

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Arbeitswissenschaft

**Erfassung der feinmotorischen Performanz beim On-Orbit Servicing mittels
Telemanipulation und Unterwassersimulation**

Dipl.-Psych. Lena Strauß

Vollständiger Abdruck der bei der
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. F. Förstner

Berichterstatter: Prof. Dr. B. Färber

Berichterstatter: Prof. Dr. U. Walter

Diese Dissertation wurde am 28.09.2010 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 27.10.2010 angenommen.

Tag der Prüfung: 21.02.2011

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitswissenschaft und dem Sonderforschungsbereich SFB 453 Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion.

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle danken.

Mein besonderer Dank gilt:

Meinem Mann Dr.-Ing. Steffen Strauß und meiner Familie danke ich für die aufmerksame Korrektur meiner Dissertation sowie für die persönliche Unterstützung während der gesamten Arbeit.

Prof. Dr. Berthold Färber und Prof. Dr. Michael Popp für die Betreuung dieser Arbeit. Die Hinweise und die konstruktiven Verbesserungsvorschläge habe ich zu schätzen gewusst.

Gerhard Werner und Dipl.-Ing. Guy Berg danke ich für die tatkräftige und unermüdliche Unterstützung beim Unterwasserexperiment.

Dipl.-Ing. Jordi Artigas, Dipl.-Ing. Philipp Kremer und Dr. Dipl.-Ing. Carsten Preusche danke ich für die technische Beratung zur Nutzung des Telerobotiksystems.

Den Kollegen vom Institut danke ich für das stets offene Ohr und die fachliche sowie persönliche Begleitung meiner Arbeit.

Abschließend möchte ich Tobias Daege, Patrick Schneider, Thomas Balle und Carolin Hantschmann für die tatkräftige und zuverlässige Unterstützung bei der Durchführung der einzelnen Experimente danken.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Gestalterische Aspekte des Telemanipulationssystems	2
2 Fragestellung	8
3 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung	11
3.1 <i>Feinmotorik</i>	11
3.2 Moderierende Faktoren bei feinmotorischer Leistung.....	15
3.2.2 <i>Handlungskontrolle</i>	15
3.2.2.1 Zusammenhang zwischen <i>Handlungskontrolle</i> und <i>Feinmotorik</i>	17
3.2.2.2 Erfassung der <i>Lage-</i> bzw. <i>Handlungsorientierung</i>	18
3.2.3 <i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i>	20
3.2.3.1 Zusammenhang zwischen <i>konzentrierter Aufmerksamkeit</i> und <i>Feinmotorik</i>	23
3.2.3.2 Erfassung der <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i>	23
3.3 Externe Einflussfaktoren bei feinmotorischer Leistung.....	25
3.3.1 <i>Mikrogravitation</i>	25
3.3.1.1 Zusammenhang zwischen <i>Mikrogravitation</i> und <i>feinmotorischer Leistung</i>	27
3.3.1.2 Methoden zur erdgebundenen Simulation von <i>Mikrogravitation</i>	29
3.3.2 Der Handschuh als externer Einflussfaktor	32
3.3.2.1 Handschuhe und ihre Funktion.....	32
3.3.2.2 Der Einfluss von Handschuhen auf die feinmotorische Leistung.....	34
3.3.3 <i>Blickfeldeinschränkung</i> als externer Einflussfaktor.....	36
3.3.4 Telemanipulation.....	38
3.3.4.1 Ein- und Ausgabegeräte.....	40
3.3.4.2 Messkriterien im Telemanipulationssystem.....	42
3.3.4.3 Gestaltungskriterien und ihr Einfluss auf feinmotorische Leistungsfähigkeit.....	42

3.4 Zusammenfassung und Konsequenzen	45
4 Forschungsmethodisches Design	47
4.1 Ausrichtung des Prüfstandes	47
4.1.1 Methode	48
4.1.1.1 Stichprobe.....	48
4.1.1.2 Aufbau.....	48
4.1.1.3 Versuchsablauf.....	50
4.1.2 Ergebnisse	51
4.1.3 Diskussion.....	52
4.2 Validierung des Prüfstandes.....	53
4.2.1 Methode.....	53
4.2.1.1 Stichprobe.....	53
4.2.1.2 Aufbau.....	53
4.2.1.3 Versuchsablauf.....	54
4.2.2 Ergebnisse.....	55
4.2.3 Diskussion.....	57
4.3 Untersuchung der externen Einflussfaktoren.....	58
4.3.1 Einfluss der <i>Destabilisierung</i> auf die feinmotorische Leistung	58
4.3.1.1 Methode	59
4.3.1.1.1 Stichprobe.....	59
4.3.1.1.2 Aufbau	59
4.3.1.1.3 Versuchsablauf.....	60
4.3.1.2 Ergebnisse	61
4.3.1.3 Diskussion	62
4.3.2 Der Einfluss von <i>Blickfeldeinschränkung</i> und Handschuhen auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit	63
4.3.2.1 Methode.....	64
4.3.2.1.1 Stichprobe.....	64
4.3.2.1.2 Aufbau	64
4.3.2.1.3 Versuchsablauf.....	65
4.3.2.2 Ergebnisse.....	67
4.3.2.3 Diskussion.....	70
4.3.3 Die feinmotorische Leistung im Telemanipulationssystem	71
4.3.3.1 Methode.....	72
4.3.3.1.1 Stichprobe.....	72
4.3.3.1.2 Aufbau	72
4.3.3.1.3 Versuchsablauf.....	75
4.3.3.2 Ergebnisse.....	76
4.3.3.3 Diskussion.....	77
4.3.4 Die feinmotorische Leistung unter Bedingung eines simulierten Außenbordeinsatzes	78
4.3.4.1 Methode.....	79
4.3.4.1.1 Stichprobe.....	79
4.3.4.1.2 Aufbau	81
4.3.4.1.3 Versuchsablauf.....	82

4.3.4.2 Ergebnisse.....	84
4.3.4.2.1 Ergebnisse der Gegenüberstellung der Telemanipulation und des simulierten Außenbordeinsatzes	85
4.3.4.3 Diskussion.....	87
4.3.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse bezüglich der externen Einflussfaktoren	88
4.4 Untersuchung der moderierenden Faktoren.....	91
4.4.1 Der Einfluss der <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i> auf die feinmotorische Leistung.....	91
4.4.1.1 Einfluss der <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i> unter Standardbedingungen	92
4.4.1.1.1 Methode.....	92
4.4.1.1.1.1 Stichprobe	92
4.4.1.1.1.2 Aufbau	92
4.4.1.1.1.3 Versuchsablauf	93
4.4.1.1.2 Ergebnisse.....	93
4.4.1.1.3 Diskussion.....	94
4.4.1.2 Der Einfluss der <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i> unter Bedingungen der Telemanipulation	95
4.4.1.2.1 Methode	95
4.4.1.2.1.1 Stichprobe	95
4.4.1.2.1.2 Aufbau	95
4.4.1.2.1.3 Versuchsablauf	95
4.4.1.2.2 Ergebnisse	96
4.4.1.2.3 Diskussion	97
4.4.1.3 Der Einfluss der <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i> auf die feinmotorische Leistung unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes	98
4.4.1.3.1 Methode	98
4.4.1.3.1.1 Stichprobe	98
4.4.1.3.1.2 Aufbau	98
4.4.1.3.1.3 Versuchsablauf	98
4.4.1.3.2 Ergebnisse	99
4.4.1.3.3 Diskussion	100
4.4.2 Der Einfluss der <i>Handlungskontrolle</i> auf die feinmotorische Leistung.....	101
4.4.2.1 Der Einfluss der <i>Handlungskontrolle</i> unter Standardbedingungen	101
4.4.2.1.1 Methode	102
4.4.2.1.1.1 Stichprobe	102
4.4.2.1.1.2 Aufbau	102
4.4.2.1.1.2 Versuchsablauf	102
4.4.2.1.2 Ergebnisse	102
4.4.2.1.3 Diskussion	105
4.4.2.2 Der Einfluss der <i>Handlungskontrolle</i> unter Bedingungen eines Telemanipulationsszenarios	105
4.4.2.2.1 Methode	106
4.4.2.2.1.1 Stichprobe	106

4.4.2.2.1.2 Aufbau	106
4.4.2.2.1.3 Versuchsablauf	106
4.4.2.2.2 Ergebnisse	107
4.4.2.2.3 Diskussion	108
4.4.2.3 Der Einfluss der <i>Handlungskontrolle auf die feinmotorische Performanz</i> unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes	108
4.4.2.3.1 Methode	109
4.4.2.3.1.1 Stichprobe	109
4.4.2.3.1.2 Aufbau	109
4.4.2.3.1.3 Versuchsablauf	109
4.4.2.3.2 Ergebnisse	109
4.4.2.3.3 Diskussion	111
4.4.3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse bezüglich der moderierenden Faktoren	112
5 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung	115
5.1 Auswirkung auf die Praxis	118
6 Ausblick	123
Literaturverzeichnis	125
Anhang	150
A.1 Instruktion zur Montageaufgabe	150
A.2 Beschreibung der vier Validierungs-Aufgaben am Prüfstand	151
A.2.1 Schraubaufgabe	151
A.2.2 Steckaufgabe	151
A.2.3 Kabellegeaufgabe	152
A.2.4 Schaltaufgabe	153
A.3 Ergebnisse der Validierung des Prüfstandes	154
A.3.1 Perzentile der Handvermessung	154
A.3.2 Ausreißerbereinigung	155
A.3.3 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten	155
A.3.4 Ergebnisse des Validierungsexperimentes für die linke Hand	156
A.4 Ergebnisse des Experiments zur <i>Destabilisierung</i>	156
A.4.1 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten	156
A.5 Ergebnisse des Experiments zur <i>Blickfeldeinschränkung</i>, Reduktion der	157
<i>Beweglichkeit</i> und der <i>taktilen Wahrnehmung</i> der Hände	157
A.5.1 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten	157
A.5.2 Ergebnisse der Post hoc Analyse nach Siegel et al. (1988)	157
A.6 Materialien und Ergebnisse des Telemanipulations-Experiments	160
A.6.1 Auszüge aus dem Fragebogen zum Präsenzerleben	160
A.6.2 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung	160
A.6.3 Analyse des Zusammenhangs zwischen Präsenzerleben und Performanz	161

A.7 Überprüfung der Normalverteilung der Daten beim Unterwasserszenario	162
A.8 Ergebnisse der Testreihe zur <i>konzentrierten Aufmerksamkeit</i>.....	163
A.8.1 Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung und <i>konzentrierter Aufmerksamkeit</i> unter Standardbedingungen.....	163
A.8.1.1 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung.....	163
A.8.1.2 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung	164
A.8.1.3 Ergebnisse der Korrelationsberechnung nach Spearman.....	164
A.8.2 Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung und <i>konzentrierter Aufmerksamkeit</i> unter Bedingungen der Telemanipulation	164
A.8.2.1 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung	165
A.9 Punkt-biserialer Korrelation.....	166

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Telemanipulationssystem (DLR) mit den entsprechenden Komponenten.....	1
Abb. 2: Gegenüberstellung der Szenarien Telemanipulationssystem und simulierter EVA.....	8
Abb. 3: Grafische Darstellung der möglichen moderierenden und externen Einflussfaktoren	11
Abb. 4: Grafische Darstellung der zu betrachtenden Einflussfaktoren auf die Feinmotorik.....	15
Abb. 5: Grafische Darstellung der zu betrachtenden Einflussfaktoren	20
Abb. 6: Modell zur Differenzierung von Aufmerksamkeit und Konzentration	22
Abb. 7: Zielobjekte; Itembeispiel mit Zielobjekten und Distraktoren (Brickenkamp, 2002)	24
Abb. 8: Grafische Darstellung der zu betrachtenden Einflussfaktoren auf die Feinmotorik.....	25
Abb. 9: Grafische Darstellung der zu betrachtenden Einflussfaktoren	32
Abb. 10: Grafische Darstellung der Einflussfaktoren.....	36
Abb. 11: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden Einflussfaktoren	39
Abb. 12: Die Aufgaben der Motorischen Leistungsserie	48
Abb. 13: Prüfstand versehen mit den entsprechenden Montageobjekten.....	49
Abb. 14: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs für eine Versuchsperson	50
Abb. 15: Versuchsperson vor dem Prüfstand in einer stabilen, sitzenden Haltung.....	59
Abb. 16: Systematische Darstellung des Versuchsablaufs.....	60
Abb. 17: (a) worky® Thermo Winterhandschuhe, (b) worky®Green Grip Strickhandschuhe	64
Abb. 18: (a) Helm von der Seite, (b) Helm mit den Halskrausen	65
Abb. 19: Systematische Darstellung eines exemplarischen Versuchsablaufs	66
Abb. 20: (a) Vergleichsbedingung, (b) Versuchsperson mit Handschuhen.....	66
Abb. 21: Grafische Darstellung der Mediane der Bearbeitungszeiten der einzelnen Aufgaben.....	68
Abb. 22: Die durch den Helm induzierte Reduktion des normalen Blickfeldes.....	70
Abb. 23: Teleoperator mit dem am Gestell fixierten Prüfstand	73
Abb. 24: Proband mit Head Mounted Display (HMD) und Operator	73
Abb. 25: Versuchsperson mit Head Mounted Display.....	74
Abb. 26: Exemplarische Darstellung des Versuchsablaufs für einen Probanden.....	75
Abb. 27: Gegenüberstellung der Szenarien Telemanipulationssystem und simulierter EVA.....	78
Abb. 28: Wasserfester Prüfstand unter Wasser.....	81
Abb. 29: Versuchsperson und Versuchsleiter unter Wasser.....	82
Abb. 30: Exemplarische Darstellung eines Versuchsdurchlaufes für einen Probanden.....	83
Abb. 31: Versuchsperson ohne (a) und mit Handschuhen (b) unter Wasser vor dem Prüfstand	83
Abb. 32: Darstellung der Mediane der drei Szenarien über alle Aufgaben.....	86
Abb. 33: Grafische Darstellung der betrachteten Einflussfaktoren.....	89

Abb. 34: Grafische Darstellung der betrachteten Einflussfaktoren auf die Feinmotorik.....	112
Abb. 35: Grafische Darstellung der möglichen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik.....	116
Abb. 36: Die zur Validierung verwendete Schraube DIN 961 M10 x 1	151
Abb. 37: (a) Prüfstand, (b) Ausschnitt des Prüfstands mit der markierten Schraube	151
Abb. 38: Prüfstand mit (a) geöffnetem Stecker und (b) geschlossener Steckverbindung	152
Abb. 39: (a) Prüfstand mit gelöstem Kabel, (b) Kabel in Kreisform verlegt.....	152
Abb. 40: Der Prüfstand mit verschlossenem Kästchen.....	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die <i>Feinmotorik</i> -Faktoren nach Fleishman (1972)	12
Tabelle 2: Sechs bimanuelle Subtests der Motorischen Leistungsserie	54
Tabelle 3: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der rechten Hand.....	56
Tabelle 4: Mediane und Stichprobenumfang der drei Szenarien über alle Aufgaben hinweg.....	86
Tabelle 5: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der rechten Hand.....	93
Tabelle 6: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der linken Hand.....	94
Tabelle 7: Korrelationstabelle über alle Aufgaben mit und ohne <i>Zeitverzögerung</i>	96
Tabelle 8: Korrelationstabelle über alle Aufgaben mit und ohne Handschuhe	99
Tabelle 9: Korrelationstabelle über alle Subtests der Motorischen Leistungsserie.....	103
Tabelle 10: Korrelationstabelle über die Aufgaben am Prüfstand	104
Tabelle 11: Korrelationstabelle über die Leistung im Telemanipulationsszenario	107
Tabelle 12: Korrelationstabelle über die Leistung im Telemanipulationsszenario	108
Tabelle 13: Korrelationstabelle über die Leistung im Unterwasserszenario ohne Handschuhe...110	
Tabelle 14: Korrelationstabelle über die Leistung im Unterwasserszenario mit Handschuhen ...111	
Tabelle 15: Auflistung wesentlichher Bewertungsaspekte für Raumfahrtmissionen	119
Tabelle 16: Gegenüberstellung und Bewertung der bemannten und Telerobotikmission	121
Tabelle 17: Perzentile der Finger- und Daumenmaße der weiblichen Versuchspersonen.....	154
Tabelle 18: Perzentile der Handmaße der weiblichen Versuchspersonen	154
Tabelle 19: Perzentile der Finger- und Daumenmaße der männlichen Versuchspersonen	154
Tabelle 20: Perzentile der Handmaße der männlichen Versuchspersonen	154
Tabelle 21: Anzahl der Ausreißer mit z-Werten über 3.29.....	155
Tabelle 22: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die rechte Hand	155
Tabelle 23: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die linke Hand.....	155
Tabelle 24: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die Aufgaben am Prüfstand.....	155
Tabelle 25: Korrelationsmatrix für die Ergebnisse der linken Hand.....	156
Tabelle 26: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die sitzende, stabile Bedingung	156
Tabelle 27: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die destabilisierte Bedingung	156
Tabelle 28: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben und Bedingungen	157
Tabelle 29: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Schraubaufgabe.....	158
Tabelle 30: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Steckaufgabe.....	158
Tabelle 31: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Schaltaufgabe	158
Tabelle 32: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Kabelaufgabe	159

Tabelle 33: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben	160
Tabelle 34: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen Präsenzerleben und Performanz ...	161
Tabelle 35: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen Präsenzerleben und Performanz in der Bedingung mit <i>Zeitverzögerung</i>	161
Tabelle 36: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests der Daten aus dem Unterwasser- und dem Telemanipulationsszenario.....	162
Tabelle 37: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle verwendeten Subtests der Motorischen Leistungsserie und die <i>konzentrierte Aufmerksamkeit</i>	163
Tabelle 38: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben	164
Tabelle 39: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen <i>konzentrierter Aufmerksamkeit</i> und der Leistung hinsichtlich der Montageaufgaben.....	164
Tabelle 40: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben	165

Abkürzungsverzeichnis

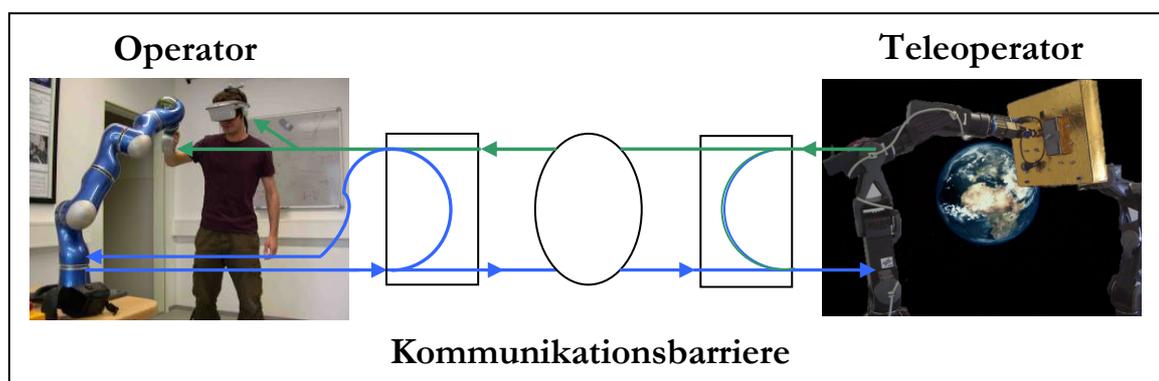
Abb.	Abbildung
ADS	Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom
ANOVA	Analysis of Variance
°C	Grad Celsius
CMAS	Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques
χ^2	Chi-Quadrat
D	beobachteter Distributions-Wert
df	Freiheitsgrad
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoF	Degrees of Freedom
3D	dreidimensional
et al.	et alia, und andere
EVA	Extra-vehicular Activity
g	Erdschwerebeschleunigung $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
HAKEMP	Handlungskontrolle nach Erfolg, Misserfolg und prospektiv
HMD	Head Mounted Display
HOM	Handlungsorientierung nach Misserfolg
HOP	Handlungsorientierung bei der Handlungsplanung
HOT	Handlungsorientierung bei der Tätigkeitsdurchführung
ISS	Internationale Raumstation
KL-Z	Kolmogorov-Smirnov-Z-Wert
LEO	Low Earth Orbit
LOM	Lageorientierung nach Misserfolg
LOP	Lageorientierung bei der Handlungsplanung
LOT	Lageorientierung bei der Tätigkeitsdurchführung
m	Meter
Mdn	Median
ml	Milliliter
MLS	Motorische Leistungsserie
mm	Millimeter
ms	Millisekunden
MTM	Methods-time Measurement

n	Stichprobenumfang
o.J.	ohne Jahr
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
Phantom	Personal haptic interface mechanism
PVC	Polyvinylchlorid
r^2	Determinationskoeffizient
ROTEX	Roboter-Technologie-Experiment
ROKVISS	Robotik-Komponenten-Verifikation auf der ISS
r_s	Korrelationskoeffizient nach Spearman
r_{pbis}	Korrelationskoeffizient der punkt-biserialen Korrelation
s	Sekunden
T	T-Statistik
Tab.	Tabelle
TU	Technische Universität
vgl.	vergleiche
\bar{x}	Mittelwert

1 Einleitung

Bei einer großen Anzahl von Montagetätigkeiten hängt der Erfolg oder die Qualität des Resultates nicht zuletzt von der Güte der feinmotorischen Leistung des Bearbeiters ab. Dies bezieht sich nicht nur auf Tätigkeiten auf der Erde, sondern auch auf den extraterrestrischen Raum. Gerade im Bereich des On-orbit-Servicing und damit bei Reparaturen und Montagetätigkeiten im Orbit wird die Performanz der Menschen durch die widrigen äußeren Umstände beeinflusst. Dabei sind Fehler in dieser Umgebung nicht selten mit Gefahren für die beteiligten Personen verbunden.

Neben den starken Temperaturschwankungen, dem Vakuum sowie der *Mikrogravitation* herrschen im Orbit hohe Konzentrationen an belastender Strahlung. Aus diesen Gründen ist der Mensch während entsprechender Außenbordeinsätze mit besonderen Raumfahrtanzügen, den sogenannten Extravehicular Activity Spacesuits (EVA Spacesuits), ausgestattet (Thomas, 2006). Diese Anzüge bieten zwar einerseits Schutz vor den widrigen Bedingungen im All, schränken den Menschen jedoch andererseits in seiner *Beweglichkeit* und seinem Blickfeld ein. Neben dieser Einschränkung wirkt die ungewohnte *Mikrogravitation* zusätzlich beeinträchtigend auf den Organismus und den menschlichen Bewegungsapparat (Parrish, 1999; Thomas, 2006). Diese Einschränkungen können zu Einbußen hinsichtlich der feinmotorischen Leistung bei den entsprechenden Montage- und Reparaturtätigkeiten im Orbit führen. Zusätzlich sind die kostenaufwendigen und zeitintensiven Außenbordeinsätze trotz weitreichender Vorsichtsmaßnahmen nach wie vor mit einem erheblichen Sicherheitsrisiko für den Menschen verbunden. Aus diesem Grund wird nach Alternativen und Unterstützungsmöglichkeiten für die entsprechenden Außenbordeinsätze von Astronauten¹ gesucht (McCain, 1991).



**Abb. 1: Telemanipulationssystem (DLR) mit den entsprechenden Komponenten
In Anlehnung an: Sonderforschungsbereich 453, TU München**

¹ Im Folgenden wird der Begriff „Astronaut“ geschlechtsneutral und gleichbedeutend mit den Bezeichnungen „Kosmonaut“ und „Taikonaut“ verwendet.

Eine Möglichkeit zur Unterstützung von Astronauten beim On-orbit-Servicing könnten die Telemanipulationssysteme darstellen (King, 2001). Diese Systeme bestehen grundsätzlich aus einem Operator, einem Rechnersystem und einem Teleoperator (Hung, 2003).

Durch diesen Aufbau können Aktionen in einer entfernten Umgebung durchgeführt werden (vgl. Abb. 1). Folglich könnten mithilfe entsprechender Telemanipulationssysteme Reparaturen und Wartungsarbeiten vorgenommen werden, ohne dass ein Mensch direkt vor Ort in der entfernten Umgebung physisch präsent sein muss. Bereits während der Robotik-Komponenten-Verifikation auf der Internationalen Raumstation (ROKVISS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kooperation mit der Europäischen Weltraumbehörde (ESA) konnte ein Telemanipulationssystem seine Raumfahrttauglichkeit unter Beweis stellen (Albu-Schäffer, 2006). Eine Grundlage für diesen Aufbau lieferte der DLR-Leichtbauroboter. Diese Roboter finden in mehreren Telemanipulationssystemen Verwendung. Eine nähere Betrachtung entsprechender Telemanipulationssysteme im Hinblick auf ihre Tauglichkeit, Astronauten beim On-orbit-Servicing zu unterstützen, ist daher sinnvoll. Dabei sollte darauf hingewiesen werden, dass die Telemanipulationssysteme ihrerseits Faktoren aufweisen, die die Performanz des Benutzers beeinträchtigen könnten, z. B. eine *Zeitverzögerung* bei der Datenübertragung (Keshavarzpour, 2008). Die entsprechenden gestalterischen Faktoren eines dieser Telemanipulationssysteme des DLR werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt und diskutiert.

1.1 Gestalterische Aspekte des Telemanipulationssystems

Im Folgenden werden Gestaltungsaspekte eines Telemanipulationssystems des DLR im Hinblick auf die Bearbeitung von Montageaufgaben mit hohem feinmotorischen Anteil diskutiert. Der Betrachtung werden das Eingabegerät, die Anzahl der Freiheitsgrade, die sensorische Rückmeldung, die *Zeitverzögerung* in der Datenübertragung sowie das Ausgabegerät unterzogen. Dabei stehen die ergonomischen Aspekte zur möglichen Beeinflussung der menschlichen Performanz im Vordergrund.

Einen Ansatzpunkt bietet hierbei das Eingabegerät. Dieses besteht bei dem betrachteten Telemanipulationssystem aus einem Leichtbauroboterarm mit integriertem Force-Feedback. Dieser Aufbau gehört, ähnlich wie die Mausgeräte und die Joysticks, zu den abstrakten Eingabegeräten in Telemanipulationssystemen (Deml, 2004). Die Steuerung ist nicht auf den ersten Blick offensichtlich und kann daher nicht als intuitiv bezeichnet werden. Datenhandschuhe oder Exoskeletons bieten hingegen die Möglichkeit einer integralen Steuerung und einer intuitiveren Bewegung des

Benutzers bei der Handhabung des Telemanipulationssystems. Jedoch ist der Operator bei den bisher beschriebenen Aktoren permanent mit selbigen in Kontakt. Diese permanente Berührung mit dem Eingabegerät beeinträchtigt die Bewegungsfreiheit und fühlt sich für den Menschen unnatürlich an (Nojima, 1999). In diesem Hinblick bietet das Encounter-type-Display mit integriertem Bewegungstracking eine vielversprechende Gestaltungsoption. Es ermöglicht dem menschlichen Operator, sich frei im Arbeitsraum zu bewegen. Erst wenn ein zu manipulierendes Objekt gezielt berührt oder gegriffen wird, wird dem Benutzer durch das Display ein Kontakt zurückgemeldet (Nojima, 1999). Der Mensch fühlt somit, was er in der entfernten Umgebung sieht, muss jedoch keinen Aktor steuern, um frei durch die entfernte Umgebung zu navigieren. Diese Art der Manipulation von Objekten und der Bewegung durch den Raum entspricht dem natürlichen Vorgehen des Menschen. Die Implementierung eines Encounter-type-Displays könnte daher eine positive Beeinflussung der feinmotorischen Performanz nach sich ziehen.

Ein weiteres Gebiet mit entsprechenden Gestaltungsmöglichkeiten im Hinblick auf eine Unterstützung der Performanz stellen die Anzahl und die Auswahl der Freiheitsgrade (degree of freedom, DoF) dar. Grundsätzlich werden die Freiheitsgrade nach den Bewegungsdimensionen auf der X-, Y- und Z-Achse in drei rotatorische und drei translatorische Freiheitsgrade unterteilt (vgl. Kapitel 3.3.4.2). Die Hand, das wichtigste Instrument des Menschen bei der Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben, verfügt über 25 Freiheitsgrade (Kapandji, 1982). Die Steuerung, Kontrolle und sinnvolle Nutzung einer entsprechenden Anzahl von Freiheitsgraden in einem Telemanipulationssystem erscheint jedoch als kontraproduktiv. Zwar ist von einer generellen Aussage, dass ein System mit weniger Freiheitsgraden eine bessere Performanz nach sich zieht als ein Aufbau mit mehr DoFs, abzusehen (Pongrac, 2008). Dennoch sollte das jeweilige Telemanipulationssystem auf die Freiheitsgrade beschränkt bleiben, die tatsächlich für die jeweilige Aufgabe benötigt werden (vgl. Kapitel 3.3.4.2). Das für die Studie verwendete Telemanipulationssystem verfügt, vergleichbar mit dem menschlichen Arm, über sieben sowohl translatorische als auch rotatorische DoFs. Diese Anzahl bietet dem Operator die Möglichkeit, den Slave in allen benötigten Dimensionen zu bewegen, und verhindert gleichzeitig eine Überforderung des Benutzers durch zu viele Freiheitsgrade (Shields, 1997). Um dem Operator dennoch die Möglichkeit zu geben, ausschließlich die für die jeweils spezifische Aufgabe nötigen Freiheitsgrade zu nutzen, könnten die temporär überflüssigen Freiheitsgrade jeweils deaktiviert werden (Ryu, 2003). Dabei muss jedoch die visuelle Rückmeldung mit der propriozeptiven Wahrnehmung des Menschen übereinstimmen (Djajadiningrat, 1997), um die intuitive Steuerung nicht zu gefährden. Zusätzlich böte eine Aufteilung der translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade auf zwei unterschiedliche Eingabegeräte eine mögliche Unterstützung der feinmotorischen Leistung. Entsprechende

Vorschläge werden in der Literatur kontrovers diskutiert (Masliah, 2000), sollten jedoch als weitere Option der ergonomischen Gestaltung in Betracht gezogen werden.

Prinzipiell kann die Ausgabe eines Telemanipulationssystems zum einen in die Dimension der *Tiefe* und zum anderen in die Dimension der *Breite* aufgeteilt werden (Zhao, 2003). Beide Dimensionen beziehen sich auf die sensorische Ausgabe der Telemanipulationssysteme. Die *Tiefe* umfasst dabei das Ausmaß, in dem das jeweilige Sinnessystem angesprochen wird. Die *Breite* hingegen beschreibt die generelle Anzahl der bedienten Sinnesmodalitäten. Beide Aspekte sollten bei der Gestaltung eines Telemanipulationssystems Berücksichtigung finden. In diesem Zusammenhang ist die visuelle Wahrnehmung eine Komponente, die hinsichtlich der Performanz eine wichtige Einflussgröße darstellt (Pongrac, 2008). Nicht nur ein genügend großes Blickfeld, sondern auch eine dreidimensionale Sicht (3D) sollte dem menschlichen Operator zugänglich gemacht werden. Eine entsprechende Darstellung der entfernten Umgebung in 3D, in diesem Fall des Prüfstandes, konnte durch die Verwendung mehrerer Kameras und des HMDs als visuelles Ausgabegerät realisiert werden (vgl. Kapitel 4.3.3). Die dreidimensionale Abbildung der entfernten Umgebung ist für eine möglichst realistische und damit für den Menschen vertraute Darstellung sinnvoll und sollte in Zukunft beibehalten werden.

Gerade im Bereich der Weltraummontage werden die Telemanipulationssysteme mit mehreren Kameras ausgestattet (McCain, 1991; Andary, 1993; Parrish, 1999), wengleich die Übertragung von visueller Information eine Vergrößerung der zu übertragenden Datenpakete nach sich zieht und damit die Gefahr der *Zeitverzögerung* forciert. Dennoch könnte die Implementierung einer zusätzlichen Kamera direkt auf dem Kopf des Teleoperators eine mögliche Verbesserung des visuellen Feedbacks darstellen. Durch eine derartige Erweiterung könnte verhindert werden, dass der Teleoperator selbst die Sicht auf das zu manipulierende Objekt verdeckt. Entsprechend wurde bereits in der erfolgreichen ROTEX-Mission (Reintsema, 2007) eine Kamera auf dem Slave fixiert. Zwar ist mit einem derartigen Aufbau das periphere Sehen des Menschen eingeschränkt, jedoch beschreibt Stassen (1997) diese Sichtfeldeinschränkung als Hilfe zur Fokussierung des jeweils wichtigen Bereiches. Eine Fokussierung kann auch durch eine Option, die das Heranzoomen an wichtige Objekte erlaubt, erreicht werden. Zusätzlich spielt gerade bei der Montage im Weltraum die Beleuchtung eine wichtige Rolle. Die wechselnden Lichtverhältnisse in Abhängigkeit zum Stand der Sonne erfordern künstliche Lichtquellen, um die entfernte Umgebung ausreichend zu beleuchten. Telemanipulationssysteme, die im Bereich des On-orbit-Servicing eingesetzt werden, weisen daher unterschiedliche Lichtquellen auf (McCain, 1991). Die gezielte Beleuchtung der zu bearbeitenden Objekte in der entfernten Umgebung könnte daher die

feinmotorische Performanz während der Arbeit mit dem betrachteten Telemanipulationssystem im Hinblick auf die *Tiefe* unterstützen.

In Bezug auf die Dimension der *Breite* wurde neben der visuellen Rückmeldung dem Benutzer des Telemanipulationssystems haptisches Feedback über den Force-feedback-Roboterarm präsentiert. Das Öffnen und Schließen des Greifers erfolgt über einen Kippschalter am Eingabegerät. Dabei kann das System nicht haptisch übermitteln, ob z. B. der Backengreifer des Teleoperators geöffnet oder geschlossen ist oder ob ein Objekt erfolgreich gegriffen wurde. Es kann lediglich über das visuelle Feedback erkannt werden, ob das zu manipulierende Objekt (z. B. eine Schraube) tatsächlich vom Greifer erfolgreich erfasst wurde. Diese einseitige Rückmeldung könnte Fehler in der Bedienung hervorrufen. Eine Erweiterung der haptischen Rückmeldung z. B. durch das bereits beschriebene Encounter-type-Display könnte hier eine Verbesserung darstellen. Durch dieses System würde der Benutzer direkt fühlen, ob er das Objekt erfolgreich erfasst hat.

Die Implementierung eines auditiven Feedbacks bietet ebenfalls eine Möglichkeit, die *Breite* des Telemanipulationssystems zu erweitern. Die Berührung eines Objektes in der entfernten Umgebung könnte dadurch nicht nur gesehen und gefühlt, sondern zusätzlich gehört werden. Die Darbietung einer klanglichen Ausgabe würde die Performanz des menschlichen Operators möglicherweise erhöhen (Strassen, 1997). Diesbezüglich konnten bereits Lederman et al. (2002) in einer Untersuchung zur zusätzlichen Integration von auditivem Feedback positive Ergebnisse berichten. Ein entsprechend multimodales Feedback würde zusätzlich der Rückmeldung aus der natürlichen Umgebung des Menschen am nächsten kommen. Dies würde wiederum die Gestaltung des Telemanipulationssystems intuitiver werden lassen und entsprechend die Steuerung erleichtern.

Wie in Kapitel 3.3.4.3 beschrieben wird, hat die jeweilige Länge der *Zeitverzögerung* einen Einfluss auf die Performanz bei der Arbeit mit Telemanipulationssystemen. Nach wie vor sind in Kommunikationssystemen zeitliche Verzögerungen zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen unvermeidlich (MacKenzie, 1993; Sheridan, 1993; Oboe, 2003). Jedoch konnte in den letzten Jahren das Zeitintervall bei der Datenübertragung von der Erde zu einem Space Shuttle im Orbit von 5 bis 7 s (Reintsema, 2007) auf 600 ms reduziert werden. Eine haptische *Zeitverzögerung* kann jedoch bis maximal 300 ms vom Menschen kompensiert werden, eine visuelle bis maximal 1000 ms (Held, 1966; Ottensmeyer, 2000). Eine Reduktion auf unter 300 ms könnte somit eine merkliche Verbesserung der feinmotorischen Leistung bedeuten. Daher ist die Verringerung oder Eliminierung der *Zeitverzögerung* vielversprechend. Eine derartige Reduktion kann durch eine direkte Da-

tenübertragung von der Bodenstation zum Teleoperator erreicht werden. Durch die Rotation der Erde ist dies allerdings nur für ein geringes Zeitfenster möglich. So lange, wie der Teleoperator im Orbit sich über der Bodenstation befindet, kann diese direkte Verbindung hergestellt werden. Dreht die Erde sich weiter, so muss die direkte Kommunikation durch eine Verbindung über einen zwischengeschalteten Satelliten ersetzt werden.

Ein weiterer Gestaltungsbereich, der Beachtung finden sollte, ist die Form der Endeffektoren. Beim hier betrachteten Telemanipulationssystem besteht dieser aus einem Parallelgreifer (vgl. Kapitel 4.3.3). Dieser birgt bei der Bearbeitung feinmotorischer Aufgaben unterschiedliche Schwierigkeiten (Turki, 1995). Die Struktur der Oberfläche des zu manipulierenden Objektes und der Umgebung kann nicht durch einen entsprechenden Greifer erfasst werden (Shimoga, 1992). Gerade die Oberfläche gibt jedoch Auskunft über die Griffbarkeit und damit auch die Stabilität des Haltens während der Manipulation (Wing, 1996; Flanagan, 2000). Objekte mit uneinheitlicher und unebener Form oder Oberfläche können mit einem Parallelgreifer nicht grundsätzlich ohne Schwierigkeiten erfasst werden. Zusätzlich können kleine Korrekturen in der Bewegung nicht durch den Greifer allein bewerkstelligt werden (Shimoga, 1992). Hierzu muss der gesamte Roboterarm neu ausgerichtet werden. Dies kostet Zeit und setzt die Natürlichkeit der Bewegung des Menschen bei der Bearbeitung herab. Die Applizierung einer anthropomorphen Hand als Endeffektor könnte die Performanz des menschlichen Operators bei feinmotorischen Aufgaben im Vergleich zu einem Parallelgreifer erhöhen. Bereits mit einem Aufbau bestehend aus drei Fingern können laut Shimoga (1992) viele feinmotorische Aufgaben besser bewältigt werden. Allerdings werden in der entsprechenden Untersuchung weder Angaben über die Art der feinmotorischen Aufgabe noch über das entsprechende Messkriterium für die Performanz angegeben. Dennoch wurden im Laufe der letzten Jahre unterschiedliche Roboterhände entwickelt (Jacobson, 1984; Bicchi, 1999; Borst, 2002; Shadow Robot Company, 2004; Borst, 2003; Wie, 2005; Kurillo, 2007), die eine vielversprechende Entwicklung hinsichtlich feinmotorischer Leistung im Telemanipulationssystemen aufzeigen. Ob diese Endeffektoren unter Bedingungen der Weltraummontage und damit unter Bedingungen der *Mikrogravitation* akzeptable Leistungen erzielen, sollte jedoch vorab in Studien untersucht werden (Lovchik, 1999).

Die Tatsache, dass das Telemanipulationssystem lediglich einen Roboterarm als Ausgabegerät aufweist, setzt den Grad der intuitiven Bedienung zusätzlich herab. Der Benutzer kann von seiner bisherigen Erfahrung, feinmotorische Aufgaben mit zwei Armen und Händen zu bearbeiten, nicht profitieren. Bei der Arbeit mit einem Roboterarm als Ausgabegerät kann der Vergleich zu einem Menschen mit einem auf den Rücken gebundenen Arm gezogen werden (Stassen, 1997).

Die Person wird dadurch stark eingeschränkt. Daher ist die Kooperation beider Arme und Hände bei manuellen Aufgaben besonders wichtig (Guiard, 1987). Die Hände haben zudem jeweils unterschiedliche Funktionen. Bei Rechtshändern ist die linke Hand z. B. für die Stabilisierung, die rechte Hand für die besonders feinen Bewegungen zuständig (Stassen, 1997). Bei Linkshändern verhält es sich genau andersherum. Der Händigkeit des Bedieners sollte daher bei Telemanipulationssystemen Beachtung finden (Fiorini, 1987). Ein System mit zwei Roboterarmen mit jeweils an die Händigkeit angepasster Ausrichtung könnte eine mögliche Verbesserung gegenüber einem einarmigen Aufbau darstellen.

In diesem Kapitel wurden ergonomische Gestaltungsaspekte des Telemanipulationssystems zur Unterstützung der feinmotorischen Performanz diskutiert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein System mit einem Encounter-type-Display als Eingabegerät und einem sowohl in der *Tiefe* als auch in der *Breite* umfassenden sensorischen Feedback, ohne *Zeitverzögerung* und mit einer für die jeweilige Aufgabe nötigen Anzahl von Freiheitsgraden versehen, eine optimale feinmotorische Performanz vermuten ließe. Zusätzlich sollte das System mit einem zweiarmigen Ausgabegerät mit einer anthropomorphen Roboterhand als Endeffektoren ausgestattet sein. Natürlich muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass zum aktuellen Zeitpunkt ein solches System technisch äußerst schwer zu realisieren ist. Dabei ist die Gestaltung nicht nur wichtig für die Aufgabenleistung, sondern auch zum Schutz der Umgebung und des Anwenders vor Beschädigung (Roderick, 2004). Ein entsprechendes raumfahrttaugliches Telemanipulationssystem existiert zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht. Um dennoch eine möglichst realistische Betrachtung bezüglich der Leistung entsprechender Telemanipulationssysteme zu ermöglichen, wird sich die im nachfolgenden Kapitel formulierte Fragestellung auf ein existierendes und in der Raumfahrt etabliertes Telemanipulationssystem des DLR beziehen.

2 Fragestellung

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Fragestellungen für die experimentelle Versuchsreihe dieser Arbeit vorgestellt. Zusätzlich wird die Beeinflussung der Datenerhebung durch mögliche Lerneffekte aufgezeigt und eine Methode zur Behebung dieses Problems vorgestellt.

In mehreren Studien (Andary, 1993; Parrish, 1999; Roderick, 2004) wurden Telemanipulationssysteme für das On-orbit-Servicing entworfen und aufgebaut. Jedoch wurden keine Klassifikation und Analyse der Aufgabenleistung im Hinblick auf die feinmotorische Performanz vorgenommen. Selbiges gilt für das in dieser Arbeit verwendete Telemanipulationssystem. Diesem Aspekt sollte in künftigen Untersuchungen Rechnung getragen werden. Es gilt daher zu analysieren, ob die im Robotersystem auftretenden Einflussfaktoren eine stärkere Beeinträchtigung der feinmotorischen Leistung darstellen als die Einflussfaktoren eines Außenbordeinsatzes. Um eine experimentelle Gegenüberstellung realisieren zu können, wird ein etabliertes Telemanipulationssystem mit einem simulierten Außenbordeinsatz verglichen (vgl. Abb. 2). Dabei steht die feinmotorische Leistung als Vergleichskriterium im Mittelpunkt der Betrachtung.

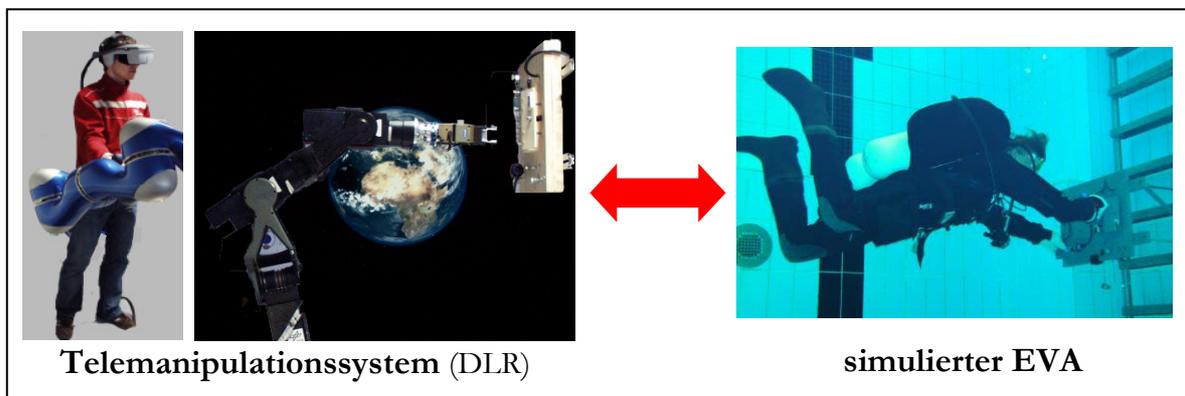


Abb. 2: Gegenüberstellung der Szenarien Telemanipulationssystem und simulierte EVA (extravehicular activity)

Eine geeignete Methode, einen Außenbordeinsatz auf der Erde zu simulieren, ist ein Unterwasserszenario. Dabei hat das Wasser einen annähernd vergleichbar destabilisierenden und hinsichtlich der Mobilität einschränkenden Einfluss auf den menschlichen Organismus wie die *Mikrogravitation*.

Abgesehen von den äußeren widrigen Bedingungen gibt es zusätzlich mögliche moderierende Faktoren, die beim Menschen zu unterschiedlichen Leistungen führen können. Zu diesen Faktoren zählen die *konzentrierte Aufmerksamkeit* und die *Handlungskontrolle*. Die Bearbeitung von Aufga-

ben mit einer hohen Komponente an feinmotorischer Anforderung und in ungewohnter Umgebung bedarf eines hohen Maßes an Fokussiertheit seitens des Menschen. Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* des Einzelnen muss für eine optimale Bearbeitung vermutlich auf einen kleinen Bereich seiner Umgebung beschränkt bleiben (Eriksen, 1986). Dieser Bereich kann die eigenen Hände einschließen, kann jedoch auch nur auf die Fingerspitzen beschränkt bleiben. Die Vermutung, dass die *konzentrierte Aufmerksamkeit* bei der Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben eine bedeutende Rolle spielen könnte, liegt daher nahe und soll im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden.

Zusätzlich können Fehler oder Misserfolge zu einer Frustrationsreaktion und somit zu Folgefehlern führen. Die *Handlungskontrolle* umfasst diese unterschiedlichen Ausprägungen des Menschen während der Handlungsplanung, Handlungsdurchführung und nach einem Misserfolgserlebnis. Die Untersuchung dieses Konstruktes soll Aufschluss darüber geben, ob tatsächlich die äußeren Einflüsse eine unterschiedliche Performanz hervorrufen oder/und der Zustand und die unterschiedlich ausgeprägten Fähigkeiten des Menschen. Aus den entsprechenden Resultaten könnte geschlussfolgert werden, ob grundsätzlich Menschen mit bestimmten Ausprägungen oder in spezifischen Zuständen die erforderlichen feinmotorischen Aufgaben bearbeiten sollten oder bezüglich dieser Konstrukte keine gesonderte Vorselektion notwendig ist.

Ein häufig diskutierter Aspekt in der experimentellen Psychologie ist der Einfluss von Lern- und Übungseffekten auf die Untersuchungsergebnisse, denen in dieser Arbeit nicht nachgegangen wird. Um einen möglichen verzerrenden Effekt auf die Performanz der einzelnen Versuchspersonen zu verhindern, wird vor jeder Datenerfassung in dieser Arbeit eine Übungsphase induziert. Dieses Training folgt dem Gesetz des *power law of practice* (Newell, 1981). Nach diesem Gesetz folgt die Zeit der Durchführung beim n-ten Durchgang bei der Bearbeitung von manipulativen Aufgaben einem Potenzgesetz (Card, 1983)

$$T_n = T_1 \cdot n^{-\alpha}$$

T_n steht im Rahmen dieses Gesetzes für die Aufgabenbearbeitung beim ersten Durchgang, α liegt nach Card et al. (1983) zwischen 0.2 und 0.6. Durch den asymptotischen Verlauf der Funktion (siehe oben) konnte berechnet werden, dass nach 25 % der Anfangszeit keine signifikante Verbesserung der Bearbeitungszeit zu erwarten ist. Die Übungsphase wird entsprechend dann als abgeschlossen bezeichnet, sobald die Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben unter 25 % der anfangs benötigten Zeit liegt. Da diesem Gesetz in den nachfolgenden Untersuchungen Rech-

nung getragen wird, kann von einer Beeinflussung oder Verzerrung der Untersuchungsergebnisse durch einen unkontrollierten Lern- bzw. Übungseffekt abgesehen werden.

3 Theoretische Grundlagen und Stand der Forschung

Das folgende Kapitel gibt einen Literaturüberblick über die bisherigen Erkenntnisse hinsichtlich der feinmotorischen Leistungsfähigkeit. Es erfolgt eine Klärung des zentralen Begriffs der *Feinmotorik* und eine Beschreibung der existierenden Einflüsse auf selbige. Dabei sind interne oder auch moderierende Faktoren (vgl. Kapitel 3.2) von externen Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 3.3) zu unterscheiden (vgl. Abb. 3).

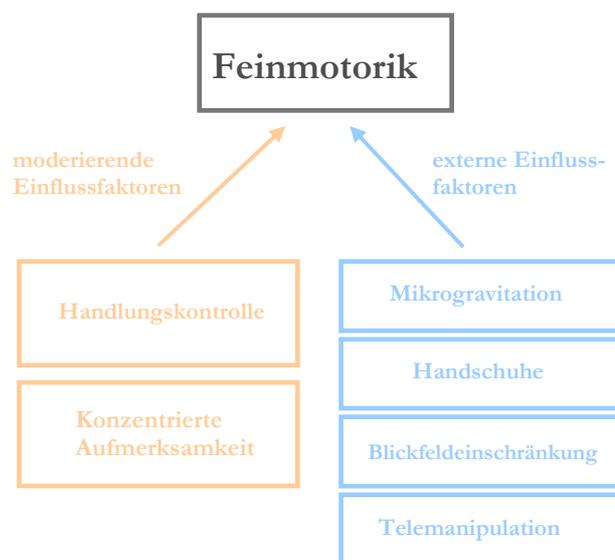


Abb. 3: Grafische Darstellung der möglichen moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

3.1 *Feinmotorik*

Der Begriff der *Feinmotorik* bezieht sich im Gegensatz zur Grobmotorik in erster Linie auf den kleinräumigen Bewegungsablauf mit relativ geringem Kraftaufwand. Gleichzeitig wird jedoch ein hohes Maß an Präzision oder Schnelligkeit bei der Ausführung feinmotorischer Bewegungen erforderlich (Meinel, 1976). Im Vergleich zu grobmotorischen Bewegungsabläufen sind weniger Muskelpartien des menschlichen Körpers involviert (Baedke, 1980; Kiphard, 1989). Demnach ist die Grobmotorik klar von der *Feinmotorik* zu unterscheiden und sollte für sich stehend untersucht werden.

Über die Zeit wurden unterschiedliche Methoden verwendet, um die feinmotorische Leistungsfähigkeit des Menschen zu erfassen, z. B. die Zielprobe, die Nachfahrprobe und die Stetigkeitsprobe (Lossagk, 1926; Koella, 1951; Vossius, 1957; Schmidtke, 1958; Schmidtke, 1960; Schmidtke, 1961; Schnauber, 1970). Zudem finden sich in unterschiedlichen Arbeiten verschiedene Klassifikationsvorschläge für die einzelnen Facetten oder Faktoren der *Feinmotorik* (Hollingworth, 1913;

Perrin; 1921; Muscio, 1922; Schorn, 1929). Die umfassendste Einteilung lieferte jedoch Fleishman im Jahre 1954. Er konnte in experimentellen Untersuchungen elf Faktoren extrahieren (vgl. Tab. 1), die jeder für sich eine Facette der *Feinmotorik* darstellen (Fleishman, 1954a; Fleishman, 1954b; Fleishman, 1962; Fleishman, 1972).

Tabelle 1: Übersicht über die *Feinmotorik*-Faktoren nach Fleishman (1972) und die entsprechenden Definitionen

<i>Feinmotorik</i>-Faktor	Definition
Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit	Geschwindigkeit, mit der Handgelenk-Finger-Bewegungen durchgeführt werden können.
Fingergeschicklichkeit	Die Fähigkeit, die Fingerbewegungen zu koordinieren, um feine Manipulationen vornehmen zu können. Dazu gehört das Greifen, Loslassen und Bearbeiten von besonders kleinen Gegenständen.
Arm-Hand-Geschwindigkeit	Die Schnelligkeit, mit der eine Person gezielte Armbewegungen bewerkstelligen kann.
Handgeschicklichkeit	Die Fähigkeit, kontrollierte und geschickte Arm-Hand-Bearbeitungen von größeren Objekten unter Zeitdruck durchzuführen.
Zielen	Das Vermögen, schnelle und präzise Bewegungen unter Mithilfe der Auge-Hand-Koordination vorzunehmen.
Arm-Hand-Ruhe	Präzise und akkurate Arm-Hand-Positionierungs-Bewegungen, die eine Minimierung des Kraftaufwandes und der Geschwindigkeit erlauben.
Reaktionszeit	Die Fähigkeit, so schnell wie möglich auf einen Stimulus zu reagieren, sobald selbiger erscheint.
Präzisionsbewegung	Die Fähigkeit, allgemeine Bewegungen kontrolliert, aber nicht überkontrolliert und präzise ausführen zu können. Dabei werden vor allem Bewegungen der großen Muskulatur angesprochen.
Koordination der Gliedmaßen	Die Fähigkeit, mehrere Körperteile simultan kontrolliert zu bewegen.
Diskriminationsfähigkeit	Die Fähigkeit, passende Orientierungsbewegungen insbesondere in Bezug auf visuelle Stimuli zu tätigen.
Psychomotorische Geschwindigkeit	Die Fähigkeit, Bewegungen permanent einem sich bewegenden Objekt hinsichtlich Geschwindigkeit und Orientierung anzupassen.

Diese elf Faktoren werden als Fähigkeiten umschrieben, die sowohl durch den Einfluss endogener (Abel, 1940) als auch exogener Faktoren entstanden sind (vgl. Kapitel 3.3). Sie umschreiben demnach allgemeingültige Fähigkeiten und sind von Fertigkeiten zu unterscheiden, die lediglich ein spezifisches Leistungsniveau innerhalb einer bestimmten Aufgabe repräsentieren.

Im Rahmen unterschiedlicher wissenschaftlicher Studien wurden die expliziten Greifprimitiven kategorisiert, die vom Menschen bei der Objektmanipulation eingesetzt werden (Rizzolatti, 1988; Buchholz, 1992). Welche Greifprimitiven genau gewählt werden, hängt von der Form, Größe und Beschaffenheit des Objektes ab (Kroemer, 1986; Goodale, 1994; Tucker, 1998; Tucker, 2001; Gentilucci, 2002). Handbewegungen werden unterschiedlich codiert je nachdem, ob die Bewegung mit oder ohne Objekt durchgeführt wird (Vainio, 2007). Für eine feinmotorische Bewegung ist ferner die Ausrichtung bzw. Orientierung der greifenden Hand von Bedeutung. Diese hängt in erster Linie von der Orientierung des Objektes ab. Unabhängig von der Form wird die Ausrichtung der Hand durch die Lage des Objektes beeinflusst. Es ist daher anzunehmen, dass die Handausrichtung durch externe und weniger durch körperinnere Begrenzungen beeinflusst wird (Roby-Brami, 2000). Die hier geschilderten Untersuchungen beziehen sich jedoch lediglich auf den manuellen Bereich bzw. den Greifraum (Zaghow, 1977) oder auch Griffraum (Häcker, 1998) und nicht auf den gesamten Arbeitsraum, der zusätzlich den sensorischen Bereich (Pflüger, 1992) beinhaltet. Innerhalb dieses Greifraums könnte z. B. eine externe Ursache für eine Veränderung hinsichtlich der *Feinmotorik* die unterschiedliche Ausrichtung der Ebene (vertikal vs. horizontal), in der sich das zu manipulierende Objekt befindetet, darstellen.

Zu den endogen gesteuerten Faktoren motorischer Leistungsveränderungen zählen Wachstums- und Reifungsprozesse. Der Wachstumsbegriff wird zumeist nur mit Bezug auf den Körper verwendet. Er beschreibt die quantitativen somatischen Veränderungen (z. B. bezüglich Körpergröße) und wird jenen Modifikationen gegenübergestellt, die sich auf qualitative Veränderungen wie Proportionsverschiebungen oder strukturelle Differenzierungsprozesse beziehen (Trautner, 1992). Unter Reifung versteht man alle Vorgänge, die aufgrund erblicher Determinierung, innen-gesteuerter Wachstumsimpulse einsetzen und in ihrem weiteren Verlauf vorwiegend von diesen gesteuert werden (Nickel, 1981). Zu diesen endogenen Ursachen könnten demnach auch das Alter und das Geschlecht des jeweiligen Menschen gehören. Aber auch die *Handlungskontrolle* (vgl. Kapitel 3.2.2) und die Konzentrationsfähigkeit als Maß für die Intensität der *konzentrierten Aufmerksamkeit* (Bleuler, 1983) (vgl. Kapitel 3.2.3) fallen in die Kategorie der endogenen Ursachen für eine mögliche Veränderung hinsichtlich der *Feinmotorik*.

Ein intergeschlechtlicher Unterschied der feinmotorischen Leistung erscheint aufgrund der unterschiedlichen Physiognomie in einem ersten Ansatz nachvollziehbar (Thomas, 1985). Des Weiteren wird als mögliche Ursache für Unterschiede zwischen den Geschlechtern hinsichtlich der *Feinmotorik* der hormonelle Einfluss sowohl auf das zentrale Nervensystem als auch auf den exekutiven motorischen Apparat angeführt (Hampson, 1988). In mehreren Studien konnten entsprechende Ergebnisse dokumentiert werden. Männer erzielten vergleichbar bessere Ergebnisse als Frauen (Dodrill, 1979; Morrision, 1979; Peters; 1979; Gordon, 1981; Bornstein, 1986; Kauranen., 1996). Allerdings bezogen sich diese Untersuchungen lediglich auf einen Faktor der *Feinmotorik*: die Finger-Handgelenk-Geschwindigkeit. In weiteren Studien wurden jedoch gegenteilige Resultate dokumentiert. Hier erzielten wiederum Frauen bessere Ergebnisse (Tiffin, 1949; Barnsley, 1970; Falk, 1977; Gardner, 1979; Sattler, 1982; Mathiowetz, 1986; Peters, 1989; Desrosiers, 1995). Allerdings wurde in diesen Studien erneut lediglich ein feinmotorischer Faktor erfasst: die *Fingergeschicklichkeit* (Tiffin, 1968). Einige Autoren formulieren daher die Annahme, dass Frauen prinzipiell besser bei Koordinationstests und Männer besser bei reinen Geschwindigkeitstests sind (Michimata, 2008). Einen guten Überblick liefern Lachnit (1990) und Pieper (1998) in ihren Untersuchungen. Dabei zeigte sich, dass hinsichtlich der Schnelligkeit und Akkuratheit zwischen den Geschlechtern kein Unterschied festgestellt werden konnte. Unterschiede hinsichtlich der feinmotorischen Leistung verschwinden, sobald die Fingerlänge und Breite als Kovariate kontrolliert werden (Peters, 1990). Die dokumentierten Unterschiede sind somit nicht Folge eines grundsätzlichen intergeschlechtlichen Unterschieds hinsichtlich der feinmotorischen Leistung (Haward, 2002), sondern Resultat einer Interaktion zwischen *Feinmotorik* und Handmaßen.

