivität BA als Funktion des Gui-Typs und der Nebenaufgabe

Die Nebenaufgabe sorgt mit Verwendung des Original-Gui-Typs für mehr Störungen, die Prozessstabilität nimmt ab. Das erklärt sich aus der Sichttrennung. Allerdings ist der Effekt gering. Mit der neuen Gui-Version ist sogar eine Erhöhung der Prozessgenauigkeit bei Auftreten der Nebenaufgabe zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung dazu wurde bereits mit Lerneffekten gegeben, da die Nebenaufgabe nie zuerst ausgeführt wurde. Das zeigt sich auch in den Bedienaktivitäten. In beiden Gui-Versionen sind die Regeltätigkeiten deshalb ohne Nebenaufgabe höher.

3.4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Untersuchung

Die Ziele der Untersuchungen bestanden in:

- dem Test der Funktionsfähigkeit und der Anwendungsmöglichkeiten einer VR-Simulation
- der Ermittlung des Einflusses verschiedener Versuchsparameter auf die Bedienhandlungen und das Prozessverhalten
- einer genauen Analyse zweier verschiedener Versionen der Mensch-Maschine-Schnittstelle (IST-Zustand vs. Redesign)
- dem Test von Eye-Tracking und statistischer Methoden für das Bedienerverhalten

in einer modellierten Bedienumgebung eines Schaufelradbaggers. Es wurden verschiedene Erhebungs- und Messverfahren angewandt, die es ermöglichen und Unterschiede auf verschiedenen

Ebenen des Verhaltens und des subjektiven Empfindens aufzudecken. Die Versuchseinrichtung (VR-Umgebung, Bedienstand, Messtechnik) war gleichzeitig Entwicklungsziel und Werkzeug der Untersuchungen.

Auf Ebene des subjektiven Empfindens wurden Müdigkeit (SSS), aktuelle Beanspruchung (KAB) und erlebte Aufgabenschwierigkeit (NASA-TLX) mittels Fragebogen gemessen. Innerhalb der Untersuchungssessions zeigte sich ein signifikanter Anstieg von für Müdigkeit und aktueller Beanspruchung über die Zeit jedoch keine Unterschiede zwischen den GUI-Versionen. Hinsichtlich der Aufgabenschwierigkeit waren die Befunde genau anders herum, es zeigte sich keine Änderung über die Zeit, dafür jedoch ein Unterschied zwischen den GUI-Versionen; mit dem GUI-Redesign wurde die Erledigung der Aufgabe als einfacher empfunden als mit der Original-GUI. Letzteres bedeutet, dass die vorgenommenen Veränderungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu einer subjektiv wahrgenommenen Erleichterung der Ausführung der Arbeitsaufgabe führten. Bedenkt man, dass die Arbeitsschicht eines Maschinenführers deutlich länger dauert (ca. 8 Stunden) als unsere Untersuchung (ca. 1 Stunde), könnte man vermuten, dass eine solche Arbeitserleichterung über eine längere Zeitdauer auch mit einer insgesamt geringeren Belastung und Ermüdung einhergehen sollte.

Ein weiterer deutlicher Hinweis für eine Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle durch die neu gestaltete GUI zeigte sich in den Angaben des Fragebogens zur Gebrauchstauglichkeit (Usability). Bei fast allen Items des Fragebogens bewerteten die Probanden das GUI-Redesign positiver. Informationen wurden als besser erkennbar und verständlicher aufbereitet empfunden. Weiterhin empfanden die Probanden die Darstellung auf der neuen GUI als weniger komplex und besser strukturiert, sie wirkte weniger ablenkend, ästhetischer und unterstützte das Erlernen ihrer Funktionen besser. Zudem wurde auch die Positionierung der GUI als leicht vorteilhaft bewertet. Zu letzterem ist jedoch zu sagen, dass sich die Urteile bei beiden GUI-Versionen um den Skalenmittelwert gruppierten, welcher eher eine gewisse Unentschiedenheit der Meinung ausdrückt; d.h. die Positionierung der neuen GUI wurde zwar positiver, aber noch nicht eindeutig als „ergonomisch günstig“ bewertet. Eine Erklärung hierfür könnte eine leichte Sichtbeeinträchtigung durch die während der Untersuchung gleichzeitig durchgeführte Blickbewegungsmessung darstellen. Das Kamerasystem könnte u.U. eine freie Sicht auf die GUI bzw. VR-Welt insbesondere bei Arbeit mit der neuen GUI eingeschränkt haben, was zu gewissen Abstrichen bei der Einschätzung führte.

Bei allen weiteren Fragebögen, die hauptsächlich zur Bewertung von Eigenschaften und Umsetzung der VR-Umgebung dienten, zeigten sich mehrheitlich keine Unterschiede zwischen den GUI-Versionen. Von einer Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse durch die sogenannte Simulatorkrankheit gehen wir nicht aus, da im Laufe der Untersuchung mit der VR-Umgebung keine Veränderung hinsichtlich assoziierter Symptome zu verzeichnen war.

Weitere Hinweise für eine Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ergaben sich aus den Verhaltensdaten, d.h. den Leistungen in der simulierten Arbeitsaufgabe. Hier zeigte sich, dass die Probanden mittels der neuen GUI genauer in der Lage waren, die vorgegebene Förderleistung einzuhalten. Profitieren konnten die Probanden vor allem bei einer hohen Fördervorgabe, d.h. in einer Arbeitssituation, bei der eine reale Maschine schon generell stärker belastet ist. Die neue GUI hat auf Verhaltensebene also zum einen das Potential, zu einer effizienteren Fahrweise zu führen und zusätzlich die Maschinenbelastung aufgrund einer stabileren Fahrweise zu verringern.

Dieser Befund wird unterstützt durch die Anzahl der verursachten Überlastfälle. Mit der neu gestalteten GUI wurden weniger Fälle pro Durchgang verursacht als mit der originalen, allerdings trifft auch dies nur für die hohe Fördervorgabe (2000t) zu, denn bei niedriger Vorgabe kam es nur selten überhaupt zu solchen Situationen.

Ein weiterer Faktor auf das Bedienverhalten, der in den Untersuchungen betrachtet wurde, war der Einfluss einer Nebenaufgabe (i.S. einer zusätzlichen Aufmerksamkeitsbelastung) auf die Leistung in der Arbeitsaufgabe. Interessanterweise hat die Nebenaufgabe keinen direkten Effekt auf Verhaltensmaße wie Genauigkeit der Förderleistung (für beide GUI-Versionen annähernd gleich), oder die Anzahl von Überlastfällen (etwas weniger Fälle mit Nebenaufgabe). Dies Ergebnis war insofern überraschend, da erwartet wurde, dass die gleichzeitige Ausführung der Nebenaufgabe zu einer Störung der Performanz in Hauptaufgabe (geringe Genauigkeit, mehr Überlastfehler) führen sollte. Eine mögliche Erklärung dieses Befunds könnte in Lerneffekten liegen. Da die Nebenaufgabe erst im zweiten Teil der Untersuchung stattfand (Versuchsdurchgang 3 und 4), kam es möglicherweise zu einem Übungseffekt, durch den jegliche, durch die Nebenaufgabe verursachte Leistungseinbußen, überdeckt wurden.

Aber auch die Performanz in der Nebenaufgabe selbst ist interessant. Man kann die Erkennungsrate der in der Nebenaufgabe dargestellten Zielreize heran ziehen, um zu ergründen, wie stark Aufmerksamkeit durch die Hauptaufgabe und in Abhängigkeit der GUI-Version bzw. dem Ort der Zielreizdarbietung beeinflusst wurde. Dabei zeigte sich kein signifikanter Einfluss der GUI-Version, dafür aber für die Fördervorgabe (die Erkennungsrate war bei hoher Anforderung schlechter als bei niedriger) und dem Ort der Darbietung (auf GUI wurden Zielreize besser erkannt als in der Weltsicht/Schaukelradregion). Insbesondere gab es eine Wechselwirkung zwischen GUI-Version und dem Ort der Darbietung, die näher betrachtet werden muss. Ziele auf der GUI wurden mit der neuen GUI-Version besser erkannt als mit der alten, auf der Weltsicht jedoch ist der Effekt umgekehrt, d.h. mit der neuen GUI ist die Erkennungsrate schlechter als bei der alten (siehe hierzu die Kontrolluntersuchung in Abschnitt 3.5).

In Zusammenschau mit den Daten zur Fördergenauigkeit kann man zwar feststellen, dass durch das GUI-Redesign auf Ebene der objektiven Leistungsparameter eine Verbesserung erzielt wurde, gleichzeitig aber lassen die Ergebnisse aus der Nebenaufgabe eine generelle Bevorzugung der Neugestaltung nicht uneingeschränkt zu, denn es wurde auch eine verringerte Erkennungsrate für mögliche Gefahrenereignisse in der Weltsicht festgestellt. Es stellt sich also die Frage, ob die Leistungsverbesserung aufgrund einer Verengung des Aufmerksamkeitsfokus (bzw. verkleinerte Aufmerksamkeitsspanne) erkauft wurde.

Analysen des Blickverhaltens können einen wichtigen Beitrag zur Klärung dieser Frage beitragen. In den Auswertungen der Eye-Tracking-Daten zeigte sich, dass während der Aufgabendurchführung die meiste Zeit auf die GUI geblickt wird (ca. 60-70% relative Blickhäufigkeit). Bis auf einen kleinen Anteil befindet sich der Blick für den Rest der Zeit auf Objekten in der Weltsicht (Schaufelrad, Tiefenanzeige, Flöz, etc.). Es gibt keinen Unterschied hinsichtlich der GUI-Versionen, d.h. die Blickverteilung zwischen GUI und Weltsicht ist in beiden Bedingungen annähernd gleich. Ein geringerer Anteil an Blickhäufigkeit in der Weltsicht scheint also die geringere Erkennungsrate/Sensitivität in der Nebenaufgabe nicht erklären zu können.

Welche anderen Erklärungsansätze kommen zur Interpretation der Ergebnisse in Betracht? Eine Vermutung wäre, dass trotz gleichartiger Blickverteilung zwischen GUI und Weltsicht, es bei der neuen GUI zu einer stärkeren Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die GUI an sich kommen könnte, wodurch Elemente in der Peripherie weniger gut wahrgenommen wurden (Verengung des *functional field of view*). Alternativ, und dies wurde auch in Gesprächen von den Probanden nach der Untersuchung erwähnt, könnte es zu einer Einschränkung der Sicht durch das Blickbewegungsmesssystem gekommen sein. Beim Blick auf die GUI (d.h. bei der neuen GUI Version etwas unterhalb der Sehachse auf Schaufelrad) wurde möglicherweise das Sichtfeld und damit der Bereich, in dem die Ziele auftauchen konnten, teilweise durch Stirnbalken und Augenkameras des Eye-Trackers verdeckt. Hinweise hierfür liefern auch die mittleren Y-Koordinaten verpasster Targets in der Weltsicht. Bei der neuen GUI waren diese größer, d.h. verpasste Zielreize waren durchschnittlich weiter oben erschienen, als bei der Original-GUI. Abschließend ließ sich dies jedoch aus den vorhandenen Daten im Nachhinein nicht eindeutig nachweisen. Um diesen Sachverhalt zu klären, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt (siehe folgendes Kapitel).

