

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

**Anwendungspotential von Telepräsenz- und
Teleaktionssystemen für die Präzisionsmontage**

Andrea Acker

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. med., Dr.-Ing. habil. E. Wintermantel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. H. Ulbrich

Die Dissertation wurde am 24.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 06.06.2011 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Glossar	XI
Abkürzungen	XV
Formelverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Produktionstechnik heute	1
1.3 Trend zur Miniaturisierung	3
1.4 Teleoperation als neue Möglichkeit in der Produktion	7
1.4.1 Definition	7
1.4.2 Telepräsenz	11
1.4.3 Teleaktion	11
1.4.4 Anwendungspotential der Teleoperation für die Montage	12
1.5 Zielsetzung der Arbeit	14
1.6 Vorgehensweise	15
2 Stand der Forschung und Technik	17
2.1 Allgemeines	17
2.2 Montage miniaturisierter Systeme	17
2.2.1 Manuelle und teilautomatisierte Präzisionsmontage	18
2.2.2 Automatisierte Präzisionsmontage	20
2.2.3 Zusammenfassung	22
2.3 Anwendungsgebiete der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie	23
2.3.1 Minimalinvasive Chirurgie	23
2.3.2 Serviceroboter im Weltraum	24
2.3.3 Handhabung gefährlicher Objekte	24
2.3.4 Handhabung biologischen Materials	25
2.3.5 Steuerung von Industrierobotern	26

2.3.6	Präzisions- und Mikromontage	27
2.4	Signaldarstellung im HVA-Arbeitsraum	29
2.4.1	Visualisierung	29
2.4.2	Akustik	30
2.4.3	Haptik	32
2.4.4	Lernen in multimodalen Arbeitsräumen	33
2.4.5	Latenzzeiten	34
2.5	Handlungsbedarf	36
3	Kriterien für die Anwendung der Teleoperationstechnologie	37
3.1	Allgemeines	37
3.2	Kriterienkatalog	38
3.3	Anwendung des Kriterienkatalogs	41
3.4	Zusammenfassung	44
4	Gestaltung von Teleoperationssystemen für den industriellen Einsatz	47
4.1	Allgemeines	47
4.2	Gestaltung der Operatorseite	47
4.2.1	Visualisierung	47
4.2.2	Akustische Wiedergabe	51
4.2.3	Haptische Rückkopplung	53
4.3	Gestaltung des Teleoperators	57
4.3.1	Freiheitsgrade	57
4.3.2	Werkzeuge	59
4.4	Versuchsaufbau für die telepräsenste Präzisions- und Mikromontage	63
4.4.1	Systemkomponenten	63
4.4.2	Telepräsenzfunktionen	64
4.5	Zusammenfassung	67
5	Untersuchung von Einsatzfaktoren	69
5.1	Allgemeines	69
5.2	Vorversuch: Skalierung der Operatoreingabe	69
5.3	Vorversuch: Steuerungsart des Teleoperators	76

5.4	Vorversuch: Steuerung der Vertikalen	78
5.5	Vorversuch: Einfluss der Zeitverzögerung auf die Performanz	80
5.6	Einfluss haptischer Rückmeldung	83
5.6.1	Versuchsziel und Durchführung	83
5.6.2	Ergebnisse	85
5.6.3	Fazit	87
5.7	Visuelles und haptisches Lernen	88
5.7.1	Versuchsziel und Durchführung	88
5.7.2	Ergebnisse	90
5.7.3	Fazit	91
5.8	Schlussfolgerungen	93
6	Technisch-wirtschaftliche Betrachtung	95
6.1	Technische Gestaltungsaspekte	95
6.1.1	Erweiterung der Krafrückkopplung beim Greifen	95
6.1.2	Krafrückkopplung bei unebenen Oberflächen	97
6.1.3	Vorgehen zur Planung telepräsent gesteuerter Montageanlagen	98
6.2	Aspekte zur Wirtschaftlichkeit	101
6.2.1	Ressourcenverbrauch	101
6.2.2	Zuverlässigkeit	104
6.2.2.1	Allgemeine Berechnung der Zuverlässigkeit	105
6.2.2.2	Zuverlässigkeit des Menschen	106
6.2.2.3	Zuverlässigkeit von TPTA-Systemen	107
6.2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	111
6.2.3.1	Investitionskosten	111
6.2.3.2	Maschinenstundensatz	111
6.2.3.3	Variable Kosten	115
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
8	Literaturverzeichnis	121
9	Anhang	155
9.1	Kriterienkataloge für verschiedene Aufgabenstellungen	155

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Einflüsse auf die Produktion	2
Abbildung 1.2:	Größenordnungen verschiedener Montagebereiche (nach GREITMANN 1998).....	4
Abbildung 1.3:	Einflüsse auf die Mikroproduktion.....	5
Abbildung 1.4:	Problemfelder bei der manuellen Mikromontage.....	6
Abbildung 1.5:	Teleaktions- und Telepräsenzsystem.....	9
Abbildung 1.6:	Operatorarbeitsplatz für die teleoperierte Mikromontage (Quelle: PETZOLD 2007, S. 137).....	10
Abbildung 1.7:	Teleoperationstechnologie als Lösungsansatz bei der manuellen Montage von Mikroprodukten.....	13
Abbildung 1.8:	Vorgehensweise der Arbeit	16
Abbildung 2.1:	Zusammenhang zwischen Stückzahl und Anlagenflexibilität.....	18
Abbildung 2.2:	Manuelle Montage unter dem Mikroskop im Reinraum	19
Abbildung 2.3:	Versuchsstand des DLR für den Einsatz von telepräsent gesteuerten Robotern in Weltraumstationen (STOLL et al. 2009)	24
Abbildung 2.4:	TPTA-System zur Handhabung schwerer Lasten (Quelle: REINHART & RADT 2008)	27
Abbildung 2.5:	Performanz des Operators in Abhängigkeit der Verzögerung der Signallaufzeiten (PONGRAC 2008, S. 201)	35
Abbildung 4.1:	PC-System mit Shutterbrille für eine dreidimensionale Sichtweise (links) und Head Mounted Display (rechts)	48
Abbildung 4.2:	Virtuelle Mikromontage mit dem Haptic Master (links), virtuelle Roboter- montage mit dem Immersion Joystick (rechts)	54
Abbildung 4.3:	Montageprozesse und Ableitung der Freiheitsgrade	60
Abbildung 4.4:	Menschliches und maschinelles Greifen mit Zuordnung der angesprochenen Sinne zu den Einzeltätigkeiten sowie deren Entsprechungen als messbare Signale bei Fernsteuerung und Automatisierung	61

