Arbeitsphysiologische Ansätze zur Erfassung der Beanspruchung bei der Anwendung innovativer Technologien

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

von M. Sc. Dipl.- Ing. Juan Sebastián Sánchez Márquez

geb. am 22.04.1982 in Mexiko Stadt

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

Prof. Dr. med. Irina Böckelmann

Promotionskolloquium am 25.07.2012

Meinen Eltern gewidmet

~

A mis padres

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemdarstellung 16

2. Theoretische und empirische Grundlagen 19

2.1 Definition von Belastung und Beanspruchung 19

2.2 Kardiophysiologische Beanspruchungsparameter 22

2.2.1 Herzaktivität als physiologischer Indikator psychischer Beanspruchung 22

2.2.2 Herzfrequenzvariabilität 23

2.2.3 Blutdruck 27

2.3 Mensch-Maschine Interaktion 27

3. Anwendung innovativer Technologien 29

3.1 Erweiterte Realität und Head Mounted Displays 29

3.1.1 Das Kontinuum zwischen Realität und virtueller Realität 29

3.1.2 AR-Displays 30

3.1.3 Anwendungsgebiete 31

3.1.4 Ergonomische Aspekte bei der Gestaltung von AR-Technologien 35

3.2 Ultraschall und Ultraschallanwendungen 39

3.2.1 Gefährdungsarten, Belastungsquellen und –folgen 43

4. Fragestellungen und Hypothesen 53

4.1 Studie zur physiologische Beanspruchungsanalyse und visuelle Beeinträchtigung durch kopfgetragene AR-basierte Werkerassistenzsysteme (AR-Studie) 53

4.2 Begleitstudie zu Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz bei Ultraschall-Verfahrensentwicklung und Aggregatetechnik zur Vergütung von Legierungsschmelze für den Formguss von Leichtmetal-Bauteilen aus Aluminium (US-Studie) 53

5. Probanden und Methodik der AR-Studie 55

5.1 Probanden der AR-Studie 55

5.2 Studiendesign der AR-Studie 55

5.3 Methodik der AR-Studie 56

5.3.1 Ophthalmologische Statusuntersuchungen (AR-Studie) 56

5.3.2 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität 59

5.3.3 Psychometrische Tests (AR-Studie) 60

5.4 Probanden der US-Studie 64

5.5 Methodik der US-Studie 67

5.5.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität 67

5.5.2 Blutdruck 68

5.5.3 Audiometrie 68
5.5.4 Schalldruckpegelmessungen 68
5.5.5 Gehörschutz 70
5.5.6 Fragebögen 71
5.6 Statistische Methoden 73
6 Ergebnisse 74
6.5 Ergebnisse der AR-Studie 74
6.5.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität (AR-Studie) 74
6.5.2 Ophthalmologische Statusuntersuchungen 76
6.5.3 Psychometrische Tests (AR-Studie) 78
6.6 Ergebnisse der US-Studie 87
6.6.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität 87
6.6.2 Blutdruck 88
6.6.3 Schalldruckpegelmessungen 96
6.6.4 Audiometrie 99
6.6.5 Fragebögen 100
7. Diskussion und Ausblick 110
8. Zusammenfassung 114
Literaturverzeichnis 117
Anhang I: Fragebögen 126
Schriftliche Eigenständigkeitserklärung 137
Danksagung 138
Lebenslauf 140
Beruflicher Werdegang 140
Akademische Ausbildung 141

Abkürzungsverzeichnis

BBK	Belastungs-Beanspruchungs-Konzept
Hf	Herzfrequenz
AR	Augmented Reality, Erweiterte Realität
FVST	Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
FGSE	Fakultät für Geistes-, Sozial- und Erziehungswissenschaften
FEIT	Fakultät für Elektro- und Informationstechnik
FIN	Informatik
FNW	Fakultät für Naturwissenschaften
FWW	Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
HRV	Heart rate variability, Herzfrequenznvariabilität
EKG	Elektrokardiogramm
NN	Abstand zweier Herzschläge
NN50	Anzahl der Paare benachbarter NN-Abstände, die sich jeweils > 50 ms voneinander unterscheiden
pNN50	Prozentsatz der NN-Abstände mit > 50 ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Abstand
SDNN	Standardabweichung aller NN-Intervalle
SDANN	Standardabweichung der alle 5 Minuten berechneten mittleren NN-Intervalldauer der gesamten Aufzeichnung
SDSD	Standardabweichung aufeinander folgender NN-Abstände
RMSSD	Quadratwurzel des Mittelwertes aus den quadrierten Differenzen aufeinander folgender NN-Intervalle
SDNN index	Mittelwert der Standardabweichung aller NN-Intervalle für alle 5 min Segmenten der gesamten Aufzeichnung
HRV triangular index	Integral der Dichteverteilung (Zahl der NN-Intervalle) geteilt durch das Maximum der Dichteverteilung
TINN	Spannweite des NN-Histogramms, ermittelt durch Dreiecksinterpolation des NN-Intervall-Histogramms
RR	Intervall zwischen Abstand zweier R-Zacken im EKG

VLF	VLF-Band (very low frequency band) bzw. A-Band (0,003-0,004 Hz)
LF	LF-Band (low frequency band) bzw. B-Band (0,04-0,15 Hz)
LF norm	Leistung im low frequency Band LF in normalisierte Einheiten
HF	Leistung im high frequency Band (0,15-0,4 Hz)
HF norm	Leistung im high frequency Band in normalisierte Einheiten
LF/HF	Quotient der sympatho-vagalen Balance
Total Power	Gesamtleistungsspektrum
ULF	Leistung im ultra low frequency Band (0,0001-0,003 Hz)
VLF	Leistung im very low frequency Band (0,003-0,004 Hz)
LF	Leistung im low frequency Band (0,04-0,15 Hz)
a	Anstieg der lineare Interpolation des Spektrums in log-log Skala
HUD	Head-up-display
HMD	Head mounted display
HMI	Human-machine-interface
HMS	Head-mounted-sights
RE	Real Environment
VE	Virtual Environment
RV	Reality-virtuality-Kontinuum
VRD	Virtual Retinal Display
MR	Mixed Reality
OST	Optical-see-through
VST	Video-see-through
US	Ultraschall
MRT	Magnetresonanztomographie
CT	Computer Tomographie

FOV	Field of view
DIN	Deutsches Institut für Normung
HLU	Hochleistungsultraschall
TTS	Temporary threshold shift, Vorübergehende Hörschwellenverschiebung
LIT	LitEye
OG	Ohne Gerät
NOM	Nomad
WTS	Wiener Testsystem
PP	Periphere Wahrnehmung
FFT	Fast Fourier Transform
FB	Fragebogen
VP	Versuchspersonen
DLG	Dauerleistungsgrenze
HKE	Herzkreislauferkrankungen

2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verwendeten Kopf-getragenen Displays. 16
Abb. 2: Verwendete Pilotanlage für die Behandlung von Aluminiumschmelze....17
Abb. 3: Modell zur Beschreibung der Beziehungen zwischen Belastungen und Beanspruchung)....20
Abb. 4: Veränderung der Beanspruchung bei Veränderung von Eigenschaften durch Ermüdung 21
Abb. 5: Einflussgrößen im Mensch-Maschine-System. 28
Abb. 6: Abgrenzung der realen und der virtuellen Umgebung mit Definition der Mixed Reality innerhalb des RV Kontinuums....30
Abb. 7: Einordnung von Displays für Augmented Reality. 31
Abb. 8: Unterteilung der Anzeigegeräte nach optischem Aufbau. 31
Abb. 9: Anwendungsbeispiel in der Montage....32
Abb. 10: Beispiel der Durchführung einer Laparoskopie 33
Abb. 11: Ultraschall-gesteuerte Brust-Biopsie.. 34
Abb. 12: Head Up Display im Kampfflugzeug. 34
Abb. 13: Beispiel der Anwendung der AR-Technologie bei Piloten. 34
Abb. 14: Beispiel eines eigebauten HUD im Auto....35
Abb. 15: Akkommodationskonflikt zwischen realen und virtuellen Informationen/Konflikt durch Entkopplung von Akkomodation und Vergenz und Wahrnehmungsverzerrung bei gekreuzter Parallaxe 36
Abb. 17: Einbettung einer Messinghülse in Kunststoff 44
Abb. 18: Einsatz von Ultraschall beim Gießen....46
Abb. 19: Querschnitt des Ultraschallaggregats für die Behandlung von Metallschmelze in der Gießerei....47
Abb. 20: Schalldruckpegelmessung mit subharmonischen Schwingungen....47
Abb. 21: Gehörgefährdung in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel und der Einwirkzeit.....50
Abb. 22: Untersuchungschema der AR- Studie. Hier steht NOM für das Nomad-, LIT für das LitEye-Gerät und OG für Versuch ohne Gerät 55
Abb. 23: Verwendete HMD-Modelle. 56
Abb. 24: Angewandtes Rodatest 302-Gerät für die Visus-, Phorie, Stereo- und Kontrastsehen- Erfassung. der Fa. VISTECH....57
Abb. 25: Test Periphere Wahrnehmung aus der Wiener Testbatterie (Wiener Test System, WTS) der Firma. Schuhfried GmbH (links) und Perimeter der Firma. Medmont (rechts) 59
Abb. 26: Exemplarische Landoltringe mit Öffnungen 60
Abb. 27: Exemplarische Landoltringe mit Kontrast 61
Abb. 28: Rechner für die Durchführung der Tests: afferente dynamische Sehleistung, Neglect, verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung 63
Abb. 29: Neglect-Test. 63
Abb. 30: Test der verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung in Reihenfolge a bis d. 64
Abb. 31: Schiller MT-200 Holter System. 67
Abb. 32: Verwendete Audiometriekabine....68
Abb. 33: Verwendete Messtechnik für die Schalldruckpegelerfassung. 69
Abb. 34: Schallpegel- Kalibrator 326 70
Abb. 35: Peltor 3M OPTIME III Kopfbügel 71
Abb. 37: Perimetriebefund....77

Abb. 38: Ergebnissen der nicht gesehenen Punkte bei der Perimetrie-Untersuchung bei allen drei Untersuchungsbedingungen 77
Abb. 39: Ergebnisse der Perimetrie-Untersuchungen bei allen Untersuchungsbedingungen nach Quadranten 78
Abb. 40: Gesichtsfeld bei dem Test „Periphere Wahrnehmung“ bei allen drei Untersuchungsbedingungen 79
Abb. 42: Blickwinkel des linken Auges bei allen drei Untersuchungsbedingungen 80
Abb. 43: Trackingabweichung bei allen drei Untersuchungsbedingungen 80
Abb. 44: Anzahl der richtigen Treffer (Reaktionen) der rechten Seite bei allen drei Untersuchungsbedingungen 81
Abb. 45: Anzahl der richtigen Treffer (Reaktionen) der linken Seite bei allen drei Untersuchungsbedingungen 81
Abb. 46: Anzahl falscher Reaktionen (Betätigen des Fußpedals ohne Darbietung eines Reizes) bei allen drei Untersuchungsbedingungen 82
Abb. 47: Anzahl der ausgelassenen Reaktionen (keine Reaktion auf dargebotene Reize) ... 82
Abb. 48: Medianwerte der Reaktionszeiten auf die Reize von rechts bei allen drei Untersuchungsbedingungen 83
Abb. 49: Medianwerte der Reaktionszeiten auf die Reize von links bei allen drei Untersuchungsbedingungen 83
Abb. 49: Medianwerte der Gesamtreaktionen bei alle Untersuchungsbedingungen 84
Abb. 50: Afferente dynamische Sehleistung bei allen drei Untersuchungsbedingungen 84
Abb. 51: Gemessene Schalldruckpegel 121 dB (A) bei 20.68 kHz 97
Abb. 52: Unterschiedliche Schalldruckpegelmessungen 98
Abb. 53: Audiogramm der Vor- und Nachuntersuchung für das rechte Ohr mit Bestimmung der Luft- und Knochenleitung 99
Abb. 54: Audiogramm der Vor- und Nachuntersuchung für das linke Ohr (unten) mit Bestimmung der Luft- und Knochenleitung 100
Abb. 55: Fragebogen zur Lärmbelastung 101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der gebräuchlichen Parameter der zeitbezogenen HRV-Analyse.....25
Tabelle 2: Übersicht der gebräuchlichen Parameter der frequenzbezogenen HRV-Analyse)26
Tabelle 3: Korrespondierende frequenz- und zeitbezogene HRV-Parameter.....26
Tabelle 4: Industrielle Anwendungen des Ultraschalls im Hochleistungsbereich.....41
Tabelle 5: Industrielle Anwendungen des Ultraschalls im Niedrigleistungsbereich nach Lynworth.....42
Tabelle 6: Beispiele für Schallausbreitungsgeschwindigkeiten 43
Tabelle 7: Vergleich verschiedener Entgasungsverfahren für ALg (Al-Si-Mg) Legierungen. .46
Tabelle 8: HRV-Datenausgabe des Phasenvergleichs Neglect (NEG), Aufmerksamkeitsverschiebung (AV) und der Erholung (ERH) 74
Tabelle 9: HRV-Datenausgabe des Gerätevergleichs NOM, LIT, OG.....75
Tabelle 10: Ergebnisse der Neglectprüfung bei allen drei Untersuchungsbedingungen.....85
Tabelle 11: Ergebnisse des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung bei allen drei Untersuchungsbedingungen.....86
Tabelle 12: Mittelwert der Herzfrequenz 87
Tabelle 13: Optimale, normale und hoch normale Blutdruckwerte 88
Tabelle 14: Blutdruckwerte für die verschiedenen Versuchsphasen 88
Tabelle 15: Test bei gepaarten Stichproben für den Blutdruck.....89
Tabelle 16: Korrelationen bei gepaarten Stichproben für den Blutdruck 90
Tabelle 17: Differenz der Audiogramme für die Knochenleitung bei Vor- und.....91
Tabelle 18: Knochenleitung in einzelnen Frequenzen bei Vor- und Nachuntersuchung.....92
Tabelle 19: Wilcoxon-Test der Knochenleitung für das rechte und das linke Ohr.....93
Tabelle 20: Differenz der Audiometrie bei Vor- und Nachuntersuchung für die Luftleitung zwischen den einzelnen Frequenzen 94
Tabelle 21: Luftleitung in den einzelnen Frequenzen bei Vor- und Nachuntersuchung.....95
Tabelle 22: Wilcoxon-Test bei Vor- und Nachuntersuchung für das rechte und das linke Ohr und Luftleitung.....96
Tabelle 23: Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerde“ vor Versuch 1 und während Versuch 1. 103
Tabelle 24: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests während Versuch 1 und vor Versuch 1. 104
Tabelle 25: Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerden“ während Versuch 1 und Versuch 2. 105
Tabelle 26: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests während Versuch 2 und Versuch 1. 106
Tabelle 27: Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerden“ vor Versuch 1 und während Versuch 2. 107
Tabelle 28: Ergebnisse des Wilcoxon- Tests während Versuch 2 und vor Versuch 1. 108

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen zwei innovativer Technologien auf den Menschen experimentell untersucht.

Die erste Anwendung befasst sich mit einer ophthalmologischen Beanspruchungsanalyse beim Tragen unterschiedlicher Head-Mounted-Displays. Diese Displays werden für die Darstellung bestimmter Informationen als Unterstützung des Werkers getragen und benutzen als Schnittstelle eine rechnergestützte teilmodellierte Umgebung, die Augmented Reality genannt wird.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sollen einen Beitrag leisten, um eine Entscheidung für den Einsatz bestimmter Modelle für unterschiedliche Bedürfnisse (z. B. Tätigkeitsszenarien) treffen zu können.

Die zweite behandelte Technologie beschäftigt sich mit einem anderen menschlichen Sinn, unser Hörvermögen.

Seit vielen Jahren sind die Vorteile und Potenziale des Ultraschalls bekannt. Es gibt eine breite Anwendungspalette, die sich bis zum Haushaltsbedarf erweitert hat. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Anwendung ist für den industriellen Bereich konzipiert worden. Es handelt sich um eine ultraschallbasierte Anlage, in der die durch die Ultraschallexposition entstandene Kavitation für die Behandlung bzw. Vergütung von Metalllegierungen in der Gießerei benutzt wird.

Die Literaturrecherche zur auralen Ultraschallexposition zeigt, dass bei der Anwendung innovativer Technologien extraaurale Wirkungen auftreten können. Dies könnte beim Einsatz in der industriellen Fertigung zu einer Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes und des Wohlbefindens des Arbeitnehmers führen. Im Sinne der Humanzentrierung sind neue Technologien auf beschwerdefreies Arbeiten des Anwenders in Studien zu kontrollieren.

Ultraschall als Schall könnte den Menschen belasten und dabei auf das Herz-Kreislauf-System bzw. die Herzfrequenz und den Blutdruck wirken. Der Körper könnte so in eine Art Stresszustand versetzt werden, auf den der menschliche Organismus reagiert, um die Balance zwischen Belastung und Beanspruchung im Sinne des Belastungs-Beanspruchungskonzeptes wiederherzustellen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Belastung bei der Anwendung von innovativen Technologien und deren Belastungsfolgen bzw. Beanspruchungsreaktionen in diesen Produktionsverfahren zu erfassen.

Als Ergebnis sollen Aussagen getroffen werden, inwieweit eine sichere Produktherstellung von Ultraschall-Aluminium-Legierungen für den Leichtbau in der Luft- und Raumfahrtindustrie (Harz-Gebiet) möglich wäre.

In allen diesbezüglich gefährdeten Fällen ist die ergonomische Beobachtung der Gegebenheiten erforderlich, um Gefahren für die Gesundheit zu vermeiden bzw. zumindest zu minimieren.

Abstract

The present dissertation deals with an experimental stress-strain analysis of the effects on human beings resulting from the application or use of two innovative technologies.

The first application addresses an ophthalmological strain-stress analysis (visual and perception impairment) resulting from wearing two different Head-Mounted-Display (HMD) models. These displays are used for information assistance and use a computer as interface to generate fully or partially model environments better known as Augmented Reality.

The conclusions gained from this should help on deciding whether or not to introduce this kind of technology in certain fields depending on the field´s requirements for these.

The second technology deals with another sense, namely the hearing sense.

Ultrasound potentials and advantages are well known since decades. There is a large list of applications that reach out to the electro domestic branch. Though this application is at home at the foundry sector, which is used to treat aluminum-alloy melts to improve their mechanical properties using the cavitation which resulting from the sonification of the melt.

Literature analyses show the possibility of the appearance of subjective effects due to ultrasound irradiation in human subjects. Ultrasound as sound does, could affect their health status having repercussions on the circulatory system resulting in an increase of heart-rate and arterial pressure. In this way, the human body is set on a stress-status to which the body reacts trying to reestablish a balance between stress and strain trying to adapt to this situation.

It is therefore the purpose of this study, to realize a quantification of the possible risks and draw prevention measures before the production of aluminum- alloy light-components are produced in foundries at the Harz-region (Germany) or in other foundries in the world trying to establish a safe working process.

In all these potential risk-situations, ergonomic analyses are to be carried out to try avoiding risks or at least to minimize them.

Compendio

En el presente trabajo se investigaron los posibles efectos de la aplicación de tecnologías innovativas en el hombre.

La primera parte del trabajo trata de un análisis oftalmológico con el propósito de identificar trastornos visuales y alteraciones de la percepción visual como consecuencia de la posible influencia negativa por la carga (en sentido de esfuerzo o alteración físico-psicológica) resultante de portar las pantallas portátiles montadas sobre la cabeza (dos modelos diferentes) de tipo diadema de diseño similar a una banda para la frente, llamados Head-Mounted-Display (HMD por sus siglas en inglés). Estos dispositivos son usados para la visualización de información con propósito de asistencia, como por ejemplo: un almacén o la producción de un producto con diversas variaciones en los modelos en la industria, por nombrar algunos. Estos aparatos utilizan computadoras como interfaz para la generación de un ambiente modelado o semimodelado, según sea el caso, que es conocido como Augmented Reality, la realidad aumentada.

Las conclusiones de ésta investigación pretender aportar elementos de información que permita la toma de decisiones sobre la introducción o no de esta tecnología en distintos sectores según su aplicación y compatibilidad con los requerimientos particulares de cada rama de la industria.

En la segunda parte del trabajo se analizan los efectos de la aplicación de tecnologías innovativas sobre el oído y el sistema circulatorio.

Desde hace muchos años se conoce el potencial del ultrasonido. Existe una gran cantidad de aplicaciones en los que se incluyen los aparatos electrodomésticos. En este caso se trata de su empleo en el sector industrial donde se utiliza la cavitación ocasionada (en fluidos) por el ultrasonido para tratar la colada de aluminio, mejorando sus propiedades metalúrgicas en la industria fundidora.

El análisis de la literatura muestra que existe la posibilidad de que resulten efectos extraaurales al estar expuesto a la irradiación de ultrasonido (transportado por aire), lo que pudiese agraviar el estado de bienestar del (la) empleado(a). Con el fin de obtener un proceso de trabajo libre de molestias y la centralización humana del trabajo, se pretende investigar las molestias posibles que pudiera causar la irradiación de ultrasonido en el ser humano.

El ultrasonido, al igual que el ruido, afecta el estado de bienestar del ser humano y sus sistemas circulatorio y respiratorio pudiendo causar modificaciones o alteraciones de la

frecuencia cardiáca y la presión arterial. El cuerpo es colocado en un estado de estrés, al cual su organismo reacciona, tratando de compensar la relación entre carga y efecto de la carga para poder reestablecer el equilibrio del concepto o sistema de carga y efecto de la carga y volver al “estado normal de bienestar”.

El objetivo de este estudio es cuantificar las consecuencias de esta aplicación innovativa con potencial de riesgo y poder realizar recomedaciones para la prevención y el trabajo seguro previo a la producción de partes de aleaciones de aluminio con posible aplicación en la industria aeroespacial y automovilística, procedente de la industria local de la región del Harz (Alemania) o en su caso en otras industrias fundidoras.

En todos estos casos de riesgo correspondiente, es tarea de la observación y cuantificación ergonómica según sea el caso, para evitar los riesgos o por lo menos minimizarlos para la obtención de un lugar y proceso de trabajo seguros.

1. Einleitung und Problemdarstellung

Die Arbeitswelt im Wandel

Im Zuge der Globalisierung und der damit verbundenen zunehmenden Ansprüche auf Dienstleistungen und Produktangebote aufgrund des internationalen Wettbewerbs entstehen für Betriebe als auch für den Arbeitnehmer neue Herausforderungen. Diese Ansprüche müssen mit neuen Wegen bzw. neuer Technisierung der Produktionsprozesse und Verfahren, in dem der Arbeitnehmer als Operateur eingebunden ist, angegangen werden. Der Umgang mit modernen Arbeitsmitteln und -bedingungen wirkt sich als steigende körperliche und psychomentale Belastung aus. Für den Betrieb sind diese Belastungen nicht nur aufgrund des demographischen Wandels von Bedeutung. Sie betreffen den älteren Arbeitnehmer im Betrieb als auch die jüngeren Generationen bereits in der Ausbildungsphase (Sánchez et al., 2012). Die daraus resultierenden Belastungsfolgen könnten in der späteren beruflichen Zukunft für häufige Krankschreibungen oder Frühberentungen sorgen.

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen zweier innovativer Technologien auf den Menschen experimentell untersucht.

Die erste Studie befasst sich mit der Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung, die beim Tragen von Kopf-getragenen Displays entsteht. Diese Displays (s. **Abb. 1**) werden für die Darstellung bestimmter Informationen als Unterstützung des Werkers getragen und benutzen als Schnittstelle eine rechnergestützte teilmodellierte Umgebung, die Augmented Reality genannt wird.

***Abb. 1*:** *Verwendeten Kopf-getragenen Displays. (Links) Gerät der Firma LitEye, LE-750A. (Rechts) Gerät der Firma Microvision, Nomad ND 2100*

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sollen dazu beitragen, die Entscheidung für den Einsatz der Modelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bedürfnisse bzw. Anwendungsszenarien zu erleichtern.

Die zweite behandelte Technologie beschäftigt sich mit einem anderen menschlichen Sinn, unser Hörvermögen.

Seit vielen Jahren sind die Vorteile und Potenziale des Ultraschalls bekannt. Es gibt eine breite Anwendungspalette, die bis zum Haushaltsbedarf hinausreicht. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Anwendung ist für den industriellen Bereich konzipiert worden. Es handelt sich um eine ultraschallbasierte Anlage, in der die durch die Ultraschallexposition entstandene Kavitation für die Behandlung bzw. Vergütung von Metalllegierungen in der Gießerei benutzt wird (s. **Abb. 2**).

Abb. 2: *Verwendete Pilotanlage für die Behandlung von Aluminiumschmelze*

Die Fachliteratur zur auralen Ultraschallexposition, insbesondere die Arbeit von Veit (1980), dient als Anregung für diese Studie. In Veits Bericht (1980) werden verschiedene Studien zusammengefasst, die sich mit den Wirkungen des Ultraschalls und subjektiven Beschwerden der Ultraschallexposition befassen. Ein Teil des Berichts geht auf Studien ein, die ausschließlich auf Kontaktultraschall (Ultraschallgeber mit Schädelkontakt) und audiometrische Daten eingehen. Andere Studien befassen sich mit Industrieanwendungen und subjektiven Beschwerden.

Unter anderen möglichen Folgeuntersuchungen listete Veit (1980), die „Experimentelle Klärung der Erzielbarkeit einer vorübergehenden Hörschwellenverschiebung (TTS) im Bereich subharmonische Frequenzen bei Beschallung mit luftgeleiteten Ultraschall“ (Veit, 1980: S. 51) sowie die „Untersuchungen der Ultraschalleinwirkung auf das menschliche

Gehör unter Zuhilfenahme von Methoden der objektiven Audiometrie“ (Veit, 1980: S. 51). Bisher gibt es keine Studien, die sich mit diesen speziellen Aufgabenstellungen und einer Ultraschall-basierten Gießanlage befassen. Mit der vorliegenden Arbeit wird zur Füllung dieser Lücke beigetragen.

Die modernen Technologien und deren Einsatz in der industriellen Fertigung können zu einer Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes und des Wohlbefindens des Arbeitnehmers führen. Im Sinne der Humanzentrierung sind neue Technologien auf beschwerdefreies Arbeiten des Anwenders in Studien zu kontrollieren. Daraus ergeben sich Fragestellungen, die genauer untersucht werden müssen, um die Beanspruchung bei der Anwendung von Innovativen Technologien und deren Belastungsfolgen in diesen Produktionsverfahren zu erfassen. Es ist daher von großer Bedeutung, die potenzielle Auswirkung des von der Anlage abgestrahlten Schalls aus ergonomischer Sicht zu betrachten und experimentell zu untersuchen, bevor eine Einführung im Betrieb erfolgen kann.

Nach der Einleitung folgt im zweiten Kapitel ein Überblick zu theoretischen und empirischen Grundlagen der Studie. Diesem schließt sich eine Beschreibung der Anwendungsgebiete und von Aspekten zur ergonomischen Gestaltung der in dieser Arbeit aufgeführten Technologien an (Kapitel drei). Im vierten und fünften Kapitel werden die Fragestellungen beider Studien dargestellt und die Methodik erläutert. Die Ergebnisse werden in Kapitel sechs ausführlich dargestellt. Es folgen abschließend Diskussion und Ausblick sowie eine Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel sieben und acht).

2. Theoretische und empirische Grundlagen

2.1 Definition von Belastung und Beanspruchung

Belastung und Beanspruchung sind zwei unterschiedliche Begriffe, die häufig verwechselt werden. Unter Belastung versteht man alle äußeren Auswirkungen von Anforderungen und Arbeitsbedingungen, die auf den arbeitenden Menschen einwirken und die in der Lage sind, eine Reaktion des Organismus auszulösen. Sie setzt sich aus Teilbelastungen, der Belastungsdauer und der Belastungshöhe, zusammen.
Zur Festlegung der Belastungsdauer (Anfang bis Ende) bezieht man sich auf die Uhrzeit. Zur zeitlichen Fixierung der Belastung gibt man die Belastungszeit an (Laurig, 1992; Bullinger, 1994).
Bei der Belastungshöhe existieren Teilbelastungen mit physikalischer Maßeinheit, auch als Belastungsgrößen bekannt. Diese sind z. B. Bedienkräfte in N, zu hebende Last in kg, physikalische Arbeit in kJ, Wärmestrahlung in W/m^2, Schalldruckpegel in dB(A). Desweiteren existieren auch Teilbelastungen ohne physikalische Maßeinheit, die als Belastungsfaktoren bezeichnet werden. Diese setzen sich aus der Gesamtheit der physischen und psychischen Leistungen sowie Arbeitsumweltbelastungen und -bedingungen wie z. B. Lärm, Klima, Luftverunreinigung, Licht, mechanische Schwingungen und soziale Bedingungen zusammen (Laurig, 1992; Bullinger, 1994; Pfister, 2008).

Unter Beanspruchung versteht man die Reaktion des Körpers auf äußere, einwirkende Belastungen. Dies kann eine Funktion des Körpers sein wie z. B. Beschleunigung der Herzfrequenz, Schweißsekretion etc. Dabei spielt die individuelle Leistungsfähigkeit eine wichtige Rolle, da identische Belastungen bei verschiedenen Menschen zu unterschiedlicher Beanspruchung führen. Diese physikalischen Einwirkungen sind so gering wie möglich zu halten, damit der Mensch in einer erträglichen bis angenehmen Arbeitsumwelt arbeiten kann (Bernotat, 1978).

Die Beanspruchung setzt sich aus Beanspruchungsarten, Beanspruchungsniveau und Beanspruchungsgrößen zusammen.

Die Beanspruchungsarten beschreiben wie die Funktionssysteme des Menschen auf die Belastung reagieren. Diese Beanspruchungen können entweder muskulärer (physischer), psychophysischer (durch Arbeitsumweltbedingungen) oder psychischer (Beanspruchung der Sinnesorgane, mentale und emotionale Beanspruchung) Art sein (Schmidtke, 1981). Wenn es Situationen gibt, in denen diese Beanspruchungsarten gemeinsam einwirken, spricht man von einer kombinierten Beanspruchung (Bullinger, 1994).

Die Quantifizierung der Beanspruchung bei der Arbeit kann mit den Beanspruchungsgrößen wie z. B. Herz- (Puls)- Frequenz in P/min, Atemfrequenz in Atemzüge/min, Blutdruck in mm Hg, Körperflüssigkeiten in g/h, Körpertemperatur in °C, ermittelt werden (Laurig, 1992; Bullinger, 1994).

2.1.1 Belastungs-Beanspruchungskonzept

Das Belastungs-Beanspruchungskonzept (BBK) von Rohmert und Rutenfranz (1975) ist ein im deutschen Forschungsraum sehr etabliertes Konzept (BGW, 2007). Dieses BBK konzentriert sich auf die Arbeitsumweltbelastungen und ihre Auswirkungen im und auf den Menschen. (Rohmert, Rutenfranz, 1975; BGW, 2007). Nach Triebig et al. (2008) ist das Belastungs-Beanspruchungskonzept (s. **Abb. 3**) ähnlich einer Kausalkette, in der die Belastungen auf Menschen mit individueller Leistungsfähigkeit treffen und eine Beanspruchung auslösen.

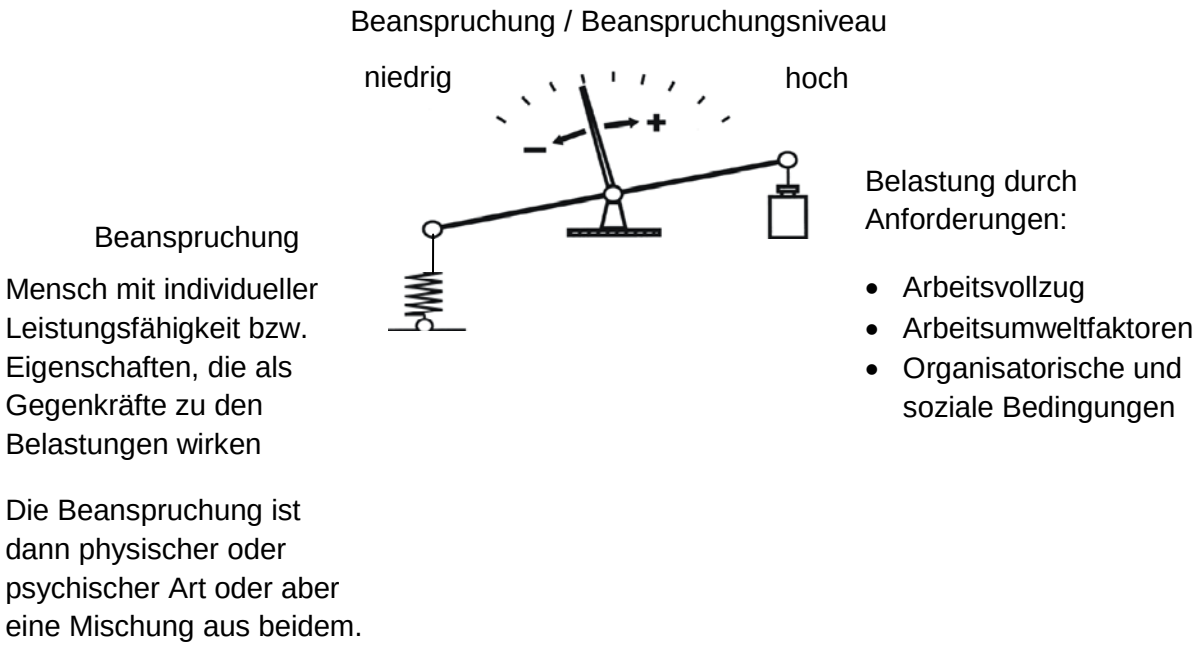


Abb. 3: *Modell zur Beschreibung der Beziehungen zwischen Belastungen und Beanspruchung (Laurig, 1992)*

Die Beanspruchung wirkt auf den Menschen mit seiner individuellen Leistungsfähigkeit, die als Gegenkräften zur der Belastung wirken. Wenn der Mensch einer Belastung ausgesetzt ist, diese aufgrund seiner Eigenschaften aber kaum spürbar ist, kann man die Belastung als neutral bewertet werden. Kann er eine zu hohe Belastung nicht durch seine individuelle

Leistungsfähigkeit ausgleichen, bewertet man die Belastung als gesundheitsgefährdend (Österreich, 2001; BGW, 2007). Eine geringe Belastung kann aber auch durch die fehlende Kompensation beeinträchtigend bzw. schädigend wirken. Dies geschieht wenn aufgrund des Belastung-Beanspruchungsverhältnisses und der Bewältigungsstrategien am Arbeitsplatz, Motivation oder Ziele des Arbeitnehmers bezüglich der Durchzuführenden Tätigkeit fehlen und die zur Monotonie, Stress und psychischer Sättigung u.a. führen können (Triebig et al., 2008). Überforderung durch zu hohe Belastung sowie Unterforderung durch zu geringe Belastung sollten vermieden werden (Österreich, 2001).

Das Beanspruchungsniveau, d.h. die Form in der die Belastung einwirkt, hängt von der Dauer und der Höhe der Belastung sowie von den individuellen Eigenschaften des Menschen ab.

Ermüdung führt zu einer reversiblen Abnahme der Eigenschaften durch die Beanspruchung (s. **Abb. 4**). Durch Pausen bzw. durch Erholung kann dieser ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden. So führt die Regeneration der Eigenschaften zu einer Veränderung der Belastung (Laurig, 1992).

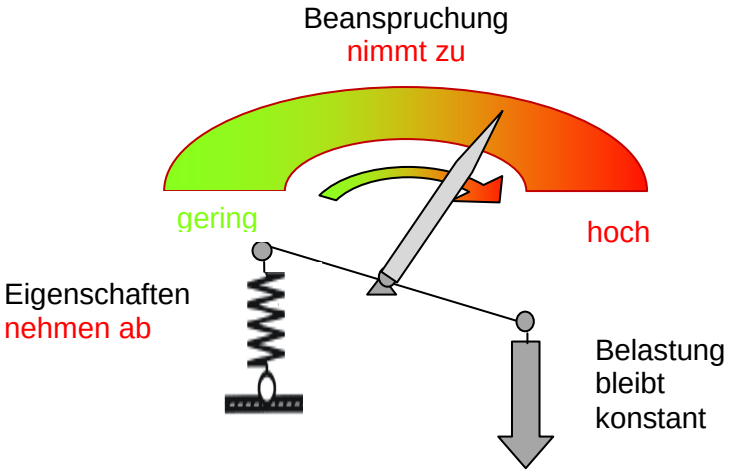


Abb. 4: *Veränderung der Beanspruchung bei Veränderung von Eigenschaften durch Ermüdung (Laurig, 2008)*

In der vorliegenden Arbeit findet das BBK Anwendung. In den aufgeführten Studien wurden die Versuchspersonen verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Diese wurden schließlich mit visuellen, audiometrischen, subjektiven und kardiophysiologischen Daten ausgewertet. Inwiefern die Belastungen die Versuchspersonen beansprucht haben, lässt sich dem Kapitel sechs entnehmen.

2.2 Kardiophysiologische Beanspruchungsparameter

2.2.1 Herzaktivität als physiologischer Indikator psychischer Beanspruchung

Zur Beurteilung der Beanspruchung lassen sich quantitativ messbare Belastungen wie z. B. organische Reaktionen und quantitativ nicht-messbaren Belastungen wie z. B. subjektive Empfindungen unterscheiden.

Die quantitativ messbare Belastungen lassen sich mit den üblichen physikalischen Messverfahren ermitteln, also durch Messungen der Herzschlagfrequenz, der Herzfrequenzarrhythmie, des arteriellen Blutdrucks, der Atemfrequenz, der Körpertemperatur sowie der Freisetzung biochemischer Substanzen (z. B. in Urin, Blut, Speichel) in zeitabhängiger Veränderung der Dauer und Höhe der Belastung (Laurig, 1992; Bullinger, 1994; Roggentin, 2009).

Die quantitativ nicht-messbaren Belastungen oder subjektiven Belastungen lassen sich mittels Beschreibung oder Fragebögen einschätzen.

Um die Wirkungen bzw. den Einfluss der Belastung in zeitlicher Veränderung oder Stabilität auf den Menschen zu bewerten, werden vegetative Parameter wie die Herzfrequenz- und Blutdruckvariabilität angewandt.

Die Messung der Herzaktivität hat sich als eine der ältesten und wichtigsten Methoden zur objektiven, qualitativen und quantitativen Beanspruchungsbeurteilung bereits in vielen Fachbereichen der Wissenschaft etabliert. Da die Herzfrequenz eng mit physiologischen und psychomentalen Prozessen verbunden ist und die Anpassungsfähigkeit des Organismus an Belastungen wiederspiegelt, eignet sich daher die Herzaktivität als Indikator für physische und psychische Belastungen (Horn, 2003; Pfister et. al., 2007; Triebig et al., 2008). Aus diesem Grund wird eine HRV-Analyse in beiden aufgeführten Studien der vorliegenden Arbeit durchgeführt.

Nach Pfister et al. (2007) hat die HRV- Analyse folgende Einsatzmöglichkeiten:

- Erkennung des Herz-Kreislauf-Risikos im Rahmen arbeitsmedizinischer Vorsorgeuntersuchungen,
- Erfolgskontrolle in Fällen, in denen das vegetative System beteiligt ist (z. B. präventive Maßnahmen bei Bewegungsmangel und sportlicher Aktivität) (Weippert, 2010; Horn, 2003),

- Frühzeitige Identifikation der Neurotoxizität aufgenommener Schadstoffe (Böckelmann, 2006),
- Psychophysiologische Beanspruchungsanalyse an Arbeitsplätzen mit psychischen und psychomentalen Belastungen.

2.2.2 Herzfrequenzvariabilität

Das Herz eines gesunden Menschen schlägt unregelmäßig. Es zeigt Variationen von Schlag zu Schlag, da der Organismus sich an Situationen (z. B. psychische oder physische Belastungen) oder Reize anpassen muss (Kučera, 2006).

Die Schwankung der Abstände zwischen aufeinanderfolgende Herzschläge (RR- Intervalle) wird als Herzfrequenzvariabilität oder Herzschlagfrequenzvariabilität (HRV)[1] bezeichnet (Malik, 1996; DGAUM, 2001, Weippert, 2010). Der Begriff Herzschlagfrequenzvariabilität ist durch Konvention festgelegt worden als die Beschreibung der Veränderungen der Herzfrequenz und der RR- Intervallen geworden (Malik, 1996).

Die Herzfrequenz lässt sich durch das Auszählen der Pulsschläge oder durch eine objektive, nicht-invasive Messmethode wie das Elektrokardiogramm (EKG) ermitteln, das eine Analyse zu einem exemplarischen Zeitpunkt bzw. für einen beliebigen Zeitabschnitt ermöglicht (Malik, 1996).

Die HRV ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Sympathikus und Parasympathikus (Nervus Vagus), die entgegengesetzte Wirkungen haben. Während der Sympathikus auf die Zunahme der Herzfrequenz und eine Minderung der HRV aktiv wirkt, besitzt der Parasympathikus (Vagus) eine hemmende bzw. negative Wirkung, die eine Abnahme der Herzfrequenz und eine Zunahme der HRV verursacht (Kučera, 2006).