3.5. Zusätzliche Kontrolluntersuchung

Sechs Versuchspersonen aus der Hauptuntersuchung wurden gebeten, das Experiment ohne Eye-Tracker zu wiederholen. Dabei wurde auf sämtliche Fragebögen verzichtet. Jeder Teilnehmer durchlief ein Training zur Wiederauffrischung und vier Trials mit wechselnden Fördervorgaben. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe wurde nur die neu gestaltete GUI benutzt und die Nebenaufgabe war in allen vier Trials aktiv. Die Ergebnisse der Erkennungsleistung aus der Nebenaufgabe wurden in Bezug zu den Daten aus der Erstuntersuchung betrachtet. Die beiden Untersuchungen sind in der Analyse durch den Faktor *Eye-Tracker* gekennzeichnet. Mittels multifaktorieller Varianzanalyse Fördervorgabe (niedrig/hoch), Eye-Tracker (ohne/mit), Ort der Aufmerksamkeitsziele (ohne/mit) konnte der Haupteffekt für den Ort der Aufmerksamkeitsziele bestätigt werden. Die Sensitivität für Ziele auf der GUI war wieder höher als für die Simulatorwelt, $F(1, 5) = 25.26, p < .004$. Weiterhin besteht eine nicht signifikante Tendenz, dass insgesamt die Leistung ohne Eye-Tracker etwas besser ist, $F(1, 5) = 3.57, p = .118$. Entscheidend ist jedoch die Interaktion zwischen den Faktoren *Eye-Tracker* und *Ort der Aufmerksamkeitsziele* (siehe Abbildung 38).

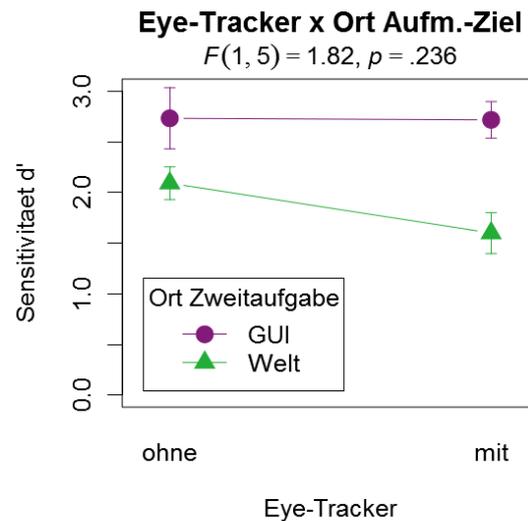


Abbildung 38: Sensitivität bei der Nebenaufgabe in Abhängigkeit vom Präsentationsort und dem Tragen eines Eye-Trackers.

Hierbei zeigt sich zunächst deskriptiv, dass die Sensitivität für Ereignisse auf der GUI unabhängig davon ist, ob die Probanden ein Eye-Tracking-System trugen oder nicht. In beiden Fällen lag d' bei ca. 2.75. Die Sensitivität für Symbole in der Außenwelt hingegen ist ohne Eye-Tracker deutlich größer, wenngleich die Stichprobengröße es nicht erlaubt, von einem signifikanten Effekt zu sprechen. Die durchschnittliche Sensitivität bzgl. der Weltsicht war ohne Eye-Tracker ($MD = 2.09$) sogar deutlich über dem Wert für die Original GUI ($MD = 1.90$), der in der ersten Versuchsreihe gemessen wurde. Dieser Befund scheint darauf hinzuweisen, dass die Blickbewegungsregistrierung zu einer leichten Einschränkung des Sichtfelds geführt hatte. Somit ist die Verringerung der Sensitivität für Ereignisse in der *Weltsicht* mit großer Wahrscheinlichkeit nicht auf ein Defizit (im Sinne einer stärkeren Aufmerksamkeitsbindung) bei der neugestalteten GUI-Version zurückzuführen.

Das Ergebnis der Nachuntersuchung wirft auch eine neue Perspektive auf die Antworten zur Bewertung der GUI-Position im Usability-Fragebogen (vgl. Kapitel 3.3.1). Die Positionierung für das GUI-Redesign wurde zwar ergonomisch besser, aber nicht übereinstimmend als gut beurteilt. Ein Grund hierfür könnte die Verdeckung der Sicht durch den Eye-Tracker darstellen. Dies könnte zu einer tendenziell weniger positiven Bewertung der Positionierung geführt haben. Der Aspekt der Sichtverdeckung spielte bei der Anordnung mit der Original-GUI vermutlich keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Hier befanden sich GUI und Schaufelrad etwa in einer (vertikalen) Höhe und das funktional wichtige Sichtfeld hatte dadurch eine eher horizontale Ausdehnung. Zu sehen ist dies auch in den Abbildungen der Fixation-Maps. Während bei der neuen GUI die Blickverteilung eher eine vertikale Ausrichtung hat, erstreckt sie sich bei der Original-GUI in der Horizontalen (vgl. Tabelle 1).

4. Bewertung der Methode

Ziel des Projekts war die Entwicklung und Testung einer Methode zur systematischen Untersuchung von MMI in Leitständen von Tagebaugroßgeräten, mit dem Anspruch, den Ansatz zur Bewertung von Neugestaltungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle einsetzen zu können. An dieser Stelle sollen die wesentlichen Kernkomponenten der entwickelten Methode bewertet werden. Die Bewertung soll vor allem hinsichtlich der Zweckmäßigkeit und Nutzen für die Analyse von MMI-Aspekten erfolgen. Zusätzliche Kriterien für die Bewertung sind jedoch auch Aufwand für Herstellung der Methode, Aufwand und Reliabilität der Durchführung einer Messung, Aufwand für Analyse der Daten eines Verfahrens, Validität der Ergebnisse und Wiederverwendbarkeit in vergleichbaren Anwendungskontexten und Potential für eine Weiterentwicklung.

4.1. Bewertung VR-Umgebung und Prozessszenario

Auch bei einer bereits vorhandenen Hardwarearchitektur (Hexapod, Rechner, Netzwerk und Beamercluster, Softwarearchitektur), wie sie für das beschriebene Projekt am Lehrstuhl für Baumaschinen und Fördertechnik der TU-Dresden vorhanden war, und zahlreicher Projekterfahrung mit der Realisierung anderer VR-Umgebungen im Bereich mobiler Baumaschinen, bleibt die Entwicklung einer neuen VR-Umgebung für das Einsatzszenario Großgeräte im Tagebau ein aufwendiges Unterfangen. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass die Tagebaugeräte meist Einzelanfertigungen sind; auf bereits vorhandene 3D-Maschinenmodelle kann also nur teilweise zurückgegriffen werden.

Die Interaktion zwischen Grabwerkzeug und Flöz wurden in der Simulation rechnerseitig durch eine Methode erzeugt, bei der die Bodendurchdringung durch das Grabwerkzeug grafisch löst wurde. Um den Grabprozess zu simulieren und zu visualisieren erfolgte eine Berechnung in 3 Teilschritten. Zunächst wurde der Kontaktraum bestimmt, dann mittels interaktiver Texturgenerierung und Oberflächendeformation die Bodenoberfläche neu berechnet. Als Ergebnis entstehen ein Durchdringungswert sowie ein Wert für das abgetragene Bodenvolumen, der an die weiteren Simulationsmodule übergeben wird. Die Vorteile dieser Methode bestehen darin:

- notwendige Berechnungen erfolgen graphikkartenseitig und erzeugen damit keine rechnerische Belastung der CPU
- das Modell ermöglicht die Beherrschung/Simulation großer Oberflächenvolumen
- Echtzeitfähigkeit
- Im Vergleich zu anderen Verfahren (voxelbasierten Berechnungen) sind nur geringe Mengen an Daten in der Simulation vorzuhalten.

Das Modell ist hinreichend genau, um Interaktion zwischen Grabwerkzeug und Boden abzubilden und das notwendige Feedback zum Förderprozess sowie Prozessdaten wie Fördervolumen und Bodendurchdringung des Schaufelrads für das Maschinenmodell zu erzeugen. Über die analytische Weiterverarbeitung des Fördervolumens können auch Leistungsgrößen und Maschinenbelastungen bestimmt werden.

Ein wesentliches Merkmal für die Interaktion mit Objekten im virtuellen Raum ist die Herstellung eines Tiefengefühls/-eindrucks. Dies wurde in den Befragungen auch als ein wichtiges Merkmal für die Steuerung der Simulation genannt. Die Durchdringung des Schaufelrads im Boden war auf Grund der realisierbaren Projektion nur schwer abzuschätzen. Um dies zu verbessern wurde ein zusätzlicher Tiefenindikator in Nähe des Schaufelrads auf die Leinwand projiziert. Diese Ersatzanzeige ist jedoch nur bedingt technisch valide und in Folge wurde die Wichtigkeit dieser Information für den Prozess von den Probanden auch unterschiedlich eingeschätzt. Eine Verbesserung des 3D-Tiefeneindrucks ist theoretisch durch stereoskopische Darstellung möglich, jedoch mit der aktuellen Hardware-Konfiguration nicht umzusetzen. Andere Möglichkeiten hierfür bieten Shutterbrillen oder HMDs, bei beiden gibt es jedoch Einschränkungen was den Einsatz von Eyetracking angeht, bei HMD würde zusätzlich ein Headtrackingsystem notwendig sein.

Bisher ist die Interaktion des Schaufelrads mit dem Boden anhand geometrischer Veränderungen des Bodenprofils und teilweise farblicher und struktureller Veränderung der Oberflächentextur zu erkennen. Bei Weiterentwicklung sollten Modellierung von Staub, Erdreichbewegungen und andere eingriffstypische Veränderungen im Flöz in Betracht gezogen werden. Ziel der Untersuchungen sollten dann Einflüsse der Visualisierungseffekte auf das Bedienerverhalten sein.

Neben visuellen Merkmalen wurden in der VR-Umgebung auch Schwingungen und Vibrationen der Kabine sowie akustisches Feedback zum Arbeitsprozess implementiert. Die Simulationsparameter des Bewegungssystems für Vibration wurden durch Approximation des Schwingverhaltens der Kabine eines Schaufelradbaggers (Aufzeichnungen mittels 3-D-Beschleunigungsaufnehmern in Felduntersuchung) abgeleitet. Akustisches Feedback wurde aus den Tonspuren der Videoaufzeichnungen während der Felduntersuchung extrahiert. Für Vibration/ Schwingung und Ton konnte das Feedback interaktiv in Abhängigkeit vom Prozesszustand in zwei Stufen moduliert werden. Im Sinne einer realistischeren Umsetzung wäre zukünftig eine stärker parameterabhängige Simulation mehrerer Zustände wünschenswert.

Als Szenario wurde ein typischer Arbeitsprozess im Schaufelradbagger umgesetzt, die Kohlegewinnung innerhalb einer Flözschicht. In diesem Szenario konnte eine kontinuierliche Steuerung und Kontrolle eines prototypischen Arbeitsprozesses umgesetzt werden. Gleichzeitig ermöglichte es eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Arbeitsabläufe. Die Aufgabe wurde von allen Versuchsteilnehmern gut gemeistert und als leicht bis mittelmäßig schwierig/anspruchsvoll beschrieben. Die Aufgabe war nicht zu einfach - bei allen Probanden kam es zu Fehlern im Prozess - führte aber auch nicht zu Überforderung und Frustration. Zwischen den Versuchsbedingungen aber auch innerhalb eines Durchgangs zeigte sich ausreichende Varianz in den Verhaltensmaßen, um den Einfluss von Gestaltungsmaßnahmen analysieren zu können. Eine Übertragung der erzielten MMI Ergebnisse auf andere Einsatzszenarien (unterschiedliche Arbeitstechnologien wie Planum herstellen oder Einschnitt in Flöz vornehmen und andere Geräteklassen z.B. Eimerkettenbagger) ist nur teilweise gegeben. Hierfür wären mehr oder weniger starke Anpassungen der Visualisierung, des Bedienkonzepts oder des Maschinenmodells notwendig. Grundsätzlich Methoden der Implementierung können jedoch direkt übernommen werden, sodass von einem wesentlich geringeren zeitlichen Aufwand für die Umsetzung ausgegangen werden kann.