Abbildung 4.5:	Vorgehen zur Werkzeugauswahl für Telepräsenzsysteme für Anwendungen im industriellen Einsatz am Beispiel der Montage	62
Abbildung 4.6:	TPTA-System für die Präzisions- und die Mikromontage	64
Abbildung 4.7:	Schematischer Aufbau des TPTA-Systems für die Präzisions- und die Mikromontage	65
Abbildung 4.8:	Visualisierung: schräg gestellte Überblickskamera (links), Vergrößerungskamera in Draufsicht auf einen gegriffenen Mikrochip (rechts)	66
Abbildung 5.1:	Prozentuale Verteilung von Produktionsvorgängen (nach LOTTER 1986)	70
Abbildung 5.2:	Skalierung und Wirkrichtung der Übertragungsgrößen zwischen Operator und Teleoperator	71
Abbildung 5.3:	Versuchsaufgabe zur Untersuchung der Skalierung zwischen Operator- und Teleoperatorbewegung mit Blickrichtung des Operators (vergrößert)	72
Abbildung 5.4:	Abweichungen bei der Trackingaufgabe, dargestellt als mittlere Abweichungen mit Standardfehler in Abhängigkeit der Skalierungsstufe	74
Abbildung 5.5:	Insgesamt zurückgelegte Distanz bei Tracking und Positionierung im Versuch bei verschiedenen Skalierungsstufen	75
Abbildung 5.6:	Positionssteuerung eines Teleoperators bei Auslenkung des Joysticks in die Positionen 1 bis 3	77
Abbildung 5.7:	Ansteuerung der vertikalen z-Richtung mit einem 2D-Joystick mit zwei unterschiedlichen Mapping-Strategien: objekt- und körperbezogen	79
Abbildung 5.8:	Signallaufzeiten im telepräsenten System	81
Abbildung 5.9:	Ergebnisse für die Tracking- (links) und die Positionieraufgabe (rechts) bei unterschiedlichen Latenzzeiten	83
Abbildung 5.10:	Kräfte beim pick-and-place-Vorgang (mit Standardfehler)	86
Abbildung 5.11:	Zeit zur Erfüllung der Aufgabe (mit Standardfehler) bei verschiedenen Arten der Rückkopplung des Greiferkontakts	86
Abbildung 5.12:	Ergebnis der Probandenbefragung zum Einfluss von haptischer Rückkopplung auf die Aufgabenausführung	87

Abbildung 5.13: Schematischer Versuchsaufbau für den Lernvorgang (links) und die Aufzeichnung der Aufgabe durch einen Experten (Lehrvorgang, rechts) unter Verwendung des in Abschnitt 4.4 beschriebenen TPTA-Systems (Bezeichnungen siehe Abbildung 4.7).....	89
Abbildung 5.14 Mittelwerte der Trackingzeiten je Durchgang, unterschieden nach der Lernbedingung (mit Standardabweichung).....	90
Abbildung 5.15: Mittelwerte für die aufgebrauchte Druckkraft bei pick-and-place-Aufgaben	91
Abbildung 6.1: Greifer zur Krafterfassung: schematisch im CAD (links) und real mit gegriffenem Mikrochip (rechts)	95
Abbildung 6.2: Endeffektor mit Sensorik zur Zustandserfassung (schematisch, Draufsicht).....	96
Abbildung 6.3: Verlauf von Greifweg und Greifkraft bei einem pick-Vorgang ...	97
Abbildung 6.4: Vermessung der Oberfläche einer Platine	98
Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des verbesserten TPTA-Systems für die Präzisions- und die Mikromontage (vgl. Bezeichnungen auch mit Abbildung 4.7).....	99
Abbildung 6.6: Vorgehen zur Bewertung der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie als Lösung für die Ausführung einer Aufgabe	100
Abbildung 6.7: Ressourcenverbrauch im manuellen, im teleoperierten, im teil- und im vollautomatisierten Montagesystem.....	103
Abbildung 6.8: Beispiele für Zuverlässigkeitsnetzwerke bei der Montage.....	106
Abbildung 6.9: Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Teleoperation bzw. die damit verbundene Erhöhung der Zuverlässigkeit einer Teilfunktion...	110
Abbildung 6.10: Kosten pro Stück, Ausschussrate bei allen Systemen bei 10 %, in Abhängigkeit der Taktzeit, normiert auf die Kosten der manuellen Montage	116
Abbildung 6.11: Kosten pro Stück in Abhängigkeit der Taktzeit und der Ausschussrate bei mittlerer Fehlerrate (10 %) der manuellen Montage (vgl. HEP Nr. 2 für eine nicht routinemäßige Aufgabe in Tabelle 6.2), normiert auf die Kosten der manuellen Montage	117

Abbildung 6.12: Kosten pro Stück in Abhängigkeit der Taktzeit und der Ausschussrate bei hoher Fehlerrate(30 %) der manuellen Montage (vgl. HEP Nr. 1 für eine komplizierte nicht routinemäßige Aufgabe in Tabelle 6.2), normiert auf die Kosten der manuellen Montage	118
Abbildung 9.1: Kriterienkatalog für die Telepräsenz zur Anwendung in der Präzisions- und in der Mikromontage.....	155
Abbildung 9.2: Kriterienkatalog für die Teleaktion zur Anwendung in der Präzisions- und in der Mikromontage.....	156
Abbildung 9.3: Kriterienkatalog für die Telepräsenz bei Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie	157
Abbildung 9.4: Kriterienkatalog für die Teleaktion bei Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie	158
Abbildung 9.5: Kriterienkatalog für die Telepräsenz beim Anwendungsfall eines Weltraumeinsatzes	159
Abbildung 9.6: Kriterienkatalog für die Teleaktion beim Anwendungsfall eines Weltraumeinsatzes	160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Durch Telepräsenz ansprechbare Sinne des Menschen.....	12
Tabelle 3.1:	Kriterienkatalog für den Einsatz der Teleaktionstechnologie	40
Tabelle 3.2:	Kriterienkatalog für den Einsatz der Telepräsenztechnologie	41
Tabelle 3.3:	Bewertung der Eignung der Teleaktionstechnologie für die Präzisions- und die Mikromontage.....	43
Tabelle 3.4:	Bewertung der Eignung der Telepräsenztechnologie für die Präzisions- und die Mikromontage.....	44
Tabelle 4.1:	Geräte zur Visualisierung in TPTA-Systemen	49
Tabelle 4.2:	Bewertung ausgewählter Visualisierungsmodi (Bewertungseinheiten: 4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig)	51
Tabelle 4.3:	Bewertung ausgewählter Geräte für die akustische Wiedergabe (Bewertungseinheiten: 4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig)	53
Tabelle 4.4:	Auswahl von Ein-/Ausgabe-Geräten	55
Tabelle 4.5:	Bewertung haptischer Ein-/Ausgabe-Geräte (Bewertungseinheiten: 4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig).....	57
Tabelle 4.6:	Mikrogreifprinzipien und die Möglichkeiten zu Prozessrückmeldungen durch die Visualisierung des Vorgangs sowie die Erfassung des Greifzustands	62
Tabelle 5.1:	Skalierungsstufen des Teleoperators zur Übertragung der Bewegungen des Operators auf Geschwindigkeiten des Teleoperators	72
Tabelle 5.2:	Ergebnisse der Analysen zur Geschwindigkeitsskalierung.....	75
Tabelle 5.3:	Ergebnisse einer Umfrage zum subjektiven Empfinden der Probanden bezüglich der Art der Steuerung (Anzahl der Nennungen der Probanden) und durchschnittliche Zeit zur Aufgabenerfüllung.....	77
Tabelle 5.4:	Ergebnisse zum Vergleich der geschwindigkeits- und der positionsbasierten Steuerung	78