Eine hohe HRV wird als Zustand guter Gesundheit bezeichnet bzw. als eine gute Regulationsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems. Eine geringe HRV wird als pathologische Stereotypie dargestellt, da es an Kompensations- oder Anpassungsfähigkeit fehlt, weil der Herzschlag den Erfordernissen nicht effektiv verändern kann (Roggentin, 2009; Pfister et. al, 2007; Koepchen, Huopaniemi, 1991 in: Pfister et. al., 2007).

Man unterscheidet zwischen HRV-Analyse im Zeit-, Frequenz- und Phasenbereich aus der Kurzzeit- und Langzeitmessungen (Malik, 1996).

[1] Abkürzung abgeleitet vom englischen Begriff Heart Rate Variability

Die zeitbezogene HRV-Analyse basiert auf der Grundannahme, dass die Folge der Herzschläge einem stochastischen Prozess (zufällige Reihenfolge) entstammt. Diese Analyse geht auf die statistische Variabilität mit verschiedenen Variablen ein wie NN-Intervalle, Mittelwert der Herzfrequenz, Differenz zwischen dem längsten und dem kürzesten Herzschlag und Differenz zwischen Nacht- und TagesHerzfrequenz. (Triebig et al, 2008; Horn, 2003; Malik, 1996).

Die statistisch langzeitbezogenen Messungen (24 Stunden) unterteilen sich in direkte und abgeleitete Messungen. Die direkten Messungen beziehen sich auf die NN-Intervalle oder die momentane Herzfrequenz. Die abgeleiteten Messungen befassen sich mit dem Unterschied zwischen NN-Intervallen (Malik, 1996).

Die wichtigsten Parameter im Zeitbereich sind die Standardabweichung aller NN-Intervalle (SDNN), die Quadratwurzel des Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen (RMSSD) und der prozentuale Anteil der NN-Intervalldauer mit >50 ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Intervall (pNN50) (Malik, 1996; Schega et al., 2011). Diese Messungen (s. **Tabelle 1**) aus Kurzzeitveränderungen berechnen hochfrequente Variationen des Herzschlages und sind mathematisch und physiologisch stark miteinander korreliert (s. **Tabelle 2** und **Tabelle 3**) (Malik, 1996).

Bei den geometrischen Methoden werden die NN-Intervall-Serien zu geometrischen Mustern umgewandelt. Basierend auf den geometrischen bzw. graphischen Eigenschaften des gegebenen Musters wird mit Hilfe einer Formel die Variabilität bewertet (Malik, 1996). Eine ausführliche Beschreibung der HRV-Parameter und ihrer Bedeutung wird in dieser Arbeit nicht präsentiert. Es wird auf die spezifische Fachliteratur verwiesen.

***Tabelle 1**: Übersicht der gebräuchlichen Parameter der zeitbezogenen HRV-Analyse (Malik, 1996; DGAUM, 2001)*

Parameter	Dimension	Erläuterung
		Statistische Messungen
NN	ms	Abstand zweier Herzschläge
NN50		Anzahl der aufeinanderfolgenden NN-Intervalldauern > 50ms Differenz
pNN50	%	Prozentualer Anteil der NN-Intervalldauern mit > 50ms Differenz von vorangehender Intervalldauer
SDNN	ms	Standardabweichung aller NN-Intervalle
SDANN	ms	Standardabweichung der alle 5 Minuten berechneten mittleren NN-Intervalldauer der gesamten Aufzeichnung
SDSD	ms	Standardabweichung aufeinanderfolgender NN-Abstände
RMSSD	ms	Quadratwurzel des Mittelwertes aus den quadrierten Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle
SDNN index	ms	Mittelwert der Standardabweichung aller NN-Intervalle für alle 5 min Segmenten der gesamten Aufzeichnung
		Geometrische Messungen
HRV triangular index		Quotient aller NN-Intervalle und der Höhe des Histogramms aller NN-Intervalle in diskreter Skala mit Werten von 7.8125 ms (1/125s)
TINN	ms	Spannweite des NN-Histogramms, ermittelt durch Dreiecksinterpolation des NN-Intervall-Histogramms

Die frequenzbezogene HRV-Analyse ist ein spektralanalytisches Verfahren des RR-Tachogramms. Horn (2003) beschreibt einen zyklischen Charakter für biologische Systeme und Prozesse, die wiederkehrenden (sinusförmigen) Schwankungen unterliegen. Diese können auch bei der Herztätigkeit beobachtet werden. In der frequenzbezogenen HRV-Analyse wird das Tachogramm in die einzelnen Frequenzen aufgenommener Schwingungen zerlegt.

Tabelle 2: *Übersicht der gebräuchlichen Parameter der frequenzbezogenen HRV-Analyse (Malik, 1996; DGAUM, 2001; Horn, 2003)*

Parameter	Dimension	Erläuterung
		Kurzzeitauswertung (5min**)**
VLF (very-low-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,003 bis 0,004 Hz
LF (low-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,04 bis 0,15 Hz
LF norm (low-frequency-Band)	n.u. (normalisierte Einheite)	Leistung im LF(Totale Leistung- VLF) x 100
HF (high-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,15 bis 0,4 Hz
HF norm	n.u.	Leistung HF in normalisierte Einheiten
LF/HF		LF[ms^2]/HFP[ms^2]
		Langzeitauswertung (24 h)
Total Power	ms^2	Absolute Spektralenergie ≤0.04 Hz
ULF (ultra-low-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,0001 bis 0,003 Hz
VLF (very-low-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,003 bis 0,004 Hz
LF (low-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,04 bis 0,15 Hz
HF (high-frequency-Band)	ms^2	Leistung von 0,15 bis 0,4 Hz
a		Anstieg der linearen Interpolation des Spektrums in log- log Skala

Wenn keine speziellen Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um die Komponenten des Frequenzbereichs zu entnehmen, können die Ergebnisse der frequenzbezogenen HRV-Analyse mit denen der zeitbezogenen Analyse, welche einfacher durchzuführen ist, verglichen werden (s. Tabelle 3) (Malik, 1996).

Tabelle 3: *Korrespondierende frequenz- und zeitbezogene HRV-Parameter (Malik, 1996; DGAUM, 2001)*

Zeitbezogener Parameter	Entsprechender frequenzbezogener Parameter
SDNN	Total Power
HRV triangular index	Total Power
TINN	Total power
SDANN	ULF
SDNN index	Mittelwert aus 5 min Total Power
RMSSD	HF
SDSD	HF
NN50 count	HF
pNN50	HF
Differential index	HF
Logarithmic index	HF

2.2.3 Blutdruck

Der Blutdruck (BD) dient zur Herzaktivität- und Beanspruchungs-Beurteilung bei Ruhe bzw. Erholungs- und Arbeits- bzw. Belastungsbedingungen. Seine Bedeutung ist aufgrund seiner einfachen Messbarkeit und der Entwicklung neuer nicht-invasiver Methoden in der arbeitsmedizinischen Praxis in den letzen Jahren gestiegen. Die Blutdruckerfassung wird somit in verschiedenen Gebieten wie Kontrollen bei Therapien oder Erfolgsprognosen, aber auch in der in Form des Langzeit-Elektrokardiogramms (EKG) für 24-Stunden Monitoring, angewandt (DGAUM, 2008).

2.3 Mensch-Maschine Interaktion

Wie bereits beschrieben, unterliegt der Mensch privat und bei seinem Arbeitsvollzug den physikalischen und sozialen Einflüssen seiner Umwelt. Um die Wechselwirkungen von Mensch und Maschine unter Umwelteinflüssen zu analysieren, werden diese nach Bernotat (1978) in vier Gebiete aufgeteilt (s. **Abb. 5**):

Gebiet A (Anpassung der Maschine an den Menschen bzw. Anthropotechnik) untersucht „wie sich die Maschine an die menschlichen Eigenschaften und Fähigkeiten anpassen lässt“ (Bernotat, 1978: S.53) sowie die Auswirkungen, die sich aus der Systemleistung und Beanspruchung des Menschen ergeben. Dazu gehören z. B. haptische, akustische und visuelle Reize sowie die Anzahl und Auslegung der Bedienelemente und die Anpassung des zeitlichen Verhaltens der Maschine an das des Menschen.

In Gebiet B (Anpassung des Menschen an die Maschine) wird untersucht wie der Mensch durch Selektion nach körperlichen und geistigen Merkmalen und durch geeignete Ausbildung und Training an den Arbeitsauftrag angepasst werden kann.

Gebiet C befasst sich mit der Wirkung der physikalischen Umwelt auf den Menschen, hierzu gehören die in Kapitel 2.1 als Arbeitsumweltbelastung aufgelisteten Faktoren und deren Auswirkung auf den Menschen und den Arbeitsvollzug.

Gebiet D untersucht die Wirkungen der sozialen Umwelt auf den Menschen und ist somit ein Bereich der Betriebspsychologie. Im Fokus steht hier die soziale Struktur der Arbeitsumwelt, beispielsweise das Verhältnis zu Arbeitskollegen, Vorgesetzen und ihm unterstellten Mitarbeitern, die das Verhalten des Arbeitsnehmers und die Art der Ausführung eines Auftrages beeinflussen.

Die vorliegende Dissertation befasst sich vorwiegend mit den Punkten A und C. Dabei kann die Head-Mounted-Display-Studie aufgrund der Eigenschaften der Virtual-Reality-Brille unter Punkt A angeordnet werden. Die Ultraschall-Studie lässt sich aufgrund der vorhandenen

Arbeitsumweltbelastungen unter Punkt C kategorisieren. Auf diese Weise werden zwei der vier von Bernotat genannten Gebiete der Mensch-Maschine Interaktion in der vorliegenden Arbeit behandelt.

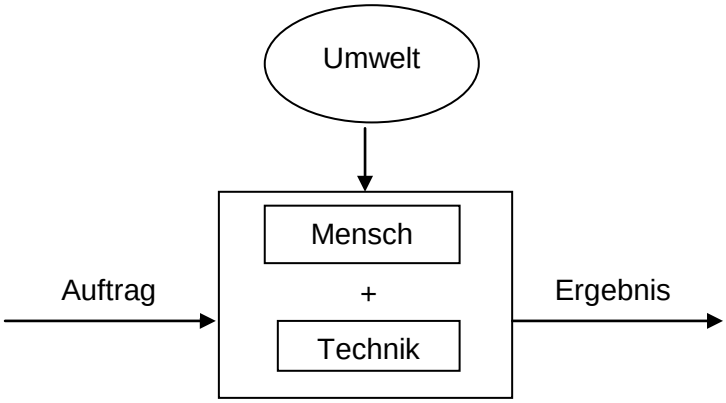


Abb. 5: *Einflussgrößen im Mensch-Maschine-System. (Bernotat ,1978; S.53)*

Im folgenden Kapitel werden wichtige Charakteristika der beiden innovativen Technologien, ihre Anwendungsgebiete sowie technische und ergonomische Gestaltungsaspekte dargestellt.

3. Anwendung innovativer Technologien

3.1 Erweiterte Realität und Head Mounted Displays

Erweiterte Realität (AR)[2] beschreibt eine Mensch-Maschine Interaktion, in der die menschliche Wahrnehmung durch elektronisch- bzw. computergenerierte Informationen erweitert wird. Hier erfolgt eine Überlagerung des Gesichtsfeldes mit visuellen, auditiven und haptischen Informationen, so dass die Anreicherung der realen Umgebung ermöglicht wird, wobei diese reale Umgebung ergänzt und nicht ersetzt wird (Alt, 2002; Tegtmeier, 2006; Feiner et al., 1999; Azuma, 1997).

Visuelle erweiterte Realität-Systeme sind u.a. solche, in denen Kopf-Bewegungssensoren, kopfgetragene Anzeigen, die dem Anwender eine Sicht der realen Umgebung mit computergenerierten Informationen mittels Video oder optischer Kopplung einblenden oder undurchsichtige Anzeigen, in denen eine Bildüberlagerung durch synthetisierte Grafiken stattfindet, eingesetzt werden (Feiner et al., 1999; Milgram, Colquhoun Jr., 1999).

Es gibt verschiedene Auffassungen über die Definition und Reichweite des AR-Begriffes, die hauptsächlich in drei Kategorien unterteilt werden können. Nach Milgram und Colquhoun Jr. (1999) bezieht sich die erste Definitionskategorie auf Anzeige-Systeme, die jedwede Art von Head-Mounted Displays (HMD) oder Head-Up Displays (HUD) verwenden. Die zweite Kategorie beinhaltet Fälle, in denen die reale Welt durch Computergrafiken (virtuell) angereichert wird, einschließlich großer und monitorbasierter Anzeigen. Die dritte Kategorie schließt jegliche Mischung von realen und virtuellen Umgebungen ein.

Die Anwendungsfelder der AR-Technologie werden in Kapitel 3.1.2 behandelt.

3.1.1 Das Kontinuum zwischen Realität und virtueller Realität

Die Abgrenzung der Bereiche der realen (RE)[3], der virtuellen (VE)[4] und der erweiterten[5] Umgebung wird im Reality-Virtuality-Kontinuum (RV) veranschaulicht (s. **Abb. 6**).

Milgram und Colquhoun Jr. (1999) beschreiben, dass die reale Umgebung und die virtuelle Umgebung an den Enden des Virtual-Reality-Kontinuums als Pole betrachtet werden sollen. Darüber hinaus wird der Bereich zwischen beiden Extremen als Mixed Reality (MR),

[2] abgeleitet vom englischen Begriff Augmented Reality.
[3] ohne Computer generierten Informationen mit Schwerpunkt auf die Wahrnehmung der Realität.
[4] der virtuellen (vollständig Computergenerierten) Umgebung, mit Schwerpunkt auf die Wahrnehmung der Virtualität (Alt, 2002).
[5] der erweiterten (partiell computergenerierte) Umgebung.

gemischte Realität bezeichnet. Diese beinhaltet alle Mischungen zwischen den RV Kontinuum-Polen. (Alt 2002; Milgram und Colquhoun Jr., 1999). Es ist zu beachten, dass jeweils (AR) erweiterte Realität, virtuelle Realität (VR) und gemischte Realität (MR) ein Bereich des (RV) Kontinuums beinhalten, aber die reale und die virtuelle Umgebung ausschließen (Milgram, Colquhoun Jr., 1999).

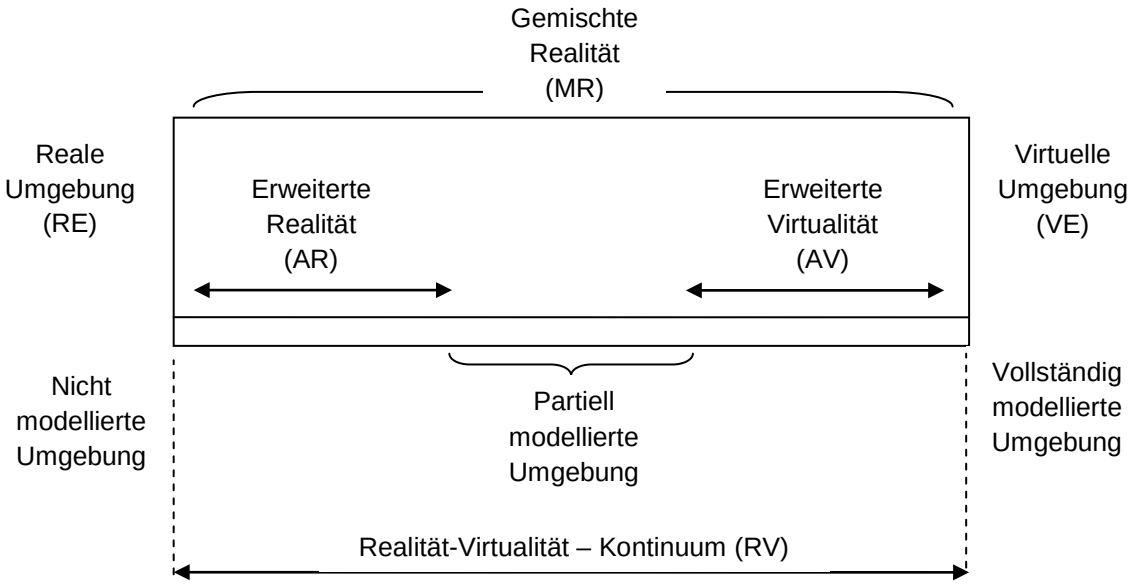


Abb. 6: *Abgrenzung der realen und der virtuellen Umgebung mit Definition der Mixed Reality innerhalb des RV Kontinuums (Alt ,2002; Milgram, Colquhoun Jr. ,1999)*

3.1.2 AR-Displays

Die Anzeigegeräte können in zwei Arten unterteilt werden, Optical-See-Through (OST) und Video-See-Through (VST).

Ein OST-System kombiniert die realen und synthetischen Bilder mittels eines halbdurchlässigen Spiegels, der sich vor den Augen des Anwenders befindet. Hingegen erzeugt das VST-System vor den Augen des Anwenders (mit einer Video-Kamera, die in der Nähe des Kopfes montiert wird wie ein Video Mixer) eine Kombination der realen Umgebung mit einem computer-generierten Bild (Alt, 2002; Fuchs, Ackermann, 1999) (s. **Abb. 7,** S.31)**.**

Darüber hinaus können die AR-Anzeigegeräte auch nach ihrem optischen Aufbau in monokular, biokular und binokular (Alt, 2003) unterteilt werden (s. **Abb. 8**, S.31). Fritzsche (2006) unterscheidet zwei Merkmale, den Grad der Gesichtsfeld-Verdeckung und das angesprochene Auge. Ersteres kann für die korrekte und schnelle Wahrnehmung der Realität und, wenn im Einsatz im Betrieb, für die Arbeitssicherheit (Mobilität) von Nachteil sein (Alt, 2003).

Desweiten existieren auch mobile Anzeigegeräte, die die Information nicht vor den Augen des Anwenders zur Verfügung stellt, sondern z. B. auf Bildschirmen oder mobilen Rechnern.

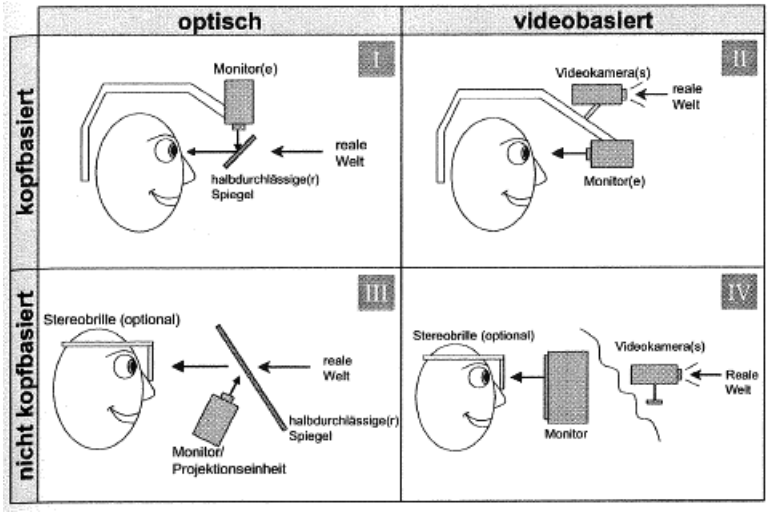


Abb. 7: *Einordnung von Displays für Augmented Reality (I, II nach Luczak et. al. 2003, S 2000; S. 202, IV nach Azuma ,1997; S. 363) in Oehme (2004). Übernommen aus Oehme, 2004; S.11.)*

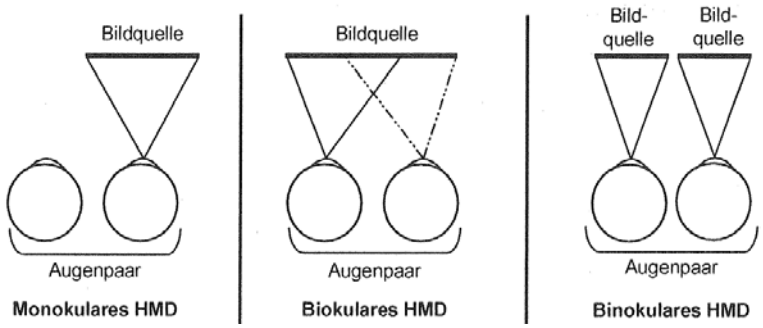


Abb. 8: *Unterteilung der Anzeigegeräte nach optischem Aufbau*. (Übernommen von Alt, 2003; S.9.)

3.1.3 Anwendungsgebiete

Der Einsatz von Wearable computing (tragbaren Computern) wird erst durch die Miniaturisierung der Technik und der Netzwerk-Technologie möglich. Diese erlaubt ihren Einsatz auch jenseits eines festen Arbeitsplatzes (Feiner et al., 1999) und ermöglicht eine mobile Nutzung von kombinierten Medien (Autenrieth, 2004). Laut Azuma (1997) gibt es mindestens sechs Bereiche, in denen AR-Technologien angewendet werden können: die

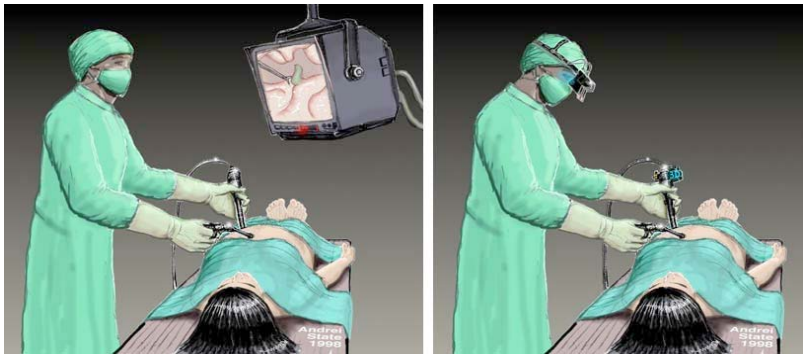
medizinische Visualistik, Instandhaltung und Reparatur von Gebäuden oder Leitungen, Annotation und Visualisierung von Information in Bibliotheken, Planung der Bewegungsmuster eines Roboters, für Freizeitzwecke sowie militärische Flugmaschinen und Zielsteuerung.

In diesem Abschnitt werden Beispiele für aktuelle und zukünftige AR-Anwendungsgebiete gegeben und erläutert.

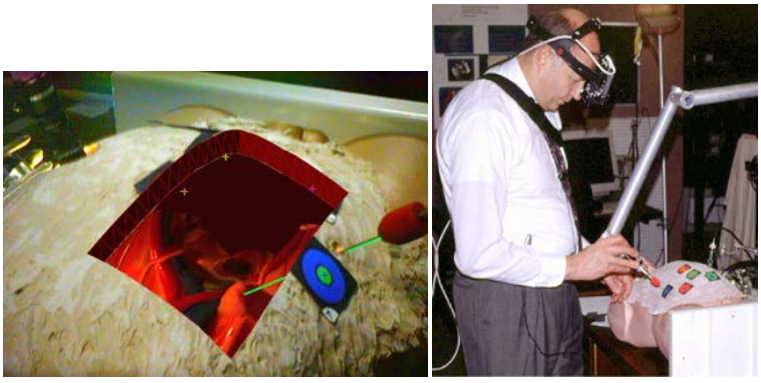
Der Bereich der Produktion/Industrie stellt ein überaus breites Anwendungsfeld für die AR dar. So kann z. B. innerhalb einer bestehenden Fabrikhalle die Produktion eines neuen Produktes oder einer Produktpalette mit verschiedenen Modellen geplant werden, indem virtuelle (geplante) Maschinen und Werkzeuge in die reale Halle eingeblendet werden. In einer weiteren Anwendung können direkt in einem Montageprozess einem Werker am Montageort Hinweise zur Ausführung seiner Tätigkeit gegeben werden (s. **Abb. 9**). Dies kann für zahlreiche Aufgaben in der Montage z. B. der Installation von Rohr- oder Kabelleitungen (Azuma, 1997), für Verkleidungen oder Innendesign (Tegtmeier, 2006), der Qualitätssicherung und in der Kommissionierung genutzt werden. Desweiteren ist die AR bei der Fahrassistenz in teureren Wagenklassen hilfreich. Gleiches gilt auch für den Servicebereich, z. B. für die Instandsetzung eines Flugzeugs oder die Cockpitgestaltung (Fritzsche, 2006; Tegtmeier, 2006; Böckelmann et al., 2011). Darüber hinaus finden AR-Technologien Anwendung bei Teleoperationen von Robotern mit verzögertem Feedback (Stereoscopic AR), bei der virtuelle Bewegungsmuster angewendet werden, um die Programmierung des Bewegungsspielraumes zu testen und später in der realen Welt in Auftrag zu geben (Azuma, 1997). In diesem Fall wäre der Einsatz von AR-Technologie in der Luft- und Raumfahrt denkbar.

Abb. 9: *Anwendungsbeispiel in der Montage (Microvision, 2011)*

Einen weiteren wichtigen Anwendungsbereich der AR, für den es bereits prototypische Lösungen und damit auch erste Anwender-Untersuchungen gibt, stellt die Medizin dar. Bei der medizinischen Visualistik anhand Magnetresonanztomographie (MRT), Computer Tomographie (CT) und Ultraschall (US) lassen sich etwa Operationen (Laparoskopie, s. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)** mit AR-Technologien planen, indem über echte Bilder des Patienten virtuelle Schnitte gelegt werden und beispielweise die Lage eines Endoskops auf dem Patientenkörper eingeblendet wird. Dies kann auch für Trainingszwecke nützlich sein. Desweiteren haben die AR-Technologien potenzielle Anwendung bei der Pränatal- und Brustkrebsdiagnostik in Kombination mit Ultraschallbildern. In diesem Fall wird Ultraschall zur Lokalisation der Nadel und der Läsion sowie für das Absaugen der Zyste angewendet (s. **Abb. 11**).



a) b)



c)

Abb. 10: *Beispiel der Durchführung einer Laparoskopie mit dem Gesichtsfeld des Chirurgen Anmerkungen - a) mit Monitor und Disparität der Handbewegungen mit der Orientierung der Kamera und Blickrichtung des Chirurgen. Hier muss die Kamera manuell justiert werden, wodurch nur eine Hand bei der Operation zum Einsatz kommen kann. b) geplanter Einsatz des HMDs um eine Draufsicht zu ermöglichen, die nicht nur in Blickrichtung der Kamera funktioniert, sondern auch eine dreidimensionale Sicht im (HMD) Gesichtsfeld des Chirurgen ermöglicht. Diese Sicht hilft die Disparität die bei den Kamerabewegungen entsteht, zu eliminieren. c) Laparoskopie-Training. (Übernommen von State, 1998).*

Abb. 11: *Ultraschall-gesteuerte Brust-Biopsie. (Übernommen von State, 2000).*

Im militärischen Bereich dienen HMD-Systeme als Unterstützung bei Einsätzen von Kampfpiloten oder Fußsoldaten. In Hubschraubern oder Kampfflugzeugen finden Head-UP-Displays (HUD) (s. **Abb. 14**) und Head-Mounted Sights (HMS) Anwendung (s**. Abb. 12**, **Abb. 13**) um Navigation und Zielerfassung zu erleichtern. Fußsoldaten nutzen HMD-Systeme zur Orientierung und Informationsübermittlung (Azuma, 1997). (Milgram, Colquhoun Jr., 1999).

Abb. 12: *Head Up Display im Kampfflugzeug. (CHIP, 2010).*

Abb. 13: *Beispiel der Anwendung der AR-Technologie bei Piloten. (Aero, 2011)*

Weitere Anwendungsfelder sind denkbar in der Geographie (Überlagerung von Daten aus Geoinformationssystemen), im Tourismus zur Orientierung in der Natur, der Kennzeichnung von Orten, Gebäuden oder Wahrzeichen oder der Visualisierung von Kulturstätten im originalen Zustand. Ihr Einsatz wäre weiterhin möglich bei der Organisation von Daten, zur Navigation bei schlechten Wetter- und Sichtverhältnissen (z.B. Nebel) oder zur Unterstützung bei Unterwasserarbeiten (Schweiß-Taucher) (Azuma, 1997). Im Freizeitbereich könnten Head-Mounted-Displays in Computerspielen und in der Filmindustrie Anwendung finden (Azuma, 1997).

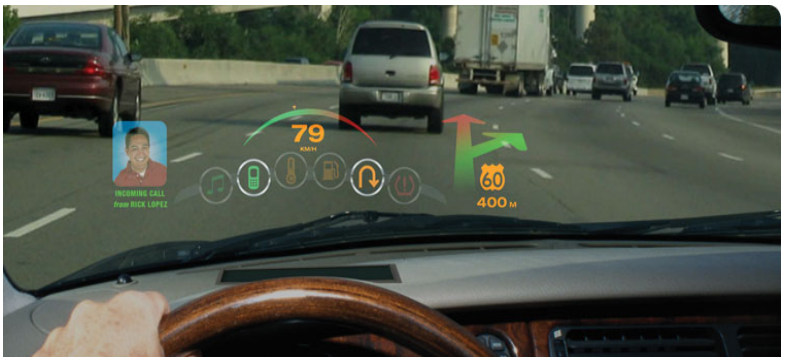


Abb. 14. *Beispiel eines eigebauten HUD im Auto (Microvision, 2012)*

3.1.4 Ergonomische Aspekte bei der Gestaltung von AR-Technologien

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, beruhen AR-Technologien schwerpunktmäßig auf der visuellen Wahrnehmung bzw. auf dem Gesichtsfeld oder dem Grad der Verdeckung, weil durch diesen Weg die angereicherte Information zum Anwender übermittelt wird. Somit spielen die Hard- und Software-Eigenschaften der Geräte eine äußerst wichtige Rolle (Alt, 2003; Fritzsche, 2006), die in diesem Kapitel betrachtet wird. Bernotat (1978) beschreibt, dass sich der Mensch bei der Ausführung eines Auftrages unter Einflüssen der Umwelt und der Technik befindet. Für die korrekte Erfüllung des Auftrages ist neben diesen beiden Faktoren die unbeeinträchtigte Wahrnehmung seiner Umgebung ausschlaggebend. Dies ist zur Vermeidung von Arbeitsunfällen notwendig, beispielweise durch das rechtzeitige Sehen eines Warnsignals oder Hindernisses, das Vermeiden eines Sturzes oder die Betätigung des Bremspedals.

Man kann daraus schließen, dass die Referenzbasis der Verbesserungsbereiche der menschgerechten Systemgestaltung bei der Nutzer-Orientierung, also bei Benutzeroberfläche und Handhabung, liegen (Böckelmann et al., 2011).

Die ergonomischen Aspekte können in zwei Kategorien, die visuell-kgnitive Kriterien und die Handhabungskriterien, eingeteilt werden.

Zu den kogno-visuellen Kriterien gehören laut Oehme (2004) die See-through/Look Around Fähigkeit, das virtuelle Sichtfeld, das reale oder periphere Sichtfeld, die Farbdarstellbarkeit, die Augendominanzeinstellbarkeit, die Stereoskopiefähigkeit, die Kontrast und Helligkeit sowie die Auflösung.

Ein weiteres visuelles Kriterium bei stereoskopischen Displays ist die Akkomodationsentfernung, die Entfernung auf die das menschliche Auge sich einstellen muss, um das virtuelle Bild scharf zu sehen. Da bei häufigem Akkommodieren und großer Entfernung Ermüdungserscheinungen auftreten können, wird der Einsatz von HMDs bei Montagearbeiten nicht empfohlen (Oehme, 2004). Neben den Ermüdungserscheinungen muss der Benutzer sich entscheiden, welches Bild er fokussieren will, das reale oder das virtuelle. Dies kann gelingen, wenn sich beide Objekte in gleicher Entfernung befinden (s. **Abb. 15**). Während die Akkomodationsentfernung für virtuelle Objekte die Entfernung vom Betrachter bis zur Projektionsfläche ist, oder die Akkommodationsfläche im Fall der See-Through-Geräte, entspricht die Akkommodationsentfernung für reale Objekte der Entfernung zur Position des realen Objektes (Drascic, Milgram 1996).

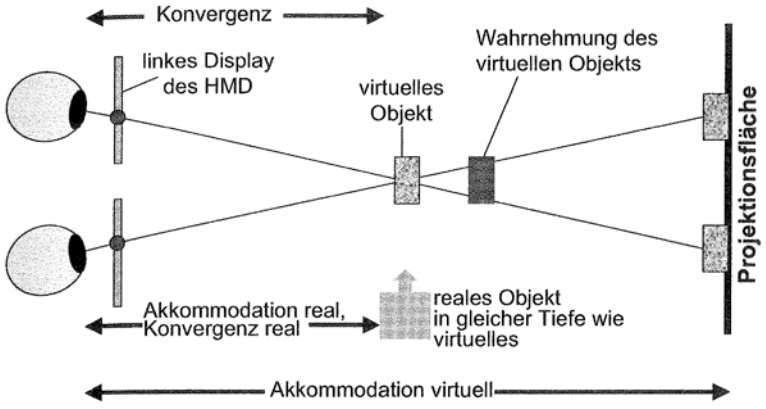


Abb. 15: *Akkommodationskonflikt zwischen realen und virtuellen Informationen/Konflikt durch Entkopplung von Akkomodation und Vergenz und Wahrnehmungsverzerrung bei gekreuzter Parallaxe[6] (Übernommen aus Oehme 2004 S.33, nach Drascic, Milgramm (1996, S.129)*

[6] Parallaxe: Arrangement der Umgebung bei Perspektiv-Wechsel was uns erlaubt verschiedene Perspektive der Welt (durch unsere zwei Augen) zu bekommen ohne uns zu bewegen (Drascic, Milgram, 1996).

Wenn man aber versucht ein reales Objekt in derselben Entfernung wie das virtuelle Objekt zu platzieren, ergibt sich eine Akkomodationsdiskrepanz, die dem Betrachter sagt, dass sich die Objekte in verschiedenen Entfernungen befinden, was die richtige Wahrnehmung von Tiefenentfernung und Größe täuschen kann (Drascic, Milgramm, 1996).

Oehme (2004) beschreibt die Entstehung des Vergenz-Akkommodation-Konfliktes bei gekreuzter Parallaxe bei binokularen HMDs. Dies geschieht, wenn ein Auge auf das virtuelle Objekt fokussiert (auf eine bestimmten Tiefenentfernung) und das andere auf die Projektionsfläche, die sich in Akkommodationsentfernung (auf einer anderen Tiefenentfernung) befindet. Dieser Konflikt kann laut Oehme (2004) vermieden werden, wenn sich das virtuelle Objekt auf der Projektionsfläche und bei Nullparallaxe befindet.

Zu den Handhabungskriterien zählt das Gewicht, das nach Rottenkolber, Edelmann, Höller (2004) in Fritszche (2006) nicht mehr als 200g betragen soll. Außerdem zählen dazu das Drehmoment, die Möglichkeiten des Justierens und des Wegklappens sowie Brillentauglichkeit bzw. Möglichkeiten der Fehlsichtkorrektur. Desweiteren sollte das Gerät möglichst kabellos sein, hohen Tragekomfort und Kommunikationsmöglichkeiten (Mikrophon/Kopfhörer) bieten. Helligkeit und Kontrast sollten individuell einstellbar sein (Oehme, 2004; Edelmann, Höller, 2004 in Fritszche, 2006).

Head-Mounted Displays, Video-see-through (VST) und Non-head Mounted-Displays weisen folgende Limitationen auf. Bei HMDs weisen Fuchs und Ackermann (1999) auf das Rendering hin. Das Rendering ist die Zeit, die der Rechner benötigt um bei einer Kopfbewegung die Umgebung neu zu berechnen oder zu justieren. Dies kann zu einem Konflikt (Desorientierung) in der Interaktion mit der Umgebung und zur sogenannten Simulator-Krankheit oder Cyber-sickness führen (Oehme, 2004), die auch in der Studie (mit Flugpiloten) von Pfendler (2007) genannt wurde. Weitere Beeinträchtigungen, die auftreten können, sind Sehstörungen und Kopfschmerzen, aber auch Wahrnehmungstäuschungen (z. B. falsche Entfernungswahrnehmung, falsche Schätzung des Nickwinkels oder der Höhe) und dynamische Wahrnehmungstäuschungen (z. B. Bewegungswahrnehmung bei fehlender Bewegung; Übersehen von Driftbewegungen) während des Fluges. Als Ursache für die Simulatorkrankheit werden laut Pfendler (2007) „Divergenzen zwischen der visuellen und der vestibulären Bewegungsrückmeldung vermutet, die entstehen, wenn bei ruhenden Bildern im HMD Kopfbewegungen auftreten.“ (Pfendler, 2007, S. 237). Desweiteren ist die Umgebung des Benutzers nicht oder nur in Schattenart sichtbar, wenn die Helligkeit des HMDs im Vergleich zu den Umgebungslichtverhältnissen zu hoch ist, was zum Übersehen von Warnsignalen oder -lichtern führen könnte. Als weiteres Phänomen ist die Okklusion zu

nennen, die auftritt, wenn sich ein synthetisches Objekt vor einem realen befindet. Das reale Objekt erscheint in diesem Fall (meistens) durchsichtig.
Bei den VST-Displays besteht das Problem des Kamera-Abgleich (Versetzung der Kamera) und des limitierten Gesichtsfeldes (Field-of-View, FOV), worunter man den „maximalen Winkel, in dem ein HMD Informationen darstellen kann bzw. in welchen ein Durchschauen auf die reale Szene möglich ist“ versteht (Oehme, 2004, S. 35). Weitere Probleme entstehen aufgrund der zeitlichen Verzögerung durch die Rechenzeit und die limitierte Feldtiefe. Desweiteren geht auch die Stereoposis verloren, wenn nur eine Kamera benutzt wird. Da Kameras unter einem schmaleren Lichtintensität-Operationsspektrum optimal arbeiten als das menschliche Auge, müssen diese Faktoren bei den Kamera-Einstellungen und der Kamera-Auswahl berücksichtigt werden. Darüber hinaus besteht auch das Okklusion-Problem bei den VST-Geräten weiter (Fuchs, Ackermann, 1999).

Non-Head-Mounted Displays haben ihren Einsatz in Situationen, in denen HMDs nicht praktikabel oder nicht möglich sind, bspw. bei Langzeit-Benutzungen oder der Verwendung anderer Mittel in einer nicht-augmentierten Umgebung. Der Vorteil dieser Systeme ist, dass sie eine höhere Auflösung anbieten als normale Monitore für AR-Anwendungen und somit keine Ermüdung oder Beschwerden durch das Tragen auftreten. Ihr Nachteil besteht darin, dass die Geräte wenig Arbeitskapazität haben, was bei Platzmangel potenzielle Schwierigkeiten nach sich zieht (Fuchs, Ackermann, 1999).

Die Anforderungskriterien sind laut Oehme (2004) von Gerät zu Gerät unterschiedlich und nicht immer miteinander kompatibel (Fritzsche, 2006). Auf der einen Seite müssen die Geräte ein geringes Gewicht haben (Tragekomfort), so dass Beschwerden durch das Tragen oder das Drehmoment (statischen Haltemoment) in der Hals-, Rücken-, Schulter-, und Nackenregion sowie Druckstellen vermieden werden. Auf der anderen Seite müssen diese Displays ausreichend Platz für Brillenträger (oder für eine Fehlsichtkorrektur) bieten, da es durchaus sein kann, dass es z. B. Operateure gibt, die Brille statt Kontaktlinsen tragen. Außerdem sollte das Gehäuse der Geräte Stabilität gegen Stöße oder Beschleunigung bieten, besonders im virtuellen Gesichtsfeld, in dem letztendlich die virtuellen Informationen visualisiert werden. Zudem sollen die Geräte die Möglichkeit des Wegklappens bieten um eine freie Sicht zum Arbeitsfeld zu ermöglichen, wenn es gerade nicht benutzt wird, da ein häufiges Auf- und Absetzen zu Beschädigungen führen kann.

Für bessere Mobilität, Arbeitssicherheit, Erreichbarkeit und Kommunikation bei der (manchmal auch beidhändigen) Arbeitstätigkeit wäre die Installation eines Mikrophons und integrierten Kopfhörern sowie der kabellose Aufbau (Oehme, 2004) sinnvoll. Weiterhin ist die Möglichkeit Helligkeit bzw. Kontrast einzustellen und Antibeschlag-Beschichtungen

vorteilhaft, da große Helligkeits- und Temperaturunterschiede zu schweren Sichtbedingungen führen können.

3.2 Ultraschall und Ultraschallanwendungen

Zunächst muss erklärt werden, was Schall bzw. Ultraschall (US) ist. Schall wird nach VDI (2008) als „physikalische Energie“ bezeichnet. Ultraschall wird als Schall bezeichnet, der über der Hörbarkeitsgrenze des menschlichen Gehörs (DIN 1320) liegt, die vereinbarungsgemäß bei 16 bzw. bei 20 kHz. Da Schall eine mechanische Bewegung von Materie ist, braucht auch Ultraschall ein Medium zur Entstehung und Ausbreitung und kann sich daher nicht im Vakuum ausbreiten. Das Medium (Gase, Flüssigkeiten und Festkörper) bestimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit die jeweilige Wirkung (Hill, Haar, 1985; Wodara, 2004; VDI, 2008).