Ein typisches Phänomen bei der Durchführung von Untersuchungen in VR-Umgebungen ist die Simulatorkrankheit. Unsere Studienteilnehmer zeigten im Verlauf der Untersuchung keine Anzeichen einer Verschlechterung der damit assoziierten Symptome. Dies spricht für eine generell gut

Abstimmung von Bewegungssystem und Visualisierung in der entwickelten VR-Umgebung. Teilweise ist es aber auch auf die geringe visuelle Bewegungsdynamik in der Simulation eines Schaufelradbaggers zurückzuführen, was auch der Realität entspricht. Für andere Geräteklassen oder andere Prozessszenarien im Umfeld Tagebau ist daher eine ähnlich geringe Anfälligkeit für die Simulatorkrankheit zu erwarten.

4.2. Analyse tätigkeitsbezogener und prozessbezogener Maße

Gestaltungsmaßnahmen mit dem Ziel der Optimierung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle sollten vor allem zu einer Verbesserung der Leistung in der Arbeitsaufgabe führen, also zu einer insgesamt effizienteren und stabileren Arbeitsweise mit weniger Fehlern. Für die Bewertung der MMI wurden verschiedene tätigkeits- und prozessbezogene Parameter des Bedienverhaltens verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass Bediener sowohl hinsichtlich der Genauigkeit eine Vorgabe der Förderleistung einzuhalten als auch bei der Anzahl von Prozessfehlern (Überlastfehlern) von Arbeit mit der neu gestalteten GUI profitieren konnten.

Mit der Bereitstellung von Prozessbewertungsgrößen (vgl. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) besteht die Möglichkeit, Bedieneinrichtungen für Maschinen ähnlicher Konfiguration bzw. Änderungen dieser Einrichtungen vergleichend hinsichtlich Effektivität und Effizienz ihrer Wirksamkeit zu untersuchen. In unserer Untersuchung konnte die Aussagefähigkeit dieser Größen für die Beschreibung der Bediener-Prozess-Abhängigkeit bestätigt werden. In der Auswertungen ergab sich ein Einfluss der GUI-Variante auf die Fähigkeit des Bedieners, zielgerichtet Leistungsvorgaben zu erreichen. Das ließ sich auch in den aktivierten Bedienhandlungen/mustern wieder finden.

4.3. Analyse physiologischer und psychologischer Maße

Neben der Erstellung einer VR-Umgebung ist ein Herausstellungsmerkmal des Projekts die Verwendung von Eye-Tracking. Das dazu notwendige Blickbewegungssystem konnte erfolgreich in die VR-Umgebung integriert und mit den Daten des Simulators synchronisiert werden. Hardware- und softwaretechnische Lösungen sind so konzipiert worden, dass sie ohne weiteres auch in anderen Szenarien einsetzbar sind. Mit kleineren Abstrichen bei der Messgenauigkeit im Vergleich zum klassischen Labor-Setting konnte die Erhebung bei allen Probanden erfolgreich durchgeführt werden. Anhand der Messdaten konnte mittels einer zeitaufwendigen Nachbearbeitung (Kategorisierung der Blickoverlayvideos) die Blickausrichtung für jeden Zeitpunkt innerhalb des Versuchsdurchlaufs bestimmt werden. Damit ist die räumliche und zeitliche Zuordnung von Aufmerksamkeitszuwendungen zu bestimmten Prozessparametern und -inhalten während der Aufgabenbearbeitung möglich. Es kann bestimmt werden, welche Informationen für bestimmte Prozessabschnitte von besonderer Wichtigkeit waren. Zu den Kernaussagen, die aus den Eyetrackingdaten gewonnen wurden, gehören, dass beide GUI-Versionen vergleichbar häufig betrachtet wurden, dass die Informationsdisplays unterschiedlich stark zwischen den Prozessabschnitten innerhalb eines Schwenks genutzt werden und dass die Nebenaufgabe zu einem breiter gestreuten Aufmerksamkeitsfokus und zu Veränderung der Verteilung der Blickzuwendungshäufigkeiten führte. Das Verfahren dient vorrangig dazu, Abläufe der Informationsverarbeitung innerhalb eines Prozesses zu beschreiben und kann auf einem detaillierten Level verwendet werden, um Ursachen für Bedienfehler aufzuspüren. Einschränkungen der Methode

bestehen in relativ hohen Anschaffungskosten des Geräts, in einem hohen notwendigen Expertisegrad hinsichtlich Planung, Durchführung und Auswertung einer Eyetracking-Untersuchung und einer begrenzten Einsatzdauer aufgrund des geringen Tragekomforts des Systems. Je nach Untersuchungsziel ist es aber auch denkbar, den Eye-Tracker nur etappenweise zu verwenden. Der Einsatz mobilerer Eye-Tracking-Systeme, welche meist leichter und komfortabler zu tragen sind, geht oft mit einem Verlust an Messgenauigkeit einher, da diese System zeitlich deutlich schlechter auflösen und somit bspw. die Trennung von Fixationen von Sakkaden nicht sinnvoll möglich ist. Je nach Anwendungsfall und Fragestellung wäre ein anderes System denkbar, auf jeden Fall sollte aber eine sorgfältige Abwägung bei der Auswahl des Gerätes getroffen werden.

Die Durchführung einer Nebenaufgabe zusammen mit der Hauptaufgabe als zusätzliche Aufmerksamkeitsbelastung zeigte keinen direkten Effekt auf die Aufgabenausführung bei Genauigkeit der Förderleistung, Bedienstabilität und der Anzahl von Überlastfällen. Wie weiter oben diskutiert, liegt dieser Befund vermutlich in methodischen Aspekten des Untersuchungsdesigns und daraus resultierenden Lerneffekten begründet, die sich jedoch durch Veränderungen in der Versuchsabfolge kontrollieren lassen. Bei der Performanz der Nebenaufgabe an sich (Entdeckungsrate der Zielreize) zeigte sich hauptsächlich ein Effekt des Orts der Darstellung der Aufmerksamkeitsreize. Ein Einfluss der MMI-Gestaltung war ebenfalls, zumindest in Abhängigkeit vom Ort der Darstellung, zu verzeichnen, allerdings konnte diese Wechselwirkung in einer Kontrolluntersuchung auf Sichtbeeinträchtigung durch das Blickbewegungsmessungssystem zurückgeführt werden. Das Verfahren ist also sensitiv genug, um Unterschiede in Aufmerksamkeitsprozessen, die durch die Untersuchungsbedingungen erzeugt werden, aufzudecken.

Neben Leistungs- und Verhaltensdaten sind Fragebogenmaße ein probates Mittel zur Erhebung von Gebrauchstauglichkeit und Einstellungen gegenüber Hardware- und Softwareprodukten, sowie zur Bestimmung kurz- und langfristiger Folgen einer Tätigkeit auf das subjektive Befinden eines Nutzers. Sie werden im Kontext der Bewertung von Mensch-Maschine-Schnittstellen häufig eingesetzt. Daher gibt bereits eine Reihe standardisierter Verfahren für spezifische Einsatzzwecke. Wenn Verfahren bereits vorhanden sind, ist es meist methodisch sauberer (existierende Gütekriterien) und mit geringerem Aufwand verbunden, diese in einer Untersuchung einzusetzen, als neue zu konzipieren. Zu beachten ist aber die Passung des Verfahrens mit dem Untersuchungsgegenstand, die richtige Durchführung sowie die korrekte Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Ein höherer Grad an Expertenwissen (inhaltlich und methodisch) ist notwendig, wenn Fragebogenverfahren neu erstellt oder aus verfügbaren Methoden neu zusammengestellt werden müssen.

In der aktuellen Untersuchung zeigten sich vor allem zwei Fragebogen sensitiv hinsichtlich MMI-bezogener Fragestellungen. Bei Beurteilung der Aufgabenschwierigkeit (NASA-TLX) wurde die Arbeitsaufgabe mit dem GUI-Redesign gegenüber der Original-GUI bei gleicher Aufgabenstellung als leichter durchführbar wahrgenommen. Mittels eines aus verfügbaren Fragebögen und Richtlinien zur ergonomischen Displaygestaltung entwickelten Fragebogens zur Gebrauchstauglichkeit, wurde aufgedeckt, dass die Neugestaltung des Informationsdisplays gegenüber der alten Version, hinsichtlich aller enthaltener Kriterien (Erkennbarkeit, Verständlichkeit, Struktur, Lernförderlichkeit etc.) als ergonomisch besser gestaltet angesehen wurde. Weitere Fragebögen zur Ermüdung und subjektiver Beanspruchung konnten nicht zwischen den GUI-Versionen trennen. Möglicherweise lassen sich Effekte diesbezüglich erst bei längerer Untersuchungsdauer (z.B. normalen Arbeitsschicht von 8 Stunden) aufzeigen. Insgesamt stellen Fragebögen damit ein sinnvolles und relativ aufwandarmes Mittel dar, um Veränderungen der MMI bewerten zu können.

4.4. Zusammenfassende Bewertung und allgemeine Anwendungsmethode

Das vorgestellte Verfahren beschreibt einen Ansatz zur Analyse von MMI in Bedienumgebungen von Tagebaugeräten. An einem prototypischen Beispielszenario wurde gezeigt, dass es mittels der im Projekt entwickelten strukturierten Methodik möglich ist, sowohl den Rahmen für Gestaltungspotenzial in einer vorhandenen Bedienumgebung aufzudecken als auch zu einer objektiven Bewertung von Gestaltungslösungen einer Bedienumgebungen zu kommen. Mit den verwendeten Verfahren konnten Veränderungen auf verschiedenen Ebenen (Bedienverhalten, Prozessmerkmale, Wahrnehmung des Bedieners, subjektive Einstellungen des Bedieners) und hinsichtlich verschiedener, für die Beurteilung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle wesentlicher Aspekte, aufgezeigt werden.

Für die Ableitung einer allgemeinen Anwendungsmethode sind zwei Aspekte aus der durchgeführten Untersuchung hervorzuheben. Erstens, die Beschreibung einer allgemeinen Bewertungsmethode, die Methoden und Parameter zur Analyse der MMI in Bedienständen liefert, und zweitens eine allgemeine Bestimmungsmethode im Sinne von Schritten und Komponenten, die für den Aufbau einer geeigneten Simulationsumgebung, der Analyse von Bedienständen, der Durchführung entsprechender Evaluationsuntersuchungen und deren Bewertung notwendig sind. Bei Punkte sind im Folgenden genauer beschrieben.

Bewertungsmethode

Der Systemzustand einer MMI-Umgebung muss hinsichtlich objektiver und subjektiver Kriterien des Bedienverhaltens bewertet werden. Dabei hat es sich in unserer Studie als sinnvoll erwiesen, verschiedene Verfahren und Methoden, die Aussagen zu verschiedenen Ebenen des Bedienerverhaltens und -erlebens zulassen, zu verwenden. Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren können sich gegenseitig bestätigen, zum Teil aber auch ergänzend Informationen zum Verständnis der erzielten Befunde beitragen. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind eine Reihe von Verfahren und ihrer operativen Merkmale aufgeführt, die für eine solche Bewertung herangezogen werden können.

Darüber hinaus sind in Abhängigkeit von der analysierten Arbeitstechnologie weitere Bedien- und Prozessmaße unabdingbar. Dazu zählen:

- Prozessverhalten (z.B. die Prozessgenauigkeit als Maß für die Häufigkeit des Erreichens einer Sollvorgabe)
- Bedienaktivität (d.h. Maße für Art und Häufigkeit von Regelungstätigkeiten)
- Prozessfehler (Überlast)
- Informationen des Daten-Logging (Aufzeichnung aller relevanten Simulationsparameter für jeden Zeitschritt, aus denen funktionale Zusammenhänge von Maschine-Prozess-Bediener beschrieben und aktuellen Bedienwirksamkeiten analysiert werden können).