Tabelle 5.5:	Ergebnisse einer Befragung zur Steuerungsweise der z-Richtung (Höhe) bei verschiedenen Perspektiven, Anzahl der Nennungen für verschiedene Ansichten eines Flugzeugs und eines Mikrosystems.....	80
Tabelle 5.6:	Ergebnis für die Befragung zur Steuerung der Senkrechten mit einem zweidimensionalen Joystick.....	80
Tabelle 5.7:	Ergebnisse für den Einfluss der Latenzzeit.....	83
Tabelle 5.8:	Ergebnisse der haptischen Rückkopplung bei Montageaufgaben	88
Tabelle 5.9:	Ergebnisse für visuelles und visuell-haptisches Lernen bei Mikromontagevorgängen.....	92
Tabelle 5.10:	Einsatzfaktoren in der telepräsenten Präzisions- und Mikromontage.....	93
Tabelle 6.1:	Einfluss der Teleoperation auf Produktionsressourcen im Vergleich zur manuellen Präzisionsmontage.....	102
Tabelle 6.2:	Fehlerwahrscheinlichkeiten des Menschen (Quellen: KIRWAN 1996, GROZDANOVIC & STOJILJKOVIC 2006) bei verschiedenen Tätigkeiten, welche in Produktionsumgebungen auftreten	107
Tabelle 6.3	Zuverlässigkeiten von Teilschritten und resultierende Gesamtzuverlässigkeiten bei einem Beispielprozess.....	109
Tabelle 6.4:	Investitionskostenschätzung für Teleaktionssysteme	112
Tabelle 6.5:	Investitionskostenschätzung für Telepräsenzsysteme	113
Tabelle 6.6:	Maschinenstundensätze für die manuelle Montage sowie für automatisierte und TPTA-Systeme im Vergleich.....	114
Tabelle 6.7:	Rüstkosten für die manuelle Montage sowie für automatisierte und Telepräsenzsysteme im Vergleich	115

Glossar

- Augmentierte Realität:** Wird die Realität durch Zusatzinformationen, beispielsweise durch optische Anzeigen oder virtuelle Einblendungen, angereichert, so wird von augmentierter Realität gesprochen (EURSCH 2010).
- Baukastensystem:** Baukastensysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie den Aufbau einer begrenzten oder unbegrenzten Zahl von Produkten aus einer Sammlung genormter Bausteine auf Grund eines Programms oder Baumusterplans ermöglichen (BOROWSKI 1961; SCHÜNEMANN 2003).
- Handhaben:** Der Begriff des Handhabens ist als „Schaffen, definiertes Verändern oder vorübergehendes Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung (Orientierung und Position) von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem“ definiert (VDI 2860 1990). Das Handhaben wird weiterhin unterteilt in die Teilfunktionen Speichern, Mengenveränderung, Bewegen, Sichern und Kontrollieren.
- Immersion:** Als Immersion wird das Wahrnehmen eines Operators einer virtuellen oder teleoperierten Umgebung verstanden. Der Grad der Immersion ist ein Indiz für das Präsenzerleben des Operators (vgl. auch EURSCH 2010, S. 63; FREYBERGER 2008, S. 13).
- Manuelle Montage:** Der Mensch führt selbst unter Verwendung von Hilfsmitteln, beispielsweise durch Nutzung von Werkzeugen, einen Montagevorgang aus. Hierfür nutzt er seine Geschicklichkeit, seine Sinnesorgane und seine kognitiven Fähigkeiten (LOTTER 1982).
- Modalität:** In der Sinnesphysiologie bezeichnet man als Modalität einen menschlichen Sinn wie Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen (FREYBERGER 2008, S.12).
- Modularität:** Ein komplexes Produkt oder Verfahren besteht aus getrennt voneinander entwickelten und gefertigten Teilsystemen, die zusammengesetzt ein funktionierendes Ganzes ergeben. Modularität wird erreicht, indem die Konstruktionsinformationen eines Systems in sichtbare Konstrukti-

onsvorgaben und verborgene Konstruktionsparameter unterteilt werden (BALDWIN & CLARK 2000; SCHÜNEMANN 2003).