Die Händigkeit des Menschen hat aufgrund der ausgleichenden Verwendung der jeweils dominanten Hand bei bimanuellen Tätigkeiten keinen Einfluss auf die feinmotorische Leistung. Unterschiede zwischen Links-, Rechts- und Beidhändern hinsichtlich der Performanz sind bei einer beidhändigen Aufgabenstellung demnach nicht festzustellen (Müller, 2003). Lediglich bei gleichzeitiger Ausführung zweier Aktivitäten unterschiedlicher Qualität zeigt sich eine Reduktion der Performanz (Kinsbourne, 1971; Dalen, 1989; Foltys, 2001). Eine Interferenz kann z. B. hervorgeufen werden, wenn während der feinmotorischen Tätigkeit gleichzeitig gesprochen wird (Kimura, 1973). Sowohl die Leistung der linken als auch der rechten Hand nimmt unter diesen Umständen signifikant ab. Stärker betroffen ist jeweils die kontralateral zur sprachdominanten Hemisphäre liegende Hand (Dalen, 1989). Dass dennoch die Leistung beider Hände beeinträchtigt wird, könnte auf die Kontrollfunktion der linken Hemisphäre auch für Bewegungen der ipsilateralen Hand zurückzuführen sein (Wyke, 1971; Kreuter, 1972, Nalcali, 2001).

Lerneffekte konnten bisher nur bei der nicht-dominanten Hand festgestellt werden (Haward, 2002). Es bleibt jedoch zu beachten, dass lediglich zwei Faktoren der *Feinmotorik* (*Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit*) im Hinblick auf diese Fragestellung analysiert wurden. Untersuchungen über mögliche Lerneffekte bei den übrigen Faktoren sollten angestrebt werden.

Die feinmotorische Leistung wird in einzelne Facetten unterteilt, die wiederum separat voneinander untersucht werden sollten. Dabei müssen mögliche Einflussfaktoren beachtet und hinsichtlich ihrer Auswirkung analysiert werden. Nachfolgend wird ein Überblick über die moderierenden Faktoren *konzentrierte Aufmerksamkeit* und *Handlungskontrolle* gegeben und ein möglicher Zusammenhang mit der feinmotorischen Leistungsfähigkeit diskutiert.

3.2 Moderierende Faktoren bei feinmotorischer Leistung

3.2.2 Handlungskontrolle

Im folgenden Kapitel wird der moderierende Faktor *Handlungskontrolle* beschrieben (vgl. Abb. 4) und ein möglicher Zusammenhang zwischen diesem Konstrukt und der feinmotorischen Leistungsfähigkeit diskutiert. Des Weiteren wird ein Messinstrument zur Erfassung der *Handlungskontrolle* vorgestellt.

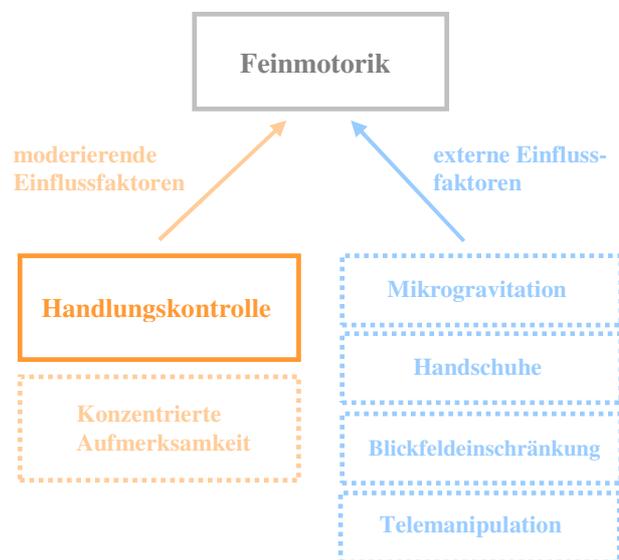


Abb. 4: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Das Konstrukt *Handlungskontrolle* beschreibt im Allgemeinen die Fähigkeit, eine gesetzte Absicht gegen konkurrierende Handlungstendenzen abzusichern, um das geplante Ziel zu erreichen (Häcker, 1998). Die zu erfassenden Konstruktdimensionen sind hierbei die sozialisationsbeding-

ten Dispositionen *Handlungsorientierung* und *Lageorientierung* (Kuhl, 1984; Kuhl, 1987; Kuhl, 1994a; Kuhl, 1994b). Lageorientierte Menschen setzen ihre Absichten, obwohl sie hohe Motivation und hinreichend hohe Fähigkeiten aufweisen, häufig nicht direkt um, sondern bleiben auf vorhergehenden Analyseschritten stehen oder kehren immer wieder zu vorherigen Gedankengängen zurück. Im Rahmen des Handlungskontrollmodells versucht Kuhl somit das Phänomen der Perseveration² (Eysenck, 1967) zu erfassen. Das Konzept der *Handlungsorientierung* wird definiert durch kognitive Aktivitäten, die Handlungsalternativen und Pläne fokussiert, welche geeignet sind, Diskrepanzen zwischen der aktuellen Lage und einer angestrebten, zukünftigen Situation zu verringern (Kuhl, 1981; Kuhl, 1985; Struthers, 1996).

Eine umfassende und angemessene Handlungsabsicht liegt nur dann vor, wenn vier spezifische Grundelemente aktiviert werden. Diese vier Elemente sind der angestrebte zukünftige Zustand, der gegenwärtige Zustand, die Diskrepanz zwischen dem Ist- und dem Sollzustand sowie die Handlung, mit der die Diskrepanz verringert werden soll (Kuhl, 1983). Werden eines oder mehrere der vier Elemente gegenüber den anderen vernachlässigt, spricht Kuhl von einer Degeneration der kognitiven Repräsentation der Handlungsabsicht (Beswick, 1994). Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn eine Person ihre ganze Aufmerksamkeit auf den Zielzustand oder die Zielreaktion (Dollard, 1973) richtet oder aufgrund eines vorhergehenden Misserfolgs den Ist-Zustand übermäßig fokussiert. Eine degenerierte Absicht kann nach diesem Modell nicht ausgeführt werden und äußert sich in einer Perseveration. Dieser Zustand beansprucht somit die Aufmerksamkeit so stark, dass auch keine anderen Handlungsabsichten umgesetzt werden können (Siebecke, 1998). Ein solcher Zustand wird lageorientiert genannt. Dabei werden von Kuhl zwei Arten der *Lageorientierung* unterschieden. Zum einen beschreibt er die *Präokkupation* und zum anderen das *Zögern*. Beide Arten führen zu einer Einschränkung der volitionalen Effizienz. Der Zustand der Präokkupation entsteht durch die Belastung mit unkontrollierbaren emotionalen und kognitiven Prozessen. Diese Prozesse interferieren mit der Handlungsabsicht. Mögliche Auslöser sind aversive und konfliktinduzierende Ereignisse wie z. B. Fehler. Das Zögern beschreibt die generelle Schwierigkeit, Handlungen einzuleiten. Diese Handlungslähmung entsteht ebenfalls durch Belastung, ist aber im Gegensatz zur *Präokkupation* verbunden mit Kontrollverlust und Hilflosigkeit, die durch Frustration bei vergangenen Lösungsversuchen entstanden sind. Dabei gehen positive Anreize des Ziels nicht verloren, sie verlieren jedoch ihre handlungsleitende Wirkung. Somit kommt es zum Festhalten an den bisherigen Absichten und Zielen, der Perseveration.

² Perseveration steht im Folgenden für eine beobachtete Verzögerung des Wechsels zu neuen Reaktionen.

Zusammenfassend gesagt, stagnieren lageorientierte Personen auf dem Status quo, zeigen Tendenzen zur Perseveration, neigen zu grüblerischem Analysieren nach Misserfolgen und zögern aufgrund umfangreicher Informationssammelungs- und Informationsauswertungsprozesse, bevor sie selbst einfache und vorstrukturierte Aufgaben weiterbearbeiten oder Entscheidungen treffen (Lay, 1995; Siebecke, 1998). Im Gegensatz dazu setzen handlungsorientierte Personen Vorhaben direkt in die Tat um, sind zielstrebig (Corno, 1993) und lassen sich durch Misserfolge nicht verunsichern. Stiensmeier-Pelster et al. postulierten (1985) die Annahme, dass handlungsorientierte Personen effizientere Entscheidungsstrategien verwenden. Dies konnte jedoch in einer Studie von Roth (1993) nicht bestätigt werden. Lediglich in Situationen hoher Gedächtnisanforderung reduzieren sowohl lage- als auch handlungsorientierte Menschen in einem vergleichbaren Maße die Zahl der zu berücksichtigenden Optionen (Niederberger, 1987). Bei vergleichsweise einfachen Aufgabenstellungen im motorischen Bereich konnten hingegen noch keine aussagekräftigen Ergebnisse bezüglich des Unterschiedes zwischen handlungsorientierten und lageorientierten Personen vorgewiesen werden.

Ein intergeschlechtlicher Unterschied hinsichtlich der *Handlungskontrolle* konnte bisher ebenfalls nicht festgestellt werden (Blunt, 1998). Sowohl in Bezug auf die *Lageorientierung* als auch in Bezug auf die *Handlungsorientierung* weisen Männer und Frauen eine vergleichbare Verteilung auf.

3.2.2.1 Zusammenhang zwischen *Handlungskontrolle* und *Feinmotorik*

Zum Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistungsfähigkeit und *Handlungskontrolle* ist bisher kaum etwas bekannt. McCown (1986) und Aitken (1982) konnte in Untersuchungen nachweisen, dass lageorientierte Personen durch Perseveration mehr Zeit zur Bearbeitung von Aufgaben benötigen. Die Bearbeitungszeit ist gerade im Rahmen der *Feinmotorik* ein Leistungsmaß (Fleishman, 1972). Allerdings beziehen sich die bisherigen Studien nicht auf rein motorische Aufgabenstellungen, sondern vorwiegend auf theoretische Problemstellungen wie z. B. die Bewertung von Kosten-Nutzen-Strategien. Handlungsorientierte Menschen arbeiten unter Zeitdruck im Vergleich zu lageorientierten Menschen wesentlich effizienter (Stiensmeier, 1985; Stiensmeier-Pelster, 1989; Roth, 1993). Dies wird durch die Wahl einfacherer Strategien erklärt. Dies bezieht sich sowohl auf umfassende Problemkonstellationen als auch auf einfach strukturierte motorische Aufgaben. Unter Zeitdruck neigen zwar auch lageorientierte Personen zum Einsatz einfacherer Bearbeitungsstrategien, jedoch in einem zu geringen Ausmaß (Stiensmeier-Pelster, 1991). Es wird vermutet, dass Lageorientierte grundsätzlich Schwierigkeiten haben, Entscheidungsprozesse zu terminieren und kontrolliert zu agieren (Beckmann, 1994) sowie Bewertungsprozesse zum Abschluss zu bringen (Dibbelt, 1994). Dies könnte folglich bei Montagetätigkeiten zu einer verminderten Leistungsfähigkeit führen. Es wird jedoch auch die Meinung vertreten, dass Lageorientier-

te sicherere Strategien auswählen, die folglich zeitintensiver sind (Mayr, 1991; Stiensmeier-Pelster, 1991; Doll, 1992; Roth, 1993). Somit ist zu vermuten, dass Lageorientierte aufgrund der zeitintensiveren Strategiewahl bei feinmotorischen Aufgaben längere Bearbeitungszeiten aufweisen.

Des Weiteren wurde ein Zusammenhang der Bedeutung jeglicher Aufgabenstellung für das Individuum mit der jeweiligen Disposition der Handlungskontrolle erwartet. Diese Annahme konnte von Vodanovich (1997) bestätigt werden. Die Bedeutung der jeweiligen Aufgaben korreliert negativ mit *Lageorientierung*. Je stärker sich ein Mensch mit der Aufgabenstellung identifiziert, desto unwahrscheinlicher ist lageorientiertes Verhalten (Little 1989; Pychyl, 1995). Erneut beziehen sich diese Ergebnisse jedoch nicht ausschließlich auf feinmotorische Aufgaben. Dennoch ist anzunehmen, dass dieser Effekt auch eine negative Auswirkung auf die Leistung bei feinmotorischen Aufgaben verursacht.

Während die Akkuratheit in der Durchführung von Aufgaben bei handlungsorientierten Personen niedriger liegt als bei lageorientierten Personen, erzielen handlungsorientierte Menschen höhere Geschwindigkeiten im Hinblick auf die Aufgabendurchführung (Feather, 1962; Atkinson, 1966; Kuhl, 1994). Laut einer Studie von Frost (1991) führt die *Präokkupation*³ nicht nur zu einer negativen Beeinflussung der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe, sondern verschlechtert die Performanz auch in den darauf folgenden motorischen Aufgaben. Dieser Effekt zeigt sich zusätzlich im vermehrten Gebrauch von personenbezogenen Imperativen (Horney, 1950; zitiert nach Frost, 1995). Dies ist von Bedeutung, da bei feinmotorischen Arbeitsgängen häufig mehrere Aufgaben bewältigt werden müssen. Dass die Sorge über Fehler und die daraus resultierende Perseveration tatsächlich einen negativen Einfluss auf die Performanz hat, konnte des Weiteren Perry (1984) in einer Untersuchung bestätigen. Es wird demnach nicht nur die Wahrnehmung über die eigene Leistung, sondern eine tatsächliche Abnahme hinsichtlich der Leistungsfähigkeit messbar. Daher ist ein Zusammenhang zwischen *Handlungskontrolle* und der feinmotorischen Leistung zu vermuten und sollte systematisch untersucht werden. Die damit angedeutete Hypothese wird in Kapitel 4.4 noch eingehender erläutert.

3.2.2.2 Erfassung der *Lage-* bzw. *Handlungsorientierung*

Zur Untersuchung der *Handlungskontrolle* entwickelte Kuhl (o. J.) ein Messinstrument in Form einer dichotomen Selbstauskunft, den Fragebogen „*Handlungskontrolle* nach Erfolg, Misserfolg und prospektiv“ (HAKEMP 90). Lageorientiertes Verhalten unterscheidet sich von handlungsorientiertem Verhalten auf den Ebenen der Handlungsplanung und der Handlungsdurchführung

³ *Präokkupation* oder auch Befangenheit, hier als das Grübeln lageorientierter Personen über Fehler zu verstehen, das auch dann nicht abgestellt werden kann, wenn die Person sich auf eine Aufgabe konzentrieren will.

sowie in Bezug auf den Umgang mit Misserfolg. Dementsprechend besteht der Fragebogen aus drei Subskalen. Im Rahmen der Skala „*Handlungsorientierung* nach Misserfolg“ (HOM; Gegensatz: LOM, *Lageorientierung, Präokkupation*) wird der Umgang mit Misserfolg erfragt. Dies entspricht der Erfassung des Ausmaßes der *Präokkupation*.

Beispielitem: *Wenn ich bei einem Wettkampf öfter hintereinander verloren habe, dann*

- a) *denke ich bald nicht mehr daran.* (HOM)⁴
- b) *geht mir das noch eine ganze Weile durch den Kopf.* (LOM)

Des Weiteren wurde die Skala „*Handlungsorientierung* bei der Handlungsplanung“ (HOP, Gegensatz: LOP, *Lageorientierung, Zögern*) entwickelt. Dies entspricht der Erfassung des Ausmaßes des Zögerns. Der Fokus liegt auf dem Verhalten, Entscheidungen zu treffen und Handlungen zu initiieren.

Beispiel-Item: *Wenn ich weiß, dass etwas bald erledigt werden muss, dann*

- a) *muss ich mir oft einen Ruck geben, um den Anfang zu kriegen.* (LOP)
- b) *fällt es mir leicht, es schnell hinter mich zu bringen.* (HOP)

Die Skala „*Handlungsorientierung* bei der Tätigkeitsausführung“ (HOT, Gegensatz: LOT, *Lageorientierung, Aktionismus*⁵) erfasst das Ausmaß, in dem eine Person in einer Tätigkeit aufgeht, ohne dass die Aufmerksamkeit durch Kognitionen über das Ziel oder weitere Handlungsalternativen abgelenkt wird.

Beispiel-Item: *Wenn ich mit einer interessanten Arbeit beschäftigt bin, dann*

- a) *suche ich mir zwischendurch gern eine andere Arbeit.* (LOT)
- b) *könnte ich unentwegt weitermachen.* (HOT)

Jede Skala umfasst zwölf Situationsbeschreibungen. Jeder Situation folgen zwei Antwortalternativen, wobei die eine Antwortmöglichkeit handlungsorientiertes und die andere Antwortmöglichkeit lageorientiertes Verhalten erfasst.

Da die Handlungskontrolltheorie nach Kuhl anhand des HAKEMP untersucht wurde, ist dieser Erhebungsbogen für die gesamte Theorie zentral (Sack, 1989). Der HAKEMP wurde daher zahl-

⁴ Die Bezeichnung der Skalenzugehörigkeit wird im Fragebogen nicht angegeben und erfolgt hier nur zur Erhöhung der Nachvollziehbarkeit.

⁵ Aktionismus ist hier als das verfrühte Wechseln zu einer neuen Tätigkeit zu verstehen.

reichen Validierungsstudien unterzogen (Kuhl, 1983; Sack, 1990; Dahme, 1992; Doll, 1992; Kanfer, 1994; Diefendorff, 2000). Die von Lienert (1969) formulierte Anforderung einer inneren Konsistenz von mindesten 0,9 wird nicht erreicht. Nach Häcker (1978) wird eine entsprechend geringe Konsistenz bei den meisten Persönlichkeitsfragebögen festgestellt. Im Allgemeinen liegen die Werte des HAKEMP 90 jedoch in Form von Cronbachs Alpha zwischen 0,7 und 0,8 (Kuhl, 1994), sodass die Reliabilität durchaus im annehmbaren Bereich anzusiedeln ist. Daher wird der beschriebene Fragebogen im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen Verwendung finden.

3.2.3 *Konzentrierte Aufmerksamkeit*

Im folgenden Kapitel wird der moderierende Faktor *konzentrierte Aufmerksamkeit* beschrieben (vgl. Abb. 5) und eine Abgrenzung zu den Begriffen *Konzentration* und *Aufmerksamkeit* vorgenommen. Zusätzlich wird ein möglicher Zusammenhang zwischen diesem Konstrukt und der feinmotorischen Leistungsfähigkeit diskutiert. Abschließend wird ein Messinstrument zur Erfassung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* vorgestellt.

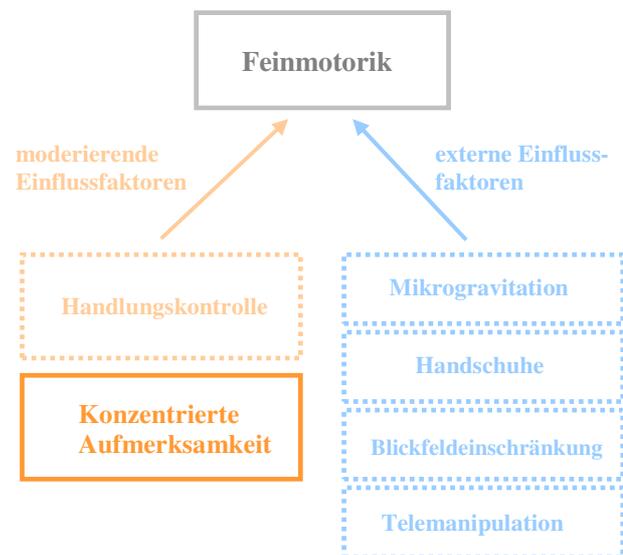


Abb. 5: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Nach wie vor kann unter *Aufmerksamkeit* kein homogenes Konstrukt verstanden werden (Schmidt-Atzert, 2008a). Über die Jahre wurden unterschiedliche Aufmerksamkeitsmodelle diskutiert, die jedes für sich andere Aspekte als zentral ansehen (Moosbrugger, 2006). So stellen Posner et al. (1990) die Wahrnehmung in den Vordergrund, während Engle et al. (1999) *Aufmerksamkeit* als exekutives Kontrollsystem umschreiben. Andere Wissenschaftler wiederum sehen eine Kom-

bination aus beiden Ansätzen als adäquat an (Sturm, 2000). Eine Erweiterung des Modells nach Zomeren et al. (1994) und damit das umfangreichste Aufmerksamkeitsmodell ist bei Sturm et al. (2000) zu finden (Schmidt-Atzert, 2008a). In diesem Modell wird die Aufmerksamkeit in unterschiedliche Komponenten⁶ unterteilt. Bei einer faktorenanalytischen Untersuchung (Zimmermann, 2004) konnten jedoch nur drei Komponenten identifiziert werden, die einen Konsens abbilden: Vigilanz, Alertness und Selektion. Dieses Resultat lässt erkennen, wie uneinheitlich mit dem Begriff der *Aufmerksamkeit* verfahren und wie vielfältig dieses Konstrukt zugleich verstanden wird. Eine nähere Betrachtung einzelner Facetten der *Aufmerksamkeit* und verwandter Konstrukte erscheint daher als sinnvoll.

Aufmerksamkeit wird in dem Versuch einer allgemeinen Definierung als die Fähigkeit umschrieben, irrelevante Reize aus der Umgebung und von Innen (z. B. Körpersymptome) von relevanten Reizen zu trennen (Anderson, 1996). *Aufmerksamkeit* wird daher häufig als Filter beschrieben, der der begrenzten Kapazität des Gehirns Rechnung trägt (Cherry, 1953; Broadbent, 1958; Moray, 1959; Treisman, 1960; Deutsch, 1963; Neisser, 1967). Während früher die *Aufmerksamkeit* benötigt wurde, um z. B. Gefahrensignale wie die Nähe eines Raubtieres zu erkennen, dient sie heute dem Suchen von z. B. Personen in einer Menschenmenge (Schmidt-Atzert, 2008b). Dabei wird die willentliche von der unwillentlichen *Aufmerksamkeit* unterschieden. Schmerzen oder laute Geräusche finden unwillentlich Beachtung (Pashler, 2000). Aufmerksamkeits-tests hingegen erfassen die willentliche *Aufmerksamkeit*. Lediglich bestimmte Reize werden als relevant erklärt, und der jeweilige Aufmerksamkeits-test überprüft, wie gut diese von der zu untersuchenden Person registriert werden.

Von dem Konstrukt der *Aufmerksamkeit* ist das der *Konzentration* abzugrenzen. Die *Konzentration* beschreibt zwar ebenfalls eine Fähigkeit, jedoch bezieht sich diese auf die Weiterverarbeitung der Reize, die durch Aufmerksamkeitsprozesse ausgewählt wurden. Sie umschreibt demnach die Fähigkeit, unter Bedingungen schnell und genau zu arbeiten, die das Erbringen einer kognitiven Leistung normalerweise erschweren. *Konzentration* hat somit Arbeitscharakter (Westhoff, 1995) und ist mit Anstrengung verbunden. Daher beschreibt Mierke (1955) *Konzentration* als zuchtvolle Organisation der *Aufmerksamkeit* durch den Menschen selbst für das Erfassen und Gestalten bestimmter Aufgaben.

⁶ Alertness, Vigilanz, räumliche Aufmerksamkeit, Aufmerksamkeitswechsel, geteilte Aufmerksamkeit und Selektion.

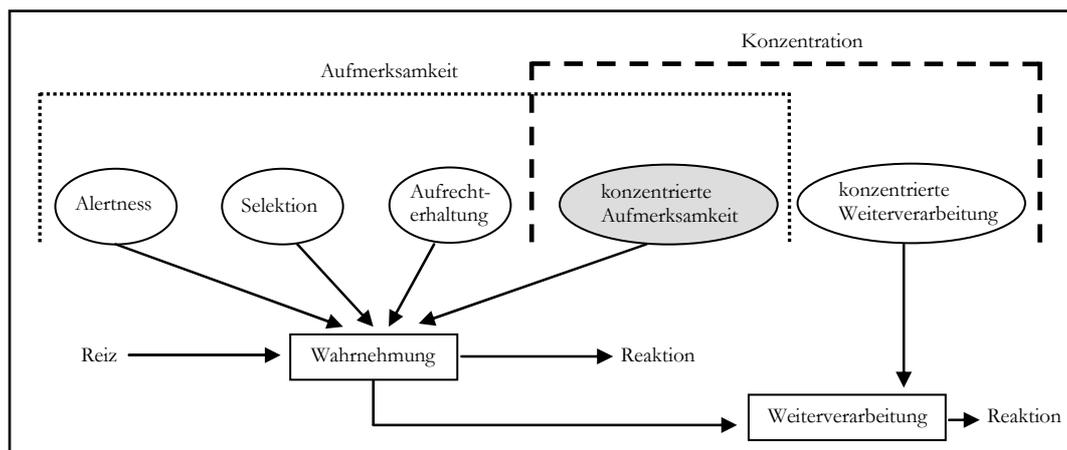


Abb. 6: Modell zur Differenzierung von Aufmerksamkeit und Konzentration (Schmidt-Atzert, 2008b)

Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* hingegen ist eine Schnittstelle zwischen den Konstrukten *Aufmerksamkeit* und *Konzentration* (vgl. Abb. 6). Sie beschreibt zum einen die Fähigkeit, relevante von irrelevanter Information zu trennen, und des Weiteren, diese Fähigkeit unter erschwerten Bedingungen realisieren zu können. Daher baut die *konzentrierte Aufmerksamkeit* auf der allgemeinen Fähigkeit der *Aufmerksamkeit* auf und bildet die Vorstufe zur *Konzentration*, also zur Weiterverarbeitung der Information. Somit ist die *konzentrierte Aufmerksamkeit* ähnlich wie die *Konzentration* mit Anstrengung verbunden. Hat ein Mensch Defizite hinsichtlich seiner *konzentrierten Aufmerksamkeit*, so hat dies unweigerlich Einfluss auf seine *Konzentration*, jedoch nicht unabdingbar auf seine *Aufmerksamkeit*.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Erkennen von Informationen das Konstrukt der *Aufmerksamkeit* und damit reine Wahrnehmungsprozesse umschreibt. Das Erkennen von Information unter erschwerten Bedingungen wird als *konzentrierte Aufmerksamkeit* bezeichnet, und als *Konzentration* wird die Weiterverarbeitung der Information beschrieben.

Im Sinne der Unterscheidung der drei Bezeichnungen *Aufmerksamkeit*, *konzentrierte Aufmerksamkeit* und *Konzentration* wird versucht, die Tests zur Erfassung der jeweiligen Konstrukte entsprechend voneinander abzugrenzen. Tests zur Erfassung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* verlangen die Selektion von relevanten und irrelevanten Reizen unter erschwerenden Bedingungen und sind daher im Gegensatz zu einfachen Aufmerksamkeitstests mit Anstrengung verbunden. Konzentrationstests fordern zudem eine weitere Verarbeitung der Information z. B. in Form einer Rechenaufgabe (Krumm, 2008).

3.2.3.1 Zusammenhang zwischen *konzentrierter Aufmerksamkeit* und *Feinmotorik*

Feinmotorik erfordert nicht nur motorische Fähigkeiten, sondern auch Wahrnehmungsgeschwindigkeit (Spree, 1998). Teil der *konzentrierten Aufmerksamkeit* ist eben diese Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Daher erscheint gerade im Bereich der *Feinmotorik* eine Untersuchung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* sinnvoll, da bei derartigen Aufgabenstellungen nicht nur relevante Informationen verarbeitet werden müssen, sondern diese oftmals unter Zeitdruck oder unter Anforderung besonders qualitativ hochwertiger Resultate absolviert werden müssen. Verschiedene Studien konnten zeigen, dass eine Gehirnregion im frontoparietalen Bereich sowohl bei feinmotorischen Tätigkeiten als auch bei *konzentrierter Aufmerksamkeit* zentral ist (Honda, 1998; Haaland, 2000, Sturm, 2001). Der dorsolaterale präfrontale Kortex wird sowohl bei ungewohnten feinmotorischen Aufgaben als auch bei benötigter *Aufmerksamkeit*, die als Vorstufe der *konzentrierten Aufmerksamkeit* verstanden werden kann, aktiv (Jahanshahi, 1998; Sturm, 2001). Dies lässt einen Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistungsfähigkeit und *konzentrierter Aufmerksamkeit* vermuten.

Bereits die Untersuchung von Braun et al. (2000) konnte einen negativen Zusammenhang zwischen dem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom (ADS) und der feinmotorischen Leistung aufzeigen. Weitere Studien erzielten vergleichbare Resultate (Pitcher, 2003; Meyer, 2006). Dennoch sind die Erkenntnisse und empirischen Erforschungen zum Zusammenhang zwischen *konzentrierter Aufmerksamkeit* und feinmotorischer Leistung sehr gering (Streng, 2002). Zwar konnte ein Zusammenhang zwischen *Aufmerksamkeit* und feinmotorischer Leistung der nichtdominanten Hand in empirischen Studien festgestellt werden (Sacktor, 1999; Streng, 2002), jedoch handelte es sich dabei nicht um *konzentrierte Aufmerksamkeit* und es wurde nur die *Fingergeschicklichkeit* (Fleishman, 1962) und somit nur eine Facette der *Feinmotorik* analysiert. Untersuchungen bezüglich des Zusammenhangs beider Konstrukte sind daher anzustreben.

3.2.3.2 Erfassung der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

Der Aufmerksamkeitsbelastungstest d2 nach Brickenkamp (2002) ist ein Papier-Bleistift-Verfahren, das unter den Leistungstests zu den Durchstreichverfahren gezählt wird. Die Durchstreichtests können in zwei Kategorien eingeteilt werden, wobei die relevanten und irrelevanten Reize entweder vergleichsweise ähnlich oder unähnlich sind. Der d2-Test zählt, im Gegensatz zu den differenziellen Leistungstests (Kleber, 1999), zu den Verfahren mit sehr ähnlichen Reizkonfigurationen. Er besteht aus einer regelgeleiteten Suche und der Markierung von Zielobjekten (alle *ds* mit zwei Strichen), die unregelmäßig zwischen den Distraktoren aufgeführt sind (vgl. Abb. 7). Insgesamt sind 658 visuelle Reize auf 14 Zeilen verteilt, die wiederum direkt nacheinander in jeweils 15 Sekunden abgearbeitet werden müssen. Die Zielobjekte beinhalten zwei

Merkmalsebenen. Zum einen Striche und zum anderen die Buchstaben *d* und *p*, wobei *p* den Distraktor darstellt.

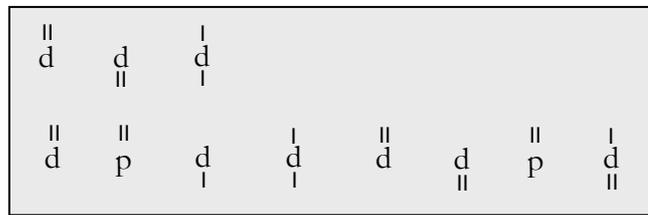


Abb. 7: Zielobjekte (obere Reihe); Itembeispiel mit Zielobjekten und Distraktoren (untere Reihe) (Brickenkamp, 2002)

Da die Aufgabenstellung die Selektion bestimmter vorgegebener Reize erfordert und gleichzeitig die integrierten Distraktoren ignoriert werden müssen, wird zur Bearbeitung *Aufmerksamkeit* benötigt. Die Menge der zu bearbeitenden Reize, der Zeitdruck und die ähnliche Reizkonfiguration bilden eine erschwerte Bedingung der Aufgabenstellung. Diese Tatsache weist ebenso wie die Bezeichnung *Aufmerksamkeitsbelastungstest* durch die Testautoren auf die Erfassung des dargestellten Konstrukts der *konzentrierten Aufmerksamkeit* hin. Mit dem d2-Test kann sowohl eine *konzentrierte Aufmerksamkeit* kurzer Dauer als auch die Fähigkeit, diesen Zustand eine gute halbe Stunde aufrechtzuerhalten, analysiert werden (Simon, 2002). Dabei werden zum einen das Arbeitstempo und zum anderen die Fehlerrate analysiert.

Der d2-Test wurde in zahlreichen Studien validiert (Brickenkamp, 2002) und gehört zu den am meisten eingesetzten Leistungstests in Deutschland. Sowohl die Durchführung des d2-Tests als auch die Auswertung sind standardisiert. Somit kann eine hohe Objektivität garantiert werden. Durch die Altersnormen und definierten Kennwerte weist der d2-Test zudem eine hohe Interpretationsobjektivität auf. Die Reliabilität befindet sich mit einem Konsistenzkoeffizienten von .95 (Split-Half-Reliabilität) in einem respektablen Bereich.

3.3 Externe Einflussfaktoren bei feinmotorischer Leistung

Die beiden Konstrukte *Handlungskontrolle* und *konzentrierte Aufmerksamkeit* stellen mögliche moderierende bzw. interne Faktoren hinsichtlich der feinmotorischen Leistungsfähigkeit dar (vgl. Kapitel 3.2). Doch auch von außen können Faktoren die Performanz des Menschen während eines EVAs oder der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem beeinflussen. Diese externen Einflussfaktoren werden im folgenden Kapitel vorgestellt und diskutiert. Zu diesen beeinflussenden Größen gehören die *Mikrogravitation*, die Reduktion der *taktilen Wahrnehmung* und der *Beweglichkeit* der Hände durch Handschuhe, die *Blickfeldeinschränkung* sowie Telemanipulationssysteme und ihre Schnittstellen.

3.3.1 Mikrogravitation

Im folgenden Kapitel wird der externe Einflussfaktor *Mikrogravitation* beschrieben (vgl. Abb. 8) und ein möglicher Zusammenhang zwischen diesem Faktor und der feinmotorischen Leistungsfähigkeit diskutiert. Des Weiteren werden Modelle zur Simulation der *Mikrogravitation* am Menschen vorgestellt.

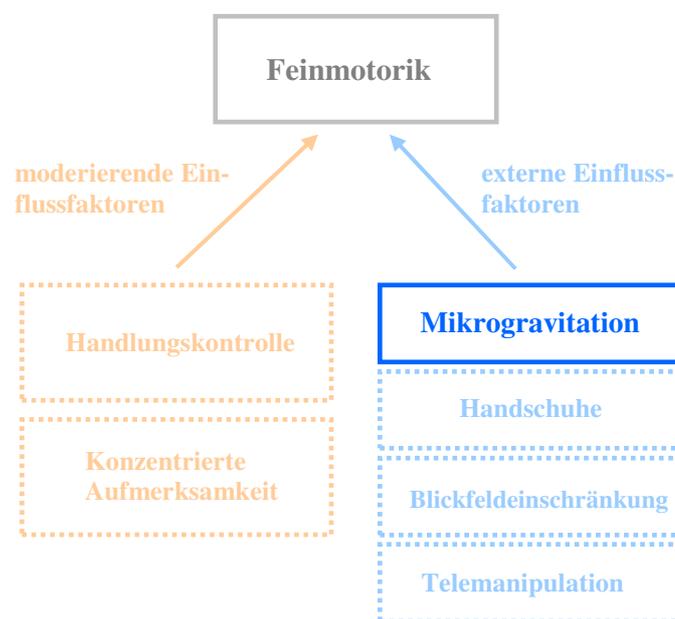


Abb. 8: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Seit Beginn der bemannten Raumfahrt wurden zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit des Menschen an die *Schwerelosigkeit* durchgeführt (Lackner, 2000). Allerdings hat sich in der wissenschaftlichen Forschung der Begriff der *Mikrogravitation* gegenüber der *Schwerelosigkeit* durchgesetzt, da Letzterer keine genaue Beschreibung der Schwerkraftverhältnisse in

erdnahen Umlaufbahnen umfasst (Bonde-Petersen, 1982). Zudem impliziert die Bezeichnung *Schwerelosigkeit* fälschlicherweise, dass es Zustände ohne jegliche Schwerkraft gäbe. Jedoch erzeugen selbst Elementarteilchen Schwerkraft, die allgemein in ihrer Reichweite als unbegrenzt gilt. Der Begriff der *Mikrogravitation* hingegen umfasst den Netto-Betrag aller Beschleunigungen, die auf einen Körper während eines Raumfluges einwirken (Kirschner, 1987). Dieser Betrag bewegt sich in einem Bereich zwischen 10^{-6} und 10^{-2} der Erdanziehung auf Meereshöhe (1 g).

Für den menschlichen Körper ist eine Anpassung an die *Mikrogravitation* in einem gewissen Ausmaß zwar möglich, jedoch beeinflusst dieser komplexe Prozess mehrere Organ- und Muskelsysteme und damit auch die Wahrnehmung und Motorik. Die *Mikrogravitation* ruft unter anderem eine Flüssigkeitsverschiebung im menschlichen Organismus hervor. 1500 bis 2000 ml der in den Beinen gelagerten Flüssigkeit wird durch das Fehlen des hydrostatischen Drucks in den Kopf und die intrathorakalen Organe umverteilt. Unmittelbar, nachdem der Mensch der *Mikrogravitation* ausgesetzt wird, beginnt die Veränderung des physiologischen Systems. Am stärksten werden dabei die otolithischen Organe des inneren Ohres, die besonders auf lineare Beschleunigung sensibel reagieren, beeinträchtigt. Allerdings treten diese Veränderungen nicht simultan auf. Die Auswirkungen auf das Gleichgewichtssystem machen sich für gewöhnlich in den ersten Tagen mit individuellen Schwankungen bemerkbar. Dadurch treten gerade im Bereich der motorischen Leistung negative Effekte auf, die nicht selten zu Beschwerden durch ungewohnte Bewegungen (Kinetosen⁷) führen (Ross, 2001). Der Abbau der Muskel- und Knochenmasse hingegen erlangt erst nach mehreren Monaten ein messbares Ausmaß. Trotz der vielen Untersuchungen in Bezug auf die *Mikrogravitation* und ihren Einfluss auf den Menschen fehlt nach wie vor eine systematische Analyse hinsichtlich der Auswirkung der *Mikrogravitation* speziell auf die Objektmanipulation und damit auf die feinmotorische Leistung (Lackner, 2000). Um derartige Studien durchführen zu können, müssten in einem ersten Schritt geeignete standardisierte Untersuchungsmethoden entwickelt und validiert werden. Dies ist bisher nicht erfolgt (Fowler, 2000a).

In Bezug auf die *Mikrogravitation* und ihren Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit werden mehrere Hypothesen kontrovers diskutiert. Zum einen die Gravitationshypothese, des Weiteren die Multi-Stressor-Hypothese (Fowler, 2000b) und die Zwei-Faktoren-Hypothese (Manzey, 2000). Dabei umfasst die Gravitationshypothese die Annahme, dass eine Umgebung in *Mikrogravitation* an sich einen negativen Effekt auf die Leistungsfähigkeit des Menschen hat z. B. durch die

⁷ Der Begriff Kinetose bezieht sich auf einen Symptomkomplex, der durch verschiedene Beschleunigungsreize ausgelöst werden kann, die außerhalb der individuellen Adaptationsschwelle liegen (Schmäl, 2000). Dabei können Symptome wie Unwohlsein, Erbrechen, Schweißausbrüche, Pulsanstieg und Schwindel auftreten.

Destabilisierung des Körpers (Fowler, 2000b). Zusätzlich beeinflusst die *Mikrogravitation* das zentrale Nervensystem und ruft eine Störung der motorischen Prozesse hervor.

Die Multi-Stressor-Hypothese hingegen postuliert einen indirekten Einfluss der *Mikrogravitation* auf die Leistungsfähigkeit des Menschen. Als Ursache des Leistungsrückganges unter Bedingungen der *Mikrogravitation* werden psycho-physiologische Effekte postuliert. Laut der Multi-Stressor-Hypothese werden diese Effekte durch die mentale Belastung während des Aufenthalts unter extremen Bedingungen induziert (Fregly, 1996; Friedl, 2000).

Die Zwei-Faktoren-Hypothese wiederum ist eine Kombination aus den beiden oben beschriebenen Annahmen (Schneider, 2008). Die *Mikrogravitation* wirkt direkt auf die motorischen Prozesse. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die Arbeitsbelastung und die psychische Anspannung verstärkt (Manzey, 2000). So entsteht ferner eine Beeinträchtigung weiterer Prozesse, z. B. die der Informationsverarbeitung und damit der *Aufmerksamkeit*.

Obwohl mehrere Studien in permanenter *Mikrogravitation* (Watt, 1985; Newman, 1990; Berger, 1997; Newman, 1999; Bock, 2001; Heuer, 2003) und wechselnder Gravitation während sogenannter Parabelflüge (Money, 1991; Chen, 1999; Jüngling, 2002; Augurelle, 2003; Rafiq, 2005; Speich, 2005) analysiert wurden, konnte keine der Hypothesen grundsätzlich angenommen oder verworfen werden (Schneider, 2008). Dies kann unter Umständen auf den jeweils geringen Stichprobenumfang zurückzuführen sein (Manzey, 2000). Dementsprechend konnte die Ursache für eine motorische Leistungsabnahme des Menschen unter Bedingungen der *Mikrogravitation* bisher nicht vollständig erklärt werden.

3.3.1.1 Zusammenhang zwischen *Mikrogravitation* und *feinmotorischer Leistung*

Kognitive Prozesse, z. B. logisches Schlussfolgern, gelten unter Bedingungen der *Mikrogravitation* als unbeeinflusst (Benke, 1993; Manzey, 1998). Dies gilt jedoch nur unter der Bedingung, dass keine Beeinträchtigung durch Kinetosen vorliegt (Ratino, 1988). Im Gegensatz dazu wurde der Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistungsfähigkeit und *Mikrogravitation* bisher nicht systematisch untersucht. Vielmehr erfolgten allgemeine Studien zur Erfassung der veränderten Gravitation auf die motorischen Fähigkeiten des Menschen. Ein signifikanter Einfluss der *Mikrogravitation* konnte jedoch in Bezug auf das motorische System z. B. bei Trackingaufgaben (Manzey, 1993; Schifflett, 1995; Newman, 1999) und bei motorischen Mehrfachaufgaben (Schifflett; 1995) festgestellt werden. Dabei stand die Armbewegung besonders im Vordergrund (Fisk, 1993; Gentaz, 1996). *Mikrogravitation* beeinflusst laut Bock et al. (1994) die Wahrnehmung sowohl der Armbewegung als auch der Armposition. Der gesamte Haltungskontrollmechanismus des

Menschen wird durch die *Mikrogravitation* verändert (Young; 1984). Der Arm wird hinsichtlich seiner Position zum Körper als zu niedrig wahrgenommen. Somit kommt es zu überschießenden Bewegungen (Ross, 2001) und einer Reduktion der Präzision in Armbewegungen bis zu 70 % (Watt, 1985; Bock, 1992; Coello, 1994; Coello, 1996; Lackner, 1998). Jedoch ist der Mensch in dieser Hinsicht gut trainierbar (Ross, 2001). In einer Untersuchung von Bock (2001) konnte allerdings kein Einfluss der *Mikrogravitation* auf die Präzision der Armbewegung festgestellt werden. Die Versuchspersonen⁸ erzielten vergleichbare Resultate, egal ob sie freie Sicht auf das Target hatten oder die Sicht beeinträchtigt wurde. Diese uneinheitlichen Ergebnisse lassen sich jedoch auf die Tatsache zurückführen, dass prinzipiell sehr kleine Stichproben untersucht wurden und sich generell die jeweiligen Messmethoden und Apparaturen stark voneinander unterscheiden und einen direkten Vergleich nahezu unmöglich erscheinen lassen.

Allerdings verändert sich nicht ausschließlich die Präzision der Bewegung, sondern auch die Geschwindigkeit. Die *Mikrogravitation* erzeugt eine Verlangsamung der Bewegungsabläufe (Cohen, 1992; Berger, 1997). Gerade bei Aufgaben, die genaues Zielen erforderten, verlängerte sich die Bearbeitungszeit (Bock, 2001). Dieses Resultat fand sich auch nach einem längeren Aufenthalt des Menschen in *Mikrogravitation* (Berger, 1997). Zur Erklärung wird zum einen die Gravitationshypothese und zum anderen die Multi-Stressor-Hypothese herangezogen, allerdings konnten die entsprechenden Annahmen keine befriedigende und widerspruchsfreie Erklärung für die erfassten Effekte liefern (Berger, 1997). Zusätzlich wird die Verlängerung der Reaktionszeit durch die Bedingung der *Mikrogravitation* als Ursache für eine Verlangsamung der Bewegungsabläufe angeführt, jedoch sind die Resultate aus wissenschaftlichen Untersuchungen diesbezüglich uneinheitlich (Wing, 1973; Semjen, 1998).

Der Aspekt der Geschwindigkeit der Armbewegung ist von besonderem Interesse, da diese als *Feinmotorik*-Faktor gilt. Auch das *Zielen* als *Feinmotorik*-Faktor und die Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit wurden mehrfach untersucht (Ross, 1991). Zwar wurde keine Erhöhung in der Bearbeitungszeit der entsprechenden Aufgaben festgestellt, jedoch eine Zunahme in der Fehlerrate (Ross, 2001). Als Erklärung wurde eine missglückte Koordination von Auge und Hand aufgrund von Fehlern im sensomotorischen System, hervorgerufen durch die *Mikrogravitation*, vermutet. Gegenteilige Ergebnisse zeichneten Berger et al. (1997) in einer Studie in permanenter *Mikrogravitation* auf. Es stellt sich daher die Frage, ob diese widersprüchlichen Resultate tatsäch-

⁸ Im Folgenden werden Begriffe wie Versuchspersonen, Probanden, Versuchsteilnehmer etc. geschlechtsneutral verwendet und beziehen auch weibliche Personen mit ein.

lich auf den Einfluss der *Mikrogravitation* zurückzuführen sind oder vielmehr durch das Phänomen des Accuracy-Speed-Tradeoff⁹ (Schmidt-Atzert, 2004) entstanden sind.

Mehrere Studien wurden durchgeführt, die von der Aufgabenbeschaffenheit ebenfalls der Untersuchung der *Feinmotorik* zugeordnet werden können. Dabei standen chirurgische Interventionen im Vordergrund. Die Versuchspersonen wurden angehalten, simulierte, operative Eingriffe vorzunehmen (Nähen, Klammern, Schneiden, Greifen von Nadeln). Dabei konnte festgestellt werden, dass derartige Aufgaben auch unter Bedingungen der *Mikrogravitation* bewältigt werden können (Campell, 2005; Rafiq, 2005; Rafiq, 2006). Allerdings ist auch hier mit starken Beeinträchtigungen hinsichtlich der Bearbeitungszeit zu rechnen. Zusätzlich wurden eine größere Krafteinwirkung auf die verwendeten Instrumente und ein erweiterter Arbeitsraum festgestellt (Rafiq, 2006). Kritisch anzumerken ist, dass keine systematische Untersuchung der *feinmotorischen* Faktoren in diesen Studien stattfand. Vielmehr wurden allgemein praxisrelevante Aufgaben untersucht. Der Nachteil bei derartigen Studien ist, dass nicht genau festgestellt werden kann, ob alle Faktoren der *Feinmotorik* beeinflusst werden oder nur einige wenige. Eine explizite Analyse der einzelnen Faktoren und der Einfluss der *Mikrogravitation* auf selbige sollte daher ins Auge gefasst werden.

3.3.1.2 Methoden zur erdgebundenen Simulation von *Mikrogravitation*

Um untersuchen zu können, welchen Einfluss die *Mikrogravitation* auf den Organismus und die Leistungsfähigkeit des Menschen hat, werden unterschiedliche Simulationsmodelle herangezogen. Diese Modelle können auf der Erde oder im erdnahen Umfeld realisiert werden und sind daher effektiv und effizient zugleich. Im Folgenden werden die einzelnen Methoden vorgestellt und die jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert.

Der Effekt der *Mikrogravitation* kann für ein Zeitfenster von ca. 20 Sekunden durch Parabelflüge erzeugt werden (Ross, 2001). Dazu durchfliegt ein Flugzeug die Bahn einer Wurfparabel, wobei es sich während eines bestimmten Zeitfensters im freien Fall befindet. Während dieser Zeit herrschen Bedingungen der *Mikrogravitation*. Aus dem horizontalen Flug holt das Flugzeug mit voller Schubkraft Schwung, erzielt damit eine vertikale Beschleunigung von 1,5 bis 1,8 g und fliegt in einem Winkel von 47° steil nach oben. Nach dem Drosseln der Turbinen entsteht dann für 20 bis 22 Sekunden ein Zustand minimaler Schwerkraft mit einer Restbeschleunigung von nur noch etwa 10⁻² g. Nach dem Abfangen des Flugzeugs im Steilflug nach unten mit einem Winkel von 42° herrscht für 20 Sekunden eine erhöhte Beschleunigung von rund 1,8 g und somit Hypergravi-

⁹ Dieses Phänomen beschreibt den Konflikt zwischen der Geschwindigkeit und Akkuratheit bei der Aufgabenbearbeitung.

tation, die sich dann beim Horizontalflug für eine Minute auf 1 g normalisiert (Schneider, 2008). Der schnelle Wechsel zwischen Phasen der Hyper- und der *Mikrogravitation* ist für den menschlichen Organismus sehr belastend. Es stellt sich daher die Frage, ob bei Parabelflügen tatsächlich die Auswirkung von *Mikrogravitation* untersucht werden kann oder ob vielmehr die Auswirkung von Stresshormonen erfasst wird.

Die horizontale Lage ist eines der am häufigsten benutzten Modelle zur Simulation von *Mikrogravitation* (Sandler, 1980). Die gemeinsame Charakteristik von *Mikrogravitation* und dem Liegen in Horizontalebene ist der Verlust der hydrostatischen Flüssigkeitssäulen entlang der Längsachse des Körpers. Länger andauerndes Liegen in Horizontalebene ist wie die *Mikrogravitation* mit bestimmten Veränderungen der Körperflüssigkeiten, mit Flüssigkeitsumverteilungen und Anpassungsprozessen des Herz- und Kreislaufsystems verbunden (Sandler, 1982). Wird die Person zusätzlich in einen auf Horizontalebene freibeweglichen Tragegurt gehängt, kann außerdem eine *Destabilisierung* der Körperlage erzeugt werden (Amir, 2000). Die *Destabilisierung* ist eine typische Folge der *Mikrogravitation* und sollte gerade im Bereich der motorischen Anpassung des Menschen untersucht werden. Die Methode der horizontalen Lage stellt zusammenfassend gesagt eine geeignete Möglichkeit zur Untersuchung der feinmotorischen Leistungsfähigkeit unter Bedingungen der *Mikrogravitation* dar.

Für Langzeituntersuchungen wird bevorzugt die Methode der Kopftieflage eingesetzt. Einige Wissenschaftler postulierten die Annahme, dass diese Technik die frühen physiologischen Anpassungsprozesse des Menschen an die *Mikrogravitation* verlässlicher simuliere als die Horizontallage (Kakurin, 1976). Die Ergebnisse einiger Studien konnten diese Annahme bestätigen, besonders in Bezug auf die klinischen Symptome und den zeitlichen Ablauf der Flüssigkeitsverschiebung (Blomquist, 1980; Gzenko, 1980; Dietlein, 1981). Allerdings treten bei der Methode der Kopftieflage häufig Störungen des sensorischen Systems auf (Kirschner, 1987). Diese äußern sich mit Symptomen von Schwindel und Übelkeit. Für die Untersuchung des Einflusses der *Mikrogravitation* auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit des Menschen scheint diese Methode daher wenig geeignet.

Ein weiteres Simulationsmodell der *Mikrogravitation* ist die Immersion in einem thermoindifferenten Wassertank (Graveline, 1960). Durch die Veränderung der hydrostatischen Kräfte erfolgt eine vergleichsweise schnelle Flüssigkeitsverschiebung. Zusätzlich erfolgt eine Verringerung der Last auf den Muskel- und Gelenkapparat. Diese Verringerung ist vergleichbar mit der unter Bedingungen der *Mikrogravitation* (Watt, 1985; Ross, 2001).

Der Zustand der Schwerelosigkeit im All entsteht beim Menschen auf einer orbitalen Kreisbahn durch den Ausgleich der Erdanziehungskraft durch die Zentrifugalkraft. Die Erdanziehungskraft ist also nach wie vor vorhanden (Walter, 1997). Unter Wasser wird die Erdanziehungskraft zwar ebenfalls beeinflusst, jedoch durch die Auftriebskraft. Die Auftriebskraft unterscheidet sich von der Zentrifugalkraft dahin gehend, dass sie keine variable, sondern eine feste Kraft ist und nicht an jedem einzelnen Massepunkt des Körpers ansetzt. Aus diesem Grund werden z. B. beim Taucher die Steinchen in den Bogengängen des Vestibularapparates (Schmäl, 2000) nach unten gedrückt. Somit hat der Taucher im Gegensatz zum Astronauten nach wie vor die Orientierung für oben und unten.

Für die bewusste Orientierung im Raum ist jedoch die intakte Interaktion zwischen vestibulärem System¹⁰, dem visuellen System und dem propriozeptiven System erforderlich. Treten in einem dieser drei Bereiche Komplikationen auf, wie es z. B. im All der Fall ist, kommt es zu Desorientierung und Schwindel. Die Methode der Immersion wird daher mitunter kritisiert, da diese keine Körperrotationstäuschungen und Desorientierung vergleichbar mit denen in tatsächlicher *Mikrogravitation* hervorruft. Allerdings können diese Symptome durchaus unter Wasser in Form eines alternobaren Drehschwindels auftreten oder bewusst provoziert werden (Ross, 2001). Da dieser Drehschwindel jedoch mit Übelkeit und Erbrechen einhergehen kann, wird aus Gründen der Zumutbarkeit und Sicherheit auf eine Induzierung entsprechender Körperrotationstäuschungen unter Wasser in der experimentellen Untersuchung verzichtet.

Die Bewegungsabläufe des Menschen unter Wasser sind langsamer und weniger filigran als an Land (Baddeley, 1966; Adolfson, 1974). Kerr et al. (1978) erklärte diese Resultate mit der zähen Bremsung der Bewegung durch das Wasser. Schmidt et al. (1978) formulierte weitere Erklärungen: Die größere Kraftaufbringung und Krafteinwirkung resultiere in größerer Variabilität der Bewegungspräzision. Eine vergleichbare Verschlechterung der motorischen Leistung tritt bei *Mikrogravitation* ein (Fowler, 2000). Hinsichtlich der feinmotorischen Leistung könnte die Verzerrung der visuellen Wahrnehmung durch das Wasser eine eklatante Beeinflussung darstellen. Selbst bei der Verwendung einer Tauchermaske verändern sich die wahrgenommene Größe, Entfernung, Geschwindigkeitswahrnehmung sowie die wahrgenommene Position und die Konturen von Gegenständen (Ross, 1972; Ross, 1989). Allerdings konnte in mehreren Untersuchungen gezeigt werden, dass der Mensch diese Verzerrungen nach kurzer Zeit adaptieren kann (Luria,

¹⁰ Das vestibuläre System umfasst das Gleichgewichtsorgan und befindet sich zusammen mit dem Hörorgan im Innenohr des Menschen.

1970; Ross, 1970; Ono, 1971; Ross, 1972). Die Immersion stellt somit eine geeignete Methode zur Untersuchung des Einflusses der *Mikrogravitation* auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit dar und wird für die anstehende experimentelle Studie als Methode herangezogen.

3.3.2 Der Handschuh als externer Einflussfaktor

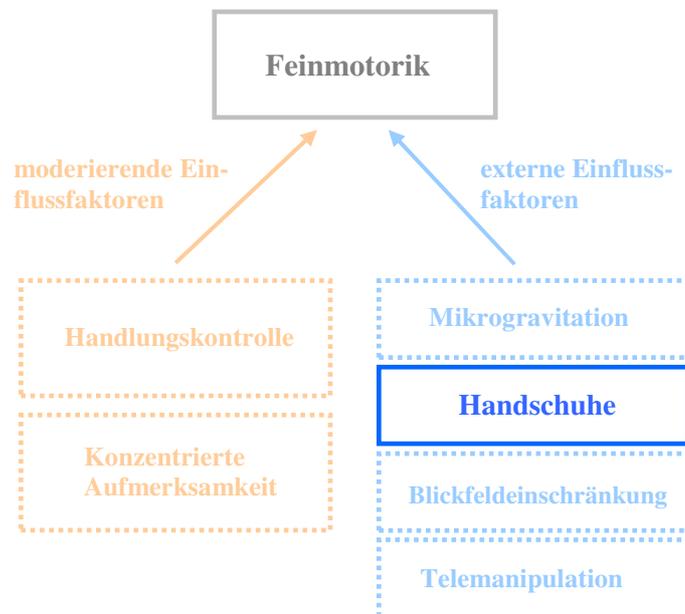


Abb. 9: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Handschuhe werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt und haben nicht selten eine Bewegungseinschränkung und eine Reduktion der taktilen Rückmeldung zur Folge. Die Darstellung des Verwendungszwecks von Handschuhen und der Folgen ihres Einsatzes ist Inhalt des folgenden Kapitels (vgl. Kapitel 3.3.2.1). Der entsprechende Einfluss von Handschuhen (vgl. Abb. 9) und ihren Eigenschaften auf die einzelnen Faktoren der feinmotorischen Leistungsfähigkeit wird anschließend diskutiert (vgl. Kapitel 3.3.2.2).

3.3.2.1 Handschuhe und ihre Funktion

Die Hand des Menschen ist eines seiner wichtigsten und filigransten Instrumente (Wilson, 1998). Ohne Hände könnte der Mensch viele alltägliche Aufgaben gar nicht oder nur unter erhöhter Anstrengung absolvieren (Weinreich, 2003). Selbst in speziellen Bereichen wie zum Beispiel der Weltraummontage ist der Gebrauch der Hände zur Manipulation von Objekten unabdingbar. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Studien angestrengt, um sowohl die Hand und ihre physiologischen Eigenschaften als auch Möglichkeiten zum Schutz dieser vor widrigen Umgebungsbedingungen zu erforschen (Heus, 1995).

Kälte ist eine Umgebungsbedingung, die physiologische Prozesse im Bereich der Hand (Edwards, 1960) und folglich ihre Leistungsfähigkeit verändert (Rogers, 1984). Gerade bei Außenbordeinsätzen ist der Mensch entsprechend widrigen Bedingungen ausgesetzt. Bereits eine Reduktion der Hauttemperatur auf 20°C bewirkt eine leichte Verringerung der motorischen Leistung der Hand (Hellström, 1965). Eine starke Beeinträchtigung der Motorik wird bei einer Oberflächentemperatur von 14° bis 15°C (Mills, 1952; Rubin, 1957; Clark, 1961; Riley, 1984; Daanen, 1993) und einer Gelenktemperatur von 24°C (Clarke, 1958; Petrofsky, 1975) berichtet. Im Bereich der *Feinmotorik* werden besonders die Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Arm-Hand-Ruhe* durch niedrige Temperaturen negativ beeinflusst (Rogers, 1984). Beeinträchtigungen können zusätzlich durch sehr hohen oder sehr niedrigen Umgebungsdruck und dessen Folgen entstehen (Kiessling, 1962; Schmidtke, 1981; Zander, 2008). Verletzungen des Haut-, Muskel- und Fasergewebes stellen eine weitere Ursache dar, aus der eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Hand resultieren kann. Derartige Verletzungen können durch spitze oder scharfe Gegenstände und Kanten verursacht werden.