Heutzutage kommen ultraschallbasierte Technologien auf verschiedensten Gebieten zum Einsatz. Weit verbreitete Einsatzfelder sind die Navigation und Ortung sowie die medizinische Diagnostik und Therapie. Ultraschall wird zu Reinigungszwecken (z. B. von Bauteilen, Schmuck, Zähnen und Kläranlagen) eingesetzt und findet Anwendung bei der Herstellung von Emulsionen und Werkstoffen, der Verfahrensbeschleunigung und der Materialprüfung. Auch bei der Bauteileentwicklung wird auf ultraschallbasierte Technologien zurückgegriffen, wobei die Materialeigenschaften der Metalllegierungen durch die Anwendung von Hochleistungsultraschall (HLU) zielgenau modifiziert werden.

Die Anwendungen des Ultraschalls lassen sich nach Wodara (1984) gemäß ihrer gewünschten oder erwarteten Effekte oder Ziele in passive und aktive Anwendungen einteilen.

Bei passiven Anwendungen spricht man von Messschall. Sie verfügen über „geringe Intensität (niederenergetische Schwingungen mit kleiner Amplitude), die keine physikalischen oder chemischen Veränderungen im beschallten Medium hervorrufen“ (Wodara, 2004, S.1). Zu ihnen zählt z. B. die Sonographie der Halsschlagarterien, Pränataldiagnostik und Ortung.

Die aktiven Anwendungen zeichnen sich durch ihre „hohe Intensität (hochenergetische Schwingungen mit einer Leistungsdichte von mehr als 0,5 bis 1 W/cm^2 und großer Amplitude) [aus], die Eigenschafts- oder Strukturveränderungen bzw. Veränderungen im behandelten Werkstück im beschallten Medium hervorrufen“ (Wodara, 2004, S. 2). Zu dieser US-Anwendungsart gehören u.a. Ultraschallreinigung, Verfahrensbeschleunigung in

chemischen Reaktoren, Schneiden, Schweißen, Emulgieren, Dispergieren, Kläranlagen, Zerstäuben und Gießen.

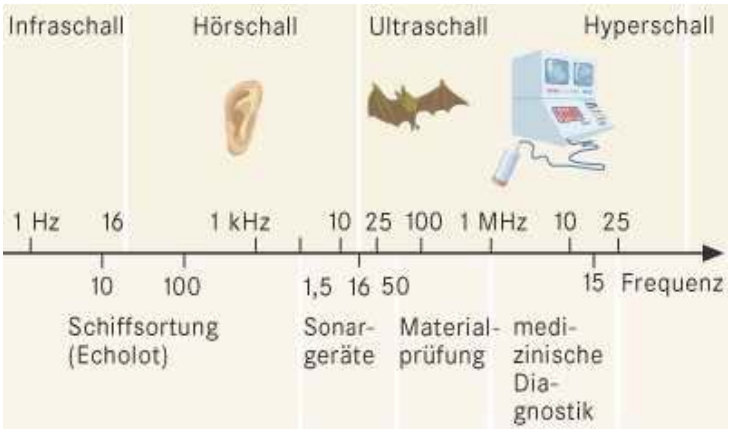


Abb. 16: *Unterteilung der Frequenzbereiche für Schallanwendungen. (Meyers, 2008)*

Die Anwendungsgebiete des Schalls (s. **Abb. 16**) und des Ultraschalls werden nach der Betriebsfrequenz (s. **Tabelle 4**, S.41 und **Tabelle 5**, S.42) und den gewünschten oder erwarteten Effekten oder Zielen unterteilt, die je nach Anwendung positiv (z. B. bei Reinigung von Schmuck) oder negativ (z. B. wenn die empfohlene Reinigungszeit überschritten wird und dadurch eine Beschädigung der Oberfläche entsteht) sein können. Da jede Anwendung eine Klasse für sich ist, werden an dieser Stelle keine weiteren Beispiele erläutert.

Tabelle 4: *Industrielle Anwendungen des Ultraschalls im Hochleistungsbereich nach Repacholi (1981) vom Verfasser übersetzt*

Anwendung	Beschreibung	Frequenz (kHz)	Leistungs- oder Intensitätsbereich
Reinigung und Entfettung	Reinigung durch Kavitation, Lösung reinigt Teile, die sich darin befinden	18-100	Normalerweise unter 10 W/cm^2 aber bis zu 100 W Leistung
Schweißen und Löten	Verschiebung vom Oxide-Film, Verbindung ohne Flussmittel	Ca. 30	2- 200 W/cm^2
Kunststoffschweißen	Schweißen von elastischen und harten Kunststoffen	20-60	Normalerweise 20-30 W/cm^2 aber 2abgegebene Leistung unter 1000 W
Metallschweißen	Schweißen von artgleichen und artungleichen Metallen	10-60	Bis zur 10 000 W/cm^2
Zerspanung	Rotationszerspanung, Stoß-schleifen unter Verwendung von Schleifschlamm, vibrations-assistiertes Bohren	Normalerweise 20	
Extraktion	Extraktion von Parfüm, Säften, Chemikalien aus Blumen, Obst, Pflanzen	Ca. 20	Ca. 500 W/cm^2
Zerstäubung	Kraftstoffzerstäubung um die Verbrennungseffizienz zu erhöhen und die Immission zu reduzieren; auch Dispersion geschmolzener Metalle	20- 30 000	Bis zur 800 W
Emulgierung	Mischung und Homogenisierung, Schlamm und Cremen	-	-
Entschäumen und Entgasen	Trennung von Schaum und Gas von der Flüssigkeit, Reduzierung von Gas und Schauminhalt	-	-
Schäumen von Getränken	Schaum verdrängt Luft in Flaschen oder Behälter vor Abdeckung	-	-
Elektroplattierung	Erhöht das Plattierungs-Niveau und erzeugt dichtere einheitliche Ablagerung	Ca.27	30 W
Erosion	Test der Erosion durch Kavitation, Entgraten/Schleifen, Abziehen	-	-
Trocknen	Trocknen von Wärme-empfindliche Pulver, Lebensmitteln, Pharmazeutika	Ca. 20	Ca. 150 W

***Tabelle 5**: Industrielle Anwendungen des Ultraschalls im Niedrigleistungsbereich nach Lynworth (1975) vom Verfasser übersetzt und modifiziert*

Anwendung/ Messung von:	Prinzip	Frequenz
Durchfluss	Ermittlung von Durchflussleistung für Gase, Flüssigkeiten und Festkörper- Dopplertechnik	1-10 MHz
Elastische Eigenschaften	Relativ zur Schallgeschwindigkeit und Resonanzarten der Polarisierung	25-300 MHz
Temperatur	Ansprechverhalten zur Temperaturabhängigkeit des Schalls, Geschwindigkeit oder Minderung/Dämpfung	Bis zur 30 MHz
Dicke	Messung des Hin- und Rückfahrtintervalls des Pulses	2-10 MHz
Dichte, Porosität	Resonante und nicht-resonante Transmission der Probe	Bis zur 50 kHz
Feinkörnigkeit der Metalle	Ultraschalldämpfung	Wenige MHz
Druck	Die Frequenz des Quarz-Kristalls- Schwingers (Messquarz) ändert sich mit angewandtem Druck	0,5-1 MHz
Pegelstand	Minderung/Dämpfung des US-Strahls oder Messung der Laufzeit (pulse-echo-Technik)	Ca. 100 kHz
Zählen	Zählen der Strahlunterbrechungen	40 kHz
Fehler-Erkennung (Materialprüfung)	Beobachten von Werkstofftrennungen im abgestrahlten Strahl	25 kHz bis 25 MHz (mW Leistung)
Zeitverzögerungslinien	Wandlung des elektrischen Signals zu Ultraschall und zurück nachdem der Ultraschall einen definierte Route überquert ist.	Wenige MHz
Einbruchswarnanlage	Ultraschall ist in den Raum eingestrahlt und ein bestimmter Anteil des Strahles ist überwacht; sollte sich dieser Anteil ändern (durch Einbrecher) läutet ein Alarmsignal	18-50 kHz (mW Leistung)
Schädlingsbekämpfung	Frequenz und Intensität des US wirkt störend bei Schädlingen, ist für Menschen jedoch nicht hörbar.	18-50 kHz (mW Leistung)
Sonar	Die Doppler-Methode ermittelt Anwesenheit und Geschwindigkeit des Objektes	5-50 kHz
Akustisches Mikroskop	Beobachtet Phasen-Verschiebung und Dämpfung des US-Strahls beim Exemplar	100-3000 MHz

3.2.1 Gefährdungsarten, Belastungsquellen und –folgen

Grundsätzlich kann eine gesundheitsgefährliche Belastung durch zwei Aussetzungsarten bestehen, nämlich durch luft- und kontaktübertragenen Ultraschall. Im ersten Fall, und Gegenstand dieser Arbeit, findet eine Einleitung des Ultraschalls über das Trommelfell in das Innenohr statt. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang verschiedene mögliche vegetative und subjektive Störungen diskutiert, wie die Beeinträchtigung des Hörvermögens, Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Tinnitus, Veränderung des Blutzuckerspiegels sowie Ermüdung und Reizbarkeit (Acton, 1983; WHO, 1982; Kuttruff, 1989; Skiba, 1994; VDI, 2008). Ähnliche Beschwerden wurden auch bei der Anwendung von niederfrequentem Ultraschall beschrieben (s. Kuttruff, 1989). Laut VDI (2008) ist eine Schädigung des Innenohres durch Ultraschall (in gleicher Weise wie bei Hörschall) möglich, da im Bereich des Überganges zwischen Hörfrequenz und Ultraschall je höher die Frequenz ist, desto gößer muss der Schalldruckpegel sein, um Hörempfindungen auszulösen. (s. VDI, 2008, S.23)

Im zweiten Fall liegt ein extraauraler Hautkontakt vor. Wenn der Ultraschall durch Kavitation absorbiert und in Wärme umgewandelt wird, können einige biochemische Prozesse dabei beeinträchtigt werden. Es kann zu Zelle- und Gewebezerstörung sowie zur Entstehung zytotoxischer freier Radikale kommen (Canada, 1991, Sorge, 2002; PubMed, 2000; Fučić et. al., 2007; O'Brien Jr., 2007). Das schädigende Potenzial des Ultraschalls hängt vom Schalldruck und seiner Intensität ab. Wenn eine mittlere Intensität von 0,1 W/cm^2 nicht überschritten wird, gilt sie als gesundheitlich unbedenklich (Lips, Hohmann, 1997). Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit hängt von der Wellenlänge des Schalls und von dem Ausbreitungsmedium ab (s**. Tabelle 6**).

Tabelle 6: *Beispiele für Schallausbreitungsgeschwindigkeiten übernommen aus Lips, Hohmann (1997)*

Stoff		Temperatur [°C]	Dichte [kg/m^3]	Schallausbreitungsgeschwindigkeit [m/s]
Gase	Luft	20	1,205	344
Flüssigkeiten	Wasser	20	998	1‘483
	Sauerstoff	-183	1‘143	909
Metalle	Stahl	20	7‘840	5‘100
	Aluminium	20	2‘700	5‘100

Acton und Carson (1967) berichten, dass in ihrer Studie Beschwerden wie Kopfschmerzen, Ohrendruck, Brechreiz und Tinnitus aufgetreten sind, wenn mit hoher Ultraschallfrequenz und hörbaren Anteilen gearbeitet wurde. Keine Beeinträchtigungen waren zu beobachten, wenn die Versuchspersonen (VP) Ultraschall ohne hörbaren Anteilen ausgesetzt wurden und mit älteren VP gearbeitet wurde, die schon Lärm vorbelastet waren und Hörverluste hatten. Sie schlussfolgerten daraus, dass subjektive Beschwerden bei einer Betriebsfrequenz von 20 kHz und unter 110 dB durchaus möglich seien (Acton, Carson, 1968) und dass hörbare Anteile vorhanden sein müssen, um diese subjektiven Effekte zu beobachten. Auch Von Gierke (1950) berichtet, dass Ultraschall hörbar werden kann, da subharmonische Schwingungen im Ohr erzeugt werden.

Daraus kann man schließen, dass bei der Anwendung von kavitationsbasierten Verfahren die Gefahr des Auftretens extraauraler Beschwerden durch die Präsenz subharmonischer Schwingungen besteht. Subharmonischen Schwingungen (s. Abb. 17, S. 24) sind die hörbaren Töne in 1/X Anteil (z. B. 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/8 oder 1/10) einer gegebenen Frequenz. So betragen bei einer gegeben Betriebsfrequenz von 20 kHz die subharmonischen Töne bei der Hälfte der Betriebsfrequenz 10 kHz (im Hörbereich) und bei einem Drittel 17.6 kHz (Lips, Hohmann, 1997). Die letzte Frequenz (17, 6 kHz) befindet sich im oberen Ende des Hörbereiches. Subharmonische Beschwerden könnten, wenn überhaupt, nur im geringen Maße auftreten (Acton, Carson, 1968). Acton und Carson (1968) erklären, dass diese subjektive Beschwerde eine Reaktion des Zentralen Nervensystems auf die hohen Schallfrequenzen ist, indem sie „hörbar“ wurden. Damit der Ultraschall hörbar wird (und eine Erhöhung der Reizschwelle rasch möglich ist), müssen die Schalldruckpegel hoch genug sein. Dies wird bezeichnet als Übergang von *upper sonic* zu *ultrasonic* Frequenzen (Herbertz, Grunter, 1981; Herbertz, 1984).

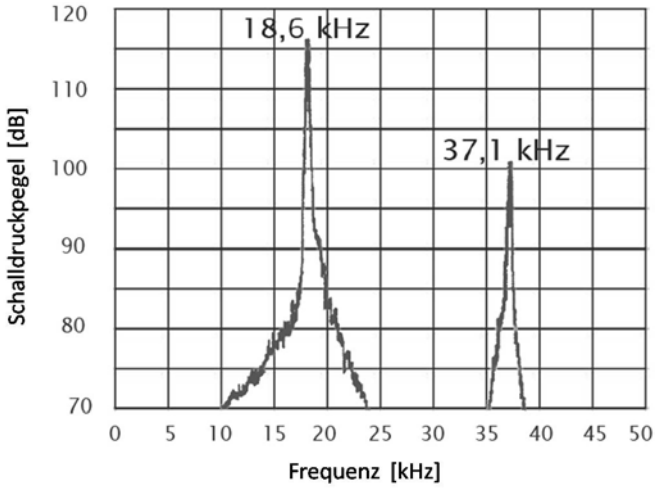


Abb. 17: *Einbettung einer Messinghülse in Kunststoff nach Lips , Hohmann (1997). Das hörbare Pfeifen (15 – 18 kHz) entsteht als subharmonische Schwingung der Arbeitsfrequenz 37,1 kHz*

3.2.2 Anwendung von Hochleistungsultraschall (HLU) zur Vergütung von Legierungsschmelzen für den Formguss von Leichtmetalbauteilen aus Aluminium

Nach hochgradiger Ausfeilung des Motormanagements und aller Reibungsverluste am Fahrzeug ist der Leichtbau das prägnanteste Instrument zur Senkung des Aufwands an Antriebsenergie. Vor zehn Jahren noch hätte es als nicht realisierbares Sicherheitswagnis gegolten, Automobil-Fahrwerksteile aus Aluminium zu gießen. Grundlagenforschungen zu Kristallisationsvorgängen sich abkühlender Legierungsschmelzen aus den Moskau/Leningrader wissenschaftlichen Schulen um G.I. Eskin und A.B. Donskoy (Krstić, Sánchez Márquez, 2009) in den siebziger Jahren wiesen technologische Wege auf, den Leichtbau-Vorteilen des Aluminiums beständig bessere Anwendungseigenschaften im Automobil- bis hin zum Raumfahrzeugbau zu vermitteln (Krstić, Sánchez Márquez, 2009).

Die Verwendung von akustischer Kavitation in industriellen Anwendungen wie der Entgasung, Filtration und Verfeinerung der Körner (Eskin, 2001) findet auch bei der Legierungsvergütung und dem Gießen von Leichtbau-Komponenten statt. Als Teil der Vergütung werden Maß- und Wärme-Transfer-Prozesse beschleunigt, wie es z. B. bei der Diffusion, Dissolution, Dispersion und Emulgierung der Fall ist. Es wird hiermit von den Vorteilen der Kavitation profitiert um die innere Struktur des Metalls so zu verändern, dass sie widerstandsfähiger wird (Eskin, 2001).

Die Kavitationsentwicklung in der Schmelze ist eine der Hauptvoraussetzungen für die Ultraschallbehandlung der Schmelze. Kavitation wird als die Entstehung und der Zusammenfall von Hohlräumen (z. B. Gasblasen) mit großem Druck bei der Ultraschallexposition bezeichnet. Einige dieser Hohlräume geraten in Schwingung bei der Betriebsfrequenz, die normalerweise 18 kHz beträgt. Andere, die nicht vollständig mit Gas gefüllt sind, platzen unter dem Einfluss und dem Kompressionsdruck der akustischen Welle. Beim Zerplatzen der Hohlräume entstehen kleine Partikel (Kavitationskeime), die in einer Art Kettenreaktion in der Nähe der Ultraschallquelle in wenigen Mikrosekunden generiert werden. Die beim Zerplatzen erzeugte Energie wird in Druck von bis zu 1000 MPa und Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/s umgewandelt (Eskin, 2001).

Die Ultraschallbehandlung der Schmelze durch die Kavitation ist die Basis für die Verstärkung diverser physisch-chemischer Erstarrung vorangehender Prozesse. Wie hoch die Effizienz der Ultraschall-Entgasung ist, wird im Vergleich zu anderen Vorgängen in **Tabelle 7** veranschaulicht.

Tabelle 7: *Vergleich verschiedener Entgasungsverfahren für ALg (Al-Si-Mg) Legierungen. (Übernommen aus Eskin, 2001)*

Methode	H_2 (cm^3/100g)	Dichte (g/cm^3)	Porosität Nummer	UTS (MPa)	El (%)
Eingangsschmelze	,35	2,660	4	200	3,8
Ultraschall	,17	2,706	1-2	245	5,1
Vakuum	,20	2,681	1-2	228	4,2
Argon	,26	2,667	2-3	233	4,0
C_2Cl_6	,30	2,665	2-3	212	4,5
Flux	,26	2,663	3-4	225	4,0

In Gießereien wird zur Schmelzevergütung Ultraschall mit einer Frequenz von 18 bis 25 kHz eingesetzt. Bei der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Anwendung handelt es sich um 20 kHz (s. **Abb. 18**, **Abb. 19, Abb. 20**). Obwohl dieser Frequenzbereich eigentlich außerhalb des menschlichen Hörfeldes liegt, ist der Reiz von Normalhörenden in der Regel dennoch wahrnehmbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Trommelfell durch den unmodulierten Ultraschall zu subharmonischen Schwingungen angeregt wird. Die Hörempfindung wird als sehr hohes, unangenehmes, akutes Pfeifen beschrieben, das einen gewissen Druck auf das Gehör verursacht. Der Ton wird nicht nur beim Eintauchen der Sonotrode in die Schmelze wahrgenommen, sondern ist auch bei der „trockenen" Inbetriebnahme in der Luft zu hören. Der gemessene Schalldruckpegel betrug in dem Versuchsaufbau, wie in **Abb. 20** zu sehen 110 dB(A).

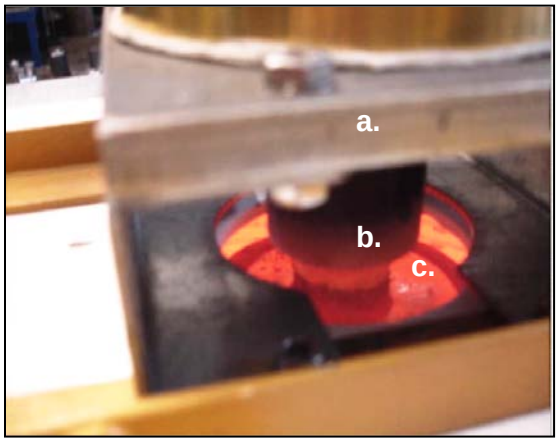


Abb. 18: *Einsatz von Ultraschall beim Gießen; die Beschallung der Schmelze erfolgt hier mit einer Sonotrode bei 20 kHz: a) Sonotrodenhalterung, b) Sonotrodenspitze, c) Schmelzebad*

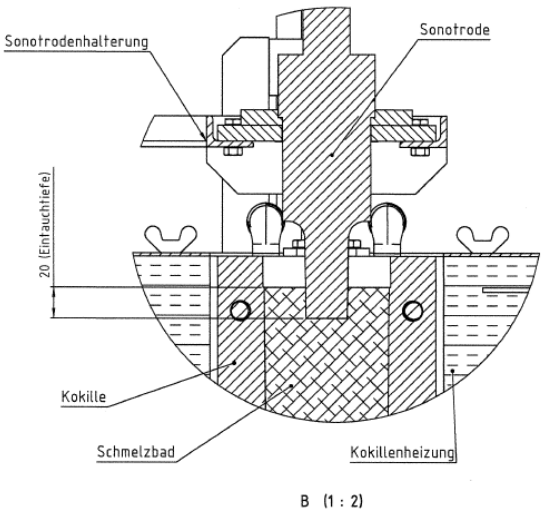


Abb. 19: *Querschnitt des Ultraschallaggregats für die Behandlung von Metallschmelze in der Gießerei (ENA, 2009)*

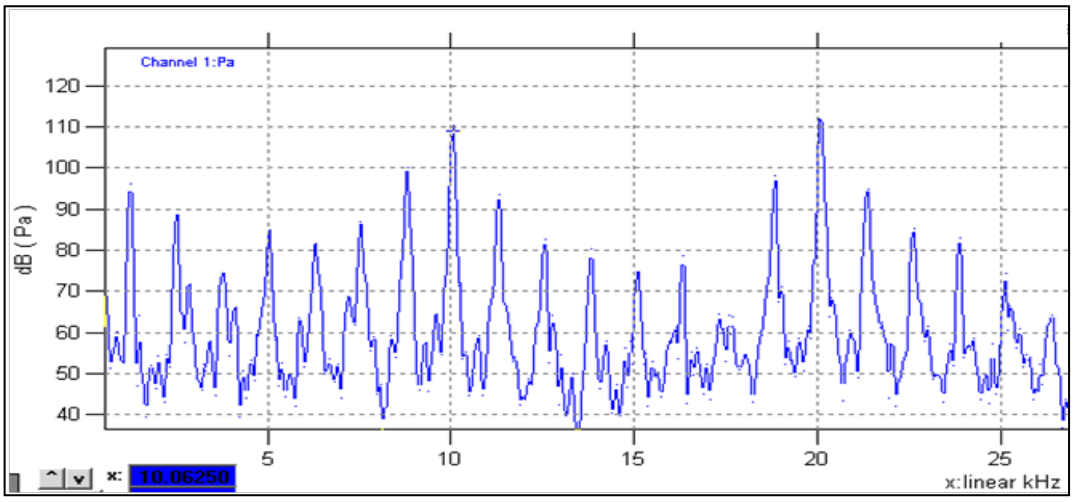


Abb. 20: *Schalldruckpegelmessung mit subharmonischen Schwingungen. Wie der Ausschnitt aus der Schalldruckpegelmessung zeigt, entstehen im menschlichen Hörbereich (z. B. 2 kHz, 10 kHz) subharmonische Schwingungen mit hohem Lärmpegel bei der Beschallung von Aluminium-Legierungsschmelze*

Festzuhalten ist, dass das genaue Ausmaß gesundheitlicher Beeinträchtigungen, das sich beim Einsatz ultraschallbasierter Technologien ergeben kann, bis heute nicht ausreichend geklärt ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Feldexperiment an einem Gießereiarbeitsplatz durchgeführt. Neben einer ausführlichen audiometrischen Untersuchung wurden dabei auch eine Reihe physiologischer Parameter betrachtet.

3.2.3 Ergonomische Aspekte bei der Gestaltung von Arbeitsplätzen unter der Anwendung von luftgeleiteten Ultraschall

Um beschwerdefreies Arbeiten zu gewährleisten, müssen folgende bedeutende Aspekte und Vorschriften, Normen und Regelungen berücksichtigt werden (Maue, 2009):

- RICHTLINIE 2003/10/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm),
- Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV),
- Arbeitststättenverordnung (ArbStättV),
- Verordnungen zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSV)
- EG-Maschinenschutzrichtlinie (2006/42/EG)
- Unfallverhütungsvorschrift (UVV Lärm)
- DIN- Normen und VDI- Richtlinien

Die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung 2007 (LärmVibrationsArbSchV (2007)) setzt Expositions- und Auslösewerte sowie den Spitzenschalldruck fest:

1.	**Expositionsgrenzwerte**	$L_{EX,8h}$= 87 dB(A) bzw.
	Spitzenschalldruckpegel	P_{peak}= 200 Pa[7]
2.	**Obere Auslösewerte**	$L_{EX,8h}$=85 dB(A) bzw.
	Spitzenschalldruckpegel	P_{peak}=140 Pa[8]
3.	**Untere Auslösewerte**	$L_{EX,8h}$=80 dB(A) bzw.
	Spitzenschalldruckpegel	P_{peak}=112 Pa[9]

Bei der Ermittlung des Expositionspegels wird die dämmende Wirkung des Gehörschutzes berücksichtigt, jedoch nicht bei den Auslösewerten.

[7] 140 dB(C) bezogen auf 20 µPa
[8] 137 dB(C) bezogen auf 20 µPa
[9] 135 dB(C) bezogen auf 20 µPa

Unabhängig von den Maßnahmen, die mit den unteren und oberen Auslösewerten verbunden sind, muss der Arbeitgeber nach der LärmVibrationsArbSchV (2007) die Lärmbelastung am Arbeitsplatz so gering halten wie der Stand der Technik es ermöglicht und außerdem folgende Maßnahmen ergreifen :

- $L_{EX,8h}$ **≥ 80 dB(A)** oder L_{pCpeak} **≥ 135 dB(C)**
  - Sind die Beschäftigten über die Gefährdungen durch Lärm zu informieren und zu unterweisen,
- $L_{EX,8h}$ **> 80 dB(A)** oder L_{pCpeak} **> 135 dB(C)**
  - Ist geeigneter Gehörschutz bereitzustellen,
  - Sind den Beschäftigten arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen anzubieten,
- $L_{EX,8h}$ **≥ 85 dB(A)** oder L_{pCpeak} **≥ 137 dB(C)**
  - Sind Bereiche zu kennzeichnen und der Zugang abzugrenzen,
  - Ist die Verwendung von Gehörschutz sicherzustellen,
  - Sind arbeitsmedizinische Voruntersuchungen (nach G20 „Lärm“, BGI/ GUV-I 504-20, 2007) durchzuführen,
- $L_{EX,8h}$ **> 85 dB(A)** oder L_{pCpeak} **>137 dB(C)**
  - Ist ein Lärmminderungsprogramm aufzustellen und durchzuführen.

$L_{EX,\ 8h}$ bedeutet, dass dieser Wert für die Arbeitsdauer von acht Stunden nicht überschritten werden darf. In **Abb. 21** wird veranschaulicht, wie der Lärmexpositionspegel von 85 dB(A) oder bei einem gegebenen Schalldruckpegel und dementsprechender Einwirkzeit erreicht wird (Maue, 2009):

88 dB(A) über 4 Stunden

91 dB(A) über 2 Stunden

94 dB(A) über 1 Stunde

97 dB(A) über 30 Minuten

100 dB(A) über 15 Minuten

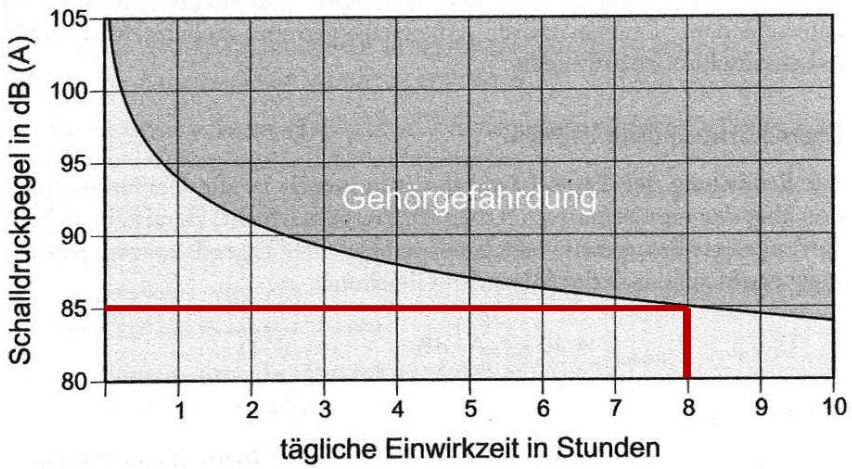


Abb. 21: *Gehörgefährdung in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel und der Einwirkzeit. In Rot dargestellt für 84 dB (A) und Einwirkzeit von 8 Stunden. Übernommen aus Maue, 2009 s. 136*

Desweiteren existieren technische, organisatorische und persönliche Schallschutzmaßnahmen zur Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen. Aus arbeitssicherheitstechnischer Perspektive sollten technischen Schallschutzmaßnahmen Priorität eingeräumt werden, da sie am effektivsten sind und weniger durch individuelle Handhabung beeinflusst werden (VDI, 2008).

Technische Schallschutzmaßnahmen lassen sich in primäre und sekundäre Maßnahmen unterteilen. Primäre Maßnahmen sind solche, die an der Schallquelle wirken, um die Schallentstehung zu mindern. Sekundäre Maßnahmen verhindern die Ausbreitung des Schalls. Erstere sind in der früheren Maschinenentwicklungsphase zu berücksichtigen. Die Technik ist so zu gestalten, dass eine akustische Optimierung z. B. durch die Wahl der Betriebsfrequenz möglich ist, aber trotzdem das Konzept der Durchführbarkeit für die erwünschten Ziele (der Ultraschallkavitation) beibehalten werden kann. Sekundäre Maßnahmen beinhalten die Verwendung von Kapselung und Abdeckungen, die den Übertragungsweg vermindern. Hier muss insbesondere die Wahl der Materialen und die Form des Baus beachtet werden, da es zu Folgeproblemen wie der Beeinträchtigung der Bedienbarkeit oder thermischen Problemen kommen kann. Sollten Maschinenveränderungen vorgenommen werden, müssen die Betriebssicherheitsverordnung und das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz beachtet werden. Desweiteren ist die Verwendung von absorbierenden Trennwänden und Deckenauskleidungen sehr wirksam (VDI, 2008).

Was den Baustoffe betrifft, so wird luftgeleiteter Ultraschall durch undurchlässige Materialen abgeschwächt. Um den hörbaren Anteil der Frequenz zu mindern, sind schwere Konstruktionen nicht nötig. Es muss aber beachtet werden, dass ein abgedeckte Struktur vollständig abgedichtet sein muss, da die Ultraschallwelle im Vergleich zu kleinen Löchern lang ist und sich trotzdem durch diese Öffnungen weiter ausbreiten kann (Acton, 1983).

Nach INRS (2006) ist die Absorption der Ultraschallwelle proportional zu der Frequenz. In Luft und bei einer Temperatur von 15° C mit 37% Feuchtigkeit beträgt die Absorption der Ultraschallwelle bei 30 kHz ca. 7 dB pro einer zurückgelegten Distanz von 10 m.

Hohe Ultraschallfrequenzen (100 kHz bis 1 GHz) werden durch Luft und jegliche Art von Materialien isoliert. Isolationen der Ultraschallquellen in direkten Feldern sind einfacher durchzuführen als bei Flüssigkeiten.

Ultraschall reflektiert in Wänden wie auch hörbarer Schall und beugt sich um Kanten und Hindernisse, die sich im Ausbreitungsweg befinden. Ultraschall ist bei rauen Wänden aufgrund der Wellenlänge leicht zu streuen. Ultraschall wird stark abgeschwächt bei Wänden, die für die Isolation hörbarer akustischer Frequenzen verwendet werden. Plexiglas-Platten mit 4mm Dicke dämpfen bei 25 kHz ca. 40 dB. Wie bereits erwähnt, könnte eine nicht komplett abgedichtete Abdeckung diverse Probleme wie Streuung verursachen und eine zweite Ultraschall-Quelle erzeugen, was die Abdeckung gänzlich unwirksam machen kann.

Gold et. al. (1984, in Canada, 1991) berichtet bezüglich der Materialeigenschaften und erwähnt, dass 3mm dicker Karton geeignet ist, um einen Schalldruckpegel von 70 dB zwischen 20 und 50 kHz zu reduzieren.

Crabtree und Forschaw (1977, in Canada, 1991) konstruierten relativ simple Abdeckungen für diverse Ultraschallreiniger. Diese Abdeckungen bestanden aus 0,75“ (Zoll) Sperrholz, die mit 1“ Styropor ausgekleidet und auf einen Klavierdeckel aufgesetzt wurden. Diese Konstruktion kann den Schalldruckpegel von 85 dB zu 55 dB bei 16 kHz 1/3 Oktav-Band reduzieren. Für größere Reiniger bestanden die Konstruktionen aus simplen Baumaterialien wie 0,5“ Gips und 0,5“ Sperrholz, womit eine Reduktion von 40 dB erreicht wurde.

Acton und Carson (1967) beschreiben einfache Schutzmaßnahme für eine Bank mit US-Reiniger. Die Abdeckung wurde aus Polyvinyl Chloride und Perspex angefertigt (Plexiglas, Akrylglas) und mit einer Edelstahl-Spundwand an der Außenseite der Tür befestigt. Diese Materialien wurden verwendet, da sie korrosionsresistent auf die in den Waschvorgängen entstehenden Dämpfe wirken. Obwohl die Tür nicht vollständig abgedichtet wurde, konnten Acton und Carson mit dieser Abdeckung eine Minderung von ca. 10 dB bei 20 kHz und 15 dB bei 40 kHz erreichen, die zur Eliminierung der subjektiven Effekte ausreichte.

Die Verwendung von sehr porösen Materialien wie z. B. Glaswolle wird aufgrund ihrer Eigenschaften nicht empfohlen, da es keinen bedeutsamen Schutz bieten kann (Acton, 1983).

Bezüglich des Schallschutzes für aerodynamische Quellen müssen nach der VDI (2008) die Strömungsgeschwindigkeiten und schallabstrahlende Flächen klein gehalten werden sowie große Druckänderungen und Turbulenzen vermieden werden. Desweiteren werden organisatorische und persönliche Schallschutzmaßnahmen empfohlen.

Unter organisatorischen Schallschutzmaßnahmen versteht man solche, die auf die Expositionszeit der Beschäftigten wirken, um diese zu reduzieren sowohl während der Arbeitszeit als auch in den Pausen. Persönliche Schallschutzmaßnahmen sind zu verwenden, wenn der Einsatz der anderen Schallschutzmaßnahmen nicht erfolgreich war. Für die Auswahl des Gehörschutzes empfiehlt es sich die entsprechende Literatur und Rechtsnormung wie BGR/GUV-R 194 (2008) und VDI (2008) zu konsultieren.

Es wird darüber hinaus empfohlen, Bereiche, in denen Ultraschall-Anlagen zum Einsatz kommen, zu kennzeichnen und den Eingriff in die Technik z. B. die Sonotrode, das Ultraschallbad oder das Behandlungsgefäß durch unbefugtes Personal, aus Versehen oder durch einen Unfall zu verhindern. Zusammengefasst stehen die Bekämpfung von der Lärmentstehung, der Lärmausbreitung und der Lärmaufnahme als Maßnahmen für die Lärmbekämpfung zur Verfügung.

4. Fragestellungen und Hypothesen

4.1 Studie zur physiologische Beanspruchungsanalyse und visuelle Beeinträchtigung durch kopfgetragene AR-basierte Werkerassistenzsysteme (AR-Studie)

Mehr als 90% der Information, die ein Mensch wahrnimmt, werden visuell verarbeitet. Eine Einschränkung des Gesichtsfeldes kann die korrekte Wahrnehmung seines Umfeldes bei der Bedienung eines Fahrzeuges (z. B. Gabelstapler) mindern und spielt daher bei der Sicherheit im Werk eine sehr wichtige Rolle.

Es handelt sich bei dieser Studie um eine Untersuchung der Beanspruchung des visuellen Systems beim Tragen von zwei unterschiedlichen Head-Mounted-Displays.

Die daraus resultierenden Fragestellungen sind:

1. Welche visuellen Leistungen werden beeinflusst?
2. Welche quantitativen Veränderungen der ophthalmologischen Parameter zeichnen sich ab?
3. Welche Unterschiede in der visuellen Wahrnehmung ergeben sich beim Tragen beider Geräte?

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen sollen dazu beitragen, die Entscheidung für den Einsatz der Modelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bedürfnisse zu erleichtern.

4.2 Begleitstudie zu Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz bei Ultraschall-Verfahrensentwicklung und Aggregatetechnik zur Vergütung von Legierungsschmelze für den Formguss von Leichtmetal-Bauteilen aus Aluminium (US-Studie)

Die modernen Technologien und deren Einsatz in der industriellen Fertigung können zu einer Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes und des Wohlbefindens des Arbeitnehmers führen. Im Sinne der Humanzentrierung sind neue Technologien auf beschwerdefreies Arbeiten des Anwenders in Studien zu kontrollieren. Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen, die genauer untersucht werden müssen, um die Beanspruchung bei der Anwendung von Innovativen Technologien und deren Belastungsfolgen in diesen Produktionsverfahren zu erfassen.

1) Wirkt sich Ultraschall als Belastungsfaktor auf das Herz-Kreislauf-System bzw. die Herzfrequenz und den Blutdruck aus, indem diese Werte bei der Aussetzung erhöht werden?

2) Bestehen bedeutsame Veränderungen der Hörschwelle im Vergleich der ersten und zweiten Messung?

3) Ob und inwieweit treten Schädigungen oder Beeinträchtigungen des Gehörs z. B. des Cortischen Organs bzw. Haarzellen, Hörschwellenverschiebungen auf?

4) Welche Schalldruckpegel und welche harmonischen und subharmonischen Schwingungen entstehen?

Ultraschall als Schall könnte den Menschen belasten und dabei auf das Herz-Kreislauf-System bzw. die Herzfrequenz und den Blutdruck wirken. Der Körper wird so in einen Stresszustand versetzt, auf den der menschliche Organismus reagiert, um die Balance zwischen Belastung und Beanspruchung im Sinne des Belastungs-Beanspruchungskonzeptes wiederherzustellen.

5) Ob und inwieweit treten vegetative und subjektive Störungen bei Betriebsfrequenzen von 20 - 25 kHz bei dieser US-basierten Gießanlage auf?

6) Sind die verwendeten bzw. herkömmlichen Arbeitsschutzmittel für diesen Lärmbereich ausreichend?

In allen diesbezüglich gefährdeten Fällen ist die arbeitsmedizinische Beobachtung der Gegebenheiten erforderlich, um Gefahren für die Gesundheit zu vermeiden bzw. zumindest zu minimieren.

Als Ergebnis dieser Arbeit sollen Aussagen getroffen werden, inwieweit eine sichere Produktherstellung von Ultraschall-Aluminium-Legierungen für den (lokalen) Leichtbau in der Luft- und Raumfahrtindustrie möglich wäre.

5. Probanden und Methodik der AR-Studie

5.1 Probanden der AR-Studie

Die untersuchte Stichprobe bestand aus 25 Probanden (4 männlich, 21 weiblich) mit einem Durschnittsalter von (25,5 ± 4,0 Jahre).

5.2 Studiendesign der AR-Studie

Zuerst wurden Visus, Phorie und Kontrast erfasst. Danach erfolgten das Anlegen des Brustgurts zur Herzfrequenzerfassung und die dementsprechenden Tests in zufälliger Reihenfolge. Der ganze Ablauf wurde dreimal durchgeführt, zweimal mit HMD (Nomad, hier NOM genannt und LitEye, hier LIT genannt) und einmal ohne Gerät (s. **Abb. 22**).

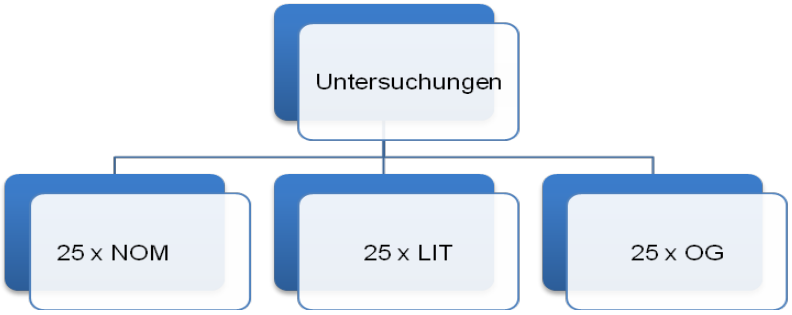


Abb. 22: *Untersuchungschema der AR- Studie. Hier steht NOM für das Nomad-, LIT für das LitEye-Gerät und OG für Versuch ohne Gerät*

5.3 Methodik der AR-Studie

Die verwendeten HMDs sind in **Abb. 23**. zu erkennen.