- Multimodalität:** Dieser Begriff beschreibt in Telepräsenzsystemen die Wahrnehmung eines Reizes mit mehr als einem Sinnesorgan. Bei der Reizerfassung werden beim Menschen folglich mehrere Sinne angesprochen (FREYBERGER 2008, S. 12).
- Operator:** In Telepräsenz- und Teleaktionssystemen wird der menschliche Bediener als Operator bezeichnet (ANTON 2002).
- Peg-in-hole:** Dies ist ein Aufgabentyp, bei welchem ein Objekt in eine Aussparung eingeführt werden muss.
- Pick-and-place:** Dies ist eine Aufgabe, welche aus einem Greifvorgang (pick) eines Objekts und dessen Absetzen (place) besteht.
- Remote-Umgebung:** Der Begriff beschreibt die Lokalität, an der sich das vom menschlichen Bediener ferngesteuerte System befindet (Teleoperationsort), um die eigentliche Handhabungsoperation durchzuführen (ANTON 2002).
- Teach-in:** Dies ist eine Vorgehensweise zur Programmierung von automatisierten Abläufen an Maschinen, wobei jede Position bzw. jeder Befehl in der vorgesehenen Reihenfolge vom Werker angesteuert und anschließend für das Automatikprogramm abgespeichert wird.
- Teleaktion:** Unter Teleaktion wird die Ausführung einer Handlung in einer entfernten Umgebung verstanden. Ein menschlicher Operator ist dabei nicht selbst am Aktionsort tätig, sondern agiert durch Fernsteuerung eines am Handlungsort befindlichen Teleoperators.
- Teleoperator:** Ein Teleoperator ist ein universell einsetzbares Mensch-Maschine-System, welches es dem Operator erlaubt, Handhabungsoperationen an einem für ihn nicht direkt zugänglichen Teleoperationsort durchzuführen. Charakteristikum für den Teleoperator ist die indirekte Interaktion zwischen dem Bediener und einem zu manipulierenden Gegenstand (ANTON 2002).

- Telepräsenz:** Die Wahrnehmung einer zeitlich oder räumlich getrennten Umgebung durch ein Kommunikationsmedium wird als Telepräsenz bezeichnet (STEUER 1995).
- Tracking:** Dieser Begriff aus der Virtuellen Realität beschreibt das Nachverfolgen eines Objekts.
- Virtuelle Realität:** Virtuelle Realität ist eine high-end-Benutzerschnittstelle an einem Computer, welche eine reale Umgebung durch multi-sensorische Wahrnehmungen für den Benutzer darstellt und hierfür verschiedene Sinneswahrnehmungen durch visuelle, akustische, taktile, geschmackliche oder geruchliche Reize für den Menschen erfassbar macht (BURDEA & COIFFET 2003).

Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AFM	Atomic Force Microscope (Rasterkraftmikroskop)
AR	Augmented Reality (augmentierte Realität)
BE	Bewertungseinheit
CAD	Computer Aided Design (computergestützte Konstruktion)
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment (Raum mit automatisierter, virtueller Umgebung)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOF	Degrees of Freedom (Freiheitsgrade)
FBA	Fehlerbaumanalyse
FF	Force Feedback (Kraftrückkopplung)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
HEP	Human Error Probability (menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit)
HERA	Helpful Agent for Safety Learning in Virtual Environment (virtuelle Trainingsumgebung für sicheres Lernen)
HMD	Head Mounted Display (kopfgetragenes Anzeigegerät)
HRTF	Head Related Transfer Function (kopfbezogene Übertragungsfunktion)
HVA	haptisch-visuell-auditiv
ISO	International Organization for Standardization (Internationales Institut für Normung)
LAN	Local Area Network (lokales Netzwerk)
lat.	lateinisch
MTM	Methods of Time Measurement (Methoden zur Zeitmessung)
MVM	Münchener Vorgehensmodell

Abkürzungen

RFID	Radio-Frequency Identification (Identifizierung durch elektromagnetischer Wellen)
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm (horizontaler Gelenkarm-roboter)
SEM	Sekundärelektronenmikroskop
SID	Spatially Immersive Display (räumlich immersives Display)
TFT	Thin Film Transistor (Dünnschichttransistor), auf dessen Technologie die sogenannten TFT-Bildschirme basieren
TPTA	Telepräsenz und Teleaktion
VA	Vibrations-Assistenz-Modus
VEPAB	Virtual Environment Performance Assessment Battery (Aufgabenkatalog für die Leistungsmessung in virtuellen Umgebungen)
VIS	visueller Modus
VR	Virtual Reality (virtuelle Realität)
VRMAT	Virtual Reality Manipulation Assessment Testbed (Testumgebung für Manipulationen in virtuellen Umgebungen)
W-LAN	Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk)

Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
d_{ist}	mm	gemessener Abstand
d_{skal}	mm	skalierter Abstand
F_{ist}	N	gemessene Kraft
F_{skal}	N	skalierte Kraft
F_M	N	gemittelte Kraft
$F_{Operator}$	N	Kraft am Operator-Eingabegerät
$F_{Teleoperator}$	N	Kraft am Teleoperator
FG_{Gesamt}	-	Gesamtanzahl an Freiheitsgraden
$FG_{Prozess}$	-	Freiheitsgrade des Produktionsprozesses
$FG_{Automation}$	-	Freiheitsgrade eines (teil-)automatischen Prozesses
$FG_{Operator}$	-	Freiheitsgrade des Eingabegeräts des Operators
H_{WST}	mm	Höhenprofil des Werkstückträgers
H_B	mm	Höhenprofil des Werkstückträgers mit Bauteil
K_A	€/h	kalkulatorische Abschreibungen
K_{Aus}	-	Ausprägungsform
K_B	€/hm ²	Betriebskosten
K_{erf}	-	Erfüllung einer Ausprägungsform
k_F	-	Skalierungsfaktor der Kraft
k_v	-	Skalierungsfaktor der Geschwindigkeit
k_d	-	Skalierungsfaktor des Abstands
K_I	€/h	Instandhaltungskosten

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$K_{Personal}$	€/h	Personalkosten-Stundensatz
$K_{Reinraum}$	€/h	Gesamtkosten Betrieb Reinraum
k_T	-	Stufe der Latenzzeit
k_v	-	Skalierungsfaktor der Geschwindigkeit
$K_{v,ges}$	€	variable Gesamtkosten
$K_{rüst}$	€/Los	Rüstkosten
$K_{rüst,Los}$	€/Los	Gesamtrüstkosten pro Los
$K_v(x_L)$	€	variablen Kosten pro produziertem Produkt
i	-	Instandhaltungskostensatz
n	-	Anzahl
m	-	Anzahl
M	€/h	Maschinenstundensatz
$M_{Position}$	mm	Mittelwert (Position)
$M_{Tracking}$	mm	Mittelwert (Tracking)
p	-	Signifikanzniveau
R	-	Zuverlässigkeit
R_s	-	Zuverlässigkeit einer Teilfunktion
R_s	-	Zuverlässigkeit bei serieller Schaltung
R_p	-	Zuverlässigkeit bei paralleler Schaltung
R_{sp}	-	Zuverlässigkeit bei Kombination aus serieller und paralleler Schaltung
t	s	Zeit
T	a	Nutzungsdauer
T_n	h/a	Nutzungszeit
$T_{normiert}$	-	normierte Zeit
T_{Latenz}	-	Zeit zur Aufgabenerfüllung bei Zeitverzögerung
$T_{Rüst}$	h/Los	Rüst- bzw. Anlernzeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung
T_{V1}	s	Verzögerungszeit der Kommunikation Operator-Teleoperator
T_{V2}	s	Verzögerungszeit der Kommunikation Teleoperator-Operator
Θ	Nm	Drehmoment
$v_{Operator}$	m/s	Geschwindigkeit des Operator-Eingabegeräts
$v_{Teleoperator}$	m/s	Geschwindigkeit des Teleoperators
ω	1/s	Kreisfrequenz
W	€	Wiederbeschaffungswert
w_{ist}	-	Istzustand des Werkzeugs
w_{soll}	-	Sollzustand des Werkzeugs
x	mm	Position auf der x-Achse
x_L	[Stk.]	Losgröße
x_{ist}	mm	Istposition
x_{soll}	mm	Operatoreingabe Sollposition
x_{skal}	mm	skalierte Sollposition
y	mm	Position auf der y-Achse
z	-	kalkulatorischer Zinssatz
Z	€/h	kalkulatorische Zinsen