Einen wirksamen Schutz gegenüber den beschriebenen Einflüssen auf die Leistungsfähigkeit der Handmotorik stellen Handschuhe dar (Nelson, 1995; Imamura, 1998; Geng, 2000). Dabei werden je nach Einsatzbereich unterschiedliche Ansprüche an selbige formuliert. Im Bereich der Welt-raummontage müssen die Handschuhe und der gesamte Raumanzug mehrere Bedingungen erfüllen, um den Astronauten vor starken Druck- und Temperaturschwankungen, Strahlung und herumfliegenden Partikeln zu schützen (Skoog, 2002; Mauschnitz, 2006). Sie müssen aus luftdichtem, feuerfestem, nicht brennbarem Material bestehen, das zugleich reißfest und dennoch geschmeidig ist (Thomas, 2006). Die Erfüllung derartiger Anforderungen geht häufig mit einer Beeinträchtigung der *Beweglichkeit* (Gianola, 1972), *Griffkraft* (Wang, 1987) und der *taktilen Wahrnehmung* (Sudahakar, 1988) im Handbereich einher.

Die *Beweglichkeit* ist gerade im Bezug auf die *Feinmotorik* ein wichtiger Parameter (Heus, 1995). Einen limitierenden Faktor hinsichtlich der *Beweglichkeit* stellen normalerweise die Bänder und ihre begrenzte Dehnbarkeit dar (Fox, 1981). Durch die Handschuhe kommt ein Faktor hinzu, der die *Beweglichkeit* von außen zusätzlich beeinträchtigt. Bellingar et al. (1993) konnten eine Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände aufgrund von Handschuhen anhand einer Videoanalyse zeigen. Während das Beugen der Hand durch die Handschuhe unbeeinflusst blieb, wurden Drehbewegungen und Spreizungen signifikant beeinträchtigt. Auch in einer Studie von Abeysekera (1992) konnte von einer Beeinträchtigung der *Beweglichkeit* der Hand und der Finger durch Handschuhe berichtet werden.

Die von Sudhakar et al. (1988) und Nelson et al. (1995) formulierte Vermutung, dass Handschuhe eine Beeinträchtigung der *taktilen Wahrnehmung* provozieren, konnte in den Untersuchungen von Neiburger (1992) und Mital et al. (1991) bestätigt werden. Allerdings zeigt der Mensch hinsichtlich der Reduktion der *taktilen Wahrnehmung* ein Gewöhnungsverhalten und somit eine, wenn auch eingeschränkte, Kompensation. Menschen, die täglich mit Handschuhen arbeiten, weisen während des Tragens von Handschuhen weniger Schwierigkeiten hinsichtlich der Sensitivität auf als Personen, die selten mit Handschuhen arbeiten (Germaine, 2003).

Besonders die beiden Parameter *Beweglichkeit* und *taktile Wahrnehmung*, die wiederum mit der *Griffkraft* im Zusammenhang stehen (Sudhakar, 1988), sind bei feinmotorischen Aufgabenstellungen von Bedeutung. Wie gezeigt werden konnte, hat das Tragen von Handschuhen auf diese Parameter einen negativen Einfluss. Es soll daher im Folgenden erörtert werden, ob Handschuhe folglich eine direkte Beeinträchtigung der feinmotorischen Leistung hervorrufen.

3.3.2.2 Der Einfluss von Handschuhen auf die feinmotorische Leistung

In den letzten Jahren wurden viele Untersuchungen angestrengt, um den Einfluss von Handschuhen auf die feinmotorische Leistung des Menschen zu erfassen (Bensel, 1993; Nelson, 1995; Gauvin, 2001; Gallus, 2003; Sawyer, 2005). Allgemein konnte festgestellt werden, dass Handschuhe einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der *Feinmotorik* hervorrufen (McGinnis, 1973; Plummer, 1985; Holmér, 1994; Imamura, 1998). Eine Beeinträchtigung in Bezug auf die Bearbeitungszeit, die ein Maß für die feinmotorische Leistungsfähigkeit ist, konnte festgestellt werden. Selbige stieg unter Verwendung von Handschuhen um bis zu 22 % signifikant an (Bradley, 1969; Bensel, 1980; Bensel, 1993). Zusätzlich konnte Neiburger (1992) eine Zunahme der Fehlerrate bei der Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben feststellen.

In Bezug auf den Einfluss von Handschuhen auf die feinmotorische Leistung des Menschen ist zwischen verschiedenen Eigenschaften der entsprechenden Handschuhe zu differenzieren. So ziehen dickere Handschuhe (0.48 mm) eine stärkere Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Hände nach sich als dünnere Handschuhe (0.28 mm) (Bensel, 1993; Geng, 1998; Zander, 2008). Zusätzlich ist die Passung von Bedeutung. Liegt der Handschuh eng an, konnte eine geringere Reduzierung der feinmotorischen Fähigkeit dokumentiert werden. Ist der Handschuh jedoch zu groß, wirkt dies im Vergleich verstärkt beeinträchtigend (Sawyer, 2005).

Um einen verbesserten Schutz vor Kälte und Verletzung gewährleisten zu können, wurde in einigen Studien die Methode, zwei Handschuhe übereinander zu ziehen, untersucht. Die Resultate

werden jedoch kontrovers diskutiert. Während Nelson et al. (1995) keine zusätzliche Beeinträchtigung durch einen zweiten Handschuh feststellen konnte, reduzierte die Kombination von zwei Handschuhen in den Untersuchungen von Johnson et al. (1986) und Endres et al. (1990) die feinmotorische Leistung. Geng et al. (1997) hingegen stellten im Vergleich zur Verwendung von einem Handschuh sogar eine geringere Beeinträchtigung der Leistung in feinmotorischen Tests bei der Verwendung von doppelten Handschuhen fest. Dies wurde mit der Reibung des inneren und des äußeren Handschuhs aneinander und der daraus resultierenden besseren Passung erklärt. Die uneinheitlichen Resultate hinsichtlich der Methode, zwei Handschuhe übereinander zu tragen, lässt sich durch den Einsatz jeweils unterschiedlicher Messmethoden bezüglich der feinmotorischen Leistung erklären. Zudem weicht die Zusammensetzung der Stichproben in den einzelnen Studien voneinander ab und lässt einen direkten Vergleich somit als wenig sinnvoll erscheinen.

Allgemeine Aussagen zur feinmotorischen Leistung sind allerdings kritisch zu betrachten. Wie bereits beschrieben (vgl. Kapitel 3.1), kann die feinmotorische Leistung nicht undifferenziert als eine eindimensionale Leistung bezeichnet werden, sondern muss als eine Kombination aus mehreren Faktoren verstanden, untersucht und dargestellt werden. Diese Differenzierung wurde bei den oben beschriebenen Studien nicht uneingeschränkt gewährleistet. In weiteren Untersuchungen standen hingegen einzelne Faktoren im Vordergrund. Die Ergebnisse konnten zeigen, dass Menschen, die mit Handschuhen versehen sind, in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* in ihrer Leistung signifikante Beeinträchtigungen erfahren (Rogers, 1984; Johnson, 1986; Zander, 2008). Vergleichbare Resultate zeigten sich in Bezug auf die *Handgeschicklichkeit*. Dieser *Feinmotorik*-Faktor wird ebenfalls durch das Tragen von Handschuhen negativ beeinflusst (Gianola, 1972; Berger, 2009). Ein dritter *Feinmotorik*-Faktor wurde in mehreren Studien hinsichtlich einer möglichen Einschränkung durch die Verwendung von Handschuhen überprüft. Dieser Faktor wird als *Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit* beschrieben und ist ebenfalls anfällig für die Beeinträchtigung der Hand durch Handschuhe (Rogers, 1984; Parsons, 1985).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Handschuhe einen guten Schutz gegenüber widrigen Umgebungsbedingungen bieten und z. B. im Orbit für den Menschen überlebensnotwendig sind (Abramov, 2003). Gleichzeitig wird durch sie jedoch die Leistung in Bezug auf einzelne Faktoren der *Feinmotorik* stark beeinträchtigt. Beim Einsatz von Handschuhen muss somit in der Regel mit einer längeren Bearbeitungszeit oder einer erhöhten Fehlerrate gerechnet werden.

3.3.3 Blickfeldeinschränkung als externer Einflussfaktor

Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über den externen Einflussfaktor *Blickfeldeinschränkung* gegeben und ein möglicher Zusammenhang zwischen diesem Faktor und der feinmotorischen Leistungsfähigkeit dargestellt (vgl. Abb. 10).

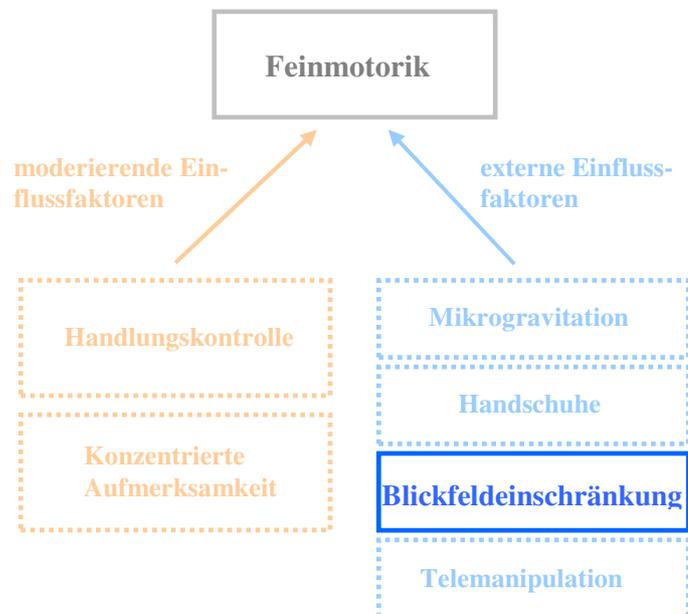


Abb. 10: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Die wichtigste, komplexeste und am weitesten entwickelte Sinnesmodalität des Menschen ist das Sehen. Es erlaubt das Wahrnehmen der Umgebung und das Abstimmen des aus diesen Informationen resultierenden Handelns. Im übertragenen Sinne ist das Auge vergleichbar mit einer Kamera, die für das Gehirn die Welt filmt (Zimbardo, 1999). Ähnlich wie bei einem Bildaufnahmegerät wird auch im menschlichen Auge die Welt durch eine Linse, die das Licht sammelt und bündelt, registriert. Im Gegensatz zur Kamera, die ein Bild mit gleichmäßiger Auflösung abbildet, ist das visuelle System des Menschen lediglich in der Lage, den Bereich von $\pm 1^\circ$ bis $\pm 2^\circ$ um die optische Achse, den fovealen Bereich (Miura, 1990; Martens, 2000), farbig und scharf zu sehen. Dies entspricht der Größe des Daumennagels am ausgestreckten Arm. Die Peripherie dient im Vergleich zur Fovea zur Wahrnehmung der Bewegung von Objekten. Diese Region wird als Sichtfeld definiert und umfasst den Bereich, in dem visuelle Informationen foveal und peripher erlangt werden können, während die Augen und der Kopf des Betrachtes fixiert bleiben (Ball, 1988). Um die Begrenzung des Sichtfeldes in ihrer Auswirkung zu reduzieren, wird das Umfeld

durch Sakkaden¹¹ und Blickfolgebewegungen¹² abgetastet und somit die Region der Informationsgewinnung erweitert. Sakkaden finden bis zu fünf Mal pro Sekunde statt und sind Teil des Abtastvorgangs, über den das Auge die Umgebung wahrnimmt. Da nur in der Fovea das scharfe und farbige Sehen optimal ausgeprägt ist, reicht es nicht aus, einen Punkt eines Sehobjektes zu fixieren, um das Objekt im Ganzen klar wahrzunehmen. Vielmehr werden viele Punkte des Sehobjektes schnell nacheinander abgetastet und die scharfen Einzelbilder im Gehirn zu einem Gesamtbild verrechnet. Dies geschieht durch das Wechselspiel von Sakkaden und Fixationsperioden (Boyce, 2003).

Das nutzbare Sichtfeld umfasst im Vergleich zum allgemeinen Sichtfeld die optische Region, in der visuelle Informationen vom Menschen nicht nur wahrgenommen, sondern auch verarbeitet und in eine Reaktion umgesetzt werden können (Williams, 1995; Crundall, 1999; Rantanen, 1999). Einen signifikanten Einfluss auf die Größe des nutzbaren Sichtfeldes stellt die kognitive Belastung des Betrachters dar. Bei hoher Belastung reduziert sich das nutzbare Sichtfeld auf den fovealen Sichtbereich (Olsson, 2000; Nunes, 2002; Recarte, 2003) und zieht damit den Verlust der Information aus der Peripherie nach sich. Das Blickfeld hingegen beschreibt die räumliche Region, in der Objekte wahrgenommen werden können, wenn der Betrachter seine Augen, jedoch nicht den Kopf, bewegt (Schmidtke, 1993). Die räumliche Ausdehnung des (nutzbaren) Sichtfeldes ist demnach kleiner als die des Blickfeldes. Sowohl eine Blickfeld- als auch eine Sichtfeldeinschränkung kann zum einen durch äußere Manipulation in Form von Prismenbrillen und Augenabdeckungen provoziert oder durch neuronale Erkrankungen z. B. in Form eines Skotoms (Gazzaniga, 2002) verursacht werden.

Grundsätzlich dient die visuelle Sinnesmodalität neben der Wahrnehmung von Objekten, Mustern und Farben auch der Koordination von Bewegungen. Gerade beim Erlernen von neuen motorischen Abläufen wird das visuelle Feedback zur Reduktion von Fehlern verwendet (Krendel, 1960). Motorische Abläufe wie das Greifen und *Zielen* bilden dabei einen großen Bestandteil der täglichen Bewegungen des Menschen. Derartige motorische Ausführungen werden in drei Stufen unterteilt (Jakobson, 1991). Die erste Stufe beinhaltet die räumliche Positionierung der Gliedmaßen in Bezug auf ein Objekt und wird als Zielbewegung zusammengefasst. Die zweite Stufe umschreibt die präzise Ausrichtung der Finger und das Ergreifen des jeweiligen Gegenstandes. Ab-

¹¹ Sakkaden umfassen schnelle und kurz währende Augenbewegungen (Thier, 2003).

¹² Blickfolgebewegungen beschreiben die Augenbewegungen, die bei der Wahrnehmung von bewegten Sehobjekten stattfinden. Diese „heftet“ sich mithilfe der Fixation an das bewegte Objekt und folgt diesem mit der entsprechenden Winkelgeschwindigkeit.

schließlich folgt die dritte Stufe, die als Phase der Objektmanipulation betitelt wird (Jeannerod, 1988; Gonzales-Alvarez, 2007).

Die Zielbewegung wird durch die räumliche Position des Objektes beeinflusst, während sich die Greifbewegung der Form, Größe und Farbe des Gegenstandes anpasst (Gentilucci, 2001). Für eine gezielte Greifbewegung ist sowohl die genaue Registrierung der Objektlokalisierung als auch die Koordination der einzelnen Körperglieder von hoher Bedeutung (Desmurget, 1998). In verschiedenen Studien wurde der Einfluss der *Blickfeldeinschränkung* auf diese beiden Bewegungsabläufe analysiert (Watt, 2000a; Watt, 2000b; Gonzalez-Alvarez, 2007). Die Genauigkeit der Bewegung nimmt ab, je weiter sich das zu greifende Objekt im peripheren Blickfeld befindet (Westheimer, 1984; Paillard, 1985). Diese relative Ungenauigkeit in Bewegungsabläufen bestätigte sich in weiteren Untersuchungen. Deren Resultate zeigten, dass eine Unterbindung der fovealen Sakkaden die Akkuratheit der Zielbewegungen signifikant verringert (Roll, 1986; Bock, 1993). Allerdings beziehen sich die bisherigen Untersuchungen lediglich auf allgemeine, undefinierte Greif- und Zielbewegungen. Diese sind zu unterscheiden von den kategorisierten *Feinmotorik*-Faktoren nach Fleishman (1972).

Die Phase der Objektmanipulation, die unter anderem die feinmotorischen Faktoren beinhaltet, wurde bisher nur vereinzelt in Bezug auf die *Blickfeldeinschränkung* untersucht. In einer Studie von Johnson et al. (1986) konnte gezeigt werden, dass eine *Blickfeldeinschränkung* durch Gasmasken (Kobrick, 1986) keinen signifikanten Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat. Jedoch beziehen sich die Resultate lediglich auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit*. Die weiteren Faktoren wurden nicht erfasst. Baddeley (1966) konnte hingegen nachweisen, dass die *Blickfeldeinschränkung* durch Tauchermasken einen negativen Effekt hinsichtlich der *Handgeschicklichkeit* verursacht. Watt et al. (2000a) postulierten daher, dass eine *Blickfeldeinschränkung* bei jeglichen visuomotorischen Aufgabenstellungen erfasst und systematisch untersucht werden sollte. Dementsprechend wird die *Blickfeldeinschränkung* in der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die entsprechenden *Feinmotorik*-Faktoren als externer Einflussfaktor berücksichtigt und analysiert (vgl. Kapitel 4.3.2).

3.3.4 Telemanipulation

Das folgende Kapitel dient der Beschreibung von Telemanipulationssystemen und den verschiedenen Eingabegeräten. Des Weiteren soll dargestellt werden, inwiefern diese Systeme für die feinmotorische Tätigkeit von Bedeutung und als entsprechende externe Einflussfaktoren zu ver-

stehen sind (vgl. Abb. 11). Dabei kommen verschiedenste Systeme zum Einsatz. Im Folgenden werden die gängigsten Methoden beschrieben.

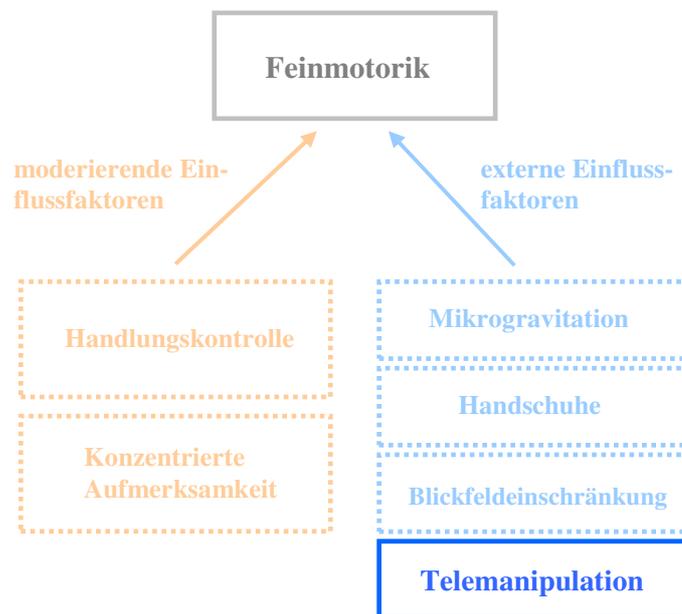


Abb. 11: Grafische Darstellung der zu betrachtenden moderierenden und externen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik

Telemanipulationssysteme, mitunter auch als Teleoperationssysteme oder Telerobotiksysteme bezeichnet (Stone, 2001), bestehen aus mehreren miteinander verbundenen Komponenten. Ein Telemanipulationssystem beinhaltet einen *Master* oder Operator, der von einem Menschen gesteuert wird (Kosuge, 1995). Diese gelegentlich als Telearbeitsplatz umschriebene Komponente besteht sowohl aus Eingabe- als auch aus Ausgabesystemen (vgl. Kapitel 3.3.4.1). Die Weiterleitung der entsprechenden Daten erfolgt über die zweite Komponente, ein Rechnersystem, das eine Verbindung zwischen dem *Master* und der dritten Komponente, dem *Slave* ermöglicht. Der *Slave* wird zur Umsetzung der jeweiligen Aufgabe in einer entfernten Umgebung verwendet und trägt daher auch die Bezeichnung Teleoperator (Sheridan, 1992). Er verfügt sowohl über Effektoren, um die entsprechenden Eingaben auszuführen, als auch über Sensoren, um Informationen aus der Umgebung aufzunehmen. Die beidseitige Rückmeldung ist eines der am häufigsten eingesetzten Systeme, wobei der *Slave* den Bewegungen des *Masters* folgt bzw. sie umsetzt und seinerseits die Information aus der entfernten Umgebung über das Rechnersystem an den *Master* zurückmeldet.

Besonders herausfordernd ist die Generierung einer Umgebung, die dem Benutzer das Gefühl gibt, tatsächlich in der entfernten Umgebung zu sein. Im Idealfall wird in der Telemanipulation

die bestehende, durch räumliche Entfernung induzierte Barriere für den Menschen überwunden. In diesem Zusammenhang wird der Begriff der Telepräsenz verwendet, sodass häufig nicht nur von einem Telemanipulationssystem, sondern weiterführend von einem Telepräsenzsystem gesprochen wird. Der Begriff Telepräsenz beschreibt das Gefühl, sich aktuell in der entfernten Umgebung zu befinden (Minsky, 1980; Butterworth, 1992; Held, 1992; Sheridan, 1992; Bandini, 2003; Luciani, 2003; Schubert, 2003). Diese Definition ist allerdings ständiger Veränderung und Weiterentwicklung unterworfen (Pongrac, 2008). Um Einheitlichkeit gewährleisten zu können, soll im Rahmen dieser Arbeit oben genannte Definition gelten.

3.3.4.1 Ein- und Ausgabegeräte

Bei Telemanipulationssystemen wird zwischen verschiedenen Ein- und Ausgabegeräten unterschieden. Je nach anzusprechender Sinnesmodalität werden taktile, kraftrückmeldende, akustische und optische Systeme eingesetzt. Dabei kommen verschiedene Systeme zum Einsatz. Im Folgenden werden einige der gängigsten Methoden beschrieben.

Die taktilen Systeme werden nochmals in die jeweilige Art der Empfindung unterteilt. Zu unterscheiden sind dabei Druckempfindungen, elektrotaktile, vibrotaktile oder thermische Empfindungen, die durch entsprechende Stimulationen erzeugt werden können (Zwisler, 2001). Da sowohl die Reizauflösung der Epidermis als auch der darunter liegenden Dermis je nach Ort der Implementierung schwankt, sollten eben merkliche Unterschiede und Absolutschwellen berücksichtigt werden (Röder, 2001). Eine Region besonders hoher Auflösung bilden die Fingerspitzen, während der menschliche Rumpf einen Bereich geringer Auflösung darstellt (Goldstein, 1997).

Die pneumatische Stimulation erfolgt durch Luftkissen (Suzumori, 1991; Shimoga, 1994), die durch sequenzielle Ansteuerung eine Objektexploration simulieren oder durch statischen Druck das Empfinden von Greifkräften beim Benutzer hervorrufen können (Stone, 2001). Durch z. B. kleine Vibrationsmotoren kann hingegen die vibrotaktile Stimulation erzeugt werden (Wagner, 2002). Die elektrotaktile Reizung erfolgt über die Applizierung einer geringen und damit schmerzfreien Stromstärke. Durch thermoelektrische Pumpen kann die Haut des Menschen gezielt erwärmt oder gekühlt und somit unterschiedliche thermische Eindrücke erzeugt werden (Burdea, 1996).

Die optischen Systeme können in kopfbasierte, nicht-tragbare und stationäre Geräte unterteilt werden. Dabei gibt es sowohl immersive, d. h. das gesamte Umblickfeld (Schmidtke, 1993) einschließende, und nicht-immersive Systeme, die im Vergleich eine Begrenzung hinsichtlich des Gesichtsfeldes aufweisen. Allen gemeinsam ist die Darstellung benötigter Bildinhalte durch un-

terschiedliche Techniken. Somit wird das visuelle System des Menschen angesprochen und der Eindruck einer jeweils erforderlichen Umgebung geschaffen.

Die akustische Abbildung entfernter Umgebung kann mittels Kopfhörer durch die unabhängige und gezielte Ansteuerung beider Ohren erreicht werden. Besonders dichotische Kopfhörer bieten durch die verzögerte Ausgabe von Signalen an jeweils einem Ohr die Möglichkeit, Positionen von Schallquellen im Raum zu simulieren. Dadurch kann der Eindruck eines dreidimensionalen Raumes vermittelt werden. Zusätzlich erhöht die Einspielung von Nachhall und Reflexionen die Telepräsenz (Deml, 2004). Neben den Kopfhörern bietet der Einsatz von Lautsprechern eine weitere Option der akustischen Rückmeldung. Je mehr Lautsprecher um den Benutzer positioniert werden, umso realistischer gestaltet sich die räumliche Simulation.

Die kraftreflektierenden Geräte können in tragbare und nicht-tragbare Systeme unterteilt werden. Sie übertragen durch mechanische Aufbauten Kraft auf die Muskeln des Anwenders. Dabei werden die nicht-tragbaren Geräte in der Umgebung fixiert und stellen daher häufig eine Einschränkung der Bewegungsfreiheit, besonders der Lokomotion¹³, des Benutzers dar. Diese Einschränkung ist bei tragbaren Systemen nicht gegeben. Sie werden direkt am Körper getragen und erinnern optisch häufig an ein Skelett, wodurch sich die Bezeichnung Exoskeletton eingebürgert hat (Burdea, 1992). Allerdings müssen diese Geräte vor der Verwendung an den jeweiligen Benutzer angepasst und kalibriert werden und stellen nicht selten durch ihr Gewicht eine Belastung dar. Das Exoskeletton fungiert dabei in einem Telemanipulationssystem nicht nur als Ausgabe-, sondern ebenso als Eingabegerät. Zusammen mit dem Datenhandschuh kann es als intuitives System bezeichnet werden. Die Steuerung und die Bewegung durch den Raum sind dem natürlichen Bewegungsablauf des Menschen angepasst. Ein ebenfalls weit verbreitetes Eingabegerät ist der personal haptic interface mechanism, das so genannte Phantom. Dieses System kann zur sequenziellen Erfassung von Objekten oder Oberflächen verwendet werden. Da es jedoch lediglich punktuelle Rückmeldung über die Beschaffenheit der entfernten Umgebung an den Benutzer zurückmeldet, ist es für großflächige Explorationen weniger geeignet. Neben den bereits beschriebenen Eingabegeräten fungieren noch weitere Aufbauten als Schnittstelle in Telemanipulationsszenarien. Diese hinsichtlich der Steuerung eher als abstrakt zu bezeichnenden Systeme umfassen z. B. die Computermaus und den Joystick. Zwar werden selbige für den Einsatz in Telemanipulationssystemen z. B. in Form der vom DLR entwickelten Spacemouse (Heger, 2006) mitunter erweitert, dennoch sind selbigen Geräte, die der natürlichen Bewegung und der Greifprimitiven des Menschen angepasst sind, vorzuziehen.

¹³ Bewegung, die der Ortsveränderung dient (Leszczynski, 1995).

3.3.4.2 Messkriterien im Telemanipulationssystem

Um den Einfluss von einzelnen Telemanipulationssystemen auf den Menschen untersuchen zu können, müssen in einem ersten Schritt geeignete Messkriterien festgelegt werden. Derartige Kriterien lassen sich in zwei Bereiche unterteilen. Den einen Bereich bildet die Erfassung der bereits beschriebenen Telepräsenz. Der zweite Bereich umfasst die Analyse der Performanz.

Die Telepräsenz lässt sich in eine subjektive und in eine objektive Telepräsenz aufteilen, die jeweils mit unterschiedlichen Methoden erfasst werden können. Die subjektive Telepräsenz ist ein Maß für die individuelle Erfahrung des Anwenders im Telemanipulationssystem. Ratingskalen, Interviews oder die Erfassung von psychophysischen Maßen bilden hierbei weit verbreitete Datenerhebungsmethoden (Usoh, 2000; Lessiter, 2001; Scheuchenpflug, 2001). Die objektive Telepräsenz kann im Vergleich dazu ohne die Auskunft des Anwenders erhoben werden. Sie umfasst physiologische Korrelate, wie z. B. die Herzratenmodulation (Meehan, 2002) und Reflexe. Allerdings weist die Erfassung der Telepräsenz Einschränkungen bezüglich der Gütekriterien der Messdaten auf. Die Antworten bezüglich des subjektiven Präsenzerlebens basieren auf Selbstbeobachtungen und unterliegen somit dem Einfluss subjektiver Verzerrungen und Verfälschungen. Im Vergleich dazu kann die objektive Telepräsenz unabhängig vom Versuchsleiter erfasst werden. Die Richtung der Interpretation dieser Daten ist jedoch nicht klar definiert. Somit können unterschiedliche Emotionen zu einer vergleichbaren Veränderung der Pulsfrequenz führen (Nash, 2000).

Die Performanz wird allgemein als Prozess des Leistens, vorwiegend in Bezug auf motorisch zu erledigende und gegenständliche Aufgaben, beschrieben (Häcker, 1998). Sie wird über die Fehleranzahl und/oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit erfasst (Stein, 1990; Held, 1991). Ein direkter Zusammenhang zwischen Telepräsenz und Performanz wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Während einige Wissenschaftler von einem direkten positiven Zusammenhang sprechen (Minsky, 1980; Loomis, 1992), wird dieser von anderen grundsätzlich bezweifelt (Schloerb, 1995; Witmer, 1996) oder nur durch den Einfluss dritter Variablen als erklärbar angesehen (Nash, 2000; Mania, 2001; Schuemie, 2001; Sadowski, 2002). Daher sollten die beiden Konstrukte Performanz und Telepräsenz nach wie vor getrennt voneinander erfasst werden. Aus diesem Grund und den bereits beschriebenen Einschränkungen der Gütekriterien der Telepräsenzerfassung steht in der vorliegenden Arbeit die Untersuchung der Performanz im Vordergrund.

3.3.4.3 Gestaltungskriterien und ihr Einfluss auf feinmotorische Leistungsfähigkeit

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über eine Auswahl von Gestaltungsparametern in Telemanipulationssystemen gegeben, die hinsichtlich ihres Einflusses auf die feinmotorische Leis-

tungsfähigkeit des Menschen von Bedeutung sein könnten. Dazu zählen die Anzahl der verfügbaren Freiheitsgrade, die Länge der *Zeitverzögerung* zwischen Sender und Empfänger, der Verlust von Datenpaketen und die verschiedenen Arten der sensorischen Rückmeldung.

Der Verlust von Datenpaketen umfasst den prozentualen Anteil der Pakete, die bei einer Übertragung während eines Round Trips verloren gehen. Diese Übertragungsleistung wird ähnlich wie die Zeitverzögerung durch verschiedene Faktoren beeinflusst. In diesem Rahmen sind unter anderem die Netzbelastung, die Entfernung und die Anzahl der Knotenpunkte zu nennen (Oboe, 2003). Die Datenübertragung kann daher durch Paketverluste oder das Auftreten von Bitfehlern, Verfälschungen eines binären Signalelementes bei der Übertragung oder Speicherung innerhalb der Pakete fehlschlagen. Zur Kompensation entsprechender Probleme bei der Datenübertragung finden im Bereich der Telemanipulation verschiedene Verfahren Verwendung. Zu nennen sind dabei der sogenannte Deadband-Ansatz (Hirche, 2005), die lineare Prädiktion (Hinterseer, 2006) oder eine Kombination aus beiden Methoden. Besonders die Kombination aus beiden Ansätzen ist vielversprechend. Eine Untersuchung von Hinterseer et al. (2006) zeigte, dass eine Reduktion der Paketrate um 95 % implementiert werden konnte, ohne das Präsenzerleben des Benutzers signifikant zu beeinträchtigen (Pongrac, 2008).

Zeitverzögerungen zwischen Eingangs- und Ausgangssignal können durch unterschiedliche Einflussfaktoren entstehen. Sowohl die Länge der Kommunikationsstrecke, die besonders im Bereich der Weltraummontage erheblich ist, als auch die physikalische Beschaffenheit des Kommunikationskanals können eine *Zeitverzögerung* provozieren. Zeitintensive Verarbeitungsschritte erhöhen zusätzlich die Wahrscheinlichkeit von *Zeitverzögerungen* (Pongrac, 2008). Diese Verzögerungen stellen für den Menschen einen unnatürlichen und damit ungewohnten Parameter dar, der zu einer starken Reduktion der Performanz (Hannaford, 1991; Turner, 2001) bis hin zur Unfähigkeit, die Aufgabe zu bewältigen, führen kann (Sheridan, 1993). Dass die *Zeitverzögerung* in Telemanipulationssystemen einen negativen Effekt auf die Performanz hat, konnte in mehreren Studien gezeigt werden (Thompson, 1977; Held, 1991; Sheridan, 1993; Pongrac, 2008). Allerdings unterscheidet sich die Beeinträchtigung je nach Aufgabenart. Bei Trackingaufgaben¹⁴ ist die Reduktion der Performanz am stärksten. Schon ab einer *Zeitverzögerung* von 120 ms konnte eine signifikante Beeinträchtigung der Aufgabenleistung erfasst werden (Held, 1991). Weniger starken Einfluss hat die *Zeitverzögerung* bei Platzierungsaufgaben und einen noch geringeren Einfluss im Hinblick auf Greifaufgaben (Pongrac, 2008). Daraus kann geschlossen werden, dass Aufgaben mit Objektkon-

¹⁴Experimentelle Aufgaben, mit deren Hilfe sich die Bewegungssteuerung und Spurenverfolgung vor allem im Umgang mit Werkzeugen untersuchen lässt (Häcker, 1998).

takt stärker beeinflusst werden als Aufgaben, bei denen freie Bewegungen im Mittelpunkt stehen. Da bei feinmotorischer Aufgabenstellung die Objektmanipulation eine wichtige Komponente darstellt, lässt sich vermuten, dass *Zeitverzögerung* einen negativen Einfluss auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit haben könnte. Allerdings wurde diese Annahme in den bisherigen Studien nicht systematisch untersucht.

Ein weiterer Parameter, der Einfluss auf die Aufgabenleistung in Telemanipulationssystemen hat, ist die Anzahl der verfügbaren Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DoF). Grundsätzlich gibt es drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade oder Dimensionen (Hiersig, 1995). In einigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine gute motorische Leistung in einer Dimension unmittelbar zu einer Reduktion in einer anderen Dimension führt (Gardner, 1950; Senders, 1955). Dieser Befund kann dadurch erklärt werden, dass das motorische System des Menschen generell ausschließlich auf die benötigten Freiheitsgrade zurückgreift. Die nicht benötigten werden blockiert. Dieses Phänomen bezeichnete Bernstein bereits 1967 als „degrees of freedom“-Problem. In späteren Studien mit sechs Freiheitsgraden konnte gezeigt werden, dass lediglich 25 % der Bewegungen, unabhängig vom Eingabegerät, unkoordiniert ablaufen (Masliah, 2000). Der Einsatz von mehreren Dimensionen ist demnach möglich, zieht jedoch immer eine Reduktion der motorischen Leistung nach sich (Masliah, 2000; Deml, 2004; Pongrac, 2008). Aus diesem Grund sollten nur die für die Aufgabenbearbeitung notwendigen Freiheitsgrade implementiert werden (Zhai, 1997; Deml, 2004).

Die Sensorik ist ein wichtiger Bereich in der Telemanipulation. Es kann sowohl visuelle, akustische als auch haptische Rückmeldung gegeben werden. Diese Modalitäten können einzeln oder sogar gleichzeitig appliziert werden. Die visuelle Rückmeldung gilt als besonders wichtig, da viele Aufgaben eine hohe räumliche Komponente aufweisen (Deml, 2004). Die Implementierung der haptischen Rückmeldung ist schwieriger als die der visuellen und akustischen. Dennoch ist sie gerade bei Explorationsaufgaben von Vorteil, da die haptische Rückmeldung bei derartigen Aufgaben die Performanz verbessert (Howe, 1995; Lederman, 1999). Die Kombination mehrerer Modalitäten ist ebenfalls möglich. In diesem Fall ist eine asynchrone Darbietung, d. h. ein zeitverzögertes Auftreten der einzelnen Modalitäten zueinander, effektiver als ein Telemanipulationssystem ohne jegliche Rückmeldung (Petzold, 2004). Laut Adams (2001) und Unger (2002) dauert die Handhabung von Objekten, unabhängig von der jeweiligen Art der sensorischen Rückmeldung, in Telemanipulationssystemen länger als die manuelle Manipulation. Massimo et al. (1994) und Li et al. (1996) hingegen stellten fest, dass die Telemanipulation bei Platzierungsaufgaben durch visuelle Rückmeldung vergleichbar mit der Performanz in realer Umgebung ist. Allerdings

wurden bei den unterschiedlichen Studien verschiedene Eingabegeräte verwendet und unterschiedliche Aufgaben gestellt. Daher ist ein direkter Vergleich der Resultate und eine grundsätzliche und allgemeingültige Aussage bezüglich des Einflusses von Telemanipulationssystemen und deren sensorischer Rückmeldung auf die Bearbeitungszeit und die feinmotorische Leistung bisher nicht möglich. Eine systematische Untersuchung eines Telemanipulationssystems auf die einzelnen *Feinmotorik*-Faktoren (vgl. Kapitel 3.1) ist demzufolge sinnvoll.

3.4 Zusammenfassung und Konsequenzen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erfassung der Einflüsse von sowohl moderierenden als auch externen Faktoren auf die feinmotorische Leistung. Sie soll Aufschluss über die feinmotorische Leistungsfähigkeit des Menschen bei spezifischen Montageaufgaben zum einen mit einem Telemanipulationssystem und zum anderen während eines simulierten Außenbordeinsatzes (extravehicular activity, EVA) geben. Diese Gegenüberstellung wird zur Ermittlung der Beeinflussung des Telemanipulationssystems auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit des Menschen herangezogen. Da die feinmotorische Fähigkeit nicht als ein umfassendes Maß erhoben werden kann und sich statt dessen in mehrere Facetten unterteilt (Fleishman, 1972), ist eine systematische Analyse der einzelnen *Feinmotorik*-Faktoren sinnvoll.

Die zu untersuchenden externen Einflussfaktoren entsprechen den Bedingungen, mit denen der Mensch während eines Außenbordeinsatzes im Weltraum oder der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem konfrontiert wird. Dazu zählen zum einen bei der Weltraummontage die *Mikrogravitation*, die *Bewegungseinschränkung* der Hände und die Reduktion der *taktilen Wahrnehmung* durch Handschuhe sowie die *Blickfeldeinschränkung*. Zum anderen trifft der Mensch bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem auf unterschiedliche *Anzahlen von Freiheitsgraden*, *Zeitverzögerungen* zwischen dem Sender und Empfänger und verschiedene, simulierte *Arten von sensorischen Rückmeldungen*. Zwar wurde die Beeinträchtigung dieser Bedingungen auf die Leistungsfähigkeit des Menschen bereits durch verschiedene Studien untersucht (Bock, 1993; Sheridan, 1993; Imamura, 1998; Masliah, 2000; Adams, 2001; Bock, 2001), allerdings nicht im Hinblick auf die einzelnen *Feinmotorik*-Faktoren, die neben den entsprechenden Fachkenntnissen gerade beim On-orbit-Servicing von Bedeutung sind. Gerade im Bereich der Weltraummontage ist die Auswirkung der *Zeitverzögerung* auf die Performanz von Wichtigkeit.

Des Weiteren erfolgte bisher kein systematischer Vergleich zwischen der feinmotorischen Leistung des Menschen im Telemanipulationssystem und während eines Außenbordeinsatzes. Diese Gegenüberstellung ermöglicht jedoch die Bewertung des Ist-Zustandes des Telemanipulations-

systems bezüglich der Performanz im Vergleich zu dem Szenario, in dem Montagearbeiten im On-orbit-Servicing bisher erfolgen, dem EVA. Die Leistung des Menschen unter den Bedingungen des simulierten Außenbordeinsatzes bildet somit ein Vergleichsmaß für die Leistung des Menschen mit dem Telemanipulationssystem.

Ebenfalls unbeachtet blieb bisher der Einfluss der moderierenden Faktoren *Handlungskontrolle* und *konzentrierte Aufmerksamkeit* auf die *Feinmotorik*-Facetten. Jedoch könnten gerade diese Konstrukte bei der Arbeit unter ungewohnten Bedingungen, zu denen die der Telemanipulationssysteme und der Außenbordeinsätze zählen, von Bedeutung sein. Die Untersuchung dieser Annahme und der Vergleich des Einflusses der Bedingungen bei der Telemanipulation und der manuellen Weltraummontage auf die feinmotorische Leistung werden im Folgenden beschrieben.

4 Forschungsmethodisches Design

Um den Einfluss der unterschiedlichen moderierenden und externen Faktoren auf die feinmotorische Leistung (vgl. Kapitel 3) während der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem und während eines simulierten Außenbordeinsatzes untersuchen zu können, muss in einem ersten Schritt ein geeigneter Prüfstand entwickelt und validiert werden (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2). Dieser Prüfstand sollte, neben der Erfassung der feinmotorischen Leistung, sowohl robust genug für den Einsatz in einem Telepräsenzsystem als auch zur Simulation eines EVAs sein. Wie bereits in Kapitel 3.3.1.1. beschrieben, stellt der Parabelflug für die Teilnehmer eine hohe Belastung dar, und bietet lediglich ein kurzes Zeitfenster, in dem *Mikrogravitation* herrscht. Aus diesen Gründen erfolgt die Simulation des Außenbordeinsatzes durch ein Unterwasserszenario. In einem zweiten Schritt werden in Kapitel 4.3 die externen Einflussfaktoren und ihre Wirkung auf die montagerelevanten *Feinmotorik*-Faktoren experimentell untersucht. Der Vergleich zwischen der Leistungsfähigkeit des Menschen in einem Telemanipulationssystem und während eines simulierten Außenbordeinsatzes in Bezug auf die notwendigen *Feinmotorik*-Facetten wird ebenfalls in Kapitel 4.3 dargestellt. Darauf folgend steht in Kapitel 4.4 die Erfassung des Einflusses der moderierenden Faktoren *Handlungskontrolle* und *konzentrierte Aufmerksamkeit* bezüglich der feinmotorischen Leistung im Mittelpunkt. Abschließend werden die Resultate zusammengefasst (vgl. Kapitel 4.3.5 und Kapitel 4.4.3) und im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit diskutiert (vgl. Kapitel 5).

4.1 Ausrichtung des Prüfstandes

Gerade im Bereich der Weltraummontage ist eine horizontale Ausrichtung der Arbeitsoberfläche nicht selbstverständlich. Der Astronaut muss sich jeweils den gegebenen Umständen anpassen und sowohl horizontale als auch vertikale Oberflächen bearbeiten können. Daher wird im folgenden Kapitel eine Studie vorgestellt, in der untersucht wird, ob die vertikale gegenüber der horizontalen Ausrichtung von Arbeitsoberflächen einen Einfluss auf die einzelnen *Feinmotorik*-Faktoren und damit auf die motorische Leistungsfähigkeit des Menschen hat. Dazu erfolgt die Entwicklung und Beschreibung eines Prüfstandes, der Grundkomponenten gängiger Montageaktivitäten beinhaltet. Zeigen die Ergebnisse, dass die Ausrichtung des Prüfstandes eine Beeinflussung der Performanz hervorruft, muss eine Validierung für beide Bedingungen erfolgen, um eine umfassende Analyse der feinmotorischen Fähigkeit mittels dieses Prüfstandes und damit eine höhere Generalisierbarkeit der Resultate zu ermöglichen. Wird kein Unterschied zwischen der vertikalen und der horizontalen Ausrichtung ersichtlich, genügt die Validierung entweder der einen oder der anderen Variante.

4.1.1 Methode

4.1.1.1 Stichprobe

30 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 37 Jahren ($\bar{x} = 23,5$ Jahre) nahmen an der Untersuchung teil. Darunter befanden sich elf Frauen und 19 Männer. Mithilfe des Edinburgh Inventars (Oldfield, 1971) wurde die Händigkeit der Probanden erfasst. Dieser Fragebogen besteht aus zwanzig Fragen zur Erfassung der Dominanz der linken, rechten oder beider Hände bei alltäglichen Tätigkeiten. Die Auswertung des Fragebogens zeigte, dass die untersuchte Stichprobe ausschließlich aus Rechtshändern bestand. Zwar konnte bisher kein Unterschied zwischen Links-, Rechts- und Beidhändern hinsichtlich der feinmotorischen Leistung bei bimanuellen Aufgaben festgestellt werden (Müller, 2003), jedoch waren diese Untersuchungen nicht auf die unterschiedliche Orientierung von Arbeitsoberflächen ausgerichtet. Um eventuelle Einflüsse zu unterbinden, wurde daher bezüglich der Händigkeit eine homogene Stichprobe ausgewählt. Alle Versuchspersonen wiesen einen unbeeinträchtigten oder korrigierten Visus auf und berichteten keine neuronalen oder motorischen Beeinträchtigungen.

4.1.1.2 Aufbau

Für die Untersuchung einzelner *Feinmotorik*-Faktoren wurde bereits im Rahmen des Wiener Testsystems eine kommerziell erhältliche Testbatterie von der ©Schuhfried GmbH entwickelt. Dieses Verfahren, die Motorische Leistungsserie, wurde auf Grundlage der Fleishman-Faktoren erstellt (Schoppe, 1974) und bildet ein standardisiertes, normiertes und valides Testsystem (Hamster, 1980). Es ist eine Zusammenstellung mehrerer feinmotorischer Aufgaben, die jede für sich einen jeweils anderen *Feinmotorik*-Faktor erfassen. Sie besteht aus einer 300 mm x 300 mm x 15 mm großen Plattform, die mit unterschiedlichen Bohrungen, Fräsungen und Kontaktflächen versehen ist (vgl. Abb. 12).

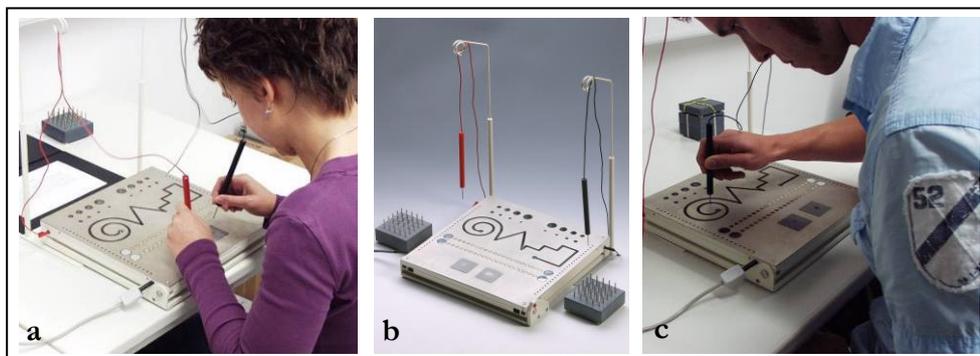


Abb. 12: Die Aufgaben der Motorischen Leistungsserie (b) können sowohl bimanuell (a) als auch einhändig bearbeitet werden (c).

Sowohl an der linken als auch an der rechten Seite ist je ein Griffel angebracht. Diese sind zur Bearbeitung der entsprechenden Aufgaben zu verwenden. Die Aufgaben können sowohl einhändig als auch bimanuell absolviert werden. Insgesamt können mit diesem Verfahren sechs *Feinmotorik*-Faktoren (vgl. Kapitel 3.1) erfasst werden (*Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit*, *Fingergeschicklichkeit*, *Arm-Hand-Geschwindigkeit*, *Handgeschicklichkeit*, *Zielen* und *Arm-Hand-Ruhe*). Die Performanz wird mittels der Fehlerzahl, die sich aus den unerlaubten Berührungen der Plattform außerhalb der Kontaktflächen ergibt, und der benötigten Bearbeitungszeit analysiert. Für den Einsatz in einem Telemanipulationssystem ist die Motorische Leistungsserie jedoch nicht widerstandsfähig genug. Des Weiteren kann das Testsystem aufgrund der empfindlichen Elektronik nicht unter Wasser eingesetzt werden und ist somit für die geplante Versuchsreihe nicht geeignet. In dieser Untersuchung wurde die Motorische Leistungsserie daher lediglich als Screening-Verfahren eingesetzt. Diese Vorauswahl soll gewährleisten, dass sich die Probanden hinsichtlich ihrer feinmotorischen Leistung im Normbereich befinden und somit mögliche Effekte aufgrund von über- oder unterdurchschnittlicher Ausprägung ausgeschlossen werden können.

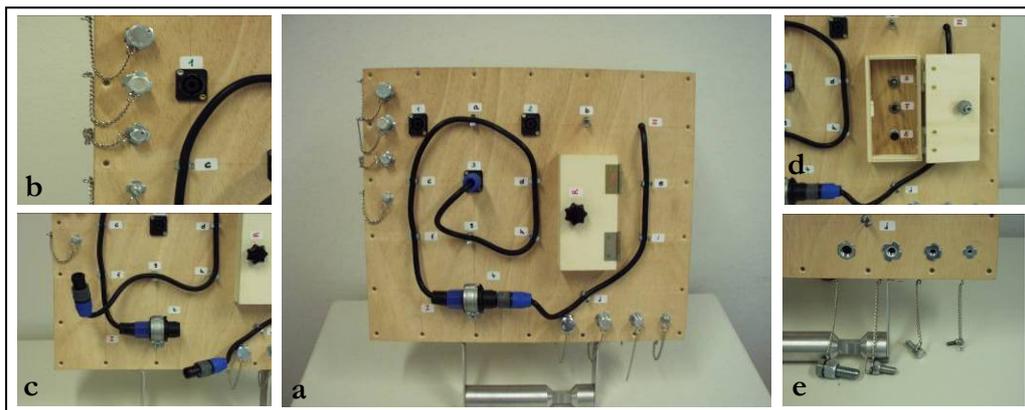


Abb. 13: (a) Prüfstand, versehen mit den entsprechenden Montageobjekten, (b) Schrauben und (c) geöffneten Bajonettstecker, (d) geöffnetes Kästchen mit Kippschaltern und (e) Schrauben verschiedener Größe

Der neu entwickelte und robuste Prüfstand besteht aus einer 400 mm x 480 mm x 40 mm Holzplatte, getragen von einem in der Höhe und Neigung verstellbaren Gelenk. Dieses Gelenk ist wiederum mit einem hölzernen Fuß verbunden, um dem Aufbau Stabilität zu verleihen. Der gesamte Prüfstand wird während der Datenerhebung auf einem 40 mm hohen Fuß auf einem Tisch platziert und befindet sich 290 mm vom Sitzreferenzpunkt der Versuchsperson entfernt und ermöglicht somit eine ideale Arbeitsausrichtung (Zaghow, 1977; Schmidtke, 1981). Die Oberfläche des Prüfstandes ist mit unterschiedlichen Gegenständen versehen (vgl. Abb. 13).

Zu diesen Gegenständen zählen Schrauben verschiedener Größe, Bajonettstecker und -buchsen, Kabelverbindungen, Kabelklemmen, Kippschalter und ein Holzkästchen mit Magnetverschluss. Diese Objekte bieten die Möglichkeit, Grundkomponenten von Montagetätigkeiten darzubieten. Zum Beispiel das Schrauben, Steckverbindungen-Erstellen, Kabellegen, Schalten und das Öffnen von Verschlüssen. Die Performanz hinsichtlich der feinmotorischen Leistung wird dabei mittels der benötigten Bearbeitungszeit der jeweils vorgegebenen Aufgaben erfasst (Stein, 1990). Vergleichbare Tätigkeiten sind sowohl bei Montageverrichtungen auf der Erde als auch beim On-orbit-Servicing im Rahmen der Weltrauminstallation und -wartung typisch und garantieren somit eine hohe externe Validität. Zudem ist der Prüfstand äußerst robust und kann im Falle eines Schadens schnell repariert werden. Durch den Ersatz der Holzplatte durch eine entsprechende PVC-Platte kann dieser Prüfstand in eine unter Wasser taugliche Variante umgebaut werden.

4.1.1.3 Versuchsablauf

Die Untersuchung lief für alle Versuchspersonen identisch ab. In einem ersten Schritt wurden die persönlichen Daten per Fragebogen erfasst. Diese enthielten unter anderem Angaben über das Geschlecht, das Alter und den Beruf bzw. den Studiengang. Anschließend erfolgte die Vorauswahl mithilfe der Motorischen Leistungsserie bezüglich der feinmotorischen Leistungsfähigkeit. Lag die jeweilige Versuchsperson mit ihrer Performanz bei allen sechs *Feinmotorik*-Faktoren im Normbereich, wurde sie zur Datenerhebung am Prüfstand herangezogen. In einem zweiten Schritt hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, sich in einer freien, fünfminütigen Explorationsphase mit dem Prüfstand vertraut zu machen und sämtliche Gegenstände auszuprobieren. Nach Abschluss dieser Probephase konnte die Datenerhebung eingeleitet werden. (vgl. Abb. 14).

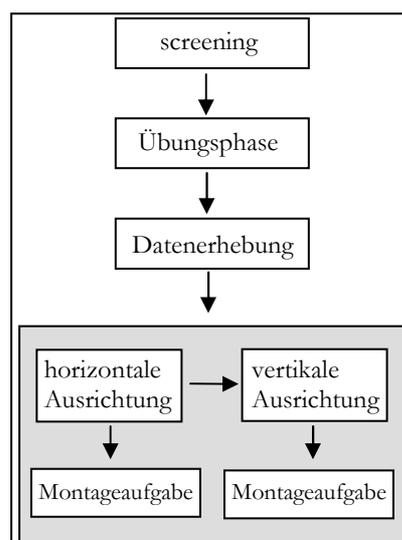


Abb. 14: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs für eine Versuchsperson

Jede Versuchsperson wurde instruiert, eine umfassende Montageaufgabe zu absolvieren. Die Umsetzung dieser Aufgabe erforderte den Gebrauch aller Objekte auf dem Prüfstand. Sie umfasste Schrauben, Kabellegen, das Erstellen von Steckverbindungen, Schalten und das Öffnen von Magnetverschlüssen¹⁵. Der Ausgangszustand des Prüfstandes war für jeden Probanden identisch. Der durch die Bearbeitung der Aufgabe zu erreichende Zielzustand des Prüfstandes war für die Versuchspersonen jeder Zeit durch eine vorliegende Abbildung sichtbar. Diese Hilfestellung verhinderte, dass neben der motorischen Performanz zusätzlich Gedächtnisleistungen und deren Beeinflussung erfasst wurden. Dieselbe Aufgabe mussten unter zwei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden. Zum einen mit horizontaler Ausrichtung des Prüfstandes und zum anderen mit vertikaler Ausrichtung der Arbeitsoberfläche. Dabei wurde durch eine Permutation die Abfolge variiert, um eventuelle Reihenfolge- und Lerneffekte ausschließen zu können. Als Leistungsmaß diente die benötigte, mittels einer Stoppuhr erfasste Bearbeitungszeit. Vor Beginn der Aufgabenbearbeitung wurden alle Versuchspersonen angehalten, ihre Hände auf eine Markierung zu platzieren, um eine einheitliche Ausgangsposition zu gewährleisten. Auf ein Startsignal hin durfte mit der Bearbeitung begonnen werden. Dabei lautete die Instruktion, so genau und so schnell wie möglich vorzugehen. Die Zeitmessung stoppte, sobald die jeweilige Versuchsperson die Aufgabe vollständig bearbeitet und die Hände wieder in die Ausgangsposition gebracht hatte.

4.1.2 Ergebnisse

Hinsichtlich der feinmotorischen Leistung, die mittels des Screening-Verfahrens erhoben wurde, entsprachen alle Versuchspersonen der Norm und wurden somit zur Datenerhebung zugelassen. Durch die Berechnung des Kolmogorov-Smirnov-Tests konnte gezeigt werden, dass weder die Daten der horizontalen ($D(30) = .282$; $p < .05$), noch der vertikalen Bedingung ($D(30) = .162$; $p < .05$) einer Normalverteilung entsprechen. Aus diesem Grund wurde zur weiteren Analyse die nonparametrische und damit verteilungsfreie Friedman ANOVA für Messwiederholungen herangezogen. Die Auswertung zeigte, dass sich im Allgemeinen die motorische Leistung der Versuchspersonen bei unterschiedlicher Ausrichtung des Prüfstandes nicht signifikant ($\chi^2(1) = .310$; $p > .05$) voneinander unterscheidet.

Eine Berechnung des Wilcoxon-Rang-Tests sollte dieses Resultat bestätigen und die Aussagekraft damit untermauern. Dazu wurde mittels der Bonferroni-Korrektur ein neues Signifikanzniveau von $\alpha/n \approx .025$ errechnet und der Analyse zugrunde gelegt (Field, 2005). Die Auswertung des Wilcoxon-Rang-Tests zeigte ebenfalls, dass sich die Leistung während der Montageaufgabe bei den unterschiedlichen Ausrichtungen nicht signifikant ($T = 227.5$; $Mdn_{\text{horizontal}} = 28.8\text{s}$;

¹⁵ Eine ausführliche Beschreibung der Aufgabe befindet sich im Anhang A.1.

$Mdn_{\text{vertikal}} = 28.0s$; $r = -.028$) unterscheidet, und bestätigte damit das Ergebnis der Friedman ANOVA.

Des Weiteren wurde eine Post-hoc-Analyse nach Siegel et al. (1988) berechnet. Diese Analyse setzt die mittleren Ränge der Friedman ANOVA in Beziehung zum z-Wert, der Stichprobengröße n und der Anzahl der Bedingungen k , die gemeinsam einen kritischen Wert ergeben.

$$\begin{aligned} |\overline{R}_h - \overline{R}_v| &\geq z_{\alpha/k(k-1)} \sqrt{\frac{k(k+1)}{6n}} \\ |1.55 - 1.45| &\geq .167 \\ 0.1 &\geq .167 \end{aligned}$$

Ist die Differenz der mittleren Ränge größer als dieser kritische Wert, ist die Differenz und damit der Unterschied zwischen den beiden Bedingungen bedeutend. Auch das Post-hoc-Verfahren konnte keinen Einfluss der Ausrichtung des Prüfstandes aufzeigen. Die Differenz der mittleren Ränge ist kleiner als der kritische Wert. Somit ist $0.1 > 0.167$ eine falsche Aussage und der Unterschied zwischen den Bedingungen nicht signifikant. Zusammenfassend ergibt sich daraus, dass durch keines der berechneten Verfahren ein Effekt der Orientierung des Prüfstandes auf die Performanz erfasst werden konnte.