Tabelle 2: Übersicht über die Verfahren zur Untersuchung von MMI

Verfahrensgruppe	Verfahren	Aufwand	Dauer	Ort	Nutzen
Befragung	halbstandardisiertes Interview	hoch	mehrere Stunden/ Tage	Feld	allgemeines Verständnis für Arbeitsabläufe, subjektive Beschreibung der Tätigkeiten, nicht beobachtbare Ereignisse
Beobachtung	offene, teilnehmende Verhaltensbeobachtung	hoch	mehrere Stunden/ Tage	Feld	objektive, quantitative Verhaltensdaten, weitestgehend frei von sozialer Erwünschtheit
Beobachtung/ apparativ	Videoanalyse	hoch	mehrere Tage	Feld	ermöglicht standardisierte <i>retrospektive</i> Verhaltensbeobachtung, unterstützend für Befragung (Mikrofon)
übergeordnet	Hauptaufgabe – Fördern	hoch	nach Fragestellung	Simulator	Performanz (Förderleistung) unter verschiedenen Bedingungen
psycho- physiologisch	Nebenaufgabe – Aufmerksamkeitssymbole	mittel	parallel zur Hauptaufgabe	Simulator	Gefahrenwahrnehmung (Reaktionszeit, Richtigkeit)
Fragebogen	Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung (KAB)	gering	ca. 1 Minute	Simulator	subjektiv erlebten Beanspruchung mit kurzen Retestintervallen (z.B. vorher-nacher)
Fragebogen	Simulation Sickness Questionnaire (SSQ)	gering	ca. 5 Minuten	Simulator	Simulatorkrankheit
Fragebogen	Evaluationsbogen VR-Umgebung (auf Basis von Präsenz-Fragebogen (Witmer & Singer)	gering	ca. 10 Minuten	Simulator	Präsenzerleben und Immersion
Fragebogen	Evaluationsbogen Displaygestaltung (auf Basis von ISONORM 9241/10 und allg. Prinzipien der Displaygestaltung)	gering	ca. 10 Minuten	Simulator	Gebrauchstauglichkeit der Displaysysteme/ Usability
psycho- physiologisch/ apparativ	Eye-Tracking	hoch	nach Fragestellung/ Versuchsdesign, sinnvoll mind. ca. 30 Minuten	Simulator	räumliche und zeitliche Aspekte visueller Aufmerksamkeit

Bestimmungsmethode

Verallgemeinernd lässt sich für Bedieneinrichtungen in Tagebaugroßgeräten ein Bestimmungsablauf ableiten. Die wesentlichen Charakteristika werden genannt.

- *Determinierung*
 - Maschine (Konfiguration, Leistungsparameter, Bewegungsräume)
 - Bedieneinrichtung (Bedienelemente, Konstruktion, Informationssysteme, Informationen)
 - Bediener (Qualifikation)
 - Prozess (Parameter Grab-/Förderprozess, Zielgrößen)
 - Untersuchungsszenario (abzubildende Technologie/Aufgabe, Umgebungskomponenten)
 - Nebenaufgabe (Überwachung, Sicherheit)

- *Untersuchungstechnik*
 - Messtechnik (Eye-Tracker, Daten-Logger)
 - Methoden (s. Bewertungsmethoden)
 - Versuchsplan (Probandenzahl, Varianten, Ablauf, Abfolge)

- *Untersuchungsziel*
 - Zielgrößen, Abhängigkeiten

- *Versuchseinrichtung*
 - VR-Umgebung (Prozessmodell, Maschinenmodell, Ansteuerung Bewegungssystem, Visualisierung Frontsicht/Monitor/Kamera, Bedienrichtung, Simulationssystem, Rechnerarchitektur)
 - Operator-Tool (Online-Steuerung Simulation)

- *Annahmen*
 - Abstraktionsgrad, Abgrenzung

- *Auswertung*

- vergleichende Parameter (s. Bewertungsmethode)

Für die Gestaltung der VR-Umgebung ist eine genaue Kenntnis des Prozesses, der Arbeitsweise und der technischen Gegebenheiten notwendig. Wie man dieses Wissen erheben kann, wurde im ersten Schritt (Felduntersuchen) des vorgestellten Verfahrens dargestellt. Nicht immer sind Probleme einer bestehenden Schnittstelle zwischen Maschine und Bediener vollständig bekannt. Die in der Felduntersuchung angewandten Verfahren können helfen, die relevanten Probleme zu identifizieren und damit Hinweise für Gestaltungspotential aufzudecken. Hierfür erwiesen sich Befragungen und Beobachtungen vor Ort (d.h. im Arbeitsprozess, mit den Experten für den Prozess also den Maschinenführer) mit geeigneten Interview- und Befragungstechniken als eine sinnvolle Herangehensweise.

Aus methodischer Sicht ist für den Nachweis darüber, ob Veränderungen und Gestaltungsmaßnahmen zu einer verbesserten Mensch-Maschine-Schnittstelle geführt haben, ein Vergleich von mindestens zwei verschiedenen Varianten notwendig. In der Regel möchte man wissen, ob eine neue Version einer Bedienumgebung zu einer Verbesserung gegenüber dem aktuellen Stand führt und damit die Kosten der Neuentwicklung und -implementierung rechtfertigen. Daher ist in der Regel ein Vergleich zwischen IST-Zustand und einer oder mehreren neuen Varianten unabdingbar.

Erstmalig wurde in diesem Projekt für das Anwendungsgebiets „Bedienstände in Tagebaugroßgeräten“ ein Methode zur Bewertung der Mensch-Maschine-Schnittstelle erarbeitet und anhand von Untersuchungen evaluiert. Aus dem Neuheitsgrad der durchgeführten Arbeiten ergibt sich (u.a. auch mit Hinblick einer Weiterentwicklung entsprechender VR-Simulatoren) die Notwendigkeit, den aktuellen Kenntnisstand in Folgeprojekten zu erweitern und zu vertiefen. Bei wiederholtem Einsatz des verwendeten Methodenkanons ist von einer deutlichen Reduzierung des Untersuchungsaufwands durch eine effizientere Vorgehensweise auszugehen, da Verfahren bereits vorhanden und Durchführung und Analysen bereits erprobt sind. Zudem sollte sich sukzessive herauskristalisieren, welche der Verfahren in welchem Kontext am besten zu Antworten auf die gestellt Untersuchungsfragen führen.

5. Neugestaltung einer Bedienumgebung

5.1. Spezifikation für Visualisierungslösung und Eingabegeräte

Anhand der Felduntersuchungen konnten drei Kriterien für Optimierung der MMI im Leitstand des Schaufelradbaggers herausgearbeitet werden. Einerseits wurde die derzeitige räumliche Positionierung der Informationsdisplays, welche wesentliche Informationen für den Förderprozess bereitstellen, als ergonomisch ungünstig eingestuft. Weiterhin enthielten die Displays zahlreiche Informationen, die für die primäre Arbeitsaufgabe (Kohle fördern) nicht relevant sind und lediglich bei Systemstörungen für zur Fehleridentifizierung notwendig sind. Eine Reduzierung der Anzeigeelemente auf ausschließlich relevante Informationen sollte zu einer generellen Platzersparnis und zu einer besseren Übersichtlichkeit beitragen. Drittens wurde bei zahlreichen Anzeigeelementen Potential für eine optimierte Art der Darstellung hinsichtlich perceptiver und kognitiver Merkmale erkannt. Ein genereller Leitfaden für Bedienstände ist in Abschnitt 5.2 zusammengefasst. Im Folgenden wird aber zunächst die Neugestaltung der vorliegenden GUI beschrieben und Hintergründe der Maßnahmen skizziert.

Im oberen linken Teil der GUI befindet jetzt sich die Kameraansicht (in alter GUI-Version extra Bildschirm). Wie sich in der Felduntersuchung zeigte, ist die Anzeige vor allem bei Schwenks nach links von Bedeutung und dient oft als Orientierungshilfe für die sonst kaum einzusehende Region hinter dem Schaufelrad. Die Positionierung wurde so gewählt, dass gleichzeitig ein geringer Abstand zu Hauptsichtachse und zur Förderleistungsanzeige erreicht wurde. Ein weiterer Grund der Anordnung besteht in der Tatsache, dass die Kamera von oben links filmt (aus Ego-Perspektive des Geräteführers gesehen). Daher war die entsprechende Anordnung des Anzeigeelementes nahe liegend.

Rechts daneben wurde der Schwenkwinkel als analoge Anzeige mit gerader Auslegerichtung (0°) als Zentrum abgebildet. In der Darstellungsweise wurde ein natürliches Mapping von physikalischer und visualisierter Information umgesetzt, da Art der Bewegung des (physischen) Schaufelradauslegers und Art der Bewegung der Anzeige übereinstimmen (links—rechts). Der exakte Schwenkwinkelwert ist außerdem digital unterhalb des Anzeigeelements gut lesbar abgebildet. Die Höhe des Schaufelrades ist am rechten Displayrand als vertikale Balkenanzeige visualisiert. Auch hier kann der Wert auf einer Analogskala und als exakter Zahlenwert abgelesen werden.

Unten links befinden sich drei Säulenanzeigen als wichtigste Informationsquelle für den Geräteführer, um die aktuelle Förderleistung in Bezug zur Überlastgefahr ablesen zu können. Im Einzelnen sind das (von links nach rechts) die Anzeige der Leistungsaufnahme des Schaufelrades, die Förderleistungsanzeige und die Anzeige der Leistungsaufnahme des Schwenkwerks. Alle drei lassen kein absolutes Ablesen der exakten Werte zu. Vielmehr ist es wichtig, den Wertebereich möglichst schnell und auf einen Blick erfassen zu können. Dazu wird die jeweilige Leistungsaufnahme zusätzlich zur Höhenproportionalität auch farblich als Ampelsystem kodiert. Der grüne Bereich erstreckt sich von 0% bis 80%, der gelbe von 80% bis 100% und schließlich der rote Bereich bei über 100%. Durch diese Redundanz und die räumliche Anordnung soll es dem Geräteführer ermöglicht werden, den aktuellen Leistungsstatus rein peripher wahrzunehmen zu können und dennoch rechtzeitig

Überlastsituationen zu vermeiden (Prinzipien Zugänglichkeit und Redundanz). Der blaue Balken in der Mitte bildet die aktuelle Förderleistung (IST) ab. Die seitens der Leitzentrale angestrebte Vorgabe (im Beispiel der Abbildung 2000 t/h) wird als eine Art Füllstrich in die Säule eingezeichnet, so dass die ursprünglichen zwei getrennten Anzeigen in eine integriert werden konnten. Das entspricht dem von Wickens und Carswell [47] postulierten Proximity-Compatibility-Prinzips, das die Wichtigkeit von „singulären Wahrnehmungsobjekten“ betont, die mehrere Dimensionen der physikalischen Welt in sich vereinen. Diese können dann aufgrund der integrierten Aufbereitung parallel verarbeitet werden und vermindern daher den benötigten kognitiven Ressourcenaufwand.