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Neue Fertigungstechnologien bilden die Basis für neue Produkte – neue Produkte erfordern wiederum neue Montagetechniken. Ein Bereich, in welchem dies besonders zum Tragen kommt, ist die Mikrotechnik. Der Trend zur Miniaturisierung, ausgelöst durch neue Fertigungsverfahren, führt zu immer kleineren Bauteilen und Produkten (HESSELBACH et al. 2003; FLEISCHER et al. 2007; MEYER et al. 2008b). Die Handhabung und Montage von miniaturisierten Bauteilen im Millimeter- und Mikrometerformat bringt neue Herausforderungen für die Montagetechnik, da herkömmliche Verfahren und Betriebsmittel den neuen Randbedingungen nicht mehr gerecht werden. Die folgenden Abschnitte diskutieren diesen Trend zur Miniaturisierung in Bezug auf die Anforderungen an die Produktionstechnik und stellen die Teleoperation als neue Methode für manuell schwer handhabbare und montierbare Produkte vor, wie sie in der Mikrosystemtechnik vorliegen.

1.2 Produktionstechnik heute

Nicht nur die Produkte, auch die Produktionstechniken zu deren Herstellung unterliegen heute anderen Anforderungen als noch vor einigen Jahren. So gibt es einen starken Trend weg von der Serienproduktion von Massengütern hin zu einer variantenreichen Produktpalette oder zur individuellen Einzelproduktion durch Mass Customization (PILLER 2006), wobei Produkte durch vom Kunden veränderbare Merkmale wie Farbe, Gehäuseform, Speicherkapazität, etc., individualisiert werden. Des Weiteren findet eine starke Verkürzung von Produktlebenszyklen statt (VAHRENKAMP 2008, S. 25), so dass die Flexibilität der Produktionsmittel zu einem wichtigen Kriterium wird. Im Gegensatz hierzu steht die Forderung nach einer Reduzierung der Produktionskosten, getrieben durch den internationalen Wettbewerb.

Da die Montage ein sehr kostenintensiver Teil der Produktion ist (LOTTER 1986, S. 12), haben die genannten Einflüsse hier besonders starke Auswirkungen. Bis zu 69 % der Montagevorgänge werden trotz einer voranschreitenden Automatisierung noch manuell oder teilautomatisiert ausgeführt, insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen und variantenreicher Produktpalette (BUTALA et al. 2002). Eine Vollautomatisierung ist hier bisher zu unflexibel, da Prozessänderungen mit einem hohen Aufwand für die Umrüstung und die Umprogrammierung verbunden sind.

Durch eine flexible Automatisierung soll diesem Mangel begegnet und kurze Umrüstzeiten sowie die Wiederverwendbarkeit der Betriebsmittel gefördert werden (WIENDAHL 2002; WILDEMANN 2004; WIENDAHL et al. 2007; HAGEMANN 2008; HARASHIMA & OHNO 2009). Die Automatisierung hat gegenüber einer Organisationsform, in der weiterhin Werker¹ benötigt werden, an einem Hochlohnstandort wie Deutschland oftmals Kostenvorteile aufzuweisen (vgl. WERNER 2008, S. 134). Darüber hinaus gibt es Aufgaben, die technisch nur sehr aufwändig oder gar nicht automatisierbar sind. Beispiele sind unter anderem im Bereich der Handhabung formflexibler Bauteile zu finden, wie bei der Verlegung von Kabeln oder Kabelbäumen. Hierfür wird an Methoden zur Automatisierung, beispielsweise durch Roboter und angepasste Simulationsmodelle, geforscht (HENRICH & WÖRN 2000; LOOCK & SCHÖMER 2001; LOTTER & WIENDAHL 2006).

Auch der gesellschaftliche Wandel beeinflusst die Unternehmensstrukturen, so dass der Umgang mit alternden Belegschaften und leistungsgewandelten Mitarbeitern vor allem in Europa zukünftig eine große Rolle spielen wird (ZÄH et al. 2005). Hierfür sind die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes und die Unterstützung des Werkers bei der Ausführung seiner Tätigkeiten zur Schonung der Gesundheit wichtige Themen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit. Abbildung 1.1 zeigt, welche vielfältigen Einflüsse aus der Produktentwicklung und der Umwelt für die Produktion von Bedeutung sind. In diesem turbulenten Umfeld ist die Wahl der Montagestrategie ein entscheidendes Kriterium für den Unternehmenserfolg. Sie muss den genannten Einflüssen Rechnung tragen und eine wirtschaftliche Produktion sichern.