4.1.3 Diskussion

In der beschriebenen Studie sollte herausgefunden werden, ob die horizontale Ausrichtung des entwickelten Prüfstandes einen anderen Einfluss auf die Aufgabenleistung hat als die vertikale Ausrichtung. Die Ergebnisse zeigen auf, dass ein solcher Unterschied zwischen den beiden Bedingungen nicht besteht. Die Arbeitsleistung der Versuchspersonen bei der horizontalen Bedingung ist nicht signifikant verschieden zu der Performanz während der vertikalen Ausrichtung. Sollte dennoch eine von der jeweiligen Ausrichtung abhängende Beeinträchtigung existieren, ist der Mensch in der Lage, selbige zu kompensieren, sodass kein signifikant unterschiedlicher Einfluss auf die Bearbeitungszeit erfassbar ist. Die Validierung des Prüfstandes kann daher in einer der beiden Ausrichtungen durchgeführt werden, ohne die Generalisierbarkeit der Ergebnisse in den nachfolgenden Untersuchungen einzuschränken. Im nächsten Kapitel (4.2) wird das entsprechende Experiment zur Validierung des Prüfstandes dargestellt.

4.2 Validierung des Prüfstandes

Um den Einfluss der externen und moderierenden Faktoren auf die feinmotorische Leistung bei Montagearbeiten sowohl mit Telemanipulationssystemen als auch während eines simulierten Außenbordeinsatzes untersuchen zu können, wird im folgenden Kapitel eine Studie zur Validierung des Prüfstandes vorgestellt. Dieser soll für einen direkten Vergleich zwischen der feinmotorischen Leistung bei der Verwendung eines Telemanipulationssystems und dem On-orbit-Servicing geeignet sein. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, kann nach Fleishman (1972) die feinmotorische Leistung in elf Faktoren unterteilt werden. Abhängig von der jeweiligen auszuführenden Aufgabe werden die verschiedenen Faktoren zur Aufgabebearbeitung benötigt oder nicht. Mithilfe des besagten Prüfstandes soll herausgefunden werden, welche *Feinmotorik*-Faktoren bei typischen Montagätätigkeiten von Bedeutung sind und ob diese zuverlässig und genau mit dem Prüfstand erfasst werden können. Dazu sollen Aufgaben definiert werden, die jeweils eine *Feinmotorik*-Facette erfassen und in zukünftigen Untersuchungen eingesetzt werden können. Als Vergleichsmaß wird das bereits validierte und hinsichtlich der Gütekriterien geeignete Verfahren des Wiener Testsystems, die Motorische Leistungsserie, herangezogen.

4.2.1 Methode

4.2.1.1 Stichprobe

Die untersuchte Stichprobe setzte sich aus 42 Probanden zusammen. Es waren 19 Frauen und 23 Männer im Alter von 19 bis 64 Jahren ($\bar{x} = 27.5$ Jahre) vertreten. Die Händigkeit der Versuchspersonen wurde mit dem Edinburgh Inventar (vgl. Kapitel 3.1.1.1) erfasst. Um eine homogene Stichprobe untersuchen zu können, wurden ausschließlich Rechtshänder zur Datenerhebung zugelassen. Zusätzlich erfolgte eine Vermessung der Hände aller Versuchspersonen gemäß der DIN 33 402 (Jürgens, 2004). Unter anderem werden bei dieser Vermessung die verschiedenen Fingerlängen, die Fingerbreiten und die Handdicke erfasst. Diese Maßnahme wurde zur Gewährleistung, dass die Probanden hinsichtlich der anthropometrischen Maße ihrer Hände der Normalbevölkerung entsprechen und somit eine repräsentative Stichprobe bilden, herangezogen. Alle Probanden waren Ingenieure oder Studenten der Ingenieurwissenschaften. Diese Zusammensetzung wurde bewusst gewählt, um eine Stichprobe zu erstellen, die zukünftige Arbeiter mit technischen Berufen wie der Telemanipulation oder Weltraummontage repräsentiert.

4.2.1.2 Aufbau

Der zu untersuchende und damit zur Validierung herangezogene Prüfstand wurde bereits in Kapitel 4.1.1.2 beschrieben. Insgesamt wurden vier verschiedene Aufgaben auf diesem Prüfstand definiert, die zur Datenerhebung dienen. Dabei war darauf zu achten, dass alle Aufgaben jeweils

einen *Feinmotorik*-Faktor erfassen und bimanuell ausgeführt werden können. Die bimanuelle Ausführung ist von Bedeutung, da der Mensch bei Montagetätigkeiten sowohl auf der Erde als auch im Orbit zweihändig arbeitet und die Aufgaben eben diese Bedingungen simulieren sollen. Jede der Aufgaben beinhaltet eine typische Komponente von Montagetätigkeiten. Dementsprechend wurde neben einer Schraubaufgabe eine Steckaufgabe, eine Schaltaufgabe und eine Aufgabe, die das Kabellegen erforderte, definiert.¹⁶ Als Leistungsmaß diente die mit einer Stoppuhr gemessene Bearbeitungszeit. Die Ergebnisse der einzelnen Aufgaben wurden anschließend mit der Performanz an der Motorischen Leistungsserie (vgl. Kapitel 4.1.1.2) ins Verhältnis gesetzt. Um sowohl beim Prüfstand als auch bei der Motorischen Leistungsserie vergleichbare Anforderungen zu schaffen, wurden jeweils nur bimanuelle Aufgaben bzw. Subtests ausgewählt. Somit konnten insgesamt fünf Subtests der Motorischen Leistungsserie¹⁷, die wiederum jeweils einen *Feinmotorik*-Faktor erfassen, den vier Aufgaben am Prüfstand gegenübergestellt werden (vgl. Tab. 2). Weisen beide Verfahren vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Performanz auf, kann davon ausgegangen werden, dass sie die feinmotorische Performanz messen und schlussfolgernd der Prüfstand geeignet ist, die Leistung der *Feinmotorik*-Faktoren zu erfassen.

Tabelle 2: Sechs bimanuelle Subtests der Motorischen Leistungsserie und die entsprechenden *Feinmotorik*-Faktoren (vgl. Kapitel 2.1) sowie die vier bimanuellen Aufgaben des Prüfstandes

Motorische Leistungsserie	<i>Feinmotorik</i> -Faktoren	Prüfstand
• Tapping	⇒ • Handgelenk-Finger-	• Schrauben
• Aiming	⇒ Geschwindigkeit	• Stecken
• Steadiness	⇒ • Zielen	• Schalten
• Lange Stifte stecken	⇒ • Arm-Hand-Ruhe	• Kabellegen
• Kurze Stifte stecken	⇒ • Handgeschicklichkeit	
	• Fingergeschicklichkeit	

4.2.1.3 Versuchsablauf

Der Ablauf des Versuches wurde für alle Probanden identisch gestaltet. Zu Beginn wurden die soziodemografischen Daten der Versuchspersonen dokumentiert. Sie umfassten Angaben über das Alter, das Geschlecht und den Beruf bzw. die Studienrichtung. Im Anschluss erfolgte die Handvermessung der dominanten Hand mittels eines digitalen Messschiebers. Daran anschließend absolvierte jeder Versuchsteilnehmer die fünf Subtests der Motorischen Leistungsserie. Die Daten konnten unverzüglich ausgewertet werden und gaben Aufschluss über die Performanz der

¹⁶ Für eine exakte Beschreibung der Aufgaben siehe Anhang A.2

¹⁷ Für eine exakte Beschreibung der Subtests siehe Hamster (1980).

jeweiligen Probanden. Lagen die Daten im Normbereich, wurde die entsprechende Person zur weiteren Datenerhebung zugelassen. Diese Vorauswahl sollte garantieren, dass die untersuchten Probanden repräsentativ für die Normalbevölkerung sind. Somit wurde die Motorische Leistungsserie zum einen als Screening-Verfahren und zum anderen als Vergleichsmaß für die Validierung des Prüfstandes eingesetzt. Nach der Aufnahme der feinmotorischen Leistung folgte die Datenerhebung am Prüfstand. Dabei wurde den Versuchsteilnehmern eine fünfminütige Explorationsphase zugestanden, um ihnen die Möglichkeit zu geben, sich mit den Gegenständen am Prüfstand vertraut zu machen. Im Anschluss führte jeder Proband die vier definierten Aufgaben unter Erfassung der Bearbeitungszeit durch. Die Reihenfolge der Aufgaben wurde mittels des Lateinischen Quadrates variiert (Wagenaar, 1969). Somit konnten eventuelle Lern- und Reihenfolgeeffekte ausgeschlossen werden. Um eine einheitliche und damit vergleichbare Ausgangsposition zu schaffen, platzierten die Probanden ihre Hände vor Beginn jeder Aufgabe auf einer markierten Position am Prüfstand. Die Versuchspersonen wurden angehalten, so genau und so schnell wie möglich zu arbeiten. Die Bearbeitungszeit wurde mit einer Stoppuhr gemessen und startete, sobald die Versuchspersonen das Startsignal, eine mündliche Anweisung, erhielten.

4.2.2 Ergebnisse

Aus den Daten der Handvermessung wurden die Perzentile gebildet (vgl. Anhang A.3.1). Diese zeigen, dass alle Versuchspersonen hinsichtlich ihrer Handproportionen der europäischen Durchschnittsbevölkerung entsprechen (Jürgens, 2004). In Bezug auf die Leistung während der einzelnen Subtests der Motorischen Leistungsserie wiesen die Versuchspersonen ebenfalls eine der Norm entsprechende Spanne auf. Somit konnten alle Versuchspersonen zur Datenerhebung am Prüfstand zugelassen werden. Die dort erhobenen Datensätze wurden mittels einer Korrelationsrechnung mit den Ergebnissen der Motorischen Leistungsserie ins Verhältnis gesetzt. Diese Analyse sollte Aufschluss darüber geben, ob mittels der definierten Aufgaben am Prüfstand tatsächlich einzelne *Feinmotorik*-Faktoren erfasst werden können, der Prüfstand in dieser Hinsicht also ein valides Verfahren darstellt. Um zu verhindern, dass Ausreißer die Ergebnisse verzerren, wurde in einem ersten Schritt eine Ausreißerbereinigung auf Basis der z-Werte vorgenommen. Zwei Ausreißer mit z-Werten über 3.29 konnten gefunden (vgl. Anhang A.3.2) und entsprechend aus dem Datensatz ausgeschlossen werden (Field, 2005). Die korrigierte Anzahl der Datensätze, die in die weitere Analyse einfließen, verringerte sich somit auf 40 Probanden.

Um des Weiteren entscheiden zu können, ob ein nonparametrisches oder ein parametrisches Verfahren zur Analyse herangezogen werden darf, findet der Kolmogorov-Smirnov-Test Verwendung. Die Ergebnisse dieser Überprüfung auf Normalverteilung zeigten, dass einige der Daten nicht normalverteilt sind (vgl. Anhang A.3.3). Da eine Analyse einheitlich gestaltet werden

sollte (Field, 2005), wurden daher für die folgende Auswertung ausschließlich verteilungsfreie Verfahren herangezogen. Somit wurde anstelle der Pearson- die Spearman-Korrelation berechnet.

Die Ergebnisse der Motorischen Leistungsserie wurden bei den verwendeten bimanuellen Subtests für die rechte und die linke Hand separat aufgezeichnet. Um die Analyse übersichtlich zu gestalten, werden im Folgenden lediglich die Ergebnisse der Prüfung in Bezug auf die dominante und somit die rechte Hand im Text dargestellt. Die Resultate der Korrelation zwischen der Performanz der linken Hand und den Aufgaben am Prüfstand sind im Anhang A.3.4 dokumentiert.

Tabelle 3: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der rechten Hand, bezogen auf die fünf bimanuellen Subtests der Motorischen Leistungsserie und die vier Aufgaben am Prüfstand

		Schraubaufgabe	Steckaufgabe	Schaltaufgabe	Kabelaufgabe
Tapping <i>Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit</i>	r_s	-.239	-.313	-.203	-.222
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.053	.083	.070	.087
	n	40	40	40	40
Aiming <i>Zielen</i>	r_s	.209	.427(**)	.173	.290
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.196	.003	.286	.070
	n	40	40	40	40
Steadiness <i>Arm-Hand-Ruhe</i>	r_s	-.113	-.133	.021	-.115
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.488	.413	.896	.480
	n	40	40	40	40
Lange Stifte stecken <i>Handgeschicklichkeit</i>	r_s	.396	.382	.618(**)	.626(**)
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.061	.065	.006	.010
	n	40	40	40	40
Kurze Stifte stecken <i>Fingergeschicklichkeit</i>	r_s	.471(**)	.207	.222	.107
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.009	.199	.169	.513
	n	40	40	40	40

(**) Die Korrelation ist auf dem 0,01-Niveau signifikant.

Die Auswertung zeigt, dass die Performanz der einzelnen Aufgaben am Prüfstand mit der Leistung bezüglich der Subtests der Motorischen Leistungsserie hoch signifikant korreliert. Die Schraubaufgabe hängt mit dem Subtest *Kurze Stifte stecken* ($r_s = .47$; $p_{\text{zwei-seitig}} < .01$) signifikant auf dem 1-%-Niveau (vgl. Tab. 3) zusammen. Diese Aufgabe ist folglich geeignet, um die Leistung bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Fingergeschicklichkeit* abzubilden. Die Aufgabe, bei der eine Steckverbindung erstellt werden musste, korrelierte hingegen ausschließlich mit dem Ergebnis des Subtests *Aiming* ($r_s = .44$; $p_{\text{zwei-seitig}} < .01$). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Steckaufgabe am Prüfstand geeignet ist, um den *Feinmotorik*-Faktor *Zielen* zu messen. Die Analyse der Schaltaufgabe zeigte eine Korrelation mit dem Subtest *Lange Stifte stecken* ($r_s = .63$, $p_{\text{zwei-seitig}} < .01$). Bezüglich der anderen Subtests konnte kein Zusammenhang gefunden werden. Da-

raus kann geschlossen werden, dass mittels der Schaltaufgabe am Prüfstand der *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* erfasst werden kann. Die vierte Aufgabe am Prüfstand umfasste das Verlegen eines Kabels in vorgeschriebener Form. Die Ergebnisse dieser Aufgabe korrelierten ebenfalls signifikant mit der Leistung der Probanden hinsichtlich des Subtests *Lange Stifte stecken* ($r_s = .62$, $p_{\text{zwei-seitig}} < .01$). Diese Aufgabe misst somit ebenfalls die Performanz in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit*. Keine Korrelation konnte hingegen zwischen den Aufgaben am Prüfstand und den Subtests *Tapping* und *Steadiness* gefunden werden. Sie erfassen zum einen die Leistung bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Handgelenk-Finger-Geschwindigkeit* und zum anderen die Leistung hinsichtlich des Faktors *Arm-Hand-Ruhe*. Diese beiden Facetten der *Feinmotorik* können folglich nicht durch den Prüfstand erfasst werden bzw. spielen ihre Ausprägungen bei den definierten Montageaufgaben keine relevante Rolle.

Die Korrelationsergebnisse der linken Hand, bezogen auf die einzelnen Aufgaben am Prüfstand, sind vergleichbar mit denen der rechten Hand (vgl. Anhang A.3.4). Daher ist eine direkte Darstellung der Ergebnisse im Text als redundant zu betrachten. Allerdings weisen ähnliche Ergebnisse zwischen der linken und rechten Hand darauf hin, dass die definierten Montageaufgaben tatsächlich bimanuelle Bearbeitung erfordern, was wiederum den Gegebenheiten bei Installations- und Wartungstätigkeiten sowohl auf der Erde, also auch beim On-orbit-Servicing entspricht. Die Betrachtung der bimanuellen Bearbeitung der Aufgaben soll daher in den nachfolgenden Untersuchungen weiterhin erfasst werden.

4.2.3 Diskussion

Durch das Validierungsexperiment sollte herausgefunden werden, ob der entwickelte Prüfstand ein geeignetes Verfahren ist, um verschiedene *Feinmotorik*-Faktoren zu erfassen. Daraus ergab sich zusätzlich die Möglichkeit zu erörtern, welche *Feinmotorik*-Faktoren bei typischen Montagetätigkeiten im Vordergrund stehen bzw. vom ausführenden Menschen für eine erfolgreiche Umsetzung benötigt werden. Bezüglich der Validierung kann zusammenfassend gesagt werden, dass bei typischen Komponenten von Montageaufgaben, wie sie am Prüfstand definiert wurden, die *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Zielen* und *Handgeschicklichkeit* durch die vorgestellte Arbeitsoberfläche erfasst werden können. Anzumerken ist allerdings, dass die erfassten Korrelationen zwischen der Leistung am Prüfstand und bei der Bearbeitung der Motorischen Leistungsserie zwar hoch signifikant, aber lediglich von mittlerer Größe sind. Dennoch können sie als aussagekräftig betrachtet werden, da diese Korrelationen die einzigen Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Aufgaben und den Subtests darstellen. Die Aufgaben am Prüfstand erfassen demnach jeweils nur eine *Feinmotorik*-Facette. Daraus lässt sich schließen, dass die erfassten *Feinmotorik*-Faktoren die Haupteffekte für die jeweilige Performanz am Prüfstand darstellen. Der Prüfstand

ist demnach ein valides Verfahren, um die Leistung in Bezug auf diese drei *Feinmotorik*-Faktoren abzubilden, und kann zum Vergleich zwischen der feinmotorischen Leistung während eines simulierten Außenbordeinsatzes und der feinmotorischen Performanz während der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem herangezogen werden. Zusätzlich dürfen die drei genannten Faktoren aufgrund der Ergebnisse als relevant für eine erfolgreiche Bearbeitung von Montageaufgaben erachtet werden und sollten in zukünftigen Untersuchungen bezüglich typischer Installations- und Wartungstätigkeiten Berücksichtigung finden.

4.3 Untersuchung der externen Einflussfaktoren

Im vorangegangenen Kapitel konnte bestätigt werden, dass der entwickelte Prüfstand ein valides Verfahren zur Erfassung der für Montagetätigkeiten relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* darstellt. Um die Beeinflussung von externen Faktoren auf diese Facetten der *Feinmotorik* untersuchen zu können, werden im Folgenden die in Kapitel 4.2.1.2 definierten Aufgaben am Prüfstand eingesetzt. Dabei steht ein systematisches Vorgehen und folglich eine jeweils separate Untersuchung der möglichen Einflussfaktoren im Vordergrund. Die zu analysierenden externen Einflussfaktoren beziehen sich zum einen auf die Bedingungen eines Außenbordeinsatzes (vgl. Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) und zum anderen auf die Bedingung bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem (vgl. Kapitel 4.3.3).

4.3.1 Einfluss der *Destabilisierung* auf die feinmotorische Leistung

Die *Destabilisierung* des Menschen im Weltraum ist eine Folge des externen Einflussfaktors *Mikrogravitation* (vgl. Kapitel 3.3.1). Im folgenden Kapitel wird eine Studie vorgestellt, bei der die Untersuchung, ob diese *Destabilisierung* der Körperlage einen Einfluss auf die einzelnen *Feinmotorik*-Faktoren und damit auf die motorische Leistungsfähigkeit des Menschen bei typischen Montagetätigkeiten hat, im Vordergrund steht. Ein möglicher Einfluss auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit ist zwar nachvollziehbar, jedoch wurde diese Annahme bisher keiner systematischen Analyse unterzogen.

Wie bereits in Kapitel 3.3.1.2 dargestellt, ist eine frei schwingende Tragegurtvorrichtung, die den Menschen in eine horizontale Lage versetzt, eine geeignete Möglichkeit, *Destabilisierung* durch *Mikrogravitation* auf der Erde zu simulieren. Diese für den Menschen ungefährliche und effektive Methode ist im Rahmen der Studie dem Parabelflug vorzuziehen. Während des Parabelfluges beträgt das Zeitfenster, in dem tatsächlich von *Mikrogravitation* gesprochen werden kann, lediglich 20 Sekunden (vgl. Kapitel 3.3.1.2). Die verschiedenen Montageaufgaben zur Erfassung der jeweiligen *Feinmotorik*-Faktoren sind jedoch länger als dieses Zeitfenster. Daher ist die Methode des

Parabellfluges für derartige Untersuchungen nicht geeignet und wird durch die horizontale Lage ersetzt. Die Leistung der Probanden hinsichtlich der *Feinmotorik*-Faktoren während einer *Destabilisierung* ihrer Körperlage wird der Performanz während einer stabilen, sitzenden Haltung gegenübergestellt. Auf diese Weise kann systematisch untersucht werden, welchen Einfluss die durch *Mikrogravitation* induzierte *Destabilisierung* der Menschen auf ihre feinmotorische Leistung hat.

4.3.1.1 Methode

4.3.1.1.1 Stichprobe

Insgesamt wurden 30 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 55 Jahren ($\bar{x} = 30.5$) untersucht. Die Stichprobe setzte sich aus 10 Frauen und 20 Männern zusammen. Die Händigkeit der Probanden wurde mit dem Edinburgh Inventar untersucht (Oldfield, 1971). Die gesamte Stichprobe bestand ausschließlich aus Rechtshändern und bildete somit diesbezüglich eine homogene Stichprobe. Die Versuchspersonen berichteten von keinen motorischen oder neuronalen Störungen und verfügten über einen unbeeinträchtigten oder korrigierten Visus. Zusätzlich wurde bei der Stichprobe darauf geachtet, dass die Probanden keine Rückenbeschwerden oder Erkrankungen der Wirbelsäule aufwiesen, um eventuelle Komplikationen beim Anlegen und der Platzierung im Gurt zu vermeiden. Des Weiteren wurde die Körpergröße der Versuchspersonen kontrolliert, um eine optimale Passung der Tragevorrichtung garantieren zu können.

4.3.1.1.2 Aufbau

Um sicherzustellen, dass alle Versuchspersonen hinsichtlich ihrer feinmotorischen Leistungsfähigkeit der Norm entsprechen, wurde die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems als Screening-Verfahren eingesetzt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Ausprägung der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* gelegt, da diese drei Facetten bei den Montagetätigkeiten benötigt und durch den Prüfstand erfasst werden können.

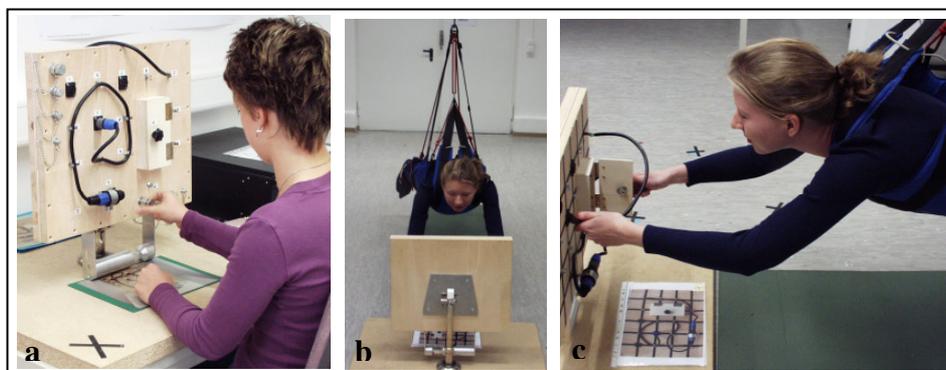


Abb. 15: (a) Versuchsperson vor dem Prüfstand in einer stabilen, sitzenden Haltung, (b) Probandin im Tragegurt platziert und (c) Versuchsperson bei der Bearbeitung der Aufgaben am Prüfstand in der destabilisierten Bedingung.

Des Weiteren sollte ein vergleichbarer Ausgangs- bzw. Trainingszustand der feinmotorischen Leistung der einzelnen Versuchspersonen gewährleistet werden können, um Verzerrungen beim direkten Vergleich zu verhindern.

Für die erste Bedingung wurde der Prüfstand in vertikaler Ausrichtung auf einem Tisch platziert (vgl. Kapitel 4.1.1.2). Die Versuchspersonen nahmen eine sitzende, hinsichtlich der Körperhaltung stabile Haltung vor dem Prüfstand ein (vgl. Abb.15a). Der Abstand entsprach dabei den Vorgaben nach Schmidtke (1981) für eine ideale Arbeitsausrichtung. Für die zweite Bedingung wurden die Probanden in einen Drachenfliiegergurt platziert (vgl. Abb. 15b und 15c). Dieser wurde so ausgerichtet, dass die jeweilige Person waagrecht in einer Höhe von 300 mm über dem Boden hing. Die Arme und der Kopf waren dabei frei, sodass weder die Sicht noch die *Beweglichkeit* der Hände und Arme durch den Gurt selbst behindert wurden. Der Prüfstand wurde in vertikaler Ausrichtung vor den Versuchspersonen positioniert. Dabei musste darauf geachtet werden, dass jeder Proband alle für die Aufgabenbearbeitung relevanten Gegenstände erreichen konnte. Während der Bearbeitung war es den Versuchspersonen nicht gestattet, sich am Boden abzustützen. Lediglich der Prüfstand selbst durfte zur Stabilisierung der Körperhaltung berührt werden. Diese Maßnahme wurde zur Gewährleistung einer möglichst umfassenden *Destabilisierung* ergriffen.

4.3.1.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf gestaltete sich für jede der dreißig Versuchspersonen identisch. Zu Beginn des Experiments wurden die soziodemografischen Daten erhoben. Sie umfassten das Alter, das

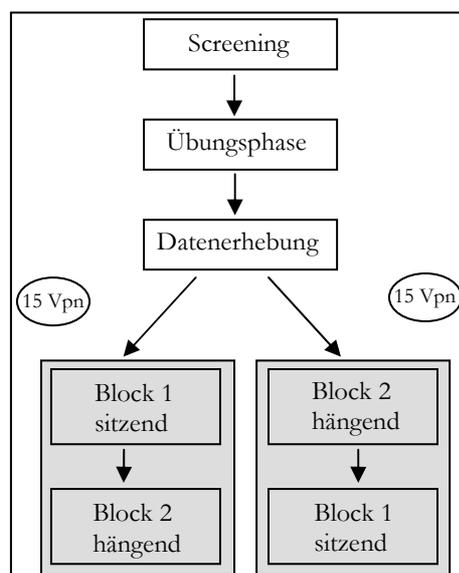


Abb. 16: Systematische Darstellung des Versuchsablaufs

Geschlecht und den Beruf bzw. die Studienrichtung des jeweiligen Probanden. Im Anschluss durchliefen die Versuchsteilnehmer das Screening-Verfahren an der Motorischen Leistungsserie. Lediglich die Personen, die hinsichtlich ihrer Leistung der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit*, *Fingergeschicklichkeit* und *Zielen* der Durchschnittsbevölkerung entsprachen, wurden zur weiteren Datenerhebung zugelassen (vgl. Abb. 16).

Nachfolgend hatte jede Versuchsperson die Möglichkeit, sich mit dem Prüfstand und der Tragevorrichtung vertraut zu machen. Dazu wurde den Teilnehmern eine fünfminütige Explorationsphase sowohl in der sitzenden als auch in der hängenden Haltung gewährt. War die jeweilige Versuchsperson mit dem Aufbau vertraut, wurde die Datenerhebungsphase am Prüfstand eingeleitet. Diese Phase gliederte sich in zwei Blöcke. Ein Block umfasste die jeweils vier validierten Aufgaben am Prüfstand (vgl. Kapitel 4.2.1.2) in der sitzenden Position. Während des anderen Blocks wurde jede Versuchsperson angehalten, dieselben Aufgaben hängend in der Tragevorrichtung auszuführen. Die Unterteilung in zwei Blöcke war aus Gründen der Zumutbarkeit induziert. Das Positionieren der Versuchsteilnehmer im Tragegurt erfordert Zeit. Ein ständiger Wechsel zwischen den Bedingungen hätte den Versuch somit in die Länge gezogen und Ermüdungserscheinungen bei den Probanden verursacht. Solche Ermüdungserscheinungen können zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen und sind somit zu vermeiden. Die Reihenfolge der Aufgaben wurde innerhalb der Blöcke mittels des Lateinischen Quadrates (Wagenaar, 1969) ausbalanciert, um sowohl Reihenfolge- als auch Lerneffekte ausschließen zu können. Die eine Hälfte der Versuchspersonen begann in der sitzenden Position, während die anderen 15 Probanden in der hängenden Haltung begannen. Für jede Aufgabe wurde die Bearbeitungszeit erfasst und zur statistischen Betrachtung herangezogen.

4.3.1.2 Ergebnisse

Die Auswertung des Datensatzes erfolgte systematisch nach den Gesichtspunkten der statistischen Analyse. Durch die Berechnung des Kolmogorov-Smirnov-Tests zeigte sich, dass die Versuchsergebnisse weder in der destabilisierten Bedingung ($D(30) = .224$; $p < .001$) noch in der sitzenden Bedingung ($D(30) = .209$; $p < .01$) eine Normalverteilung aufwiesen (vgl. Anhang A.4.1). Aus diesem Grund wurden für die weitere Analyse ausschließlich verteilungsfreie Verfahren eingesetzt. Zur Analyse der Performanz während der beiden Bedingungen destabilisiert vs. sitzend wurde folglich der Wilcoxon-Rangsummentest herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die *Destabilisierung* der Körperhaltung einen negativen Einfluss auf die Leistung bezüglich der drei *Feinmotorik*-Faktoren hat. Bei der Schraubaufgabe, die den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* erfasst, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der sitzenden

und der destabilisierten Bedingung festgestellt werden ($T = 458.0$; $p < .05$; $r = -.60$). Die Analyse mittels des Wilcoxon-Tests konnte dieses Resultat aufzeigen. Dabei stellte die Bearbeitungszeit während der *Destabilisierung* das 1,6-Fache der Zeit gegenüber der sitzenden Haltung dar ($Mdn_{\text{sitzend}} = 8.7$ s; $Mdn_{\text{destabilisiert}} = 14.25$ s). Die Auswertung der Steckaufgabe, die zur Erfassung des *Feinmotorik*-Faktors *Zielen* eingesetzt wurde, zeigte vergleichbare Resultate. Durch die *Destabilisierung* wurde die Performanz signifikant reduziert ($T = 380.0$; $p < .05$; $Mdn_{\text{sitzend}} = 3.95$ s; $Mdn_{\text{destabilisiert}} = 5.0$ s; $r = -.50$). Durch die Analyse konnte des Weiteren gezeigt werden, dass die Bearbeitungszeit signifikant um das 1,3-Fache durch die *Destabilisierung* anstieg.

Die Schaltaufgabe und die Kabelaufgabe sind beide valide in Bezug auf die Leistungserfassung bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Handgeschicklichkeit* (vgl. Kapitel 4.2.2). Auch bei diesen Aufgaben konnte mittels Wilcoxon-Rangsummentests ein signifikanter Effekt der *Destabilisierung* auf die Performanz nachgewiesen werden ($T_{\text{Schalter}} = 448.0$; $p < .01$; $r = -.60$ und $T_{\text{Kabel}} = 374.5$; $p < .01$; $r = -.40$). Dabei wurde, wie die Post-hoc-Analyse zeigen konnte, die Leistung bei der Kabelaufgabe ($Mdn_{\text{sitzend}} = 11.03$ s; $Mdn_{\text{destabilisiert}} = 14.95$ s) stärker beeinflusst als die Performanz bei der Schaltaufgabe ($Mdn_{\text{sitzend}} = 4.95$ s; $Mdn_{\text{destabilisiert}} = 6.34$ s). Die Bearbeitungszeit stieg durch die *Destabilisierung* bei der Kabelaufgabe um das 1,4-Fache, während sie bei der Schaltaufgabe lediglich um das 1,3-Fache anstieg. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die *Destabilisierung* der Körperhaltung auf die drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* einen signifikanten Einfluss hat.

4.3.1.3 Diskussion

Die *Destabilisierung* der Körperlage als Folge des externen Einflussfaktors *Mikrogravitation* hat eine signifikante Beeinflussung der feinmotorischen Leistung des Menschen bezüglich der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* zur Folge. Die unterschiedliche Auswirkung der *Destabilisierung* bei der Kabel- und der Schaltaufgabe, die beide denselben *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* erfassen, könnte zum einen durch die unterschiedliche Dauer der grundsätzlichen Bearbeitungszeit erklärt werden. Zum anderen muss während der Kabelaufgabe mit weichem, elastischem Material gearbeitet werden. Dieses bietet während der Manipulation an sich keine Möglichkeit zur Stabilisierung der Körperlage. Anders verhält sich dies bei den Schaltern. Sie sind fest in den Prüfstand integriert und bieten somit dem Bearbeiter Halt. Aus diesem Grund könnte die *Destabilisierung* bei der Kabelaufgabe einen stärkeren Einfluss auf die Performanz haben als bei der Schaltaufgabe. Da lediglich die drei *Feinmotorik*-Faktoren relevant für die hier untersuchten typischen Montageaufgaben sind, kann keine Aussage über die Beeinflussung der *Destabilisierung* bezüglich der anderen Facetten der *Feinmotorik* (vgl. Kapitel 3.1) gemacht werden. Eine systematische Analyse könnte Ziel weiterer Forschungsbestrebungen sein.

Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass die Versuchspersonen in der destabilisierten Haltung zur Bearbeitung der definierten Aufgaben am Prüfstand signifikant mehr Zeit benötigten als in der normalen, sitzenden Positionierung. Die *Destabilisierung* der Körperhaltung ist demnach nicht nur ungewohnt für den Menschen, sie verschlechtert zusätzlich die Performanz. Die Annahme, dass Astronauten während eines Außenbordeinsatzes ebenfalls durch die *Destabilisierung* in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt werden, kann daher bestätigt werden. Um zu erfassen, wie stark im Vergleich dazu der Mensch bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem beeinflusst wird, ist eine Gegenüberstellung beider Szenarien sinnvoll.

4.3.2 Der Einfluss von *Blickfeldeinschränkung* und Handschuhen auf die feinmotorische Leistungsfähigkeit

Beim On-orbit-Servicing gehören zur Ausstattung des Astronauten unter anderem Handschuhe, die vor den widrigen Umgebungsbedingungen Schutz bieten. Gleichzeitig führen diese Raumfahrthandschuhe jedoch zu einer Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände und zu einer Reduktion der *taktilen Wahrnehmung* (vgl. Kapitel 3.3.2.1). Die Beeinflussung der feinmotorischen Leistung durch Handschuhe wurde bereits in einigen Studien untersucht (McGinnis, 1973; Plummer, 1985; Holmér, 1994; Imamura, 1998), allerdings wurden weder die einzelnen Facetten der *Feinmotorik* systematisch erfasst (Gianola, 1972; Rogers, 1984; Johnson, 1986; Zander, 2008; Berger, 2009) noch fanden Handschuhe, die hinsichtlich ihrer Bewegungseinschränkung mit der der Raumfahrthandschuhe vergleichbar sind, Berücksichtigung (Bensel, 1993; Geng, 1998; Zander, 2008). Eine systematische Analyse der Beeinflussung von entsprechenden Handschuhen auf die Facetten der *Feinmotorik*, die bei typischen Montagetätigkeiten von Bedeutung sind, ist daher erstrebenswert.

Neben der Bewegungseinschränkung und der Verringerung der *taktilen Wahrnehmung* durch die Handschuhe werden Astronauten hinsichtlich ihres Blickfeldes eingeschränkt. Diese *Blickfeldeinschränkung* wird weniger durch das Visier des Astronautenhelms als vielmehr durch die Einschränkung der Kopfbeweglichkeit durch die Konstruktion des Anzuges erzeugt. Diese verhindert, dass der Mensch beim Tragen des Anzuges den Kopf im gewohnten Maße drehen und neigen kann. Somit wird das Blickfeld stark reduziert. Die *Blickfeldeinschränkung* stellt daher einen weiteren möglichen externen Einflussfaktor bezüglich der feinmotorischen Leistungsfähigkeit dar und wird in dieser Untersuchung einer systematischen Analyse unterzogen.

4.3.2.1 Methode

4.3.2.1.1 Stichprobe

Ingesamt wurden 30 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 58 Jahren ($\bar{x} = 30.3$ Jahre) untersucht. Die Stichprobe setzte sich aus 10 Frauen und 20 Männern zusammen. Alle Versuchsteilnehmer wurden mittels des Edinburgh Inventars (Oldfield, 1971) hinsichtlich ihrer Händigkeit untersucht. Die gesamte Stichprobe bestand ausschließlich aus Rechtshändern und bildete somit diesbezüglich eine homogene Stichprobe. Keine der Versuchspersonen berichtete von motorischen oder neuronalen Störungen, und alle verfügten über einen unbeeinträchtigten oder korrigierten Visus. Aufgrund hygienischer Standards wurden alle Versuchspersonen angehalten, während des Experiments Latex-Handschuhe zu tragen. Um mögliche allergische Reaktionen ausschließen zu können, wurden alle Teilnehmer auf Allergien gegen latexhaltige Materialien befragt. Keiner der Probanden vermerkte eine Allergie.

4.3.2.1.2 Aufbau

Um sicherzustellen, dass alle Versuchspersonen hinsichtlich ihrer feinmotorischen Leistungsfähigkeit der Norm entsprechen, wurde die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems als Screening-Verfahren eingesetzt. Dabei stand die Erfassung der Leistung in Bezug auf die drei relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit*, *Fingergeschicklichkeit* und *Zielen* im Vordergrund. Für die Überprüfung der feinmotorischen Leistung bei typischen Montagetätigkeiten fand erneut der validierte Prüfstand mit den entsprechenden vier definierten Aufgaben (vgl. Kapitel 4.2) Verwendung.



Abb. 17: (a) worky® 1594 Thermo Winterhandschuhe, (b) worky® 1492 Green Grip Strickhandschuhe

Die Bewegungseinschränkung der Hände, die durch Astronautenhandschuhe hervorgerufen wird, wurde mittels einer Schichtung mehrerer Handschuhe übereinander erzielt. Das Übereinanderziehen mehrerer Handschuhe reduziert nicht nur die *Beweglichkeit* der Hände, sondern zusätzlich die *taktile Wahrnehmung*. Des Weiteren kann eine bessere Passung der Handschuhe, die jeweils nur in drei Standardgrößen vorliegen, durch das Übereinanderziehen verschiedener

Handschuhe erreicht werden (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Somit wurde jede Versuchsperson angehalten, sowohl einen worky® 1492 Green Grip Strickhandschuh (Leipold & Döhle GmbH) als auch einen worky® 1594 Thermo Winterhandschuh (Leipold & Döhle GmbH) über den dünnen (0.34 mm) und nur zur Hygiene verwendeten Latexhandschuh zu ziehen (vgl. Abb. 17). Diese Dreifachschichtung erzeugt eine Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände und der *taktilen Wahrnehmung*, die vergleichbar mit der Reduktion durch Astronautenhandschuhe ist. In den Ausbildungseinrichtungen für die Astronautentrainings werden eben solche Handschuhkombinationen zur Simulation der Bedingungen eines Außenbordeinsatzes verwendet. Diese Arbeitshandschuhe werden als vergleichbar mit Astronautenhandschuhen bezeichnet (Chodack, 1991).

Die *Blickfeldeinschränkung* konnte mittels eines Helms erreicht werden (vgl. Abb. 18). Das Visier dieses Helmes wurde mithilfe des Verfahrens der Perimetrie¹⁸ vermessen und der Reduktion des Blickfeldes, mit der die Astronauten während eines Außenbordeinsatzes konfrontiert werden, angepasst. Zusätzlich trug jede Versuchsperson eine Halskrause (vgl. Abb. 18b), die direkt über verschiedene Schrauben mit dem Helm verbunden wurde, um die Beweglichkeit des Kopfes einzuschränken und um ein Verrutschen des Helmes zu verhindern. Die Halskrausen waren in verschiedenen Größen verfügbar, um eine optimale Passung für den jeweiligen Probanden zu erreichen.

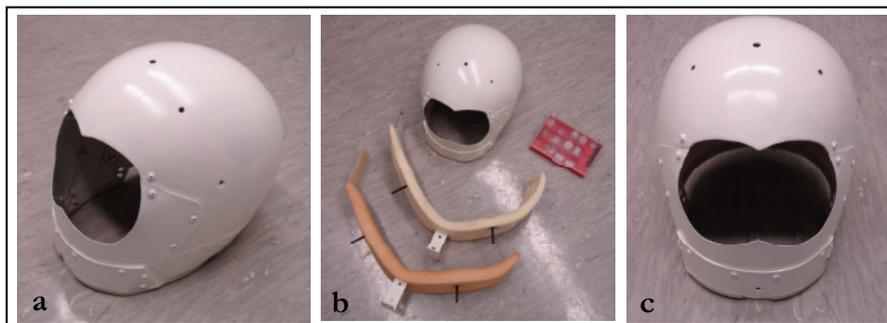


Abb. 18: (a) Helm von der Seite, (b) Helm mit den Halskrausen zur Reduktion der Bewegungsfreiheit, (c) Helm von vorne

4.3.2.1.3 Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuches, der für jeden Probanden identisch ablief, wurden die soziodemografischen Daten der Probanden erhoben. Sie umfassten das Alter, Geschlecht, mögliche Allergien gegen latexhaltige Materialien und den Beruf bzw. die jeweilige Studienrichtung. Im Anschluss erfolgte die Vorauswahl mittels der Motorischen Leistungsserie. Ausschließlich Versuchspersonen, die hinsichtlich der Performanz bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit*, *Fin-*

¹⁸ Die Perimetrie beschäftigt sich mit der Bestimmung der funktionalen Kapazität des visuellen Systems in verschiedenen Teilen des visuellen Feldes (Häcker, 1998).

gergeschicklichkeit und *Zielen* der Durchschnittsbevölkerung entsprachen, wurden zum Experiment zugelassen.

Darauf folgend wurde jeder Versuchsperson die Gelegenheit gegeben, sich mit dem Prüfstand, den Handschuhen und dem Helm vertraut zu machen (vgl. Abb. 19). Nach ca. fünf Minuten konnte diese Explorationsphase bei allen Versuchspersonen abgeschlossen werden.

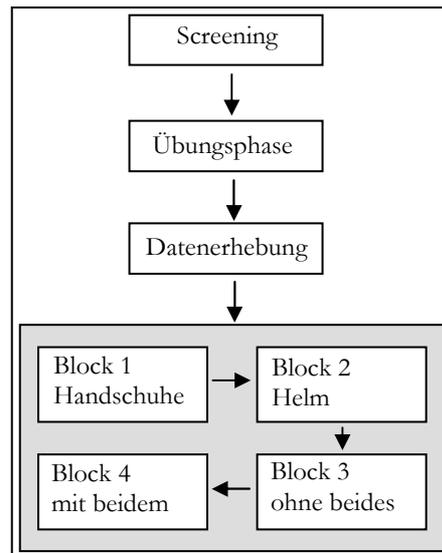


Abb. 19: Systematische Darstellung eines exemplarischen Versuchsablaufs für einen Probanden

Im Anschluss wurde die experimentelle Phase eingeleitet. Diese setzte sich aus vier verschiedenen Bedingungen zusammen, unter denen die jeweils vier definierten Aufgaben am Prüfstand absolviert werden mussten (vgl. Abb. 20).

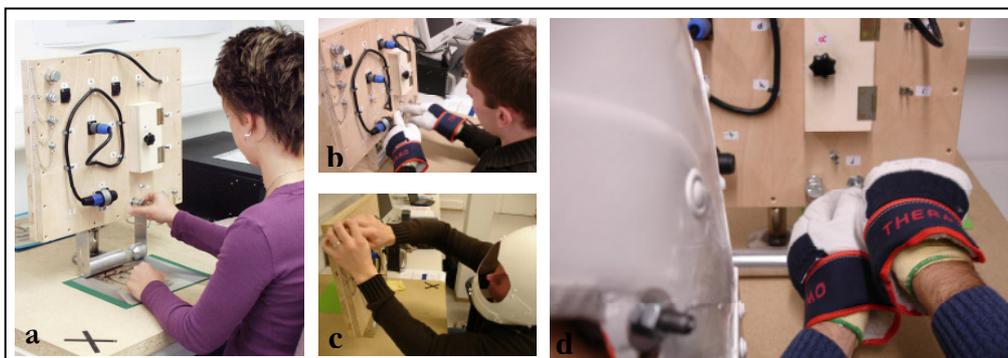


Abb. 20: (a) Vergleichsbedingung, (b) Versuchsperson mit Handschuhen, (c) Versuchsperson mit Helm und (d) Versuchsperson mit Helm und Handschuhen

In einer Bedingung, der Vergleichsbedingung oder auch Standardbedingung, mussten die Versuchsteilnehmer die Aufgaben unter normalen Umständen, also ohne Handschuhe und ohne

Helm vollenden (vgl. Abb. 20a). In einer weiteren Bedingung trugen alle Versuchspersonen während der Aufgabenbearbeitung den Helm (vgl. Abb. 20c). Das Tragen der Handschuhe bei der Absolvierung der Montagetätigkeiten stellte die dritte Bedingung dar (vgl. Abb. 20b). Die vierte Bedingung umfasste das Bearbeiten des Prüfstands bei gleichzeitigem Tragen der Handschuhe und des Helms (vgl. Abb. 20d). Jede Bedingung bildete einen Block, innerhalb dessen die Aufgabenreihenfolge mittels des Lateinischen Quadrates (Wagenaar, 1969) variiert wurde. Die Abfolge der Blöcke wurde ebenfalls mit Hilfe dieses Verfahrens permutiert, um eventuellen Lern- und Reihenfolgeeffekten vorzubeugen. Vor Beginn jeder Aufgabe platzierten die Versuchspersonen ihre Hände auf einer Markierung am Prüfstand, um eine einheitliche Ausgangsposition zu gewährleisten. Erst nach der Präsentation des Startsignals durfte mit der Umsetzung der Aufgaben begonnen werden. Für jede Aufgabe wurde die Bearbeitungszeit erfasst.

4.3.2.2 Ergebnisse

Alle der 30 Versuchspersonen entsprachen hinsichtlich ihrer feinmotorischen Leistungsfähigkeit an der Motorischen Leistungsserie der Durchschnittsbevölkerung und konnten daher zur Datenerhebung zugelassen werden. In einem ersten Schritt der Auswertung wurde mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests die Verteilungsform des Datensatzes überprüft. Da ein Großteil der Daten nicht normalverteilt ist (vgl. Anhang A.5.1), wurden für die weitere Berechnung lediglich nonparametrische Verfahren herangezogen. Auf diese Weise kann ein einheitliches Vorgehen bei der Analyse garantiert werden. Zur Untersuchung, ob die verschiedenen externen Einflussfaktoren tatsächlich eine Beeinträchtigung der feinmotorischen Leistungsfähigkeit hervorrufen, wurde die verteilungsfreie ANOVA nach Friedman herangezogen. Die Ergebnisse der verschiedenen Bedingungen werden im Folgenden alle jeweils ins Verhältnis zur Vergleichsbedingung gesetzt. Somit kann erfasst werden, ob die *Blickfeldeinschränkung*, die Reduktion der *taktilen Wahrnehmung* und die Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände tatsächlich einen Einfluss auf die feinmotorische Leistung des Menschen hat.

In Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit*, der mittels der Schraubaufgabe erfasst wird, konnte ein signifikanter Einfluss durch die verschiedenen Einflussfaktoren festgestellt werden ($\chi^2(3) = 68.28$; $p < .001$). Um die mögliche Beeinträchtigung der einzelnen Einflussfaktoren auf die *Fingergeschicklichkeit* differenziert aufzuzeigen, wurde der Wilcoxon-Test berechnet. Allen Ergebnissen wurde bei dieser Post-hoc-Analyse ein mittels der Bonferroni-Korrektur ermitteltes Signifikanzniveau von .0125 zu Grunde gelegt.¹⁹ Die Ergebnisse zeigen, dass die Handschuhe durch die Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände und durch die Reduktion der *taktilen Wahr-*

¹⁹Dieses Signifikanzniveau wird für alle weiteren Berechnungen in diesem Kapitel herangezogen.

nehmung die Leistung der *Fingergeschicklichkeit* signifikant herabsetzen ($T = 465.00$; $Mdn_{\text{Handschuh}} = 18.85$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 8.55$ s; $r = .87$). Die Bearbeitungszeit verdoppelte sich durch das Tragen der Handschuhe. Die *Blickfeldeinschränkung* durch den Helm hingegen hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung der *Feinmotorik* ($T = 310$; $Mdn_{\text{Helm}} = 9.15$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 8.55$ s; $r = .21$). Beide Einflussfaktoren zusammen bewirken wiederum eine signifikante Reduktion der Performanz ($T = 465$; $Mdn_{\text{beides}} = 17.5$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 8.55$ s; $r = .87$). Die Probanden benötigten beim Tragen der Handschuhe und dem Helm im Durchschnitt die zweifache Bearbeitungszeit. Da die Werte jedoch identisch mit denen der Handschuh-Bedingung sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Beeinträchtigung durch selbige und nicht durch die Kombination mit dem Helm entstanden sind. Die Verringerung der Performanz wird folglich nicht durch die *Blickfeldeinschränkung* verursacht. In Abbildung 21 wird der Median der benötigten Bearbeitungszeiten für die einzelnen Aufgaben unter den verschiedenen Bedingungen grafisch dargestellt.

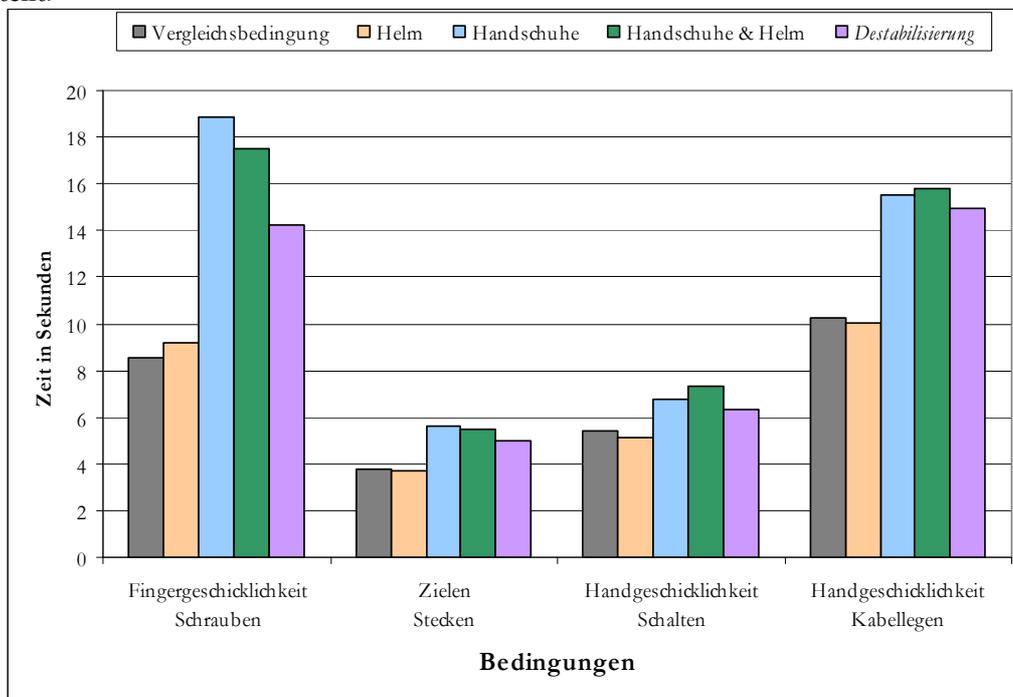


Abb. 21: Grafische Darstellung der Mediane der Bearbeitungszeiten der einzelnen Aufgaben während der unterschiedlichen Bedingungen. Für einen umfassenden Vergleich wird zusätzlich die Bedingung *Destabilisierung* aus Kapitel 3.3.1 aufgeführt.

Die Analyse der Beeinträchtigung der Leistung durch die externen Einflussfaktoren in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Zielen* zeigte vergleichbare Ergebnisse ($\chi^2(3) = 44.28$; $p < .001$). Die Handschuhe hatten bei der Steckaufgabe einen signifikanten Einfluss auf die Performanz ($T = 449.00$; $Mdn_{\text{Handschuh}} = 5.65$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 3.8$ s; $r = .81$). Durch das Tragen der Handschuhe stieg die Bearbeitungszeit um das 1.5-Fache an. In der Bedingung, in der die Versuchspersonen sowohl

mit den Handschuhen als auch mit dem Helm ausgestattet wurden, konnten wiederum identische Resultate zur Handschuh-Bedingung festgestellt werden ($T = 432.5$; $Mdn_{\text{Helm}} = 3.7$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 3.8$ s; $r = .75$). Die Bearbeitungszeit stieg in dieser Bedingung somit um das 1.4-Fache an. Der Helm hatte ähnlich wie bei dem *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* keinen Einfluss auf die Leistung der Probanden ($T = 158.5$; $Mdn_{\text{beides}} = 5.45$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 3.8$ s; $r = .42$).

Die Auswertung der Ergebnisse der Kabelaufgabe konnte zeigen, dass auch der *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* durch die externen Einflussfaktoren beeinträchtigt wird ($\chi^2(3) = 44.28$; $p < .001$). Eine differenzierte Analyse der Performanz in den unterschiedlichen Bedingungen zeigte erneut, dass die Handschuhe besonders beeinträchtigend sind. Dies gilt sowohl für die Bedingung, in der lediglich die Handschuhe ($T = 453$; $Mdn_{\text{Handschuh}} = 15.5$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 10.25$ s; $r = .83$), als auch für die Bedingung, in der zusätzlich der Helm getragen werden musste ($T = 435$; $Mdn_{\text{Helm}} = 10.05$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 10.25$ s; $r = .86$). Die Versuchspersonen benötigten das 1.5-Fache der Bearbeitungszeit, wenn sie Handschuhe oder die Kombination aus Handschuhen und Helm trugen. Der Helm für sich genommen hatte keinen signifikanten Einfluss auf die *Handgeschicklichkeit*, dies wird zusätzlich durch die geringe Effektstärke unterstrichen ($T = 202.5$; $Mdn_{\text{beides}} = 15.8$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 10.25$ s; $r = .06$).

Die Schaltaufgabe, die ebenfalls den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* abbildet, konnte diese Resultate bestätigen. Die externen Einflussfaktoren zeigten einen signifikanten Einfluss auf die Performanz ($\chi^2(3) = 49.595$; $p < .001$). Selbiger wurde wie in den anderen Aufgaben auch durch die Handschuhe ($T = 422$; $Mdn_{\text{Handschuh}} = 6.75$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 5.4$ s; $r = .71$) und nicht durch den Helm verursacht ($T = 185$; $Mdn_{\text{Helm}} = 5.1$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 5.4$ s; $r = .18$). Durch die Handschuhe stieg die Bearbeitungszeit um das 1.25-fache an. Dies zeichnete sich auch in der Bedingung, in der beides getragen werden musste, ab ($T = 382$; $Mdn_{\text{beides}} = 7.35$ s; $Mdn_{\text{Vergleich}} = 5.4$ s; $r = .65$). Hier stieg die Bearbeitungszeit im Kontrast zur Vergleichsbedingung um das 1.4-fache.

Zur Überprüfung der Ergebnisse des Wilcoxon-Tests wird die Post-hoc-Berechnung nach Siegel et al. (1988) verwendet. Bei dieser Analyse wird ähnlich wie beim Wilcoxon-Test mit den mittleren Rängen gearbeitet, allerdings werden sie hier ins Verhältnis zu den im Hinblick auf die Anzahl der Bedingungen korrigierten z-Werten gesetzt (vgl. Kapitel 4.1.2). Durch diese Methode kann die kritische Differenz errechnet werden. Ist dieser Wert kleiner als die Differenz der mittleren Ränge, so ist der Unterschied zwischen den Bedingungen als signifikant zu erachten. Trägt die Versuchsperson Handschuhe oder Handschuhe und Helm, so ist die Differenz der mittleren Ränge bei allen Aufgaben und damit in Bezug auf alle drei *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklich-*

keit, *Fingergeschicklichkeit* und *Zielen* größer als der kritische Wert und damit signifikant (vgl. Anhang A.5.2). Werden die Probanden lediglich mit dem Helm ausgestattet und damit in ihrem Blickfeld eingeschränkt, so hat dies keinen signifikanten Einfluss auf die Performanz. Die Differenz der mittleren Ränge ist bei jeder Aufgabe kleiner als der kritische Wert (vgl. Anhang A.5.2). Die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests können daher durch die Analyse nach Siegel et al. (1988) bestätigt werden.

4.3.2.3 Diskussion

Die Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* der Hände, verursacht durch das Tragen von Handschuhen, hat eine Beeinträchtigung der feinmotorischen Leistung zur Folge. Die Performanz bezüglich der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit*, *Fingergeschicklichkeit* und *Zielen* wird somit durch diese externen Einflussfaktoren reduziert. Die *Blickfeldeinschränkung* hat hingegen keinen Einfluss auf die erbrachte Leistung bei den hier untersuchten Montagetätigkeiten und folglich auch nicht auf die erfassten *Feinmotorik*-Faktoren. Dies bedeutet jedoch nicht, dass *Blickfeldeinschränkung* grundsätzlich keinen Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat. Lediglich die hier induzierte *Blickfeldeinschränkung* hat keine Reduktion hinsichtlich der Leistung bei den Aufgaben des hier eingesetzten Prüfstandes zur Folge. Dies kann damit erklärt werden, dass trotz der Reduktion des Blickfeldes alle benötigten Gegenstände des Prüfstandes während der gesamten Bearbeitung uneingeschränkt sichtbar waren (vgl. Abb. 22).

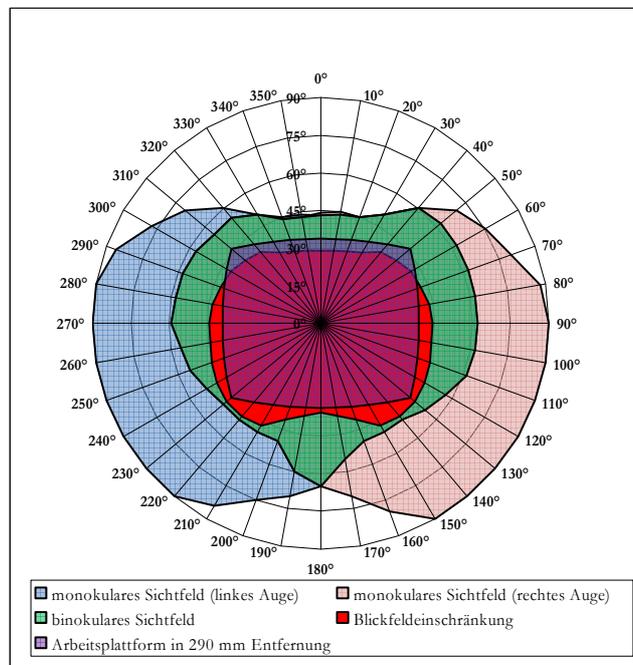


Abb. 22: Die durch den Helm induzierte Reduktion des normalen Blickfeldes des Menschen hat keinen Einfluss auf die Bearbeitung des Prüfstandes

Somit wurden den Versuchspersonen durch den Helm keine wichtigen visuellen Informationen zur Umsetzung der Montageaufgaben vorenthalten. Die Beeinträchtigung der Performanz während der Bedingung, in der sowohl die Handschuhe als auch der Helm zu tragen waren, lässt sich allein durch den Einfluss der Handschuhe erklären. Die Beeinträchtigung in dieser Bedingung ist vergleichbar mit der Handschuh-Bedingung. Folglich wird der Effekt der Handschuhe durch das Tragen des Helms nicht zusätzlich verstärkt. Dies Ergebnis deckt sich mit der Tatsache, dass die hier induzierte *Blickfeldeinschränkung* keinen Einfluss auf die erfassten *Feinmotorik*-Faktoren hat.