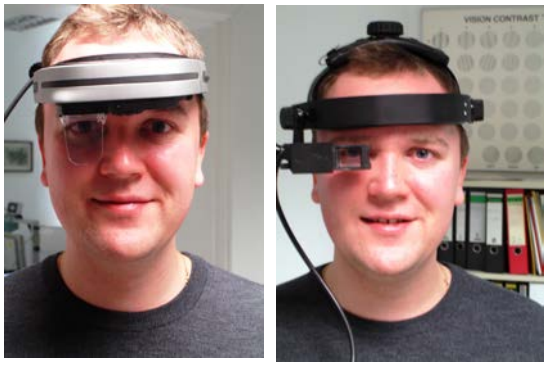


Abb. 23: *Verwendete HMD-Modelle. (Links) Gerät der Fa. Microvision, Nomad ND 2100 hier als NOM bezeichnet. (Rechts) Gerät Fa. LitEYE, LE-750A hier als LIT bezeichnet*

Bei dem Nomad-Gerät handelt es sich um einen monokularen Look-Around-HMD, das eine Laserstrahlung verwendet um die virtuellen Informationen über einen transparenten Umlenkspiegel direkt auf die Netzhaut des Anwenders zu projizieren. Bei so einem Aufbau spricht man von einem Virtual-Retinal Display (VRD). Das Nomad ND2100 hat ein Gewicht von 226,7g und ein FOV von 23 x 17,25°. Dem entspricht ein Monitor von 17“ in Armlänge-Entfernung. Der Laser hat die Farbe monochrom rot.

Das LitEye LE-750A ist ein so genanntes see-through-Gerät mit organischer Leuchtdiode (OLED)-Technologie mit einem Gewicht von 80g und einem FOV (diagonal) von 24° (640 x 480mm) und 28° (800 X 600mm).

5.3.1 Ophthalmologische Statusuntersuchungen (AR-Studie)

Visus, Phorie, Stereosehen

Zuerst wurde die ophthalmologische Statusuntersuchung durchgeführt. Diese ist wichtig um die Sehfähigkeit der VP vor dem eigentlichen Versuch festzustellen und damit Fehler während der Durchführung des Versuches aufgrund schlechter Sehfähigkeit ausschließen zu können. Sie beinhaltet eine Erfassung des Visus sowie die Prüfung von Phorie, Stereo- und Kontrastsehen (s. **Abb. 24**, S. 57).

Mit dem Visus kann man bestimmen, wie die Sehschärfe eines Menschen ist. Der Visus wurde anhand von Landoltringen in unterschiedlichen Größen ermittelt. Landoltringe sind

Ringe, die eine Öffnung in ähnlicher Position wie die Winkelminuten haben. Die VP mussten die entsprechende Seite oder die Winkelminute, in der sich die Öffnung befindet, angeben. Dafür wurden den VP mehrere Folgen mit Reihen von Ringen in unterschiedlichen Größen gezeigt. Zur Ermittlung des versteckten Schielens wurde die Phorie anhand eines Rechtecks und eines Kreises erfasst. Wenn die VP nicht schielen, befindet sich der Kreis in der Mitte des Rechtecks. Wird der Kreis außerhalb des Rechtecks oder doppelt gesehen werden, wird das Schielen erfasst.

Um das Stereosehen zu ermitteln wurde eine Reihe von Balken oder Linien gezeigt. Einzelne Balken mit abweichender Breite erwecken den Eindruck, dem Betrachter näher zu sein. Die VP mussten die sich hervorhebenden Balken erkennen und diese angeben.

Das Konstrastsehen wurde auch anhand von Landoltringe ermittelt. Die Landoltringe wurden in Reihen vor die Augen des Probanden projiziert. Der Kontrast der Ring-Reihen zum weißen Hintergrund unterschied sich voneinander. Die Aufgabe bestand darin, die Öffnungen der Ringe mit unterschiedlichem Kontrast zum Hintergrund zu erkennen und diese anzugeben.

***Abb. 24**: Angewandtes Rodatest 302-Gerät für die Visus-, Phorie, Stereo- und Kontrastsehen-Erfassung. der Fa. VISTECH*

Im experimentellen Teil wurde die ophthalmologische Beanspruchungsanalyse beim Tragen von verschiedenen Head-Mounted Displays (NOM (Nomad), LIT (LitEye) bzw. ohne Gerät (OG)) durchgeführt. Es erfolgte die Erfassung von Gesichtsfeld und Perimetrie (s. **Abb. 25**)

Perimetrie

Mittels Perimetrie wird das zentrale Gesichtsfeld erfasst. Als Gesichtsfeld bezeichnet man den Bereich der Außenwelt, welchen man mit ruhiggestelltem Auge sehen kann. Die Probanden bekommen einen Fixationspunkt in der Mitte des Perimeters (Halbkugel) zu sehen, welchen sie die ganze Zeit betrachten müssen. Beginnt der Test, erscheinen andere Lichtpunkte in bestimmten Bereichen des Perimeters. Wenn diese Punkte von den Probanden ohne Änderung der Blickrichtung wahrgenommen werden können, wird die Drucktaste betätigt. In der zweiten Runde des Testes wird dieser Fixationspunkt nach links und danach nach rechts versetzt, wobei auch andere Lichtreize erscheinen. Der Ablauf bleibt gleich.

Werden Punkte im Bereich des eigentlichen Gesichtsfeldes nicht wahrgenommen, gelten diese als „ausgefallen“. Diese Ausfälle werden als Skotome bezeichnet. Kann der Proband in diesem Bereich nichts erkennen, ist ein absolutes Skotom vorhanden. Eine noch vorhandene Restwahrnehmung („Grauer Fleck“) (s. **Abb. 37**, S. 77) wird als relatives Skotom bezeichnet. Als Messverfahren dient hier ein computergestutztes Perimeter der Firma Medmont (s. **Abb. 25**, S. 59)**.**

Periphere Wahrnehmung (PP), Wiener Testsystem (WTS)

Das Wiener Testsystem ermöglicht die psychologische, computergestützte Testdiagnostik mit mehr als 120 Testverfahren aus der klinischen, Sport-, Flug-, Personal-, Neuro- oder Verkehrspsychologie (Katalog WTS, Schuhfried GmbH 2012).

Die PP ist ein Test, in dem die periphere Wahrnehmungsleistung erfasst wird, während die Probanden gleichzeitig eine Trackingaufgabe[10] durchführen. Die periphere Wahrnehmungsleistung wird als die Aufnahme und Verarbeitung visueller Information verstanden.

Zur genauen Bestimmung der Sitzposition und der Entfernung zum Bildschirm dient ein Ultraschallentfernungsmesser, der eine Rückmeldung zur Positionskorrektur gibt, bis die genaue Sitzentfernung erreicht ist. Dies ermöglicht die Angabe des tatsächlichen Gesichtsfeldes in Grad.

Sobald die richtige Sitzposition erreicht ist, beginnt die Einweisungs- und Übungsphase. Am Gerät befinden sich links und rechts Leuchtdioden, die in Abständen Lichtreize erzeugen und

[10] Mit einem Trackball und eine Ziel- ähnliche Scheibe (Fadenkreuz) zur Verfolgung einer im Bildschirm hin und her bewegenden Kugel.

sich mit vorgegebener Geschwindigkeit bewegen. Der Proband muss währenddessen die Trackingaufgabe durchführen. Beim Auftreten einer Lichtschranke (rechts oder links), muss diese bestätigt werden, indem das Pedal betätigt und der Ball im Fadenkreuz gehalten wird. Die Durchführungsdauer beträgt 15 Minuten inklusive Instruktions- und Übungsphase (Katalog WTS, Schuhfried GmbH).

Abb. 25: *Test Periphere Wahrnehmung aus der Wiener Testbatterie (Wiener Test System, WTS) der Firma. Schuhfried GmbH (links) und Perimeter der Firma. Medmont (rechts)*

5.3.2 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität

Zur Erfassung objektiver physiologischer Beanspruchungsdaten wie Herzfrequenz (HR) und Herzfrequenznvariabilität (HRV) im Zeit-, Frequenz- und Phasenbereich, wurde hierzu eine Polar Uhr (RS800CX). Die Auswertung erfolgte in Kubios HRV (University of Eastern Finland), Excel 2007 und SPSS Version 17.

5.3.3 Psychometrische Tests (AR-Studie)

Zur Ermittlung sensorischer Beeinträchtigung wurden verschiedene Tests aus der TAP-Testbatterie (Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung von Zimmermann und Fimm 2007, TAP Version 2.1) durchgeführt. Die TAP- Testbatterie (s. **Abb. 28**, S.63) besteht aus der verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung, Neglect und dynamischen Sehtests bzw. afferenten dynamischen Sehleistungen. Parallel zu diesen Tests wird die Reaktionszeit des Probanden (vergangene Zeit bis zur Betätigung der Taste) vom Rechner ermittelt.

Dynamischer Sehtest

Unter dynamischem Sehen versteht man die korrekte Bewegungswahrnehmung, die insbesondere bei Fahr- und Steuertätigkeiten wichtig ist. Um die afferente dynamische Sehleistung zu prüfen, wurde der rechnergestützte Düsseldorfer Test für Dynamisches Sehen (DTDS) von Wist eingesetzt. Dieser Test besteht aus vier Bewegungskontraststufen (100%, 50%, 30%, 20%) (s. **Abb. 27**) mit 20 Darbietungen je Stufe. Es werden Landoltringe (s. **Abb. 26**) mit verschiedenen Öffnungsrichtungen (oben, unten, links, rechts) dargestellt. Die Aufgabe des Probanden ist die jeweilige Öffnungsrichtung bei unterschiedlichen Kontraststufen, die auf sich bewegenden Bildpunkten basieren, anzugeben. Die Kontraststufe variiert von „leicht“ bis „schwer“. Bei der Stufe „leicht“ werden 100% der Bildpunkte und bei der Stufe „schwer“ 20% der Bildpunkte dargestellt. (Lüder, Böckelmann, 2009; Ehrenstein, Schlykowa, 2001).

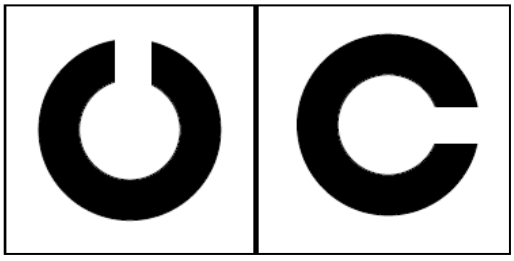


Abb. 26: Exemplarische Landoltringe mit Öffnungen „oben“ oder „zwölf Uhr“ und „rechts“ oder „fünfzehn Uhr“ (Ehrenstein, Schlykowa, 2001)

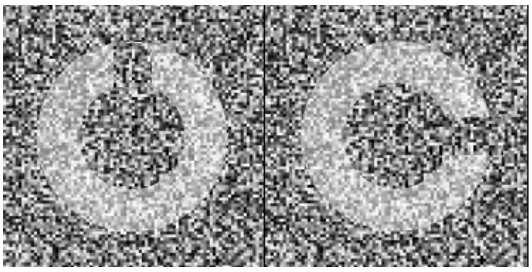


Abb. 27: Exemplarische Landoltringe mit Kontrast (Ehrenstein, Schlykowa, 2001)

Gesichtsfeld/Neglect

Bei der Überprüfung vom Gesichtsfeld/Neglect werden die Gesichtsfeldausfälle beim Tragen des AR-Displays erfasst. Auf diese Weise kann man die Verdeckung des AR-Displays überprüfen die Reaktionszeiten für diese visuelle Reize erfassen. Ein halbdurchlässiger Spiegel des AR-Displays befindet sich vor dem rechten Auge[11]. Größere Gesichtsfeldausfälle besonders auf der rechten Seite können die Lesefähigkeit einschränken (Zimmermann, Fimm, 2007).

Es stehen die Gesichtsfeld- und die Neglectprüfung zur Verfügung. Bei der ersten Variante wird ein Flickerreiz auf leerem Hintergrund gezeigt. Bei der Neglectprüfung (im abgedunkelten Raum) ist der Bildschirm mit Zahlen ausgefüllt, um eine Extinktion[12] zu provozieren. Ein Buchstabe, der sich in einem Quadrat in der Mitte des Bildschirms befindet (Fixationspunkt), soll benannt werden, sobald dieser auftaucht bzw. wechselt. So wird die Fixation auf das Zentrum des Bildschirmes gelenkt. Währenddessen sollen die Probanden eine Taste betätigen, wenn eine beliebige Zahl der Bildschirm-Maske anfängt zu flimmern. Diese Variante der Neglectprüfung bietet 44 periphere Reize, also 11 Reize pro Quadrant (s. **Abb. 29**).

Für alle Quadranten (beide Halbfelder) werden Mittelwert, Median, Standardabweichung sowie Reaktionszeit und Anzahl der korrekten, falschen und ausgelassenen Reaktionen ausgegeben. In einer zusätzlichen Graphik werden die fehlenden Reaktionen mit „-1“ angezeigt, was die Abschätzung des ausgefallenen Sehfeldes bzw. der nicht beachteten Reize unter der Neglectbedingung erlaubt.

Joos et al. (2007) beschreiben das Auge als Sensor und als aktiven Teil der Umgebungsexploration. Verlängerte Reaktionszeiten sind ein Hinweis auf eine verlangsamte Aufmerksamkeitsverschiebung oder verminderte Kontrastempfindlichkeit in dem

[11] beim 66% der Personen das dominante Auge. Oehme, Wiedenmaier, Schmidt und Luczak, 2003: in Fritzsche, 2006.

[12] „Extinktion kann nach Karnath (1988) in der visuellen Modalität auch bei Stimuli auftreten, die im perimetrisch intakten Halbfeld dargeboten werden. Neglect- Patienten zeigen im intakten Halbfeld eine Vernachlässigung der relativ links gelegenen Reize“ in: Schröder, 2004, s. 38).

entsprechenden Halbfeld. Laut Haufe (1991) in Zimmermann, Fimm (2007) entsprechen verlängerte Reaktionszeiten einer Verlangsamung der Aufmerksamkeitsverschiebung mit erhöhten Sakkadenlatenzen nach der entsprechenden Seite, die die Explorationsleistung stört. Sakkaden sind die schnellsten (ballistischen) Bewegungen, die der menschliche Körper ausführen kann. Nach Mickasch, Haack (1986) in Joos et. al. (2007: S. 3) erfolgt die Auslösung entweder spontan durch gezielte Verhaltenspläne bei der Inspektion und Interpretation der Umweltinformationen oder unwillkürlich, etwa durch Veränderungen im peripheren Gesichtsfeld. Galey[13] in Joos et. al. (2007) betrachtet sie als Indikator für Vigilanz und Beanspruchung.

Die Durchführungszeit beträgt 5 Min und 10 Sekunden.

Verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung

Die verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung wird als Fähigkeit verstanden, die visuelle Aufmerksamkeit ohne Änderung der Blickrichtung auf einen Ausschnitt im Raum zu fokussieren (Zimmermann, Fimm, 2007). Ziel dieser Untersuchung ist es herauszufinden, ob sich die Aufmerksamkeit beim linken oder beim rechten Gesichtsfeld (wo sich der halbdurchlässige Spiegel befindet) verlangsamt. Die Differenz der Reaktionszeiten zwischen dem validen und dem invaliden Hinweisreiz gilt als Zeitbedarf für die Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus (s. **Abb. 30**).

Beim Testablauf wird ein Pfeil (Hinweisreiz) in der Mitte des Bildschirms angezeigt. Dieser Pfeil wird in 80% der Darbietungen auf der Seite „valider Reiz“, wo letztendlich der Reiz erscheinen wird, platziert. In 20% der Darbietungen erscheint der Pfeil auf der Seite des „invaliden Reizes“. Insgesamt werden 100 Reize dargeboten. Die Probanden orientieren sich in die angezeigte Richtung. Bei invaliden Reizen muss eine Umorientierung bzw. eine erneute Verschiebung des Fokus stattfinden. Die Reaktion der jeweiligen Reize (Zielreiz) muss per Tastendruck bestätigt werden, so dass die für die Umorientierung benötigte Zeitspanne messbar gemacht wird (Zimmermann, Fimm, 2007).

Bei der Durchführung muss beachtet werden, dass die Probanden auf den Fixationspunkt schauen und nicht zu der Seite, auf der Pfeil erwartet wird.

Für jede Position des kritischen Reizes und jede Richtung des Hinweisreizes werden jeweils Mittelwert, Median und Streuung der Reaktionszeiten sowie Anzahl der korrekten Reaktionen, Auslassungen, Antizipationen und Ausreißer ausgegeben.

Die Durchführungszeit ohne Instruktion und Vortest beträgt 5 Minuten.

[13] Galley, N. (1989). Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de)activation. A review and some speculations. *Journal of Psychophysiology*, Vol. 3, 229-244. in: Joos et. al., 2007.

Abb. 28: *Rechner für die Durchführung der Tests: afferente dynamische Sehleistung, Neglect, verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung*

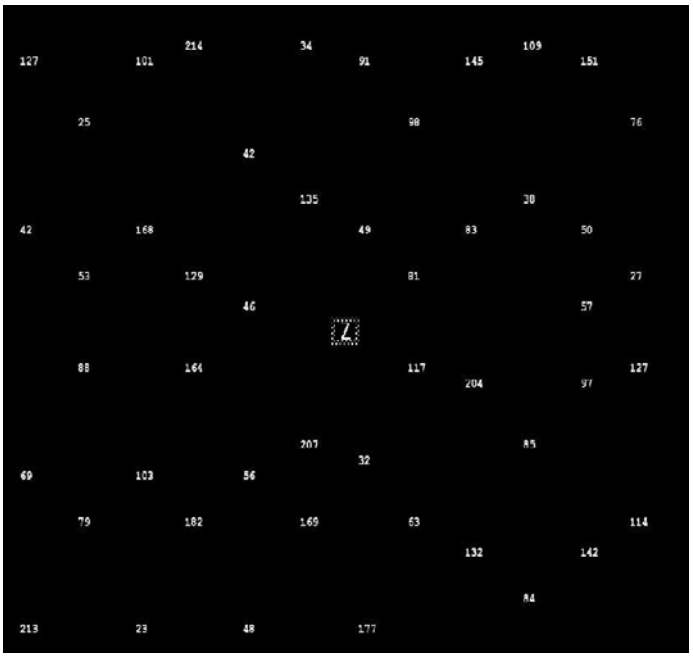


Abb. 29: *Neglect-Test. Zimmermann, Fimm (2007) in Milhahn, Inkred (2008)*

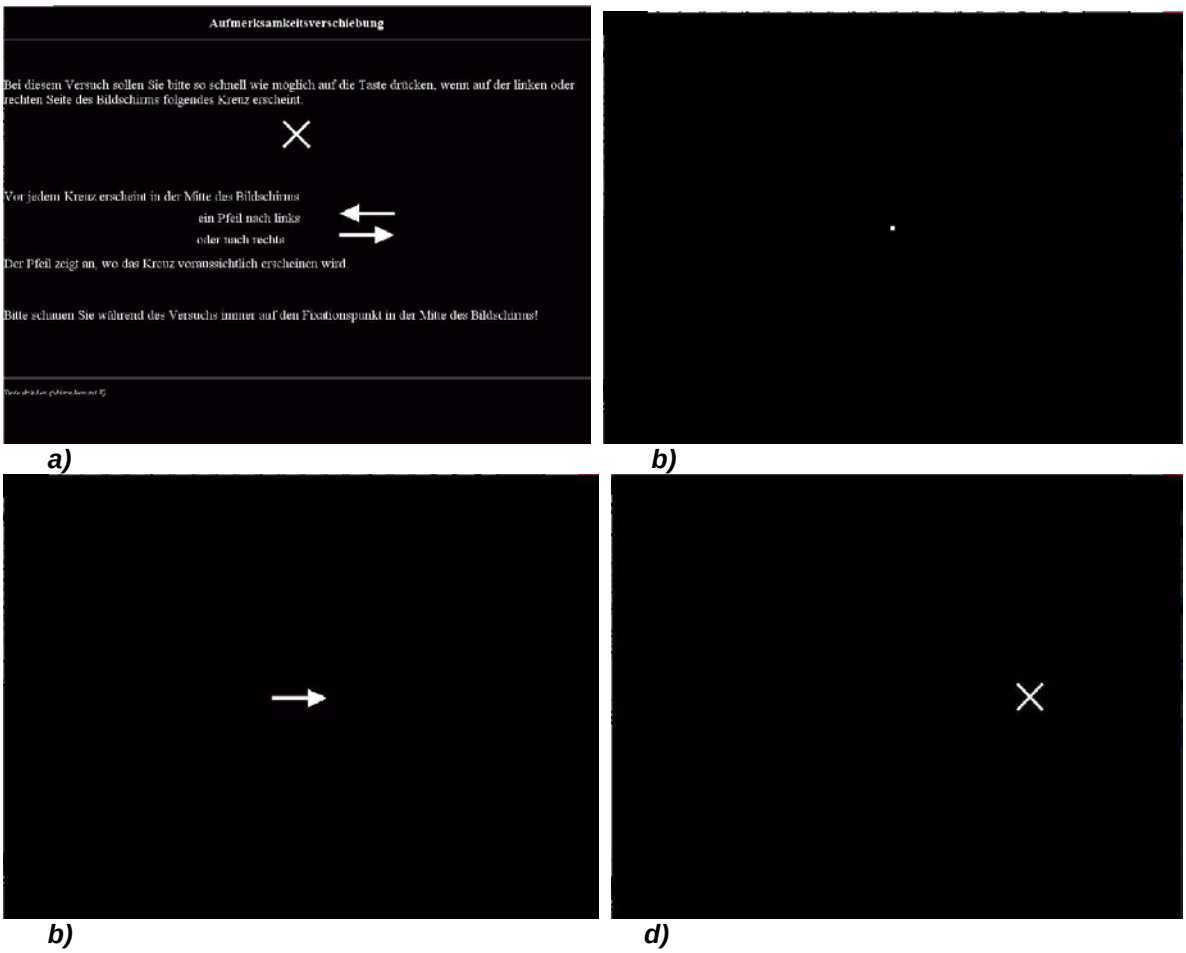


Abb. 30: *Test der verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung in Reihenfolge a bis d. Zimmermann, Fimm (2007) in Milhahn, Inkred (2008)*

5.4 Probanden der US-Studie

Um möglichen Belastungen und Folgen von Ultraschallexposition beobachten zu können, wurden Versuche mit einer Gruppe von 30 Probanden (20,6 ± 4,22 Jahre; 29 weiblich, 1 männlich) durchgeführt.

Zur Terminfindung wurden die Probanden per E-Mail oder telefonisch nach ihrer Verfügbarkeit am jeweiligen Tag gefragt. Auf diese Weise wurden die Termine so vereinbart, dass immer drei Probanden an einem Versuchstag erscheinen konnten. Es wurden immer die ersten drei Probanden berücksichtigt, die sich am schnellsten gemeldet bzw. den Termin bestätigt haben. Die Anzahl der männlichen Probanden ist Aufgrund der Verfügbarkeit und des Studiengangs aus dem die Probanden stammen, gering.

Die Probanden erhielten für ihre Teilnahme an der Studie entweder eine Aufwandsentschädigung oder Versuchspersonenstunden, die für ihr Studium als Credit Points angerechnet werden konnten.

5.5 Studiendesign der US-Studie

Um sicherzustellen dass die erfassten Messwerte verwendbar sind, wurde die Entscheidung getroffen, zwei US-Beschallungen anstelle einer einzelnen durchzuführen.

Der Untersuchungsablauf gliedert sich wie folgt:

1. Gewinnung von studentischen Probanden während der Lehrveranstaltungen in den Studiengängen der Natur- und technischen Wissenschaften (z. B. im Rahmen der Vorlesungen an der Fakultät für Maschinenbau, der Fakultät für Naturwissenschaften oder der Medizinischen Fakultät sowie über Aushänge in den verschiedenen Fakultätsgebäuden).

2. Statusuntersuchung der Probanden im Bereich Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät. Die Untersuchung beinhaltete die Durchführung einer Audiometrie (Bestimmung der Knochen- und Luftleitung) sowie das Anlegen des Blutdruck- und EKG-Gerätes für die Erfassung der Langzeitwerte (24h). Außerdem beantworteten die Probanden die Fragebögen zur Erfassung der privaten Lärmbelastung, zur Eigen- und Fremdanamnese, zum Raucherstatus, zur Erfassung von Beschwerden der letzten 12 Monate und aktuellen Beschwerden.

3. An einem anderen Tag erfolgten zwei Versuche an einem Gießereiarbeitsplatz des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) der OvGU Magdeburg. Die Untersuchung am Gießereiarbeitsplatz bestand aus folgenden Teilen:

3.1. Aufklärung des Probanden bezüglich des Zwecks der Untersuchung.

3.2. Ausfüllen von vier Fragebögen vor dem Versuch

3.2.1. Fragebogen zur Erfassung der privaten Lärmbelastung

3.2.2. Fragebogen zur Eigen- und Fremdanamnese und zum Raucherstatus

3.2.3. Fragebogen zur Erfassung von Beschwerden der letzten 12 Monate

3.2.4. Fragebogen zur Erfassung von aktuellen Beschwerden

3.3. Anlegen des Langzeit-EKG-Gerätes sowie des Langzeit-Blutdruckgerätes

3.4. Anwesenheit beim Versuch für eine Dauer von drei Stunden (verfügbare Gesamtzeit für die komplette Durchführung von Vorbereitung bis zur Abnahme der Herz-Frequenz- und Blutdruckmessgeräten) als „Anlagenbediener“, wobei sich die Probanden lediglich in direkter Umgebung der Maschine aufhalten mussten. Die Entscheidung lediglich nur dabeizustehen war wichtig um Veränderungen des Herz-Kreislaufs durch Bewegung auszuschließen und so besser die Wirkung des Ultraschalls zu analysieren. Desweiteren war aus Sicherheitsgründen vom zuständigen Laborleiter eine aktive Teilnahme, d.h. direktes Eingreifen, untersagt. Der Zeitraum der Ultraschallexposition betrug jeweils drei Minuten Behandlungszeit (zweimalig) mit Unterbrechungen von fünf Minuten (Ruhephase vor der Aussetzung und Erholungsphase nach der Aussetzung) während des Gießens der Proben und zum Nachfüllen der Legierung durch Mitarbeiter des IFQ in der US-Behandlungskokille. Das nötige Volumen der Legierung wurde aus dem Ofen entnommen und in der Behandlungskokille für die US-Behandlung eingefüllt bzw. für das Gießen weiterer Proben nachgeladen.

4. In den Unterbrechungen (Erholungsphase) erfolgte das Ausfüllen des Fragebogens zur Erfassung der aktuellen Beschwerden nach dem Versuch. Die Ruhe- bzw. Erholungsphasen dienten zur Normalisierung des Herz-Kreislaufs bzw. zur Senkung der Herzfrequenz nach dem diese durch die Bewegung vom Sitzplatz zum Versuchslabor und zurück zum Sitzplatz angeregt wurde.

5. Nach Beendigung der letzten Erholungsphase wurde der Versuch beendet.

6. Die Probanden und Versuchsleiter fuhren gemeinsam zum Bereich Arbeitsmedizin für die Abnahme der Geräte und die Durchführung der Audiometrie.

Die Versuche wurden wie folgt durchgeführt (Beispiel):

09:17-09:22 Ruhephase im Sitzen, Ausfüllen des Fragebogens zu aktuellen Beschwerden (5 Minuten)

09:22-09:27 Ruhephase im Stehen (5 Minuten)

09:28-09:31 Beschallung (3 Minuten)

09:32-09:37 Ruhephase im Sitzen, Ausfüllen des Fragebogens zu aktuellen Beschwerden (5 Minuten)

09:37-09:42 Ruhephase im Stehen (5 Minuten)

09:42-09:45 Beschallung (3 Minuten)

09:46-09:51 Ruhephase im Sitzen Ausfüllen des Fragebogens zu aktuellen Beschwerden, (5 Minuten), anschließend: Versuchsende

5.5 Methodik der US-Studie

Die Datenerfassung beinhaltet die Erhebung der arbeitsmedizinischen, -physiologischen und -sicherheitstechnischen Daten, die in den nächsten Punkten erläutert werden.

5.5.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität

Für die Erfassung von Langzeit- sowie Herzfrequenzdaten während des Versuches wurde ein EKG-Gerät, MT-200 der Firma Schiller (s. **Abb. 31**) verwendet. Die Auswertung erfolgte mit Kubios HRV (University of Eastern Finland), Excel 2007 und SPSS Version 17.

Abb. 31: *Schiller MT-200 Holter System. Med Electronics, 2012*

Bei der Datenerfassung traten verschiedene Schwierigkeiten auf. Die Versuche mit drei Probanden wurden zeitgleich mit drei unterschiedlichen Herzfrequenzgeräten durchgeführt. Bei der Auswertung der Daten wurde ersichtlich, dass diese Herzfrequenz-Geräte keine einheitliche Uhrzeit hatten. Darüber hinaus geschah auch keine automatische Zeitumstellung bei den Geräten, so dass ein Abgleich mit dem Versuchsprotokoll notwendig war, um sicher zu gehen, dass die angezeigte Uhrzeit richtig war.

Um die Werte bei der Datenauswertung besser verfolgen zu können, wurde den Probanden vor der Versuchsdurchführung das Setzen eines Markers in der Messung erläutert. Bei der

Datenauswertung ist ersichtlich geworden, dass in einigen Fällen nicht alle Marker vorhanden waren. Die Ursachen hierfür liegen bei der fehlenden Betätigung der Knöpfe durch die Probanden oder aber beim Datenverlust bei der Datenumwandlung für die elektronische Auswertung.

5.5.2 Blutdruck

Die Erfassung des Langzeit- und des Versuchsblutdrucks wurde mit einem Blutdruckmessgerät der Firma SpaceLabs, Model 90207 durchgeführt und mit Excel 2007 sowie SPSS Version 17 ausgewertet.

5.5.3 Audiometrie

Es erfolgte die Bestimmung von Knochen- und Luftleitung in der Audiometriekabine des Bereiches Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät.

Abb. 32: *Verwendete Audiometriekabine des Bereichs Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät für die Bestimmung der Knochen- und Luftleitung*

5.5.4 Schalldruckpegelmessungen

Für die Schalldruckpegelerfassung wurde ein Laptop mit der Software MatLab als Schnittstelle für die Soft- und Hardware SigLab verwendet.

Diese Messtechnik bestand aus:

- Einem Präzisions-Analysator **SigLab 50-51 FFT-Analysator** (s. **Abb. 33**) der Firma. SIGMATEST mit folgender Spezifikation:
  - 2 Eingangskanäle, 1 Ausgangskanal
  - Nutzsignalabstand >90dB störfrei
  - Bandbreite von 0..2Hz bis 0..50kHz in 1-2-5 Sequenz einstellbar
  - Auflösung 3200 Frequenzlinien in jedem Band
  - Zoom-Funktion
  - Meßgenauigkeit ±0.0025% bzw. ±0.02dB
  - Sensorstromversorgung IEPE an beiden Eingängen
  - Abmessungen wie Notebook-Computer
  - Batteriebetrieb mit eingebautem NC-Akku
  - Speicher 16MB, optional auf 32MB aufrüstbar incl. Instrumentensoftware 3.28 für MatLab und
  - Handbuch und Software für die Schallanalyse im 1/n Oktavband

Abb. 33: *Verwendete Messtechnik für die Schalldruckpegelerfassung. Links, Laptop PC, Rechts SigLab Analysator*

- Einer **SCSI-Karte** für den PCI-Bus für Desktop-PC, incl. Anschlusskabel, einer **SCSI APA-1460** für Notebook-PC, incl. Anschlusskabel

- Einem **Messmikrofon MP401 mit Vorverstärker** mit folgender Spezifikation:

  - Ultraschall-Messmikrofonkapsel ¼“ Kl.1 polarisiert
  - Frequenzbereich 10...70000 Hz
  - Vorverstärker ½“ für IEPE Speisung (direkter Anschluss an SigLab)
  - BNC-Anschluss incl. Adapter ¼“ auf ½“ und Anschlusskabel BNC/BNC

- einem Schallpegel-Kalibrator 326 (Firma CENTER) mit folgender Spezifikation mit dem das Messmikrofon vor dem Versuch kalibriert wurde:

  - Genauigkeitsklasse 2 (nach IEC 60942 (2003) ANSI s.1.40- 1984
  - Referenzpegel 94/114dB @ 1kHzm
  - Adapter für 1“ und ½“ Messmikrofone

Abb. 34: *Schallpegel- Kalibrator 326*

Die Messungen wurden in 1,5 m Abstand zur Schallquelle in einer Höhe von 75 cm durchgeführt.

Die Einstellungen bei der Schnittstelle (MatLab, SigLab) wurden für dB (A) und Reichweite bis 50 kHz ausgewählt.

5.5.5 Gehörschutz

Der verwendete Gehörschutz bestand aus einem Peltor 3M Svenska AB (Värnamo, Schweden) Kopfbügel OPTIME III (H540A-411-SV) mit einem Dämmwert (Sound Noise Reduction, SNR) von 35 dB nach EN 352-1 und EN 352-3 geprüft und zugelassen, und

Ohrstöpsel von OHROPAX GmbH (Wehrheim, Deutschland), gemäß EN 352-2-1993 mit Schalldämmung (SNR) von 27 dB, die gleichzeitig getragen wurden.

Die Probanden wurden vor dem Versuch darüber informiert, dass Gehörschutz getragen werden muss. Zudem wurde die richtige Verwendung des Gehörschutzes (Stöpsel und Bügel) erläutert. Kurz vor dem Einsetzen der Ultraschallexposition wurde jedes Mal darauf hingewiesen, dass der Gehörschutz einzuführen und aufzusetzen sei.

Abb. 35: *Peltor 3M OPTIME III Kopfbügel*

Abb. 36: *Ohrstöpsel von Ohropax GmbH*

5.5.6 Fragebögen

Es wurden vier verschiedene Fragebögen (FB) verwendet:

1. <u>Fragebogen zur Erfassung der privaten Lärmbelastung und Medikamentenannahme</u>

   Dieser FB beinhaltet vier Fragen zur Lärmbelastung der VP in ihrer Freizeit und eine Frage zur Medikamentenannahme. Die Durchführungszeit beträgt eine Minute.

Hier wurden die Antworten in eine Skala nach Häufigkeit (von „fast täglich“ bis „fast nie“ bzw. von „Mehr als 1 Stunde täglich“ bis „1 Stunde im Monat“) eingetragen. Für die spätere Auswertung, wurden Zahlen verwendet. Zahlen von „4“ für „fast täglich“ bis „0“ für „fast nie“ bzw. „0“ für „Mehr als 1 Stunde täglich“ bis „4“ für „1 Stunde im Monat“ verwendet.

2. Fragebogen zur Eigen- und Fremdanamnese und zum Raucherstatus

Dieser FB beinhaltet elf Fragen zur Erfassung des aktuellen Raucherstatus, mögliche ototoxische Wirkung des Zigarettenrauches und Gehör- sowie Herz-Kreislauferkrankungen. Auch hier wurde die Skala von „fast täglich“ mit der Zahl „4“ bis „fast nie“ mit „0“ verwendet. Die Durchführungszeit beträgt eine Minute.

3. Fragebogen zur Erfassung von Beschwerden der letzten 12 Monate

Dieser FB beinhaltet zwölf Fragen zur Erfassung von bestimmten Beschwerden, die während der Ultraschallexposition in der Literatur berichtet worden sind. Hier wird nach diesen Beschwerden im Zeitraum „in den letzen 12 Monaten“ erfragt. Die Antworten wurden nach Häufigkeit von „nicht“ mit der Zahl „0“ bis „erheblich mehr als üblich“ mit „5“ kodiert. Die Skala für den Zustand reicht von „nie“ mit der Zahl „0“ bis „immer“ mit „4“ und für die Intensität mit „gar nicht“ mit „0“ bis „außerordentlich“ mit „4“. Die Durchführungszeit liegt bei zwei Minuten.

4. Fragebogen zur Erfassung von aktuellen Beschwerden

Dieser FB beinhaltet elf Fragen zur Erfassung der aktuellen Beschwerden und wird jeweils vor und nach der Ultraschallexposition beantwortet, um die eventuell auftretenden Beschwerden der VP zu erfassen. Bei der Frage nach der Intensität wurde die Skala von „nicht stärker als üblich“ mit der Zahl „1“ bis „erheblich stärker als üblich“ mit „5“ verwendet. Die Durchführungszeit beträgt eine Minute.

Mit diesen Fragebögen wurden die private Lärmbelastung, die Eigen- und Familienanamnese bezüglich Gehörkrankheiten und aktuellen Beschwerden erfasst. Diese Fragen beziehen sich auf die Prädisposition für Gehörprobleme in Verbindung mit der Ultraschallaussetzung sowie auf Beschwerden, über die in der Literatur in der Anwesenheit von Ultraschall berichtet wurde.

Die Fragebögen befinden sich im Anhang I.

5.6 Statistische Methoden

AR- Studie

Die Untersuchung der Aufmerksamkeitsverschiebung beim Vergleich von Nomad, LitEye und ohne Gerät, sowie der Vergleich der einzelnen Bedingungen des Tests der Aufmerksamkeitsverschiebung nach Gerät (also Nomad vs. LitEye vs. ohne Gerät) und der Reaktionszeiten nach Gerät (Nomad, LitEye und ohne Gerät) wurden mit dem Friedman Test ausgewertet.

Die Untersuchung des Neglects wurde für den Vergleich der Bedingungen innerhalb einzelner Geräte und für den Vergleich der Neglectprüfung nach Gerät (also Nomad vs. LitEye vs. ohne Gerät) und den Vergleich der HRV- Daten (Geräte- und Phasenvergleich) ebenfalls mit dem Friedman- und nichtparametrischen Tests ausgewertet.

US-Studie

Die Rohdatenaufbereitung erfolgt mit MatLab, SigLab und Excel 2007. Die nachfolgende statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS 17.0 durchgeführt.

Es kamen folgende Verfahren zum Einsatz:

- Kolmogorov-Smirnov-Test (Prüfung der Normalverteilung)
- T-Test (bei normalverteilten Variablen) bzw. Mann-Whitney-Test (bei nichtnormalverteilten Variablen) beim Querschnittsvergleich
- Wilcoxon-Test (bei dem Vergleich für abhängige Stichproben)
- Korrelationsanalyse für den Dosis-Wirkung-Effekt, d.h. die erzeugte oder hervorgerufene Wirkung auf einer bestimmten Dosis. In diesem Fall ist Dosis die zeitliche Ultraschallexposition.

6 Ergebnisse

6.5 Ergebnisse der AR-Studie

6.5.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität (AR-Studie)

Die gewonnen Daten aus den HRV Messungen zeigen keine Unterschiede bei den Beanspruchungsparametern zwischen den drei Untersuchungsbedingungen und den zwei verwendeten Head-Mounted-Displays (s. **Tabelle 8** und die Mittelwerte der Herzfrequenz (MeanHR) des Neglect-Tests sind sowohl beim Tragen der HMDs Nomad (NOM) und LitEye (LIT) als auch bei der Durchführung ohne Gerät (OG) ähnlich (s. **Tabelle 9**).

Es kann z. B. aus dem Mittelwert der Herzfrequenz (MeanHR) und der Tabelle 8 ersehen werden, dass die Werte des Neglect-Tests (NEG) und des Tests zur Aufmerksamkeitsverschiebung (AV) keine großen Unterschiede aufweisen.

Tabelle 8: *HRV-Datenausgabe des Phasenvergleichs Neglect (NEG), Aufmerksamkeitsverschiebung (AV) und der Erholung (ERH)*

Variabel	**NEG** **MW± SD**	**AV**	**ERH**	**$p_{Friedman}$**
MeanRR	804,53±98,90	810,22±97,00	745,64±176,40	,002
SDNN	48,99±17,31	42,50±15,27	53,80±19,16	<,001
MeanHR	76,04±9,09	75,49±8,65	104,21±143,51	<,001
SDHR	4,92±1,23	4,37±1,09	6,57±2,03	<,001
RMSSD	48,55±21,07	45,04±19,83	43,97±18,88	,289
NN50	59,36±33,16	82,16±48,79	71,60±39,56	,001
pNN50	26,21±16,43	24,63±15,62	21,14±13,91	,756
RR_TRIANG_INDEX	11,92±3,47	10,80±3,00	12,90±4,41	,005
FFT_VLF_POWER	98,16±128,75	69,84±68,22	294,08±216,17	<,001
FFT_LF_POWER	1329,84±1039,65	957,12±975,08	1910,52±1163,68	<,001
FFT_LF_POWER nu	57,71±16,28	63,11±41,94	65,94±18,20	,011
FFT_HF_POWER	1025,60±1170,74	745,56±821,09	905,72±679,865	,005
FFT_HF_POWER nu_	42,50±15,97	58,66±71,95	30±12,95	,000

Fortsetzung Tabelle 8

Variabel	NEG MW± SD	AV	ERH	$p_{Friedman}$
FFT_TOTAL	2498,28±2076,23	1771,84±1697,79	3103,16±1772,79	<,001
FFT_LFdHF	1,70±1,05	53,19±178,35	2,52±1,41	,013
AR_VLF_POWER	136,36±140,06	91,10±66,71	319,24±211,63	<,001
AR_LF_POWER	1330,56±1094,67	927±886,28	1973,08±1436,33	<,001
AR_LF_POWER nu	57,23±14,84	74,84±111,37	65,61±17,88	,024
AR_HF_POWER	1066,64±1137,47	786,70±838,51	878,20±662,64	,048
AR_HF_POWER nu	57,68±75,78	65,39±92,78	30,38±13,16	,02
AR_TOTAL	2533,68±2155,88	1799,58±1641,44	3167,00±1959,52	<,001
AR_LFdHF	1,71±1,31	50,58±245,09	80,65±390,69	,006
SD1	34,60±15,31	31,94±14,24	31,15±13,641	,223
SD2	74,40±25,26	69,89±23,77	105,02±36,62	<,001
TINN	228,40±73,86	209,60±69,65	270,40±95,78	<,001

Die Mittelwerte der Herzfrequenz (MeanHR) des Neglect-Tests sind sowohl beim Tragen der HMDs Nomad (NOM) und LitEye (LIT) als auch bei der Durchführung ohne Gerät (OG) ähnlich (s. **Tabelle 9**).