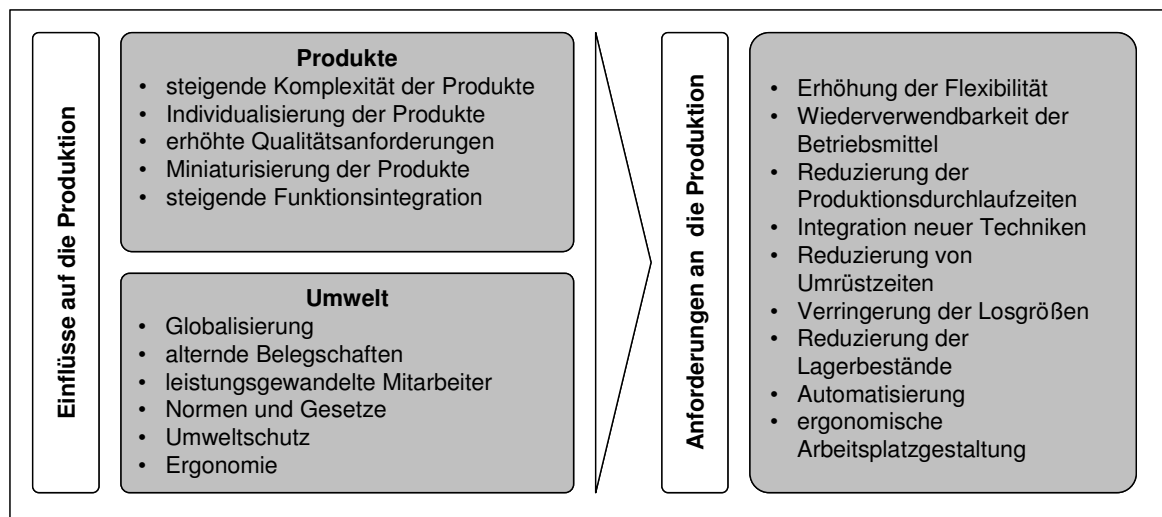


Abbildung 1.1: Einflüsse auf die Produktion

¹ Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit, falls eine geschlechterneutrale Formulierung nicht angewendet werden kann, stellvertretend für die feminine und maskuline Form nur die letztgenannte verwendet.

1.3 Trend zur Miniaturisierung

Eine besonders große Herausforderung für die Montage stellt die Miniaturisierung dar, da durch neue Herstellverfahren die Größe einzelner Bauteile und damit auch des Gesamtprodukts enorm verkleinert werden kann. So gibt es heute durch Röntgentiefenlithographie hergestellte Mikrozahnräder mit 800 µm Durchmesser für Miniaturgetriebe (MEYER et al. 2008a; MEYER et al. 2008b; HAHN et al. 2010). Durch neue Fertigungstechniken hergestellt, müssen die nur wenige Millimeter bis Mikrometer großen Bauteile in der Montage gehandhabt und gefügt werden, was neue Anforderungen an den Menschen und die Betriebsmittel stellt. SCHUH et al. (2008) sehen hierfür Lösungsansätze in der Miniaturisierung von Betriebsmitteln und der Automatisierungstechnik. In Abhängigkeit der Produktgröße und der Präzisionsanforderungen wird die Montage deshalb in die Bereiche der konventionellen, der Feinwerk-, der Präzisions- und der Mikromontage unterteilt (Abbildung 1.2, vgl. GREITMANN 1998 und HESSELBACH et al. 2006). Jedoch muss die Herausforderung der Miniaturisierung für die Produktion in einem weitläufigeren Kontext betrachtet werden, da sie andere Randbedingungen an Fertigung, Handhabung und Montage stellt als die Makromontage. Zu denjenigen Auswirkungen, welche aus den veränderten Abmaßen und Geometrien resultieren, kommt häufig die Einschränkung auf kleine und mittlere Stückzahlen hinzu (LEHMANN 2008, S. 39). Auch durch den Reinraum als Produktionsumgebung zur Vermeidung der Verschmutzung von Bauteilen werden vor allem in Bezug auf die Partikelemission von Produktionseinrichtungen weitere Anforderungen gestellt (HESSELBACH 2000). Durch den Einsatz neuer Werkstoffe in der Mikrotechnik mit spezifischen Eigenschaften entsteht außerdem die Notwendigkeit zum Einsatz angepasster Betriebsmittel (HESSELBACH et al. 2006). Darüber hinaus definiert HESSELBACH (1997, S. 3) neben der Positioniergenauigkeit die Unterschiedlichkeit der Geometrien und hohe Flächenpressungen auf die miniaturisierten Greifflächen als wesentliche Probleme der Mikromontage.

Vor allem die notwendige höhere Präzision im Vergleich zur Makromontage bei der Bauteilfertigung sowie bei Montage- und Fügevorgängen bringt einen erheblichen Mehraufwand mit sich. Sie führt zu hohen Kosten für eine automatisierte Produktion (CLÉVY et al. 2006). Zudem wächst das Verhältnis von Fertigungsfehler zu Werkstückgröße, da Werkzeugungenauigkeiten, Spann- und Lagefehler sowie Positionier- und Rundlauffehler von Werkzeugen oder Spindeln im Vergleich zur Werkstückgröße überproportional anwachsen (LEHMANN 2008, S. 13).

Neben den fertigungstechnischen Aspekten unterscheidet sich auch die Unternehmensstruktur im Bereich der Mikrotechnik stark von anderen Branchen. Neben wenigen Großunternehmen dominieren überwiegend kleine und mittelständische Unternehmen, welche sich auf kundenspezifische Produkte spezialisiert haben und diese in kleinen Stückzahlen herstellen (SCHÜNEMANN et al. 1999). Eine automatisierte

Produktion ist hierbei nicht rentabel, da der Automatisierungsaufwand durch die enormen Präzisionsanforderungen der Mikrotechnik ein hohes Kostenpotential und folglich auch ein hohes Investitionsrisiko darstellt (SCHUH et al. 2008; STEIGER 2008). Hinzu kommen bei einer Automatisierung häufig auftretende Kosten für die Umrüstung und Anpassung der Anlagen aufgrund der kleinen Losgrößen. Die Montage erfolgt in dieser Branche deshalb bisher überwiegend manuell (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2006; HESSELBACH et al. 2006).

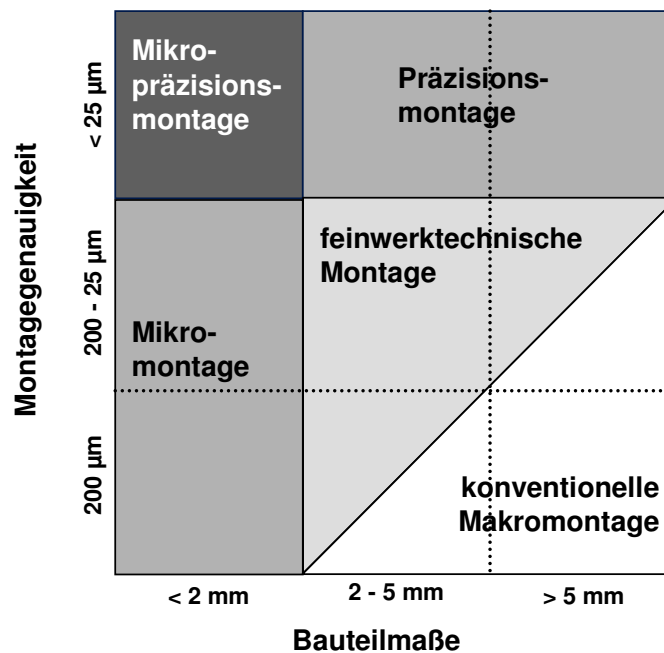


Abbildung 1.2: Größenordnungen verschiedener Montagebereiche (nach GREITMANN 1998)