Die Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* als externe Einflussfaktoren bei der Weltraummontage sind für den Menschen nicht nur ungewohnt, sondern setzen zusätzlich seine feinmotorische Leistung herab. Bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem, das von der Erde aus angesteuert wird, treten diese Einflussfaktoren nicht auf. Es bietet sich daher an zu überprüfen, ob der Mensch mit einem Telemanipulationssystem eine bessere Leistung bei eben diesen Montagefähigkeiten zu erbringen in der Lage ist als ein Astronaut bei der direkten Weltraummontage im Orbit.

4.3.3 Die feinmotorische Leistung im Telemanipulationssystem

In den bereits durchgeführten Experimenten zu den externen Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2) konnte gezeigt werden, dass die Faktoren *Destabilisierung*, Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* eine Beeinträchtigung der Performanz bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit*, *Fingergeschicklichkeit* und *Zielen* zur Folge haben. Der Einflussfaktor *Blickfeldeinschränkung* verursacht hingegen bei dem verwendeten Prüfstand und den entsprechenden definierten Montageaufgaben keine Beeinträchtigung der Leistung. Jedoch werden die Astronauten bei ihren Außenbordeinsätzen im Rahmen des On-orbit-Servicing allein durch die Handschuhe und die Auswirkungen der *Mikrogravitation* gravierend behindert. Daher bietet es sich an zu untersuchen, ob ein Telemanipulationssystem, das von der Erde aus gesteuert wird, eine Alternative zu diesen Außenbordeinsätzen darstellt. Während der Arbeit mit Telemanipulationssystemen treten die oben genannten externen Einflussfaktoren nicht auf. Daraus könnte geschlossen werden, dass die Performanz nicht beeinträchtigt wird. Allerdings weisen die Telemanipulationssysteme andere externe Einflussfaktoren (z. B. *Zeitverzögerung*, vgl. Kapitel 3.3.4.3) auf, die ihrerseits eine Reduktion der feinmotorischen Leistung zur Folge haben könnten. Es gilt daher herauszufinden, ob die im Robotersystem auftretenden Einflussfaktoren eine stärkere Beeinträchtigung der Performanz darstellen als die Einflussfaktoren eines Außenbordeinsatzes. Durch eine nachfolgende Gegenüberstellung der beiden Szenarien, Telemanipulation einerseits und Außenbordeinsatz andererseits, kann festgestellt werden, wie gut das bisher verwendete Telemanipulationssystem für eine optimale Leistung des Menschen gestaltet ist und ob es tatsächlich eine

Alternative zum direkten Einsatz eines Astronauten darstellt. Um einen derartigen Vergleich realisieren zu können, muss in einem ersten Schritt die Performanz des Menschen während der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem aufgenommen werden. Diese Resultate können anschließend in einem zweiten Schritt der Leistung während eines simulierten Außenbordeinsatzes gegenübergestellt werden. Die Umsetzung des ersten Schrittes und damit das Experiment zur Erfassung der Leistung des Menschen während der Telemanipulation wird in diesem Kapitel vorgestellt. In dieser Untersuchung absolvierten die Versuchspersonen die definierten Aufgaben am validierten Prüfstand mit einem entsprechenden Robotersystem.

4.3.3.1 Methode

4.3.3.1.1 Stichprobe

Insgesamt wurden 24 Versuchspersonen im Alter von 21 bis 61 Jahren ($\bar{x} = 30.25$ Jahre) untersucht. Die Stichprobe setzte sich aus 5 Frauen und 19 Männern zusammen. Alle Versuchsteilnehmer wiesen einen unbeeinträchtigten oder korrigierten Visus auf. Keiner der Teilnehmer berichtete von motorischen oder neuronalen Störungen. Die Händigkeit der Probanden wurde mittels des Edinburgh Inventars (Oldfield, 1971) erfasst. Die gesamte Stichprobe bestand ausschließlich aus Rechtshändern und bildete somit diesbezüglich eine homogene Stichprobe. Telemanipulationssysteme und ihre Bedienung sollen möglichst intuitiv und damit für die Durchschnittsbevölkerung verständlich und leicht erlernbar gestaltet sein. Dadurch soll erreicht werden, dass ein Mensch ohne viel Training mit diesen Systemen arbeiten kann. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, dass lediglich Versuchspersonen ohne jegliche Vorerfahrung hinsichtlich des Gebrauches von Telemanipulationssystemen aufgenommen werden. Dies sollte eine vergleichbare Ausgangslage hinsichtlich des Erfahrungs- und Übungszustandes garantieren.

4.3.3.1.2 Aufbau

Der Aufbau dieser Untersuchung bestand unter anderem aus der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems, das erneut als Screening-Verfahren eingesetzt wurde. Dadurch sollte verhindert werden, dass Versuchspersonen, deren feinmotorische Leistung von der Norm abweicht, in die Datenanalyse einbezogen werden und die Ergebnisse verzerren. Des Weiteren wurde der bereits in Kapitel 4.1.1.2 beschriebene Prüfstand mit den entsprechend vorgegebenen Aufgaben eingesetzt.

Dieser Prüfstand wurde mittels eines Gestells vertikal im Arbeitsbereich des verwendeten Teleoperators platziert (vgl. Abb. 23).

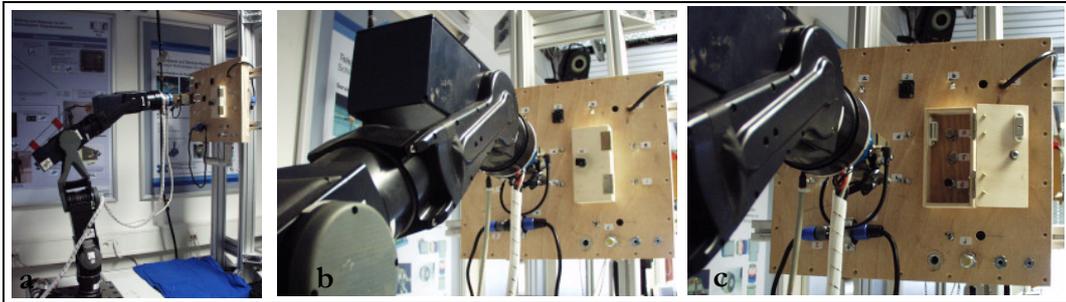


Abb. 23: (a) Teleoperator mit dem am Gestell fixierten Prüfstand, (b) der Kopf des Teleoperators vor dem Prüfstand mit (b) geschlossenem und (c) geöffnetem Kästchen

Als Teleoperator bzw. Slave des Telemanipulationssystems wurde ein Leichtbauroboter der Serie II des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) verwendet (vgl. Abb. 23). Dieser Roboter wiegt ca. sieben Kilogramm und erreicht eine Traglast von ca. 18 Kilogramm und verfügt über sieben Freiheitsgrade. Diese Anzahl entspricht der des menschlichen Arms. Am Kopf des Roboters sitzt ein Parallelgreifer mit einer Öffnungsspanne von 110 mm bis 250 mm. Angesteuert wird der Teleoperator durch den Leichtbauroboter der Serie III, der gleichermaßen vom DLR entwickelt wurde und als Master bzw. Operator fungiert (vgl. Abb. 24).



Abb. 24: (a) Proband mit Head Mounted Display (HMD) und Operator, (b) Operator, (c) Versuchsperson mit HMD und Operator

Die Kinematik dieses Roboters wurde ebenfalls der des menschlichen Arms angepasst und verfügt somit ebenso über sieben Freiheitsgrade. Über einen Kippschalter am Operatorkopf wird der Öffnungs- und Schließmechanismus des Parallelgreifers am Teleoperatorkopf gesteuert.

Die visuelle Rückmeldung konnte durch ein entsprechendes Kamerasystem erreicht werden. Die Kameras zeichneten den Teleoperator und seine Bewegung in der Arbeitsumgebung auf und leiteten diese Informationen in Form einer 3D-Darstellung an ein Head Mounted Display (HMD; NVIS nVisor SX, 1280 x 1024 Auflösung) weiter. Somit konnte der menschliche Operator während des Experiments die Bewegung des Slaves jederzeit visuell überprüfen und gegebenenfalls korrigieren. In Abbildung 25a ist ein entsprechendes HMD dargestellt. Abbildung 25b und 25c zeigen das Sichtfeld der Versuchsperson, das im Head Mounted Display präsentiert wurde.

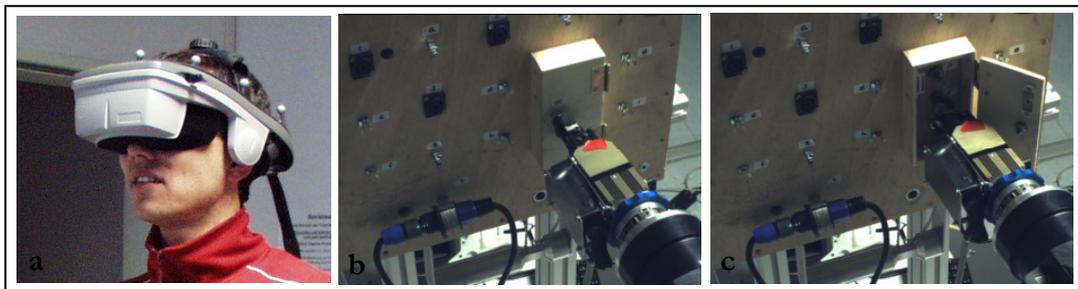


Abb. 25: (a) Versuchsperson mit Head Mounted Display und die Sicht des Probanden im HMD auf den Parallelgreifer des Teleoperators und das geschlossene (b) und geöffnete (c) Kästchen

Das Telemanipulationssystem kann verschiedene *Zeitverzögerungen* (Delays) der Datenübertragung simulieren. Daher war es möglich, die Versuchspersonen zum einen mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms und zum anderen ohne *Zeitverzögerung* arbeiten zu lassen. Die 600 ms Delay entsprechen dem Zeitintervall, dass bei einer Datenübertragung von der Erde zur Internationalen Raumstation (ISS; International Space Station) und zurück entsteht. Diese Zeitspanne wird daher als realistisches Szenario für zukünftige Telemanipulationssysteme im Rahmen des On-orbit-Servicing von der Erde aus eingesetzt. Sofern der Teleoperator direkt vor Ort, z. B. aus dem Inneren der ISS heraus, vom Operator angesteuert wird und damit die Entfernung entsprechend gering ist, entsteht keine *Zeitverzögerung*. Aus diesem Grund wird neben der *Zeitverzögerung* von 600 ms die Bedingung ohne Delay in den Versuchsplan aufgenommen und damit werden beide Szenarien simuliert.

Zusätzlich zum technischen Aufbau des Experiments wurde der validierte Fragebogen nach Scheuchenpflug (2001) zur Erfassung des Präsenzerlebens (vgl. Kapitel 3.3.4.2) eingesetzt. Dieser misst über verschiedene Items den jeweiligen Ausprägungsgrad der empfundenen Präsenz. Die Antworten werden dabei auf einer siebenstufigen Antwortskala geratet. Für die Untersuchung im Rahmen des Telemanipulationssystems wurden drei geeignete Items ausgewählt, um das jeweilige Gefühl der Präsenz in der entfernten Umgebung zu erfassen (vgl. Anhang A.6.1). Durch die Erfassung des Präsenzerlebens kann untersucht werden, ob selbiges einen Einfluss auf die Performance der einzelnen Probanden hat. Es kann somit analysiert werden, ob das Präsenzerleben einen Einflussfaktor in Bezug auf die feinmotorische Leistung darstellt.

4.3.3.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde für alle Probanden identisch gestaltet. Nach dem Screening mittels der Motorischen Leistungsserie und der Erfassung der soziodemografischen Daten (vgl. Kapitel 4.1.1.3) wurden die Versuchspersonen in das Telemanipulationssystem eingewiesen. Im Anschluss übten die Probanden die verschiedenen Aufgaben am Prüfstand sowohl mit *Zeitverzögerung* als auch ohne *Zeitverzögerung*. Die Übungsphase wurde abgeschlossen, sobald die Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben unter 25 % der anfangs benötigten Zeit lag (vgl. Kapitel 2). Nach der Übungsphase wurde die Datenerhebung eingeleitet (vgl. Abb. 26).

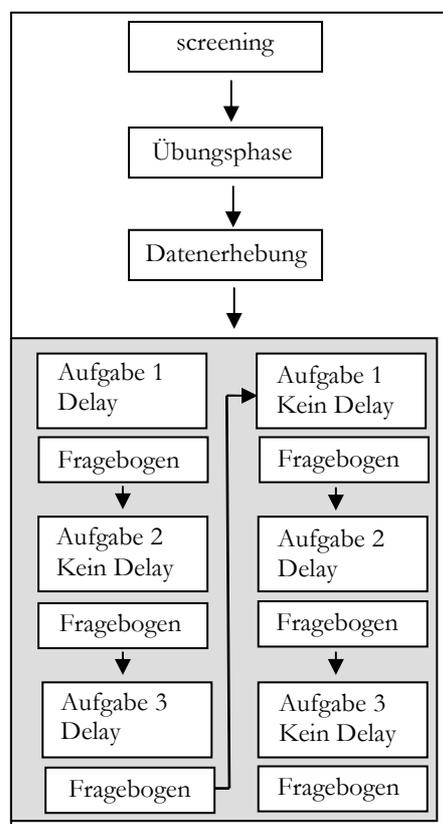


Abb. 26: Exemplarische Darstellung des Versuchsablaufs für einen Probanden

Die Versuchspersonen wurden dazu angehalten, die definierten Aufgaben am Prüfstand jeweils einmal mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms und einmal ohne *Zeitverzögerung* mit dem Telemanipulationssystem zu absolvieren.

Da der *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit*, der durch die Kabelaufgabe erfasst werden kann, ebenfalls mittels der Schaltaufgabe (vgl. Anhang A.2.4) untersucht wird, wurde aus Gründen der Zumutbarkeit hinsichtlich der Untersuchungsdauer auf die Kabelaufgabe verzichtet. Durch diese Maßnahme konnte die Durchführungsdauer des Versuches auf zwei Stunden beschränkt und damit für die Versuchspersonen zumutbar gestaltet werden. Somit umfasste das Experiment die drei Montageaufgaben Schrauben, Stecken und Schalten unter den beiden *Zeitverzögerungsbedingungen* 600 ms Delay und 0 ms Delay.

Um Reihenfolge- und Lerneffekt ausschließen zu können, wurde die Reihenfolge der Aufgaben mittels des Lateinischen Quadrates permutiert (Wagenaar, 1969). Ebenso wurde mit den zwei Bedingungen der *Zeitverzögerung* verfahren. Nach jeder Aufgabe wurden den Versuchspersonen die vier Items des Fragebogens nach Scheuchenpflug zur Beantwortung vorgelegt.

4.3.3.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchung vorgestellt. Da die Gegenüberstellung der Resultate der Untersuchung mit dem Telemanipulationssystem und der Resultate des simulierten Außenbordeinsatzes erst erfolgen kann, wenn beide Experimente durchgeführt wurden, wird in diesem Kapitel lediglich auf den möglichen Einfluss der *Zeitverzögerung* und des Präsenzerlebens auf die Performanz eingegangen.

Jede der 24 Versuchspersonen konnte zur Datenerhebung zugelassen werden. Ihre Performanz an der Motorischen Leistungsserie entsprach der Norm. Zur Analyse der Datensätze wurden unterschiedliche statistische Verfahren herangezogen. Um entscheiden zu können, ob parametrische oder nonparametrische Verfahren zu verwenden sind, wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test eingesetzt. Die Ergebnisse dieses Tests zeigten, dass einige der Datensätze nicht normalverteilt sind (vgl. Anhang A.6.2). Aus diesem Grund wurden für die weitere Analyse ausschließlich verteilungsfreie Verfahren herangezogen.

Um herauszufinden, ob die *Zeitverzögerung* von 600 ms einen Einfluss auf die Performanz des Menschen bei der Bearbeitung typischer Montageaufgaben mit einem Telemanipulationssystem hat, werden die Ergebnisse der einzelnen Aufgaben in den beiden Bedingungen gegenübergestellt. Der hierfür geeignete Test ist der Wilcoxon-Rangsummen-Test. Hinsichtlich der Schraub-

aufgabe und damit in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen festgestellt werden ($T = 285$; $p < .001$; $Mdn_{\text{ohneDelay}} = 192.5$ s; $Mdn_{\text{Delay}} = 271.0$ s; $r \approx .78$). Die Bearbeitungszeit stieg durch die *Zeitverzögerung* um das 1.4-Fache an. Ein Delay von 600 ms hat somit eine signifikante Beeinträchtigung der *Fingergeschicklichkeit* zur Folge.

Ähnliche Ergebnisse konnten hinsichtlich der *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* festgestellt werden. Bei der Steckaufgabe hatte die *Zeitverzögerung* ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das *Zielen* und verursachte eine Zunahme der Bearbeitungszeit um das 2.5-Fache ($T = 273.5$; $p < .001$; $Mdn_{\text{ohneDelay}} = 37.0$ s; $Mdn_{\text{Delay}} = 98.0$ s; $r \approx .72$). Die Steigerung der Bearbeitungszeit bei der Schaltaufgabe, induziert durch das Delay von 600 ms, betrug das 1.7-Fache ($T = 300$; $p < .001$; $Mdn_{\text{ohneDelay}} = 102.5$ s; $Mdn_{\text{Delay}} = 188.0$ s; $r \approx .86$) und zeigte somit einen signifikanten Einfluss der *Zeitverzögerung* auf die Leistung bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Handgeschicklichkeit*.

Zur Analyse des Präsenzerlebens und dessen möglichen Einfluss auf die Performanz der Versuchspersonen wurde eine Korrelationsrechnung durchgeführt. Da die drei Antwortvariablen des Fragebogens ordinalskaliert sind, wird statt der Produkt-Moment-Korrelation die Rangkorrelation nach Spearman angewendet (Marx, 1982). Die Ergebnisse zeigen, dass kein Zusammenhang zwischen dem Präsenzerleben und der Leistung am Prüfstand besteht (vgl. Anhang A.6.3). Das Ausmaß des Präsenzerlebens stellt somit keinen Einflussfaktor hinsichtlich der Arbeit am validierten Prüfstand dar.

4.3.3.3 Diskussion

In dieser Untersuchung wurde die Leistung der einzelnen Versuchspersonen während der Bearbeitung vordefinierter und validierter Montageaufgaben mit einem Telemanipulationssystem erfasst. Dabei stand die Analyse des möglichen Einflusses durch eine realistische *Zeitverzögerung* der Datenübertragung beim On-orbit-Servicing und des Präsenzerlebens im Mittelpunkt.

Der vermutete Einfluss der *Zeitverzögerung* auf die feinmotorische Leistung bei typischen Montagetätigkeiten konnte bestätigt werden. Ein Delay von 600 ms erhöht die Bearbeitungszeit bei allen Aufgaben und hat somit Auswirkung auf die Performanz bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen*. Die *Zeitverzögerung* stellt folglich einen externen Einflussfaktor beim telemanipulativen On-orbit-Servicing dar. Der Frage, ob die Stärke der Behinderung durch diesen Einflussfaktor eine Reduktion der Performanz hervorruft, die vergleich-

bar mit der Einschränkung der Leistung der Astronauten durch die *Mikrogravitation* und die Raumfahrthandschuhe ist, wird in Kapitel 4.3.4.2.1 nachgegangen.

Das Präsenzerleben als weiterer möglicher Einflussfaktor hinsichtlich der Performanz wurde ebenfalls analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass kein Zusammenhang zwischen dem Grad des Präsenzerlebens und der Leistung während der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem besteht. Allerdings kann die geringe Bearbeitungsdauer der einzelnen Aufgaben und die somit jeweils zeitlich stark eingeschränkte Möglichkeit des Sich-Hineinversetzens in die entfernte Umgebung zu diesem Ergebnis beigetragen haben. Durch eine Studie mit längeren ununterbrochenen Zeitintervallen hinsichtlich der Aufgabenbearbeitung mit einem Telemanipulationssystem könnte dieser Frage nachgegangen werden.

4.3.4 Die feinmotorische Leistung unter Bedingung eines simulierten Außenboreinsatzes

Während der Außenboreinsätze (EVAs) werden die Astronauten durch die *Mikrogravitation* und durch die Bewegungseinschränkung, verursacht durch den Raumanzug und die Handschuhe, in ihrer feinmotorischen Leistungsfähigkeit beeinträchtigt. Zusätzlich sind diese EVAs nach wie vor mit einem Risiko für die jeweiligen Astronauten verbunden und äußerst zeit- und kostenintensiv. Daher bietet es sich an zu untersuchen ob ein Telemanipulationssystem, das von der Erde aus gesteuert wird, eine Alternative zu diesen Außenboreinsätzen darstellt. In Kapitel 4.3.3 wurden das Telemanipulationsexperiment und die entsprechenden Ergebnisse hinsichtlich der Performanz bereits dargestellt.

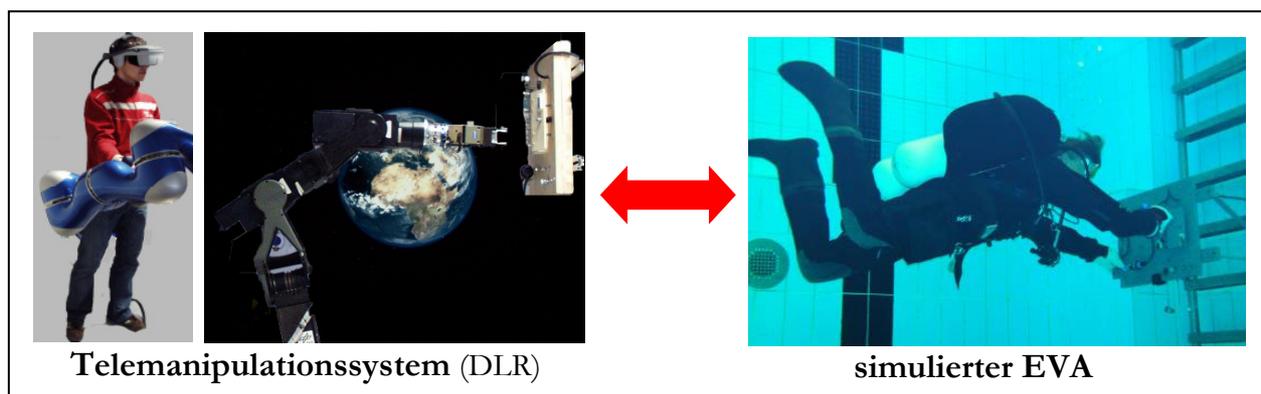


Abb. 27: Gegenüberstellung der Szenarien Telemanipulationssystem und simulierter EVA (extravehicular activity)

Um die geplante Gegenüberstellung zwischen Telemanipulationssystem einerseits und simulierten Außenboreinsatz andererseits (vgl. Abb. 27) zu realisieren, wird in dem nachfolgenden Kapitel

das Unterwasserexperiment mit dem simulierten Außenbordeinsatz beschrieben und analysiert. In dieser Untersuchung absolvierten die Versuchspersonen die definierten Aufgaben am validierten Prüfstand in spezieller Ausrüstung unter Wasser. Um die Ergebnisse der beiden Szenarien zusätzlich mit der Leistung des Menschen unter Standardbedingungen, d.h. ohne äußeren Einfluss (vgl. Kapitel 4.3.2) in Relation setzen zu können, werden selbige mit eben dieser Standardbedingung verglichen. Somit wird es möglich eine Rangordnung der einzelnen Szenarien zu erstellen (vgl. Kapitel 4.3.4.2.1).

In einem ersten Schritt wird jedoch der genaue Einfluss der Bewegungseinschränkung und des reduzierten haptischen Feedbacks durch die Handschuhe untersucht (vgl. Kapitel 4.3.2). Durch die zusätzliche Einwirkung der simulierten *Mikrogravitation* auf den Bewegungsapparat könnte sich das Verhältnis zwischen der Bearbeitung mit Handschuhen und ohne Handschuhe verändern. Dieser Annahme soll im Folgenden zusätzlich nachgegangen werden. Um den möglichen Einfluss der *Mikrogravitation* auf die feinmotorische Leistung zu erfassen, werden die Performanz während des Unterwasserexperiments und die Resultate aus der Untersuchung unter Standardbedingungen (vgl. Kapitel 4.3.2) ins Verhältnis gesetzt. In beiden Untersuchungen wurden die definierten Aufgaben am validierten Prüfstand mit und ohne Handschuhe durchgeführt. Die Bearbeitungszeit dient erneut als Messkriterium.

4.3.4.1 Methode

4.3.4.1.1 Stichprobe

Insgesamt wurden 24 rechtshändige Versuchspersonen im Alter von 21 bis 61 Jahren ($\bar{x} = 30.25$ Jahre) untersucht. Die Zusammensetzung der Stichprobe hinsichtlich des Alters und des Geschlechts ist identisch mit der des Telemanipulationsexperiments (vgl. Kapitel 4.3.3). Die Methode der Matched Samples (Bortz, 2006) wurde zur Extrahierung des Einflusses von personengebundenen Störvariablen, und damit zur besseren Vergleichbarkeit beider Stichproben, angewendet. Die Stichprobe setzte sich daher ebenfalls aus fünf Frauen und 19 Männern zusammen. Alle Versuchsteilnehmer wiesen einen unbeeinträchtigten oder korrigierten Visus auf. Keiner der Teilnehmer berichtete von motorischen oder neuronalen Störungen. Ausschließlich Versuchspersonen mit einem gültigen Brevet (mindestens CMAS***²⁰), einer ärztlichen Bestätigung der Tauchtauglichkeit und Erfahrung im Umgang mit Trockentauchanzügen wurden zum Experiment zugelassen. Dies sollte eine vergleichbare Ausgangslage hinsichtlich des Erfahrungs- und

²⁰ Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques Tauchgruppenleiter DIN EN 14153-3

Übungszustandes garantieren. Zusätzlich sollte durch die vorzuweisende Qualifizierung erreicht werden, dass die Taucher die Tarierung unter Wasser ohne große Anstrengung umsetzen können.

4.3.4.1.2 Aufbau

Die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems wurde erneut als Screening-Verfahren in den Aufbau integriert. Dadurch sollte verhindert werden, dass Versuchspersonen, deren feinmotorische Leistung von der Norm abweichen, in die Datenanalyse einbezogen werden und die Ergebnisse verzerren. Für die Untersuchung unter Wasser wurde der Prüfstand (vgl. Kapitel 4.1.1.2) in eine wasserfeste Variante umgestaltet. Dabei blieb die Anordnung der einzelnen Komponenten identisch. Lediglich die aus Holz gefertigten Bauteile wurden durch PVC ersetzt (vgl. Abb. 28). Mittels eines Metallgestells konnte der Prüfstand in einer Tiefe von 2.5 m unter Wasser vertikal befestigt werden.

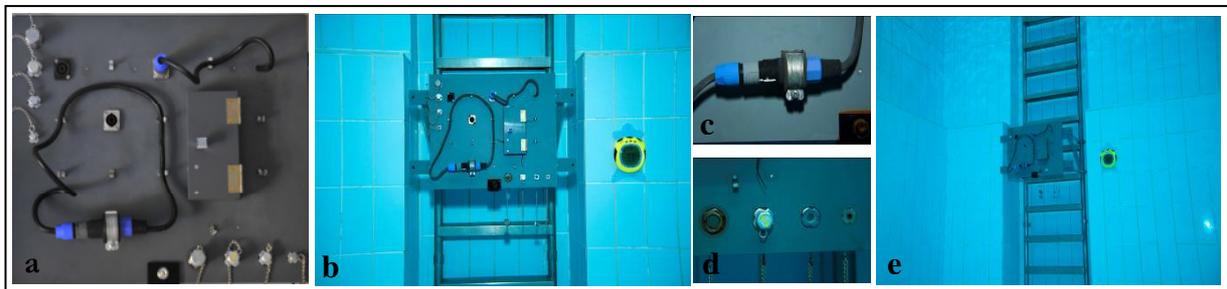


Abb. 28: Wasserfester Prüfstand (a) unter Wasser (b) mit den entsprechenden Steckverbindungen (c) und Schraubaufgaben (d) in 2.5 m Tiefe vertikal montiert (e)

Die verwendeten Handschuhe entsprachen denen aus Kapitel 4.3.2. Neben einem Einweg- und einem Strickhandschuh wurde ein Thermohandschuh zur Simulation der Bewegungseinschränkung und der reduzierten *taktilen Wahrnehmung* von Raumfahrthandschuhen eingesetzt. Die Erfassung der Bearbeitungszeit erfolgte durch eine Unterwasserstoppuhr. Durch selbige wurde zusätzlich mittels einer akustischen Ausgabefunktion das Startsignal gegeben. Die Anzeige der zu bearbeitenden Montageaufgaben (vgl. Kapitel 4.2) wurde durch unterwassertaugliche Schilder und Schreibtafeln realisiert.

Alle Teilnehmer waren mit einem Trockentauchanzug, einem Unterzieher und einer Tauchmaske ausgerüstet (vgl. Abb. 29). Die Trockentauchanzüge verfügen über ein spezielles, wasserdichtes Material und über Manschetten, die das Eindringen von Wasser über die Öffnungen am Hals und den Handgelenken verhindern. Flossen wurden von den Versuchspersonen nicht getragen, um die Vergleichbarkeit mit einem simulierten Außenbordeinsatz nicht herabzusetzen.

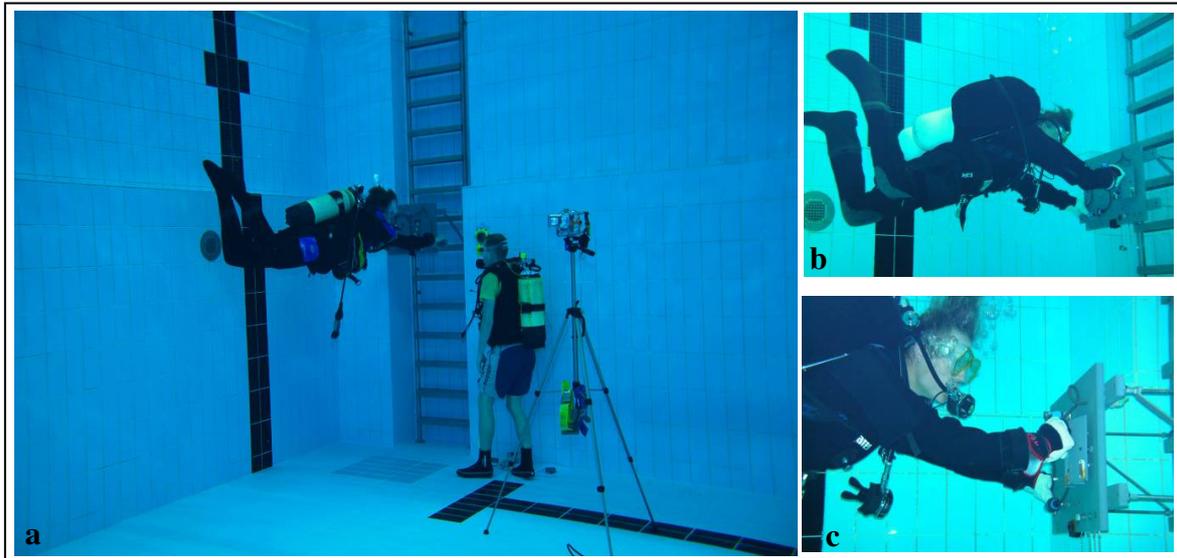


Abb. 29: Versuchsperson und Versuchsleiter unter Wasser (a); Versuchsperson vor dem Prüfstand (b), Versuchsperson mit Handschuhen vor dem Prüfstand (c)

4.3.4.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde für alle Probanden identisch gestaltet. Nach dem Screening mittels der Motorischen Leistungsserie und der Erfassung der soziodemografischen Daten (vgl. Kapitel 4.1.1.3) wurden die Versuchspersonen in die Montageaufgaben am Prüfstand eingewiesen (vgl. Abb. 30). Dabei wurde ihnen über Wasser jede Aufgabe zum Üben mit entsprechenden zu denen unter Wasser identischen Duplikaten dargeboten.

Auf die Kabelaufgabe (vgl. Anhang A.2.3) wurde in dieser Untersuchung genau wie in dem Telemanipulationsexperiment verzichtet. Da die jeweiligen Bearbeitungszeiten des Unterwasserexperiments mit denen des Telemanipulationsexperiments verglichen werden, ist eine identische Aufgabenauswahl maßgebend. Somit umfasste das Experiment unter Wasser ebenfalls die drei Montageaufgaben Schrauben, Stecken und Schalten zum einen unter der Bedingung mit Handschuhen und zum anderen ohne Handschuhe (vgl. Abb. 31).

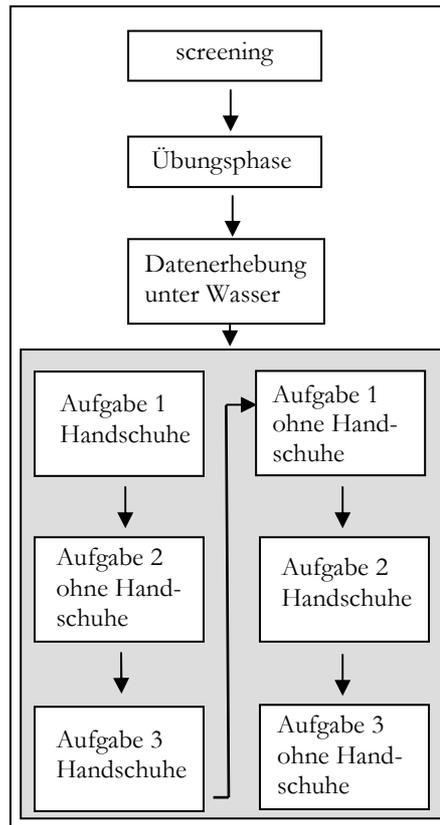


Abb. 30: Exemplarische Darstellung eines Versuchsdurchlaufes für einen Probanden

Um ausschließen zu können, dass Reihenfolge- und Lerneffekt die Versuchsergebnisse verzerren, wurde mithilfe des Lateinischen Quadrates (Wagenaar, 1969) die Aufgabenabfolge permutiert. Ebenso wurde mit den zwei Bedingungen mit und ohne Behandschuhung verfahren. Gleichbleibende Sichtverhältnisse wurden über entsprechende Deckenbeleuchtung erzielt. Jede Versuchsperson trug eine Tauchermaske mit vergleichbarer *Blickfeldeinschränkung*.

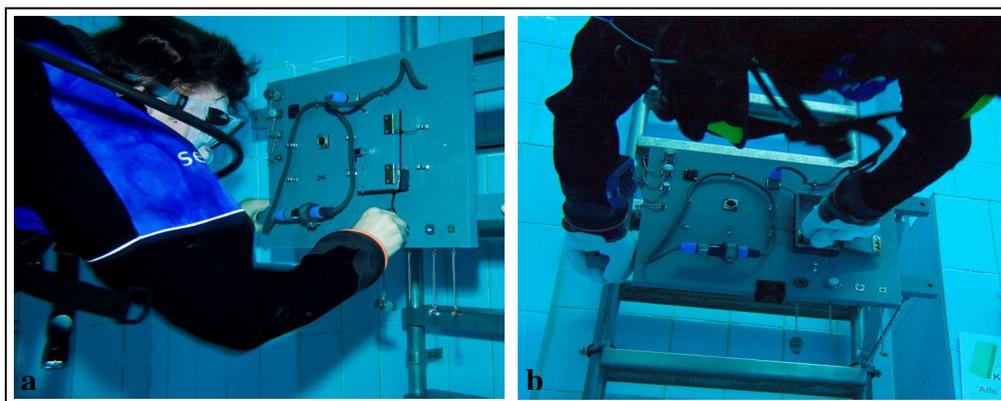


Abb. 31: Versuchsperson ohne (a) und mit Handschuhen (b) unter Wasser vor dem Prüfstand

4.3.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Unterwasserexperiments vorgestellt. In einem ersten Schritt werden die beiden experimentellen Bedingungen mit und ohne Handschuhe ins Verhältnis gesetzt und kurz diskutiert. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 4.3.4.2.1 die Gegenüberstellung des Telemanipulationsexperiments und des simulierten Außenbordeinsatzes sowie der Standard-situation.

Die Leistung der 24 Versuchspersonen an der Motorischen Leistungsserie entsprach der Norm. Somit konnten alle Probanden zur Datenerhebung unter Wasser zugelassen werden. In einem ersten Schritt wurde die Verteilungsform der Daten mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests analysiert. Durch diese Analyse kann entschieden werden, ob parametrische oder nonparametrische Verfahren anzuwenden sind. Die Resultate dieses Tests zeigen, dass einige Variablen nicht normalverteilt sind (vgl. Anhang A.7). Aus Gründen der Einheitlichkeit wird daher auf nonparametrische Verfahren zurückgegriffen (Field, 2005).

Um zu analysieren, ob die Einschränkung der *Beweglichkeit* der Hände und der *taktilen Wahrnehmung* durch die Handschuhe ebenfalls einen Einfluss unter Bedingungen der simulierten *Mikrogravitation* haben, werden im Folgenden beide Datensätze gegenübergestellt. Dabei findet das Verfahren des Wilcoxon-Tests für zwei verbundene Stichproben Verwendung. Jeder der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* wird separat betrachtet. Für die Schraubaufgabe und somit für den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Handschuhe auf die Performanz ($T = 287$; $p < .05$, $r = -.8$). Die Bearbeitungszeit ($Mdn_{ohne} = 10.9$ s; $Mdn_{mit} = 23.72$ s) nahm um mehr als das Doppelte zu. Ähnlich gestaltete sich die Beeinträchtigung während der Bearbeitung der Schaltaufgabe. Die Performanz in Bezug auf die *Handgeschicklichkeit* wurde durch die Handschuhe signifikant verringert ($T = 224$; $p < .05$; $r = -.4$). Die Bearbeitungszeit ($Mdn_{ohne} = 6.04$ s; $Mdn_{mit} = 7.57$ s) nahm um das 1.3-Fache zu. Ebenfalls beeinträchtigend wirkten die Handschuhe auf den *Feinmotorik*-Faktor *Zielen* ($T = 235$; $p < .05$; $r = -.5$). Die Bearbeitungszeit ($Mdn_{ohne} = 5.33$ s; $Mdn_{mit} = 7.07$ s) nahm signifikant ebenfalls um das 1.3-Fache zu. Diese Ergebnisse decken sich weitestgehend mit den Resultaten zur Untersuchung des Einflusses der Handschuhe auf die feinmotorische Performanz unter Standardbedingungen aus Kapitel 4.3.2 und bestätigen diese.

Um nachfolgend zu analysieren, ob die simulierte *Mikrogravitation* einen verstärkenden Effekt auf die Beeinträchtigung der feinmotorischen Performanz hat, werden die Resultate unter Standardbedingungen aus Kapitel 4.3.2 mit den Ergebnissen aus dem Unterwasserexperiment verglichen.

Dieser Vergleich erfolgt mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests für unabhängige Stichproben. Die Ergebnisse für die Bearbeitung der drei Montageaufgaben am Prüfstand ohne Handschuhe zeigen einen Einfluss der *Mikrogravitation* auf die *Fingergeschicklichkeit* (KS-Z = 3.46; $p < .05$) und das *Zielen* (KS-Z = 1.59; $p < .05$) auf. Die Bearbeitungszeit erhöht sich bei der Schraubaufgabe und damit in Bezug auf die *Fingergeschicklichkeit* um das 1.2 fache ($Mdn_{\text{standard}} = 8.55$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 10.9$ s). Im Hinblick auf das *Zielen* nimmt die Bearbeitungszeit um das 1.4-Fache ($Mdn_{\text{standard}} = 3.8$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 5.33$ s) zu. Die Performanz während der Schaltaufgabe wird durch die simulierte *Mikrogravitation* nicht beeinflusst (KS-Z = .866; $p > .05$). Es konnte kein signifikanter Unterschied in der Bearbeitungszeit festgestellt werden ($Mdn_{\text{standard}} = 5.4$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 6.04$ s).

Ähnliche Ergebnisse konnten hinsichtlich der Bedingung mit Handschuhen festgestellt werden. Sowohl die *Fingergeschicklichkeit* (KS-Z = 3.46; $p < .05$) als auch das *Zielen* (KS-Z = 1.29; $p > .05$) werden durch die simulierte *Mikrogravitation* beeinflusst. Die Bearbeitungszeit nimmt daher sowohl bei der Schraubaufgabe ($Mdn_{\text{standard}} = 18.85$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 23.72$ s) unter Wasser um das 1.2-Fache als auch bei der Steckaufgabe ($Mdn_{\text{standard}} = 5.65$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 7.57$ s) um das 1.3-Fache signifikant zu. Der *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* wird durch die Bearbeitung unter Wasser nicht signifikant beeinflusst (KS-Z = .722; $p > .05$; $Mdn_{\text{standard}} = 6.75$ s; $Mdn_{\text{wasser}} = 7.07$ s).

4.3.4.2.1 Ergebnisse der Gegenüberstellung der Telemanipulation und des simulierten Außenbordeinsatzes

Bei dieser Gegenüberstellung wird das Telemanipulationssystem mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms mit der Performanz unter Wasser verglichen. Dabei geht es um eine möglichst realistische Simulation der äußeren Bedingung. Aus diesem Grund wird bei dem Telemanipulationssystem das Delay von 600 ms mit einbezogen. Diese *Zeitverzögerung* simuliert die Steuerung des sich im All befindenden Teleoperators von der Erde aus. Durch die Ausstattung der Taucher mit einem Anzug und entsprechenden Handschuhen wiederum werden die beeinflussenden externen Faktoren (z. B. Bewegungseinschränkung) eines Außenbordeinsatzes simuliert. Dieser Vergleich ermöglicht somit eine realistische Einschätzung des zu vermutenden Unterschieds der feinmotorischen Performanz in beiden Szenarien.

Die Analyse mittels eines Kolmogorov-Smirnov-Tests für zwei Stichproben zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen dem Telemanipulations- und dem Unterwasserszenario. In Bezug auf die Schraubaufgabe und damit hinsichtlich die *Fingergeschicklichkeit* (KS-Z = 3.46; $p < .05$) beträgt die Bearbeitungszeit mit dem Telemanipulationssystem das 11-Fache der Zeit, die unter Wasser benötigt wird ($Mdn_{\text{wasser}} = 23.7$ s; $Mdn_{\text{tele}} = 271.0$ s). Beim *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* konnte ebenfalls ein signifikanter Unterschied analysiert werden (KS-Z = 3.26;

$p < .05$). Die Bearbeitungszeit nimmt hier um das 26 fache zu ($Mdn_{\text{wasser}} = 7.1 \text{ s}$; $Mdn_{\text{tele}} = 188.0 \text{ s}$). Der dritte untersuchte *Feinmotorik*-Faktor *Zielen*, der durch die Steckaufgabe erfasst wird, wurde ebenfalls durch die beiden Szenarien signifikant unterschiedlich stark beeinflusst ($KS-Z = 3.17$; $p < .05$). Die Bearbeitungszeit mit dem Telemanipulationssystem betrug das 13 fache im Vergleich zur Bearbeitung unter Wasser ($Mdn_{\text{wasser}} = 7.57 \text{ s}$; $Mdn_{\text{tele}} = 98.0 \text{ s}$).

Tabelle 4: Mediane und Stichprobenumfang der drei Szenarien über alle Aufgaben hinweg

		Standard- bedingung	Unterwassersze- nario	Telemanipulations- szenario
<i>Fingergeschicklichkeit</i> Schraubaufgabe	Median	8.6s	23.7s	271.0s
	n	24	24	24
<i>Handgeschicklichkeit</i> Schaltaufgabe	Median	5.4s	7.1s	188.0s
	n	24	24	24
<i>Zielen</i> Steckaufgabe	Median	3.8s	7.57s	98.0s
	n	24	24	24

Für den Vergleich der Standardbedingung mit den beiden Szenarien wurde die Stichprobe der Standardbedingung denen des Unterwasserexperiments und des Telemanipulationsszenarios mittels der Methode Matched Samples angepasst. Werden die Ergebnisse dieser beiden Szenarien nun der Standardbedingung ohne äußere Einflüsse (vgl. Kapitel 4.3.2) gegenübergestellt, zeigt sich, dass der Mensch im Hinblick auf seine feinmotorische Performanz sowohl durch das Telemanipulationssystem als auch durch die simulierten Bedingungen eines Außenbordeinsatzes beeinträchtigt wird (vgl. Tab. 4). Dabei sind alle drei *Feinmotorik*-Faktoren betroffen (vgl. Abb. 32). Die Performanz hinsichtlich der *Fingergeschicklichkeit* wird im Vergleich zu den anderen *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* am stärksten beeinflusst.

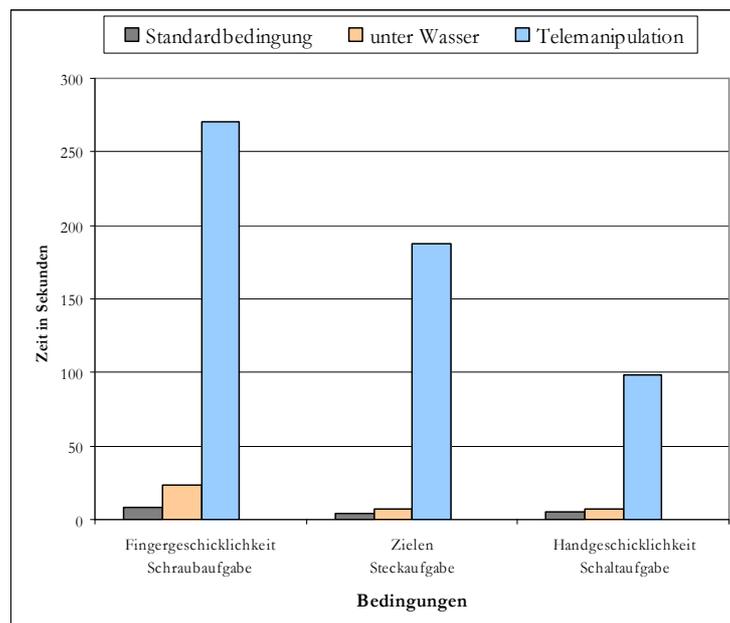


Abb. 32: Darstellung der Mediane der drei Szenarien über alle Aufgaben

4.3.4.3 Diskussion

In dieser Untersuchung wurde mittels eines Unterwasserszenarios ein Außenbordeinsatz simuliert. Dabei wurden von den Versuchspersonen definierte Montageaufgaben an einem validierten Prüfstand unter Wasser absolviert. Diese Montageaufgaben dienten zur Erfassung der jeweiligen feinmotorischen Leistung. Durch den Vergleich der beiden Bedingungen mit und ohne Handschuhe konnte erneut gezeigt werden, dass die Bewegungseinschränkung der Hände und die Reduktion der haptischen Rückmeldung einen negativen Einfluss auf die feinmotorische Leistung haben (vgl. Kapitel 4.3.2). Alle drei der relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* werden durch das Tragen der Handschuhe beeinträchtigt. Die Einschränkung der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* treten somit auch unter Bedingungen der simulierten *Mikrogravitation* auf. Des Weiteren konnte zusätzlich der direkte Einfluss der simulierten *Mikrogravitation* auf die feinmotorische Performanz erfasst werden. Es zeigte sich, dass auch dieser Einflussfaktor eine negative Auswirkung auf die feinmotorische Leistung des Menschen hat. Jedoch betrifft diese Beeinträchtigung lediglich die *Fingergeschicklichkeit* und das *Zielen* und somit nur zwei der drei für die Montageaufgaben relevanten *Feinmotorik*-Faktoren. Die *Handgeschicklichkeit* wird durch die simulierte *Mikrogravitation* nicht beeinflusst. Ob entsprechende Ergebnisse auch unter Bedingungen echter *Mikrogravitation* erzielt werden können, bleibt jedoch offen. Entsprechende Untersuchungen sollten in Zukunft angestrebt werden, um eine Generalisierung der Resultate zu ermöglichen.

Neben der Untersuchung der Auswirkung von Bewegungseinschränkung, reduzierter *taktiler Wahrnehmung* und simulierter *Mikrogravitation* wurde ein Vergleich eines Telemanipulationsszenarios und eines simulierten Außenbordeinsatzes im Hinblick auf die feinmotorische Leistung realisiert. Die Gegenüberstellung beider Szenarien zeigte, dass der Mensch bei der Arbeit mit dem verwendeten Telemanipulationssystem stärker in Bezug auf die drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* beeinträchtigt wird als bei einem simulierten Außenbordeinsatz unter Wasser. Im Vergleich zu einer Standardbedingung, in der der Mensch ohne äußere Einflüsse die entsprechenden Montageaufgaben bearbeiten durfte, sind jedoch beide Szenarien bezüglich der feinmotorischen Leistung niedriger einzuordnen. In der Standardbedingung erbrachten die Versuchspersonen die beste Performanz, d. h., hier wurden die kürzesten Bearbeitungszeiten gemessen. Generell konnte gezeigt werden, dass der *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* am stärksten durch die äußeren Einflüsse sowohl im Telemanipulationsszenario als auch unter Wasser beeinträchtigt wurde. Zusammenfassend heißt das, dass die definierten Montageaufgaben mit dem eingesetzten Telemanipulationssystem erfolgreich absolviert werden können, dass jedoch im Vergleich zur direkten Bearbeitung durch den Menschen sowohl unter Bedingun-

gen der simulierten *Mikrogravitation* als auch unter Bedingungen der Telemanipulation signifikant mehr Zeit veranschlagt werden muss.

Die jeweiligen Montageaufgaben, die die einzelne Performanz bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren erfassen, sind lediglich von kurzem Zeitumfang. Auch mit dem Telemanipulationssystem benötigt der Mensch somit durchschnittlich max. 300 Sekunden, um selbige zu absolvieren. Die hier getroffenen Aussagen können daher lediglich auf Bearbeitungen mit einem vergleichbaren Zeitumfang bezogen werden. Ob entsprechende Resultate für Aufgaben mit längerer Bearbeitungszeit z. B. im Stundenbereich erzielt werden können, sollte in zukünftigen Untersuchungen erfasst werden. Zusätzlich wurden lediglich drei *Feinmotorik*-Faktoren erfasst. Diese sind für die definierten Montageaufgaben relevant. Dennoch sind Montageaufgaben, bei denen zusätzliche *Feinmotorik*-Faktoren z. B. *Arm-Hand-Ruhe* (vgl. Kapitel 3.1) eine zentrale Rolle spielen, denkbar. Studien, die eben diese Faktoren berücksichtigen, sind daher erstrebenswert.

4.3.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse bezüglich der externen Einflussfaktoren

In den vorangegangenen Kapiteln 4.1 und 4.2 war das Ziel der Untersuchung, einen Prüfstand zu entwickeln, der zur Erfassung der feinmotorischen Leistung bei typischen Montageaufgaben im Bereich des On-orbit-Servicing geeignet ist und sowohl unter Wasser einsetzbar als auch robust genug für die Bearbeitung mit einem Telemanipulationssystem ist. Hierzu sollte eine Arbeitsoberfläche mit typischen Montageaufgaben dienen, um einem gewissen Maß an externer Validität gerecht zu werden. In einem ersten Schritt wurde überprüft, ob die Ausrichtung des Prüfstandes einen Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat. Dies konnte nicht bestätigt werden (vgl. Kapitel 4.1). Für die Performanz ist es unwesentlich, ob die Arbeitsfläche vertikal oder horizontal ausgerichtet ist. Es reichte daher, die in einem zweiten Schritt erfolgte Validierung des Prüfstandes in einer Ausrichtung durchzuführen (vgl. Kapitel 4.2). An einem bereits hinsichtlich der Gütekriterien anerkannten und standardisierten System, der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems, wurde der vertikale Prüfstand anhand definierter Aufgaben validiert. Durch die vier Aufgaben Schrauben, Stecken, Schalten und Kabellegen (vgl. Anhang A.2) können drei *Feinmotorik*-Faktoren erfasst werden (vgl. Kapitel 4.2). Die Facetten der *Feinmotorik* *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* können als für die Montagearbeit relevant bezeichnet werden und über das Messkriterium der Bearbeitungszeit erfasst werden.

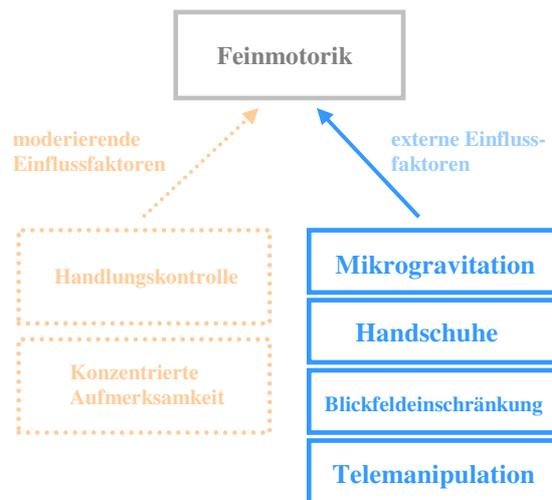


Abb. 33: Grafische Darstellung der betrachteten Einflussfaktoren auf die Feinmotorik mit Gewichtung auf die externen Faktoren

Der validierte Prüfstand wurde darauf folgend für die Untersuchung der externen Einflussfaktoren auf die drei *Feinmotorik*-Faktoren eingesetzt (vgl. Abb. 33). Schrittweise wurden einzelne Bedingungen, denen ein Astronaut bei einem Außenbordeinsatz (Extra-Vehicular Activity, EVA) ausgesetzt ist, experimentell untersucht. Dazu gehörten die *Destabilisierung* der Körperlage durch die *Mikrogravitation*, die Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* der Hände durch simulierte Raumfahrthandschuhe sowie die *Blickfeldeinschränkung* durch einen geeigneten Helm. Während die *Destabilisierung* der Körperlage (vgl. Kapitel 4.3.1) und die Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* einen beeinträchtigenden Einfluss auf die Performanz bezüglich aller drei *Feinmotorik*-Faktoren erzeugten (vgl. Kapitel 4.3.2), rief die *Blickfeldeinschränkung* hingegen keine negative Beeinflussung der *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und des *Zielens* hervor (vgl. Kapitel 4.3.2). Diese Ergebnisse zeigen, dass der Astronaut bei der Weltraummontage bereits durch einige, für sich genommene Einflussfaktoren in seiner Leistung eingeschränkt wird. Eine Untersuchung, ob eine Telemanipulation eine geeignete Alternative für entsprechende Aufgaben im Bereich des On-orbit-Servicing darstellt, zeichnete sich daher als sinnvoll ab. Zwar wird generell davon ausgegangen, dass Telemanipulationssysteme die Bearbeitungszeit bei manuellen Aufgaben verlängern (Adams, 2001), dennoch sind entsprechende Szenarien sicherer und auf lange Sicht kostengünstiger als bemannte Missionen (Reintsema, 2007). Dieselben definierten Aufgaben wurden daher in einer weiteren Untersuchung mit einem Telemanipulationssystem, das für die Weltraummontage ausgelegt ist, absolviert. Sowohl die Steuerung des Teleoperators von der Erde aus als auch die Steuerung aus direkter Umgebung ohne *Zeitverzögerung* erzeugt eine starke Einschränkung der feinmotorischen Leistung (vgl. Kapitel 4.3.3).

Für eine wirklichkeitsnahe Gegenüberstellung der Performanz mit einem Telemanipulationssystem und der des Astronauten während eines Außenbordeinsatzes sollten jedoch beide Szenarien möglichst realistisch simuliert werden. Ein Versuchsaufbau, der alle bisherigen Einflussfaktoren eines EVAs integriert und den Bedingungen eines Außenbordeinsatzes möglichst nahe kommt, konnte in einem Unterwasserszenario verwirklicht werden. Auch unter diesen Bedingungen wurde die Leistung im Hinblick auf alle drei *Feinmotorik*-Faktoren durch die Handschuhe reduziert (vgl. Kapitel 4.3.4.2.1). Die simulierte *Mikrogravitation* hatte ausschließlich auf die *Fingergeschicklichkeit* und das *Zielen* einen signifikant beeinträchtigenden Einfluss (vgl. Kapitel 4.3.4.2). Jedoch war die Bearbeitungszeit der definierten Aufgaben unter Wasser vergleichsweise geringer als in dem Telemanipulationsszenario (vgl. Kapitel 4.3.4). Wird eine direkte Rangordnung (Bortz, 2006) aufgestellt, so erzielt der Mensch ohne äußere Einflüsse unter Standardbedingungen die beste Leistung. Gefolgt wird diese Performanz von der des Menschen während eines simulierten Außenbordeinsatzes. Den stärksten einschränkenden Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat das Telemanipulationssystem. Dieses Resultat wird in Kapitel 5 diskutiert. Vorerst wird jedoch in Kapitel 4.4 der Einfluss der möglichen moderierenden Faktoren *konzentrierte Aufmerksamkeit* und *Handlungskontrolle* auf die feinmotorische Leistung untersucht.

4.4 Untersuchung der moderierenden Faktoren

Im vorangegangenen Kapitel konnte bestätigt werden, dass einige der externen Einflussfaktoren bei der Weltraummontage sowohl vor Ort im Rahmen eines Außenbordeinsatzes als auch bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem einen signifikanten Einfluss auf die feinmotorische Leistung des Menschen haben. Neben diesen externen Einflussfaktoren gibt es jedoch auch interne oder moderierende Faktoren. Sie beeinflussen die Leistung des Menschen nicht durch äußeres Einwirken aus der Umgebung, sondern durch den Zustand und die Fähigkeiten des Menschen selbst. Zu diesen Faktoren gehört neben der *Handlungskontrolle* (vgl. Kapitel 3.2.2) die *konzentrierte Aufmerksamkeit* (vgl. Kapitel 3.2.3). Ob diese Faktoren tatsächlich einen Einfluss auf die feinmotorische Leistung bei typischen Montagetätigkeiten haben, wird in diesem Kapitel näher betrachtet.

4.4.1 Der Einfluss der *konzentrierten Aufmerksamkeit* auf die feinmotorische Leistung

Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* ist zur Bewältigung vieler Aufgaben von Bedeutung. Es ist daher nahe liegend anzunehmen, dass sie auch im Bereich der *Feinmotorik* einen Einfluss auf die Leistung hat. In bisherigen Studien konnte zwar bereits ein Zusammenhang zwischen *Aufmerksamkeit* und der feinmotorischen Performanz festgestellt werden (Sacktor, 1999; Strenge, 2002), allerdings wurde in diesen Studien lediglich das Konstrukt *Aufmerksamkeit* und eine Facette der *Feinmotorik*, die *Fingergeschicklichkeit*, erfasst. Eine systematische Analyse der für die Montageaufgaben zusätzlich bedeutenden *Feinmotorik*-Faktoren *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* in Bezug auf die *konzentrierte Aufmerksamkeit* ist daher sinnvoll.