Tabelle 9: *HRV-Datenausgabe des Gerätevergleichs NOM, LIT, OG*

Variabel	NOM MW± SD	LIT	OG	$p_{Friedman}$
MeanRR_NEGLECT	804,53±98,90	798,01±90,34	795,67±96,17	,731
SDNN_NEGLECT	48,99±17,31	47,84±21,16	48,94±15,46	,526
MeanHR_NEGLECT	76,04±9,09	76,54±8,54	76,85±8,51	,877
SDHR_NEGLECT	4,92±1,23	4,92±1,44	5,02 ±1,28	,585
RMSSD_NEGLECT	48,55±21,07	45,79±23,97	46,59±16,79	,610
NN50_NEGLECT	59,36±33,16	50,76±30,84	59,68±35	,220
pNN50_NEGLECT	26,21±16,43	23,14±15,85	26,04±16,18	,562
RR_TRIANG_INDEX_NEGLECT	11,92±3,47	10,80±2,74	11,91±3,34	,025
FFT_VLF_POWER_NEGLECT	98,16±128,75	97,32±92,86	108,48±105,19	,291

Fortsetzung Tabelle 9

Variabel	NOM MW± SD	LIT	OG	$p_{Friedman}$
AR_VLF_POWER_NEG	136,36±140,06	154,76±133,08	143,40±105,35	,517
FFT_LF_POWER_NEGLECT	1329,84±1039,65	1366,68±1835,51	1534,88±1327,584	,022
FFT_LF_POWER nu_NEGLECT	57,50±15,97	54,58±16,66	58,13±14,20	,083
FFT_HF_POWER_NEGLECT	1025,60±1170,74	962,96±1120,89	942,16±573,18	,508
FFT_HF_POWER nu_NEGLECT	42,50±15,975	45,41±16,66	41,87±14,20	,083
FFT_TOTAL_NEGLECT	2498,28±2076,23	2429,68±2909,01	2585,28±1826,75	,048
FFT_LFdHF_NEGLECT	1,70±1,05	1,60±1,36	1,70±1,04	,083
AR_LF_POWER_NEGLECT	1330,56±1094,67	1394,52±1532,53	1454,56±1124,58	,031
AR_LF_POWER nu_NEGLECT	57,23±14,84	56,22±15,46	58,44±12,93	,329
AR_HF_POWER_NEGLECT	1066,64±1137,47	1050,80±1527,15	976,80±693,03	,913
AR_HF_POWER nu_NEGLECT	57,68±75,78	43,78±15,45	41,55±12,93	,329
AR_TOTAL_NEGLECT	2533,68±2155,88	2600,12±3046,24	2574,76±1716,57	,375
AR_LFdHF_NEGLECT	1,711±1,31	1,65±1,24	1,73±1,25	,399
SD1_NEGLECT	34,95±14,99	32,64±17,05	33,21±11,95	,686
SD2_NEGLECT	74,40±25,26	76,15±28,86	75,31±21,04	,876
TINN	228,40±73,86	232±91,26	235,20±79,27	,796

6.5.2 Ophthalmologische Statusuntersuchungen

Visus, Phorie, Stereosehen:

Es wurden keine visuellen Störungen bei den durchgeführten Tests festgestellt.

Perimetriebefund:

Das Gesichtsfeld wurde in vier Quadranten aufgeteilt. Beim Einsatz des LitEye-Geräts resultieren Gesichtsfeldeinschränkungen im rechten oberen und rechten unteren Quadranten. Beim Nomad-Gerät zeigten sich visuelle Defizite des Gesichtsfelds im rechten

oberen und linken oberen Quadranten (s. **Abb. 37**). Die Unterschiede erwiesen sich im Vergleich zur Gesichtsfeldprüfung ohne HMD als statistisch höchst signifikant (p<0,001). Weitere Perimetrie-Ergebnisse sind in den **Abb. 38** und **Abb. 39** dargestellt.

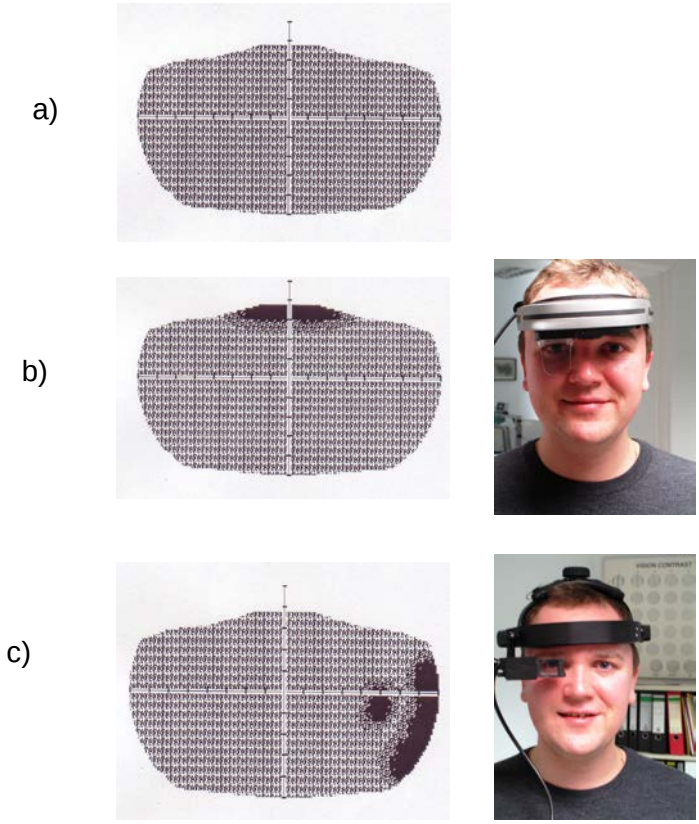


Abb. 37: *Perimetriebefund a) ohne Gerät, b) beim Tragen des Nomad-Gerätes und c) beim Tragen des LitEye-Gerätes. Beispiel eines einzelnen Probanden*

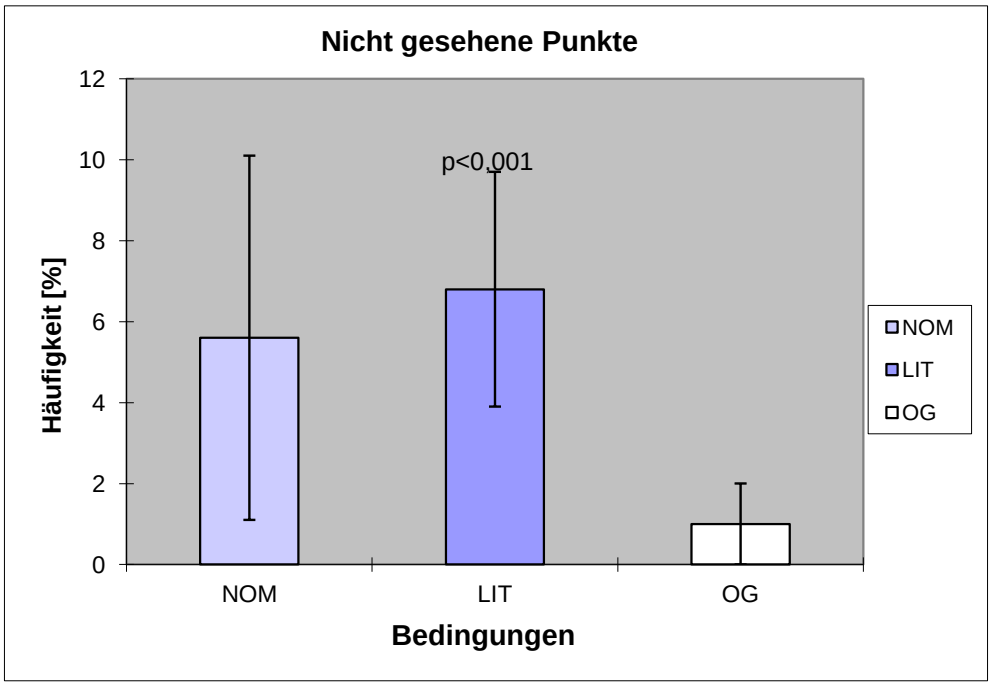


Abb. 38: *Ergebnissen der nicht gesehenen Punkte bei der Perimetrie-Untersuchung bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

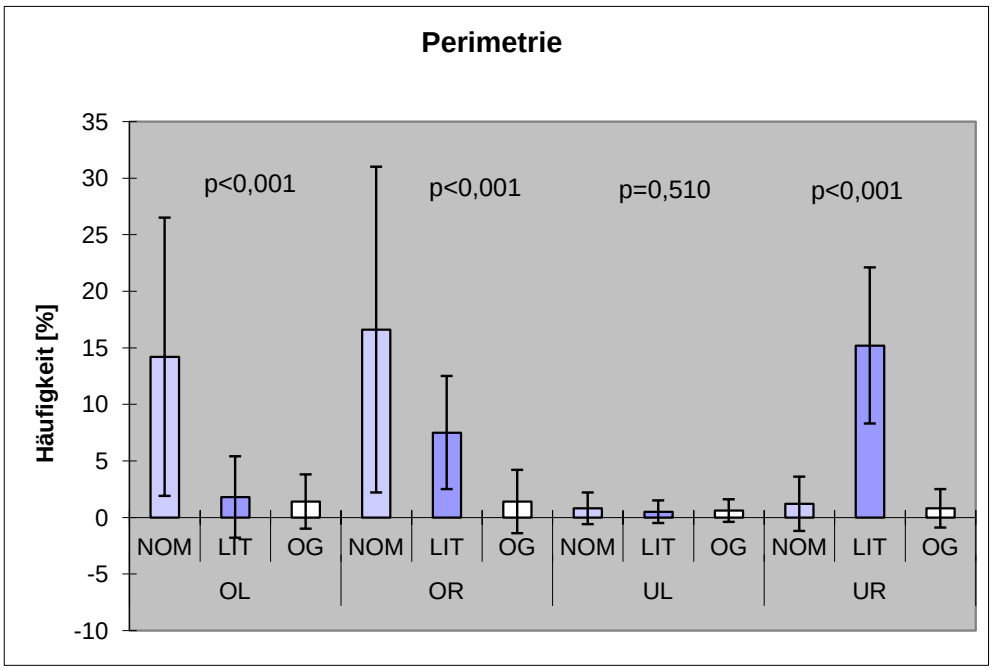


Abb. 39: *Ergebnisse der Perimetrie-Untersuchungen bei allen Untersuchungsbedingungen nach Quadranten; OL= oben links, OR= oben rechts, UL= unten links, UR= unten rechts*

6.5.3 Psychometrische Tests (AR-Studie)

Periphere Wahrnehmung

Bei dem LitEye-Gerät wurde eine signifikante Einschränkung des Gesichtsfeldes **(Abb. 40**) und eine Einschränkung des Blickwinkels im rechten Auge (s**. Abb. 41**) im Vergleich zum linken (**Abb. 42**) festgestellt. Der Blickwinkel des linken Auges der Probanden wurde nicht eingeschränkt.

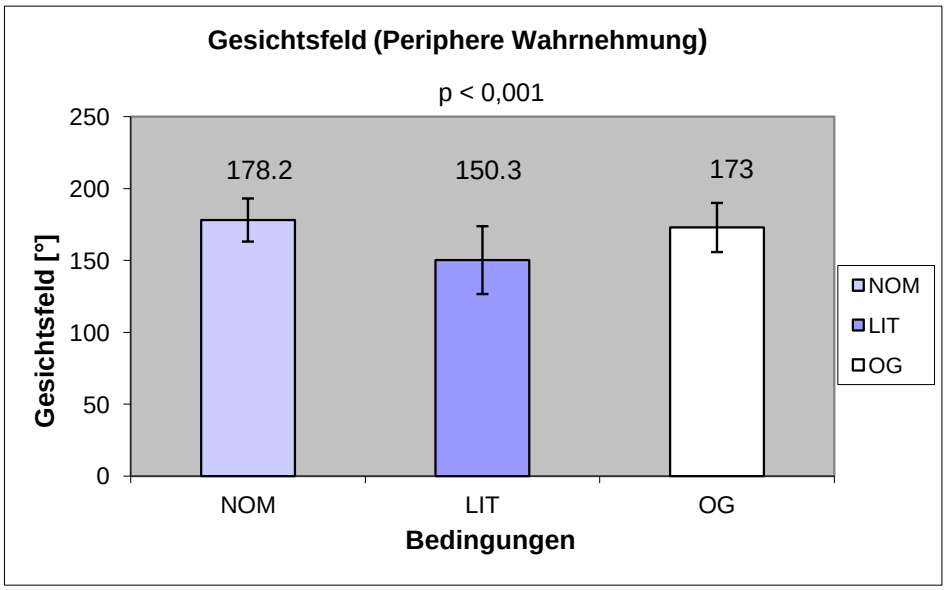


Abb. 40: *Gesichtsfeld bei dem Test „Periphere Wahrnehmung“ bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

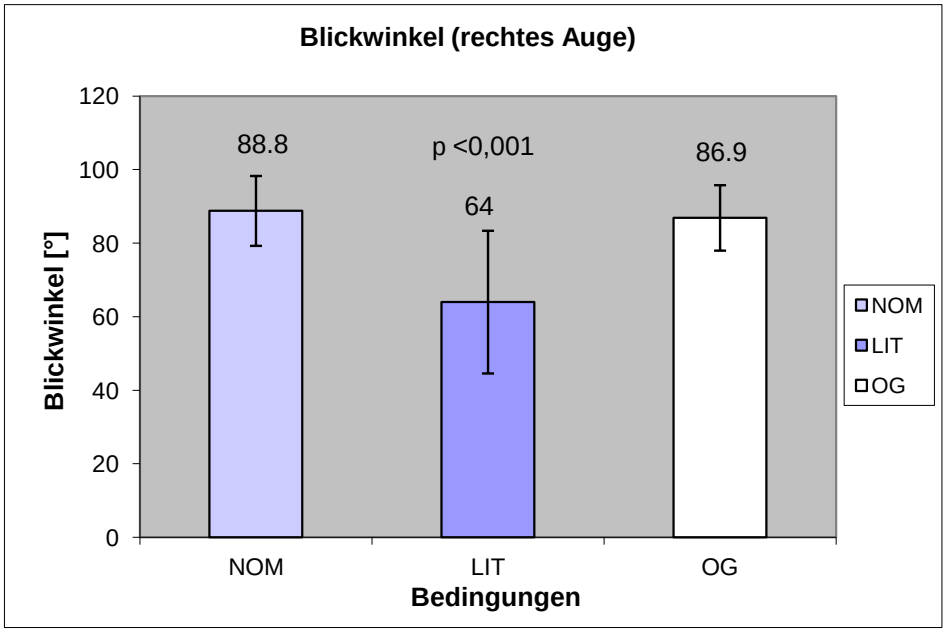


Abb. 41*:* *Blickwinkel des rechten Auges bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

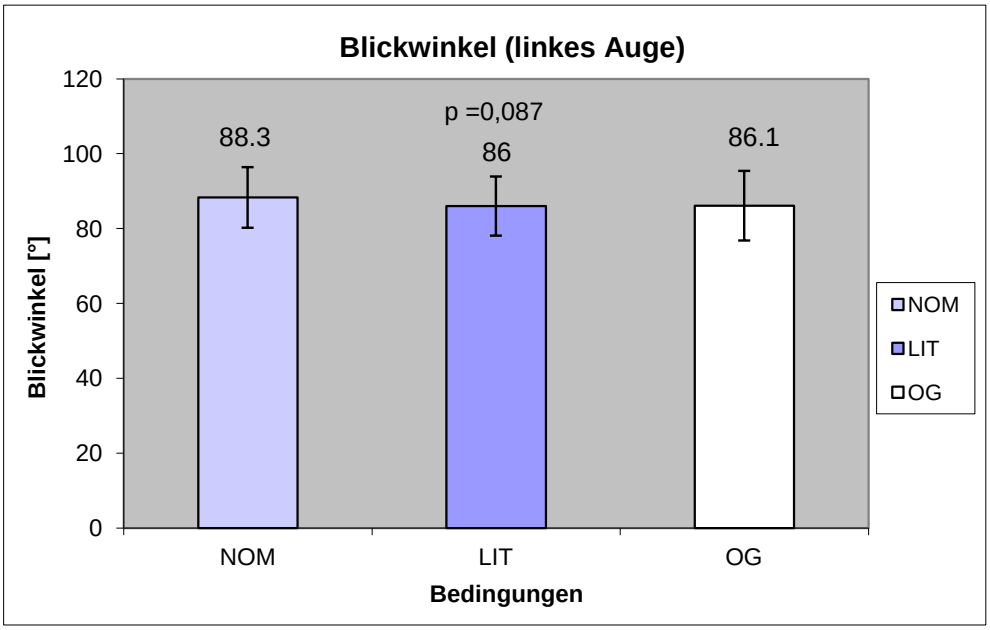


Abb. 42: *Blickwinkel des linken Auges bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Die Trackingabweichung als Aufgabe bei der Durchführung des Tests wird als die Abweichung des Fadenkreuzes von der Kugel verstanden. Diesbezüglich wurden keine Unterschiede bei allen drei Untersuchungsbedingungen gefunden. Die Aufgabe des Tracking mit der Kugel findet frontal auf dem Bildschirm statt und wird durch die Verdeckung der HMD-Geräte nicht beeinflusst. Diese Aufgabe bezweckt, dass die VP geradeaus schauen und nicht zu den peripheren Leuchten. Wenn die Kugel nicht im Fadenkreuz gehalten wird, bekommen die VP auf dem Bildschirm einen Hinweis, der darauf hinweist, dass die Kugel zu verfolgen und im Fadenkreuz zu halten ist.

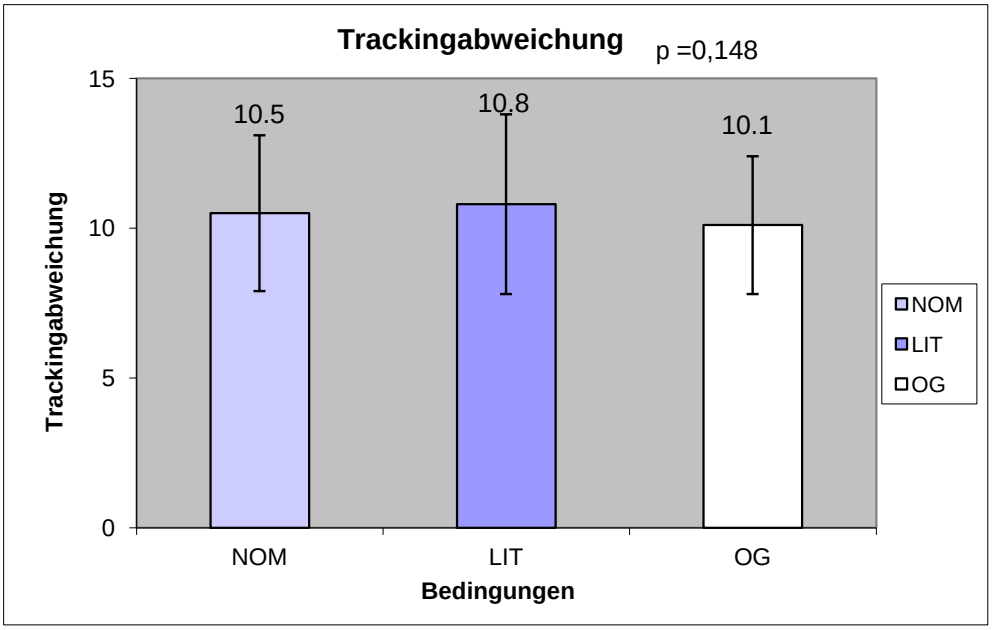


Abb. 43: *Trackingabweichung bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Die Anzahl der richtigen Treffer, Reaktionen auf den Reiz in Form einer Lichtschranke, sind bei dem Gerät LitEye bei der rechten Seite (**Abb. 44**) reduziert.

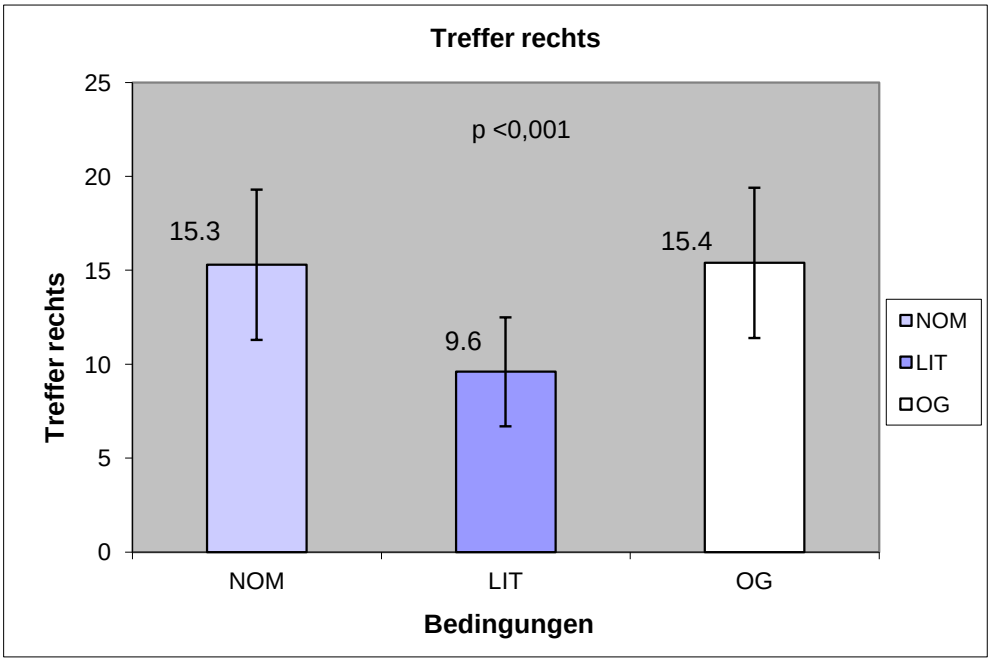


Abb. 44: *Anzahl der richtigen Treffer (Reaktionen) der rechten Seite bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

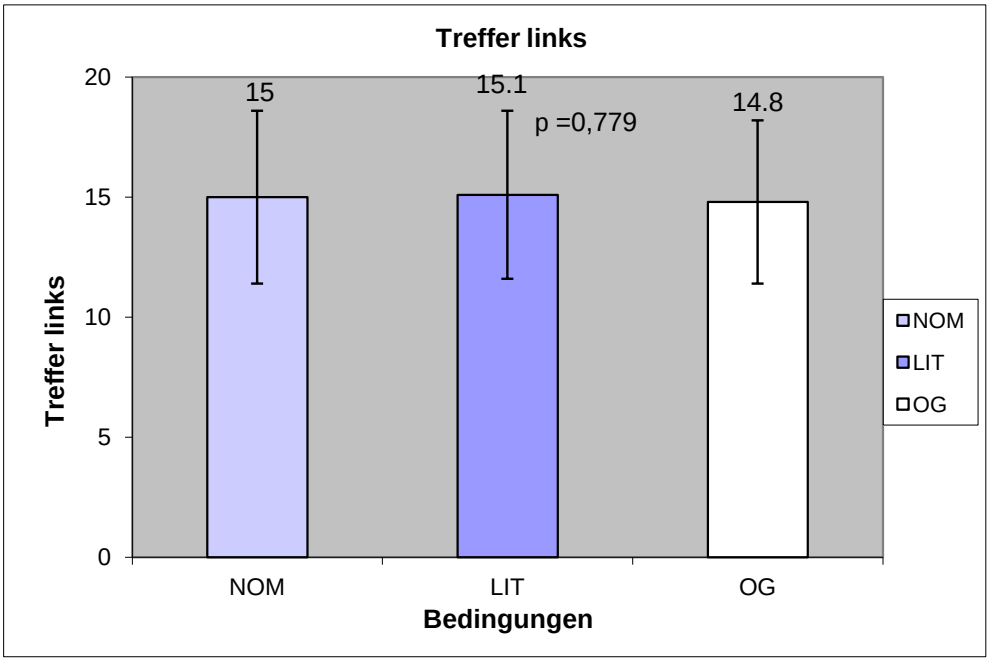


Abb. 45: *Anzahl der richtigen Treffer (Reaktionen) der linken Seite bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Die Anzahl falscher Reaktionen (Betätigen des Fußpedals ohne Darbietung eines Reizes) ist bei LitEye tendenziell größer (**Abb. 46**). Ebenfalls ist bei LitEye die Anzahl der ausgelassenen Reaktionen (keine Reaktion auf dargebotenen Reiz) höher (**Abb. 47**).

Die Medianwerte der Reaktionszeiten auf linke bzw. rechte Reize bzw. Gesamtreaktionszeiten sind bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar (**Abb. 48** und **Abb. 49**).

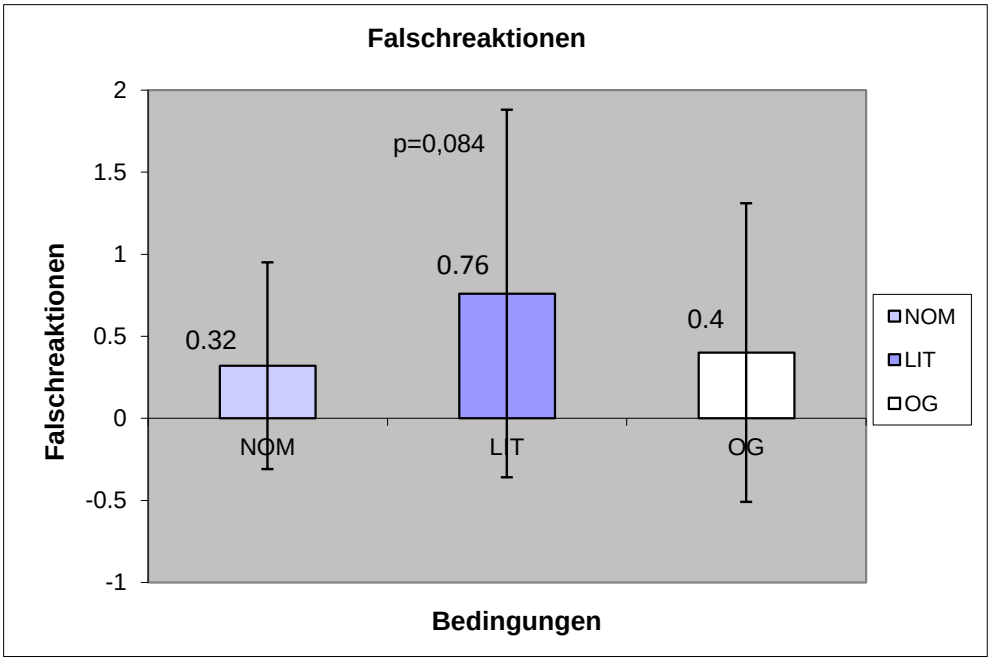


Abb. 46: *Anzahl falscher Reaktionen (Betätigen des Fußpedals ohne Darbietung eines Reizes) bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

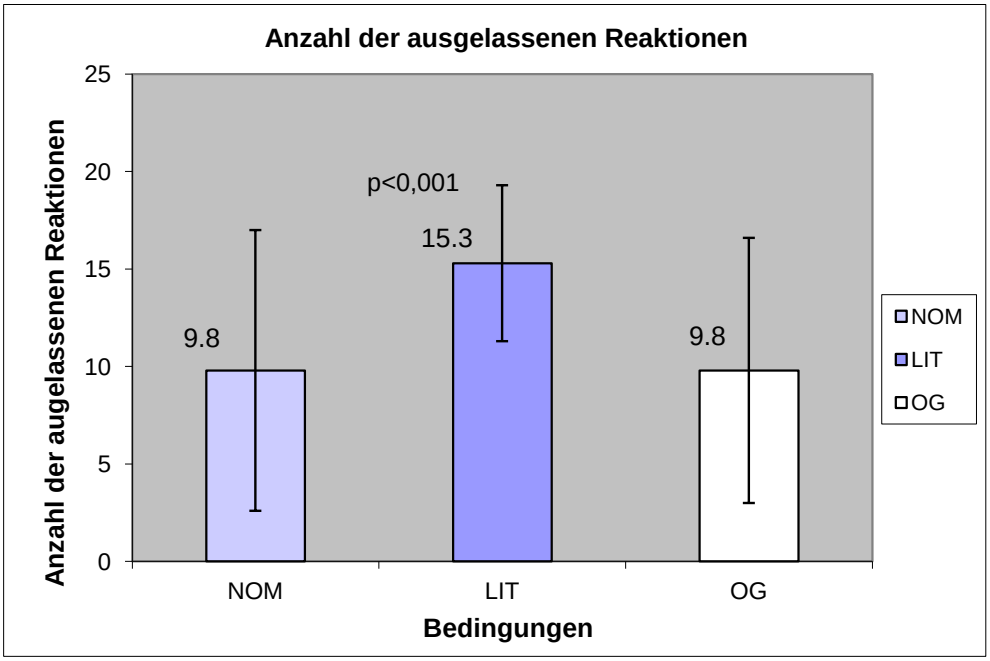


Abb. 47: *Anzahl der ausgelassenen Reaktionen (keine Reaktion auf dargebotene Reize)*

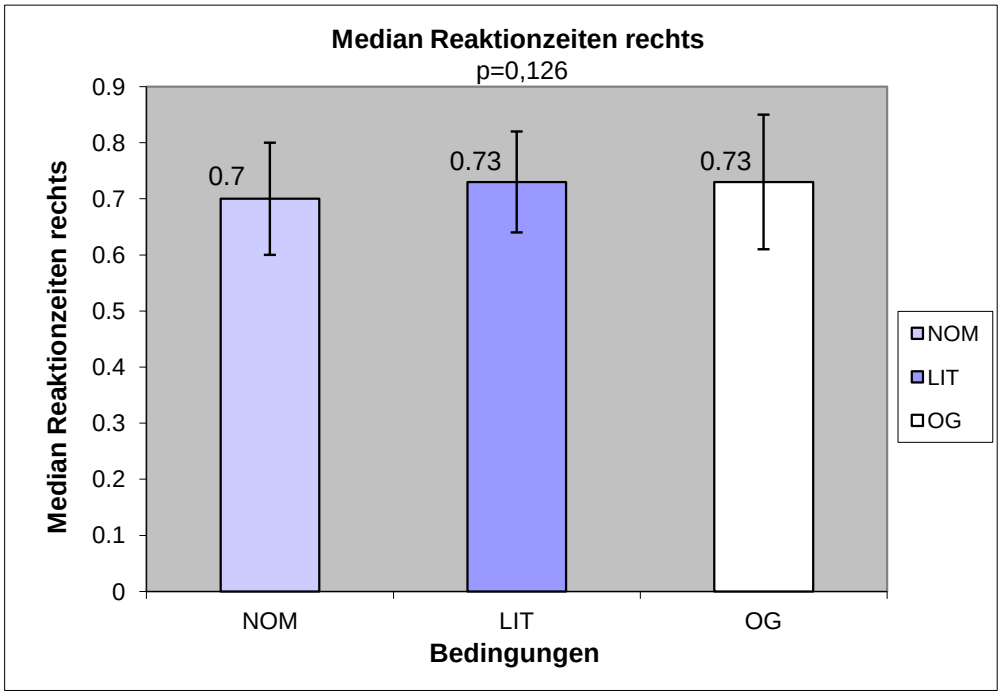


Abb. 48: *Medianwerte der Reaktionszeiten auf die Reize von rechts bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

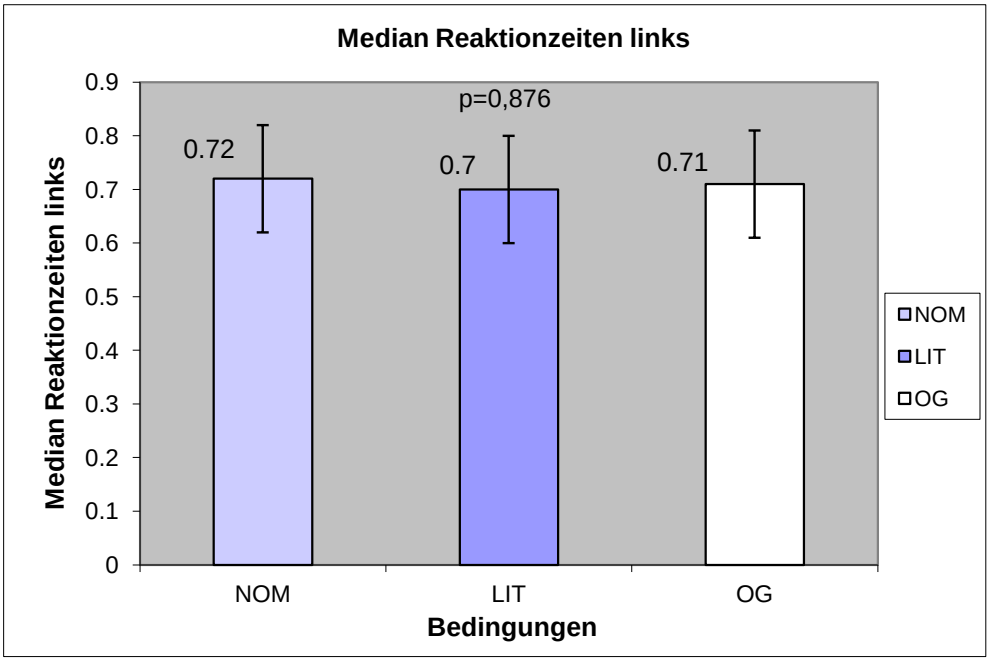


Abb. 49: *Medianwerte der Reaktionszeiten auf die Reize von links bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

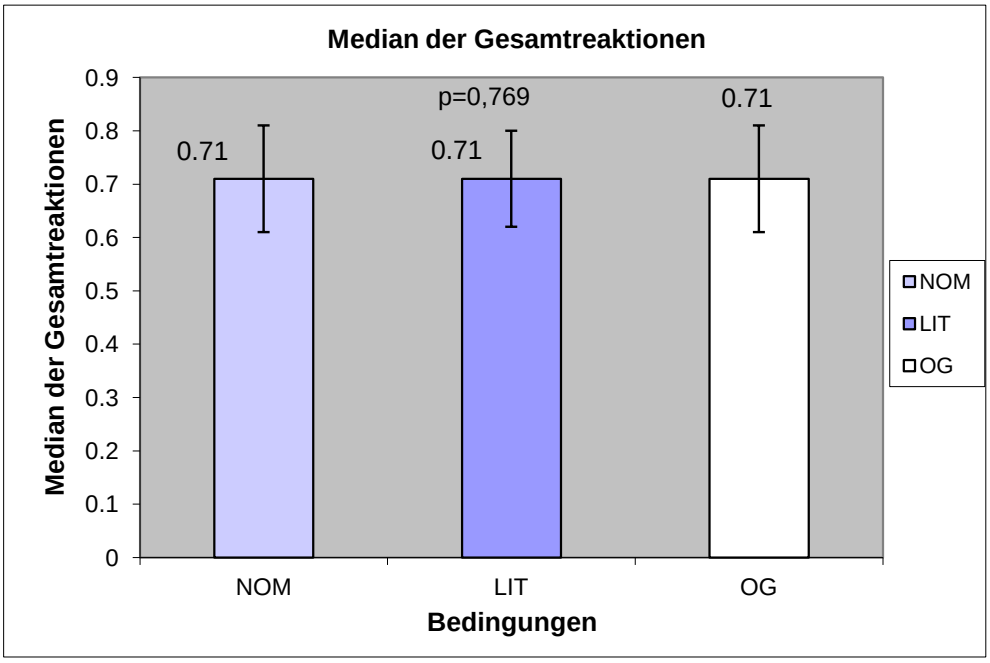


Abb. 49: *Medianwerte der Gesamtreaktionen bei alle Untersuchungsbedingungen*

Afferente dynamische Sehleistung

Die afferente dynamische Sehleistung (Dynamischer Sehtest) wird durch das Tragen von HMD nicht beeinflusst und ist bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar.

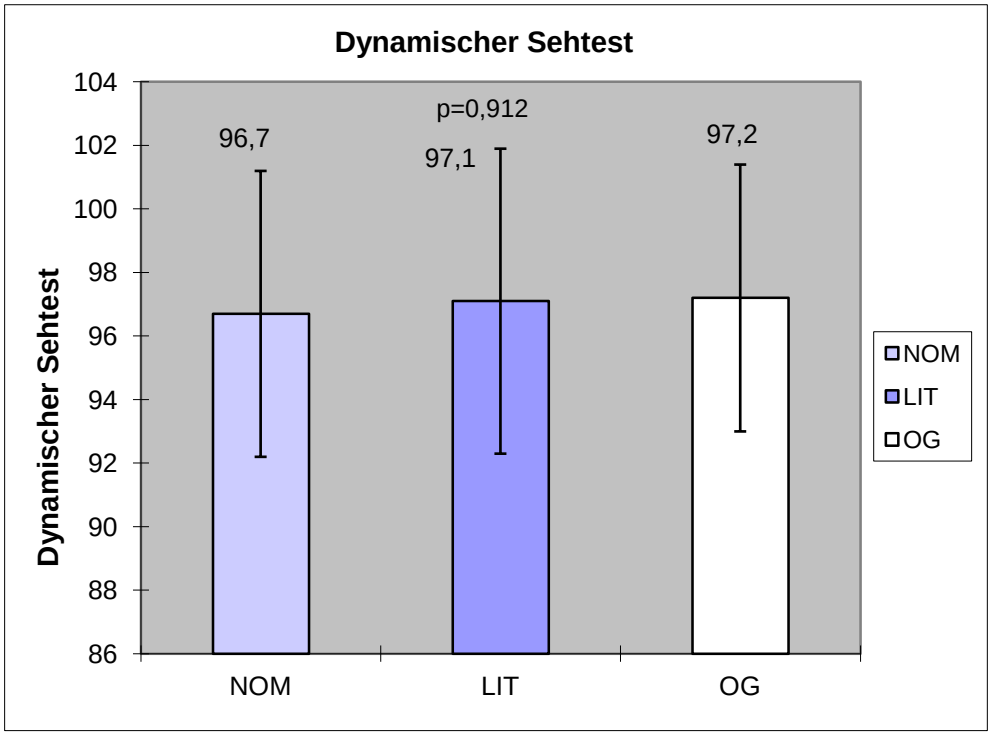


Abb. 50: *Afferente dynamische Sehleistung bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Neglect-Test:

Die Ergebnisse des Neglect-Tests wurden in Quadranten aufgeteilt und sind in der **Tabelle 10** dargestellt**.** Es wurden keine Unterschiede gefunden.