Der Anzeigenbereich rechts unten widmet sich ausschließlich dem Fahrwerk des Tagebaugerätes. Wichtige Lageparameter sind hier Längs- und Querneigung sowie die Raupensteuerung, eine Art Lenkeinschlag des Fahrwerkes. Diese drei Parameter wurden in Analogie zum Flugzeug- bzw. Neigezugcockpits als künstlicher Horizont integriert. Diese Darstellungsform ermöglicht, die intuitive Abbildung mehrerer Lageparameter zu kombinieren (Proximity-Compatibility) und genügt dabei zusätzlich dem Prinzip des natürlichen Mappings. Dem Geräteführer soll es dadurch leichter fallen, nicht nur das Ausmaß der Anstellwinkels, sondern v.a. die Richtung der Fahrwerksneigung zu erfassen. Beispielsweise fällt es leichter, die Neigung aus Abbildung 16 heraus dahingehend zu beurteilen, dass das Fahrwerk nach vorne rechts gekippt ist als aus Abbildung 15, wo die Anzeigen erst „mental übersetzt“ werden müssen.

In der Weiterführung des Gedankens einer an die Primäraufgabe orientierten Informationsdarbietung ist es sicher auch sinnvoll, Eingabe- und Steuermöglichkeiten vorzusehen, die an die erschwerten Bedingungen einer Bedienung unter hoher Schwingungsbelastung angepasst sind. Ein sicheres und fehlerarmes Umschalten bei Interaktionen mit der softwareseitigen Prozessautomatisierung erfordert daher Bedienelemente, die ohne Mehrfachbelegung oder hierarchische Menüstrukturen eine direkte Auswahl des gewünschten Anzeigemoduls oder Funktionsparameters erlauben. Dafür sind z.B. integrative Interaktionselemente anstatt Kombinationen aus Funktionstasten und Auswahllisten vorzuziehen.

Insgesamt ergaben unsere Untersuchungen, dass die im Schaufelradbagger vorhandenen Eingabegeräte ausreichend für die Aufgabe einer manuellen Steuerung waren und sich in der Praxis bereits viele Jahre bewährt haben. Inwieweit ein Bedienelement mit gekoppelter Funktion von Richtungswahl und Geschwindigkeit als Ein-Hand-Gerät eine sinnvolle Erweiterung darstellt, könnte jedoch in weiterführenden Untersuchungen in der VR-Umgebung getestet werden. Unsere Analysen legen aber nahe, dass neuartige Eingabegeräte wie Touchscreens für den Einsatz im Tagebau, aufgrund hoher Staub- und Schmutzbelastung, weniger geeignet sind.

5.2. Gestaltungskonzept einer menschenzentrierten Bedienumgebung

5.2.1. Prinzipien der Displaygestaltung

Auf Grundlage von wissenschaftlichen Erkenntnissen zu spezifischen Stärken und Schwächen menschlicher Wahrnehmung und Informationsverarbeitung erstellten Wickens, Lee, Liu und Gordon-Becker [48] eine Sammlung von Prinzipien der Displaygestaltung. Diese sind recht allgemein gehalten und können als initialer Leitfaden bei Gestaltung oder Bewertung von Anzeigeelementen herangezogen werden. Die Prinzipien lassen sich unterschiedlichen kognitiven Funktionen zuordnen: Wahrnehmung, Mentale Modellbildung, Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Ähnliche Taxonomien

existieren u.a. auch in [49–51]. Im Grunde weisen all diese Taxonomien viele Gemeinsamkeiten auf. Der Grund dafür ist wohl, dass die meisten Autoren ihre Regeln auf Grundlage kognitionspsychologischer Erkenntnisse formulieren. Die Prinzipien adaptiert nach [48] werden daher stellvertretend für viele andere im Folgenden etwas näher erläutert. Zusätzlich werden Hinweise gegeben, wie jedes einzelne am Geräteführerstand umgesetzt werden könnte.

Wahrnehmung

Die Einhaltung perzeptueller Prinzipien ist für die initiale Aufnahme der Informationen seitens des Benutzers von Bedeutung. Das Hauptaugenmerk liegt auf klarer und eindeutiger Darbietung von Anzeigeelementen um erschwerte Informationsaufnahme und Verwechslungen vorzubeugen.

Lesbarkeit Die Lesbarkeit einzelner Displayelemente (Zahlen, Buchstaben u. graphische Elemente) ist eine notwendige Voraussetzung für die Informationsaufnahme seitens des Maschinenführers. Die Lesbarkeit ist abhängig vom Kontrast, der Größe und der Beschaffenheit des jeweiligen Elementenhintergrunds. Im Leitfaden für Bildschirm und Büroarbeitsplätze lassen sich Grenzwerte für Bildschirmkontrast und Schriftgrößen finden. Hier wird für gute Lesbarkeit gefordert, dass die Höhe von alphanumerischen Zeichen zwischen 22 und 31 Bogenminuten (1/60 eines Winkelgrades) beträgt. Die Mindesthöhe eines Letters lässt sich per Faustformel als Sehabstand (mm) / 155 ermitteln. Üblicherweise werden Schriftgrößen in IT-Systemen aber in Punkt (pt) angegeben. Dazu muss das Ergebnis noch in amerikanische Zoll umgerechnet werden und mit dem jeweiligen dpi-Wert des Anzeigesystems multipliziert werden (meist Windows 96 dpi, Unix-artige 72 dpi). Im vorliegenden Fall gestaltet sich die Rechnung wie folgt: $1000 \text{ mm (Abstand der GF zum Bildschirm)} / 155 * 0.0394 * 96 \text{ dpi} = 24.4 \text{ pt}$. Die Schriftgrößen auf den Anzeigesystemen des Schaufelradbaggers hätten also über Mindestschriftgrößen von ca. 24 pt verfügen müssen. Weiterhin ist auf Zeicheneindeutigkeit zu achten, d.h. es ist eine Schriftart zu wählen, in denen einzelne alphanumerischen Charakter gut voneinander unterscheidbar sind, z.B. l und I oder 0 und O. Schließlich muss der Bildschirm möglichst frei von Reflexionen sein und eine Helligkeit von mind. 100 cd/mm² sowie einen Kontrast von mind. 4:1 umfassen.

Vermeidung von Beurteilungen aufgrund absoluter Werte Urteile anhand einzelner sensorischer Variablen wie Größe oder Farbe können fehlerbehaftet bzw. schwer unterscheidbar sein, da solche Variablen viele denkbare Ausprägungen haben könnten. Beispielsweise sollte es vermieden werden, die aktuelle Fördermenge anhand eines Farbtons wiederzugeben, der sich je nach Leistung ins Rötliche oder Grünliche verfärbt. Stattdessen sollten ggf. relative Variablen, jeweils in Bezug auf Referenzen verwendet werden (Förderleistung relativ zur Soll-Vorgabe) oder der stetige Parameter in wenige, eindeutig disjunkte Kategorien herunter gebrochen werden (bspw. grün, gelb und rot bei Stromaufnahme in der vorliegenden Gestaltungslösung).

Erwartungskonformität Bei der Informationsaufnahme werden visuelle Signale auch unter dem Einfluss von Vorwissen verarbeitet. Dabei werden Signale in den Zusammenhang mit vorherrschenden Rahmenbedingungen gestellt, um so bekannte Objekte schneller und effizienter einordnen zu können. Bei der Erwartungskonformität von Displayelementen ist es daher wichtig, dass die Anzeigen nicht den Erfahrungen und Erwartungen des Maschinenführers widersprechen. So ist sicherzustellen, dass sich einzelne Elemente an vorherrschenden Konventionen orientieren. Beispielsweise erscheinen für gewöhnlich Buttons und Schaltflächen wie aus der umgebenden GUI

herausgehoben und Eingabefelder wie hineingedrückt. Diese Unterscheidung aufgrund von Farbkodierung vorzunehmen wäre irreführend, da es dem Vorwissen des Geräteführers widerspricht.

Redundanz Wenn ein Signal mehrfach kodiert präsentiert wird, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es richtig verarbeitet wird. Das kann durch die gleichzeitige Darbietung eines Wertes in unterschiedlichen Ausprägungen erfolgen (z.B. Farbe *und* Form). Eine Ampel in Straßenverkehr bildet beispielsweise die Signale redundant ab (Position und Farbe). In der vorliegenden Displaygestaltung wurde die Leistungsaufnahme so visualisiert, dass sich Höhe der Säulen im Diagramm und die Farbe der Balken ändern (vgl. Abbildung 16).

Unterscheidbarkeit Die Unterscheidbarkeit einzelner Elemente gewährleistet eine effizientere Verarbeitung und beugt Verwechslungen vor. Dabei hängt die Unterscheidbarkeit vom Anteil identischer Merkmale an unterschiedlichen Merkmalen ab. In der vorliegenden Umgestaltung wurden beispielsweise Schwenkwinkel und künstlicher Horizont so visualisiert, dass trotz Abbildung von Winkeln in beiden Elementen, beide Domänen gut unterschieden werden können. Das liegt an der unterschiedlichen Farbgebung, gut differenzierbaren beweglichen Elementen (Zeiger vs. Horizont) und der festen Positionierung.

Mentale Modellbildung

Die Interpretation eines Displays basiert auf den Erfahrungen und Erwartungen des Benutzers. Diese Erwartungen werden durch das mentale Modell bestimmt, das ein Nutzer aufgrund vorangegangener Erfahrungen und Expertise ausgebildet und geformt hat. Daher ist es wichtig, die Anzeigen so zu gestalten, dass sie möglichst gut mit dem mentalen Modell des Nutzers korrespondieren.

Bildhafter Realismus Anzeigeelemente sollen eine möglichst große Ähnlichkeit mit dem abgebildeten realen Gegenstand bzw. physische Zustand haben. So sollten beispielsweise kontinuierliche Variablen analog und diskrete Zustände digital präsentiert werden. Ein weiteres Beispiel ist die Darbietung einer Fehlerquelle mittels einer schematischen Übersichtsdarstellung der Maschine als effizienter erfassbare Alternative zu bloßen Fehlermeldungen in Form von Text (vgl. Abbildung 15).

Bewegliche Elemente Bewegungsrichtung und -muster von Anzeigeelementen sollen mit dem mentalen Modell des Benutzers in Übereinstimmung stehen. Beispielsweise sollte sich ein Anzeigeelement, das einen steigenden Wert anzeigt, nach oben bewegen. Dieses Prinzip des natürlichen Mappings wurde an vielen Stellen beim Redesign der Schaufelradbagger-GUI verwendet: der Schwenkwinkelanzeiger bewegt sich von links nach rechts wie auch der Schaufelradausleger, Förderleistung und Leistungsaufnahmeanzeigen steigen und fallen und die Bewegung des künstlichen Horizontes entspricht der Neigungsänderung des Fahrwerkes.

Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeitszuwendung des Benutzers auf unterschiedliche Teile des Displays bzw. auf Informationen außerhalb eines Displays ist wichtig, wenn Informationen aus verschiedenen Quellen miteinander in Verbindung gebracht werden sollen. Die folgenden Prinzipien helfen dabei, die Integration unterschiedlicher Informationsströme während einer Tätigkeit möglichst effizient zu gestalten.

Zugänglichkeit von Informationen Wenn es für die Aufgabe eines Benutzers von Bedeutung ist, Informationen aus verschiedenen Quellen zu integrieren bzw. gleichzeitig zu nutzen (z.B. Informationen aus der physikalischen Umwelt und Informationen auf dem Display) dann sollte der Aufwand des Wechsels zwischen diesen Informationsquellen möglichst gering gehalten werden. Da das Verlagern der Aufmerksamkeit mit Zeit und kognitivem Aufwand verbunden ist, sollten wichtige und zusammengehörige Informationen deshalb räumlich nah angeordnet sein. Die vorliegende Neugestaltung wurde u.a. mit dem Anliegen vorgenommen, den Weg zwischen Anzeige und physischem Schaufelrad zu minimieren. Das konnte allein durch die Anbringung des Monitors erzielt werden; es waren keine Kopfbewegungen mehr nötig, um zwischen beiden Informationsquellen zu wechseln. Auch innerhalb des Displays wurde Wert auf Positionierung der Elemente gelegt. So ist bspw. die aktuelle Fördermenge zentral zwischen den Parametern zur Leistungsaufnahme angebracht. So kann der GF die Leistung peripher (also im Augenwinkel) beurteilen, während er auf die Anzeige zur Förderleistung fokussiert ist.