Die Untersuchung des möglichen Zusammenhanges zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der feinmotorischen Leistung wird in drei separate Studien unterteilt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der äußeren Bedingungen, unter denen die jeweiligen Probanden die entsprechenden Aufgaben zu absolvieren hatten. In der ersten Studie wurde die feinmotorische Performanz durch die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems und durch den validierten Prüfstand unter Standardbedingungen, d. h. ohne Einfluss von außen, erfasst. Durch die Verwendung beider Messinstrumente konnte überprüft werden, ob unterschiedliche Messverfahren zu demselben Ergebnis führen. Mit dieser Methode kann ein mögliches Artefakt, das durch das jeweilige Messinstrument provoziert wird, ausgeschlossen werden. In der zweiten Untersuchung wurde die feinmotorische Leistung der Versuchspersonen ebenfalls mithilfe des Prüfstandes erfasst, allerdings wurden die Probanden angehalten die jeweiligen Aufgaben mit einem Telemanipulationssystem (vgl. Kapitel 4.3.3) zu absolvieren. In der letzten Studie sind dieselben Aufgaben

unter Wasser zu bearbeiten. Durch die Variationen der äußeren Bedingungen soll ein möglicher Effekt eben dieser Veränderungen erfasst werden. Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die *konzentrierte Aufmerksamkeit* grundsätzlich für die Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben von Bedeutung ist und ob sie sowohl bei einem simulierten Außenbordeinsatz als auch bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem einen Einfluss auf die Performanz hat. Bei der Gestaltung zukünftiger Szenarien kann auf Grundlage dieser Informationen entschieden werden, ob der jeweiligen Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* des Bearbeiters explizit, z. B. in Form einer Vorauswahl, Beachtung geschenkt werden sollte. Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* wird durch den Aufmerksamkeitsbelastungstest d2 nach Brickenkamp (2002) erfasst (vgl. Kapitel 3.2.3.2).

4.4.1.1 Einfluss der *konzentrierten Aufmerksamkeit* unter Standardbedingungen

In dieser Studie steht die Erfassung der für die Montagetätigkeit relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* und die mögliche Beeinträchtigung dieser durch die unterschiedliche Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* im Vordergrund. Ob die *konzentrierte Aufmerksamkeit* tatsächlich einen moderierenden Faktor darstellt, kann durch die nachfolgende Studie erörtert werden. Bedeutend ist die Erkenntnis im Hinblick auf zukünftige Szenarien, in denen erfasst werden soll, ob die äußeren Bedingungen oder der Zustand der jeweiligen Person den entsprechenden Einfluss provoziert haben. Durch diese Erkenntnisse können nachfolgend entsprechend Gegenmaßnahmen oder Verbesserungen induziert werden.

4.4.1.1.1 Methode

4.4.1.1.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Untersuchung ist identisch mit der Versuchspersonengruppe der Validierungsstudie aus Kapitel 4.2.1.1. Aufgrund der Redundanz wird daher auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet.

4.4.1.1.1.2 Aufbau

Zur Erfassung der drei *Feinmotorik*-Faktoren wird zum einen die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems und zum anderen der validierte Prüfstand mit den entsprechend definierten Aufgaben verwendet. Der Aufmerksamkeitsbelastungstest d2 nach Brickenkamp (2002) diente zur Analyse der *konzentrierten Aufmerksamkeit*. Dieser Test ist durch seine kurze Durchführungsdauer und die hohe Objektivität eines der am häufigsten eingesetzten Messverfahren. Trotz der kurzen Bearbeitungszeit von lediglich vier Minuten lässt sich mit Hilfe der Ergebnisse des d2-Tests eine Aussage über die *konzentrierte Aufmerksamkeit* über eine Zeitspanne von einer halben Stunde (Simon, 2002) treffen. Dieses Verfahren ist demnach nicht nur zur Analyse des aktuellen Zustandes der *konzentrierten Aufmerksamkeit* geeignet, sondern besitzt zusätzlich eine prognostische

Aussagekraft. Dies ist von Bedeutung, da viele Tätigkeiten im Bereich der Weltraummontage eine längere Bearbeitungszeit aufweisen.

4.4.1.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde für alle Probanden identisch gestaltet. Nach der Bearbeitung des d2-Tests erfolgte die Absolvierung der drei Subtests an der Motorischen Leistungsserie. Dabei wurde die Reihenfolge permutiert. Im Anschluss wurden die Versuchspersonen angehalten, die vier Aufgaben Schrauben, Stecken, Schalten und Kabellegen am Prüfstand zu absolvieren. Auch in Bezug auf diese Testreihe wurde die Abfolge der einzelnen Aufgaben systematisch variiert, um Lern- und Positionseffekte ausschließen zu können.

4.4.1.1.2 Ergebnisse

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der feinmotorischen Leistung und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* untersuchen zu können, muss eine entsprechende Analyse der Daten erfolgen. Mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests wurde in einem ersten Schritt der Datensatz hinsichtlich der Verteilungsform überprüft. Die Analyse zeigt, dass die Daten keiner Normalverteilung entsprechen (vgl. Anhang A.8.1.1 sowie Anhang A.8.1.2) und folglich nonparametrische Verfahren zur Betrachtung herangezogen werden müssen. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Korrelationskoeffizient nach Spearman errechnet.

Tabelle 5: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der rechten Hand bezogen auf die drei Subtests der Motorischen Leistungsserie und die *konzentrierte Aufmerksamkeit*

		Kurze Stifte stecken <i>Fingergeschicklichkeit</i>	Lange Stifte stecken <i>Handgeschicklichkeit</i>	Aiming <i>Zielen</i>
<i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i> <i>Robwert</i>	r_s	-.095	-.144	-.277
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.559	.375	.084
	n	40	40	40

Die Ergebnisse der Berechnung bezüglich der Motorischen Leistungsserie zeigen, dass kein Zusammenhang zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der Leistung der rechten Hand bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit* ($r_s = -.095$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .559$), *Handgeschicklichkeit* ($r_s = -.144$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .375$) und *Zielen* ($r_s = -.277$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .084$) besteht.

Vergleichbare Ergebnisse zeigt die Analyse in Bezug auf die linke Hand. Wie in Tabelle 6 dargestellt, kann kein Zusammenhang zwischen der Leistung der linken Hand und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* festgestellt werden.

Tabelle 6: Korrelationstabelle für die Ergebnisse der linken Hand bezogen auf die drei Subtests der Motorischen Leistungsserie und die *konzentrierte Aufmerksamkeit*

		Kurze Stifte stecken <i>Fingergeschicklichkeit</i>	Lange Stifte stecken <i>Handgeschicklichkeit</i>	Aiming <i>Zielen</i>
<i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i> <i>Robwert</i>	r_s	-.129	-.144	-.311
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.428	.375	.051
	n	40	40	40

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und den definierten Aufgaben am Prüfstand zeigte entsprechende Resultate. Es konnten keine signifikanten Korrelationen aufgezeigt werden (vgl. Anhang A.8.1.3). Weder besteht ein Zusammenhang zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der Schraubaufgabe ($r_s = .031$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .872$), die den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* misst, noch zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und den Ergebnissen der Steckaufgabe ($r_s = -.126$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .508$), die wiederum die feinmotorische Facette *Zielen* erfasst. Die Schaltaufgabe ($r_s = .017$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .929$) und damit die *Handgeschicklichkeit* hängen ebenfalls nicht mit der Leistung hinsichtlich der *konzentrierten Aufmerksamkeit* zusammen. Durch die Analyse der Leistung bei der Kabelaufgabe, die ebenso den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* erfasst, konnte desgleichen kein Zusammenhang festgestellt werden ($r_s = -.299$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .108$). Die Motorische Leistungsserie und der validierte Prüfstand zeigen somit vergleichbare Ergebnisse. Es besteht insgesamt kein Zusammenhang zwischen den für die Montageaufgaben relevanten *Feinmotorik*-Faktoren und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*.

4.4.1.1.3 Diskussion

Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* als möglicher moderierender Faktor hat auf die feinmotorische Leistung bei typischen Montagetätigkeiten keinen Einfluss. Weder mit der Motorischen Leistungsserie noch mit dem validierte Prüfstand konnte ein Zusammenhang zwischen den Konstrukten festgestellt werden. Beide Messinstrumente erzielen somit ähnliche Resultate. Die Leistung hinsichtlich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* wird nicht durch das Ausmaß der *konzentrierten Aufmerksamkeit* des Menschen beeinflusst. Die Frage, ob sich dieses Verhältnis durch die gezielte Beeinflussung der äußeren Bedingungen verändert, ist nach wie vor offen. Sie soll in den nachfolgenden Studien erörtert werden.

4.4.1.2 Der Einfluss der *konzentrierten Aufmerksamkeit* unter Bedingungen der Telemanipulation

In dieser Studie wird überprüft, ob bei der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem die *konzentrierte Aufmerksamkeit* einen Einfluss auf die Performanz des Benutzers hat. Zwar konnte kein Zusammenhang zwischen der Leistung hinsichtlich der relevanten *Feinmotorik*-Faktoren und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* unter Standardbedingungen festgestellt werden, jedoch könnte durch den Einfluss der Arbeit mit einem Telemanipulationssystems selbiger induziert werden. Die im Vergleich zur natürlichen Umgebung durch das Telemanipulationssystem veränderte Arbeitsweise könnte eine erhöhte *konzentrierte Aufmerksamkeit* unabdingbar machen, um die entsprechenden Aufgaben bewältigen zu können. Menschen mit einer besseren Leistung hinsichtlich der *konzentrierten Aufmerksamkeit* würden demzufolge eine bessere Performanz in Bezug auf die Montageaufgaben aufweisen. Dieser Annahme wird im Folgenden nachgegangen.

4.4.1.2.1 Methode

4.4.1.2.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Untersuchung entspricht der Versuchspersonengruppe aus dem Telemanipulationsexperiment in Kapitel 4.3.3.1.1. Es wird daher auf eine nähere Beschreibung an dieser Stelle verzichtet.

4.4.1.2.1.2 Aufbau

Der Aufbau der Studie ist identisch mit dem des Telemanipulationsexperiments (vgl. Kapitel 4.3.3.1.2). Die Probanden hatten entsprechend die drei Montageaufgaben Schrauben, Stecken und Schalten am Prüfstand mithilfe des Roboters zu absolvieren. Die jeweilige Leistung wurde über die Bearbeitungszeit erfasst. Um möglichst realistische Szenarien zu gestalten, wurden die Aufgaben zum einem unter dem Einfluss einer *Zeitverzögerung* von 600 ms und zum anderen ohne Delay durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.3.1.2). Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* wurde erneut mit dem Aufmerksamkeitsbelastungstest d2 gemessen.

4.4.1.2.1.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf gestaltete sich für alle Probanden identisch. Vor der Übungsphase am Telemanipulationssystem absolvierten die Teilnehmer den Aufmerksamkeitsbelastungstest. Anschließend erfolgten eine kurze Pause und die Einweisung in die Bedienung des Roboters. Danach bearbeitete jede Versuchsperson die durch Permutation in der Reihenfolge variierenden Aufgaben, jeweils ohne *Zeitverzögerung* und mit *Zeitverzögerung*, am Prüfstand.

4.4.1.2.2 Ergebnisse

Der Frage, ob bei der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem die Performanz durch die jeweilige Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* des Benutzers beeinflusst wird, wurde mittels verschiedener statistischer Verfahren nachgegangen. In einem ersten Schritt wurde überprüft, ob die Verteilung der Daten einer Normalverteilung entspricht. Diese Voraussetzung parametrischer Verfahren wird von einigen Datensätzen verletzt (vgl. Anhang A.7.2.1), daher wurde ausschließlich auf nonparametrische Methoden zurückgegriffen. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Performanz während der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* zu erfassen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 7 aufgeführt. Für die Bedingung mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms konnte weder hinsichtlich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit* ($r_s = .167$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .435$) und *Handgeschicklichkeit* ($r_s = -.143$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .506$) noch in Bezug auf den Faktor *Zielen* ($r_s = -.260$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .220$) ein Zusammenhang mit der *konzentrierten Aufmerksamkeit* festgestellt werden.

Tabelle 7: Korrelationstabelle über alle Aufgaben mit und ohne *Zeitverzögerung* und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

		<i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i> Rohwert
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> 600 ms Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	.167 .435 24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> 600 ms Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	-.143 .506 24
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> 600 ms Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	-.260 .220 24
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> kein Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	-.001 .458 24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> kein Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	-.008 .972 24
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> kein Delay	r_s $p_{\text{zwei-seitig}}$ n	-.434(*) .034 24

(*)Die Korrelation ist auf dem 0.05-Niveau signifikant (zweiseitig).

In der Bedingung ohne *Zeitverzögerung* hingegen konnte ein negativer Zusammenhang zwischen der Bearbeitungszeit bei der Schaltaufgabe und damit in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* und die *konzentrierte Aufmerksamkeit* aufgezeigt werden ($r_s = -.434$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .034$). Dieses Resultat bedeutet, dass bei einer erhöhten *konzentrierten Aufmerksamkeit* die Bearbeitungs-

zeit der Montageaufgabe sinkt. Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* hat somit einen Einfluss auf die Performanz beim Betätigen von Schaltern mit dem Telemanipulationssystem. Kein Zusammenhang konnte hingegen zwischen den *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit* ($r_s = .001$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .218$) und *Zielen* ($r_s = -.008$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .972$) und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* aufgezeigt werden.

4.4.1.2.3 Diskussion

Sofern eine *Zeitverzögerung* von 600 ms induziert wird, hat die *konzentrierte Aufmerksamkeit* keinen Einfluss auf die feinmotorische Leistung bei der Arbeit mit dem verwendeten Telemanipulationssystem. Die drei untersuchten und für die Weltraummontage relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* wurden durch die unterschiedliche Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* der jeweiligen Probanden nicht beeinflusst. Dieses Resultat steht im Einklang mit den Ergebnissen der vergleichbaren Untersuchung unter Standardbedingungen (vgl. Kapitel 4.4.1.1).

Im Gegensatz dazu konnte allerdings ein Zusammenhang zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der feinmotorischen Leistung während der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem festgestellt werden, sofern keine *Zeitverzögerung* auftrat. Dies gilt jedoch nur in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit*. Hinsichtlich der Schaltaufgabe trat eine negative Korrelation auf. Dies bedeutet, dass eine hohe *konzentrierte Aufmerksamkeit* zu einer Reduktion der Bearbeitungszeit führt. Allerdings handelt es sich bei dem Zusammenhang lediglich um eine mittlere Korrelation. Ob mögliche andere Einflüsse (z. B. räumliches Vorstellungsvermögen oder Alertness²¹), die bei dieser Untersuchung nicht direkt erfasst und herauspartialisiert wurden, diesen Zusammenhang durch eine Interaktion erzeugt haben, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Dennoch darf angenommen werden, dass bei zukünftigen Montagetätigkeiten mit dem Telemanipulationssystem ohne *Zeitverzögerung*, bei denen ein erheblicher Anteil an *Handgeschicklichkeit* erforderlich ist, Benutzer mit einem hohen Maß an *konzentrierter Aufmerksamkeit* vermeintlich bessere Resultate erzielen als Menschen mit einer gering ausgeprägten *konzentrierten Aufmerksamkeit*. Dies sollte in zukünftigen Szenarien, die keine *Zeitverzögerung* aufweisen, Berücksichtigung finden.

²¹ Die Alertness umfasst die Wachsamkeit, Munterkeit und Aufgeschlossenheit der jeweiligen Person und ist unabhängig von der Leistungsdimension der Aufmerksamkeit (Häcker, 1998).

4.4.1.3 Der Einfluss der *konzentrierten Aufmerksamkeit* auf die feinmotorische Leistung unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes

Ziel dieser Untersuchung ist die Analyse, ob die *konzentrierte Aufmerksamkeit* einen Einfluss auf die feinmotorische Performanz bei einem simulierten Außenbordeinsatz unter Wasser hat. Eine vergleichbare Studie wurde bereits in Kapitel 4.4.1.1 und in Kapitel 4.4.1.2 beschrieben, jedoch bezogen sich diese Untersuchungen auf Standardbedingungen und die Arbeit mit einem Telemanipulationssystem und sind daher nicht direkt mit dem folgenden Experiment zu vergleichen. In den vorangehenden Untersuchungen konnte kein Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung hinsichtlich der drei Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* am validierten Prüfstand erfasst werden. Das Wasser und die somit simulierte *Mikrogravitation* stellen für den Menschen eine unnatürliche und schwierige Umgebung dar. Um die Montageaufgaben dennoch absolvieren zu können, ist unter Umständen ein erhöhtes Maß an *konzentrierter Aufmerksamkeit* vonnöten. Dieser Vermutung soll im Folgenden nachgegangen werden.

4.4.1.3.1 Methode

4.4.1.2.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Untersuchung ist identisch mit der Versuchspersonengruppe aus dem Unterwasserexperiment. An dieser Stelle wird daher auf eine nähere Beschreibung verzichtet und auf Kapitel 4.3.4.1.1 verwiesen.

4.4.1.3.1.2 Aufbau

Da die Erfassung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* in den Aufbau des Unterwasserexperiments (vgl. Kapitel 4.3.4.1.2) integriert war, sind selbige identisch. Die Versuchspersonen absolvierten die drei Montageaufgaben am validierten Prüfstand unter Wasser. Zum einen mit Handschuhen, und zum anderen bearbeiteten sie die Aufgaben ohne Handschuhe. Das Messkriterium war erneut die Bearbeitungszeit. Die *konzentrierte Aufmerksamkeit* wurde durch den Aufmerksamkeitsbelastungstest d2 erfasst.

4.4.1.3.1.3 Versuchsablauf

Der Ablauf des Versuches wurde standardisiert und lief daher für alle Probanden identisch ab. Vor der Übungsphase über Wasser wurde mit den Versuchsteilnehmern der d2-Test absolviert. Der Aufmerksamkeitsbelastungstest wurde in einem akustisch abgeriegelten Raum durchgeführt, um eventuelle Ablenkung von außen zu verhindern. Anschließend erfolgten eine kurze Pause und die Instruktion zur Bearbeitung der Montageaufgaben unter Wasser. Die entsprechenden Ergebnisse werden im Folgenden analysiert und dargestellt.

4.4.1.3.2 Ergebnisse

Zur Untersuchung der Annahme, dass eine unterschiedliche Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* eine unterschiedliche Leistung hinsichtlich der *Feinmotorik* unter Wasser nach sich zieht, wurden verschiedene statistische Verfahren herangezogen. In einem ersten Schritt wurde die Verteilungsform mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass einige der Datensätze nicht normalverteilt sind (vgl. Anhang A.7) und daher die Verwendung nonparametrischer Rechenmethoden nachfolgend notwendig ist. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Performanz während der Arbeit in einem simulierten Außenbordeinsatz und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* zu erfassen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman (r_s) berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 8 aufgeführt. Tragen die Versuchspersonen Handschuhe, konnte für keinen der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* ein signifikanter Zusammenhang mit der *konzentrierten Aufmerksamkeit* festgestellt werden. Für die Bedingung ohne Handschuhe konnte ebenfalls weder bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit* ($r_s = -.024$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .912$) und *Handgeschicklichkeit* ($r_s = .301$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .153$) noch im Hinblick auf den Faktor *Zielen* ($r_s = .377$; $p_{\text{zwei-seitig}} = .069$) ein Zusammenhang mit der *konzentrierten Aufmerksamkeit* bestimmt werden.

Tabelle 8: Korrelationstabelle über alle Aufgaben mit und ohne Handschuhe und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

		<i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i> Rohwert
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> mit Handschuhen	r_s	.153
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.475
	n	24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> mit Handschuhen	r_s	.006
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.977
	n	24
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> mit Handschuhen	r_s	.345
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.099
	n	24
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> ohne Handschuhe	r_s	-.024
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.912
	n	24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> ohne Handschuhe	r_s	.301
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.153
	n	24
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> ohne Handschuhe	r_s	.377
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.069
	n	24

Zusammenfassend bedeuten diese Resultate, dass die *konzentrierte Aufmerksamkeit* keinen direkten Einfluss auf die jeweilige feinmotorische Leistung am validierten Prüfstand unter Wasser hat.

4.4.1.3.3 Diskussion

Unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes hat die *konzentrierte Aufmerksamkeit* keinen Einfluss auf die feinmotorische Leistung. Dies bezieht sich auf alle drei erfassten *Feinmotorik*-Faktoren gleichermaßen. Ob die Probanden während der Datenerfassung unter Wasser Handschuhe trugen oder mit den freien Händen arbeiten durften, hatte auf diesen Tatbestand keinen Einfluss. Die drei untersuchten und für die Weltraummontage relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* wurden durch die unterschiedliche Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* der jeweiligen Probanden nicht beeinflusst. Dieses Resultat ist vergleichbar mit den Ergebnissen der analogen Untersuchungen unter Standardbedingungen (vgl. Kapitel 4.4.1.1) und während der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem mit *Zeitverzögerung* (vgl. Kapitel 4.4.2.1).

Die Korrelation zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der *Handgeschicklichkeit* im Telemanipulationsszenario ohne *Zeitverzögerung* sollte jedoch trotz oben genannter Resultate nicht ignoriert oder als statistischer Zufall interpretiert werden. Die nicht intuitive Bedienung des Telemanipulationssystems erfordert eine erhöhte *konzentrierte Aufmerksamkeit*. Folglich weisen Probanden mit höherer *konzentrierter Aufmerksamkeit* eine bessere Performanz bei der Bearbeitung der Schaltaufgabe auf. Dieser Vorteil der aufmerksameren Probanden ist unter extrem erschwerten Bedingungen durch die *Zeitverzögerung* womöglich nicht mehr erfassbar. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es grundsätzlich keinen Zusammenhang zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und der Performanz mit einem Telemanipulationssystem mit *Zeitverzögerung* gibt. Weiterführende Untersuchungen diesbezüglich sollten in Zukunft vorgenommen werden.

Des Weiteren ist anzumerken, dass die untersuchten Aufgaben einen geringen Zeitumfang aufwiesen. Ob die jeweilige Ausprägung der *konzentrierten Aufmerksamkeit* auf die feinmotorische Leistung bei einer zeitlich umfassenderen und weniger routinierten Aufgabenstellung auch unter Standardbedingungen und während eines simulierten Außenbordeinsatzes einen signifikanten Einfluss hat, kann im Rahmen dieser Untersuchungsreihe daher nicht beantwortet werden. Dieser Fragestellung sollten zukünftige Studien Rechnung tragen.

4.4.2 Der Einfluss der *Handlungskontrolle* auf die feinmotorische Leistung

Neben der *konzentrierten Aufmerksamkeit*, die im vorangegangenen Kapitel 4.4.1 als moderierender Faktor bezüglich feinmotorischer Leistung untersucht wurde, stellt das Konstrukt *Handlungskontrolle* (vgl. Kapitel 3.2.2) einen weiteren möglichen Einflussfaktor dar. Sie umfasst die Fähigkeit eine gefasste Absicht gegen konkurrierende Handlungstendenzen abzugrenzen, um das geplante Ziel zu erreichen. Dabei unterteilt sich die *Handlungskontrolle* in die beiden gegensätzlichen Dimensionen *Handlungsorientierung* und *Lageorientierung* (vgl. Kapitel 3.2.2). Aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien der Lage- und Handlungsorientierten (vgl. Kapitel 3.2.2.1), kommt es bei den lageorientierten Menschen zu einer längeren Bearbeitungszeit (Doll, 1992; Roth, 1993). Diese Bearbeitungsstrategien können sich sowohl auf komplexe Problemstellungen als auch auf Aufgaben mit niedrigerem Komplexitätsgrad beziehen. Die Akkuratheit der Handlungsorientierten hingegen ist niedriger als die der Lageorientierten (Kuhl, 1994). Allerdings betrachteten die bisherigen Studien die *Handlungskontrolle* lediglich im Rahmen der Bearbeitung von faktenbasierten, theoretischen und kognitiven Aufgaben (McCown, 1986; Aitken, 1982). Die feinmotorische Leistung konnte in den verwendeten Szenarien nicht erfasst werden. Eine Untersuchung, ob die unterschiedliche Ausprägung des Menschen hinsichtlich seiner *Handlungskontrolle* einen direkten Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat, soll daher im folgenden Kapitel untersucht werden. Dabei werden in einer Versuchsreihe drei verschiedene Szenarien realisiert. Zum einen wird der Einfluss der *Handlungskontrolle* auf die *Feinmotorik*-Faktoren unter Standardbedingungen und demnach ohne äußeren Einfluss untersucht. Des Weiteren wird der Einfluss unter Bedingungen eines Telemanipulationsszenarios und als Drittes während eines simulierten Außenbordeinsatzes unter Wasser analysiert. Durch diese unterschiedlichen Szenarien kann erfasst werden, ob die *Handlungskontrolle* grundsätzlich einen Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat oder diese nur unter spezifischen Bedingungen relevant wird.

4.4.2.1 Der Einfluss der *Handlungskontrolle* unter Standardbedingungen

In dieser Studie steht die Erfassung der für die Montagetätigkeit relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* und die mögliche Beeinträchtigung dieser durch die unterschiedliche Ausprägung der *Handlungskontrolle* im Vordergrund. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die *Handlungskontrolle* in drei unterschiedliche Ebenen aufteilt (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Handlungsorientiertes Verhalten unterscheidet sich demnach von lageorientiertem Verhalten auf den Stufen der Handlungsplanung, der Handlungsdurchführung und im Hinblick auf Misserfolgserlebnisse. Ob die *Handlungskontrolle* und damit die Unterscheidung der Menschen in lageorientierte und handlungsorientierte Personen tatsächlich einen moderierenden Faktor darstellt, kann durch die nachfolgende Studie erörtert werden. Relevant ist die entsprechende Er-

kenntnis in Bezug auf zukünftige Szenarien, in denen erfasst werden soll, ob die äußeren Bedingungen oder der Zustand der jeweiligen Person den entsprechenden Einfluss provoziert haben. Durch diese Erkenntnisse können nachfolgend entsprechend Gegenmaßnahmen oder Verbesserungen induziert werden. Realistisch wäre eine Maßnahme in Form einer Vorauswahl der Benutzer unter Berücksichtigung der jeweiligen *Handlungskontrolle*.

4.4.2.1.1 Methode

4.4.2.1.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Untersuchung ist identisch mit der Versuchspersonengruppe aus der Validierungsstudie aus Kapitel 4.2.1.1. Auf eine detaillierte Beschreibung wird aufgrund der Redundanz an dieser Stelle verzichtet und auf das entsprechende Kapitel verwiesen.

4.4.2.1.1.2 Aufbau

Zur Erfassung der drei *Feinmotorik*-Faktoren wurde zum einen die Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems und zum anderen der validierte Prüfstand mit den entsprechend definierten Aufgaben verwendet (vgl. Kapitel 4.1.1.2). Der Fragebogen HAKEMP 90 (Kuhl, o. J.) diente zur Analyse der *Handlungskontrolle* (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Dieser Papier-Bleistift-Test erfasst mit seinen drei Subskalen die entsprechenden Ausprägungen des Konstrukts. Die Bearbeitungsdauer umfasst lediglich zehn Minuten und kann ohne zusätzliche Instruktionen von der jeweiligen Versuchsperson eigenständig bearbeitet werden.

4.4.2.1.1.2 Versuchsablauf

Der Ablauf der Studie wurde für alle Probanden einheitlich gestaltet. Die Bearbeitung des HAKEMP 90 wurde in den Versuchsablauf des Validierungsexperimentes (vgl. Kapitel 4.2) integriert. Aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit wurde dadurch die Versuchsdauer unwesentlich verlängert und lag daher grundsätzlich im Rahmen der Zumutbarkeit. Im Anschluss an die Bearbeitung des Fragebogens erfolgte die Erfassung der feinmotorischen Leistung mittels der drei Subtests an der Motorischen Leistungsserie. Dabei wurde die Reihenfolge permutiert. Danach wurden die Versuchspersonen angehalten, die vier Aufgaben Schrauben, Stecken, Schalten und Kabellegen am Prüfstand zu absolvieren. Um Lern- und Positionseffekte ausschließen zu können, wurde auch in Bezug auf diese Testreihe die Abfolge der einzelnen Aufgaben systematisch variiert.

4.4.2.1.2 Ergebnisse

Durch die statistische Analyse der Datensätze konnte der Frage, ob die *Handlungskontrolle* einen moderierenden Faktor hinsichtlich der feinmotorischen Leistung darstellt, nachgegangen werden. Aufgrund der Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung (vgl. Anhang A. 3.3) für pa-

rametrische Verfahren wurden für die Auswertung ausschließlich verteilungsfreie Methoden eingesetzt. Das geeignete Verfahren zur Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen einer dichotomen (*Handlungskontrolle*) und einer metrischen Variable (Bearbeitungszeit der feinmotorischen Aufgaben) ist die punkt-biseriale Korrelation (vgl. Anhang A. 9). Diese wurde daher auf den Datensatz angewendet und zeigte für die Performanz an der Motorischen Leistungsserie die in Tabelle 9 dargestellten Ergebnisse auf.

Tabelle 9: Korrelationstabelle über alle Subtests der Motorischen Leistungsserie und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Kurze Stifte stecken <i>Finger- geschicklichkeit</i>	r_{pbis}	-.214	-.057	-.314(*)
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	< .05
	n	40	40	40
Lange Stifte stecken <i>Hand- geschicklichkeit</i>	r_{pbis}	-.030	-.032	-.450(*)
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	< .05
	n	40	40	40
Aiming <i>Zielen</i>	r_{pbis}	-.078	-.074	-.373(*)
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	< .05
	n	40	40	40

(*)Die Korrelation ist auf dem 0.05-Niveau signifikant (zweiseitig).

Zwischen der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsplanung und den *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* konnte keine signifikante Korrelation festgestellt werden (vgl. Tabelle 9). Ähnlich verhält es sich mit der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsdurchführung bzw. Handlungstätigkeit. Es konnten ebenfalls keine signifikanten Korrelationen aufgezeigt werden. Während der Handlungsplanung und der Handlungsdurchführung unterscheiden sich somit lage- nicht von handlungsorientierten Personen.

Hinsichtlich der *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg konnten im Gegensatz dazu signifikante Zusammenhänge festgestellt werden (vgl. Tabelle 9). Sowohl in Bezug auf die *Fingergeschicklichkeit* ($r_{pbis} = -.314$; $p < .05$) und die *Handgeschicklichkeit* ($r_{pbis} = -.450$; $p < .05$) als auch bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Zielen* ($r_{pbis} = -.373$; $p < .05$), handelt es sich um mittlere negative Korrelationen (Field, 2005). Die aufgeklärte Varianz (r^2) liegt jedoch lediglich zwischen ca. 10 % und 20 %. Demnach kann zwar angenommen werden, dass sich lageorientierte und handlungsorientierte Menschen in Bezug auf die drei *Feinmotorik*-Faktoren tendenziell unterscheiden, jedoch nur in einem geringen Ausmaß. Handlungsorientierte Personen weisen nach einem Misserfolg demnach eine rein tendenziell kürzere Bearbeitungszeit auf als lageorientierte Probanden.

Für die Analyse des Zusammenhangs zwischen der feinmotorischen Leistung am Prüfstand und der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* wurde ebenfalls die punkt-biseriale Korrelation herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 aufgeführt. Ähnlich wie bei der Motorischen Leistungsserie konnten drei signifikante Korrelationen festgestellt werden. Ein starker negativer Zusammenhang besteht zwischen der Leistung bei der Schraubaufgabe und damit in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* und der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsplanung ($r_{pbis} = -.520$; $p_{zwei-seitig} < .05$). Da der Anteil der aufgeklärten Varianz, berechnet durch den Determinationskoeffizient r^2 , lediglich 27 % beträgt und kein signifikanter Zusammenhang zwischen der *Fingergeschicklichkeit* der Motorischen Leistungsserie ($r_{pbis} = -.214$; $p_{zwei-seitig} > .05$) und der *Handlungskontrolle* festgestellt werden konnte, ist die beschriebene starke Korrelation mit Vorsicht zu interpretieren. Dennoch ist bei der Schraubaufgabe am Prüfstand ein tendenzieller Unterschied zwischen der feinmotorischen Leistung handlungsorientierter und lageorientierter Menschen zu vermerken.

Tabelle 10: Korrelationstabelle über die Aufgaben am Prüfstand und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Schraubaufgabe <i>Finger- geschicklichkeit</i>	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.520(*) < .05 40	-.044 > .05 40	-.970(*) < .05 40
Steckaufgabe <i>Zielen</i>	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.007 > .05 40	.013 > .05 40	-.700(*) < .05 40
Schaltaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i>	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.006 > .05 40	-.080 > .05 40	-.096 > .05 40
Kabelaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i>	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.043 > .05 40	-.213 > .05 40	-.018 > .05 40

(*)Die Korrelation ist auf dem 0.05-Niveau signifikant (zweiseitig).

Im Vergleich zur Motorischen Leistungsserie konnte zusätzlich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg und den *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit* ($r_{pbis} = -.970$; $p < .05$) und *Zielen* ($r_{pbis} = -.700$; $p < .05$) festgestellt werden. Dies spricht für die Annahme, dass sich handlungsorientierte von lageorientierten Probanden in ihrer feinmotorischen Performanz unterscheiden. Jedoch konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der *Handgeschicklichkeit* und der *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die Schaltaufgabe ($r_{pbis} = -.096$; $p > .05$) als auch für die Kabelaufgabe ($r_{pbis} = -.018$; $p > .05$). Da es sich im Vergleich dazu bei der Motorischen Leistungsserie zwar

um signifikante Korrelationen handelt (vgl. Tabelle 9), diese jedoch als schwach zu bezeichnen sind, muss erneut darauf hingewiesen werden, dass die entsprechenden Zusammenhänge mit Vorsicht zu interpretiert sind und nicht als grundsätzlicher Unterschied, sondern als Tendenz verstanden werden sollten.

4.4.2.1.3 Diskussion

Der Annahme, dass ein Zusammenhang zwischen der *Handlungskontrolle* auf den Ebenen der Handlungsplanung, Handlungsdurchführung und nach einem Misserfolg und der feinmotorischen Leistung unter Standardbedingung besteht, konnte in dieser Studie nachgegangen werden. Da signifikante Korrelationen erfasst wurden, könnte davon ausgegangen werden, dass ein Unterschied zwischen den handlungs- und den lageorientierten Menschen bei der Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben besteht. Dieses Ergebnis bezieht sich allerdings nur auf die *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg. Da die Ergebnisse bezüglich des *Feinmotorik*-Faktors *Handgeschicklichkeit* jedoch zwischen der Motorischen Leistungsserie und dem Prüfstand widersprüchlich sind, muss von einer generellen und auf die Gesamtbevölkerung bezogenen Aussage abgesehen werden. Erneute Experimente mit einem Versuchsdesign, das Misserfolge bewusst provoziert und somit diese Ebene der *Handlungskontrolle* explizit untersucht, könnten Aufschluss bieten. In Bezug auf die *Fingerschicklichkeit* und die *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsplanung kann aufgrund eines widersprüchlichen Ergebnisses zwischen Motorischer Leistungsserie und Prüfstand ebenfalls keine eindeutige Aussage getroffen werden. Eine Aufgabenstellung, die eine explizite und ausführliche Planung des Vorgehens von den jeweiligen Versuchspersonen verlangt, könnte in einer erneuten Studie untersucht werden. Für die übrigen Merkmalspaare konnten keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt werden. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die *Handlungskontrolle* unter Standardbedingungen keinen eindeutigen moderierenden Faktor bei typischen Montageaufgaben darstellt. Nach den bisherigen Erkenntnissen kann daher in zukünftigen Szenarien, in denen der Mensch Montagetätigkeiten, für die die drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* ohne Einflüsse von außen ausübt, die jeweilige Ausprägung der *Handlungskontrolle* nur unter Vorbehalt vernachlässigt werden. Dies gilt besonders in Fällen eines auftretenden Misserfolges. Da Bearbeitungsfehler bei ungeübten Personen eher zu erwarten sind, könnten die Beachtung und frühzeitige Erfassung der entsprechenden Ausprägung der *Handlungskontrolle* in Zukunft bei dieser Personengruppe von Vorteil sein.

4.4.2.2 Der Einfluss der *Handlungskontrolle* unter Bedingungen eines Telemanipulationsszenarios

In der vorangegangenen Studie wurde bereits untersucht, ob davon ausgegangen werden kann, dass sich handlungsorientierte von lageorientierten Menschen in ihrer Leistung bezüglich der drei *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* unterscheiden. In der

nachfolgenden Studie wird diese Annahme unter Bedingungen eines Telemanipulationsszenarios überprüft. Es wird vermutet, dass bei der ungewohnten und damit beanspruchenden Arbeit mit einem Telemanipulationssystem die *Handlungskontrolle* einen Einfluss auf die Performanz hat. Lageorientierte Menschen bleiben häufig auf vorhergehenden Analyseschritten einer Handlung stehen oder kehren zu vorherigen Gedankengängen zurück. Somit verfehlen sie unter Umständen die Vollendung einer Handlung und damit das gesetzte Ziel. Dieses als Perseveration bezeichnete Phänomen könnte dazu beitragen, dass lageorientierte Personen im Vergleich zu handlungsorientierten Menschen unter ungewohnten äußeren Bedingungen eine längere Bearbeitungszeit sowohl auf der Ebene der Planung, Durchführung als auch beim Umgang mit Misserfolgen aufweisen und damit eine geringere Leistung hinsichtlich der Arbeit mit Telemanipulationssystemen erreichen. Dieser Annahme soll im Folgenden nachgegangen werden.

4.4.2.2.1 Methode

4.4.2.2.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Untersuchung ist identisch mit der Versuchspersonengruppe des Telemanipulationsexperiments aus Kapitel 4.3.3. Von einer detaillierten Darstellung der Probandengruppe wird daher an dieser Stelle abgesehen.

4.4.2.2.1.2 Aufbau

Zur Erfassung der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* wurde erneut der HAKEMP 90 verwendet. Das eingesetzte Telemanipulationssystem, das für die Bearbeitung der definierten Montageaufgaben am Prüfstand Verwendung fand, ist identisch mit dem in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Aufbau. Der entsprechende Roboterarm kann durch den Master vom Menschen angesteuert werden, während dieser sowohl Kraftfeedback als auch visuelle Rückmeldungen durch das Head Mounted Display erhält.

4.4.2.2.1.3 Versuchsablauf

Die Bearbeitung des Fragebogens HAKEMP 90 wurde in den Versuchsablauf des Telemanipulationsexperiments integriert. Bevor die Versuchspersonen in die Bedienung des Roboters und damit in die Umsetzung der Montageaufgaben eingewiesen wurden, bearbeiteten sie die 36 Items zur Analyse der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle*. Die definierten Montageaufgaben wurden, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, einmal unter Bedingung der *Zeitverzögerung* und einmal ohne *Zeitverzögerung* absolviert.

4.4.2.2.2 Ergebnisse

Zur Auswertung des Datensatzes wurde, aufgrund der nicht normalverteilten Daten (vgl. Anhang 8.2.1) und der Zusammensetzung der Variablen die punkt-biseriale Korrelation verwendet. Die Ergebnisse der Analyse für die Bedingung ohne *Zeitverzögerung* sind in Tabelle 11 abgebildet.

Tabelle 11: Korrelationstabelle über die Leistung im Telemanipulationsszenario ohne *Zeitverzögerung* und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

Telemanipulation ohne Delay		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Schraubaufgabe <i>Finger- geschicklichkeit</i> kein Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.524(*) < .05 24	-.088 > .05 24	-.179 > .05 24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> kein Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.022 > .05 24	-.055 > .05 24	-.278 > .05 24
Schaltaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i> kein Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.047 > .05 24	-.275 > .05 24	-.195 > .05 24

(*)Die Korrelation ist auf dem 0.05-Niveau signifikant (zweiseitig).

In Bezug auf die *Handlungskontrolle* auf Ebene der Planung konnte ein signifikanter Zusammenhang mit der Leistung bei der Schraubaufgabe ($r_{pbis} = -.524$; $p_{zwei-seitig} < .05$) festgestellt werden. Es handelt sich hierbei um eine starke negative Korrelation, die eine aufgeklärte Varianz von 27 % beinhaltet. Mit den Feinmotorik-Faktoren *Handgeschicklichkeit* und *Ziele* kann bezüglich dieser Ebene der *Handlungskontrolle* kein signifikanter Zusammenhang aufgezeigt werden. Hinsichtlich der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsdurchführung und der Handlung nach einem Misserfolg konnten bezüglich der drei *Feinmotorik*-Faktoren ebenfalls keine signifikanten Korrelationen festgestellt werden (vgl. Tabelle 11).

In der Bedingung mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms wurden ähnliche Ergebnisse analysiert (vgl. Tabelle 12). Keine der untersuchten Korrelationen ist signifikant. Selbst zwischen dem *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* und der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsplanung konnte im Gegensatz zur Bedingung ohne *Zeitverzögerung* kein signifikanter Zusammenhang erfasst werden.

Tabelle 12: Korrelationstabelle über die Leistung im Telemanipulationsszenario mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

Telemanipulation mit Delay		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Schraubaufgabe <i>Finger- geschicklichkeit</i> 600 ms Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.240 > .05 24	-.066 > .05 24	-.025 > .05 24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> 600 ms Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.103 > .05 24	-.049 > .05 24	-.210 > .05 24
Schaltaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i> 600 ms Delay	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.055 > .05 24	-.034 > .05 24	-.003 > .05 24

4.4.2.2.3 Diskussion

In dieser Studie wurde der Frage nachgegangen, ob die *Handlungskontrolle* in einem Telemanipulationsszenario Einfluss auf die Performanz hat. Zwar konnte eine signifikante Korrelation zwischen der *Handlungskontrolle* auf Ebene der Handlungsplanung und der feinmotorischen Leistung bei der Schraubaufgabe festgestellt werden, allerdings nur bei der Bedingung ohne *Zeitverzögerung*. Bei der Bedingung mit einer *Zeitverzögerung* von 600 ms konnte dieser Zusammenhang nicht bestätigt werden. Zusätzlich beträgt die aufgeklärte Varianz lediglich 27 %. Der Unterschied in der Performanz in Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Handgeschicklichkeit* kann daher nicht allein durch den Faktor *Handlungskontrolle* erklärt werden. Aus diesem Grund wird der Zusammenhang nur als leichte Tendenz interpretiert. Daraus lässt sich schließen, dass auch in einer ungewohnten und dadurch belastenden Umgebung, wie sie in einem Telemanipulationsszenario gegeben ist, nicht grundsätzlich von einem Unterschied zwischen lage- und handlungsorientierten Menschen hinsichtlich ihrer Performanz ausgegangen werden kann. Die *Handlungskontrolle* stellt in diesem Zusammenhang keinen eindeutig moderierenden Faktor dar. Zusätzliche Untersuchungen, in denen die Versuchspersonen auf der Ebene der Handlungsplanung stärker gefordert und Misserfolge durch systematische induzierte Fehler provoziert werden, könnten zu einer Überprüfung der Aussage beitragen.

4.4.2.3 Der Einfluss der *Handlungskontrolle* auf die feinmotorische Performanz unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes

Sowohl unter Standardbedingungen als auch unter Bedingungen eines Telemanipulationsszenarios konnte kein einheitlicher und eindeutiger Nachweis dafür gefunden werden, dass sich handlungsorientierte von lageorientierten Menschen grundsätzlich in ihrer Leistung unterscheiden. Ob

dieser Tatbestand ebenfalls für eine Erfassung der feinmotorischen Leistung unter Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes gilt, wird in der nachfolgenden Studie untersucht. Dabei wird angenommen, dass eine der beiden Ausprägungen der *Handlungskontrolle* in der unnatürlichen Umgebung unter Wasser von Vorteil ist. Aufgrund des Phänomens der Perseveration ist eine vergleichsweise mindere feinmotorische Leistung bei den Montageaufgaben der lageorientierten Personen naheliegend. Dieser Annahme soll im Folgenden nachgegangen werden.

4.4.2.3.1 Methode

4.4.2.3.1.1 Stichprobe

Die Stichprobe dieser Studie ist identisch mit der Probandengruppe des Unterwasserexperiments. Eine detaillierte Darstellung der Personengruppe ist in Kapitel 3.3.4 gegeben. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle von weiterführenden Beschreibungen abgesehen.

4.4.2.3.1.2 Aufbau

Wie in den beiden vorhandenen Studien wurde erneut der HAKEMP 90 zur Erfassung der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* herangezogen. Der Aufbau zur Untersuchung der feinmotorischen Leistung unter der Bedingung eines simulierten Außenbordeinsatzes entspricht dem aus Kapitel 4.3.4. Die drei Montageaufgaben am validierten Prüfstand wurden von den Versuchspersonen unter Wasser zum einen mit und zum anderen ohne Handschuhe absolviert. Die Datensätze beider Bedingungen werden zur Untersuchung der Fragestellung herangezogen.

4.4.2.3.1.3 Versuchsablauf

In den Ablauf des Unterwasserexperiments wurde der HAKEMP 90 integriert. Aufgrund seiner geringeren Bearbeitungsdauer und hohen Akzeptanz konnte diese Integration ohne Gefährdung der Zumutbarkeit des Experiments erfolgen. Bevor die Versuchspersonen in die Bearbeitung der Montageaufgabe und den Prüfstand unter Wasser eingewiesen wurden, wurde ihnen der Fragebogen zur Analyse der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* vorgelegt.

4.4.2.3.2 Ergebnisse

Aufgrund der rechtsschiefen Verteilung und der damit verletzten Voraussetzung einer Normalverteilung für parametrische Verfahren (vgl. Anhang A.7), wurde für die Analyse der Daten eine nonparametrische Methode verwendet. Das Verfahren der punkt-biserialen Korrelation (vgl. Anhang A.9) ist für die hier vorliegende Variablenzusammensetzung (metrisch und dichotom) angebracht. Die Ergebnisse der Analyse für die Bedingung ohne Handschuhe sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Korrelationstabelle über die Leistung im Unterwasserszenario ohne Handschuhe und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

Unterwasserszenario ohne Handschuhe		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Schraubaufgabe <i>Finger- geschicklichkeit</i> ohne Handschuhe	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.046 > .05 24	-.133 > .05 24	.021 > .05 24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> ohne Handschuhe	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.034 > .05 24	.025 > .05 24	-.052 > .05 24
Schaltaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i> ohne Handschuhe	r_{pbis} $p_{zwei-seitig}$ n	-.005 > .05 24	.082 > .05 24	.058 > .05 24

Weder in Bezug auf die *Handlungskontrolle* auf Ebene der Planung und der Tätigkeit noch bezüglich der *Handlungskontrolle* auf Ebene eines eingetretenen Misserfolges konnte ein signifikanter Zusammenhang mit der feinmotorischen Performanz festgestellt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass kein nennenswerter Zusammenhang zwischen der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* und der feinmotorischen Leistung ohne Handschuhe unter Wasser besteht. Lageorientierte Menschen unterscheiden sich in dieser Untersuchung somit nicht von handlungsorientierten Personen.

Im Hinblick auf die Bedingung, in der die Versuchsteilnehmer während der Bearbeitung der Montageaufgaben unter Wasser Handschuhe trugen, konnten für die *Handlungskontrolle* auf den Ebenen der Planung und der Tätigkeit erneut keine signifikanten Korrelationen analysiert werden. Für die *Handlungskontrolle* auf der Ebene des Misserfolges konnte jedoch eine vergleichsweise hohe Korrelation erfasst werden. In Bezug auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingergeschicklichkeit* ergibt sich ein negativer Korrelationskoeffizient von $r_s = -.513$ bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Handlungsorientierte Personen benötigen somit für die Schraubaufgabe vergleichsweise weniger Bearbeitungszeit als lageorientierte Menschen. Dennoch ist zu beachten, dass die aufgeklärte Varianz von 26 % als eher gering einzuschätzen ist.

Tabelle 14: Korrelationstabelle über die Leistung im Unterwasserszenario mit Handschuhen und die drei Ebenen der *Handlungskontrolle*

Unterwasserszenario mit Handschuhen		<i>Handlungskontrolle</i> Planung	<i>Handlungskontrolle</i> Tätigkeit	<i>Handlungskontrolle</i> Misserfolg
Schraubaufgabe <i>Finger- geschicklichkeit</i> mit Handschuhen	r_{pbis}	-.237	.037	-.513(*)
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	< .05
	n	24	24	24
Steckaufgabe <i>Zielen</i> mit Handschuhen	r_{pbis}	-.324	.053	-.019
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	> .05
	n	24	24	24
Schaltaufgabe <i>Hand- geschicklichkeit</i> mit Handschuhen	r_{pbis}	-.212	-.032	.024
	$p_{zwei-seitig}$	> .05	> .05	> .05
	n	24	24	24

(*)Die Korrelation ist auf dem 0.05-Niveau signifikant (zweiseitig).

4.4.2.3.3 Diskussion

In dieser Studie wurde der Frage nachgegangen, ob die *Handlungskontrolle* in einem Unterwasserszenario zur Simulation eines Außenbordeinsatzes Einfluss auf die feinmotorische Performanz hat. Es wurde zwar eine signifikante Korrelation zwischen der feinmotorischen Leistung bei der Schraubaufgabe und der *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg festgestellt, jedoch ausschließlich in der Bedingung mit Handschuhen. Das Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis der Standardbedingungen, jedoch nicht mit denen des Telemanipulationsszenarios und der Unterwasserbedingung ohne Handschuhe. Von einer generellen Aussage bezüglich des moderierenden Einflusses der *Handlungskontrolle* muss daher an dieser Stelle abgesehen werden. Handschuhe erschweren die Bearbeitung von feinmotorischen Aufgaben. Eventuell treten unter diesen Umständen generell eher Fehler auf, die zu einem Misserfolgserlebnis führen, als bei der Arbeit ohne Handschuhe und tragen somit zu einer Differenzierung zwischen lage- und handlungsorientierten Personen bei. Aus diesem Grund könnte es von Vorteil sein, Aufgaben zu entwickeln, die gezielt Fehler provozieren und genügend Misserfolge hervorrufen, um entsprechend einen möglichen Zusammenhang zwischen der *Handlungskontrolle* auf Ebene eines eingetretenen Misserfolges und der feinmotorischen Leistung systematisch zu erfassen. Eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse ist zu diesem Zeitpunkt jedoch als eher schwierig einzustufen. Personen, die nach einem Misserfolg handlungsorientiert sind, benötigen mit Handschuhen bei der Schraubaufgabe vergleichsweise weniger Bearbeitungszeit als lageorientierte Menschen, jedoch bleiben die beiden weiteren *Feinmotorik*-Faktoren unbeeinträchtigt. Von einem generellen Zusammenhang dieser beiden Konstrukte, feinmotorische Leistung auf der einen und *Handlungskontrolle* auf der anderen Seite, und einem grundsätzlichen Einfluss der unterschiedlichen Ausprägung der *Handlungskontrolle*

le sollte daher aufgrund der nach wie uneinheitlichen Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsszenarien nicht gesprochen werden.

4.4.3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse bezüglich der moderierenden Faktoren

Dass die Bedingung von simulierten Außenbordeinsätzen, Telemanipulationssystemen und den entsprechenden externen Einflussfaktoren eine Reduktion der feinmotorischen Performanz hervorrufen kann, konnte bereits in Kapitel 4.2. gezeigt werden. Die Untersuchung, ob die *konzentrierte Aufmerksamkeit* und die *Handlungskontrolle* bezüglich der feinmotorischen Leistung moderierende Faktoren darstellen, war Gegenstand des hier zusammengefassten Kapitels (vgl. Abb. 34). Für die *konzentrierte Aufmerksamkeit* ergab sich ein nahezu einheitliches Bild. Die jeweilige Leistung hinsichtlich dieses Konstrukts stand in keinem Zusammenhang mit der feinmotorischen Leistung weder unter Standardbedingungen (vgl. Kapitel 4.4.1.1) noch unter den Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes (vgl. Kapitel 4.4.1.3). Lediglich beim Telemanipulationsszenario konnte ein mittlerer signifikanter Zusammenhang zwischen der *konzentrierten Aufmerksamkeit* und einem der drei *Feinmotorik*-Faktoren, der *Handgeschicklichkeit*, festgestellt werden (vgl. Kapitel 4.4.1.2). Menschen mit einer hohen *konzentrierten Aufmerksamkeit* benötigen für Aufgaben mit einem hohen Anteil an *Handgeschicklichkeit* mit dem verwendeten Telemanipulationssystem vergleichsweise weniger Zeit als Personen mit einer schwach ausgeprägten *konzentrierten Aufmerksamkeit*.

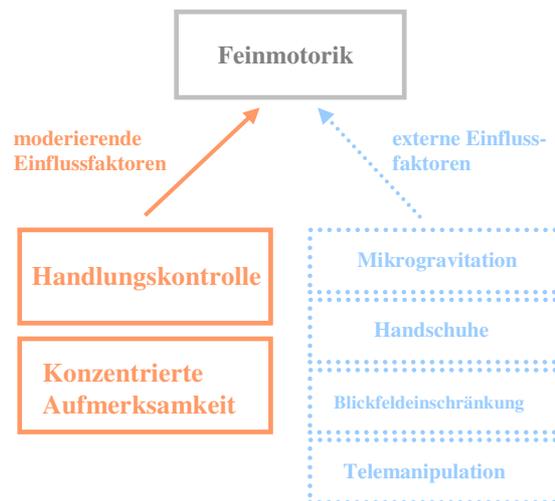


Abb. 34: Grafische Darstellung der betrachteten Einflussfaktoren auf die Feinmotorik mit Fokussierung auf die moderierenden Faktoren

Bezüglich der *Handlungskontrolle* muss zwischen den drei Ebenen der Planung, der Handlungsdurchführung und des Misserfolgs unterschieden werden. Jede Ebene wurde für sich hinsichtlich eines möglichen Zusammenhangs mit einem der drei *Feinmotorik*-Faktoren untersucht. Die jewei-

ligen Analysen bezogen sich auf die Erfassung der feinmotorischen Leistung unter der Standardbedingung ohne äußere Einflüsse, unter der Bedingung des Telemanipulationsszenarios und eines simulierten Außenbordeinsatzes. Unter Standardbedingungen traten lediglich auf der Ebene der Planung und des Misserfolges Korrelationen mit der feinmotorischen Leistung auf (vgl. Kapitel 4.4.2.1). Dieses Ergebnis wurde mit dem validierten Prüfstand erfasst. Dieselbe Untersuchung wurde zur Kontrolle mit der Motorischen Leistungsserie durchgeführt. Das Resultat konnte nicht ohne Einschränkung bestätigt werden. Bei dieser zusätzlichen Analyse trat keine signifikante Korrelation zwischen der Ausprägung der *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg und der *Handgeschicklichkeit* auf. Da die erfassten Zusammenhänge nicht bei beiden Analysen gleichermaßen auftraten, muss von einer Generalisierung des Ergebnisses abgesehen werden. Daher kann lediglich von einer Tendenz, jedoch nicht von einem grundsätzlich Unterschied zwischen Lage- und Handlungsorientierten gesprochen werden.

Unter der Bedingung des Telemanipulationsszenarios ohne *Zeitverzögerung* hat die Ausprägung der *Handlungskontrolle* lediglich auf der Ebene der Planung auf die *Fingergeschicklichkeit* einen Einfluss (vgl. Kapitel 4.4.2.2). Lageorientierte Personen weisen demnach hier eine höhere Bearbeitungszeit auf. Da es sich jedoch lediglich um einen *Feinmotorik*-Faktor und eine Ebene der *Handlungskontrolle* handelt, kann gesagt werden, dass die Bearbeitungszeit der feinmotorischen Aufgaben verhältnismäßig gering durch die unterschiedliche Ausprägung der *Handlungskontrolle* beeinflusst wird. Arbeitet der hinsichtlich der Planung handlungsorientierte Mensch zudem mit dem Telemanipulationssystem und ist dabei der *Zeitverzögerung* ausgesetzt, so benötigt dieser für Aufgaben mit einem hohen Anteil an *feinmotorischer Leistung* genauso viel Zeit wie der Lageorientierte. Dasselbe gilt für die Ebene des Misserfolgs und der Tätigkeit. Die Ausprägung der *Handlungskontrolle* hat zusammenfassend gesagt einen kaum merklichen Einfluss auf die feinmotorische Leistung während der Arbeit mit einem Telemanipulationssystem.

Während der Absolvierung der definierten Aufgaben unter Wasser unterscheiden sich die bezüglich der Planung lageorientierten Versuchspersonen von den handlungsorientierten Menschen bei keinem der drei *Feinmotorik*-Faktoren. Es sei denn, die Personen werden der Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* durch die Handschuhe ausgesetzt. Unter dieser Bedingung ist ein Unterschied zwischen den handlungs- und den lageorientierten Personen statistisch feststellbar. Dieser Unterschied bezieht sich jedoch ausschließlich auf den *Feinmotorik*-Faktor *Fingerschicklichkeit* und die *Handlungskontrolle* nach einem Misserfolg. Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass sich je nach Umgebungsbedingung ein unterschiedliches Bild des Einflusses der *Handlungskontrolle* abzeichnet. Eine grundsätzliche Aussage bezüglich der Rolle der Handlungs-

kontrolle als moderierender Faktor kann daher nicht formuliert werden. Weiterführend wird aus diesem Grund davon abgesehen, Vorauswahlen der Benutzer unter Berücksichtigung der jeweiligen Ausprägungen der *Handlungskontrolle* als grundsätzliche und realistische Verbesserungsmaßnahme entsprechender Montageszenarien zu empfehlen.

5 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung

Die in Kapitel 4.3.5 und Kapitel 4.4.3 zusammengefassten Ergebnisse werden im Folgenden kurz diskutiert und hinsichtlich denkbarer Artefakte kritisch betrachtet. Dabei stehen mögliche Erklärungen für die analysierten Resultate im Vordergrund.