Tabelle 10: *Ergebnisse der Neglectprüfung bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Position	Variable	NOM MW± SD	LIT MW± SD	OG MW± SD	$p_{Friedman}$
NELOU (links oben und unten)	Reaktionszeit (MW)	447,87±61,01	462,83±71,68	450,25±65,00	,722
	Reaktionszeit (SD)	90,46±27,65	111,85±61,74	105,85±51,12	,549
	Reaktionszeit (Median)	432,54±63,55	439,88±63,79	432,98±58,95	,929
	PR	12,21±8,076	10,54±5,77	11,92±8,304	,815
	Richtige Reaktionen	21,08±,584	20,92±,584	21,00±,511	,586
	AR	,4 ± ,204	,8± ,282	0±0	,223
NELO (links oben)	Reaktionszeit (MW)	448,58±60,45	460,15±69,24	454,65±64,14	,802
	Reaktionszeit (SD)	96,29±36,38	97,34±52,34	104,33±40,88	,872
	Reaktionszeit (Median)	434,88±59,56	444,81±69,33	432,46±63,46	,802
	Richtige Reaktionen	10,67± ,482	10,54±,509	10,71± ,46	,504
	AR	,4 ± ,204	0±0	0±0	,368
NELU (links unten)	Reaktionszeit (MW)	457,17±89,28	468,04±95,09	456,47±83,77	,769
	Reaktionszeit (SD)	102,87±78,12	115,10±99,72	111,68±81,85	,769
	Reaktionszeit (Median)	435,19±72,00	439,71±64,03	434,37±74,89	,990
	Richtige Reaktionen	10,71±,46	10,38±,647	10,63±,576	,040*
	AR	0±0	,08±,282	,04±,204	,368
NEROU (rechts oben und unten)	Reaktionszeit (MW)	460,05±66,86	462,72±80,29	448,06±69,08	,597
	Reaktionszeit (SD)	110,20±63,50	109,48±43,80	101,09±38,73	,597
	Reaktionszeit (Median)	435,06±57,02	440,42±68,08	428,08±61,01	,682
	PR	12,67±7,376	12,21±7,564	13,83±8,540	,955
	Richtige Reaktionen	20,96±,624	20,96±,550	21,00±,590	,763
	AR	,08± ,28	,08 ±,28	,04 ±,20	,819
NERO (rechts oben)	Reaktionszeit (MW)	468,97±68,36	478,55±101,67	465,96±82,64	,464
	Reaktionszeit (SD)	118,84±70,25	114,09±65,72	112,92±51,92	,549
	Reaktionszeit (Median)	443,54±68,10	445,85±87,79	440,43±72,4	,677
	Richtige Reaktionen	10,58 ±,50	10,63 ±,49	10,63 ±,49	,931
	AR	0±0	0±0	0±0	-
NERU (rechts unten)	Reaktionszeit (MW)	460,85±79,20	445,08±65,72	435,00±68,62	,597
	Reaktionszeit (SD)	105,54±88,05	93,02±33,60	88,13±37,66	,819
	Reaktionszeit (Median)	441,79±69,64	439,14±73,65	419,81±63,83	,597
	Richtige Reaktionen	10,63±,49	10,33±,565	10,54±,58	,223
	AR	,08±0,28	,04±0,20	,04±,20	,779

Verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung:

Die Ergebnisse des Tests zur Aufmerksamkeitsverschiebung sind in der

Tabelle 11 dargestellt. Auch hier wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Tabelle 11: *Ergebnisse des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung bei allen drei Untersuchungsbedingungen*

Position	**Variable**	**NOM MW± SD**	**LIT MW± SD**	**OG MW± SD**	**$p_{Friedman}$**
PNL_TGT_L (Pfeil nach links Target links)	Reaktionszeit (MW)	276,8 ± 29,5	293,7 ± 54,5	275,9 ± 39,2	,289
	Reaktionszeit (SD)	48,5 ± 16,6	58,3 ± 26,1	50,2 ± 18,3	,087
	Reaktionszeit (Median)	269,3 ± 27,2	285,3 ± 53,4	270,0 ± 36,0	,295
	Richtige Reaktionen	38,1 ± 1,3	37,7 ± 1,5	37,5 ± 2,1	,960
	Antizipation	,6 ± ,9	,8 ± 1,1	,8 ± ,9	,442
	Augenbewegungen	0 ± 0	,4 ± ,2	,4 ± ,2	,607
	Ausreiswerte	1,0 ± ,7	1,1 ± ,6	1,0 ± ,8	,724
PNL_TGT_R (Pfeil nach links Target rechts)	Reaktionszeit (MW)	332,8 ± 71,2	365,9 ± 100,1	331,3 ± 72,7	,178
	Reaktionszeit (SD)	61,9 ± 28,3	97,1 ± 96,5	63± 32,7	,311
	Reaktionszeit (Median)	330,9 ± 66,2	357,0 ± 79,0	324,8 ± 67,1	,031*
	Richtige Reaktionen	9,5 ± ,6	9,6 ± ,6	9,6 ± ,6	1,0
	Antizipation	,2 ± ,4	,2 ± ,4	,2 ± ,5	1,0
	Augenbewegungen	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	-
	Ausreiswerte	,24 ± ,4	,1 ± ,3	,2 ± ,4	,529
PNR_TGT_L (Pfeil nach rechts Target links)	Reaktionszeit (MW)	317,0 ± 60,0	333,8 ± 71,3	332,6 ± 87,3	,674
	Reaktionszeit (SD)	59,3 ± 31,4	63,9 ± 38,5	72,3 ± 57,6	,688
	Reaktionszeit (Median)	315,8 ± 62,7	331,8 ± 76,5	325,3 ± 74,8	,181
	Richtige Reaktionen	9,7 ± ,6	9,6 ± ,5	9,6 ± ,6	,601
	Antizipation	,2 ±,5	,1 ± ,3	,2 ± ,5	,641
	Augenbewegungen	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	-
	Ausreiswerte	,8 ± ,3	,2 ± ,4	,2 ± ,4	,307
PNR_TGT_R (Pfeil nach rechts Target rechts)	Reaktionszeit (MW)	276,1 ± 35,1	285,7 ± 53,0	270,9 ± 41,5	,157
	Reaktionszeit (SD)	53,8 ± 28,8	51,7 ± 15,9	48,6 ± 18,1	,333
	Reaktionszeit (Median)	268,8 ± 33,2	279,9 ± 54,3	263,9 ± 39,5	,135
	Richtige Reaktionen	37,7 ± 1,4	37,5 ± 1,2	37,8 ± 1,1	,344
	Antizipation	,9 ± ,9	,7 ± ,9	,7 ± ,6	,291
	Augenbewegungen	0 ± 0	,2 ± ,8	0 ± 0	,368
	Ausreiswerte	1,1 ± ,7	1,2 ± ,8	1,2 ± ,6	,816

6.6 Ergebnisse der US-Studie

6.6.1 Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität

Zu Fragestellung 1

1) Wirkt sich Ultraschall als Belastungsfaktor auf das Herz-Kreislauf-System bzw. die Herzfrequenz und den Blutdruck aus, was sich in einer Erhöhung dieser Werte bei der Aussetzung äußern würde?

Die Werte der Herzschlagfrequenzerfassung aus den verschiedenen Untersuchungsphasen zeigen keine signifikanten Unterschiede und befinden sich außerdem unter der Dauerleistungsgrenze (DLG) (110 p/min) für dynamische Arbeit. Es lässt sich hier keine vegetative Wirkung nachweisen (s. **Tabelle 12**).

Tabelle 12: *Mittelwert der Herzfrequenz*

Parameter	Mittelwert	N*	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
MWHR_RSi	85,18	29	11,29	2,09
MWHR_RESi	81,09	29	15,31	2,84
MWHR_RSt1	88,94	16	14,55	3,63
MWHR_RSt2	86,60	16	15,47	3,86
MWHR_RSt1	88,60	17	14,16	3,43
MWHR_US1	86,99	17	14,27	3,46
MWHR_RSt1	88,94	16	14,55	3,63
MWHR_US2	89,07	16	12,75	3,18
MWHR_RSt2	87,25	20	14,15	3,16
MWHR_US2	90,47	20	12,18	2,72

* Einige Daten mussten aufgrund der nicht Verwendbarkeit ausgeschlossen werden.

Erläuterung zur Tabelle 12

MWHR: Mittelwert der Herzfrequenz
RSi : Ruhephase in sitzender Position
RESi: Ruhe- und anschließende Erholungsphase in sitzender Position
RSt1: Ruhephase in stehender Position 1: Das Stehen nach der Erholung dient der Vorbereitung für den nächsten Versuchsablauf. Hier betritt der Proband erneut das Labor für den Beginn des nächsten Versuchsablaufs.
RSt2: Ruhephase in stehender Position 2: Ruhephase nach dem Betreten des Labors
US1, US2: Beschallungs- bzw. Lärmexpositionsphasen

6.6.2 Blutdruck

Die folgende Tabelle veranschaulicht die systolischen und diastolischen Blutdruckwerte in den Kategorien „optimal“, „normal“ und „hoch normal“.

Tabelle 13: *Optimale, normale und hoch normale Blutdruckwerte (Kraft, 2012)*

Kategorie	Systolisch	Diastolisch
Optimal	< 120	< 80
Normal	120-129	80-84
Hoch Normal	130-139	85-89

Anhand dieser Referenz kann daraus geschlossen werden dass die gewonnen Daten aus den Blutdruckmessungen sich innerhalb des normalen Rahmens befinden und dass sich auch hier keine signifikanten Unterschiede zeigen (s. **Tabelle 14**).

Tabelle 14: *Blutdruckwerte für die verschiedenen Versuchsphasen*

		MW	N	SD	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	SBD_R	124,25	4	12,393	6,196
	SBD_Bel	121,50	4	14,480	7,240
Paaren2	SBD_Bel	130,67	6	6,377	2,603
	SBD_Erh	126,83	6	3,061	1,249
Paaren 3	SBD_R	132,50	2	7,778	5,500
	SBR_Erh	128,50	2	3,536	2,500
Paaren 4	MAD_R	93	4	15,122	7,561
	MAD_Bel	93,25	4	15,478	7,739
Paaren 5	MAD_Bel	101,33	6	5,279	2,155
	MAD_Erh	94,33	6	2,658	1,085
Paaren 6	MAD_R	106	2	2,828	2
	MAD_Erh	94	2	0	0
Paaren 7	DBD_R	78,50	4	14,387	7,194
	DBD_Bel	77,75	4	15,196	7,598
Paaren 8	DBD_Bel	85,17	6	8,658	3,535
	DBD_Erh	81,17	6	5,193	2,120
Paaren 9	DBD_R	90,50	2	6,364	4,5
	DBD_Erh	77	2	2,828	2

Erläuterung zur Tabelle:

R: Ruhephase, Erh: Erholungsphase, Bel: Belastungsphase

SBD: Systolischer Blutdruck, MAD: Mittelarterieller Druck, DBD: Diastolischer Blutdruck

Der Mittel arterieller Druck (MAD) wird nach der Formel (SBD-DBD) / 3 + DBD berechnet und wird nach Seibt und Scheuch (1999) als „...die treibende Kraft im Körperkreislauf“ Bezeichnet.

Tabelle 15: *Test bei gepaarten Stichproben für den Blutdruck*

Test bei gepaarten Stichproben									
		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		MW	SD	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Untere	Obere			
Paaren 1	SBD_R - SBD_Bel	2,750	3,403	1,702	-2,666	8,166	1,616	3	,205
Paaren 2	SBD_Bel - SBD_Erh	3,833	3,869	1,579	-,227	7,893	2,427	5	,060
Paaren 3	SBD_R - SBD_Erh	4,000	4,243	3,000	-34,119	42,119	1,333	1	,410
Paaren 4	MAD_R - MAD_Bel	-,250	3,686	1,843	-6,115	5,615	-,136	3	,901
Paaren 5	MAD_Bel - MAD_ Erh	7,000	4,561	1,862	2,214	11,786	3,760	5	**,013**
Paaren 6	MAD_R - MAD_ Erh	12,000	2,828	2,000	-13,412	37,412	6,000	1	,105
Paaren 7	DBD_R - DBD_Bel	,750	,957	,479	-,773	2,273	1,567	3	,215
Paaren 8	DBD_Bel - DBD_Erh	4,000	9,143	3,733	-5,595	13,595	1,072	5	,333
Paaren 9	DBD_R - DBD_Erh	13,500	3,536	2,500	-18,266	45,266	5,400	1	,117

Die **Tabelle 16** veranschaulicht die starke Korrelation zwischen der Ruhe- und der Belastungsphase sowie die starke Korrelation zwischen der Ruhe- und der Erholungsphase. Darüber hinaus korrelieren auch der Belastungs- und der Erholungsblutdruck sehr stark miteinander. Diese starken Korrelationen bedeuten, dass sich der Zustand der VP während des Versuchs kaum geändert hat. Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, hat die Belastung einzig Einfluss auf den diastolischen Blutdruck.

Tabelle 16: *Korrelationen bei gepaarten Stichproben für den Blutdruck*

Korrelationen bei gepaarten Stichproben				
		N	Korrelation	Signifikanz
Paaren 1	SBD_R & SBD_Bel	4	**,980**	**,020**
Paaren 2	SBD_Bel & SBD_Erh	6	**,898**	**,015**
Paaren 3	SBD_R & SBD_Erh	2	**1,000**	**,000**
Paaren 4	MAD_R & MAD_Bel	4	**,971**	**,029**
Paaren 5	MAD_Bel & MAD_Erh	6	,504	,308
Paaren 6	MAD_R & MAD_Erh	2	**1,000**	**,000**
Paaren 7	DBD_R & DBD_Bel	4	**,999**	**,001**
Paaren 8	DBD_Bel & DBD_Erh	6	,204	,698
Paaren 9	DBD_R & DBD_Erh	2	**1,000**	**,000**

Zu den Fragestellungen 2, 3

2) **Bestehen bedeutsame Veränderungen der Hörschwelle in Vergleich der ersten und zweiten Messung?**

3) **Ob und inwieweit treten Schädigungen oder Beeinträchtigungen des Gehörs (z. B. des Cortischen Organs bzw. Haarzellen, Hörschwellenverschiebungen auf?**

Bezüglich der Vor- und Nachuntersuchung, wurden bis auf die Frequenzen 1 kHz für das rechte Ohr (p= 0,042) und 6 kHz für das linke Ohr (p=0,031) für die Knochenleitung nach dem Wilcoxon Test keine signifikanten Unterschiede festgestellt (s. **Tabelle 19**).

Bezüglich der Luftleitung ergaben sich hier signifikante Unterschiede zwischen der Vor- und der Nachuntersuchung bei der Frequenz 0,75 kHz (p=0,028) und 1kHz (p=0,047) beim rechten Ohr. Für das linke Ohr ergaben sich auch signifikante Unterschiede zwischen der Vor- und der Nachuntersuchung bei der Frequenz 0,75 kHz (p=0,009) und bei 4 kHz (p=0,035) für das linke Ohr (s. **Tabelle 22**).

Alle anderen Werte der Audiogramme (s. **Tabelle 18** und **Tabelle 21**) zeigen keine signifikanten Unterschiede und keine Anzeichnen einer eventuellen Gehörbeeinträchtigung oder Hörschwellenverschiebung, die mit den Beschwerdefragebögen und der Ultraschallexposition in Verbindung gebracht werden können. Eine Übersicht aller Frequenzen und Werte wird in **Tabelle 17** veranschaulicht.

Tabelle 17: *Differenz der Audiogramme für die Knochenleitung bei Vor- und Nachuntersuchung*

Statistik für das rechte Ohr (RO)

Frequenz in kHz / Item	Diff_ 0,125 _RO	Diff_ 0,25_R O	Diff_ 0,5_R O	Diff_ 0,75_ RO	Diff_ 1_R O	Diff_ 1,5_R O	Diff_ 2_R O	Diff_ 3_R O	Diff_ 4_R O	Diff_ 6_R O	Diff_ 8_R O	Diff _12 _RO
N	Gültig	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Fehlend	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
MW		2,33	-,17	1,67	3,67	,33	,00	1,67	1,83	,33	,50	
Median		5,00	,00	,00	5,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	
SD		7,739	7,931	7,350	5,074	6,940	5,252	5,467	7,008	5,403	7,468	
Minimum		-15	-20	-10	-5	-15	-10	-10	-10	-10	-20	
Maximum		15	15	20	15	15	15	10	15	15	15	
Perzentile	25		-1,25	,00	,00	,00	-5,00	-5,00	,00	-5,00	,00	-5,00
50		5,00	,00	,00	5,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	
75		5,00	5,00	5,00	5,00	1,25	5,00	5,00	6,25	,00	5,00	

Statistik für das linke Ohr (LO)

Frequenz in kHz / Item	Diff _0,1 25_ LO	Diff_0 ,25_L O	Diff_0 ,5_LO	Diff_0 ,75_L O	Diff_1 _LO	Diff_1 ,5_LO	Diff_2 _LO	Diff_3 _LO	Diff_4 _LO	Diff_6 _LO	Diff_8 _LO	Diff _12 _L O
N	0	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Fehlend	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
MW		,33	-1,33	,83	,50	1,33	1,83	2,00	1,17	2,00	1,83	
Median		,00	,00	,00	,00	,00	2,50	,00	,00	,00	,00	
SD		7,184	6,814	5,427	5,923	6,814	5,490	6,103	6,783	5,017	6,497	
Minimum		-15	-15	-10	-10	-15	-10	-15	-15	-5	-15	
Maximum		15	15	15	15	15	10	20	20	20	15	
Perzentile			-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	,00	,00	,00	-5,00	,00	,00
50		,00	,00	,00	,00	,00	2,50	,00	,00	,00	,00	
75		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	1,25	5,00	

Tabelle 18: *Knochenleitung in einzelnen Frequenzen bei Vor- und Nachuntersuchung*

Deskriptive Statistik					
Frequenz in kHz	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum dB**	**Maximum dB**
V_0,125_RO			Die Frequenz wird nicht überprüft		
V_0,25_RO	30	-2,00	6,898	-10	10
V_0,5_RO	30	-3,17	6,363	-10	15
V_0,75_RO	30	-3,33	6,865	-10	10
V_1_RO	30	-2,00	5,960	-10	10
V_1,5_RO	30	-2,83	8,167	-10	15
V_2_RO	30	-1,33	6,424	-10	15
V_3_RO	30	-1,17	5,032	-10	10
V_4_RO	30	-1,00	7,922	-10	15
V_6_RO	30	-7,50	4,689	-10	5
V_8_RO	30	-1,17	5,200	-10	10
V_12_RO			Die Frequenz wird nicht überprüft		
V_0,125_LO			Die Frequenz wird nicht überprüft		
V_0,25_LO	30	-3,17	7,130	-10	15
V_0,5_LO	30	-4,33	6,789	-10	15
V_0,75_LO	30	-3,67	6,557	-10	15
V_1_LO	30	-3,83	5,972	-10	10
V_1,5_LO	30	-1,67	8,130	-10	15
V_2_LO	30	1,67	8,023	-10	20
V_3_LO	30	-2,17	5,676	-10	10
V_4_LO	30	-2,00	5,663	-10	10
V_6_LO	30	-7,83	4,857	-10	10
V_8_LO	30	-1,00	5,632	-10	10
V_12_LO			Die Frequenz wird nicht überprüft.		.
N_0,125_RO	0		Die Frequenz wird nicht überprüft		
N_0,25_RO	30	-4,33	6,915	-10	15
N_0,5_RO	30	-2,00	7,022	-10	15
N_0,75_RO	30	-4,00	6,215	-10	15
N_1_RO	30	-4,33	5,683	-10	5
N_1,5_RO	30	-3,17	8,039	-10	20
N_2_RO	30	-1,33	5,403	-10	10
N_3_RO	30	-2,83	4,857	-10	5
N_4_RO	30	-2,50	5,686	-10	10
N_6_RO	30	-7,83	3,130	-10	0
N_8_RO	30	-1,67	7,112	-10	25
N_12_RO			Die Frequenz wird nicht überprüft		
N_0,125_LO			Die Frequenz wird nicht überprüft		
N_0,25_LO	30	-3,50	5,438	-10	10
N_0,5_LO	30	-3,00	7,144	-10	15
N_0,75_LO	30	-4,50	6,067	-10	10
N_1_LO	30	-4,33	5,979	-10	5
N_1,5_LO	30	-3,00	7,944	-10	15
N_2_LO	30	-,17	7,484	-10	15
N_3_LO	30	-4,17	4,371	-10	5
N_4_LO	30	-3,17	5,167	-10	10
N_6_LO	30	-9,83	,913	-10	-5
N_8_LO	30	-2,83	5,676	-10	5
N_12_LO			Die Frequenz wird nicht überprüft.		

Erläuterung zur Tabelle: LO: Linkes Ohr, RO: Rechtes Ohr. V:Voruntersuchung, N:Nachuntersuchung

Tabelle 18 und **Tabelle 21** veranschaulichen, dass die Messpunkte der Audiometrie, die immer um fünf kHz ansteigen oder abfallen, bei der Audiometrie 40 dB nicht überschreiten und keine akustische Beeinträchtigung durch die Ultraschallexposition zeigen.

Tabelle 19: *Wilcoxon-Test der Knochenleitung für das rechte und das linke Ohr*

Rechte Ohr (RO) Frequenz in kHz	**N_0,25_ RO - V_0,25_ RO**	**N_0,5_ RO - V_0,5_ RO**	**N_0,75_ RO - V_0,75_ RO**	**N_1_ RO - V_1_ RO**	**N_1,5_ RO - V_1,5_ RO**	**N_2_ RO - V_2_ RO**	**N_3_ RO - V_3_ RO**	**N_4_ RO - V_4_ RO**	**N_6_ RO - V_6_ RO**	**N_8_ RO - V_8_ RO**
Z	-1,466a	-,724b	-,308a	-2,033a	-,232a	-,140b	-1,564a	-1,080a	-,162a	-,500a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,143	,469	,758	**,042**	,817	,888	,118	,280	,871	,617

Linke Ohr (LO) Frequenz in kHz	**N_0,25_ LO - V_0,25_ LO**	**N_0,5_ LO - V_0,5_ LO**	**N_0,75_ LO - V_0,75_ LO**	**N_1_ LO - V_1_ LO**	**N_1,5_ LO - V_1,5_ LO**	**N_2_ LO - V_2_ LO**	**N_3_ LO - V_3_ LO**	**N_4_ LO - V_4_ LO**	**N_6_LO - V_6_ LO**	**N_8_ LO - V_8_ LO**
Z	-,332a	-1,101b	-,784a	-,452a	-1,184a	-1,694a	-1,828a	-,954a	-2,154a	-1,467a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,271	,433	,651	,236	,090	,068	,340	**,031**	,142

Erläuterung zur Tabelle:
a. Basiert auf positiven Rängen. b. Basiert auf negativen Rängen

Tabelle 20: *Differenz der Audiometrie bei Vor- und Nachuntersuchung für die Luftleitung zwischen den einzelnen Frequenzen*

Statistik für das rechte Ohr (RO)

Frequenz in kHz / **Item**		**Diff_ 0,125 _RO**	**Diff_ 0,25_ RO**	**Diff_ 0,5_R O**	**Diff_ 0,75_R O**	**Diff _1_ RO**	**Diff_ 1,5_R O**	**Diff_ 2_R O**	**Diff_ 3_R O**	**Diff_ 4_R O**	**Diff _6_ RO**	**Diff_ 8_R O**	**Diff_ 12_R O**
N	Gültig	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Fehlend		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MW		1,00	2,17	2,83	4,83	5,67	1,00	,83	1,00	,83	2,00	,50	2,67
Median		,00	5,00	,00	5,00	5,00	,00	,00	,00	,00	2,50	,00	,00
SD		9,040	11,573	5,676	5,490	9,803	9,322	7,202	5,931	7,996	12,219	10,201	11,198
Minimum		-25	-30	-10	-5	-20	-30	-15	-10	-25	-30	-25	-25
Maximum		15	25	20	20	30	15	15	10	15	30	20	30
Perzentile	25	,00	-5,00	,00	,00	,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-1,25	-5,00
50		,00	5,00	,00	5,00	5,00	,00	,00	,00	,00	2,50	,00	,00
75		5,00	10,00	5,00	6,25	10,00	6,25	5,00	5,00	5,00	10,00	5,00	6,25

Statistik Für das linke Ohr (LO)

Frequenz in kHz / **Item**		**Diff _0,125_ LO**	**Diff_ 0,25_ LO**	**Diff_ 0,5_L O**	**Diff_ 0,75_ LO**	**Diff_ 1_LO**	**Diff_ 1,5_L O**	**Diff_ 2_LO**	**Diff_ 3_LO**	**Diff_ 4_LO**	**Diff_ 6_LO**	**Diff_ 8_L O**	**Diff _12 _LO**
N		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Fehlend		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MW		1,83	2,50	2,00	3,33	2,00	2,33	1,50	1,00	2,83	1,67	1,67	1,00
Median		2,50	5,00	,00	5,00	2,50	5,00	,00	,00	5,00	,00	,00	,00
SD		10,544	10,728	7,497	6,205	8,263	7,626	5,594	6,486	8,167	8,442	8,743	9,414
Minimum		-25	-35	-10	-10	-20	-15	-15	-10	-20	-15	-15	-15
Maximum		25	20	20	15	20	15	15	20	25	25	20	35
Perzentile		-5,00	-5,00	-1,25	-1,25	,00	-5,00	-1,25	,00	-5,00	-5,00	-1,25	-5,00
50		2,50	5,00	,00	5,00	2,50	5,00	,00	,00	5,00	,00	,00	,00
75		10,00	10,00	6,25	10,00	5,00	10,00	5,00	5,00	6,25	5,00	5,00	5,00
		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabelle 21: *Luftleitung in den einzelnen Frequenzen bei Vor- und Nachuntersuchung*

Deskriptive Statistik					
Frequenz in KHz	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum dB**	**Maximum dB**
V_0,125_RO	30	8,33	7,112	-5	20
V_0,25_RO	30	5,50	8,131	-10	25
V_0,5_RO	30	2,83	6,114	-5	25
V_0,75_RO	30	3,17	5,331	-10	15
V_1_RO	30	6,67	8,841	-10	30
V_1,5_RO	30	5,00	6,823	-10	20
V_2_RO	30	2,17	6,254	-5	20
V_3_RO	30	,33	4,901	-10	10
V_4_RO	30	2,67	7,279	-10	20
V_6_RO	30	10,00	6,017	-5	20
V_8_RO	30	4,00	7,589	-10	20
V_12_RO	30	13,17	9,781	-10	35
V_0,125_LO	30	12,17	9,710	-5	35
V_0,25_LO	30	8,17	8,952	-15	30
V_0,5_LO	30	4,50	8,237	-10	30
V_0,75_LO	30	5,00	5,571	-5	15
V_1_LO	30	1,17	5,522	-10	15
V_1,5_LO	30	5,50	8,341	-10	25
V_2_LO	30	4,00	7,701	-5	25
V_3_LO	30	1,83	7,598	-10	20
V_4_LO	30	3,50	7,785	-10	20
V_6_LO	30	4,83	8,039	-5	25
V_8_LO	30	2,67	8,066	-10	20
V_12_LO	30	6,00	8,847	-5	35
N_0,125_RO	30	8,00	8,367	-5	25
N_0,25_RO	30	3,33	7,466	-10	20
N_0,5_RO	30	1,00	7,120	-10	20
N_0,75_RO	30	,67	7,038	-10	20
N_1_RO	30	2,67	6,261	-10	25
N_1,5_RO	30	4,00	7,701	-5	35
N_2_RO	30	1,33	7,420	-10	20
N_3_RO	30	-,67	5,979	-10	15
N_4_RO	30	1,83	6,884	-10	20
N_6_RO	30	8,00	10,472	-10	35
N_8_RO	30	3,50	9,751	-10	40
N_12_RO	30	10,50	12,618	-5	40
N_0,125_LO	30	10,33	10,743	-10	30
N_0,25_LO	30	5,83	10,007	-5	30
N_0,5_LO	30	2,50	7,628	-10	20
N_0,75_LO	30	1,67	5,307	-5	15
N_1_LO	30	-,83	6,444	-10	10
N_1,5_LO	30	3,17	6,363	-10	15
N_2_LO	30	2,50	7,281	-5	20
N_3_LO	30	,83	7,666	-10	25
N_4_LO	30	,67	6,121	-10	15
N_6_LO	30	3,17	6,497	-10	15
N_8_LO	30	1,00	6,747	-10	15
N_12_LO	30	5,00	9,002	-10	35

Tabelle 22: *Wilcoxon-Test bei Vor- und Nachuntersuchung für das rechte und das linke Ohr und Luftleitung*

Rechtes Ohr (RO) Frequenz in kHz	**N_ 0,125_ RO - V_ 0,125_ RO**	**N_ 0,25_ RO - V_0,25 _RO**	**N_0,5 _RO - V_0,5 _RO**	**N_0,75_ RO - V_0,75_ RO**	**N_1_ RO - V_1_ RO**	**N_1,5 _RO - V_1,5 _RO**	**N_2_ RO - V_2_ RO**	**N_3_ RO - V_3_ RO**	**N_4 _ RO - V_4_ RO**	**N_ 6_RO - V_6_ RO**	**N_ 8_ RO - V_8_ RO**	**N_ 12_R O - V_ 12_ RO**
Z	-,371a	-1,160 a	-1,744 a	-2,201a	-1,989 a	-1,009 a	-,596a	-,868 a	-,904 a	-1,131 a	-,356 a	-1,162 a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,711	,246	,081	**,028**	**,047**	,313	,551	,385	,366	,258	,722	,245

Linkes Ohr (LO) Frequenz in kHz	**N_ 0,125_ LO - V_0,1 25_LO**	**N_ 0,25_LO - V_0,25 _LO**	**N_0,5 _LO - V_0,5 _LO**	**N_0,75_ LO - V_0,75_ LO**	**N_1_ LO - V_1_ LO**	**N_1,5 _LO - V_1,5 _LO**	**N_2_ LO - V_2_ LO**	**N_3_ LO - V_3_ LO**	**N_4 _LO - V_4_ LO**	**N_6_ LO - V_6_ LO**	**N_8 _LO - V_8_ LO**	**N_12 _LO - V_12 _LO**
Z	-,863a	-1,552 a	-1,395 a	-2,624a	-1,377 a	-1,552 a	-1,574a	-,643 a	-2,113a	-,969a	-,943 a	-,406 a
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,388	,121	,163	**,009**	,169	,121	,115	,520	**,035**	,332	,346	,685

Erläuterung zur Tabelle:
a. Basiert auf positiven Rängen.

6.6.3 Schalldruckpegelmessungen

Zu Fragestellung 4

4) Welche Schalldruckpegel und welche harmonischen und subharmonischen Schwingungen entstehen?

Der gemessene Schalldruckpegel schwankte während des Versuchs bis zu einem Wert von 121 dB(A) für die Betriebsfrequenz von 20 kHz (s. **Abb. 51**) und die verwendeten Beschallungsphasen von drei Minuten. Aus diesem Grund wurde der höchste Pegel, der aufgetreten ist, genommen und so behandelt als hätte er drei Minuten konstant gewirkt.

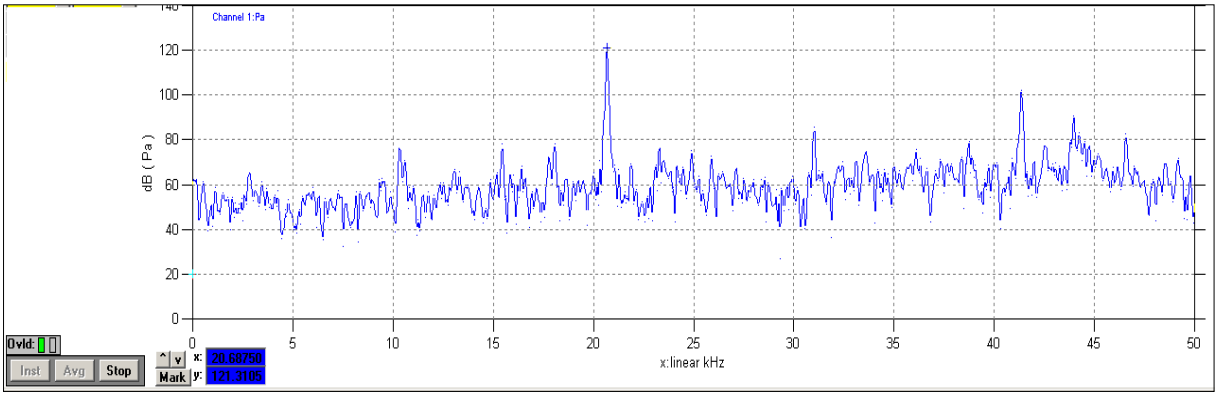
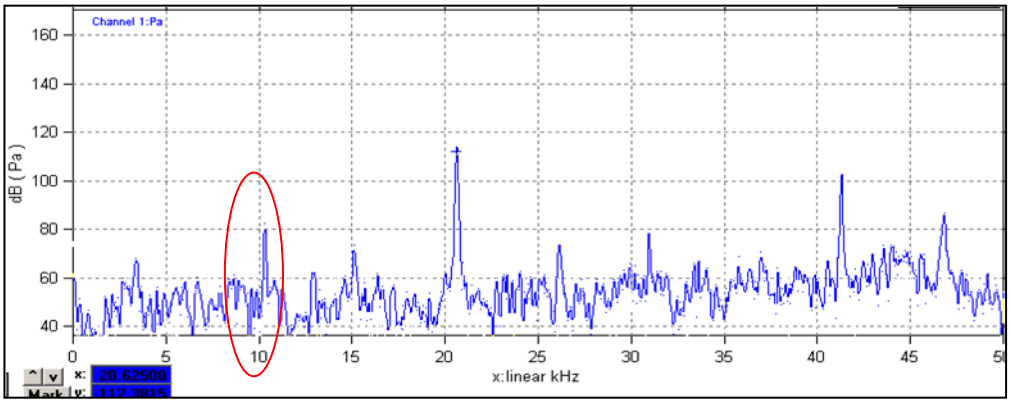


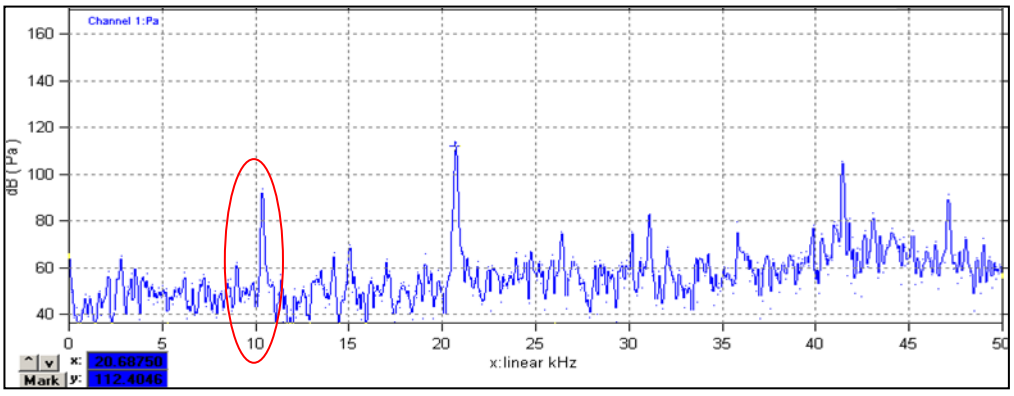
Abb. 51: *Gemessene Schalldruckpegel 121 dB (A) bei 20.68 kHz.*

Es ist ersichtlich, dass verschiedene subharmonische Frequenzen mit unterschiedlichen Schalldruckpegeln aufgetreten sind, z. B. ist die Frequenz von 10 kHz mit einem Schalldruckpegel von 80 dB (A) aber auch mit etwa 90 dB (A), aufgetreten (s. **Abb. 521**).

a)



b)



c)

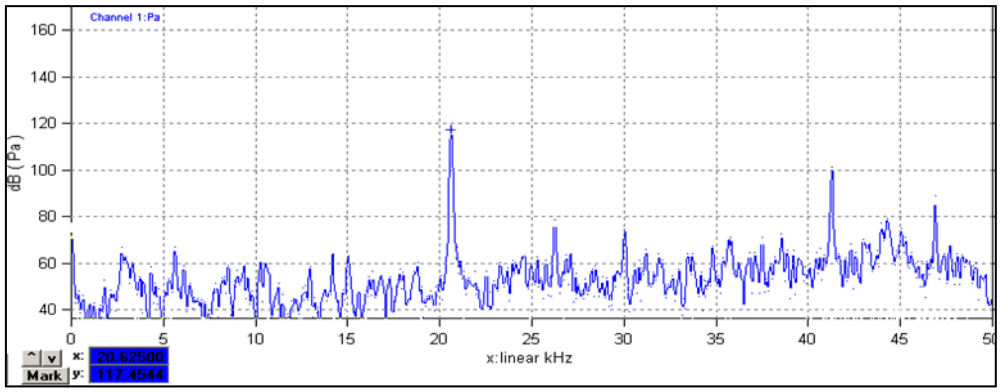


Abb. 52: *Unterschiedliche Schalldruckpegelmessungen .*

Wenn man aber den Dämmwert des verwendeten Gehörschutzes betrachtet, kommt man auf einen Gesamtdämmwert von 40 dB, der sich aus der Kombination des Kopfbügels und der Stöpsel ergibt. Das macht selbst bei dem höchsten gemessenen Schalldruckpegel (121 dB(A)) nach dem Abzug der Dämmwertdifferenz (40 dB) einen Schalldruckpegel von 81 dB. Selbst wenn man aus diesen zwei Versuchsabläufen von jeweils drei Minuten einen Mittelungspegel nach Gleichung 1 errechnen würde, ergibt sich ein Mittelungspegel nach Gleichung 1 von LAeq= 126 dB(A). Nach Abzug des Dämmwertes vom kombinierten Gehörschutz ergibt sich ein Wert von 86 dB (A).

$$LpAeq = 10lg\left[\frac{1}{T}\left(10^{0,1\,LpAi}.t_i + 10^{0,1LpAn}.t_n\right)\right]$$

Gleichung 1: Formel für die Berechnung eines Mittelungspegels

- T entspricht der Schichtzeit, in diesen Fall wurde sechs Minuten (2x 3 Minuten) US-Beschallung eingesetzt.
- LpAi bis LpAn entspricht der Anzahl von Schalldruckpegeln (in diesem Fall 121 dB(A))
- t_i bis t_n entspricht der Einwirkzeit der Schalldruckpegel

Nach dem Einsetzen der Werte in Gleichung 1

$$LpAeq = 10lg\left[\frac{1}{6}(10^{12,1}.3 + 10^{12,1}.3)\right]$$

$$LpAeq = 126\ dB(A)$$

Gleichung 1: Berechnung des Mittelungspegels für die Versuchsabläufe der US-Studie

Es wird deutlich, dass man keine der Grenz- oder Auslösewerte nach der Lärm und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung für die zulässige Expositionszeit von 8 Stunden erreicht. Die nach der Dämmwertdifferenz erreichten Werte für eine vergleichbare Tätigkeit in der Produktion oder Überwachung befinden sich im erlaubten Bereich. Somit wird eine weitere detaillierte Analyse der Schalldruckpegelmessungen für die Lärmbekämpfung bzw. für die Lärmbelastung nicht erforderlich.

6.6.4 Audiometrie

Es wurde eine Audiometrie (Knochen- und Luftleitung) als Teil der Voruntersuchung im Bereich Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät durchgeführt. Diese wurde auch nach Versuchende (Ultraschallexposition) wiederholt. Knochenleitung bei der Audiometrie wird als die Transmission des Tons durch den Schädel. Die Luftleitung findet durch die Transmission des Tons durch das Ohr statt.

Die Differenzen der Vor- und der Nachuntersuchung sind für einen exemplarischen Proband (s. **Abb. 53** und **Abb. 54**) für das linke und das rechte Ohr dargestellt.

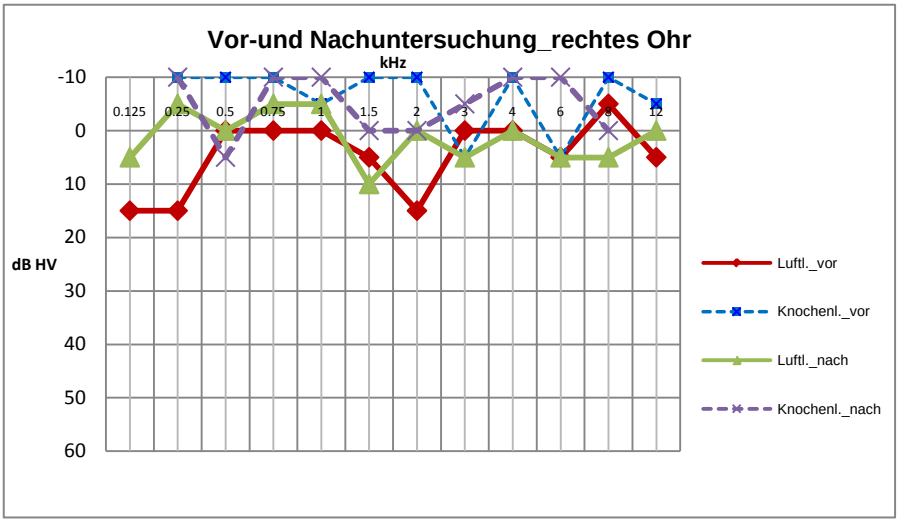


Abb. 53: *Audiogramm der Vor- und Nachuntersuchung für das rechte Ohr mit Bestimmung der Luft- und Knochenleitung*

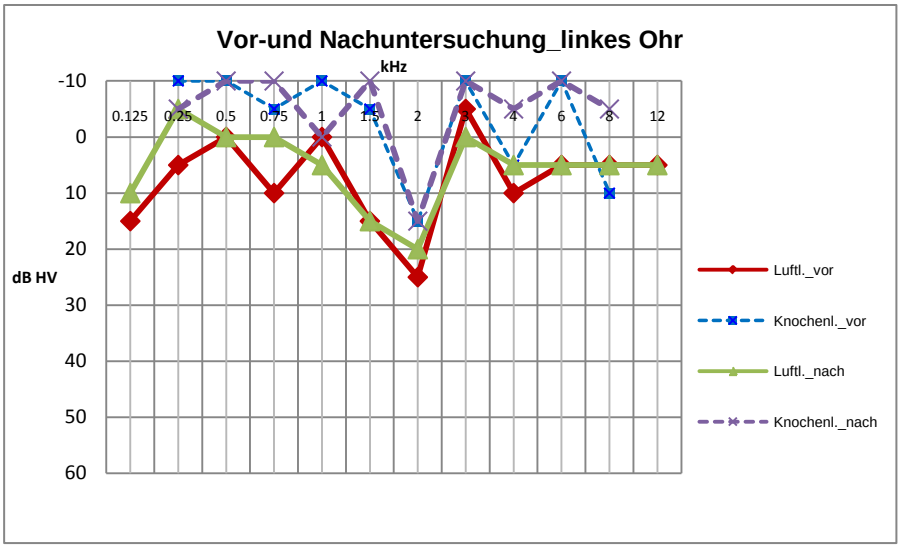


Abb. 54: *Audiogramm der Vor- und Nachuntersuchung für das linke Ohr (unten) mit Bestimmung der Luft- und Knochenleitung*

6.6.5 Fragebögen

Fragebogen zur privaten Lärmbelastung, Eigen und -Familienanamnese

Der Fragebogen zur Lärmbelastung wurde bei der Voruntersuchung von den Probanden ausgefüllt.