Nähe und Kompatibilität Das Gestaltungsprinzip von Nähe (Proximität) und Kompatibilität fordert eine Passung zwischen Aufgabe und Displayeigenschaften. Erfordert eine Aufgabe das Integrieren von Informationen (hohe Aufgaben- oder Verarbeitungsproximität), so sollten die Displayelemente ebenfalls eine hohe perzeptuelle bzw. Displayproximität aufweisen und umgekehrt. Letztere kann auf unterschiedliche Weise manipuliert werden. So kann die Displayproximität durch die Integration zusammengehöriger Werte zu einem Wahrnehmungsobjekt erreicht werden. Der künstliche Horizont (vgl. Abbildung 16) vereint Quer- und Längsneigungswinkel zu einem beweglichen Wahrnehmungsobjekt. Beide Parameter können vom GF so parallel verarbeitet werden und kodieren daher effizienter als getrennte Anzeigen. Gleiches gilt für das Zusammenführen von Ist- und Sollförderleistung.

Multiple Ressourcen Einem Benutzer fällt es leichter, Informationen aus unterschiedlichen modalen Quellen zu verarbeiten. Deswegen kann eine Aufteilung der Informationsflüsse auf verschiedene Ressourcen nützlich sein (z.B. visuell *und* auditiv statt lediglich visuell). Beispielsweise kann nur mit einem auditiven Signal wirklich sichergestellt werden, dass ein wichtiges Ereignis wirklich wahrgenommen wird (Alarm, Sirene). Allerdings ist die Spezifität beim Verarbeiten auditiver Signale eher gering, so dass die genaue Identifikation des Fehlers dennoch visuell erfolgen sollte. Weiterhin sollte akustisches Feedback sparsam und nur für wichtige Ereignisse eingesetzt werden. Es konnte aber schon oft gezeigt werden, dass ein auditives Begleitsignal die Reaktionszeit auf ein visuelles Signal verkürzen kann.

Gedächtnis

Neben der Aufnahme externer Informationen greifen Personen auch auf interne Ressourcen wie Gedächtnisinhalte zurück. Ein gut gestaltetes Display kann dem Benutzer aber einen Teil dieser kognitiven Prozesse erleichtern, z.B. indem es als Gedächtnisstütze benutzt wird. Die gedächtnisbasierten Prinzipien haben das Ziel, interne Kognitionen effizienter zu gestalten.

Externes Gedächtnis Informationen, die auf der Anzeige ablesbar sind, müssen vom Benutzer nicht aus dem Gedächtnis abgerufen werden. Sie sind entsprechend extern gespeichert und schonen so kognitive Ressourcen des Benutzers. Dieses Prinzip erfordert Abwägungen bzgl. der Sparsamkeit der Darstellung. In der Praxis erleichtert das Darbieten von Checklisten (z.B. beim Anlassen der

Maschine) das Gedächtnis. Auch die sparsame Visualisierung von Systemzuständen (im einfachsten Fall an/aus) beugt Gedächtnisfehlern vor.

Vorhersagehilfen Vorhersagehilfen unterstützen den Benutzer bei der Antizipation zukünftiger Systemzustände indem sie kognitiv aufwendige Vorhersageprozesse in simple Wahrnehmungsprozesse umwandeln. Ein bekanntes Beispiel für prädiktive Anzeigen sind die Entfernungsschilder im Straßenverkehr. In Führerständen von Fördermaschinen könnte dieses Prinzip in Form von einfachen Markern in der Schwenkwinkelanzeige integriert werden, die das Flözende anzeigen.

Konsistenz Merkmale von Displayelementen (z.B. Kodierung, Position, Farbe) sollten innerhalb des gesamten Visualisierungssystems einheitlich verwendet werden. Das erlaubt effizienteren Wissenstransfer, gewährleistet ein erleichtertes Erlernen des Systems und beugt Verwechslungen vor. Farbkodierung, die für best. Betriebszustände stehen, sollten unbedingt absolut einheitlich auf allen verfügbaren Displaysystemen verwendet werden. Außerdem sollten diese Farben nicht mit anderen Farbsystemen (wie etwa farbige GUI-Elemente zur Differenzierung von Dialogen) konfliktieren.

5.2.2. Gebrauchstauglichkeit

Neben Prinzipien, Leitlinien und Checklisten zur Gestaltung von Anzeigesystemen existieren auch internationale Normen mit Bezug zu menschengerechter Displayaufbereitung. Die europäische Norm EN ISO 9241 definiert Kriterien für die Mensch-Computer-Interaktion. Sie umfasst neben einigen allgemeinen Standards zur ergonomischen Arbeitsumgebung v.a. Standards bzgl. Hardware (Eingabegeräte, Monitore, Reflexionen) und Software-Usability. Prominent ist dabei v.a. Teil 9241-110 „Grundsätze der Dialoggestaltung“. In ihrer ursprünglichen Form wurde die Normung für Büroarbeitsplätze ausgelegt. Bedienerplätze von Maschinen oder Fahrerplätze fallen zwar ausdrücklich nicht in ihren Gültigkeitsbereich, allerdings kann das mangels Alternativen und vielfältiger Weiterentwicklungen seit der Ursprungsfassung als Versäumnis angesehen werden. Schneider [52] weist darauf hin, dass es dennoch adäquat sei, die Norm in erweiterten Kontexten anzuwenden, da die ergonomischen Prinzipien als allgemeingültig erachtet werden können. Die EN ISO 9241-110 selbst umfasst dabei folgende Punkte:

Aufgabenangemessenheit Funktionalität und Dialogführung unterstützen den Nutzer bei der Erledigung der Aufgabe; Dialogschritten spiegeln auf charakteristischen Eigenschaften der Arbeitsaufgabe wider, nicht die eingesetzte Technologie

Selbstbeschreibungsfähigkeit Dem Nutzer soll zu jeder Zeit offensichtlich sein, an welcher Stelle er sich im Dialog befindet und welche Handlungsmöglichkeiten er besitzt.

Erwartungskonformität Der Dialog entspricht vorhersehbaren Nutzerbelangen und allgemein anerkannten Konventionen.

Lernförderlichkeit Der Nutzer wird beim Erlernen des interaktiven Systems unterstützt und angeleitet.

Steuerbarkeit Der Nutzer ist in der Lage, einen Dialogablauf zu starten sowie Ausführungsrichtung und Geschwindigkeit zu beeinflussen.

Fehlertoleranz Das Arbeitsergebnis kann trotz fehlerhafter Eingaben mit keinem oder minimalen Korrekturaufwand erreicht werden.

Individualisierbarkeit Interaktion mit und Darstellung von Informationen können an individuelle Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden.

Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10 versteht sich als direkte Operationalisierung der entsprechenden ISO-Norm. Er umfasst jeweils fünf Items (siebenstufige Skala) für jedes der sieben Hauptkriterien. Er wurde an über 1200 Probanden validiert und normiert [53]. Bei der Anwendung im vorliegenden Projekt wurde allerdings schnell der ursprüngliche Hintergrund der Norm als Kriterienkatalog für Büroarbeitsplätze offensichtlich. So liegt für einige Kriterienbereiche keine ausreichende Passung zu Industrie- bzw. Maschinenarbeitsplätzen vor. Der Hauptunterschied besteht dabei in der Art der Dialogführung. Die Dialogführung eines Displaysystems im Schaufelradbagger ist im Wesentlichen darauf ausgelegt, Systemzustände anzuzeigen. Der Informationsfluss läuft also vorrangig nur in eine Richtung ab. Eine Manipulation dieser Zustände wird in der Regel indirekt erreicht, indem das Tagebaugerät angesteuert wird und sich erst dadurch Änderungen ergeben.

Vorliegende Normen heben aber in weiten Teilen auf die *Dialogführung* ab, also die direkte Interaktion mit der GUI. In der vorliegenden Form sind daher Norm und Fragebogen nur in Auszügen geeignet, um Mensch-Maschine-Interaktion in Tagebaugroßgeräten zu erfassen. Der Verfahrenskanon enthielt daher passende bzw. leicht veränderte Varianten der Items aus dem Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10 und wurde in weiten Teilen durch selbst konstruierte Items vor dem Hintergrund unterschiedlicher Gestaltungskriterien zum Displaydesign ergänzt.

5.2.3. *Schwingungen*

Der negative Effekt von Kabinenschwingung auf die visuelle Wahrnehmung ist schon seit Jahren bekannt. Nach [54] tritt eine Verschlechterung der visuellen Wahrnehmungsgenauigkeit v.a. im Bereich zwischen 2 und 20 Hz auf. Das Ausmaß hängt dabei stark von der Schwingungsamplitude ab. Gegebenenfalls müssen Schriftgrößen (v.a. in Schwingungsrichtung) und Zeichenabstände angepasst werden. Weiterhin ist es von Vorteil, wenn sowohl Bediener, als auch Anzeigesystem gleichförmig schwingen (das ist der Fall im Schaufelradbagger) anstatt sich relativ zueinander bewegen [55]. Auch Dämpfungssysteme sind v.a. dann besonders nützlich, wenn die Dämpfung auf Display und Geräteführer gleichermaßen wirkt [56]. Es ist daher durchaus sinnvoll, nicht nur den Sitz, sondern gleichermaßen das Anzeigesystem zu dämpfen oder beide zu verbinden. Bei allen Überlegungen zur Dämpfung ist zu beachten, dass der menschliche Körper in der Lage ist, selbst einen Teil der Schwingungen zu kompensieren.

6. VR-Demonstrator

Die Entwicklungsumgebung wurde nach Anpassung an die erzielten Untersuchungsergebnisse in ein Demonstrationsobjekt überführt. Da die Simulation des Anwendungsbeispiels Schaufelradbagger einen relativ hohen hardware- und softwareseitigen Aufwand erfordert, ist das Demonstrationsbeispiel gegenwärtig in der VR-Umgebung der Professur für Baumaschinen- und Fördertechnik umgesetzt. Nur hier sind Präsentationen möglich (und wurden bereits durchgeführt), bei denen man den Anforderungen an die Integration von Simulationsmodell und psychologischen Bewertungsverfahren gerecht werden kann. Auf dem institutseigenen Webportal <http://www.baumaschine.de/mmi> sind zudem ergänzende Informationen zu Ziel und Durchführung des Projekts aufbereitet. Anhand von Text und Videomaterialien werden System und Wirkprinzipien illustriert. Insgesamt soll mit dem Demonstratorbeispiel verdeutlicht werden, welche Auswirkungen Gestaltungslösungen auf funktionale Bedienhandlungen (aus der Joystick-Potentiometer-Kombination) und den Zusammenhang von Maschine, Prozess und Wahrnehmung haben können. Durch Anpassung der Parameter im Modell lassen sich ähnliche Frage- und Problemstellungen von Nutzern aus Industrie und anderen Bereichen bearbeiten.

7. Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Im durchgeführten Forschungsvorhaben wurde eine strukturierte Methodik *zur Bewertung und Gestaltung von Bedienungsumgebungen* geschaffen. Grundlage des Verfahrens ist eine als VR-Simulation umgesetzte Situation, die in wesentlichen Aspekten den Aufgabenanforderungen des Arbeitsprozesses und der -umgebung in Tagebaugroßgeräten entspricht. Im deutschsprachigen Raum sind bisher keine qualitativ vergleichbaren Umsetzungen einer solchen Situation als VR bekannt. Neben der Implementierung einer solchen VR-Umgebung, wurde im Vorhaben auch ein strukturiertes Vorgehen beschrieben, mit welchem die wichtigsten Eckpunkte, die zu Gestaltung der VR Umgebung notwendig waren (z.B. zu simulierender Bedienprozess, Bedienelemente und Funktionen, Prozessrestriktionen), erhoben werden können.