Bei der Weltraummontage ist die jeweilige feinmotorische Leistung von Bedeutung. Jeder Fehler kann zu einer Gefährdung der Besatzung und zu Materialschäden führen. Zum Schutz vor den widrigen Bedingungen im außerterrestrischen Raum trägt der Astronaut eine entsprechende Ausrüstung in Form eines EVA-Raumanzuges. Neben der *Mikrogravitation* und der dadurch entstehenden Destabilisierung der Körperlage (vgl. Kapitel 4.3.1) reduziert dieser Anzug jedoch die feinmotorische Performanz der Astronauten. Wie im Rahmen der vorliegenden Versuchsreihe unter anderem gezeigt werden konnte, erzeugen simulierte Astronautenhandschuhe eine Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* der Hände, die in einer Verringerung der feinmotorischen Leistung resultiert (vgl. Kapitel 4.3.2). Die feinmotorische Performanz umfasst in diesem Zusammenhang die für typische Montageaufgaben relevanten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen*. Diese konnten mittels definierter Aufgaben an einem validierten Prüfstand über das Messkriterium der Bearbeitungszeit erfasst werden (vgl. Kapitel 4.2). Eine *Blickfeldeinschränkung*, vergleichbar mit einer durch einen Astronautenhelm induzierten Einschränkung, verursacht keine Reduktion der Leistung bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren (vgl. Kapitel 4.3.2). Dies bedeutet nicht, dass *Blickfeldeinschränkung* grundsätzlich keinen Einfluss auf die feinmotorische Leistung hat. Lediglich die hier induzierte *Blickfeldeinschränkung* hat keine Reduktion der Leistung bei den Aufgaben des eingesetzten Prüfstandes zur Folge. Eine mögliche Erklärung ist die Tatsache, dass trotz der Reduktion des Blickfeldes alle benötigten Gegenstände des Prüfstandes während der gesamten Bearbeitung uneingeschränkt sichtbar waren.

Neben diesen externen Einflussfaktoren erweisen sich die Außenbordeinsätze zusätzlich nach wie vor als äußerst kosten- und zeitintensiv und stellen für den ausführenden Astronauten ein nicht zu unterschätzendes Risiko dar. Aus diesem Grund wird stets nach effizienten Alternativen für die Außenbordeinsätze gesucht. Eine Möglichkeit, im Bereich des On-orbit-Servicing den Astronauten während seiner Montagetätigkeiten zu unterstützen oder zu ersetzen, bieten die Telemanipulationssysteme. Da diese Systeme ihrerseits Faktoren aufweisen, die einen negativen Einfluss auf die feinmotorische Performanz haben (vgl. Kapitel 4.3.4.2), wurde eine Gegenüberstellung beider Szenarien realisiert (vgl. Kapitel 4.3.4.2.1). Als Vergleichskriterium diente erneut die Leistung bezüglich der *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen*.

Die Resultate zeigten, dass der Mensch während der Arbeit mit dem verwendeten Telemanipulationssystem eine stärkere Beeinträchtigung in seiner Performanz aufweist als während des simulierten Außenbordeinsatzes unter Wasser. Dieser Unterschied bezieht sich auf alle drei *Feinmotorik*-Faktoren. Wird eine Rangordnung aufgestellt, so erzielt der Mensch unter Standardbedingungen ohne äußere Einflüsse die beste feinmotorische Leistung (vgl. Kapitel 4.3.4.2.1). Unter den Bedingungen eines simulierten Außenbordeinsatzes nimmt die Qualität der Performanz bereits deutlich ab. Während der Arbeit mit dem Telemanipulationssystem erhöht sich die Bearbeitungszeit der Montageaufgaben noch einmal deutlich. Die Leistung bezüglich aller drei *Feinmotorik*-Facetten ist in diesem Szenario somit am geringsten. Allgemein wurde der Faktor der *Fingerschicklichkeit* durch die Bedingung beider Szenarien vergleichsweise am stärksten beeinträchtigt. Sowohl die *Handgeschicklichkeit* als auch das *Zielen* werden weniger stark durch die äußeren Bedingungen beeinflusst. Aus dieser Rangordnung könnte geschlossen werden, dass das Telemanipulationssystem keine geeignete Alternative oder Unterstützung für die Astronauten darstellt. Zu beachten ist allerdings, dass die Montageaufgaben grundsätzlich mit dem Telemanipulationssystem absolviert werden konnten. Im Vergleich zu einer direkten Bearbeitung durch einen Menschen muss lediglich eine längere Bearbeitungszeit für die einzelnen Aufgaben eingeplant werden.

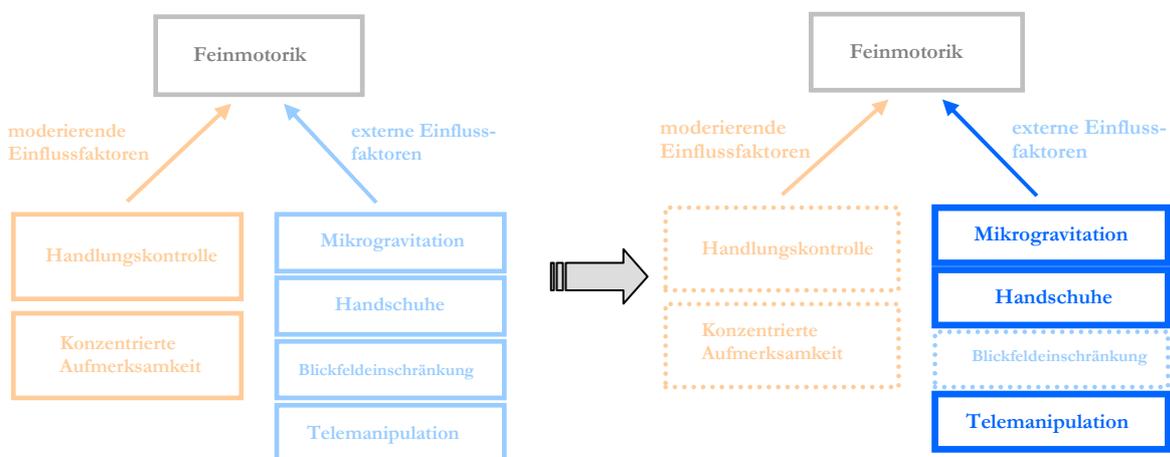


Abb. 35: Grafische Darstellung der möglichen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik (links) und die grafische Darstellung der durch die Versuchsreihe identifizierten tatsächlichen Einflussfaktoren auf die Feinmotorik (rechts).

Ein möglicher Kritikpunkt hinsichtlich der Untersuchung des Einflusses von reduzierter *Beweglichkeit* und *taktiler Wahrnehmung* auf die feinmotorische Performanz könnten die verwendeten Handschuhe darstellen. Es handelte sich bei diesen Handschuhen nicht um tatsächliche Raumfahrthandschuhe, jedoch konnte bereits Chodack (1991) zeigen, dass entsprechende Arbeitshandschuhe eine geeignete Simulation der Beeinflussung der Hand durch Raumfahrthandschuhe ermöglichen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die erfassten Ergebnisse eine als realis-

tisch zu bezeichnende Beeinträchtigung der feinmotorischen Leistung abbilden. Die Handschuhe sind daher als expliziter externer Einflussfaktor zu bezeichnen (vgl. Abb. 35).

Ein weiterer möglicher Ansatzpunkt für eine kritische Betrachtung der Versuchsreihe ist die Simulation der *Mikrogravitation*. Grundsätzlich kann bei Simulationen eine mangelnde Übereinstimmung mit der Realität negativ angemerkt werden. Die Methode eines Unterwasserszenarios zur Abbildung eines Außenbordeinsatzes ist allerdings die bewährteste erdgebundene Simulationsmethode. Zwar kann der Zustand der *Mikrogravitation* ebenfalls durch einen Parabelflug erzielt werden, jedoch sind die Zeitfenster von ca. 24 sec., in denen die *Mikrogravitation* erreicht wird, zu kurz für die hier vorgestellte Versuchsreihe (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Zusätzlich stellen Parabelflüge eine hohe Belastung für den menschlichen Organismus dar (vgl. Kapitel 4.3.1.2). Die entstehenden Stresshormone könnten die Ergebnisse bezüglich der feinmotorischen Leistung verzerren. Aus diesem Grund ist ein Unterwasserszenario im Rahmen dieser Arbeit als die am besten geeignete Simulation der *Mikrogravitation* zu bezeichnen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Versuchsreihe sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass ausschließlich drei Faktoren der *Feinmotorik* berücksichtigt wurden. Diese Faktoren sind bei der Bearbeitung typischer Montageaufgaben relevant, jedoch könnten bei speziellen Reparaturaufgaben andere Facetten der *Feinmotorik* ebenfalls eine Rolle spielen. Es wäre möglich, dass das Telemanipulationssystem bezüglich des Faktors Arm-Hand-Ruhe (vgl. Kapitel 3.1) dem Astronauten überlegen ist. Sofern sich das zu bearbeitende Objekt und der Teleoperator in einer stabilen Position befinden, kann dieser nach der Bewegung in einer geforderten Trajektorie die Endposition exakt halten, bis eine Veränderung vom Operator initiiert wird. Der Mensch hingegen muss viel Muskelkraft und ein hohes Maß an Konzentration aufbringen, um eine entsprechend exakte Position über einen längeren Zeitraum halten zu können. Für die Untersuchung entsprechend spezieller Aufgaben könnte der validierte Prüfstand jedoch erweitert werden.

Des Weiteren weisen die Aufgaben am Prüfstand an sich eine kurze Bearbeitungszeit im Minutenbereich auf. Tatsächliche Außenbordeinsätze umfassen jedoch häufig mehrere Stunden, wengleich nicht die gesamte Zeit ausschließlich für die zu bewältigen Montageaufgaben genutzt werden kann. Dennoch könnte eine Gegenüberstellung von Telemanipulationssystem und Astronaut bei einer länger andauernden Aufgabe den Leistungsabstand zwischen beiden Szenarien verändern. Gerade im Bereich der Telemanipulation wäre ein Szenario mit sich je nach Länge des Unterfangens abwechselnden Bedienern in Form von Schichtarbeit denkbar.

In Bezug auf die moderierenden Faktoren wie die *konzentrierte Aufmerksamkeit* außer bei der Schaltaufgabe beim Telemanipulationsszenario mit Delay keinen Zusammenhang mit der feinmotorischen Leistung auf (vgl. Kapitel 4.4.1). Daraus lässt sich ableiten, dass dieses Konstrukt kaum Einfluss auf die feinmotorische Performanz hat. Dennoch sollten bei Montageaufgaben mit hohem Anteil an feinmotorischen Komponenten genügend Ruhepausen eingeplant werden, um einer Überlastung und einer damit verbundenen verringerten Konzentrationsleistung entgegenzuwirken. Die *Handlungskontrolle* wies lediglich in dem Unterwasserszenario mit Handschuhen einen Zusammenhang mit der feinmotorischen Performanz auf, wobei die handlungsorientierten Personen eine signifikant kürzere Bearbeitungszeit aufwiesen. In den übrigen Szenarien unter Standardbedingungen am Wiener Testsystem oder unter Bedingungen des Telemanipulationsszenarios ist der Einfluss der Ausprägung der Handlungskontrolle nicht nennenswert. Diese Aussage kann jedoch ausschließlich in Bezug auf die drei erfassten *Feinmotorik*-Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* bei einer vorgegeben, zeitlich begrenzten Aufgabe getätigt werden. Bei kurzen und geübten Montageaufgaben mit einer sehr geringen Fehlerzahl seitens der bearbeitenden Person kann somit ein Einfluss der *Handlungskontrolle* ausgeschlossen werden. Bei diesem Telemanipulationsszenario kann daher auf eine Vorselektion der Benutzer aufgrund der konzentrierten Aufmerksamkeit oder der jeweiligen Ausprägung der *Handlungskontrolle* verzichtet werden.

5.1 Auswirkung auf die Praxis

Bei der Bewertung und der Entscheidung bezüglich bemannter oder unbemannter Missionen spielen neben der *Feinmotorik* weitere Parameter eine wichtige Rolle. Einige dieser Parameter werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert. Anhand eines konkreten Beispiels werden die entsprechenden Punkte einer praxisnahen Betrachtung unterzogen.

Das in dieser Arbeit untersuchte Bewertungskriterium für die unterschiedlichen Szenarien des On-orbit-Servicing bestand aus verschiedenen Faktoren der *Feinmotorik*. Diese feinmotorischen Parameter stellen jedoch nicht das einzige Auswahlkriterium bei einer Entscheidung für oder gegen eine Telerobotikmission dar. Neben der prinzipiellen Durchführbarkeit entsprechender Aufgaben tragen weitere Aspekte zu einer Entscheidungsfindung bei. Diese beziehen sich sowohl auf betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte (z. B. Kosten) als auch auf technische Aspekte (z. B. Reichweite). Einige dieser Parameter sind in Tabelle 15 aufgeführt. Einzelne Aspekte werden im Folgenden herausgegriffen und näher erläutert.

Tabelle 15: Auflistung wesentlicher Bewertungsaspekte für Raumfahrtmissionen

Zeitsparend
Kosten sparend
Geringe Nutzlast
Zeitliche Flexibilität bei der Durchführung einer Montage
Risikoabschätzung der Mission
Sicherheit für den Ausführenden
Ferndiagnose möglich
Zusammenarbeit mit Astronauten
Geringe Kollisionsgefahr mit der Umgebung
Improvisationsmöglichkeit bei Störungen
Reichweite
Feedback und Intuitivität während der Manipulation
u.v.a.

Ein wichtiger Faktor bei Raumfahrtmissionen ist die zu veranschlagende Zeit, um auf Störungen zu reagieren oder um wissenschaftliche Experimente durchführen zu können. Dabei bezieht sich dieser Aspekt nicht nur auf die tatsächliche Durchführung einer Mission vom Start bis zur Landung, sondern auch auf die entsprechend notwendige Vor- und Nachbereitung. Ist ein Roboter bereits fertig entwickelt und kann wiederholt in verschiedenen Telerobotikmissionen eingesetzt werden, ist dies ein zeitsparender Faktor. Muss die gesamte Technik jedoch neu entwickelt werden, kann dieser Prozess mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Die Auswahl und die Ausbildung von Astronauten beansprucht jedoch eine ebenso lange Zeitspanne.

Die betriebswirtschaftlichen Kosten spielen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Wie bei allen komplexen Projekten werden Kosten-Nutzen-Rechnungen durchgeführt, um ein möglichst effizientes Finanzierungsprogramm gestalten zu können. In der Raumfahrt verhält sich diese Tatsache nicht anders. Die Kosten sollen verhältnismäßig gering gehalten werden, während der Nutzen der jeweiligen Mission möglichst ausgeschöpft werden sollte. Prinzipiell kann jedoch nicht gesagt werden, dass unbemannte Missionen kostengünstiger sind als bemannte Missionen. Die Missionen weisen unterschiedliche Ausmaße hinsichtlich Länge und Ausrüstung auf und sind somit nur schwer einem direkten Vergleich zu unterziehen.

Die Nutzlast ist zusätzlich ein Faktor, der unter anderem auch in die Kosten-Nutzen-Analyse miteinbezogen wird. So kann eine Mission durchaus höhere Kosten aufwerfen, diese jedoch durch eine höhere Nutzlast und eine damit verbundene umfangreichere Ausrüstung und benötigte Ersatzteile ausgleichen. Einen weiteren Aspekt für die Bewertung von Missionen und eine mögliche Abwägung zwischen bemannter und unbemannter Raumfahrt stellt nach wie vor die Sicherheit dar. Jede bemannte Raumfahrtmission birgt ein Risiko für die gesamte Besatzung. Die Sicherheit für die Astronauten bzw. die Verletzungsgefahr der Menschen bei entsprechenden Einsätzen konnte durch laufend modernisierte Sicherheitsmaßnahmen zwar verringert, aber nicht vollkommen beseitigt werden. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Start- und Aufstiegsphase. Bei Telerobotikmissionen bestünde die Möglichkeit, auf ein derartiges Risiko zu verzichten. Der Mensch könnte von der Erde aus arbeiten und die Aufgaben mittels des Telerobotiksystems absolvieren. Eine tatsächliche Risikoabschätzung für entsprechende Telerobotikmissionen liegt jedoch bisher nicht vor.

Sowohl im erdnahen und mittleren Orbit als auch im geostationären Orbit befindet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Satelliten (Montenbruck, 2005), die in ihrer Lebenszeit und damit in der Dauer ihrer Funktionalität begrenzt sind. Vergleichbar mit anderen technischen Systemen können bei Satelliten ebenfalls Defekte und Ausfälle auftreten (Hoffmann, 2009). Derartige Probleme können den Satelliten selbst, andere Raumflugsysteme oder sogar den Menschen auf der Erde und auf bemannten Raumstationen gefährden. Ein nicht unwesentlicher Bestandteil des existierenden Weltraumschrotts resultiert aus entsprechenden ausgedienten Satelliten (Thoma, 2003). Durch Wartungsmissionen könnte die Lebensdauer der Satelliten verlängert und die stetig steigende Anzahl von Weltraumschrottpartikeln zumindest diesbezüglich eingedämmt werden.

Im erdnahen Orbit (Low Earth Orbit, LEO) wäre eine Wartung von Satelliten sowohl durch Astronauten als auch Robotik-Missionen denkbar. Jedoch sind nicht alle Umlaufbahnen für den Menschen direkt, z. B. mittels des Space Shuttles erreichbar. Die maximale Bahnhöhe, die der Space Shuttle erreichen kann, liegt bei 800 km (Walter, 1997). Umlaufbahnen über die Pole oder höhere Umlaufbahnen, z. B. im geostationären Orbit, sind mit dem Space Shuttle und damit für Astronauten nicht zu erreichen. Gerade in diesen Umlaufbahnen befinden sich jedoch viele Satelliten, die sowohl für Erdbeobachtungen als auch Navigation eingesetzt werden und bei Ausfällen und Manövrierunfähigkeit entsprechend gewartet werden sollten. Diese Wartungen könnten von Telerobotikmissionen übernommen werden. Zwar wurden bisher keine Telerobotiksysteme für Satellitenwartungsmissionen eingesetzt, jedoch ist die Technik auf einem einsetzbaren Stand (Tatsch, 2006). Tabelle 16 zeigt eine mögliche Bewertung der oben aufgeführten Aspekte bezo-

gen auf bemannte und Telerobotikmissionen während einer entsprechenden Satellitenwartung. Dabei muss in Betracht gezogen werden, dass es bisher keine standardisierten Wartungsmissionen gibt, die eine umfassende und allgemeingültige Bewertung und damit eine grundsätzliche Beantwortung der Frage nach einer bemannten oder unbemannten Mission erlauben.

Tabelle 16: Gegenüberstellung und Bewertung der bemannten und Telerobotikmission im Bereich der Satellitenwartung

	Bemannte Mission	Telerobotik-Mission
Zeitsparend	-	+ (bei vorhandener Technik)
Kosten sparend	-	+ (bei vorhandener Technik)
Geringe Nutzlast	-	+
Zeitliche Flexibilität bei der Durchführung einer Montage	- -	+
Risikoabschätzung der Mission	+ +	-
Sicherheit für den Ausführenden	- -	+ +
Ferndiagnose möglich	+ +	+ +
Zusammenarbeit mit Astronauten	+ +	-
Geringe Kollisionsgefahr mit der Umgebung	+	-
Improvisationsmöglichkeit bei Störungen	-	-
Reichweite	-	-
Feedback und Intuitivität während der Manipulation	+	-
u.v.a.		

+ + = hoch; + = etwas; - = gering; - - = sehr gering

Treten Komplikationen auf der ISS auf, sind speziell ausgebildete Astronauten vor Ort, die durch Außenbordeinsätze gezielte Reparaturen vornehmen können. Natürlich sind entsprechende Einsätze mit einem hohen Risiko für den jeweiligen Menschen und mit einer erheblichen physischen und psychischen Belastung verbunden. Eine Unterstützung für die Astronauten könnten Mensch-Roboter-Kooperationen z. B. auch in Form von Telemanipulationssystemen darstellen. Jedoch darf die mögliche Verletzungsgefahr der Astronauten bei der Zusammenarbeit mit Robotik-Systemen nicht vollkommen außer Acht gelassen werden. Sogenannte Robonauten (Diftler, 2003) oder der Flight Telerobotik Servicer (Sheridan, 1993) mit entsprechend funktionalen Roboterarmen ausgestattete Telemanipulationssysteme könnten bei Wartungsmissionen von Satelliten eingesetzt werden. Jedoch ist bisher die Leistung des Menschen selbst unter vergleichbar widrigen Umgebungsbedingungen wie im Orbit technisch nicht vollständig zu erreichen. Im Rahmen dieses Kapitels konnten lediglich einzelne Aspekte aufgegriffen werden. Diese Faktoren könnten zu der Entscheidung, ob eine Telerobotikmission, eine bemannte Mission oder möglicherweise

eine Kombination aus beidem sinnvoll wäre, beitragen. Gleichzeitig darf nicht vergessen werden, dass diese Frage immer wieder aufs Neue gestellt und je nach Mission neu entschieden werden sollte.

6 Ausblick

Die feinmotorische Leistung in Form der drei Faktoren *Fingergeschicklichkeit*, *Handgeschicklichkeit* und *Zielen* wird durch die externen Einflussfaktoren des Telemanipulationsszenarios und des simulierten Außenbordeinsatzes unter Wasser unterschiedlich stark beeinträchtigt. Die Bedingungen des Telemanipulationsszenarios verursachten eine vergleichsweise starke Reduktion der Performanz. Zu beachten ist, dass die erfolgte Versuchsreihe unter Laborbedingungen durchgeführt wurde. Ziel bei entsprechenden Laborexperimenten ist die möglichst vollständige Kontrolle aller unabhängigen Variablen unter Ausschluss aller Störeinflüsse, die die Ergebnisse verzerren könnten. Gleichzeitig wird einigen Laboruntersuchungen eine mangelnde Entsprechung der Realität zugeschrieben. Möglich wäre daher, dass durch eine erneute Untersuchung unter Bedingungen tatsächlicher *Mikrogravitation* im Weltraum zusätzliche Erkenntnisse bezüglich der Fragestellung erzielt werden könnten. Jedoch ist dabei anzuzweifeln, ob die in dieser Arbeit erzielte Sicherheit für die Probanden gewährleistet werden könnte.

Sollte in Zukunft eine hohe Standardisierung in Montage- und Reparaturszenarien erreicht werden, wäre eine strukturierte Erweiterung des Prüfstandes denkbar. Eine mögliche Methode böte dabei eine gezielte Arbeitsanalyse für typische Tätigkeiten im Bereich des On-orbit-Servicing z. B. in der Form des Methods-Time-Measurement-Systems (MTM-System). Dieses System erlaubt eine systematische Erfassung der Bearbeitungszeit (Kuhlang, 2008) durch die exakte Analyse der absolvierten Bewegungen. Die nötigen Bewegungen werden erfasst und hinsichtlich ihrer Effizienz analysiert und kategorisiert. Daraus resultierend wird der optimale Bearbeitungsablauf detektiert. Dies könnte einen gezielten Einsatz von Telemanipulationssystemen erleichtern, da diese passend für die jeweils nötigen Tätigkeiten gestaltet werden könnten. Für ein solches Vorhaben ist eine generelle Standardisierung der Bauteile, Materialien und Szenarien erforderlich. Diese ist zum aktuellen Zeitpunkt im notwendigen Umfang nicht gegeben.

Reparaturen und Wartungsarbeiten durch Telemanipulationssysteme könnten nicht nur Astronauten unterstützen, sondern auch die Lebensdauer z. B. der Satelliten steigern und gleichzeitig die stetig steigende Zahl der außer Betrieb genommenen, frei schwebenden Objekte reduzieren. Frei schwebende, als Weltraumschrott bezeichnete Gegenstände stellen immer wieder eine Gefahr für Raumfahrtmissionen dar. Wenn bekannt ist, für welche Aufgaben das Telemanipulationssystem eingesetzt werden soll, ist außerdem eine Erhöhung des Grades an intuitiver Gestaltung der entsprechenden Schnittstelle möglich. Dadurch könnten nicht nur Experten, sondern besonders Novizen profitieren und ohne langwieriges Training eingesetzt werden. Denkbar ist in

diesem Zusammenhang die Implementierung von Schichtarbeit. Ist ein Reparaturvorgang besonders zeitintensiv, kann der menschliche Operator durch einen zweiten abgelöst werden. Da in der vorliegenden Arbeit die feinmotorische Performanz und nicht die Vigilanz der einzelnen Versuchspersonen im Vordergrund stand, hatte die Fragestellung nach möglicher Schichtarbeit keine Relevanz. Zukünftige Untersuchungen könnten entsprechenden Fragestellungen nachgehen.

Prinzipiell könnte der erfasste Leistungsunterschied zwischen der Bearbeitung der Montageaufgaben mit dem Telemanipulationssystem und während des Unterwasserszenarios durch eine Umgestaltung des Robotiksystems verringert werden. Die in Kapitel 1 aufgeführten Gestaltungsvorschläge sollten hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit überprüft und die jeweiligen Veränderungen in ihrer Auswirkung auf die Aufgabenleistung evaluiert werden. Allerdings sind die entsprechenden technischen Erweiterungen zum aktuellen Zeitpunkt nicht realisierbar, ohne die Raumfahrttauglichkeit des Telemanipulationssystems grundsätzlich aufzuheben. Weiterhin ist eine Unterstützung der Astronauten durch Veränderung ihrer Ausrüstung z. B. in Form von motorisierten Handschuhen (Sorenesen, 1997) und Exoskeletons (Schiels, 1997), die die *Beweglichkeit* erhöhen und die benötigte Muskelkraft reduzieren, denkbar. Die technische Entwicklung ist auch in diesem Hinblick abzuwarten, um eine Gefährdung des Menschen durch unausgereifte Systeme und Weiterentwicklungen zu verhindern. Daher sollten innovative Techniken bezüglich der Verbesserung feinmotorischer Leistung bei der Weltraummontage zwar in Betracht gezogen, aber auch entsprechend systematisch analysiert werden.

Literaturverzeichnis

- Abel, W. (1940). *Erbbiologie und Erbpathologie körperlicher Zustände und Funktionen*. Band III. Berlin: Verlag von Julius Springer
- Abramov, I.P.; Skoog, A.I. (2003). *Russian Spacesuits*. London, Berlin, Heidelberg, New York, Hong Kong, Milan, Paris, Tokyo: Springer-Verlag
- Abeysekera, J. (1992). *Personal protective clothing and devices in the cold environment*. Preliminary study report, Technical Report COLDTECH 92-7, Lulea University of Technology
- Adams, R.J.; Klowden, D.; Hannaford, B. (2001). *Virtual training for manual assembly tasks*. *Haptics-e*, 2(2). http://www.haptics-e.org/Vol_02/ [31.03.2009]
- Adolfson, J.A.; Berghage, T.E. (1974). *Perception and performance under water*. New York: Wiley ; Shilling, C.W.; Werts, M.F.; Schandelmeier, N.R. (1976). *The underwater handbook: A guide to physiology and performance for the engineer*. New York: Wiley
- Aitken, M. (1982). *A personality profile of the college student procrastinator*. Dissertation, University of Pittsburgh
- Albu-Schäffer, A.; Bertleff, W.; Rebele, B.; Schäfer, B.; Landzettel, K; Hirzinger, G. (2006). *ROKVISS – Robotics Component Verification on ISS Current Experimental Results on Parameter Identification*. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3879-3885
- Amir, A.R.; Newman, D.J. (2000). *Research into the effects of astronaut motion on the spacecraft: A Review*. *Acta Astronautica*, 47(12), 859-869
- Andary, J.F.; Spidaliere, P.D. (1993). *The development test flight of the flight telerobotic servicer: Design description and lessons learned*. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), 664-674
- Anderson, J.R. (1996). *Kognitive Psychologie* (2. Aufl.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- Atkinson, J.R.; Birch, D. (1970). *The dynamics of action*. New York: Wiley
- Augurelle, A.S.; Penta, M.; White, O.; Thonnard, J.L. (2003). *The effects of a change in gravity on the dynamics of prehension*. *Experimental Brain Research*, 148, 533-540
- Baddeley, A.D. (1966). *Influence of depth on the manual dexterity of free divers: A comparison between open sea and pressure chamber testing*. *Journal of Applied Psychology*, 50(1), 81-85
- Baedke, D. (1980). *Handgeschicklichkeit im Kindesalter*. Dissertation, Marburg/ Lahn
- Ball, K.K.; Beard, B.L.; Roenker, D.L.; Miller, R.L.; Griggs, D.S. (1988). *Age and visual search: expanding the useful field of view*. *Journal of Optic Society of America*, 5, 2210-2219
- Bandini, S.; Manzoni, S.; Nunnari, F.; Simone; C. (2003). *Supporting the sense of presence in control environments*. *Cognition, Technology & Work*, 6(1), 49-52

- Barnsley, R.H.; Rabinovitch, M.S. (1970). Handedness: Proficiency versus stated preference. *Perceptual and Motor Skills*, 30, 343-362
- Beckmann, J. (1994). Volitional correlates of action versus state orientation. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.). *Volition and personality: action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Bellingar, T.A.; Slocum, A.C. (1993). Effect of protective gloves on hand movement: an exploratory study. *Applied Ergonomics*, 24(4), 244-250
- Benke, T.; Koerenko, O.; Watson, N.; Gerstenbrand, F. (1993). Space and cognition: The measurement of behavioral functions during a 6-day space mission. *Aviation, Space and Environment Medicine*, 64, 376-379
- Bensel, C.K. (1980). A human factors evaluation of two types of rubber CB protective gloves. Technical Report NATICK/TR-80/005, US Army Natick Research and Development Command
- Bensel, C.K. (1993). The effects of various thicknesses of chemical protective gloves on manual dexterity. *Ergonomics*, 36(6), 687-697
- Berger, M.; Mescheriakov, S.; Molokanov, E. Lechner-Steinleitner S.; Seguer N.; Kozlovskaya I. (1997). Pointing arm movements in short- and long-term spaceflights. *Aviation, Space, and Environment Medicine*, 68, 781-787
- Berger, M.; Mescheriakov, S.; Molokanova, E. (1997). Pointing arm movements in short- and long-term spaceflights. *Aviation, Space, and Environment Medicine*, 68, 781-787
- Berger, M.A.M.; Krul, A.J.; Daanen, H.A.M. (2009). Task specificity of finger dexterity tests. *Applied Ergonomics*, 40, 145-147
- Bernstein, N. A. (1967). *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press
- Beswick, G.; Mann, L. (1994). State orientation and procrastination. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.) *Volition and personality: Action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Bicchi, A.; Kumar, V. (2000). Robotic grasping and contact: a review. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '00*, 1, 348 – 353
- Bleuler, E. (1983). *Lehrbuch der Psychiatrie*. Berlin: Springer Verlag
- Blomquist, C.G.; Nixon, J.V.; Johnson, R.L.; Mitchell, J.H. (1980). Early cardiovascular adaptation to zero gravity simulated by head-down tilt. *Acta Astronautica*, 7, 543-553
- Blunt, A.; Pynchyl, T.A. (1998). Volitional action and inaction in the lives of undergraduate students: state orientation, procrastination and proneness to boredom. *Personality and Individual Differences*, 24(6), 837-846
- Bock, O.; Howard, I.P.; Money, K.E.; Arnold, K.E. (1992). Accuracy of aimed arm movements in changed gravity. *Aviat Space Environ Med*, 63, 994-998

- Bock, O. (1993). Localization of objects in the peripheral visual field. *Behavioral Brain Research*, 56, 77-84
- Bock, O.; Fowler, B.; Comfort, D. (2001). Human sensorimotor coordination during spaceflight: An analysis of pointing and tracking responses during the "neurolab" space shuttle mission. *Aviation, Space, and Environment Medicine*, 72(10), 877-883
- Bonde-Peterson, F.; Suzuki, Y.; Sadamoto, T.; Staehr-Johansen, T. (1981). Cardiovascular reaction to tilt and lower body positive pressure. *ESA Special Publications SP-1033*, 27-29
- Bornstein, R.A. (1986). Normative data on intermanual differences on three tests of motor performance. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 8, 12-20
- Borst, Ch.; Fischer, M.; Hirzinger, G. (2002). Calculation hand configurations for precision and pinch grasps. *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1553-1559
- Borst, Ch.; Fischer, M.; Haidacher, S.; Liu, H.; Hirzinger, G. (2003). DLR hand II: experiments and experience with an anthropomorphic hand. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '03*, 1, 702 - 707
- Bortz, J. (1989). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer
- Bortz, J.; Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag
- Boyce, P.R. (2003). *Human Factors in Lighting*. 2. Auflage, London: Taylor & Francis
- Bradley, J.V. (1969). Effect of gloves on control operation time. *Human Factors*, 11, 13-20
- Braun, C.M.; Archambault, M.A.; Daigneault, S.; Larocque, C. (2000). Right body side performance decrement in congenitally dyslexic children and left body side performance decrement in congenitally hyperactive children. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 13, 89-100
- Brickenkamp, R. (2002). *Test d2: Aufmerksamkeits-Belastungs-Test*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, Oxford, Prag: Hogrefe Verlag
- Brink, E.E.; Mackel, R. (1987). Sensorimotor performance of the hand during peripheral nerve regeneration. *Journal of Neurological Science*, 77, 249-266
- Broadbent, D.E. (1958). *Perception and Communication*. New York: Oxford University Press
- Buchholz, B.; Armstrong, T.J. (1992). A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities. *Journal of Biomechanics*, 25 (2), 149-162
- Butterworth, J.; Davidson, A.; Hench, S.; Olano, M.T. (1992). 3DM: a three dimensional modeler using a head-mounted display. *Symposium on Interactive 3D Graphics Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics*. Cambridge, 135-138
- Burdea, G. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. New York: Wiley

- Campell, M.R.; Williams, D.R.; Buckley J.C.; Kirkpatrick, A.W. (2005). Animal surgery during spaceflight on the Neurolab Shuttle mission. *Aviat Space Environment Med*, 76, 589-593
- Chen, Y.; Mori, S.; Koga, K.; Ohta, Y.; Wada, Y.; Tanaka, M. (1999). Shift in Arm-pointing movements during gravity changes produced by aircraft parabolic flight. *Biological Science in Space*, 13(2), 77-81
- Cherry, E.C. (1953). Some experiments of the recognition of speech with one and with two ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 975-979
- Chodack, J., Spampinato, P. (1991). Spacesuit Glove Thermal Micrometeoroid Garment Protection versus Human Factors Design Parameters. SP – Society of Automotive Engineers, 67-83
- Clark, R.S.J.; Hellon, R.F.; Lind, A.R. (1958). The duration of sustained contractions of the human forearm at different muscle temperatures. *Journal of Physiology*, 143, 454-473
- Clark, R.E. (1961). The limiting hand skin temperature for unaffected manual performance in the cold. *Journal of Applied Psychology*, 45(3), 193-194
- Coello, Y.; Orliaguet, J.P. (1994). Spatial adaptation of fast pointing movements to inertial perturbation: Evidence for differential adjustment of amplitude and direction. *CPC-Current Psychology of Cognition*, 13, 247-265
- Coello, Y.; Orliaguet, J.P.; Prablanc, C. (1996). Pointing movement in an artificial perturbing inertial field; A prospective paradigm for motor control study. *Neuropsychologia*, 39, 879-892
- Cohen, M.; Welch, R.; (1992). Visual-motor control in altered gravity. In: Proteau, L.; Elliot, D. (Hrsg.) *Vision and motor control*. North-Holland: Elsevier
- Corno, L. (1993). The best-laid plans: Modern conceptions of volition and educational research. *Educational Researcher*, 22, 14-22
- Crundall, D.; Underwood, G.; Chapman, P. (1999). Driving experience and the functional field of view. *Perception*, 28, 1075-1087
- Daanen, H.A.M.; Heus, R. (1993). The effect of body temperature on CIVD. Concept Report IZF, TNO Institute for Human Factors, Soesterberg
- Dahme, G.; Bleich, C.; Jungnickel, D.; Rathje, H. (1992). Ermutigende Befunde zur Reliabilität und enttäuschende Ergebnisse zur Konstruktvalidität des HAKEMP: Daten aus einer Felduntersuchung. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 3, 139-160
- Dalen, K.; Hugdahl, K. (1989). Effects of arousal and directed attention on hemispheric asymmetry in a finger-tapping dual-task paradigm. *International Journal of Neuroscience*, 46, 185-196
- Deml, B. (2004). *Telepräsenzsysteme. Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Desmurget, M.; Pelisson, D.; Rossetti, Y.; Prablanc, C. (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22(6), 761-788

- Desrosiers, J.; Hebert, R.; Bravo, G.; Dutil, E. (1995) The Purdue Pegboard Test: normative data for people aged 60 and over. *Disability and Rehabilitation*, 17, 217-224
- Deutsch, J.A.; Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 70, 80-90
- Dibbelt, S.; Kuhl, J. (1994). Volitional processes in decision making; Personality and situational determinants. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.). *Volition and personality: action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Diefendorff, J.M.; Hall, R.J.; Lord, R.G.; Streat, M.L. (2000). Action-state orientation: Construct validity of a revised measure and its relationship to work related variables. *Journal of Applied Psychology*, 85(2), 250-263
- Dietlein, L.F.; Johnston, R.S. (1981). U.S. manned space flight: the first twenty years. A biomedical status report. *Acta Astronautica*, 8(9-10), 893-906
- Diftler, M.A.; Culbert, C.J.; Ambrose, R.O.; Platt, R., Jr.; Bluethmann, W.J. (2003). Evolution of the NASA/DARPA Robonaut control system. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '03)*, 2, 2543-2548
- Djajadiningrat, J.P.; Overbeeke, C.J.; Smets, G.J.F. (1997). The importance of the number of degrees of freedom for rotation of objects. *Behaviour and Information Technology*, 16(6), 337-347
- Dodrill, C.B. (1979). Sex differences on the Halstead-Reitan neuropsychological battery and on other neuropsychological measures. *Journal of Clinical Psychology*, 35, 236-241
- Doll, J.; Mentz, M. (1992). Zur Bedeutung von Handlungsorientierung für die Bearbeitung eines Schnelligkeits- und eines Problemvideospiele. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 13(2), 117-125
- Dollard, J.; Doob, L.W.; Miller, E.N.; Mowrer, O.H.; Sears, R.S. (1973). *Frustration und Aggression*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag
- Ewards, M.; Burton, A.C. (1960). Correlation of heat output and blood flow in the finger, especially in cold-induced vasodilation. *Journal of Applied Physiology*, 15(2), 201-208
- Endres, D.; Alun-Jones, T.; Morrissey, M.S. (1990). The effectiveness of double-gloving in otolaryngology. *Clinical Otolaryngology*, 15, 535-536
- Engle, R.W.; Kane, M.J.; Tuholski, S.W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled action, general fluid intelligence and functions of the prefrontal cortex. In: Miyake, A.; Shah, P. (Hrsg.). *Models of working memory*. New York: Cambridge Press
- Eriksen, C.W.; James, J.D.ST. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception and Psychophysics*, 40(4), 225-240
- Eysenck, H.J. (1967). *The biological basis of personality*. Springfield: Thomas
- Falk, L. (1977). The effects of music tempos on motor skill. *Journal of the Tennessee Academy of Science*, 52, 150

- Feather, N.T. (1962). The study of persistence. *Psychological Bulletin*, 59, 94-115
- Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS*. London, Thousand Oaks, New Delhi: Sage Publications
- Fiorini, P.; Hannaford, B.; Jau, B. (1987). Hand Trigger System for Bi-Lateral control in Teleoperation. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 586-592
- Fisk, J.; Lackner, J.R.; Dizio, P. (1993). Gravitoinertial force level influences arm movement control. *Journal of Neurophysiology*, 69, 504-511
- Flanagan, J.R.; Bandomir, C.A. (2000). Coming to grips with weight perception: Effects of grasp configuration on perceived heaviness. *Perception and Psychophysics*, 62(6), 1204-1219
- Fleishman, E.A. (1954a). Dimensional analysis of psychomotor abilities. *Journal of Experimental Psychology*, 48, 437-454
- Fleishman, E.A.; Hempel, W. E. (1954b). A factor analysis of dexterity tests. *Personnel Psychology*, 7, 15-32
- Fleishman, E.A.; Ellison, G.D. (1962). A factor analysis of fine manipulative performance. *Journal of Applied Psychology*, 46, 96-105
- Fleishman, E.A. (1972). Structure and measurement of psychomotor abilities. In R.N., Singer (Hrsg.), *The psychomotor domain*, 78-196, Philadelphia: Lea & Febiger
- Foltys, H. (2001). Sprachfunktionen und Handmotorik: Eine neurophysiologische Untersuchung. *Aktuelle Neurologie*, 28, 72-73
- Fowler, B.; Manzey, D. (2000a). Summary of research issues in monitoring of mental and perceptual-motor performance and stress in space. *Aviation, Space, and Environment Medicine*, 71(9), A76-A77
- Fowler, B.; Comfort, D.; Bock, O. (2000b). A review of cognitive and perceptual Motor performance in space. *Aviation, Space, and Environment Medicine*, 71(9), A66-A68
- Fox, E.L.; Mathews, D.K. (1981). *The Physiological basis of physical education and athletics*. Philadelphia: Saunders College Publishing
- Fregly, M.; Blatteis, C. (1996). *Handbook of physiology*. Kapitel 4: Environmental physiology. New York: Oxford Press
- Friedl, K.E.; Moore R.J.; Hoyt, R.W.; Marchitelli, L.J.; Martinez-Lopez, L.E.; Askew, E.W. (2000). Endocrine markers of semistarvation in healthy lean men in a multistressor environment. *Applied Physiology*, 88, 1820-1830
- Frost, R.O.; Henderson, K.J. (1991). Perfectionism and reactions to athletic competition. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 13, 323-335
- Frost, R.O.; Turcotte, T.A.; Hemiberg, R.G.; Mattia, J.I.; Holt, C.S.; Hope, D.A. (1995). Reactions to mistakes among subjects high and low in perfectionistic concern over mistakes. *Cognitive Therapy and Research*, 19(2), 195-205

- Gallus, J.; Mathiowetz, V. (2003). Test-retest reliability of the Purdue Pegboard for persons with multiple sclerosis
- Card, S.K.; Moran, T.P.; Newell, A. (1983). The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, New York: Lawrence Erlbaum Associates
- Gardner, J.F. (1950). Direction of pointer motion in relation to the movement of flight controls: Cross-pointer type instrument (AF Technical Report 6010). Wright-Patterson, AFB: Air Material Command
- Gardner, R.A.; Broman, M. (1979). The Purdue Pegboard: Normative data on 1334 school children. *Journal of Clinical Neuropsychology*, 1, 156-162
- Gauvin, C.; Tellier, C.; Daigle, R.; Petitjean-Roget, T. (2006). Evaluation of dexterity tests for gloves. In: 3rd European Conference on Protective Clothing (ECPC)
- Gazenko, O.H.; Grigoyev, A.I. (1980). Modeling the physiological effects of weightlessness; Soviet-American-Experiment, NDB 92 (2), 71-75
- Gazzaniga, M.S.; Ivry, R.B.; Mangun, G.R. (2002). *Cognitive Neuroscience. The biology of the mind*. New York, London: W.W. Norton and Company
- Geng, Q.; Chen, F.; Holmér, I. (1997). Effect of protective gloves on manual dexterity in the cold environments. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 3(1-2), 15-29
- Geng, Q.; Holmér, I. (1998). Hand Dexterity with Different Gloving in the Cold. *Proceedings of International Symposium on Problems with Cold Work*, 16-20
- Geng, Q.; Karlsson, E.; Holmer, I. (2000). Manual performance after gripping cold surfaces with and without gloves. *Proceedings of NOKOBETEF 6 and 1st European Conference on Protective Clothing*, 208-211
- Gentaz, E.; Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. *Perception and Psychophysics*, 58(8), 1278-1292
- Gentilucci, M. (2002). Object motor representation and reaching-grasping control. *Neuropsychologia*, 40, 1139-1153
- Gentilucci, M.; Benuzzi, F.; Bertolani, L.; Gangitano, M. (2001). Influence of stimulus color on the control of reaching-grasping movements. *Experimental Brain Research*, 137, 36-44
- Germaine, R.; Hanson, J.; De Gara, C.J. (2003). Double gloving and practice attitudes among surgeons. *American Journal of Surgery*, 185, 141-145
- Gescheider, G.A.; Bolanowski, S.J.; Hall, K.L.; Hoffman, K.E.; Verrillo, R.T. (1994). The effects of aging on information-processing channels in the sense of touch. *Somatosensory and Motor Research*, 11, 345-357
- Gianola, S.V.; Reins, D.A. (1972). Preliminary studies on the development and testing of low-temperature handwear with improved dexterity. Technical Report 106. Springfield: NTIS National Technical Information Service U.S. Department of Commerce

- Goldstein, B.C. (1997). *Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademische Verlag
- Gonzalez-Avarez, C.; Subramanian, A.; Pardhan, S. (2007). Reaching and grasping with restricted peripheral vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 27(3), 265-274
- Goodale, M.A.; Meenan, J.P.; Bulthoff, H.H.; Nicolle, D.A.; Murphy, K.J.; Racicot, C.I. (1994). Separate neural pathways for the visual analysis of object shape in perception and prehension. *Current Biology*, 4, 604-610
- Gordon, N.G.; O'Dell, J.W.; Bozeman, N. (1981). Variation in neuropsychological performance as a function of sex. *Journal of Psychology*, 109, 127-131
- Graveline, D.E.; Balke, B. (1960). The physiological effects of hypodynamics induced by water immersion. USAF School of Aviation Medicine, Report 60
- Guiard, Y. (1987). Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model. *Journal of Motor Behavior*, 19(4), 486-517
- Haaland, K.Y.; Harrington, D.L.; Knight, R.T. (2000). Neural representations of skilled movement. *Brain*, 123, 2306-2313
- Hannaford, B.; Wood, L.; McAfee, D.A.; Zak, H. (1991). Performance evaluation of a six-axis generalized force reflecting teleoperator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(3), 620-633
- Hampson, E.; Kimura, D. (1988). Reciprocal effects of hormonal fluctuation on human motor and perceptual skills. *Behavioural Neuroscience*, 102, 456-459
- Hamster, W. (1980). *Die Motorische Leistungsserie – MLS. Handanweisung*. Mödling: Dr. G. Schuhfried
- Haward, B.M.; Griffin, M.J. (2002). Repeatability of grip strength and dexterity tests and the effects of age and gender. *International Archives of occupational and environmental Health*, 75, 111-119
- Häcker, H.; Schwenkmezger, P. (1978). *Persönlichkeitsfragebogen*. In: Schmidt, L.R. (Hrsg.). *Lehrbuch der klinischen Psychologie*. Stuttgart: Enke
- Häcker, H., Stapf, K.H. (1998). *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Bern; Göttingen; Toronto; Seattle: Verlag Hans Huber
- Heger, Moritz (2006): *Entwicklung und Simulation einer Fly-by-Wire-Steuerung per DLR-Spacemouse für ein Kleinluftschiff*. Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Held, R.; Efstathiou, A.; Greene, M. (1966). Adaptation to displaced and delayed visual feedback from the hand. *Journal of Experimental Psychology*, 72, 887-891
- Held, R.; Durlach, N. (1991). Telepresence, time delay and adaptation. In: Ellis, S.R.; Kaiser, M.K.; Grunwald; A.C. (Hrsg.). *Pictorial communication in virtual and real environments*. London: Taylor & Francis

- Held, R.M. & Durlach, N.I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109-112.
- Hellström, B. (1965). *Local Effects of Acclimatization to Cold in man*. Universitetsforlaget. Universidad Oslo
- Heuer, H.; Manzey, D.; Lorenz, B.; Sangals, J. (2003). Impairments of manual tracking performance during spaceflight are associated with specific effects of microgravity on visuomotor transformation. *Ergonomics*, 46, 920-934
- Heus, R.; Daanen, H.A.M.; Havenith, G. (1995). Physiological criteria for functioning of hands in the cold. *Applied Ergonomics*, 26(1), 5-13
- Hiersig, W. (1995). *Kinematik (Industrieroboter)*. Lexikon Produktionstechnik, Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 510
- Hirche, S., Buss, M., Hinterseer, P. & Steinbach, E. (2005). Towards deadband control in networked teleoperation systems. 16th International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC'05)
- Hinterseer, P., Steinbach, E. & Chaudhuri, S. (2006). Model based data compression for 3D virtual haptic teleinteraction. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2006)*
- Hoffman, J.A.; Miller, D.W.; Grunsfeld, J.M. (2009). Astronaut and Robotic Maintenance and Upgrades of Major Space Assets. *Astro 2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, Position Paper*, 22
- Hollingworth, H.L. (1913). Correlations of abilities as affected by practice. *Journal of Educational Psychology*, 4, 405-410
- Holmér, I. (1994). Extremity cooling and performance. *Work in the cold environment*. Investigation Report 31. National Institute of Occupational Health
- Honda, M.; Deiber, M.P.; Ibanez, V.; Pascual-Leone, A.; Zhuang, P.; Hallett, M. (1998). Dynamic cortical involvement in implicit and explicit motor sequence learning; a PET study. *Brain*, 121, 2159-2173
- Howe, R.D.; Peine, W.J.; Kontarinis, D.A.; Son, J.S. (1995). Remote palpation technology for surgical applications. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14(3), 318-323
- Hung, N. V. Q.; Narikiyo, T.; Tuan, H. D. (2003). Nonlinear adaptive control of master-slave system in teleoperation. *Control Engineering Practice*, 11, 1-10
- Imamura, R.; Rissanen, S.; Kinnunen, M.; Rintamaki, H. (1998). Manual performance in cold conditions while wearing NBC clothing. *Ergonomics*, 41(10), 1421-1432
- Jacobson, S.C.; Wood, J.E.; Knutti, D.F.; Biggers, K.B. (1984). The Utah/MIT dextrous hand: work in progress. *The International Journal of Robotics Research*, 3(4), 21-50

- Jahanshahi, M.; Profice, P.; Brown, R.G.; Ridding, M.C.; Dirnberger, G.; Rothwell, J.C.; (1998). The effects of transcranial magnetic stimulation over the dorsolateral prefrontal cortex on suppression of habitual counting during random number generation. *Brain*, 121, 1533-1544
- Jakobson, L.S.; Goodale, M.A. (1991). Factors affecting higher order movement planning: a kinematic analysis of human prehension. *Experimental Brain Research*, 86, 199-208
- Jeannerod, M. (1988). *The neural and behavioural organisation of goal-directed movements*. Oxford: Clarendon Press
- Johnson, R.F.; Sleeper, L.A. (1986). Effects of chemical protective handwear and headgear on manual dexterity. The Human Factor Society 30th Annual Meeting, Sanata Monica, 994-998
- Jüngling, S.; Bock, O.; Girgenrath, M. (2002). Speed-accuracy trade-off of grasping movements during microgravity. *Aviation, Space and Environment Medicine*, 73, 430-435
- Jürgens, H. (2004). Erhebung anthropometrischer Maße zur Aktualisierung der DIN 33 402 Teil 2. Dortmund, Berlin, Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- Kakurin, L.I.; Labachik, V.I.; Mikailov, V.M. (1976). Antiorthostatic hypokinesia as a method of weightlessness simulation. *Aviation, Space and Environment Medicine*, 47(10), 1083-1086
- Kanfer, R.; Dugdale, B.; McDonald, B. (1994). Empirical finding on the action control scale in the context of complex skill acquisition. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.). *Volition and personality: action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Kapandji, I. (1982). *The Physiology of the Joints, Upper Limb, Volume I*. Edinburgh: Churchill Livingstone
- Kauranen, K.; Vanharanta, M. (1996). Influences of aging, gender, and handedness on motor performance of upper and lower extremities. *Perception and Motor Skills*, 82, 515-525
- Kerr, R. (1978). Diving, adaptation, and Fitts Law. *Journal of Motor Behavior*, 10, 255-260
- Keshavarzpour, H.; Eghtesad, M.; Farid, M.; 2008 A new approach to wave controller design in a time-delayed nonlinear telerobotic system. *Automation Congress, WAC 2008*, 1 – 6
- Kiessling, R.J.; Maag, C.H. (1962). Performance impairment as a function of nitrogen narcosis. *Journal of Applied Psychology*, 46, 91-95
- Kimura, D.; Archibald, Y. (1974). Motor function of the left hemisphere. *Brain*, 97, 337-350
- King, D. (2001). Space Servicing: Past, present and future. *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001*, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada.
- Kinsbourne, M.; Cook, J. (1971). General and lateralized effects of concurrent verbalization on a unimanual skill. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 23, 341-345
- Kiphard, E. (1989). *Psychomotorik in Praxis und Theorie*. Dortmund: Flottmann

- Kirschner, H. (1987). Anpassung des menschlichen Organismus an -20° und -5° Kopftieflage als Modell zur Simulation von Schwerelosigkeit. Dissertation. Universität Berlin
- Kleber, E.W.; Kleber, G.; Hans, O. (1999). Differentieller Leistungstest- KG (DL-KG). Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, Oxford, Prag: Hogrefe Verlag
- Kobrick, J.L.; Sleeper, L.A. (1986). Effect of wearing chemical protective clothing in the heat on signal detection over the visual field. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 57, 144-148
- Koella, W.; Barandun, S. (1951). Die Abhängigkeit der Präzisionsleistung von der Arbeitssituation. *Arbeitspsychologie*, 14, 383-393
- Kosuge, K.; Fukada, T.; Otsuka, M. (1995). Scaled telemanipulation system using semi-autonomous task-oriented virtual tool. *Proceedings of IEEE IROS*, 124–129
- Krendel, E.S.; McRuer, D.T. (1960). A servomechanism approach to skill development. *Journal of the Franklin Institute*, 269(1), 24-42
- Kreuter, C.; Kinsbourne, M.; Trevarthen, C. (1972). Are disconnected cerebral hemispheres independent channels? A preliminary study of the effect of unilateral loading on bilateral finger tapping. *Neuropsychologia*, 10, 453-461
- Kroemer, K.H.E. (1986). Coupling the hand with the handle: An improved notation of touch, grip and grasp. *Human Factors*, 28(3), 337-339
- Krumm, S.; Schmidt-Atzert, L.; Eschert, S. (2008). Investigating the Structure of Attention: How do Test Characteristics of Paper-Pencil Sustained Attention Tests influence their Relationship with other Attention Tests? *European Journal of Psychological Assessment*, 24(2), 108 – 116
- Kuhlang, P.; Sihn, W. (2008). Das Ganze und das Detail sehen. Grundlegende Betrachtung zur Steigerung der Produktivität und zur Reduktion der Durchlaufzeit mittels Wertstromdesign und MTM. *WINGbusiness*, 2, 8-11
- Kuhl, J. (1981). Motivational and functional helplessness: The moderating effect of state versus action orientation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 40(1), 155-170
- Kuhl, J. (1983). *Motivation, Konflikt and Handlungskontrolle*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag
- Kuhl, J. (1984). Volition aspects of achievement motivation and learned helplessness: Toward a comprehensive theory of action control. In: Maher, B.A.; Maher, B.W. (Hrsg.). *Progress in experimental personality research*. Vol. 13: Normal personality processes. Orlando: Academic Press
- Kuhl, J.; Wassiljew, J. (1985). An information-processing perspective in motivation: Intrinsic task-involvement, problem-solving, and the complexity of action plans. In: d'Ydevalle, G. (Hrsg.). *Cognition, information processing, and motivation*. Amsterdam: Elsevier Science
- Kuhl, J. (1987). Action control: The maintenance of motivational states. In Halisch, F.; Kuhl, J. (Hrsg.). *Motivation, intention and volition*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag

- Kuhl, J. (1994a). A theory of action and state orientations. In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.). *Volition and personality: action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Kuhl, J. (1994b). Action vs. state orientation: Psychometric properties of the action control scale (ACS-90). In: Kuhl, J.; Beckmann, J. (Hrsg.). *Volition and personality: action versus state orientation*. Seattle, Toronto, Göttingen, Bern: Hogrefe & Huber Publisher
- Kuhl, J. (o.J.). Kurzanweisung zum Fragebogen HAKEMP 90. Unveröffentlichter Fragebogen mit Anweisung. Universität Osnabrück
- Kurillo, G.; Mihelj, M.; Munih, M.; Bajd, T. (2007). Multi-Fingered Grasping and Manipulation in Virtual Environments Using an Isometric Finger Device. *Presence*, 16(3), 293-306
- Lackner, J.R.; DiZio, P. (1998). Adaptation in a rotating artificial gravity environment. *Brain Research Reviews*, 28, 194-202
- Lackner, J.R.; DiZio, P. (2000). Human orientation and movement control in weightless and artificial gravity environment. *Experimental Brain Research*, 130, 2-26
- Lay, C.H. (1995). Trait procrastination, agitation, dejection and self-discrepancy. In: Ferrari, J.R.; Johnson, J.L.; McCown, W. (Hrsg.) *Procrastination and task avoidance: Theory, research, and treatment*. New York: Plenum Press
- Lachnit, H.; Pieper, W. (1990). Speed and accuracy effects of fingers and dexterity in 5-choice reaction tasks. *Ergonomics*, 33(12), 1443-1454
- Lederman, S.J.; Klatzky, R.L. (1999). Sensing and displaying spatially distributed fingertip forces in haptic interfaces for teleoperator and virtual environment systems. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1), 86-103
- Lederman, S.J.; Klatzky, R.L.; Morgan, T.; Hamilton, C. (2002). Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS'02, 97-104
- Lessiter, J.; Freeman, J.; Koegh, E.; Davidoff, J. (2001). A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of presence inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 282-297
- Leszczynski, C.; Schumann, W. (1995). *Psychologisches Lexikon*. Gütersloh, München: Bertelsmann Lexikon Verlag GmbH
- Li, L.; Cox, B.; Diftler, M.; Shelton, S.; Rogers, B. (1996). Development of a telepresence controlled ambidextrous robot for space applications. 13th IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, 1(4), 58-63
- Lienert, G.A. (1969). *Testaufbau und Testanalyse*. Weinheim: Beltz
- Little, B.R. (1989). Trivial pursuits, magnificent obsessions and the search for coherence. In: Buss, D.; Cantor, N. (Hrsg.). *Personality psychology: Recent trends and emerging directions*. New York: Springer Verlag
- Lossagk, H. (1926). Griffstudien. *Industrielle Psychotechnik*, 3(9),1

- Lovchik, C.S.; Diftler, M.A. (1999). The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 907-912
- Luciani, A., Urma, D., Marliere, S. & Chevrier, J. (2003). Presence: The sense of believability of inaccessible worlds. Proceedings of the 2003 International Conference on Cyberworlds (CW'03)
- Luria, S.M.; Kenney, J.A.S. (1970). Underwater vision. *Science*, 167, 1454-1461
- McGinnis, J.M.; Bensel, C.K.; Lockhart, J.M. (1973). Dexterity afforded by CB protective gloves. Technical Report 73-35-PR, US Army Natick Laboratories
- MacKenzie, I.S.; Ware, C. (1993). Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems. *Human Factors in Computing Systems*, 488-493
- Mania, K.; Chalmers, A. (2001). The effects of level of immersion on presence and memory in virtual environments: A reality centered approach. *CyberPsychology and Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 4(2), 247-264
- Manzey, D.; Lorenz, B.; Poljakov, V. (1998). Mental performance in extreme environments: results from a performance monitoring study during a 439-day spaceflight. *Ergonomics*, 41, 537-559
- Manzey, D.; Lorenz, T.B.; Heuers, H.; Sangals, J. (2000). Impairments of manual tracking performance during spaceflight: more converging evidence from a 20-day space mission. *Ergonomics*, 43, 589-609
- Martens M. H.; van Winsum W. (2000). Measuring distraction: the Peripheral Detection Task. Driver Distraction Internet Forum. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driverdistraction/Topics013040229.htm> [11.03.09]
- Marx, W. (1982). Spearman's Rho: Eine "unechte" Rangkorrelation? *Archiv für Psychologie*, 134, 161-164
- Maslah, M.R.; Milgram, P. (2000). Measuring the Allocation of Control in a 6-Degree-of-Freedom Docking Experiment. Proceedings of CHI 00: ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, 25-32
- Massimino, M.J.; Sheridan, T.B. (1994). Teleoperator performance with varying force and visual feedback. *Human Factors*, 36(1), 145-157
- Mathiowetz, V.; Rogers, S.L.; Dowe-Keval, M.; Donahoe, L.; Renells, C. (1986). The Purdue Pegboard: Norms for 14- to 19-year-olds. *American Journal of Occupational Therapy*, 3, 174-179
- Mauschnitz, R.; Oberhammer, R.; Nordmeyer, G.; Tanzer, K.; Gumpert, R.; Grömer, G. (2006). Notfallmedizin auf dem Mars. Eine simulierte Marsexpedition. *Notfall Rettungsmedizin*, 9, 653-660
- Mayr, U.; Walschburger, P. (1991). Simultane Effekte und Nachwirkungen des Intensitäts- und des Erfolgsaspektes bei der Bewältigung von Belastungen. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 38(3), 429-456