Mit dem unteren Diagramm (**Abb. 55**) wird veranschaulicht, dass 73% der Befragten in der Freizeit (also etwa 2x pro Monat) und 50%, beruflich, „fast nie“ und 26% moderat lärmbelastet sind.

Die Nutzung von Kopfhörer betreffend, haben 43% angegeben, sie jeden Tag zu benutzen und 30% einmal pro Woche. Bezüglich der Zeit für die Nutzung der Kopfhörer geben 34% an, sie ca. 1 Stunde täglich und 27% weniger als 1 Stunde täglich zu benutzen. Lediglich 6,9 % der Befragten gaben an, mehr als 1 Stunde täglich Kopfhörer zu benutzen.

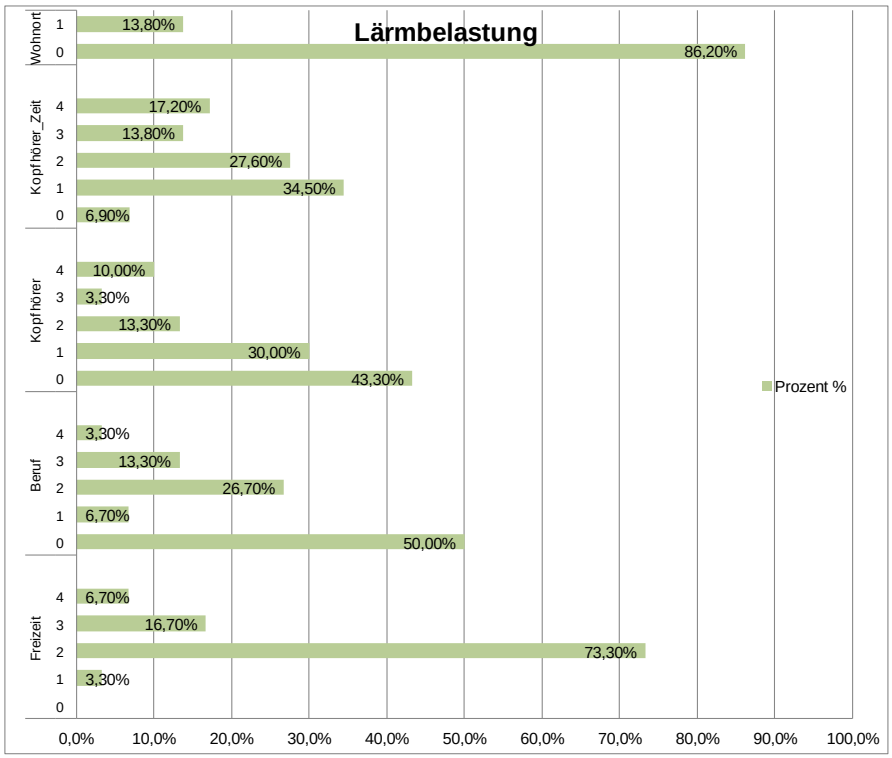


Abb. 55: *Fragebogen zur Lärmbelastung.*

Für die Lärmbelastungskategorie Freizeit, Beruf und Kopfhörer lautet die Skala:

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie
4	3	2	1	0

Für die Kategorie bezüglich der Nutzung von Kopfhörer :

Mehr als 1 Stunde täglich	Ca. 1 Stunde täglich	Weniger als 1 Stunde täglich	1 Stunde pro Woche	1 Stunde im Monat
0	1	2	3	4

Zu der Frage ob der Wohnort laut ist, wurde die „1“ für Ja und die „0“ für Nein angegeben.

Bei der Eigen- und Familienanamnese wurden Fragen zum Raucherstatus erfasst, um eventuelle ototoxische Wirkungen auszuschließen. 80% der Befragten gaben an Raucher zu sein, während jeweils 10 % nicht mehr und 10% nicht rauchten. Bei den Rauchenden ergab sich eine durchschnittliche Anzahl von fünf Zigaretten am Tag.

Bezüglich der familiären HNO-Erkrankungen gaben nur 13 % an über familiäre Gehörkrankheiten informiert zu sein, bei 17 % ist es unbekannt. Bei der Frage nach eigenen Gehörkrankheiten, gaben 96% an keine zu haben, bei dem Rest (4%) war es nicht bekannt.

Da geplant war, die Herzschlagfrequenz und den Blutdruck zu messen, wurden Fragen zu eventuellen Herzkreislauferkrankungen (HKE) im Fragebogen gestellt. Mehr als die Hälfte (67%) der Probanden gab an keine HKE in der Familie zu kennen, bei 27 % war es nicht bekannt. Nur 6% der Befragten gab an über familiäre Herzkreislauferkrankungen Bescheid zu wissen.

Es war ebenfalls von Interesse herauszufinden, ob eine psychische Belastung die Herzschlagfrequenz- und Blutdruckmessungen beeinflussen könnten. Auf die Frage, ob sie in den letzten 12 Monaten psychischen Belastungen ausgesetzt waren bzw. ob sie sich durch bedeutsame Lebensereignisse immer noch psychisch belastet fühlten, gaben 17% eine positive Antwort. 83% gaben an, nicht psychisch belastet zu sein.

Beschwerdefragebögen

Die Beschwerden, die in Verbindung mit einer Ultraschallexposition gebracht werden, wurden in dem Fragebögen zu aktuellen Beschwerden und in dem Fragebogen zu Beschwerden in den letzten 12 Monaten bei der Voruntersuchung abgefragt. Hiermit lassen sich Vorbelastungen in diesen Beschwerdekategorien ausschließen.

Zusammengefasst ließen sich aus den Ergebnissen der verwendeten Fragebögen keine Vorbelastungen feststellen, die die Herz-Kreislauf-Werte oder die audiometrischen und subjektiven Daten beeinflusst haben.

Zu Fragestellung 5

4) Ob und inwieweit treten vegetative und subjektive Störungen bei Betriebsfrequenzen von 20 - 25 kHz bei dieser US-basierten Gießanlage auf?

Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Angaben in den Beschwerdefragebögen vor dem ersten Versuchsablauf (VorV1, Direkt vor dem Versuch) und dem Versuch 1 (V1). In **Tabelle 23** und **Tabelle 24** werden die aktuellen Beschwerden beider Phasen miteinander verglichen.

Tabelle 23: *Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerde“ vor Versuch 1 und während Versuch 1.*

Deskriptive Statistiken					
Beschwerde	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum**	**Maximum**
aktuell_Kopfschmerzen_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Herzrhythmusstoerung_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Uebelkeit_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_TrockenenMund_VORV1	30	,13	,346	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_VORV1	30	,27	,740	0	3
aktuell_Muedigkeit_VORV1	30	,37	,490	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_VORV1	30	,60	,932	0	4
aktuell_Schwindelig_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_VORV1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Ohrendruck_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Hoergeraeusche_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V1	30	,10	,305	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V1	30	,23	,728	0	3
aktuell_Uebelkeit_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_FeuchteHaende_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_TrockenenMund_V1	30	,07	,254	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V1	30	,20	,664	0	3
aktuell_Muedigkeit_V1	30	,40	,498	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V1	30	,57	,935	0	4
aktuell_Schwindelig_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Ohrendruck_V1	30	,10	,305	0	1
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V1	30	,20	,610	0	2
aktuell_Gereiztheit_V1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Hoergeraeusche_V1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V1	30	,13	,507	0	2

Tabelle 24: *Ergebnisse des Wilcoxon-Tests während Versuch 1 und vor Versuch 1.*

Beschwerden	**Z**	**Asymptotische Signifikanz (2-seitig)**
aktuell_Kopfschmerzen_V1 – aktuell_Kopfschmerzen_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V1 – aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V1 – aktuell_Herzrhythmusstoerung_VORV1	-1,732a	,083
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V1 – aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_VORV1	-1,633a	,102
aktuell_Uebelkeit_V1 – aktuell_Uebelkeit_VORV1	,000b	1,000
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V1 – aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_VORV1	-,447a	,655
aktuell_FeuchteHaende_V1 – aktuell_FeuchteHaende_VORV1	,000b	1,000
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V1 – aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_VORV1	,000b	1,000
aktuell_TrockenenMund_V1 – aktuell_TrockenenMund_VORV1	-1,414c	,157
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V1 – aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_VORV1	-,743c	,458
aktuell_Muedigkeit_V1 – aktuell_Muedigkeit_VORV1	-,447a	,655
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V1 – aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_VORV1	-,276c	,783
aktuell_Schwindelig_V1 – aktuell_Schwindelig_VORV1	-1,000c	,317
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V1 – aktuell_Schwindelig_Intensitaet_VORV1	,000b	1,000
aktuell_Brechreiz_V1 – aktuell_Brechreiz_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V1 – aktuell_Brechreiz_Intensitaet_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Ohrendruck_V1 – aktuell_Ohrendruck_VORV1	-1,732a	,083
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V1 – aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_VORV1	-1,732a	,083
aktuell_Gereiztheit_V1 – aktuell_Gereiztheit_VORV1	,000b	1,000
aktuell_Hoergeraeusche_V1 – aktuell_Hoergeraeusche_VORV1	,000b	1,000
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V1 – aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_VORV1	-,743a	,458
Erläuterung zur Tabelle: a. Basiert auf negativen Rängen. b. Die Summe der negativen Ränge ist gleich der Summe der positiven Ränge. c. Basiert auf positiven Rängen. d. Wilcoxon-Test		

Bei dem Vergleich zwischen dem ersten (V1) und dem zweiten Versuchsablauf (V2) bestehen auch hier keine signifikanten Unterschiede bei den Angaben bezüglich der subjektiven Beschwerden (s. **Tabelle 25** und **Tabelle 26**).

Tabelle 25: *Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerden“ während Versuch 1 und Versuch 2.*

Deskriptive Statistiken					
Beschwerde	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum**	**Maximum**
aktuell_Kopfschmerzen_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V1	30	,10	,305	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V1	30	,23	,728	0	3
aktuell_Uebelkeit_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_FeuchteHaende_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_TrockenenMund_V1	30	,07	,254	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V1	30	,20	,664	0	3
aktuell_Muedigkeit_V1	30	,40	,498	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V1	30	,57	,935	0	4
aktuell_Schwindelig_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Ohrendruck_V1	30	,10	,305	0	1
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V1	30	,20	,610	0	2
aktuell_Gereiztheit_V1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Hoergeraeusche_V1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V1	30	,13	,507	0	2
aktuell_Kopfschmerzen_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V2	30	,13	,507	0	2
aktuell_Uebelkeit_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V2	30	,10	,403	0	2
aktuell_FeuchteHaende_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V2	30	,13	,507	0	2
aktuell_TrockenenMund_V2	30	,13	,346	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V2	30	,27	,740	0	3
aktuell_Muedigkeit_V2	30	,33	,479	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V2	30	,53	,937	0	4
aktuell_Schwindelig_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V2	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V2	30	,07	,365	0	2
aktuell_Ohrendruck_V2	30	,17	,379	0	1
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V2	30	,33	,802	0	3
aktuell_Gereiztheit_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1

Tabelle 26: *Ergebnisse des Wilcoxon-Tests während Versuch 2 und Versuch 1.*

Beschwerden	**Z**	**Asymptotische Signifikanz (2-seitig)**
aktuell_Kopfschmerzen_V2 - aktuell_Kopfschmerzen_V1	,000a	1,000
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V2 - aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V1	-,447b	,655
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V2 - aktuell_Herzrhythmusstoerung_V1	-1,000b	,317
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V2 - aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V1	-1,000b	,317
aktuell_Uebelkeit_V2 - aktuell_Uebelkeit_V1	-1,000c	,317
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V2 - aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V1	-1,000c	,317
aktuell_FeuchteHaende_V2 - aktuell_FeuchteHaende_V1	-,577c	,564
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V2 - aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V1	-1,089c	,276
aktuell_TrockenenMund_V2 – aktuell_TrockenenMund_V1	-1,414c	,157
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V2 – aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V1	-,816c	,414
aktuell_Muedigkeit_V2 – aktuell_Muedigkeit_V1	-1,000b	,317
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V2 – aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V1	-,447b	,655
aktuell_Schwindelig_V2 – aktuell_Schwindelig_V1	,000a	1,000
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V2 – aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V1	,000a	1,000
aktuell_Brechreiz_V2 – aktuell_Brechreiz_V1	,000a	1,000
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V2 – aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V1	-,447c	,655
aktuell_Ohrendruck_V2 – aktuell_Ohrendruck_V1	-1,414c	,157
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V2 – aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V1	-1,300c	,194
aktuell_Gereiztheit_V2 – aktuell_Gereiztheit_V1	-1,000c	,317
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V2 – aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V1	-1,000c	,317
aktuell_Hoergeraeusche_V2 – aktuell_Hoergeraeusche_V1	-1,000b	,317
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V2 – aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V1	-1,342b	,180

Erläuterung zur Tabelle:

a. Die Summe der negativen Ränge ist gleich der Summe der positiven Ränge.

b. Basiert auf positiven Rängen.

c. Basiert auf negativen Rängen.

d. Wilcoxon-Test

Es besteht ein signifikanter Unterschied (p=,025) bei dem angegebenen aktuellen Ohrendruck zwischen dem Versuch 2 (V2) und den Angaben, die vor dem Versuch 1 (VorV1) gemacht wurden. Es besteht auch ein signifikanter Unterschied (p=,039) bei der

Intensität des aktuellen Ohrendruckes nach dem Wilcoxon-Test zwischen dem Versuch 2 (V2) und dem Versuch 1 (VorV1) (s. **Tabelle 27** und **Tabelle 28**).

***Tabelle* 27:** *Ergebnisse des Fragebogens „Aktuelle Beschwerden" vor Versuch 1 und während Versuch 2.*

Deskriptive Statistiken					
Beschwerde	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum**	**Maximum**
aktuell_Kopfschmerzen_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Herzrhythmusstoerung_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Uebelkeit_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_VORV1	30	,03	,183	0	1
aktuell_TrockenenMund_VORV1	30	,13	,346	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_VORV1	30	,27	,740	0	3
aktuell_Muedigkeit_VORV1	30	,37	,490	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_VORV1	30	,60	,932	0	4
aktuell_Schwindelig_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_VORV1	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Ohrendruck_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_VORV1	30	,00	,000	0	0
aktuell_Hoergeraeusche_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_VORV1	30	,07	,254	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V2	30	,13	,507	0	2
aktuell_Uebelkeit_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V2	30	,10	,403	0	2
aktuell_FeuchteHaende_V2	30	,07	,254	0	1
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V2	30	,13	,507	0	2
aktuell_TrockenenMund_V2	30	,13	,346	0	1
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V2	30	,27	,740	0	3
aktuell_Muedigkeit_V2	30	,33	,479	0	1
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V2	30	,53	,937	0	4
aktuell_Schwindelig_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V2	30	,07	,365	0	2
aktuell_Brechreiz_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V2	30	,07	,365	0	2
aktuell_Ohrendruck_V2	30	,17	,379	0	1
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V2	30	,33	,802	0	3
aktuell_Gereiztheit_V2	30	,03	,183	0	1

Fortsetzung der Tabelle 27					
Beschwerde	**N**	**MW**	**SD**	**Minimum**	**Maximum**
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_V2	30	,03	,183	0	1
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V2	30	,03	,183	0	1

***Tabelle* 28:** *Ergebnisse des Wilcoxon- Tests während Versuch 2 und vor Versuch 1.*

Beschwerden	**Z**	**Asymptotische Signifikanz (2-seitig)**
aktuell_Kopfschmerzen_V2 - aktuell_Kopfschmerzen_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_V2 - aktuell_Kopfschmerzen_Intensitaet_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Herzrhythmusstoerung_V2 - aktuell_Herzrhythmusstoerung_VORV1	-1,414a	,157
aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_V2 - aktuell_Herzrhythmusstoerung_Haeufigkeit_VORV1	-1,414a	,157
aktuell_Uebelkeit_V2 - aktuell_Uebelkeit_VORV1	-,577a	,564
aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_V2 - aktuell_Uebelkeit_Intensitaet_VORV1	-,816a	,414
aktuell_FeuchteHaende_V2 - aktuell_FeuchteHaende_VORV1	-,577a	,564
aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_V2 - aktuell_FeuchteHaende_Intensitaet_VORV1	-1,089a	,276
aktuell_TrockenenMund_V2 - aktuell_TrockenenMund_VORV1	,000b	1,000
aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_V2 - aktuell_TrockenenMund_Intensitaet_VORV1	-,138c	,890
aktuell_Muedigkeit_V2 - aktuell_Muedigkeit_VORV1	-,378c	,705
aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_V2 - aktuell_Muedigkeit_Intensitaet_VORV1	-,513c	,608
aktuell_Schwindelig_V2 - aktuell_Schwindelig_VORV1	-1,000c	,317
aktuell_Schwindelig_Intensitaet_V2 - aktuell_Schwindelig_Intensitaet_VORV1	,000b	1,000
aktuell_Brechreiz_V2 - aktuell_Brechreiz_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Brechreiz_Intensitaet_V2 - aktuell_Brechreiz_Intensitaet_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Ohrendruck_V2 - aktuell_Ohrendruck_VORV1	-2,236a	,025
aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_V2 - aktuell_Ohrendrueck_Intensitaet_VORV1	-2,060a	,039
aktuell_Gereiztheit_V2 - aktuell_Gereiztheit_VORV1	-1,000a	,317
aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_V2 -	-1,000a	,317

aktuell_Gereiztheit_Intensitaet_VORV1		
Fortsetzung der Tabelle 28		
Beschwerden	**Z**	**Asymptotische Signifikanz (2-seitig)**
aktuell_Hoergeraeusche_V2 - aktuell_Hoergeraeusche_VORV1	-,577c	,564
aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_V2 - aktuell_Hoergeraeusche_Intensitaet_VORV1	-,577c	,564
Erläuterung zur Tabelle: a. Basiert auf negativen Rängen. b. Die Summe der negativen Ränge ist gleich der Summe der positiven Ränge. c. Basiert auf positiven Rängen. d. Wilcoxon-Test		

Zu Fragestellung 6

5) Sind die verwendeten bzw. herkömmlichen Arbeitsschutzmittel für diesen Lärmbereich ausreichend?

Aus den gewonnenen Ergebnissen lassen sich bei den untersuchten Parametern keine signifikanten Veränderungen bei den vegetativen Reaktionen nachweisen. Die Ergebnisse aus den subjektiven Beschwerdefragebögen sprechen für eine beanspruchungsfreie Arbeit. Es lassen sich insgesamt keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei den VP nachweisen.

Der Einsatz des verwendeten Gehörschutzes, Ohrstöpsel und Gehörschutzbügel, erwies sich als wirkungsvoll. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Schutz der Arbeitnehmer für ein solches Verfahren unter diesen Arbeitsbedingungen mit herkömmlichen Gehörschutzmitteln gewährleistet werden kann. Als Arbeitsbedingungen verstehen sich hier die in der Untersuchung verwendeten Legierungs-Behandlungszeiten von drei Minute, die im Methodik-Kapitel erläutert wurden. Sollte die Expositionszeit steigen oder sich das Design der Ultraschallanlage ändern (z. B. indem größere Gefäße und somit auch andere, mehr oder größere Sonotroden zum Einsatz kommen), empfiehlt es sich, eine erneute Untersuchung durchzuführen, die mindestens den Lärmpegel erfasst. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind nicht für die Übertragung und Generalisierung auf andere Verfahren dieser Art geeignet.

7. Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurden die Auswirkungen zwei innovativer Technologien auf den Menschen experimentell untersucht.

Die erste Anwendung befasst sich mit der möglichen Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung, die beim Tragen von kopfgetragenen Displays dieser Bauart entstehen kann. Diese Displays werden für die Darstellung bestimmter Information als Unterstützung z. B. im Werk getragen und benutzen als Teil der Schnittstelle eine rechnergestützte teilmodellierte Umgebung, die Augmented Reality (AR, Erweiterte Realität) genannt wird.

Die ophthalmologische Beanspruchungsanalyse beim Tragen von zwei unterschiedlichen Head- Mounted- Displays, zeigt nach der Aufteilung des Gesichtsfeldes in vier Quadranten und beim Einsatz des LitEye-Geräts Gesichtsfeldeinschränkungen im rechten oberen und rechten unteren Quadranten. Diese Einschränkung kann durch den technisch-bedingten Aufbau entstehen. Das Display wird von dem Stirn-Kopfhalter des Gerätes zum rechten Augen seitlich positioniert. Somit entsteht eine Beeinträchtigung im Gesichtsfeld des Trägers.

Beim Nomad-Gerät zeigten sich visuelle Defizite des Gesichtsfelds im rechten oberen und linken oberen Quadranten. Die Unterschiede erwiesen sich im Vergleich zur Gesichtsfeldprüfung ohne HMD als statistisch höchst signifikant ($p<0,001$). Hier kann die Gesichtsfeldeinschränkung auch dem technischen Aufbau zugeteilt werden. Der Aufbau des Displayhalters, der sich auf der Stirn befindet, wirkt wie eine Kopfbedeckung, die den Blick ohne Kopfbewegung behindert und verdeckt.

Bei dem LitEye-Gerät wurden eine signifikante Einschränkung des Gesichtsfeldes und eine tendenzielle Einschränkung des Blickwinkels im rechten Auge im Vergleich zum linken festgestellt. Der linke Blickwinkel der Probanden wurde nicht eingeschränkt.

Bei der Trackingabweichung als Aufgabe bei der Durchführung des Tests wurden keine Unterschiede bei alle drei Untersuchungsbedingungen gefunden.

Bei dem Gerät LitEye sind die Anzahl der richtigen Treffer und die Reaktionen auf den Reiz in Form einer Lichtschranke bei der rechten Seite reduziert.

Die Anzahl falscher Reaktionen (Betätigen des Fußpedals ohne Darbietung eines Reizes) ist bei LitEye tendenziell größer. Ebenfalls ist bei LitEye die Anzahl der ausgelassenen Reaktionen (keine Reaktion auf dargebotenen Reiz) höher. Die Medianwerte der

Reaktionszeiten auf Reize des rechten bzw. des linken Auges bzw. die Gesamtreaktionszeiten sind bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar.

Die afferente dynamische Sehleistung (Dynamischer Sehtest) wird durch das Tragen von HMD nicht beeinflusst und ist bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar. Hierfür kann der Grund sein, dass das nicht durch das Display verdeckten Auge (das linke Auge) die Leistung des verdeckten Auges bei der Bearbeitung der Bildschirmaufgabe kompensiert. In diesem Test befindet sich der Aufmerksamkeitsfokus auf der Mitte des Bildschirms, der problemlos mit dem linken Auge betrachtet werden kann.

Die Ergebnisse des Neglect-Tests wurden in Quadranten aufgeteilt und weisen keine Unterschiede auf.

Bei den Ergebnissen des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Untersuchungsbedingungen gefunden.

Auch in diesem Fall könnte die korrekte Wahrnehmung der Reize durch das nicht verdeckte Auge kompensiert worden sein. Das Nomad-Gerät verursacht keine frontale Verdeckung.

Die gewonnenen Daten aus den HRV Messungen zeigen keine Unterschiede bei den Beanspruchungsparametern zwischen den drei Untersuchungsbedingungen und den zwei verwendeten Head-Mounted-Displays. Andere Beanspruchungsstudien wie Roggentin (2009) und Fritzsche (2006) zeigten auch keine zusätzliche Beeinträchtigung bezüglich der kardiophysiologischen Beanspruchung, wobei diese anders aufgebaut waren und sich mit Kommissionierungstätigkeiten (HMD vs. Papierliste) befassten. In der vorliegenden Arbeit befanden sich die Probanden nicht in Bewegung in einer Halle, sondern saßen während der Versuchsdurchführung und wechselten nur zwischen den Computern für die jeweiligen Tests.

Zusammengefasst kann man sagen, dass der Grad der Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung beim Tragen des LitEye Modells grösser ist als bei dem anderen HMD-Model Nomad. Daher eignet sich der Einsatz solcher Geräte nicht während des Fahrens (z. B. Auto, Gabelstapler), da Warnsignale oder andere Verkehrsteilnehmer übersehen werden können. Somit ist die Sicherheit des HMD-Trägers und die der anderen Verkehrsteilnehmer oder Werker gefährdet, da diese verminderte Wahrnehmungsleistung (in diesem Zustand) nicht auf andere Weise oder durch andere Technik kompensiert werden kann. Die tatsächliche Beeinträchtigung müsste jedoch mit experimentellen Versuchen anhand eines Fahrsimulators und dementsprechenden Aufgaben bzw. Hindernissen oder anderen Objekten auf der Fahrspur überprüft werden.

Weiterhin muss erwähnt werden, dass bei beiden HMD-Geräten bzgl. der Größe und des Gewichts noch Optimierungsbedarf besteht. Hier entsteht ein Konflikt zwischen dem benötigten Platz für die Technik und der Gewichtsgrenze, dessen Überschreitung das Gleichgewicht des Gerätes beeinträchtigt und zu unausgeglichener Belastung des Kopfes führt. Problematisch ist außerdem die Vereinbarkeit des gleichzeitigen Tragens einer Brille und eines HMD. Bezüglich Handhabung und Design sollten diese im Idealfall kabellos sein. Bzgl. des Grades der Gesichtsfeldverdeckung und der Fixierung am Kopf, kann der Einsatz von HMD in diesem aktuellen Zustand nur bedingt empfohlen werden.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die potenziellen Wirkungen der Ultraschallexposition bei der Behandlung bzw. Vergütung von Metalllegierungen in der Gießerei untersucht.

Die Literatur zur auralen Ultraschallexposition zeigt, dass die Möglichkeit des Auftretens extraauraler Wirkungen bei der Anwendung innovativer Technologien besteht. Dies könnte beim Einsatz in der industriellen Fertigung zu einer Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes und des Wohlbefindens des Arbeitnehmers führen. Im Sinne der Humanzentrierung sind neue Technologien auf beschwerdefreies Arbeiten des Anwenders in Studien zu kontrollieren.

Ultraschall als Lärm könnte den Menschen belasten und dabei auf das Herz-Kreislauf-System bzw. die Herzfrequenz und den Blutdruck wirken. Der Körper könnte in einen Stresszustand versetzt werden, auf den der menschliche Organismus reagiert, um die Balance zwischen Belastung und Beanspruchung im Sinne des Belastungs-Beanspruchungskonzeptes wiederherzustellen.

Wie man den Fragestellungen und Hypothesen in Kapitel 4.2 entnehmen kann, war das Ziel der Untersuchung die weitere Erforschung der Auswirkungen des Ultraschalls auf das Gehör und auf das Herz-Kreislaufsystem. Hierzu war ursprünglich geplant, die Versuche ohne Gehörschutz durchzuführen, was jedoch von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät abgelehnt wurde.

Nach Vorstellung des Vorhabens und Gespräch mit der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät wurde beschlossen, dass aufgrund des hohen Lärmpegels bei der Ultraschallbehandlung der Legierungen, der Einsatz eines dementsprechenden Gehörschutzes notwendig sei, um eine gesundheitliche Beeinträchtigung der Probanden zu vermeiden. Nach diesem Beschluss wurde klar, dass die Untersuchungsziele nicht mehr in der ursprünglichen Form verfolgt werden konnten, da die Ultraschallwirkung durch die Verwendung von Gehörschutz gelindert werden könnte.

Zusammengefasst lassen sich durch die gewonnenen Ergebnisse zur Erfassung der vegetativen Reaktionen keine signifikanten Veränderungen bei den untersuchten Parametern nachweisen. Die Ergebnisse aus den subjektiven Beschwerdefragebögen sprechen für eine beanspruchungsfreie Arbeit. Es lassen sich insgesamt keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei den VP nachweisen.

Der Einsatz des verwendeten Gehörschutzes erwies sich als wirkungsvoll. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Schutz der Arbeitnehmer für ein solches Verfahren unter diesen Arbeitsbedingungen mit herkömmlichen Gehörschutzmitteln gewährleistet werden kann.

Es ist zu erwähnen, dass sich auf Grund der Änderung des ursprünglichen Studiendesigns durch den Beschluss der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät die positive Wirkung der verwendeten Gehörschützer herausgestellt hat. Es wurde gezeigt, dass man sich, zumindest in diesem Rahmen, mit herkömmlichem Gehörschutz schützen kann und das Auftreten von ungewünschten extraauralen Wirkungen durch die Ultraschallexposition vermeiden kann. Aussagekräftige Daten bezüglich der Wirkung des Ultraschalls wären eventuell ohne Gehörschutz deutlicher gewesen.

Bevor der Einsatz des Ultraschalls im Unternehmen stattfindet, ist die Durchführung einer experimentellen Versuchsreihe mit einer größeren, an die Produktionsbedürfnisse und Produktionsbedingungen (z. B. benötigte m^3 Schmelze, Expositionszeit, benachbarte Prozesse) angepassten Anlage empfehlenswert, da eventuell das benötigte Schmelzen-Volumen und Beschallungsverfahren (von oben, von unten, Beschallung im Lauf etc.) den Lautstärkepegel und somit die zu gewährleistenden Sicherheitsbedingungen ändern können.

Des Weiteren ist es sinnvoll, Schallleistungspegelangaben der Anlage zu bestimmen und über diese zu verfügen, bevor die Technik in Unternehmen zum Einsatz kommt. Solche Angaben sind für weitere Lärmberechnungen, Simulationen bzw. Vorkalkulationen hilfreich und gehören zu den technischen Daten, die über Anlagen im Regelfall vorliegen sollten.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Belastungspotenzial zweier innovativen Technologien untersucht. Die erste Studie befasst sich mit der Beanspruchung vom visuellen System, die beim Tragen von zwei unterschiedlichen Head-Mounted-Displays entsteht. Die wichtigsten Ergebnisse der Beanspruchungsanalyse sind:

Gesichtsfeld

Es bestehen Gesichtsfeldeinschränkungen beim Einsatz des LitEye-Geräts im rechten oberen und rechten unteren Quadranten. Beim Nomad-Gerät zeigten sich visuelle Defizite des Gesichtsfelds im rechten oberen und linken oberen Quadranten. Die Unterschiede erwiesen sich im Vergleich zur Gesichtsfeldprüfung ohne HMD als statistisch höchst signifikant. Außerdem wurde eine signifikante Einschränkung des Blickwinkels im rechten Auge im Vergleich zum linken bei dem LitEye-Gerät festgestellt. Das linke Auge wurde nicht eingeschränkt.

Reaktionen

Die Trackingabweichung erwies keine Unterschiede bei allen drei Untersuchungsbedingungen.

Die Anzahl der richtigen Treffer und Reaktionen auf den Reiz in Form einer Lichtschranke sind bei dem Gerät LitEye bei der rechten Seite reduziert. Die Anzahl falscher Reaktionen (Betätigen des Fußpedals ohne Darbietung eines Reizes) ist bei LitEye tendenziell größer. Ebenfalls höher ist bei LitEye die Anzahl der ausgelassenen Reaktionen (keine Reaktion auf dargebotenen Reiz). Die Medianwerte der Reaktionszeiten auf linke bzw. rechte Reize bzw. Gesamtreaktionszeiten sind bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar.

Afferente dynamische Sehleistung, Neglect-Test und Aufmerksamkeitsverschiebung

Die afferente dynamische Sehleistung (Dynamischer Sehtest) wird durch das Tragen von HMD nicht beeinflusst und ist bei allen drei Untersuchungsbedingungen vergleichbar. Die Ergebnisse des Neglect-Tests wurden in Quadranten aufgeteilt und weisen keine Unterschiede auf. Bei den Ergebnissen des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass der Grad der Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung beim Tragen des LitEye Modells größer ist als bei dem anderen HMD-Model

Nomad. Die Ergebnisse zeigen, dass bei beiden HMD-Geräten noch Optimierungsbedarf bezüglich der Größe und des Aufbaus besteht.

Die zweite behandelte Technologie verwendet Ultraschall für die Schmelzevergütung in der Gießerei. Bei dieser Ultraschallanwendung besteht eine Lärmbelastung für die Beschäftigten, die weiter untersucht werden musste. Die wichtigsten Ergebnisse der Belastungs-Beanspruchungsanalyse sind:

Audiometrie

Bezüglich der Audiometrie gab es bis auf die Frequenzen 1 kHz für das rechte Ohr und für 6 kHz für das linke Ohr für die Knochenleitung nach dem Wilcoxon Test keinen signifikanten Unterschied.

Bei der Luftleitung ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der Vor- und der Nachuntersuchung bei der Frequenz 0,75 kHz und 1kHz beim rechten Ohr. Für das linke Ohr, ergaben sich zwischen der Vor- und der Nachuntersuchung ebenfalls signifikante Unterschiede bei der Frequenz 0,75 kHz und bei 4 kHz.

Alle anderen Werte der Audiogramme zeigen keine signifikanten Unterschiede und keine Anzeichnen einer eventuellen Gehörbeeinträchtigung oder Hörschwellenverschiebungen, die mit den Beschwerdefragebögen und der Ultraschallexposition in Verbindung gebracht werden können.

Kardiophysiologische Daten

Die Werte der Herzschlagfrequenzerfassung aus den verschiedenen Untersuchungsphasen zeigen keine signifikanten Unterschiede. Es lassen sich hier keine vegetativen Auswirkungen nachweisen bei der Verwendung der kopfgetragene AR-Anzeigen und befinden sich außerdem unter der Dauerleistungsgrenze (DLG) (110 p/min) für dynamische Arbeit.

Die gewonnen Daten aus den Blutdruckmessungen entsprechen den normalen Werten und zeigen auch hier keinen signifikanten Unterschied.

Beschwerden

Es lässt sich eine Vorbelastung bezüglich der Beschwerden, die in Verbindung mit einer Ultraschallexposition gebracht werden, ausschließen.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede bei den Beschwerden zwischen den einzelnen Belastungsphasen, den Ruhe- und Erholungsphasen.

Es besteht ein signifikanter Unterschied bei dem angegebenen aktuellen Ohrendruck nach Versuch 2 (V2) und den Angaben vor dem Versuch 1 (VorV1). Es besteht ebenfalls ein signifikanter Unterschied bei den Angaben bzgl. der Intensität des aktuellen Ohrendruckes nach dem Wilcoxon-Test nach Versuch 2 (V2) und denen vor Versuch 1 (VorV1).

Zusammengefasst lassen sich auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse zur Erfassung der vegetativen Reaktionen keine signifikanten Veränderungen bei den untersuchten Parametern nachweisen. Die Ergebnisse aus den subjektiven Beschwerdefragebögen sprechen für eine beanspruchungsfreie Arbeit. Es lassen sich insgesamt keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei den VP nachweisen.

Der Einsatz des verwendeten Gehörschutzes erwies sich als wirkungsvoll. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Schutz der Arbeitnehmer für ein solches Verfahren unter diesen Arbeitsbedingungen mit herkömmlichen Gehörschutzmitteln gewährleistet ist.

Literaturverzeichnis

1. Acton, W.I., Carson, M.B. (1967). Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Ultrasonic Sources, Brit. J. Industr. Med. vol. 24, p. 297-304. Abgerufen von http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1008624 am 27.01.2009.

2. Acton, W.I. (1968). A Criterion for the Prediction of Auditory and Subjective Effects due to Airborne Noise from Ultrasonic Sources.Ann. Occup. Hyg., vol. 11,pp. 227-234. In: Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic Frequency. Abgerufen von www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01343.pdf. am 10.02.2009.

3. Acton, W.I. (1983). *Exposure to industrial ultrasound*: hazards, appraisal and Control, *J. Soc. Occup. Med. University of Southampton.* Abgerufen von http://occmed.oxfordjournals.org/cgi/reprint/33/3/107 am 27.01.2009.

4. Aero News Network. (2011). USAF Air Crews To Get Color Helmet Mounted Displays-Places Color Symbology In Helmet Display And Tracking Systems. Abgerufen von http://www.aero-news.net/index.cfm?do=main.textpost&id=f93e3a14-f3b6-4c6e-add6-e028415b3dab am 11.01.2012.

5. Authenrieth, Ch. (2004). Wearable Computers. Vortragsfolien zum Seminar Mobilkommunikation von Georg Carle an der Universität Tübingen. Abgerufen am 11.01.2012 von http://www.pdfdownload.org/pdf2html/view_online.php?url=http%3A%2F%2Fwww7.informatik.uni-erlangen.de%2F~dressler%2Flectures%2Fseminar-mobilkommunikation-ws0304%2Fslides-autenrieth.pdf am 11.01.2012.

6. Alt, T. (2003). Augmente Reality in der Produktion. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

7. Azuma, R. (1997). A Survey of Augmented Reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6*, 4 (August 1997), 355-385.

8. Bargel, T., Ramm, M., Multrus, F., Bargel, H. (2009). Bachelor Studierende. Erfahrungen in Studium und Lehre. Eine Zwischenbilanz. BMBF, Bonn. Abgerufen von http://www.hrk.de/bologna/de/download/dateien/bachelor_zwischenbilanz_2010.pdf am 21.07.2011

9. Bernotat, R. (1978). Ergonomische Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen. Rheinisch- Westfälische Akademie der Wissenschaften. Opladen: Westdeutscher Verlag.

10. Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege- BGW (2007). BGW-Stresskonzept- Das arbeitspsychologische Stressmodel. Eggers: Heiligenhafen. S.8.

11. BGI/ GUV-I 504-20.(2007). Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 20 "Lärm". Abgerufen von http://www.bgbau.de/d/ergonomie/fachinfos/laerm/pdf-files/bgi_504.pdf am 13.01.2012.

12. BGR/GUV-R 194. (2008). Regel- Benutzung von Gehörschutz. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). München: Carl Heymanns.

13. Blutdruckmessgerät der Fa. SpaceLabs, Model 90207. Abgerufen von http://www.spacelabshealthcare.com/en/Products_Services/Diagnostic_Cardiology.htm?prod=68 am 18.01.2012.

14. Bullinger, H.-J. (1994). Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. B.G. Stuttgart: Teubner. S.29-75.

15. BMBF (2011). *Der Bologna-Prozess*. Abgerufen von http://www.bmbf.de/de/3336.php am 20.08.2011.

16. Böckelmann, I. (2006). Arbeitsmedizinische Fragen zur Neurotoxikologie beruflicher Blei- und Lösemittelexposition. Habilitation. Med. Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

17. Böckelmann, I., Schega, L., Hamacher, D., Sánchez Márquez, J. S., Chegrynets, O., Darius, S. (2011). *AVILUS: **A**ngewandte **Vi**rtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittelzyk**lus-** Belastungs-Beanspruchungsanalyse*. Abschlussbericht. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Medizinische Fakultät, Bereich Arbeitsmedizin. Magdeburg April 2011,153 Seiten.

18. Canada, Department of National Health and Welfare. (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound, Part II - Industrial and commercial applications. Safety Code-24. (Health and Welfare, Canada, Publication, 80-EHD-60). Abgerufen von http://www.hc-sc.gc.ca/ewhsemt/pubs/radiation/safety-code_24-securite/index-eng.php am 12.01.2009.

19. CHIP ONLINE. DE. (2010).Die praktischsten Anwendungsbereiche für Augmented Reality. Abgerufen von http://www.chip.de/bildergalerie/Die-praktischsten-Anwendungsbereiche-fuer-Augmented-Reality-Galerie_42811339.html?show=7 am 11.01.2012.

20. Crabtree, R.B., Forshaw, S.E. (1977). Exposure to Ultrasonic Cleaner Noise in the Canadian Forces. DCIEM Technical Report #77X45. Available from DCIEM, 1133 Sheppard Ave. W., P.O. Box 2000, Downsview, Ontario M3M 3B9. In: Canada, Department of National Health and Welfare. (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound, Part II - Industrial and commercial applications. Safety Code-24. (Health and Welfare, Canada, Publication, 80-EHD-60).
Abgerufen von http://www.hc-sc.gc.ca/ewhsemt/pubs/radiation/safety-code_24-securite/index-eng.php am 12.01.2009.

21. Deutscher Hochschulverband. (2010). DHV-Newsletter 12/2010. *Deutscher Hochschulverband will Masterzugang öffnen.* Abgerufen von http://www.hochschulverband.de/cms1/newsletter-2010-0446.html am 15.08.2011.

22. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V.(DGAUM). (2008). Seibt, R. Scheuch, K. Leitlinie: Blutdruckmessung in der Arbeitsphysiologie. Aufgerufen von http://www.dgaum.de/index.php/publikationen/leitlinien/leitlinienarbeitsmedizin/llnichtaktuell/92-blutdruck.html am 08.03.2012

23. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V.(DGAUM). (2001). Pfister E.A., Rüdiger, H., Scheuch, K. Leitlinie: Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin. Aufgerufen von http://www.dgaum.de/index.php/publikationen/leitlinien/leitlinienarbeitsmedizin/104-herzrhythmusanalyse.html am 08.03.2012

24. Drascic, D., Milgram, P. (1996). Perceptual Issues in Augmented Reality. Proc. SPIE Vol. 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III, San Jose, California, Feb. 1996. S. 123-134.