Weiterhin enthält die vorgestellte Methodik Ansätze zur Analyse und Ableitung von Gestaltungspotential einer existierenden Mensch-Maschine-Schnittstelle, die Übertragung dieses Gestaltungspotentials in eine optimierte Gestaltungslösung, ein methodisches Vorgehen zur Analyse der Auswirkung neuer Gestaltungskonzepte auf den MMI Prozess und das Bedienverhalten anhand kontrollierter Experimente in der VR-Umgebung, sowie Analyse- und Bewertungsverfahren, um die Auswirkungen der Gestaltungslösung auf den Bedienprozess evaluieren zu können. Ein wesentliches Augenmerk wurde auf die im Prozess notwendigen Informationsflüsse und auf die Analyse der Informationsverarbeitungsprozesse beim Bediener gelegt. Als Instrument zur Analyse wurde hierfür unter anderem die Methode der Blickbewegungsmessung eingesetzt. Bisher wurde die Methodik meist nur im Bereich der Evaluierung von Assistenzsystemen und Cockpitgestaltung im Automobilbereich eingesetzt. Im Rahmen unserer Arbeiten wurde der inkrementelle und erklärende Wert solcher Methoden aufgezeigt, sowie grundsätzliche Ansätze zur Analyse und Verwendung solcher Daten dargestellt.

Mit der Methodik wird ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung moderner Systemkomponenten für Steuerungs- und Automatisierungslösungen geschaffen. Dabei ist es zunehmend nicht nur von essentieller Bedeutung, dass diese mit hochwertiger industrieller Messtechnik sowie modernen Kommunikationsmitteln zur Instandhaltung und Störungsanalyse ausgestattet werden, sondern, solange der Mensch als wichtige Komponente im System bleibt, sind zudem zukunftsorientierte Visualisierungskonzepte ein entscheidender Beitrag für die Funktionalität und Akzeptanz der Produkte. Darüber hinaus kann das Verfahren auch eingesetzt werden, um die Entwicklung von Industrieautomation (von der Einzelplanung bis zur Komplettlösung ganzer Anlagen) zu unterstützen, indem Produkte vor dem ersten Einsatz mit Hilfe von virtuellen Prototypen getestet werden können.

Die Durchführung virtueller Funktionstests zur gesamtheitlichen Betrachtung von Mensch und Maschine mit dem Ziel der Ableitung von Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich leichter Erlernbarkeit / intuitiver Bedienbarkeit der Funktionen und gleichzeitig guter Maschinenbeherrschbarkeit ist eine anspruchsvolle Herausforderung. Dazu sind die relevanten Parameter innerhalb der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu identifizieren, welche einen maßgeblichen Einfluss auf das Bedienerverhalten haben. Mithilfe des im Rahmen des Projektes entwickelten virtuellen Maschinenmodells und der geschaffenen Messmethode können solche Aufgaben *effizient* gelöst werden.

Erwartet wird eine zeitliche Verkürzung der Entwicklungszyklen die zur Implementierung neuer Gestaltungsmerkmale und Systemfeatures notwendig sind. Der Einsatz von VR ermöglicht dabei eine gezielte und systematische Vorauswahl und Einstellung der entsprechenden Schnittstellenparameter. Für das untersuchte Maschinenmodell erfolgte zunächst die Fokussierung auf eine Verbesserung von Bedienvorgängen sowie auf eine Optimierung hinsichtlich der Anforderungen, die durch komplexere Betriebsführung in der Gewinnungsprozessstrecke entstehen. Langfristig, kann durch die vorgeschlagene Methodik sukzessive eine immer weitere Anpassung der Maschine an personenspezifische aber auch montane Befindlichkeiten und Zustände des Maschinenführers und die Arbeitsaufgabe erreichbar sein. Damit wird insgesamt zukünftigen Trends im Bereich Ergonomie Rechnung getragen, wo von einer Entwicklung zu stärker adaptiven und menschenzentrierten interaktiven Schnittstellen ausgegangen werden kann.

8. Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse insbesondere für KMU

Es ist auffällig, dass es bezüglich der Leistungserbringung komplexer Betriebsführungssysteme eine umfangreiche Arbeitsteilung der namhaften E- Anlagenbauer mit einer Vielzahl von KMUs für die Gestaltung von Benutzeroberflächen gibt. Dieser Zustand begründet sich durch die funktionale Abgrenzbarkeit der erforderlichen Programmierleistung, dem Bedarf an einem sehr tiefgehenden Spezialwissen für die Leistungserbringung und die wertmäßige Handhabbarkeit dieser Vorgänge für KMU. Neben der reinen Programmierung bestehen Beiträge der KMU aus industrienahen Spezialdienstleistungen bzgl. Analytik, Design und deren Umsetzung. Sie sind gekennzeichnet durch einen relativ geringen Bedarf an Investitionskosten für erstellte Leistungen (entsprechend konzipierten Bausteine und Module einer optimierten Bedienungsumgebung) bei gleichzeitig hohem Grad an Übertragbarkeit/Reproduzierbarkeit für ähnliche Projekte.

Durch die hohe Entwicklungsdynamik der Elektronikindustrie müssen die bereits heute vorhandenen Systeme der Betriebsführung einer systematischen Neugestaltung bzw. Migration unterzogen werden. Durch den bereits genannten hohen Grad der Arbeitsteilung bei der Entwicklung und Errichtung von Betriebsführungssystemen kommt es wahrscheinlich nicht zu einer Bildung völlig neuer Geschäftsfelder. Es ist eher davon auszugehen, dass es einen qualitativ höherwertigen Verbund zwischen angewandter Ergonomie und der Automatisierungsleistung geben wird.

Mit dem erarbeiteten Verfahren können KMU gegenüber ihren Auftraggebern die Funktionalität und erhöhte Gebrauchstauglichkeit erarbeiteter Lösungen empirisch nachweisen, ohne dass ein Eingriff in bestehende Produktions- und Gewinnungsprozesse notwendig ist. Kostenintensive Fehlentwicklungen beim Umbau der Leitstände in Tagebaugroßgeräten sowie damit einhergehende Stillstandzeiten können vermieden werden. Auf Basis der durch das Bewertungsverfahren erzielten Ergebnisse können notwendige Anpassungen und Weiterentwicklungen eines Bedienstandes in einem iterativen, kontinuierlichen und interaktiven Prozess zwischen KMU und Auftraggeber erarbeitet und vorangetrieben werden. Vereinheitlichte Bewertungsstandards erleichtern den Informationsaustausch und sichern eine zielgerichtete Entwicklungsarbeit. Mit der Quantifizierung funktionaler Abhängigkeiten des Systems Bediener-Maschine-Prozess wird eine gemeinsame Entwicklungsbasis möglich.

Die Methodik erlaubt die Implementierung und Testung neuer Bedienkonzepte zeitlich weit im Voraus. Problemstellen, die durch komplette Um- oder Neustrukturierung von Prozessketten entstehen, können vorab identifiziert und Fehlentwicklungen frühzeitig vermieden werden. Damit kann die Methode einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil für KMUs darstellen.

Über die Abschätzung der Maschinenbelastung aus dem Bedienverhalten im VR-Modell können Leistungsdaten, Stillstandzeiten und damit Prozesseffizienz und -stabilität hergeleitet werden. Damit können a-priori Investitionsaufkommen und Leistungsgewinn für eine Neugestaltung gegenübergestellt und deren Rentabilität geprüft werden. Auch Fehlbeanspruchungen durch ungünstige Aufgabenprofile können mit dem Verfahren aufgedeckt und damit ein Ausfall von Arbeitskräften aufgrund Fehlbeanspruchungsfolgen (wie z.B. Stress oder Monotonie) entgegengewirkt werden.

Nicht zuletzt können optimierte MMI-Lösungen neben funktionellen Verbesserungen auch zu einem optisch und gestalterisch verbesserten Aussehen führen, welche gleichzeitig auch mit einer positiveren Produktbewertung einhergeht. Dies kann ein wesentlicher Vorteil für Kundenbindung und bei Neukundenakquise über den in diesem Projekt angedachten Einsatzkontext hinaus sein.

Auf Grund der prinzipiellen Ähnlichkeit der Anforderungen an Betriebsführungssysteme ist grundsätzlich von einer branchenübergreifenden Anwendung der neuen Erkenntnisse auszugehen. Der Anbietermarkt für derartige Anwendungen ist durch Neuzugänge und Firmenübernahmen sehr dynamisch und liegt in einem Größenbereich von ca. 40... bis 60 Firmen. Die Erstanwendung der erreichbaren Zwischenergebnisse wird auf Anlagen der Montanindustrie durchgeführt. Die einbezogenen KMUs sind mit Ihrem verfügbaren Kundenkreis wesentlich umfassender aufgestellt und sichern damit den Transfer auch in andere Branchen, wie z. B. der Chemie, des Facilities-Managements, der Verkehrsführung und der Land- und Baumaschinen.

Eine zusätzliche Motivation ist das erklärte Bestreben vieler Unternehmen und Industriebereiche, den eingetreten demografischen Veränderungen mit geeigneten Methoden entgegenzutreten. Das

betrifft auch die Umgestaltung bestehender Betriebseinrichtungen zur Vermeidung von Leistungs- und Sicherheitsverlusten bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Effektivität und Effizienz. Im Rahmen eines integrierten Gesundheitsmanagements ist auch die Vermeidung von berufsbedingten Erkrankungen und Ausfällen bei Wissens- und Leistungsträgern ein wesentlicher Baustein und führt wiederum zu neuen Anforderungen bei der Gestaltung neuer bzw. bereits verfügbarer wert – und wissensintensiver Betriebsmittel.

Damit entsteht besonders für die im Projekt beteiligten softwareherstellenden KMU (IT-Dienstleister) ein neuer Markt. Die Anwendung von innovativen Untersuchungsmethoden (z.B. Eye Tracking Verfahren) in virtuellen Umgebungen ist ein typisches Beispiel, wie unter Verwendung neuester Entwicklungen der Softwaretechnologie neue Wirtschaftsbereiche erschlossen werden können. Besonders flexibel agierende KMU weisen dabei ein gewaltiges Entwicklungspotenzial auf.

Das gilt im besonderen Maße für KMU im Dienstleistungsbereich des Datenmanagements für Unternehmen. Bisher verfolgen diese KMU vorrangig das Ziel, die Gestaltung von PLM₂-basierten Prozessen im technischen Bereich eines Unternehmens zu unterstützen. Aktuelle Trends zeigen jedoch, dass diese Kernkompetenz erweitert werden muss, um auf dem Markt bestehen zu bleiben. Der Einsatz von VR-Technologien in technischen Anwendungen bietet umfassende Potenziale für eine solche Ausweitung des Geschäftsfeldes. Für zahlreiche Unternehmen wird der *effiziente* Einsatz von VR-Technologien zu einem wichtigen Faktor zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit. Eine Breitanwendung von Virtual Reality-Anwendungen in der Industrie wird erwartet. Das sichert, dass auch IT-dienstleistende KMU ihren Trend des kontinuierlichen Wachstums der Mitarbeiterzahlen weiter fortsetzen werden.

9. Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden keine Anmeldungen durchgeführt und es sind auch keine beabsichtigt.