- McCain, H.G.; Andary, J.F.; Hewitt, D.R.; Spidaliere, P.D. (1991). Flight Telerobotic Servicer: The design and evolution of a dexterous space telerobot. Telesystems Conference, NTC '91. Proceedings, 1, 385-390
- McCown, W. (1986). Behaviour of chronic college-student procrastinators: An experimental study. *Social Science and Behavioural Documents*, 17, 133-141
- Meehan, M.; Insko, B.; Whitton, M.; Brooks, F.P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3), 645-652
- Meinel, K. & Schnabel, G. (1976). *Bewegungslehre. Abriss einer Theorie der Bewegung*. Berlin: Volk und Wissen
- Meyer, A.; Sagvolden, T. (2006). Fine motor skills in South African children with symptoms of ADHD: Influence of subtype, gender, age and hand dominance. *Behavioral and Brain Function*, 2, 33-46
- Michimata, A; Kondo, T.; Suzukamo, Y.; Chiba, M.; Izumis, S. (2008). The Manual Function Test: Norms for 20- to 90-Year-Olds and Effects of Age, Gender, and Hand Dominance on Dexterity. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 214 (3), 257-267
- Mierke, K (1955). *Wille und Leistung*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, Oxford, Prag: Hogrefe Verlag
- Mills, A.W.(1952). Progress report on the impairment of manual dexterity in cold. Defence Research Northern Laboratory Project Rep. 1, Defence Research Board
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *OMNI*, 2(9), 45-52
- Mital, A.; Kuo, T.; Faard, H.F. (1991). Advances in Industrial Ergonomics and Safety III / International Foundation for Industrial Ergonomics and Safety Research, 3, 271-277
- Miura, T. (1990). Active function of eye movement and useful field of view in a realistic setting. In: d'Ydewalle ; R. Parham; R. Groner. (Hrsg) *From Eye to Mind: Information Acquisition in Perception, Search, and Reading*. Amsterdam: North-Holland Press
- Moosbrugger, H.; Goldhammer, F.; Schweizer, K. (2006). Latent factors underlying individual differences in attention measures – perceptual and executive attention. *European Journal of Psychological Assessment*, 22, 177-188
- Money, K.E.; Cheung, B.S. (1991). Alterations of proprioceptive function in the weightless environment. *Journal of clinical Pharmacology*, 31, 1007-1009
- Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11, 56-60
- Morrison, M.W.; Gregory, R.J.; Paul, J.J. (1979). Reliability of the finger tapping test and a note on sex differences. *Perceptual and Motor Skills*, 48, 139-142
- Muscio, B. (1922). Motor capacity with special references to vocational guidance. *The British Journal of Psychology*, 8, 187-197

- Müller, J. (2003). Beziehungen zwischen ausgewählten Parametern der Motorik und kognitiven Fähigkeiten. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- Nalcali, E.; Kalaycioglu, C.; Cicek, M.; Genc, Y. (2001). The relationship between handedness and fine motor performance. *Cortex*, 37, 493-500
- Nash, E.B.; Edwards, G.W.; Thompson, J.A.; Barfield, W. (2000). A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of Human Computer Interaction*, 12(1), 1-41
- Neiburger, E.J. (1992). Latex gloves and manual dexterity. *New York State dental Journal*, 58, 24-28
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton
- Nelson, J.B.; Mital, A. (1995). An ergonomic evaluation of dexterity and tactility with increase in examination/surgical glove thickness. *Ergonomics*, 38(4), 723-733
- Newman, D.J.; Bussolari, S.R. (1990). Dual-Task performance on an interactive human/computer space shuttle flight experiment. *Biomedical science instrumentation*, 26, 213-225
- Newman, D.J.; Lathan, C.E. (1999). Memory processes and motor control in extreme environments. *EIII Trans Sys Man Cybern- Prat C: App and Rev*, 29, 387-394
- Newell, A.; Rosenbloom, P.S. (1981). Mechanism of Skill Acquisition and the Law of Practice. In: Anderson, J.R. (Hrsg.) *Cognitive Skills and Their Acquisition*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates
- Nickel, H. (1981). *Entwicklungspsychologie des Kindes- und Jugendalters. Band 1*. Bern: Huber
- Niederberger, U.; Engemann, A.; Radtke, M. (1987). Umfang der Informationsverarbeitung bei Entscheidungen: Der Einfluss von Gedächtnisbelastung und Handlungsorientierung. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 34(1), 80-100
- Nojima, T.; Inami, M.; Maeda, T.; Tachi, S. (1999). Applying an 'encounter-type' haptic display to telexistence. *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan Annual Conference*, 4, 395-398
- Nunes, L.; Recarte M. A. (2002). Cognitive demands of hands-free-phone conversation while driving. *Transportation Research Part F* 5
- Oboe, R. (2003). Force-reflecting teleoperation over the internet: The JBIT project. *Proceedings of the IEEE*, 91(3), 449-462
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113
- Olsson, S.; Burns, P.C. (2000). *Measuring Driver Visual Distraction with a Peripheral Detection Task*. Linköping University, Sweden: Department of Education & Psychology
- Ono, H.; O'Reilly, J.P. (1971). Adaptation to underwater distance distortion as a function of different sensory-motor tasks. *Human Factors*, 13, 133-140

- Ottensmeyer, M.P.; Hu, J.; Thompson, J.M.; Ren, J.; Sheridan, T.B. (2000). Investigations into performance of minimally invasive telesurgery with feedback time delays. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(4), 369 – 382
- Paillard, J.; Amblard, B. (1985). Static versus kinetic visual cues for the processing of spatial relationships. In: Ingle, D.J.; Jeannerod, M.; Lee, D.N. (Hrsg.). *Brain Mechanismus and Spatial Vision*, 299-330
- Parrish, J.C. (1999). The ranger telerobotic shuttle experiment: An on-orbit satellite servicer. *Proceeding Fifth international Symposium on Artificial Intelligence. Robotics and Automation on Space*, 225-233
- Parsons, K.C.; Egerton, D.W. (1985). The effect of glove design on manual dexterity in neutral and cold condition. In: Osborne, D.J.(Hrsg.). *Contemporary Ergonomics*. London, Philadelphia: Taylor and Francis
- Pashler, H.; Johnston, J.C.; Ruthruff, E. (2000). Attention and performance. *Annual Review of Psychology*, 52, 629-651
- Petrofsky, J.S.; Lind, A.R. (1975). Insulative power of body fat on deep muscle temperature and isometric endurance. *Journal of Applied Physiology*, 39(4), 639-642
- Perrin, F.A.C. (1921). An experimental study of motor ability. *Journal of Experimental Psychology*, 4, 24-31
- Perry, R.P.; Dickens, W.J. (1984). Perceived control in the college classroom: Response outcome contingency training and instructor expressiveness effects of student achievement and causal attributions. *Journal of Educational Psychology*, 76, 966-981
- Peters, M.; Durdin, B. (1979). Left-handers and right-handers compared on a motor task. *Journal of Motor Behavior*, 11, 103-111
- Peters, M.; Servos, P. (1989). Performance of subgroups of lefthanders, and righthanders. *Canadian Journal of Psychology*, 43; 431-358
- Peters, M.; Servos, P.; Day, R. (1990). Marked sex differences on a fine motor skill task disappear when finger size is used as covariate. *Journal of applied Psychology*, 75(1), 87-90
- Petzold, B.; Zaeh, M.F.; Färber, F.; Deml, B.; Egermeier, H.; Schilp, J.; Clarke, S. (2004). A study on visual, auditory and haptic feedback for assembly tasks. *Presence: Teleoperators and Virtual Environment*, 13(1), 16-21
- Pflüger, L. (1992). Sensomotorischer Regelkreis. In: Dupuis, G.; Kerkhoff, W. (Hrsg.). *Enzyklopädie der Sonderpädagogik, der Heilpädagogik und ihrer Nachbargebiete*. Berlin
- Pitcher, T.M.; Piek, J.P.; Hay, D.A. (2003). Fine and gross motor ability in males with ADHD. *Development Medicine and Child Neurology*, 45, 525-535
- Pieper, W.; Lachnit, H. (1998). The influence of finger skill on reaction time in 1-, 3- and 5-choice reaction tasks. *Psychologische Beiträge*, 40(2), 224-232

- Plummer, R.; Stobbe, T.; Ronk, R.; Myers, W.; Kim, H.; Jaraiedi, M. (1985). Manual dexterity evaluation of gloves used in handling hazardous materials. Proceedings of the Human Factors Society 29th Annual Meeting, Santa Monica, 819-823
- Pongrac, H. (2008). Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Posner, M.I.; Petersen, S.E. (1990). The attention system of the human brain. Annual Review of Neuroscience, 13, 25-42
- Pychyl T.A. (1995). Personal projects, subjective well-being and the lives of doctoral students. Dissertation, Carleton University
- Rantanen, E. M.; Goldberg, J. H. (1999). The effect of mental workload on the visual field size and shape. Ergonomics, 42(6), 819-834
- Ratino, D.A.; Repperger, D.W.; Goodyear, C.; Potor, G.; Rodriguez, L.E. (1988). Quantification of reaction time and time perception during Space Shuttle operations. Aviation, Space, and Environment Medicine, 59(3), 220-224
- Rafiq, J.C.; Williams, D.; Jones, J. (2005). Assessment of simulated surgical skills in parabolic microgravity. Aviation, Space and Environment Medicine, 76, 385-391
- Rafiq, A.; Hummel, R.; Lavrentyev, V.; Derry, W.; Williams, D.; Merrell, R.C. (2006). Microgravity Effects on Fine Motor Skills: Tying Surgical Knots During Parabolic Flight. Aviation, Space and Environment Medicine, 77(8), 852-856
- Recarte, M. A.; Nunes, L.M. (2003). Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. Journal of Experimental Psychology: Applied, 9(2), 119-137
- Reintsema, D.; Landzettel, K.; Hirzinger, G. (2007). DLR's Advanced Telerobotic Concepts and Experiments for On-orbit-Servicing. In: Ferre, M; Buss, M.; Aracil, R.; Melchiori, C.; Balaguer, C. (Hrsg.) Advances in Telerobotics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Riley, M.W.; Cochran, D.J. (1984). Dexterity performance and reduced ambient temperature. Human Factors, 26(2), 207-214
- Rizzolatti, G; Carmarda, C.; Fogassi, L.; Gentilucci, M.; Luppino, G.; Matelli, M. (1988). Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey II. Area F5 and the control of distal movements. Experimental Brain Research, 71, 491-507
- Roby-Brami, A.; Bennis, N.; Mokhtari, M.; Baraduc, P. (2000). Hand orientation for grasping depends on the direction of the reaching movement. Brain Research, 869, 121-129
- Roderick, S.; Roberts, B.; Atkins, E.; Akin, D. (2004). The ranger robotic satellite servicer and its autonomous software-based safety system. Intelligent Systems, IEEE, 19(5), 12-19
- Röder, B.; Rösler, F. (2001). Vergleich haptischer Wahrnehmungsleistungen zwischen blinden und sehenden Personen. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.). Der bewegte Sinn - Grundlage und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel: Birkhäuser Verlag

- Rogers, W.H.; Noddin, E.M. (1984). Manual performance in the cold with gloves and bare hands. *Perceptual and Motor skills*, 59, 3-13
- Roll, R.; Bard, C.; Paillard, J. (1986). Head orienting contributes to the directional accuracy of aiming at distant targets. *Human Movement Science*, 5, 359-371
- Ross, E.H. (1970). Adaptation of divers to curvature distortion under water. *Ergonomics*, 13, 189-499
- Ross, E.H. (1989). Perceptual and motor skills of divers under water. *International Reviews and Ergonomics*, 2, 155-181
- Roth, K. (1993). Entscheidungsverhalten im Sportspiel in Abhängigkeit von situations- und personenbezogenen Merkmalen. In: Beckmann, J.; Strang, H.; Hahn, E. (Hrsg.). *Aufmerksamkeit und Energetisierung*. Göttingen: Hogrefe
- Ross, H.E.; Franklin, S.S.; Weltman, H.; Lennie, P. (1970). Adaptation of divers to size distortion under water. *British Journal of Psychology*, 61, 365-373
- Ross, H.E.; Rejman, M.H.; Lennie, P. (1972). Adaptation to weight transformation in water. *Ergonomics*, 15(4), 387-397
- Ross, H. (1989). Perceptual and motor skills of divers under water. *International Reviews and Ergonomics*, 2, 155-181
- Ross, H.E. (1991). Motor skills under varied gravito-inertial force in parabolic flight. *Acta Astronautica*, 23, 85-91
- Ross, H.E. (2001). Haptische Wahrnehmung in der Raumfahrt. In: Grundwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.) *Der bewegte Sinn*. Berlin, Basel, Boston: Birkhäuser Verlag
- Rubin, L.S. (1957). Manual Dexterity of the gloved and bare hand as a function of the ambient temperature and duration of exposure. *Journal of Applied Psychology*, 41(6), 377-383
- Ryu, D.; Cho, C.; Kim, M.; Song, J.-B. (2003). Design of a 6 DOF Haptic Master for Teleoperation of a Mobile Manipulator. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3243-3248
- Sack, P.M.; Witte, E.H. (1989). Zum Leistungsvorteil bei Handlungsorientierung. *Forschungsergebnisse und resultierende Fragen. Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 36(3), 510-522
- Sack, P.M.; Witte, E.H. (1990). Untersuchung zur Konstruktvalidität des HAKEMP 85 von J. Kuhl. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 11, 17-26
- Sacktor, N.C.; Lyles, R.H.; Skolasky, B.A.; Anderson, D.E.; McArthur, J.C.; McFarelane, Selnes, O.A.; Becker, J.T.; Cohen, B.; Wesch, J.; Miller, E.N. (1999). Combination antiretroviral therapy improves psychomotor speed performance in HIV-seropositive homosexual men. *Neurology*, 52, 1640-1647

- Sadowski, W.; Stanney, K.M. (2002). Presence in virtual environments. In: Stanney, K.M. (Hrsg.). Handbook of Virtual Environment: Design, Implementation, and Applications. Mahwah: Lawrence Erlbaum
- Sandler, H. (1980). Effects of bedrest and weightlessness on the heart. In: Bourne, G.H. (Hrsg.) Heart and Heart-like Organs. New York: Academic Press
- Sandler, H. (1982). Cardiovascular responses to weightlessness and ground-based simulations. ESA-Report SP-180
- Sattler, J.M.; Engelhardt, J. (1982). Sex differences on Purdue Pegboard norms for children. Journal of Clinical Child Psychology, 11, 72-73
- Sawyer, J.; Bennett, A. (2005). Comparing the level of dexterity offered by latex and nitrile safety gloves. Annual and Occupational Hygiene, 50(3), 289-296
- Schiels, B.; Main, J.A.; Peterson, W.S.; Strauss, A.M. (1997). An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part A: Systems and humans, 27(5), 668-673
- Schifflett, S.; Eddy, D. Schlegel, R.; French, J. (1995). Performance assessment workstation (PAWS). NASA Marshall Space Flight Centre
- Schneider, S.; Brümmer, V.; Mierau, A.; Carnahan, H.; Dubrowski, A.; Strüder, H. (2008). Increased brain cortical activity during parabolic flights has no influence on a motor tracking task. Experimental Brain research, 185(4), 571-579
- Schmäl, F.; Stoll, W. (2000). Kinetosen. HNO, 48(5), 346-356
- Schmidt, R.A.; Zelasnick, H.N.; Frank, J.S. (1978). Source of inaccuracy in rapid movement. In: Stelmach, G.E. (Hrsg.). Information Processing in Motor Control and Learning. London: Academic Press
- Schmidt-Atzert, L.; Krumm, S.; Bühner, M. (2008a). Aufmerksamkeitsdiagnostik: Ableitung eines Strukturmodells und systematische Einordnung von Tests. Zeitschrift für Neuropsychologie, 13(1), 59-67
- Schmidt-Atzert, L.; Krumm, S. (2008b). Zur Validität von Aufmerksamkeits- und Konzentrations-tests. Report Psychologie, 33, 126-139
- Schmidtke, H. (1958). Der Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit auf die Bewegungsgenauigkeit. Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie, 17, 252
- Schmidtke, H. (1960). Über die Struktur willkürlicher Bewegungen. Psychologische Beiträge, 5, 428-439
- Schmidtke, H. (1961). Untersuchungen über die Abhängigkeit der Bewegungsgenauigkeit im Raum von der Körperstellung. Forschungsbericht, Nordrhein-Westfalen, 941
- Schmidtke, H. (1981). Lehrbuch der Ergonomie. München, Wien: Carl Hanser Verlag

- Schmidtke, H. (1993). Arbeitsplatzgestaltung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. München, Wien: Hanser Verlag
- Schnauber, H.; Müller, E.A. (1970). Die Leistungsfähigkeit der Hände bei Arbeit in verschiedener Höhe über dem Herzen. Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie, 28, 135-154
- Scheuchenpflug, R. (2001). Measuring Presence in virtual environments. CHI 2001: Conference on Human Factors in Computing Systems, Seattle, 56-58
- Schloerb, D.W. (1995). A quantitative measure of telepresence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 4(1), 64-80
- Schoppe, K.J. (1974). Das MLS-Gerät: ein neuer Testapparat zur Messung feinmotorischer Leistung. Diagnostica, 20, 43-47
- Schorn, M. (1929). Untersuchungen über die Handgeschicklichkeit. Habilitationsschrift. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth
- Schubert, T.W. (2003). The sense of presence in virtual environments: A three-component scale measuring spatial presence, involvement, and realness. Zeitschrift für Medienpsychologie, 15(2), 69-71
- Schuemie, M.J.; van der Straaten, P.; Krijn, M.; van der Mast, C.A.P.G. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. CyberPsychology and Behavior, 4(2), 183-201
- Sheridan, T.B. (1993). Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9(5), 592-606
- Shadow Robot Company (2004). Development in Dexterous Hands for Advanced Robotic Applications. Proceeding of World Automation Congress, 15, 123-128
- Shimoga, K.B. (1992). Finger Force and Touch Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation. Proceedings Fourth Annual Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration, 159-178
- Shimoga, K.B.; Khosla, P.K. (1994). Touch and force reflection for telepresence surgery. Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE, 1049-1050
- Senders, J.W.; Christensen, J.M.; Sabe, R. (1955). Comparison of single operator's performance with team performance in a tracking task (TN-55-362). Aero Medical Laboratory, Wright Air Development Centre
- Semjen, A.; Leone, G.; Lipshits, M. (1998). Motor timing under microgravity. Acta Astronautica, 42, 303-321
- Sheridan, T.B. (1992). Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control. Cambridge: MIT Press

- Sheridan, T.B. (1993). Space Teleoperation through time delay: Review and Prognosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), 592-606
- Simon, K. (2002). Unterschiede in der Konzentrationstest-Leistung vor und nach der Arbeit: Der Einfluss von Ermüdung auf die Konzentrationstestleistung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Marburg
- Siebecke, D. (1998). Unternehmerische Entscheidungen im Medienumbruch: Eine Verhaltensstudie in kleinen und mittleren Unternehmen. In: Peter, G.; Treichel, H.R. (Hrsg.). *Medienzukunft heute*, Band 2, Münster: LIT Verlag
- Siegel, S.; Castellan, N.J. (1988). *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. New York: McGraw-Hill
- Skoog, A.I.; Abramov, I.P.; Stoklitsky, A.Y.; Doodnik, M.N. (2002). The soviet-russian space suits A historical overview of the 1960's. *Acta Astronautica*, 51(1-9), 113-131
- Speich, J.E.; Cagle, Y.D.; Raifq, A.; Merrell, R.C.; Doarn, C.R.; Broderick, T.J. (2005). Evaluation of surgical skills in microgravity using force sensing. *Medical Engineering and Physics*, 27, 687-693
- Spreen, O.; Strauss, E. (1998). *A compendium of neuropsychological tests: administration, norms and commentary*. New York: Oxford Press
- Stassen, H.G.; Smets, G.J.F. (1997). Telemaipulation and Telepresence. *Control Engineering Practice*, 5(3), 363-374
- Stein, C.; Yerxa, E.J. (1990). A test of fine finger dexterity. *The American Journal of occupational Therapy*, 44, 299-504
- Stiensmeier, J. (1985). Wichtigkeit als Bedingung von Lageorientierung. *Archiv für Psychologie*, 137, 1-11
- Stiensmeier-Pelster, J.; John, M.; Stulik, A.; Schürmann, M. (1989). Die Wahl von Entscheidungsstrategien: Der Einfluss von Handlungs- und Lageorientierung und die Bedeutung psychologischer Koste. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 36(2); 292-310
- Stiensmeier-Pelster, J.; Schürmann, M.; John, M.; Stulik, A. (1991). Umfang der Informationsverarbeitung bei Entscheidungen: Der Einfluss von Handlungsorientierung bei unterschiedlich dringlichen und wichtigen Entscheidungen. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 38(1), 94-112
- Stone, R.J. (2001). Haptic feedback: A brief history from telepresence to virtual reality. In: Brewster, S.A.; Murray-Smith, R. (Hrsg.). *Haptic Human-Computer Interaction*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Strenge, H.; Niederberger, U.; Seelhorts, U. (2002). Correlation between tests of attention and performance on grooved and purdue pegboards in normal subjects. *Perceptual and Motor Skills*, 95, 507-514

- Struthers, C.W.; Menec, V.H.; Schonwetter, D.J.; Perry, R.P. (1996). The effects of perceived attributions, action control, and creativity on college students' motivation and performance: A field study. *Learning and Individual Differences*, 8(2), 121-139
- Sturm, W.; Willmes, K. (2001). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness. *Neuroimage*, 14, 76-87
- Sturm, W.; Zimmermann, P. (2000). Aufmerksamkeitsstörungen. In: Sturm, W.; Zimmermann, P.; Wallesch, C.W. (Hrsg.). *Lehrbuch der klinischen Neuropsychologie: Grundlagen, Methoden, Diagnostik, Therapie*. Lisse: Swets & Zeitlinger
- Sudhakar, L.R.; Schoenmarklin, R.W.; Lavender, S.A.; Marras, W.S. (1988). The effects of gloves on grip strength and muscle activity. *Proceedings of the Human Factors Society- 32nd Annual Meeting*
- Suzumori, K.; Likura, S.; Tanaka, H. (1991). Development of flexible microactuator and its application to robotic mechanisms. *Proceedings of IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Sacramento, 1622-1627
- Tatch, A.; Fitz-Coy, N.; Gladun, S. (2006). On-orbit-Servicing: A Brief Survey. Performance metrics for intelligent systems workshop, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland USA, 276-281
- Thier, P. (2003). Grundlagen zielgerichteter Motorik. In: Karnath, H.-O.; Thier, P. (Hrsg.). *Neuropsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Thomas, K.H.; McMann, H.J. (2006). *US Spacesuits*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag
- Thomas, J.R.; French, K.E. (1985). Gender differences across age in motor performance: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 98, 260-282
- Thompson, D.A. (1977). The development of a six degree-of-freedom robot evaluation test. *Proceedings of 13th Annual Conference on Manual Control*, Cambridge: MIT Press
- Tiffin, J.; Asher, E.J. (1948). The Purdue Pegboard: norms and studies of reliability and validity. *Journal of Applied Psychology*, 32, 234-247
- Tiffin, J. (1968). *Purdue Pegboard examiner manual*. Chicago, IL: Science Research Associates
- Trautner, H.M. (1992). *Entwicklungspsychologie des Kindes- und Jugendalters, Band 1*. Bern: Huber
- Treisman, A.M. (1960). Verbal cues, language, and meaning in selective attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 242-248
- Tucker, M.; Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 830-846
- Tucker, M.; Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, 8, 769-800

- Turki, L.; Coiffet, P. (1995). On Grasp Synthesis and Planning of Multifingered robot hands for a Telemanipulation Task. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 141-146
- Turner, M.L. (2001). Programming dexterous manipulation by demonstration. Dissertation. Stanford University
- Unger, B.J.; Nicolaidis, A.; Berkelman, P.M.; Thompson, A.; Lederman, S.; Klatzky, R.L.; Hollis, R.L. (2002). Cirual Peg-in-hole Performance using a 6-DoF magnetic levitation haptic device: Comparison with real forces and with visual guidance alone. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Orlando, 263-270
- Usuh, M.; Catena, W.; Arman, S.; Slater, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 9(5), 497-503
- Vainio, L.; Tucker, M.; Ellis, R. (2007). Precision and power grip priming by observed grasping. Brain and Cognition, 65, 195-207
- Vodanovich, S.J.; Seib, H.M. (1997). Relationship between time structure and procrastination. Psychological Reports, 80, 211-215
- Vossius, G. (1957). Experimentelle Untersuchungen über die gezielte Handbewegung des Menschen. Akademie der Wissenschaft und der Literatur Abhandlungen der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse, 4, 105-127
- Wagenaar, W.A. (1969). Note on the construction of digrambalanced Latin squares. Psychological Bulletin, 72(6), 384-386
- Wagner, C.R.; Lederman, S.J.; Howe, R.D. (2002). A tactile shape display using RC servomotors. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Orlando, 354-356
- Walter, U. (1997). In 90 Minuten um die Erde. Würzburg: H. Stürtz AG
- Wang, M.J.; Bishu, R.R.; Rodgers, S.H. (1987). Grip strength changes when wearing three types of gloves. Proceedings of INTERFACE. Symposium on Human Factor and Industrial Design in Consumer Prod, 349-354
- Watt, G.D.; Money, K.E.; Vondar, R.L.; Thirsk, R.B.; Garneau, M.; Scully-Power, P. (1985). Canadian medical experiments on shuttle flight 41-G. Canadian Aeronautics and Space Journal, 31, 215-226
- Watt, S.J.; Bradshaw, M.F.; Rushton, S.K. (2000a). Field of view affects reaching, not grasping. Experimental Brain Research, 135, 411-416
- Watt, S.J.; Bradshaw, M.F. (2000b). Binocular cues are important in controlling the grasp but not the reach in natural prehension movements. Neuropsychologia, 38, 1473-1481
- Wei, R.; Gao, X.H.; Jin, M.H.; Liu, Y.W.; Liu, H.; Seitz, N.; Gruber, R.; Hirzinger, G. (2005). FPGA based Hardware Architecture for HIT/DLR Hand. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 523-528

- Weinreich, A. (2003). Die Hand. Theorie und Praxis der Sozialpädagogik, 1, 4-44
- Weisenberger, J.M.; Poling, G.L. (2004). Multisensory Roughness Perception of Virtual Surfaces: Effects of Correlated Cues. Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS'04, 1-8
- Westheimer, G. (1984). Spatial vision. Annual Review of Psychology, 35, 201-226
- Westhoff, K. (1995). Aufmerksamkeit und Konzentration. In Amelang, M. (Hrsg.). Enzyklopädie der Psychologie. Band C VII 2, Verhaltens- und Leistungsunterschiede. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, Oxford, Prag: Hogrefe Verlag
- Williams, L.J. (1995). Peripheral Target Recognition and Visual Field Narrowing in Aviators and Nonaviators. International Journal of Aviation Psychology, 5(2), 215-232
- Wilson, F.R. (1998). The Hand. How its use shapes the brain, language, and human culture. New York: Pantheon Books
- Wing, A.; Kristofferson, A. (1973). Response delays in the timing of discrete motor responses. Perception and Psychophysics, 14, 5-12
- Wing, A.M. (1996). Anticipatory control of grip force in rapid arm movements. In: A.M. Wing, P. Haggard, J.R. Flanagan (Hrsg.), Hand and Brain: Neuropsychology and psychology of hand movement. San Diego: Academic Press
- Witmer, B.G.; Bailey, J.H.; Knerr, B.W.; Parsons, K.C. (1996). Virtual spaces and real world places. Transfer of route knowledge. International Journal of Human Computer Studies, 45(4), 413-428
- Wyke, M. (1971). The effects of brain lesions on the performance of bilateral arm movements. Neuropsychologia, 9, 33-42
- Young, L.R.; Oman, C.M.; Watt, D.G.D. ; Money, K.E.; Lichtenberg, B.K. (1984). Spatial orientation in weightlessness and readaptation to Earth's gravity. Science, 225, 205-208
- Zhai, S.; Senders, J. W. (1997). Investigating coordination in multidegree of freedom control I: Time-ontarget analysis of 6 DOF tracking. Proceedings of 41st Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society, 1249-1254
- Zhao, S. (2003). "Being there" and the role of presence technology. In: Riva, G.; Davide, F.; Ijsselstein, W.A. (Hrsg.), Being There: concepts, effects, and measurement of user presence in synthetic environments, Amsterdam: Ios Press
- Zaghow, R. (1977). Untersuchung über die Feinkoordination im Greifraum. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Zander, J.; Morrison, J. (2008). Effects of pressure, cold and gloves on hand skin temperature and manual performance of divers. European Journal of Applied Physiology, 104, 237-244
- Zimbardo, P.G.; Gerrig, R.J. (1999). Wahrnehmung. In: Hoppe-Graff, S.; Engel, I. (Hrsg.). Psychologie. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer

Zimmermann, P.; Fimm, B. (2004). Die Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP). In Büttner, G.; Schmidt-Atzert, L. (Hrsg.). Diagnostik von Konzentration und Aufmerksamkeit. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, Oxford, Prag: Hogrefe Verlag

Zomeran, van A.H.; Brouwer, W.H. (1994). Clinical Neuropsychology of Attention. New York: Oxford Press

Zwisler, R. (2001). Haptische Wahrnehmung in der Mensch-Maschine-Interaktion. In: Grunwald, M.; Beyer, L. (Hrsg.). Der bewegte Sinn - Grundlage und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel: Birkhäuser Verlag

Anhang

A.1 Instruktion zur Montageaufgabe

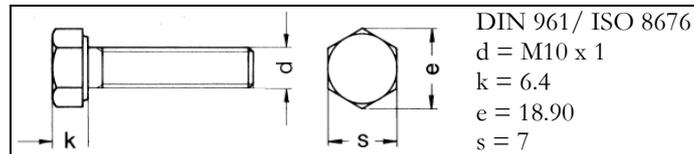
Bitte positionieren Sie sich so, dass Sie alle Gegenstände auf der Plattform sehen und erreichen können. Positionieren Sie ihre Hände auf den schwarzen Kreuzen. Diese markieren die Start- und die Stopposition. Vor sich sehen Sie ein Bild des Prüfstandes. Ich möchte Sie bitten alle Einzelteile des Prüfstandes in genau die Position zu bringen, in der sie auf dem Bild zu finden sind. D.h. Sie sollen die beiden Bajonett-Stecker aus Buchse 2 und 4 lösen und weiterhin die schwarzen Kabel von den grauen Halteschellen lösen, und dem Bild zufolge wieder in die richtigen Schellen befestigen. Anschließend führen Sie die Bajonett-Stecker in die Buchsen 1 und 4 ein und verschließen sie. Des Weiteren arbeiten Sie bitte mit dem Holzkästchen. Dieses sollen Sie öffnen, indem Sie den Magnetverschluss lösen. Nun können Sie die Box öffnen und Sie werden drei Schalter sehen, dabei sind die oberen Kippschalter und der untere Druckschalter zu betätigen. Um alle Einzelteile in die Position zu bringen, in der sie auf dem Bild zu finden sind, müssen Sie nun noch die Klappe des Kästchens schließen und die markierte Schraube oben links auf am Prüfstand lösen (ca. vier Umdrehungen). Zum Abschluss schrauben Sie die markierte Schraube unten rechts am Prüfstand komplett in das vorgegebene Gewinde (ca. vier Umdrehungen). Sofern der Prüfstand dem Zustand auf der Abbildung entspricht, gilt die Aufgabe als beendet. Bitte führen Sie dann ihre Hände auf die Ausgangsposition (schwarze Kreuze) zurück. Die Zeiterfassung stoppt hier.

Sie dürfen mit Ihren Händen die komplette Arbeitsplatte und den angebrachten Griff zur Stabilisierung und zur Lösung der Aufgabe nutzen, d.h. Sie können sie überall berühren und greifen. Die Reihenfolge in der Sie vorgehen, ist Ihnen überlassen. Bitte führen Sie die Aufgabe so schnell und so akkurat wie möglich aus. Die Zeiterfassung startet sobald ich das Startsignal gebe, beginnen Sie dann bitte unverzüglich mit der Bearbeitung.

A.2 Beschreibung der vier Validierungs-Aufgaben am Prüfstand

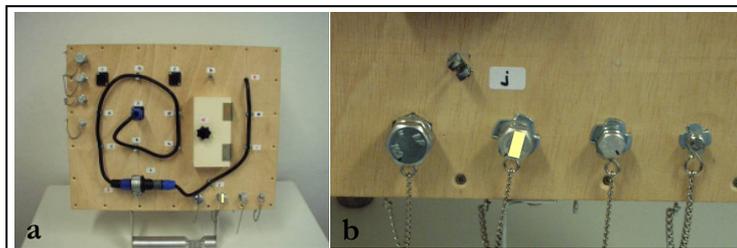
A.2.1 Schraubaufgabe

Eine Schraube DIN 961 M10 x 1 (vgl. Abb. 26) hatte komplett aus dem Gewinde herausgedreht und anschließend wieder vollständig bis zum Anschlag eingeschraubt zu werden.



**Abb. 36: Die zur Validierung verwendete Schraube
DIN 961 M10 x 1**

Vor Beginn der Aufgabendurchführung wurde jeder Versuchsperson die jeweilige Schraubrichtung (mit dem Uhrzeigersinn erzeugt das Lösen der Schraube und umgekehrt wird durch das Schrauben gegen den Uhrzeigersinn das Festziehen erreicht) erklärt. Um Verwechslungen mit den anderen Schrauben am Prüfstand zu verhindern, wurde diese Schraube mit einem gelben Strich markiert (vgl. Abb. 27). Das komplette Ein- und Ausschrauben umfasst vier Umdrehungen.



**Abb. 37: (a) Prüfstand, (b) Ausschnitt des Prüfstands mit
der markierten Schraube**

Diese Anzahl wurde gewählt, da bei einer höheren Anzahl der Umdrehungen bei gängigen Montagetätigkeiten Power-Tools zum Einsatz kommen und die Aufgabe nicht mehr ausschließlich mit den Händen verrichtet wird.

A.2.2 Steckaufgabe

Die Steckaufgabe umfasste das Lösen eines Bajonett-Steckers NL 2 FC ©Neutrik aus einer Buchse. Um Verwechslungen mit dem anderen Bajonett-Stecker am Prüfstand zu vermeiden, wurde der Stecker ähnlich wie die Schraube mit einem farbigen Strich markiert (vgl. Abb. 28).

Nachdem der Steckverschluss vollständig gelöst war, folgte der zweite Schritt der Aufgabe: Das Wiederherstellen der Steckverbindung. Dazu musste der Stecker durch eine Dreh-Schnapp-Bewegung in die Buchse eingeführt und verschlossen werden.

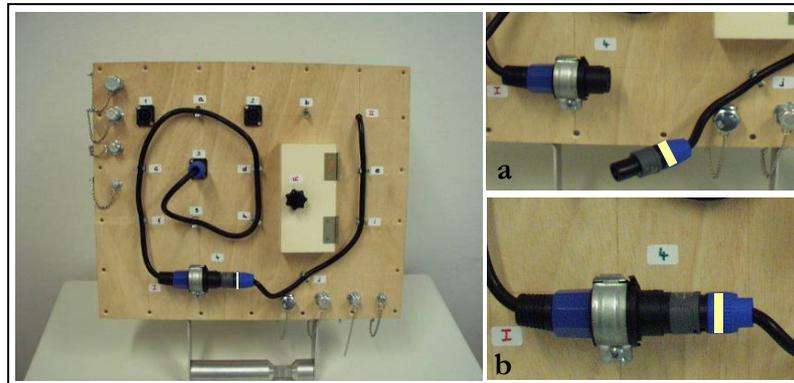


Abb. 38: Prüfstand mit (a) geöffnetem Stecker und (b) geschlossener Steckverbindung

A.2.3 Kabellegeaufgabe

Ein schwarzes Lautsprecherkabel mit einer Länge von 770 mm und einer Dicke von 1.5 mm^2 hatte in die vorgegebenen Kabelklemmen (a, c, d, f, g, h) am Prüfstand fixiert zu werden (vgl. Abb. 29). Die Form, die das Kabel nach der Anbringung beschrieb, entsprach in etwa einem Kreis. Die Reihenfolge in der die Klemmen verwendet werden sollten, war der jeweiligen Versuchsperson überlassen.

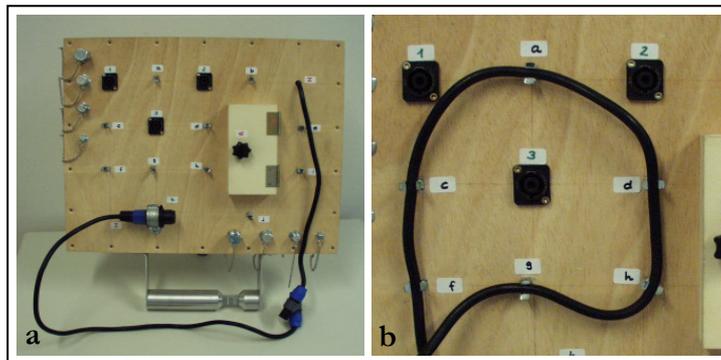


Abb. 39: (a) Prüfstand mit gelöstem Kabel, (b) Kabel in Kreisform verlegt

A.2.4 Schaltaufgabe

Die Schaltaufgabe setzte sich aus dem Öffnen des Holzkästchens, der Betätigung der drei Schalter und dem nachfolgenden verschließen des Kästchens zusammen (vgl. Abb. 30). Die Reihenfolge in der die Schalter betätigt wurden, war den Probanden überlassen.

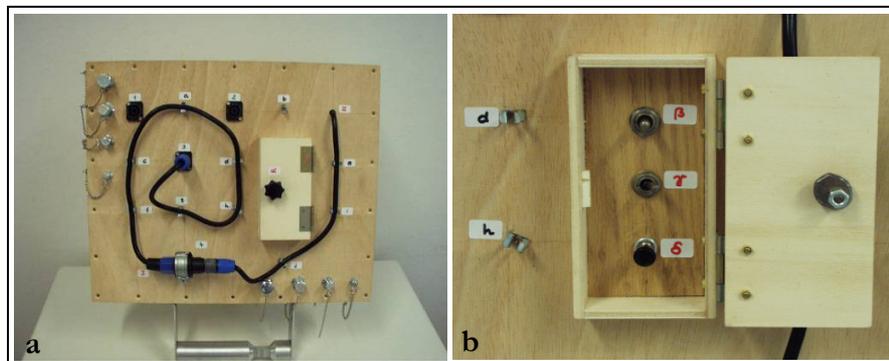


Abb. 40: (a) Der Prüfstand mit verschlossenem Kästchen, (b) geöffnetes Kästchen mit den drei Schaltern

A.3 Ergebnisse der Validierung des Prüfstandes

A.3.1 Perzentile der Handvermessung

Tabelle 17: Perzentile der Finger- und Daumenmaße der weiblichen Versuchspersonen

		Kleiner Finger		Ringfinger		Mittelfinger		Zeigefinger		Daumen	
		Breite	Länge	Breite	Länge	Breite	Länge	Länge	Breite	Länge	Breite
Perzentile	25	14.1000	54.6000	15.6000	68.1250	16.3000	73.9750	67.4750	16.9250	55.7500	17.7000
	50	14.7000	56.3500	16.0000	71.5500	16.9500	76.0000	69.6500	17.3500	58.7500	18.5000
	75	15.9250	60.1000	17.1250	73.9750	18.1750	80.2000	73.3000	19.0250	62.6750	19.5500

Tabelle 18: Perzentile der Handmaße der weiblichen Versuchspersonen

		Hand				
		Länge	Breite ohne Daumen	Breite mit Dau- men	Gelenk- Breite	Fläche
Perzentile	25	172.5000	76.3750	91.0250	53.5250	25.9250
	50	178.0000	79.0500	93.2000	54.1000	27.0500
	75	185.0000	81.0250	95.4000	55.2000	27.8000

Tabelle 19: Perzentile der Finger- und Daumenmaße der männlichen Versuchspersonen

		Kleiner Finger		Ringfinger		Mittelfinger		Zeigefinger		Daumen	
		Breite	Länge	Breite	Länge	Breite	Länge	Länge	Breite	Länge	Breite
Perzentile	25	15.4750	59.6000	17.3000	72.2750	17.9750	79.6750	72.6000	17.9500	59.5250	20.0750
	50	16.1500	63.4000	18.0000	75.2000	18.8000	82.3000	74.5000	19.0500	63.4500	20.9500
	75	16.6500	67.1250	19.1250	80.6000	19.8500	85.2500	78.2750	20.2000	67.0750	22.5250

Tabelle 20: Perzentile der Handmaße der männlichen Versuchspersonen

		Hand				
		Länge	Breite ohne Daumen	Breite mit Dau- men	Gelenk- Breite	Fläche
Perzentile	25	187.0000	84.6750	98.0000	56.5750	27.3750
	50	196.0000	87.4500	102.4000	59.9000	30.1000
	75	202.0000	91.0000	106.2000	61.5250	31.9000

A.3.2 Ausreißerbereinigung

Tabelle 21: Anzahl der Ausreißer mit z-Werten über 3.29

	Häufigkeit	Prozent
z-Wert unter 2.0	44	95.7
z-Wert größer 3.29	2	4.3
n	46	100.0

A.3.3 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten

Im Folgenden werden die Resultate des Kolmogorov-Smirnov-Tests zur Erfassung der Normalverteilung der Daten dargestellt. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse für die rechte und in Tabelle 21 die Ergebnisse für die linke Hand dargestellt. Tabelle 19 führt die Resultate hinsichtlich der Aufgaben am Prüfstand auf.

Tabelle 22: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die rechte Hand

	Statistik	df	Signifikanz
Tapping	.070	40	.200(*)
Aiming	.111	40	.200(*)
Steadiness	.160	40	.012
Lange Stifte stecken	.147	40	.030
Kurze Stifte stecken	.146	40	.031

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tabelle 23: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die linke Hand

	Statistik	df	Signifikanz
Tapping	.100	40	.200(*)
Aiming	.107	40	.200(*)
Steadiness	.201	40	.000
Lange Stifte stecken	.141	40	.043
Kurze Stifte stecken	.159	40	.013

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tabelle 24: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die Aufgaben am Prüfstand

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe	.155	40	.016
Steckaufgabe	.099	40	.200(*)
Schaltaufgabe	.122	40	.136
Kabelaufgabe	.136	40	.060

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.3.4 Ergebnisse des Validierungsexperimentes für die linke Hand

Tabelle 25: Korrelationsmatrix für die Ergebnisse der linken Hand bezogen auf die fünf bimanuellen Subtests der Motorischen Leistungsserie und die vier Aufgaben am Prüfstand

		Schraubaufgabe	Steckaufgabe	Schaltaufgabe	Kabelaufgabe
Tapping <i>Handgelenk-Finger- Geschwindigkeit</i>	r_s	.280	-.212	-.174	-.058
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.080	.480	.284	.721
	n	40	40	40	40
Aiming <i>Zielen</i>	r_s	.203	.435(**)	.292	.182
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.263	.019	.085	.290
	n	40	40	40	40
Steadiness <i>Arm-Handruhe</i>	r_s	-.100	.167	.213	.051
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.952	.303	.187	.756
	n	40	40	40	40
Lange Stifte ste- cken <i>Handgeschicklichkeit</i>	r_s	.400	.339	.618(**)	.617(**)
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.081	.332	.002	.003
	n	40	40	40	40
Kurze Stifte ste- cken <i>Fingergeschicklichkeit</i>	r_s	.440(**)	.292	.075	.194
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.004	.068	.646	.299
	n	40	40	40	40

(**) Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant.

A.4 Ergebnisse des Experiments zur *Destabilisierung*

A.4.1 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten

Tabelle 26: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die sitzende, stabile Bedingung

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe	.099	30	.200(*)
Steckaufgabe	.168	30	.030
Kabelaufgabe	.224	30	.001
Schaltaufgabe	.120	30	.200(*)

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tabelle 27: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die destabilisierte Bedingung

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe	.208	30	.002
Steckaufgabe	.209	30	.002
Kabelaufgabe	.142	30	.125
Schaltaufgabe	.221	30	.001

A.5 Ergebnisse des Experiments zur *Blickfeldeinschränkung*, Reduktion der *Beweglichkeit* und der *taktilen Wahrnehmung* der Hände

A.5.1 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten

Tabelle 28: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben und Bedingungen

		Statistik	df	Signifikanz
Schraub- aufgabe	Vergleichsbedingung	.167	30	.032
	Handschuhe	.156	30	.060
	Helm	.397	30	.000
	Handschuhe und Helm	.215	30	.001
Steck- aufgabe	Vergleichsbedingung	.168	30	.030
	Handschuhe	.199	30	.004
	Helm	.248	30	.000
	Handschuhe und Helm	.181	30	.014
Schalt- aufgabe	Vergleichsbedingung	.120	30	.200(*)
	Handschuhe	.216	30	.001
	Helm	.149	30	.087
	Handschuhe und Helm	.112	30	.200(*)
Kabel- aufgabe	Vergleichsbedingung	.224	30	.001
	Handschuhe	.134	30	.180
	Helm	.214	30	.001
	Handschuhe und Helm	.151	30	.081

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.5.2 Ergebnisse der Post hoc Analyse nach Siegel et al. (1988)

Die folgenden Tabellen geben Auskunft über die Ergebnisse der Post hoc Analyse nach Siegel et al (1988). Die mittleren Ränge der Vergleichsbedingung werden jeweilig mit \bar{R}_u , die mittleren Ränge der anderen Bedingung werden jeweils mit \bar{R}_v gekennzeichnet. Die Differenzen können anschließend mit der kritischen Differenz, die sich aus der Stichprobengröße n, der Anzahl der Bedingungen k und dem entsprechenden z-Wert errechnet, verglichen werden.

$$|\bar{R}_h - \bar{R}_v| \geq z_{\alpha/k(k-1)} \sqrt{\frac{k(k+1)}{6n}}$$

$$|\bar{R}_h - \bar{R}_v| \geq .2.635 \sqrt{\frac{4(4+1)}{6 \times 30}}$$

$$|\bar{R}_h - \bar{R}_v| \geq .878$$

Tabelle 29: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Schraubaufgabe über die verschiedenen Experimentalbedingungen und die jeweilige Differenz zum mittleren Rang der Vergleichsbedingung \bar{R}_u

Gegenüberstellung der Bedingungen	\bar{R}_u	\bar{R}_v	$\bar{R}_u - \bar{R}_v$	$|\bar{R}_u - \bar{R}_v|$
Vergleichsbedingung – Helm	1.40	1.67	0.27	0.27
Vergleichsbedingung – Handschuh	1.40	3.57	-2.17	2.17
Vergleichsbedingung – Helm und Handschuh	1.40	3.37	-1.97	1.97

Tabelle 30: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Steckaufgabe über die verschiedenen Experimentalbedingungen und die jeweilige Differenz zum mittleren Rang der Vergleichsbedingung \bar{R}_u

Gegenüberstellung der Bedingungen	\bar{R}_u	\bar{R}_v	$\bar{R}_u - \bar{R}_v$	$|\bar{R}_u - \bar{R}_v|$
Vergleichsbedingung – Helm	1.92	1.55	0.37	0.37
Vergleichsbedingung – Handschuh	1.92	3.25	-1.33	1.33
Vergleichsbedingung – Helm und Handschuh	1.92	3.28	-1.36	1.36

Tabelle 31: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Schaltaufgabe über die verschiedenen Experimentalbedingungen und die jeweilige Differenz zum mittleren Rang der Vergleichsbedingung \bar{R}_u

Gegenüberstellung der Bedingungen	\bar{R}_u	\bar{R}_v	$\bar{R}_u - \bar{R}_v$	$|\bar{R}_u - \bar{R}_v|$
Vergleichsbedingung – Helm	1.78	1.57	0.21	0.21
Vergleichsbedingung – Handschuh	1.78	3.33	-1.55	1.55
Vergleichsbedingung – Helm und Handschuh	1.78	3.32	-1.54	1.54

Tabelle 32: Darstellung der mittleren Ränge \bar{R}_v der Kabelaufgabe über die verschiedenen Experimentalbedingungen und die jeweilige Differenz zum mittleren Rang der Vergleichsbedingung \bar{R}_u

Gegenüberstellung der Bedingungen	\bar{R}_u	\bar{R}_v	$\bar{R}_u - \bar{R}_v$	$|\bar{R}_u - \bar{R}_v|$
Vergleichsbedingung – Helm	1.63	1.45	0.18	0.18
Vergleichsbedingung – Handschuh	1.63	3.33	-1.70	1.70
Vergleichsbedingung – Helm und Handschuh	1.63	3.58	-1.95	1.95

A.6 Materialien und Ergebnisse des Telemanipulations- Experiments

A.6.1 Auszüge aus dem Fragebogen zum Präsenzerleben

Darstellung eines Auszuges aus dem Fragebogen nach Scheuchenpflug zur Erfassung des Präsenzerlebens. Die hier abgebildeten Items und die entsprechenden Antwortskalen wurden für die Befragung der Probanden im Telemanipulationsexperiment verwendet.

1. Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit dem Testbed?

1	2	3	4	5	6	7
sehr natürlich			weder noch			sehr unnatürlich

2. Wie stark fühlten Sie sich in die entfernte Umgebung hineinversetzt?

1	2	3	4	5	6	7
sehr stark			weder noch			sehr schwach

3. Konnten Sie sich eher auf die Ausführung Ihrer Aufgaben konzentrieren oder mussten Sie sich eher auf das Bedienelement konzentrieren?

1	2	3	4	5	6	7
eher Aufgabe			weder noch			eher Bedienelement

A.6.2 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Tabelle 33: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben und alle Bedingungen

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe <i>kein Delay</i>	.150	24	.174
Steckaufgabe <i>kein Delay</i>	.232	24	.002
Schaltaufgabe <i>kein Delay</i>	.123	24	.200(*)
Schraubaufgabe <i>600ms Delay</i>	.144	24	.200(*)
Steckaufgabe <i>600ms Delay</i>	.276	24	.000
Schaltaufgabe <i>600ms Delay</i>	.106	24	.200(*)

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.6.3 Analyse des Zusammenhangs zwischen Präsenzerleben und Performanz

Da die Variablen des Präsenzerlebens ordinalskaliert (Bortz, 2006) sind, die des Präsenzerlebens hingegen intervallskaliert, wird statt der Produkt-Moment-Korrelation eine Rangkorrelation angewendet. Dabei stellt die Rangkorrelation nach Spearman für diesen Datensatz eine zulässige Statistik dar (Marx, 1982). Der entsprechende Korrelationskoeffizient r_s errechnet sich aus folgender Formel:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)}$$

Wobei d_i die Differenz der Rangplätze, der Untersuchungseinheit im Hinblick auf die beiden Merkmale Präsenzerleben und Performanz beschreibt. Das n hingegen steht für die Gesamtstichprobe. Die Ergebnisse der entsprechenden Berechnung, sowie der Überprüfung der Signifikanz (Bortz, 1989) werden in den nachfolgenden Korrelationstabellen dargestellt.

Tabelle 34: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen Präsenzerleben und Performanz in der Bedingung ohne *Zeitverzögerung*

		Schraubaufgabe	Steckaufgabe	Schaltaufgabe
Natürlichkeit <i>der Interaktion</i>	r_s	.020	.417	.397
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.928	.053	.054
	n	24	24	24
Hineinversetzen <i>in die fremde Umgebung</i>	r_s	.345	.309	-.040
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.097	.141	.853
	n	24	24	24
Konzentration <i>auf die Aufgabe</i>	r_s	.013	.358	.168
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.953	.086	.432
	n	24	24	24

Tabelle 35: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen Präsenzerleben und Performanz in der Bedingung mit *Zeitverzögerung*

		Schraubaufgabe	Steckaufgabe	Schaltaufgabe
Natürlichkeit <i>der Interaktion</i>	r_s	.206	.390	.379
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.335	.059	.067
	n	24	24	24
Hineinversetzen <i>in die fremde Umgebung</i>	r_s	.154	.006	.022
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.473	.979	.918
	n	24	24	24
Konzentration <i>auf die Aufgabe</i>	r_s	.023	.198	-.055
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.915	.354	.798
	n	24	24	24

A.7 Überprüfung der Normalverteilung der Daten beim Unterwasserszenario

Tabelle 36: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests der Daten aus dem Unterwasser- und dem Telemanipulationsszenario

	Statistik	df	Signifikanz
Fingergeschicklichkeit Unterwasserszenario ohne Handschube	.115	24	.200(*)
Handgeschicklichkeit Unterwasserszenario ohne Handschube	.156	24	.134
Zielen Unterwasserszenario ohne Handschube	.233	24	.002
Fingergeschicklichkeit Unterwasserszenario Handschube	.096	24	.200(*)
Handgeschicklichkeit Unterwasserszenario Handschube	.113	24	.200(*)
Zielen Unterwasserszenario Handschube	.234	24	.001
Fingergeschicklichkeit Telemanipulations- szenario	.144	24	.200(*)
Handgeschicklichkeit Telemanipulations- szenario	.106	24	.200(*)
Zielen Telemanipulations- szenario	.276	24	.000

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.8 Ergebnisse der Testreihe zur *konzentrierten Aufmerksamkeit*

A.8.1 Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung und *konzentrierter Aufmerksamkeit* unter Standardbedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnistabellen für die Untersuchung zum Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung unter Standardbedingungen und *konzentrierte Aufmerksamkeit* dargestellt. In einem ersten Schritt erfolgt die Überprüfung der Normalverteilung der entsprechenden Datensätze (vgl. Anhang A.7.1.1 und Anhang A.7.1.2). Im Anschluss wird die Korrelationstabelle zum Zusammenhang zwischen den jeweiligen Leistungen dargestellt (vgl. Anhang A.7.1.3).

A.8.1.1 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Tabelle 37: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle verwendeten Subtests der Motorischen Leistungsserie und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

	Statistik	df	Signifikanz
Lange Stifte stecken <i>Handgeschicklichkeit</i> rechte Hand	.145	40	.034
Kurze Stifte stecken <i>Fingergeschicklichkeit</i> rechte Hand	.152	40	.021
Aiming <i>Zielen</i> rechte Hand	.117	40	.177
Lange Stifte stecken <i>Handgeschicklichkeit</i> linke Hand	.137	40	.056
Kurze Stifte stecken <i>Fingergeschicklichkeit</i> linke Hand	.145	40	.033
Aiming <i>Zielen</i> linke Hand	.114	40	.200(*)
Konzentrationsleistung <i>Rawwert</i>	.099	40	.200(*)

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.8.1.2 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Tabelle 38: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben am Prüfstand und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i>	.167	40	.032
Steckaufgabe <i>Zielen</i>	.168	40	.030
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i>	.120	40	.200(*)
Kabelaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i>	.224	40	.001
Konzentrationsleistung <i>Rohwert</i>	.099	40	.200(*)

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.8.1.3 Ergebnisse der Korrelationsberechnung nach Spearman

Tabelle 39: Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen *konzentrierter Aufmerksamkeit* und der Leistung hinsichtlich der Montageaufgaben

		<i>Konzentrierte Aufmerksamkeit</i> <i>Rohwert</i>
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i>	r_s	.031
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.872
	n	40
Steckaufgabe <i>Zielen</i>	r_s	-.126
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.508
	n	40
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i>	r_s	.017
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.929
	n	40
Kabelaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i>	r_s	-.299
	$p_{\text{zwei-seitig}}$	.108
	n	40

A.8.2 Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung und *konzentrierter Aufmerksamkeit* unter Bedingungen der Telemanipulation

Im Folgenden wird die Ergebnistabelle für die Untersuchung zum Zusammenhang zwischen feinmotorischer Leistung unter dem Einfluss der Rahmenbedingungen des verwendeten Telemanipulationsszenarios und der *konzentrierten Aufmerksamkeit* dargestellt.

Diese Tabelle 37 bezieht sich auf die Überprüfung der Verteilungsform des Datensatzes.

A.8.2.1 Überprüfung der Daten auf Normalverteilung

Tabelle 40: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests über alle Aufgaben am Prüfstand mit und ohne Delay, und der *konzentrierten Aufmerksamkeit*

	Statistik	df	Signifikanz
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> 600ms Delay	.144	24	.200(*)
Steckaufgabe <i>Zielen</i> 600ms Delay	.276	24	.000
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> 600ms Delay	.106	24	.200(*)
Schraubaufgabe <i>Fingergeschicklichkeit</i> kein Delay	.150	24	.174
Steckaufgabe <i>Zielen</i> kein Delay	.232	24	.002
Schaltaufgabe <i>Handgeschicklichkeit</i> kein Delay	.123	24	.200(*)
Konzentrationsleistung <i>Robwert</i>	.110	24	.200(*)

* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

A.9 Punkt-biserialer Korrelation

Soll der Zusammenhang zwischen einer intervallskalierten und einer dichotomen Variable untersucht werden, wird statt der biserialen die Punkt-biserialer Korrelation angewendet. Dies erklärt sich aus der Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung der Daten für biserialer Korrelationen (Bortz, 1989). Der entsprechende Korrelationskoeffizient r_{pbis} errechnet sich aus folgender Formel:

$$r_{pbis} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_0}{s_y} \cdot \sqrt{\frac{n_0 \cdot n_1}{n^2}}$$

Wobei n_0 , n_1 die Anzahl der Untersuchungseinheiten; \bar{y}_0 , \bar{y}_1 die durchschnittliche Ausprägung des kontinuierlichen Merkmals darstellen. Das n hingegen steht für die Gesamtstichprobe und s_y für die Streuung der kontinuierlichen Variablen (Bortz, 1989).