25. Ehrenstein, W.H.,Schlykowa, L.(2001). Dynamisches Sehen- Prüfung und Bedeutung für Leistung und Sicherheit am Arbeitsplatz. Abgerufen von: http://www.uni-mainz.de/FB/Sport/physio/pdffiles/nuernb99.pdf am 06.06.2012.

26. ENA - Elektrotechnologien und Anlagenbau GmbH, Atzendorf.

27. Eskin, G.I. (2001). Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. All-Russia Institute of Light Alloys. Ultrasonics Sonochemistry 8. 2001, S. 319-325. Elsevier.

28. E VDI 3766:2008-10.(2008). Ultraschall- Arbeitsplatz-Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung.

29. Feiner, S., MacIntyre, B., Höllere, T. (1999). Wearing It Out: First Steps Toward Mobile Augmented Reality Systems. In Mixed Reality- Merging Real and Virtual Worlds. Ohmsha, Ltd.,Tokyo., Berlin: Springer.

30. Fritzsche, L. (2006). Eignung von Augmented Reality für den Vollschichteinsatz in der Automobilproduktion – Eine Laboruntersuchung zur psychischen Belastung und Beanspruchung bei der Arbeit mit einem monokularen Head Mounted Display. Dissertation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften.

31. Fuchs, H., Ackermann, J. (1999). Displays for Augmented Reality: Historical Remarks and Future Prospects. In Mixed Reality- Merging Real and Virtual Worlds. Ohmsha, Ltd.,Tokyo. Berlin: Springer.

32. Fučić, A., Želježić, D., Kašuba, V., Kopjar, N., Rozgaj, R., Lasan, R., Mijić, A., Hitrec, V., Lucas, J. N. (2007). *Stable and Unstable Chromosome Aberrations Measured after Occupational Exposure to Ionizing Radiation and Ultrasound. Croat Med J*. 2007 June; 48(3): 371–377. Abgerufen von http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=2080539&blobtype=pdf am 15.01.2009.

33. Galley, N. (1989). Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de)activation. A review and some speculations. *Journal of Psychophysiology*, Vol. 3, 229-244. in Joos et. al. (2007).

34. Gold, R.E., Decker, T.N., Vance, A.D. (1984). Acoustical Characterization and Efficacy Evaluation of Ultrasonic Pest Control Devices Marketed for Control of German Cockroaches." J. Econ. Entomology, vol. 77, pp. 1507-1512. In: Canada, Department of National Health and Welfare. (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound, Part II - Industrial and commercial applications. Safety Code-24. (Health and Welfare, Canada, Publication, 80-EHD-60).
Abgerufen von http://www.hc-sc.gc.ca/ewhsemt/pubs/radiation/safety-code_24-securite/index-eng.php am 12.01.2009.

35. Hecker, R. (1998). Physikalische Arbeitswissenschaft. 1.Aufl. Dr. Köster: Berlin.

36. Herbertz, J., Grunter, K. (1981). Untersuchungen zur hoerkurvenmaessigen Bewertung von Ultraschall in Luft, Fortschritte der Akustik -DAGA'81. 1981, Berlin:VDE-Verlag, pp.

509-512. In: Canada, Department of National Health and Welfare. (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound, Part II - Industrial and commercial applications. Safety Code-24. (Health and Welfare, Canada, Publication, 80-EHD-60). Abgerufen von http://www.hc-sc.gc.ca/ewhsemt/pubs/radiation/safety-code_24-securite/index-eng.php am 12.01.2009.

37. Herbertz, J. (1984). Loudness of Airborne Ultrasonic Noise. Ultrasonics International, 1983, Conference Proceedings, S.226-231. In: Canada, Department of National Health and Welfare. (1991). Guidelines for the safe use of ultrasound, Part II - Industrial and commercial applications. Safety Code-24. (Health and Welfare, Canada, Publication, 80-EHD-60). Abgerufen von http://www.hc-sc.gc.ca/ewhsemt/pubs/radiation/safety-code_24-securite/index-eng.php am 12.01.2009.

38. Hill, C.R. & Haar, G. T. (vermutlich 1985). *Chapter 6 Ultrasound:* Abgerufen von http://whqlibdoc.who.int/euro/es/EURO_SERIES_25_(chp6).pdf am 20.01.2009.

39. Horn, A. (2003). Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin - Rahmenbedingungen und methodische Grundlagen. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum.

40. INRS. (2006). Limites d´exposition aux infrasons et aux ultrasons- Étude bibliographique. INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité - Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires - 2e trimestre 2006 - 203 / 77. Frankreich.

41. Jackson, S. Schuler, R. & Schwab, R. (1986). Toward an Understanding of the Burnout Phenomenon. *Journal of Applied Psychology, 71,* 630-640. doi: 10.1037/0021-9010.71.4.630.

42. Joos, M., Rötting, M., & Velichkovsky, B. M. (2003). Die Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden, innovative Anwendungen. In T. Herrmann, S. Deutsch & G. Rickheit (Eds.), *Handbuch der Psycholinguistik* (pp. 142-168). Berlin/NY: De Greyter. Abgerufen von http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_mathematik_und_naturwissenschaften/fachrichtung_psychologie/i3/applied-cognition/publikationen/pdf/joos2002.pdf am 17.01.2012.

43. Kalla, E.M. (2011). *Gesundheitsbelastung im Studium – ein Vergleich der arbeitsbezogenen Verhaltens- und Erlebensmuster von Studierenden verschiedener Fakultäten*. Unveröffentlichte Bachelor. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

44. Karnath, H.-O. (1988): Deficits of attention in acute and recovered hemi-neglect. Neuropsychologia, 20, 27-45. In: Schröder, A. (2004). Experimentelle Untersuchung zur Wirksamkeit einer kombinierten Behandlung aus einem visuellen Explorationstraining und zusätzlicher afferenter Anbahnung bei visuellem Neglect. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, S. 38.

45. Koepchen H-P, Huopaniemi T. (1991). Cardiorespiratory and motor coordination. Berlin-Heidelberg: Springer.

46. Kraft, U. (2012). Bluthochdruck-arterielle Hypertonie. Abgerufen von: http://www.netdoktor.at/krankheiten/fakta/bluthochdruck.shtml am:09.06.2012.

47. Krstić, G., Sánchez Márquez, S. (2009). Vergütung von Aluminiumschmelzen durch Ultraschall-Behandlung. *Verbandszeitschrift „Innovation & Markt“* Verband Innovativer Unternehmen e.V. (VIU), S. 9-10.

48. Kučera, M. (2006). Herzfrequenznvariabilität- Einleitung. Abgerufen von www.drkucera.eu/upload_doc/Herzfrequenznvariabilitat_einleitung_de_2006_ok.pdf am 05.01.2012.

49. Kutter, I. (2010). Burn-out im Studium. ZEIT Campus, 3. Abgerufen von http://www.zeit.de/campus/2010/03/burnout-studenten/seite-2 am 10.07.2011.

50. Kuttruff, H. (1989). Physik und Technik des Ultraschalls. Stuttgart: S. Hirzel.

51. Laurig, W. (1992). Grundzüger der Ergonomie; Erkenntnisse und Prinzipien*. Verb. Für Arbeitsstudien u. Betriebsorganisation e.V., REFA- (4.Aufl.)* Berlin: Beuth, 1992. S. 23-38.

52. Laurig, W. (2008). *Belastungs-Beanspruchungs-Konzept und Gefährdungsbeurteilung*. Abgerufen von http://www.ergonassist.de/bel-bean_gefaehrdung/Belastung_Gefaehrdung.pdf am 5.01.2012

53. Lips, W., Hohmann, B. (1997). SUVA -Schweizerische Unfallversicherungsanstalt. Ultraschallanlagen als Lärmquelle. Luzern.

54. Lüder, A., Böckelmann, I. Beurteilung visueller Funktionen anhand dynamischen Sehens. Abgerufen von: http://www.institut-aser.de/pdf_files/literatur/aser-info-Nr-7.pdf am 06.06.2012.

55. Lynworth, L.C. (1975). Industrial applications of ultrasound - a review. II. Measurements, tests and process control using low intensity ultrasound. *IEEE Trans. Son. Ultrason.,* SU-22(2): 71-101. In: WHO (1982) *International Programme on Chemical Safety*: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 22, ULTRASOUND. Abgerufen von http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm#SubSectionNumber:1.1.2 http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_alphabetical/en/ am 19.01.2009.

56. Malik, M. (1996). Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. European Heart Journal. 17, 354-381.

57. Maue, J. (2009). 0 Dezibel + 0 Dezibel =3 Dezibel- Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms. 9. Auflage. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

58. Maslach, C., Leiter, M. (2001). *Die Wahrheit über Burnout. Stress am Arbeitsplatz und was Sie dagegen tun können*. Berlin: Springer.

59. Maslach, C., Schaufeli, W., Leiter, M. (2001). Job Burnout. *Annual Review of Psychology*, 52, 397-422*.* doi:10.1146/annurev.psych.52.1.397.

60. Meier, S., Milz, S. & Krämer, A. (2007). *Gesund Studieren. Befragungsergebnisse des Gesundheitssurvey und Auswertungen zu Arzneiverordnungen* (Bd. 18). Techniker Krankenkasse: Hamburg.

61. Meyers Lexikon online (2008). *Schall (Grafiken).* Abgerufen von http://lexikon.meyers.de/beosearch/permlink.action?pageId=46707844&version=1 am 10.01.2008.

62. Mickasch, H.D., Haack, J. (1986). Blickbewegungsforschung - Einführung in die Physiologischen Grundlagen, Techniken und in die Problem- und Anwendungsbereiche. In L.J. Issing, H.D. Mickasch Haack (Hrsg.), *Blickbewegung und Bildverarbeitung*. Frankfurt am Main/New York: Peter Lang. In Joos et. al. (2007).

63. Microvision (2011). Microvision tracker. Abgerufen von http://microvisiontracker.blogspot.de/2011/07/microvision-nomad.html am 21.05.2012.

64. Microvision (2012). Head up Displays. Abgerufen von http://www.microvision.com/vehicle_displays/index.html am 22.05.2012.

65. Milgram, P., Colquhoun, H. (1999). A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In Mixed Reality- Merging Real and Virtual Worlds. Ohmsha, Ltd.,Tokyo., Berlin: Springer.

66. Milgram, P. (2006). Some Human Factors Considerations for Designing Mixed Reality Interfaces. In *Virtual Media for Military Applications.* (pp. KN1-1 – KN1-14). Meeting Proceedings RTO-MP-HFM-136, Keynote 1. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Abgerufen von http://www.rto.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-MP-HFM-136 am 9.01.2012.

67. Milhahn, E., Inkred, B. (2008). Referat zur Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. Abbildungen. Abgerufen von: http://seelensammler.de/uni/arbeiten/TAP.pdf am 03.06.2012.

68. O'Brien., W.D., Jr. (2007). *Ultrasound—biophysics mechanisms: Prog Biophys Mol Biol*. 2007 ; 93(1-3): 212–255. Abgerufen von http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?artid=1995002&blobtype=pdf am 22.01.2009.

69. Oehme, O., Wiedenmaier, S., Schmidt, L., Luczak, H. (2003). Untersuchung des Einflusses der Augendominanz auf die Informationsentnahme mit einem Head-Mounted-Display in einer Augmented Reality-Umgebung. In: Fritzsche, L. (2006). Eignung von Augmented Reality für den Vollschichteinsatz in der Automobilproduktion – Eine Laboruntersuchung zur psychischen Belastung und Beanspruchung bei der Arbeit mit einem monokularen Head Mounted Display. Dissertation. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften.

70. Oehme, O. (2004). Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service. Dissertation. RWTH Aachen. Shaker.

71. Österreich, R. (2001). Das Belastungs-Beanspruchungskonzept im Vergleich mit arbeitspsychologischen Konzepten. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft . S. 163.

72. Pfendler, C. (2007). Bewertung mobiler Displays zur Darstellung von Karten für geographische Orientierungsaufgaben. In Zeitschrif für Arbeitswissenschaft (61) 2007/4. S. 235-244.

73. PubMed. (2000).*Section 4—Bioeffects in Tissues with Gas Bodies.* (verfasser Unbekannt) *J Ultrasound Med*. Author manuscript. Abgerunfen von http://www.pubmedcentral.nih.gov/picrender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=2000339&blobtype=pdf. am 14.01.2009.

74. Pfister, E.A., Böckelmann, I., Seibt, R., Stoll, R., Weippert, M. (2007). Arbeitsmedizinische Bedeutung der Herzfrequenzvariabilität. Zbl. Arbeitsmed 57. S. 158-166.

75. Pfister, E.A. (2008). Arbeitsmedizin für die Aus-/Fort- und Weiterbildung. (15. Überarbeitete Aufl.). Medizinische Fakultät Magdeburg. S. 30, 33.

76. Repacholi, M.H. (1981). *Ultrasound: Characteristics and* biological action, National Research Council of Canada, Ottawa, pp. 284, (Pub. NRCC 19244) In: WHO (1982). *International Programme on Chemical Safety*: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 22, ULTRASOUND. Abgerfen von http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm#SubSectionNumber:1.1.2 http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_alphabetical/en/ am 19.01.2009

77. Rottenkolber, B., Edelmann, M., Höller, F. (2004). Gestaltungsempfehlungen für Head-Mounted-Displays. In Luczak H., Schmidt, L., Koller, F. (Hrsg.), Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen (S.27-39). Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 22, Bd. 17. Düsseldorf: VDI.

78. Roggentin, A. (2009). Arbeitsphysiologische Beanspruchungsanalyse beim Einsatz von Mobilen Augmented-Reality-Systemen. Dissertation. Universität Magdeburg.

79. Rohmert, W., Rutenfranz, J. (1975). Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen. Bonn: Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung.

80. Sánchez Márquez, J. S., Kalla, E. M., Deml, B. & Böckelmann, I. (2012). Gesundheitsbelastung im Studium – ein Vergleich der arbeitsbezogenen Verhaltens- und Erlebensmuster von Studierenden verschiedener Fakultäten. *Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Kassel, 22-24. Februar*, 4 Seiten.

81. Seibt, R., Scheuch, K. (1999). Blutdruckmessung in der Arbeitsphysiologie, Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin. Abgerufen von: http://www.dgaum.de/index.php/publikationen/leitlinien/leitlinienarbeitsmedizin/llnichtaktuell/92-blutdruck.html am: 09.06.2012.

82. Schaarschmidt, U. & Fischer, A. (2008). AVEM Arbeitsbezogenes Verhaltens- und Erlebensmuster (3. Aufl.). London: Pearson.

83. Schega, L., Hamacher, D., Böckelmann, I., Huckauf, A., Mecke, R., Tümler, J. (2010). Vergleich von Messverfahren zur Analyse der Herzfrequenzvariabilität (HRV). Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin.

84. Schega, L., Hamacher, D., Bökelmann, I., Mecke, R., Huckauf, A., Urbina, M., Tümler, J. (2011). Wirkung unterschiedlicher mobiler Augmeted-Reality-Systeme auf die Beanspruchung im industriellen Arbeitsprozess. Zeitschrift für Arbeitsmedizin, Sozialmedizin und Umweltmedizin. 46: 402–410.

85. Schiller MT-200 Holter System. Abgerufen von http://www.med-electronics.com/Schiller_MT_200_Holter_System_p/sc-mt200.htm am 18.01.2012.

86. Schmidtke, H. (1981). Lehrbuch der Ergonomie. München: Hanser.

87. Schröder, A. (2004). Experimentelle Untersuchung zur Wirksamkeit einer kombinierten Behandlung aus einem visuellen Explorationstraining und zusätzlicher afferenter Anbahnung bei visuellem Neglect. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum.

88. State, A. (1998). UNC Laparoscopic Visualization Research -*Augmented Reality Technology.* Abgerufen von http://www.cs.unc.edu/Research/us/laparo.html am 11.01.2012.

89. State, A. (2000). UNC Ultrasound/Medical Augmented Reality Research. Abgerufen von http://www.cs.unc.edu/Research/us/ am 11.01.2012.

90. Skiba, R. (1994).Taschenbuch Arbeitssicherheit, 8 neubarb. Aufl.- Bielefeld: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.

91. Sorge, G. (2002). Faszination Ultraschall 1.Auflage. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B.G. Teubner GmbH.

92. Tegtmeier, A. (2006). Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie. Dissertation. Abgerufen von http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2007/andtegtmeier.pdf am .01.2012.

93. Trenkamp, O. (2011). Ausgebrannte Studenten. Lost in Perfection. *Spiegel Online. Unispiegel.* Abgerufen von http://www.spiegel.de/unispiegel/studium/0,1518,741692,00.html am 10.07.2011.

94. Triebig, G., Kentner, M., Schiele, R. (2008). Arbeitsmedizin: Handbuch für Theorie und Praxis. Gentner.

95. Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen. (2007)."Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) geändert worden ist". Bundesrepublik Deutschland. Abgerufen von http://www.gesetze-im-internet.de/l_rmvibrationsarbschv/BJNR026110007.html am 13.01.2012.

96. Von Gierke, H.E. (1950a). Subharmonics generated in the ears of humans and animals at the intense sound levels. *Am. Soc. Exp. Biol. Fed. Proc.,* **9**: l80. In: WHO (1982). *International Programme on Chemical Safety*: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 22, ULTRASOUND. Abgerufen von http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm#SubSectionNumber:1.1.2 http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_alphabetical/en/ am 19.01.2009.

97. Von Gierke, H.E. (1950b). Subharmonics generated in human and animal ears by intense sound. *J. Acoust. Soc. Am.,* **22**: 675. In: WHO (1982). *International Programme on Chemical Safety*: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 22, ULTRASOUND. Abgerufen von http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm#SubSectionNumber:1.1.2 http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_alphabetical/en/ am 19.01.2009.

98. WHO, World Health Organization. (1982). *International Programme on Chemical Safety*: ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 22, ULTRASOUND. Abgerufen von http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc22.htm#SubSectionNumber:1.1.2 http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_alphabetical/en/ am 19.01.2009.

99. Wiener Test System für Psychologische Diagnostik (2012). Katalog. Fa. Schuhfried GmbH. Mödling. Österreich. Abgerufen von http://www.schuhfried.at/fileadmin/content/eKataloge/1_de/Katalog_Wiener_Testsystem_2011_SCHUHFRIED/index.html#/2 am 17.01.2012.

100. Wolf, S., Pfister, E. Schmicker S. & Vajna, S (2007). Gesundheitszustand und Gesundheitsförderung von Studierenden, *Praktische Arbeitsmedizin, 9*, S. 10.

101. Weippert, M. (2009). Frequenzanalyse der Herzfrequenzvariabilität in der Präventivmedizin. Dissertation. Universität Rostock.

102. Wodara, J. (1984). Ultraschall-Punktschweißen metallischer Werkstoffe. Dissertation. Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg.

103. Wodara, J. (2004). Ultraschallfügen und –trennen. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.

104. Zimmermann, P. , Fimm, V. (2007). Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. TAP Version 2.1.Psytest. Herzogenrath.

105. Zimmermann, P. , Fimm, V. (2007).Verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung und Neglect-Test, in Milhahn, E., Inkred, B. (2008). Referat zur Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. Abbildungen. Abgerufen von: http://seelensammler.de/uni/arbeiten/TAP.pdf am 03.06.2012.

Anhang I: Fragebögen

Fragebogen 1. Lärmbelastung und Medikamente

Probandennummer :_____ Datum :_____

Alter:_____ Berufstätigkeit :_____

Geschlecht: □ männlich □ weiblich

Sehr geehrte UntersuchungsteilnehmerInnen,

vielen Dank für Ihre Bereitschaft, unser Projekt mit Ihrer wertvollen Mitarbeit zu unterstützen.

Der folgende Fragebogen befasst sich mit der Arbeitssicherheit eines Gießverfahrens und erhebt Daten über Ihre Beanspruchungsreaktion auf die Arbeitsumweltbelastungen, im Speziellen auf Lärm.
Dieser Fragebogen ist in 4 Teilbereiche untergliedert. Bitte beantworten Sie alle Fragen ohne eine auszulassen. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. Antworten Sie daher bitte stets so, wie es auf Sie zutrifft.

Die Ergebnisse werden uns hilfreiche Informationen geben, die uns bei der Entscheidung über weitere organisatorische Maßnahmen hilfreich sein werden.

I. Die Fragen 1-4 erheben Daten über die Lärmbelastung in Ihrer Freizeit. Sie werden Fragen zu Gewohnheiten finden. Es wird hier nach der Häufigkeit dieser Gewohnheiten gefragt. Wenn die Frage für Sie nicht zutrifft, dann kreuzen Sie bitte „fast nie".

Zur Vereinfachung die Antwortmöglichkeiten sind bereits vorgedruckt und lauten:

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie

Mehr als 1 Stunde täglich	Ca. 1 Stunde täglich	Weniger als 1 Stunde täglich	1 Stunde pro Woche	1 Stunde im Monat

Bitte machen Sie bei den nächsten Fragen ein Kreuz in dem Kästchen, welches für Sie am ehesten zutrifft.

---

1. Halten Sie sich in Ihrer Freizeit an lauten Orten auf? (z. B. Konzerte, Discos/Kneipen, Kinos etc.)

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie

---

2. Sind sie durch ihre berufliche oder nebenberufliche Tätigkeit Lärm ausgesetzt? (z. B. Arbeit in Kneipen/Musik-Bars, als DJ in einer Disco, als Musiker, Security-Personal, Catering, Techniker, Kindergarten-Betreuung, Callcenter etc.)

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie

---

3. Benutzen Sie Kopfhörer? (z. B. mp3-Player, beim Computerspielen, beim Telefonieren)

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie

Wie lange benutzen Sie Kopfhörer?

Mehr als 1 Stunde täglich	Ca. 1 Stunde täglich	Weniger als 1 Stunde täglich	1 Stunde pro Woche	1 Stunde im Monat

*Seit wann?*_____

---

4. Ist ihr Wohnort laut?
   □ ja □ nein

   Beschreibung der Lärmquelle:

5. Welche Medikamente nehmen Sie ein? Wie oft? Bitte unten auflisten.
   Wenn Sie keine Medikamente nehmen, dann schreiben Sie, ***„keine".***

Bitte überprüfen Sie noch einmal ob Sie wirklich alle Fragen wirklich beantwortet haben. Vielen Dank!

Fragebogen 2. Befragung vor der US-Beschallung. Raucherstatus und Anamnese

1. Rauchen Sie?

□ ja ► _____Zigaretten, Wie oft? : _____

□ nein ► Passivraucher? □ ja ca. _____Stunden/Tag

Wo? _____

□ nein

□ nicht mehr ► Seit wann aufgehört? _____

► Wie lange geraucht? _____

► Wie viel geraucht? _____

Zigaretten/Tag

2. Zusammenleben mit rauchendem Partner □ ja □ nein
3. Berufsabhängige Exposition am Arbeitsplatz wie z. B. bei Kellnern/Gastwirten □ ja □ nein
4. Anzahl der Raucher im Haushalt _____
5. Anzahl der durchschnittlich gerauchten Zigaretten, Zigarren, Pfeifen im Haushalt _____
6. Anzahl der Raucher am Arbeitsplatz (in geschlossenen Räumen) _____
7. Aufenthalt an Orten, wo geraucht wird □ ja

fast täglich	etwa 3x pro Woche	etwa 2x pro Monat	etwa 2x pro Jahr	fast nie

□ nein

8. Sind in Ihrer Familie Gehörkrankheiten bekannt? □ ja □ nein

Wenn ja, welche?

_____

_____

_____

9. Sind in Ihrer Familie Kreislaufkrankheiten bekannt? □ ja □ nein

Wenn ja, welche?

_____

_____

_____

10. Haben Sie Herz-Kreislaufstörungen? □ ja □ nein

Wenn ja, welche?

_____

_____

_____

11. Haben Sie Hörstörungen? □ ja □ nein

Wenn ja, welche?

_____

_____

Fragebogen 3. Beschwerde in den Letzten 12 Monaten

*Welche von den folgenden Beschwerden hatten Sie in den **letzten 12 Monaten**? Bitte markieren Sie in dem entsprechenden Kästchen.*

1. Hatten Sie Kopfschmerzen?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

2. Hatten Sie das Gefühl, dass ihr Herz unregelmäßig schlug?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

3. War Ihnen übel?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

4. Hatten Sie feuchte Hände?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

5. Hatten Sie einen trockenen Mund?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

6. Waren Sie innerhalb der letzten 12 Monate belastenden Ereignissen ausgesetzt? (z.B. Tod eines Verwandten)

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

7. Fühlten Sie sich müde?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

8. War Ihnen schwindelig?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

9. Hatten Sie Brechreiz?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

10. Spürten Sie Druck auf den Ohren?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

11. Fühlten Sie sich gereizt?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

12. Litten Sie unter Hörgeräuschen?

nicht	nicht mehr als üblich	kaum mehr als üblich	mehr als üblich	deutlich mehr als üblich	erheblich mehr als üblich

Handelt es sich dabei um einen Dauerzustand?	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Wie ist die Intensität des aktuellen Zustands?	gar nicht	kaum	mittelmäßig	ziemlich	außerordentlich

Fragebogen 4. Beschwerde, aktuellen Zustand, vor- und nach der US-Beschallung

*Bitte schildern Sie **nur ihre aktuell vorhandenen Beschwerden**. Bitte machen Sie ein Kreuz in dem entsprechenden Kästchen. (Erfragung vor und nach der Aussetzung)*

1. Haben Sie jetzt Kopfschmerzen?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

2. Haben Sie jetzt das Gefühl dass Ihr Herz unregelmäßig schlägt?

□ nicht

□ ja und derer Häufigkeit

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

3. Ist ihnen jetzt übel?

□ nicht

□ ja und zwar

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

4. Haben Sie jetzt feuchte Hände?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

5. Haben Sie jetzt einen trockenen Mund?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

6. Fühlen Sie sich jetzt müde?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

7. Ist Ihnen jetzt schwindelig?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

8. Haben Sie jetzt Brechreiz?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

9. Spüren Sie jetzt Druck auf den Ohren?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

10. Fühlen Sie sich jetzt gereizt?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

11. Leiden Sie jetzt unter Hörgeräuschen?

□ nicht

□ ja und derer Intensität

nicht stärker als üblich	kaum stärker als üblich	stärker als üblich	deutlich stärker als üblich	erheblich stärker als üblich

Anhang II: Einwilligungserklärung

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Studie:
„Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz in Ultraschall-integrierten Gießtechnologien"

Studienleiterinnen:

Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml
Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und Arbeitsgestaltung

PD Dr. med. habil. Irina Böckelmann
Bereich Arbeitsmedizin

EINWILLIGUNGSERKLÄRUNG

Name, Vorname:

Auf freiwilliger Basis erklären Sie sich bereit, als Proband/Probandin an der Studie „Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz in Ultraschall-integrierten Gießtechnologien" teilzunehmen.

Mit Ihrer Unterschrift erklären Sie, dass Sie informiert sind über:

- Den Zweck der Untersuchung
- Die Untersuchungsverfahren und
- Die Freiwilligkeit der Teilnahme

Magdeburg, den

Unterschrift Untersuchungsleitung

Unterschrift

M.Sc. Juan Sebastián Sánchez Márquez

Proband/Probandin

Anhang III: Probandenaufklärung

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Studie:
„Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz in Ultraschall-integrierten Gießtechnologien"

Studienleiterinnen:

Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml
Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und Arbeitsgestaltung

PD Dr. med. habil. Irina Böckelmann
Bereich Arbeitsmedizin

Probandenaufklärung

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich möchte Sie hiermit einladen, an der Studie „Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz in Ultraschall-integrierten Gießtechnologien" teilzunehmen. Diese Arbeit wird im Rahmen meiner Dissertation durchgeführt, zu der ein Feldexperiment mit ultraschallbasierten Technologien an einem Gießerei-Arbeitsplatz stattfindet.

Bei diesem Versuch, wird der Lärmpegel (Beurteilungspegel DIN 45645 Teil 2) erfasst, der bei der Anwendung der Schmelzebehandlungseinrichtung beim Ultraschalleinsatz mit variablen Arbeitsparametern auftritt. Außerdem wird auf die Einhaltung, der in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vorgegebenen Grenzwerte geachtet sowie mögliche subharmonische Schwingungen analysiert.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind von großer Bedeutung, da sie maßgebend für die Umsetzung einer späteren industriellen Anwendung sein werden sowie Hinweise für potenzielle präventive Maßnahmen geben können.

Das Programm besteht aus

- einem physiologischen Teil: Audiometrie, 24 Stunden Blutdruck- und EKG-Aufzeichnung; Sie profitieren dabei von einer kostenlosen Untersuchung Ihres Herz-Kreislaufsystems.
- einem psychologischen Teil: Beantwortung von Fragebögen und,
- die aktive Teilnahme als „Anlagenbediener" an den Gießversuchen.

Sie bekommen folgende Instrumente:

- Fragebogen zur Erfassung Ihrer privaten Lärmbelastung
- Eine mündliche Befragung zum Raucherstatus und Eigen/Familienanamnese,
- Fragebogen zur Erfassung von in den letzten 12 Monaten aufgetretene Beschwerden,
- Fragebogen zur Erfassung aktueller Beschwerden.

Nützen Sie die Gelegenheit, durch die Teilnahme an der Studie von unserer kostenlosen Vorsorgeuntersuchung zu profitieren.

Die Terminvereinbarungen erfolgen in dreier Gruppen. Die Untersuchungen erfordern an einem zu vereinbarenden Tag jeweils drei Stunden Untersuchungszeit und das Tragen des EKG-und Blutdruckmessgeräts für 24 Stunden.

Als Gegenleistung bekommen Sie Ihren Untersuchungsbefund plus einen Praktikumsschein, oder eine Teilnahmebestätigung für „Versuchspersonenstunden" die Sie sich für Ihr Studium anrechnen lassen können. Außerdem haben Sie die Möglichkeit an einer Verlosung teilzunehmen und dabei diverse Freizeitgestaltungs- bzw. Einkaufcentergutscheine zu gewinnen.

Die Untersuchungen sind freiwillig und unterliegen dem Datenschutz (Anonymisierung der Daten nach den Richtlinien des Bundes- und Landesdatenschutzgesetzes).

Die Projektleitung erklärt, dass

- die Daten streng vertraulich behandelt werden (Schweigepflicht und medizinischer Datenschutz),
- die Ergebnisse nur zum Zwecke der Forschung verwendet werden,
- bei auffälligen Befunden Sie darüber informiert werden,
- Sie in jeder Phase der Untersuchung aus der Studie aussteigen können und Ihnen bei einem eventuell gewünschten Ausscheiden vor Untersuchungsende keinerlei Nachteile entstehen.

M.Sc. Juan Sebastián Sánchez Márquez

Schriftliche Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

(Magdeburg, D a t u m)

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei verschiedenen Personen bedanken, die mir bei der Durchführung meiner Dissertation geholfen haben. An erster Stelle möchte ich mich bei den Probanden bedanken, ohne die die Studie nicht möglich gewesen wäre. Ich weiß, es war nicht immer einfach so früh vor Ort zu sein! Dankeschön für Eure Zeit, Flexibilität und Mitarbeit!

Als nächstes möchte ich mich beim Referat für Forschung und bei der Nachwuchskommission der Medizinischen Fakultät für die Möglichkeit bedanken, als Stipendiat in der Fakultät zu arbeiten und für die Unterstützung bei den verschiedenen Tagungen. Ebenso bedanke ich mich bei der Dr. Karl Otto Winkler Stiftung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft für die wertvolle Unterstützung beim Abschluss meiner Promotion und die Möglichkeit als Promotionsstipendiat arbeiten zu dürfen.

Ein großes Dankeschön geht an das Team und Kollegen des Bereiches für Arbeitsmedizin (Frau PD. Dr. med. Irina Böckelmann, Frau Kirsch, Frau Schediwy, Frau Wollenberg, Frau Dr. med. Darius und Frau Dr. med. Alessandra D‘Alessandro) und Herrn PD. Dr. med. Ulrich Vorwerk der Medizinischen Fakultät, sowie bei Frau Professor Dr.-Ing. Barbara Deml vom IAF, die mir bei der Durchführung der Experimente zur Seite standen und die stets ein Auge (manchmal sogar zwei) auf mich und den Fortschritt meiner Arbeit geworfen haben. Ein großes Dankeschön auch an meine IAF AGler-Kollegen für Hilfe, Rat und Worte. Es war eine schöne Zeit.

Auch mein Lob und großen Dank an Herrn Doktor Ralf Rabätje der Volkswagen AG für die Technikleihgabe und an meinen Kollegen Oleksiy Chegrynets für seinen Einsatz bei der AR-Studie.

Ich möchte mich auch bei Herrn Horn und Professor Krampitz sowie bei Herrn Goran Krstic für die angenehme Zusammenarbeit und die Unterstützung bei den Anfängen des Ultraschall-Projektes bedanken.

Mein Dankeschön geht auch an Eva-Maria Kalla für die angenehme Zusammenarbeit bei der Studie über dem Gesundheitsstatus der Studenten der Otto-von-Guericke-Universität und an Anna Lüder für die angenehme Zusammenarbeit und die unterstützenden Gespräche.

…Last but not least! Ein ganz besonderer Dank von unschätzbarem Wert geht an Mareike Tegtmeier für das Aushalten (!), also Geduld und Unterstützung während all dieser Jahre! An Jan und Mareike Tegtmeier für die wertvollen Korrekturen sowie Probelesen und Gestaltungshilfe meiner Arbeit. Habt vielen Dank!

Ihnen allen nochmal vielen Dank für Ihre Unterstützung und die überaus angenehme Zusammenarbeit.

Magdeburg, 2012

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Juan Sebastián Sánchez Márquez
Geburtsdatum:	22.04.1982
Geburtsort:	Mexiko Stadt
Staatsangehörigkeit:	mexikanisch
Adresse:	Gaertnerstr. 2 39104 Magdeburg
Telefon:	0171 788 95 29
E-Mail:	juan.sanchez@ovgu.de

Beruflicher Werdegang

03. – 05.2012	**Wissenschaftliche Hilfskraft** Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg Übersetzung von Kongressbeiträgen in englischer Sprache
10.2011 –02.2012	**Wissenschaftliche Hilfskraft** Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg Durchführung von Tutorium
Seit 2004	**Freiberuflicher Dolmetscher, Übersetzer, Fremdsprachenlehrer** Verschiedene Hochschulen, Sprachzentren und Unternehmen
04. – 10.2004	**ISO 14001 Internal Auditor** Oxford Automotive- Estampados Magna S.A. de C.V., Ramos Arizpe, (Mexiko) Implementierung von ISO 14001 und Umweltsystemmanagement
01 – 04.2004	**Praktikum** bei Oxford Automotive, Mexiko S.A. de C.V., Ramos Arizpe (Mexiko) Qualitätssicherung, Assistenz bei der Implementierung von ISO 14001- ISO/TS 16949
01.2000	**Praktikum** bei der Dr. Schrick GmbH, Remscheid CAD Zeichnungen, Unterstützung bei der Motorenmontage und Prüfung

Akademische Ausbildung

2009 - 2012	**Externer Doktorand** Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Thema: „Arbeitsphysiologische Ansätze zur Erfassung der Beanspruchung bei der Anwendung innovativer Technologien
2007 – 2009	**Studium und Abschluss** zum Master of Science (M. Sc.) Quality, Safety and Environment. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg. Thesis: "Occupational health and safety in ultrasonic-integrated technologies".
2006 – 2007	**Studium** M. Sc. Chemical and Process Engineering Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.(04.06-09.07)
2000 – 2004	**Studium und Abschluss** zum Diplom-Ingenieur Maschinenbau und Verwaltung. Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo (Mexiko)

Schulische Ausbildung

1999 – 2000	**Austauschjahr am Gertrud-Bäumer-Gymnasium Remscheid** Youth for Understanding e. V.
1997 – 1999	**Abitur**, Colegio Ignacio Zaragoza – La Salle, Saltillo (Mexiko)
1988 – 1997	Colegio Americano de Saltillo A.C., Saltillo (Mexiko)

Stipendien

Lieselotte und Dr. Karl Otto Winkler Stiftung für Arbeitsmedizin. (01.07.2011- 30.06.2012)

„Leistungsorientierte Mittelvergabe (LOM) der Medizinischen Fakultät". (01.07.2009-30.06.2011).

Weitere Qualifikationen

Sprachen

Spanisch	Muttersprache
Deutsch	Verhandlungssicher
Englisch	Verhandlungssicher
Italienisch	Mittelstufe
Französisch	Grundkenntnisse

- Produktionsprozesse, Zertifikat, 2004. Universidad Autonóma de Coahuila. Saltillo, Mexiko
- Kenntnisse von ISO 9000, ISO 14001, ISO/TS 16949, OHSAS 18001
- Microsoft Office (Erweiterte Kenntnisse), Linux (Grundkenntnisse), Turbo Pascal (Grundkenntnisse), Matlab (Grundkenntnisse)

Publikationen

Artikel

1. Krstić, G., Sánchez Márquez, S. (2009). Vergütung von Aluminiumschmelzen durch Ultraschall-Behandlung. *Verbandszeitschrift „Innovation & Markt“* Verband Innovativer Unternehmen e.V. (VIU), S. 9-10.

2. Sánchez Márquez, J.S., Deml, B., Böckelmann, I. (2011). Arbeitssicherheit beim Einsatz ultraschallbasierter Technologien. Zeitschrift *Technische Sicherheit: Anlagen-Überwachung, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Umweltschutz*. Springer-VDI-Verlag (Ausgabe 01.03.).

Poster

1. Sánchez Márquez, J. S., Böckelmann, I., Deml, B. (2009). Präventionsansatz: Arbeits- und Gesundheitsschutz bei der Anwendung von ultraschallbasierten Risikotechnologien. *13. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler. 6. - 8.11., Haan (Rheinland), S.48-49.*

   - Gefördert durch die Otto-Winkler-Stiftung.

2. Sánchez Márquez, J. S., Böckelmann, I., Deml, B. (2010). Arbeitssicherheit beim Einsatz ultraschallbasierter Technologien**.** *16. Workshop Psychologie der Arbeitssicherheit und Gesundheit, Sicher bei der Arbeit und unterwegs - wirksame Ansätze und neue Wege, Dresden. 10.-12.Mai.*

   - Gefördert durch das Referat für Forschung der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität.

3. Sánchez Márquez, J. S., Vorwerk U., Deml B., Böckelmann I. (2010). Erste Ergebnisse einer arbeitsmedizinischen Begleitstudie zum Gesundheitsschutz bei Hochleistungs-Ultraschalltechnologie in der Aluminium-Industrie. *50. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), Dortmund 16.-19. Juni.*

   - Gefördert durch das Referat für Forschung der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität.

4. Sánchez Márquez, J. S., Böckelmann, I., Deml, B. (2011). Untersuchung der Lärmauswirkung beim Einsatz ultraschallbasierter Gießtechnologien. *37. Deutsche Jahrestagung für Akustik-DAGA 2011, Dortmund 21-24.03, s.221-222.*

5. Sánchez Márquez, J. S., Böckelmann, I., Deml, B. (2012). Ergebnisse der arbeitsmedizinischen Begleitstudie zum Gesundheitsschutz bei der Ultraschallvergütung von Metalllegierungen in der Gießerei. *52. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. 2012 Göttingen 14-17.03., s. 182.*

- Gefördert durch die Otto-Winkler-Stiftung.

- Gefördert durch das Referat für Forschung der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität.

Vortrag

1. Sánchez Márquez, J.S. (2010). Weiterführende Untersuchungen zu physiologischen Auswirkungen luftgeleiteten Ultraschalls. *15. Jahre ENA-GmbH Jubiläumskolloquium*. *Magdeburg, 8. Juni.*

2. Papendick, K., Brennecke, U., Sánchez Márquez, J.S., Deml, B. (2011). Nutzerverhalten beim Laden von Elektrofahrzeugen. *Magdeburger Maschinenbau-Tage* , *Magdeburg 27. 09. - 29. 09.*, CD-ROM 9 Seiten. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.

3. Sánchez Márquez, J. S., Kalla, E. M., Deml, B. & Böckelmann, I. (2012). Gesundheitsbelastung im Studium – ein Vergleich der arbeitsbezogenen Verhaltens- und Erlebensmuster von Studierenden verschiedener Fakultäten. *Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Kassel, 22-24. Februar*, 4 Seiten.

Abschlussbericht

1. Böckelmann, I., Schega, L., Hamacher, D., Sánchez Márquez, J. S., Chegrynets, O., Darius, S. (2011). AVILUS: **A**ngewandte **Vi**rtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittelzyk**lus-** Belastungs-Beanspruchungsanalyse. *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Medizinische Fakultät Bereich Arbeitsmedizin. Magdeburg April 2011,153 Seiten*.

Masterthesis

Sánchez Márquez, J. S. (2009). Occupational health and safety in “ultrasonic-integrated technologies“. Unveröffentlichte Masterarbeit. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.