VI. Literatur

- [1] B. M. Velichkovsky, A. Rothert, M. Kopf, S. M. Dornhöfer, und M. Joos, „Towards an express-diagnostics for level of processing and hazard perception“, *Transportation Research*, Bd. 5, S. 145–156, 2002.
- [2] H. Rühmann und H. Bubb, „Fahrerassistenzsysteme–Ein Gewinn an Sicherheit und Komfort oder elektronischer Schnickschnack“, *Ergonomie aktuell*, Bd. 7, 2006.
- [3] K. Schattenberg, „Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen: Untersuchungen zur sicherheitsoptimierten Gestaltung und Positionierung von Anzeige- und Bedienkomponenten im Kraftfahrzeug“, Bibliothek der RWTH Aachen, 2002.
- [4] M. A. Just und P. A. Carpenter, „A theory of reading: From eye fixation to comprehension“, *Psychological Review*, Bd. 87, S. 329–354, 1980.
- [5] J. G. Hollands und C. D. Wickens, *Engineering psychology and human performance*. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [6] M. Joos, M. Rötting, und B. M. Velichkovsky, „Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen“, in *Psycholinguistik/ Psycholinguistics. Ein internationales Handbuch/ An International Handbook*, G. Rickheit, T. Herrmann, und W. Deutsch, Hrsg. Berlin: de Gruyter, 2003, S. 142–168.
- [7] K. M. Stanney, *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2002.
- [8] M. Olbert, *Methode zur interaktiven Informationsvisualisierung für virtuelle Prototypen in der Entwicklung von Flugzeugkabinen*. Univ., Inst. f. Statik u. Dynamik d. Luft-u. Raumfahrtkonstruktionen, 2006.
- [9] M. Bues, M. Dangelmaier, und G. Wenzel, „Virtuelle prototypen mit VRfx“, *Werkstattstechnik online*, Bd. 97, Nr. 1/2, S. 17–22, 2007.
- [10] F. Engstler, „Virtual Reality als Hilfsmittel zur Beantwortung ergonomischer Fragestellungen“, *Ergonomie Aktuell*, Nr. 7, 2006.
- [11] A. Paul, „Beschleunigte Entwicklungsprozesse/Optimierung der Innenraumentwicklung von Großraumlimousinen mit VR“, *CAD News Magazin*, Bd. 5, 2006.
- [12] J. Rausch, K. Siebertz, S. T. Christensen, und J. Rasmussen, „Simulation des menschlichen Bewegungsapparates zur Innenraumgestaltung von Fahrzeugen“, *VDI-Berichte*, Bd. 1967, Nr. 2, S. 1027–1048, 2006.
- [13] M. Schmid, „Virtuelle Realität im Bergbau: VR Welten, VR Simulatoren und VR Teamtraining“, *Bergbau*, Bd. 11, S. 491–495, 2005.

- [14] „Welcome to 5DT Mining - Mining Equipment Training“. [Online]. <http://www.mining.5dt.net/>.
- [15] „Virtual Surface Mining“. [Online]. <http://vr.tu-freiberg.de/tagebau/index.html>.
- [16] T. Penndorf und G. Kunze, „Codegenerator für die Echtzeitsimulation von Mehrkörpersystemen“, presented at the ASIM 2006 19. Symposium Simulationstechnik, Hannover, 2006.
- [17] G. Kunze, T. Penndorf, und I. Gubsch, „„Durchgespielt‘- Interaktive Simulation von Baumaschinen“, *IX - Magazin für professionelle Informationstechnik*, Bd. 8, 2007.
- [18] G. Kunze, T. Penndorf, und I. Gubsch, „„Sarturis‘ - Modulare Softwarearchitektur für die interaktive Simulation von Maschinen- und Fahrzeugsystemen in virtuellen Umgebungen“, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Abschlussbericht BMBF-Förderkennzeichen 01|SC24, 2008.
- [19] G. Kunze, C. Schubert, E. Esswein, und S. Lehrmann, „Software Architecture for Interactive Simulation of Mobile Machinery“, in *Proceedings of the 1st Commercial Vehicle Technology Symposium*, 2010.
- [20] M. Mothes, „Modellbildung von Bodensstoffen in virtueller Umgebung: Simulation mobiler Arbeitsmaschinen“, *Wissensportal baumaschine.de*, 2003. [Online]. <http://www.baumaschine.de/wissensportal-archiv/2003-01>.
- [21] T. Gruening, G. Kunze, und A. Katterfeld, „Simulation maschineller Erdbauprozesse“, presented at the 15. Fachtagung Schüttgutförderertechnik 2010, München, 2010.
- [22] P. Hoske, K. Bürkle, I. Gubsch, C. Kamusella, und G. Kunze, „Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen (Teil 3)“, *Wissensportal baumaschine.de*, 2010. [Online]. <http://www.baumaschine.de/wissensportal-archiv/2010-02>.
- [23] I. Gubsch, P. Hoske, und K. Bürkle, „Untersuchung des Bedienerverhaltens in mobilen Baumaschinen durch interaktive Simulationen in virtuellen Umgebungen“, Tag der Deutschen Baumaschinenteknik, Meerane, 2010.
- [24] W. Hacker, *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1973.
- [25] J. Rasmussen, A. M. Pejtersen, und L. P. Goodstein, *Cognitive systems engineering*. New York: John Wiley, 1994.
- [26] J. Reason, *Menschliches Versagen*. Spektrum, Akad. Verlag, 1994.
- [27] H. Bubb, „Systemergonomische Gestaltung“, *Ergonomie*, Bd. 3, S. 390–420, 1993.
- [28] K. F. Kraiss, „Mensch-Maschine-Dialog“, *Ergonomie*, Hrsg.: Schmidtke, H, Bd. 3, S. 446–458, 1993.
- [29] T. B. Sheridan, *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT press, 1992.

- [30] A. Pohlandt, P. Jordan, G. Rehnisch, und P. Richter, „REBA- Ein rechnergestütztes Verfahren für die psychologische Arbeitsbewertung und-gestaltung“, *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, Bd. 40, Nr. 2, S. 63–74, 1996.
- [31] A. Pohlandt und F. Schulze, *REBA-AS-Handbuch: Rechnergestütztes Verfahren für die Bewertung und Gestaltung im Arbeits- und Gesundheitsschutz*. TU, Professur für Arbeits- und Organisationspsychologie, 1997.
- [32] H.-E. Plath und P. Richter, *Ermüdung-Monotonie-Sättigung-Streß. Verfahren zur skalierten Erfassung erlebter Beanspruchungsfolgen*. Göttingen: Hogrefe, 1984.
- [33] J. C. Flanagan, „The critical incident technique.“, *Psychological bulletin*, Bd. 51, Nr. 4, S. 327, 1954.
- [34] W. Durst, W. Vogt, und L. Rasper, *Schaufelradbagger*. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1986.
- [35] L. Bainbridge, „Ironies of automation“, *Automatica*, Bd. 19, Nr. 6, S. 775–779, 1983.
- [36] T. Penndorf und S. Spickereit, „Framework zur CAN-Adaption für die interaktive Simulation“, *Wissensportal baumaschine.de*, 2006. [Online]. <http://www.baumaschine.de/wissensportal-archiv/2006-01>.
- [37] E. Hoddes, W. Dement, und V. Zarcone, „The development and use of the Stanford sleepiness scale (SSS)“, *Psychophysiology*, Bd. 9, Nr. 150, 1972.
- [38] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research“, *Human mental workload*, Bd. 1, S. 139–183, 1988.
- [39] B. Müller und H.-D. Basler, *Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung: Manual*. Weinheim: Beltz, 1993.
- [40] A. Seffah, M. Donyaee, R. B. Kline, und H. K. Padda, „Usability measurement and metrics: A consolidated model“, *Software Quality Journal*, Bd. 14, Nr. 2, S. 159–178, 2006.
- [41] D. M. Johnson, „Introduction to and review of simulator sickness research“, DTIC Document, 2005.
- [42] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, und M. G. Lilienthal, „Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness“, *The international journal of aviation psychology*, Bd. 3, Nr. 3, S. 203–220, 1993.
- [43] B. G. Witmer und M. J. Singer, „Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire“, *Presence*, Bd. 7, Nr. 3, S. 225–240, 1998.
- [44] B. M. Velichkovsky, M. Joos, J. R. Helmert, und S. Pannasch, „Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception“, in *Proceedings of the XXVII Conference of the Cognitive Science Society*, Stresa, Italy, 2005, S. 2283–2288.

- [45] K. Ball, C. Owsley, M. E. Sloane, D. L. Roenker, und J. R. Bruni, „Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers.“, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Bd. 34, Nr. 11, S. 3110–3123, 1993.
- [46] B. M. Velichkovsky, M. Pomplun, und J. Rieser, „Attention and communication: Eye-movement-based research paradigms“, in *Attention and Cognition*, W. H. Zangemeister, H. S. Stiel, und C. Freksa, Hrsg. Amsterdam: Elsevier, 1996, S. 125–154.
- [47] C. D. Wickens und C. M. Carswell, „The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design“, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 37, S. 473–494, 1995.
- [48] C. D. Wickens, J. Lee, Y. D. Liu, und S. Gordon-Becker, *Introduction to Human Factors Engineering (2nd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2004.
- [49] J. Nielsen und R. Molich, „Heuristic evaluation of user interfaces“, in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Empowering people*, 1990, S. 249–256.
- [50] M. G. Helander, T. K. Landauer, und P. V. Prabhu, *Handbook of Human-Computer Interaction*. Elsevier, 1997.
- [51] B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen, und S. Jacobs, *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, 5. Aufl. Addison-Wesley, 2009.
- [52] W. Schneider, *Ergonomische Gestaltung von Benutzungsschnittstellen / Kommentar zur Grundsatznorm DIN EN ISO 9241-110, 2.*, vollst. überarb. Aufl. Berlin ; Wien ; Zürich: Beuth, 2008.
- [53] J. Prümper, „Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität“, in *Software-Ergonomie '97- Usability Engineering: Integration von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung*, Bd. 97, R. Liskowsky, B. M. Velichkovsky, und W. Wünschmann, Hrsg. Stuttgart: Teubner, 1997, S. 253–262.
- [54] A. Nakashima und B. Cheung, „The Effects of Vibration Frequencies on Physical, Perceptual and Cognitive Performance“, 2006.
- [55] R. W. McLeod und M. J. Griffin, „Effects of whole-body vibration waveform and display collimation on the performance of a complex manual control task“, *Aviat Space Environ Med*, Bd. 61, Nr. 3, S. 211–219, 1990.
- [56] M. J. Moseley und M. J. Griffin, „A design guide for visual displays and manual tasks in vibration environments. Part 1: Visual displays“, 1986.

VII. Projektbezogene Veröffentlichungen

VIII. Plan zum Ergebnistransfer

Durchgeführte Transfermaßnahmen

Kick-Off-Meeting des Projektbegleitenden Ausschusses	04.03.2010
Workshop MAN TAKRAF GmbH in Lauchhammer	24.09.2010
Vortrag 14. Arbeitskreistreffen Monitoring von Prozessen der DEBRIV in Kerpen-Sindorf	20./21.10.2010
Vortrag zum Tag der Deutschen Baumaschinentechnik in Meerane	26.10.2010
Vortrag 15. Arbeitskreistreffen Monitoring von Prozessen der DEBRIV in Dresden	22.09.2011
mehrfache Beratungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss	
diverse Vorführungen der Versuchseinrichtung mit verschiedenen Unternehmen	

Geplante Transfermaßnahmen

- Veröffentlichung im Portal www.baumaschine.de
- Präsentation auf Veranstaltungen des FDBI
- Vorträge in relevanten Fachtagungen und Gremien