Die manuelle Arbeit verlangt ausgezeichnete feinmotorische Fähigkeiten des Personals, wodurch Anlernzeiten von bis zu sechs Monaten anfallen (STEIGER 2008), ehe die Montage sicher, das heißt mit minimaler Ausschussquote, durchgeführt werden kann. Häufig gibt es für besonders schwierige Arbeiten einen Experten/eine Expertin, der bzw. die den Arbeitsschritt beherrscht und deshalb für dessen Ausführung unersetzlich ist (EURSCH 2009).

Abbildung 1.3 fasst die Einflussgrößen auf die Produktion von miniaturisierten Produkten zusammen. Daraus resultieren neue Problemfelder in der Fertigung und Montage von Mikrosystemen, welche in der makroskopischen Produktion keine oder eine untergeordnete Rolle spielen (Abbildung 1.4):

1.3 Trend zur Miniaturisierung

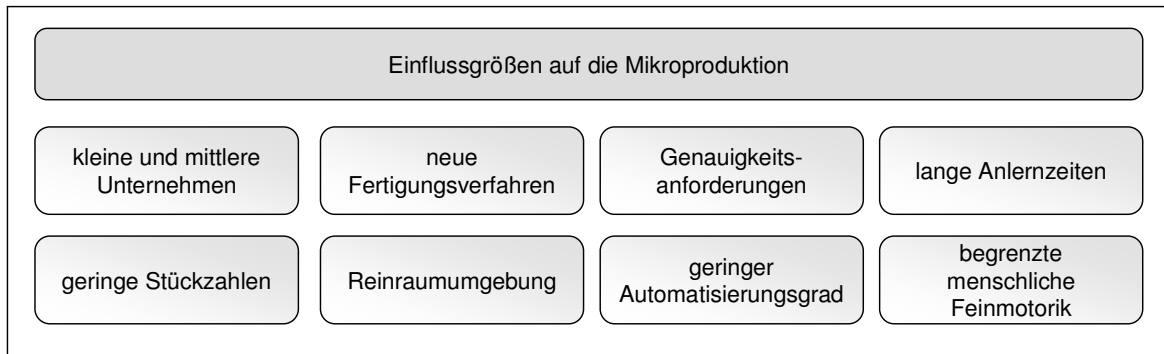


Abbildung 1.3: Einflüsse auf die Mikroproduktion

- Grenzen des Menschen bei der Wahrnehmung taktiler Kräfte:

Bei manuellen Tätigkeiten übersteigt die vom Menschen aufgebrauchte Greifkraft sehr schnell die maximal verträgliche Druckkraft des Mikroobjekts, so dass Beschädigungen auftreten können. Ein Quader aus Silizium in der Größenordnung eines Millimeters benötigt eine Greifkraft von $5,8 \cdot 10^{-6}$ N (HENSCHE 1994, S. 27). Der Mensch hingegen ist nicht in der Lage, Kräfte zu spüren, welche geringer als 0,05 bis 0,1 N/cm² sind (FAHLBUSCH et al. 2002; SHERRICK & CHOLEWIAK 1986). Folglich kann er nicht wahrnehmen, welche Greifkraft er aufbringt.

- Grenzen des Menschen bei der visuellen Wahrnehmung:

Ein weiteres Problem stellt die Visualisierung des Montagevorgangs dar, denn das menschliche Auge ist nicht in der Lage, Bildpunkte mit einem geringeren Abstand als 0,2 mm voneinander zu unterscheiden (bei Sicht aus 1 m Entfernung, MAELICKE 1990, S. 29). Eine Abhilfe schafft der Einsatz von Sehhilfen wie Mikroskopen, was jedoch zu einer Erhöhung der Komplexität des manuellen Montagevorgangs führt, weil dadurch die Hand-Auge-Koordination des Menschen erschwert wird (BRUSSEL et al. 2000; TIETJE & RATCHEV 2007). Des Weiteren bieten Sehhilfen nur eine eingeschränkte Tiefenschärfe, weshalb nicht alle Bildebenen gleichzeitig scharf betrachtet werden können.

- Grenzen der menschlichen Feinmotorik:

Auch die menschliche Feinmotorik reicht nicht aus, um den Präzisionsanforderungen der Mikromontage gerecht zu werden. In einer Untersuchung zum Platzieren einer Nadel in 250, 200 und 100 µm große Bohrungen bei einer 40-fachen Vergrößerung durch ein Mikroskop wiesen ungeübte Versuchspersonen eine Erfolgsrate von 46,0 bis 48,8 % auf (KUMAR et al. 1999). Für eine wirtschaftliche Montage wäre diese Quote nicht rentabel und würde ei-

nen erheblichen Zeitverlust und eine hohe Anzahl an Ausschussteilen zur Folge haben.

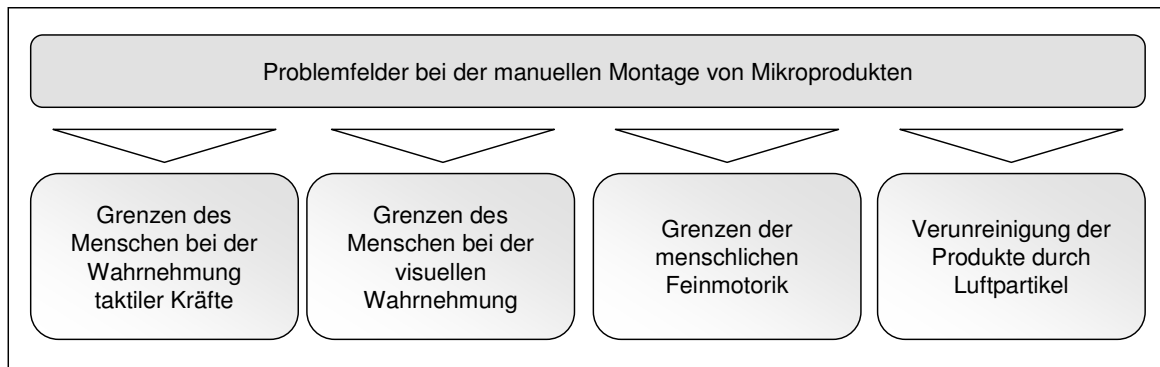


Abbildung 1.4: Problemfelder bei der manuellen Mikromontage

- Verunreinigung der Produkte durch Luftpartikel:

Doch nicht nur die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Personals, auch die Produktionsumgebung hat Einfluss auf die Produktqualität. Partikel der normalen Umgebungsluft können die Funktionsstrukturen der Bauteile verunreinigen, wenn diese Strukturen die gleiche Größenordnung wie die Luftpartikel haben. Fertigung und Montage müssen deshalb häufig im Reinraum erfolgen, um einen Partikeleintrag in die sensiblen Mikrostrukturen der Bauteile zu verhindern (HESSELBACH et al. 2006; TIETJE & RATCHEV 2007). Neben der Notwendigkeit der Reinraumtauglichkeit der Betriebsmittel muss auch der Mensch als Partikelemittent durch spezielle Schutzkleidung Vorkehrungen treffen, um die Reinraumumgebung nicht zu verschmutzen (vgl. DIN EN ISO 14644 1999; FED-STD-209E 1992), was mit zusätzlichen Kosten und zeitintensiven Ein- und Ausschleusevorgängen verbunden ist.

Untersuchungen über die Höhe der Kosten der Montage an den gesamten Produktionskosten ergaben, dass der Anteil der Montagekosten bei miniaturisierten Systemen ca. 80 % beträgt (KOELEMEIJER & JACOT 1999; KOELEMIJER CHOLLET et al. 1999; KORB 2005; SCHUH et al. 2008). Dieser hohe Anteil lässt auf bisher ungenutzte Einsparungspotentiale bei der Montage von Mikroprodukten schließen, welche durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades oder Montagehilfen für manuelle Vorgänge gehoben werden können. Stellt man diesen produktionstechnischen Randbedingungen die Anforderung der Wirtschaftlichkeit gegenüber, ist festzustellen, dass geeignete Fertigungs- und Montageanlagen für die Mikroproduktion bisher nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind (BRUSSEL et al. 2000; PFEIFER et al. 2001; FLEISCHER et al. 2005b).

1.4 Teleoperation als neue Möglichkeit in der Produktion

1.4.1 Definition

Aus den genannten Gründen ist es notwendig, geeignete flexibel einsetzbare und kostengünstige Montageeinrichtungen für die Produktion von mikrotechnischen Produkten zu entwickeln. Hierfür stellt die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie (kurz: TPTA-Technologie) einen prinzipiell geeigneten Ansatz dar, da sie manuelle Vorgänge durch angepasste Systeme zur Bewegungsausführung und Steuerungen unterstützt und erleichtert. Sie ist darüber hinaus zu einer teil- oder vollautomatisierten Montage ausbaufähig, beispielsweise durch Teach-in, so dass einfach automatisierbare Vorgänge nicht länger vom Menschen getätigt werden müssen. Stückzahlabhängig kann die Produktion somit an die geforderten Losgrößen angepasst und dabei die jeweils günstigste Montageart gewählt werden (REINHART & SCHILP 2006).

Die Vorsilbe „tele“ ist griechischen Ursprungs und bedeutet „fern“. Die Telepräsenz beschreibt folglich das Präsent-Sein, das Präsenzgefühl, an einem Ort, an dem sich der Nutzer nicht selbst aufhält. Die Teleaktion erweitert das Präsent-Sein des Nutzers und ermöglicht eine Interaktion in der entfernten Umgebung (Remote-Umgebung). Diese Entfernung kann auf zweierlei Weise hervorgerufen werden. Einerseits kann sie durch eine tatsächliche räumliche Trennung über eine bestimmte Wegstrecke zustande kommen, beispielsweise indem ein technisches System auf einem anderen Kontinent oder im Weltraum durch Teleaktion gesteuert wird. Andererseits kann die Entfernung durch eine Abkapselung des Systems bzw. des Bedieners hervorgerufen werden, wie es beim Umgang mit radioaktiven Substanzen notwendig ist.

Eine Definition für die Teleoperation von SHEN et al. (2000) ist die folgende, worin auch auf mögliche Einsatzszenarien verwiesen wird:

(...) teleoperation is an approach of applying sensing and control capabilities and intelligence of humans to robots and assisting them to carry out complex and volatile tasks in remote or special environments such as nuclear and chemical factories.

Ein Telepräsenz- und Teleaktionssystem beinhaltet die beiden wesentlichen Begriffe *Präsenz* und *Aktion*. Telepräsenz beschreibt dabei die Summe der Eindrücke auf einen Menschen, welche aus einer Umgebung übertragen sind, in der er sich nicht tatsächlich befindet.

Eine Definition von Telepräsenz gibt STEUER (1995):

Telepresence is defined as the experience of presence in an environment by means of a communication medium. In other words, presence refers to the natural perception of an environment, and telepresence refers to the mediated perception of an

environment. This environment can be either a temporally or spatially distant "real" environment.

Eine Definition von DRAPER et al. (1998) greift insbesondere den Aspekt der Trennung zwischen Operator und Teleoperator auf:

The compound construction of "tele" and "presence" (...) seems to capture the idea of projection into a distant environment, whether the distance be physical (as in teleoperation and telecommunication) or figurative (as in virtual reality).

Eine auf den menschlichen Operator und die daraus abzuleitenden Funktionen für den Teleoperator bezogene Definition geben HELD & DURLACH (1991):

In general, the purpose of a teleoperator system is to augment the sensory-motor system of the human operator. (...) At one extreme are systems meant simply to transport the operator to a different place. In the ideal version of such a system, the slave robot would be isomorphic to the operator and the various sensor and effector channels would be designed to realize this isomorphism.

Übertragen auf die Mikroproduktion bietet der Einsatz von Telepräsenz- und Teleaktionstechnologien für den Menschen den Vorteil, dass an seiner Stelle ein ferngesteuerter Akteur präzise hochauflösende Bewegungen ausführt. Die erreichbare Genauigkeit hängt damit nur vom eingesetzten kinematischen System ab und nicht mehr von den feinmotorischen Fähigkeiten des Werkers, da die Steuerungsbefehle skaliert und durch die auf die Aufgabe abgestimmte Akteurik ausgeführt werden. Die Trennung von Werker und Ausführungsort reduziert bei Arbeiten im Reinraum auch die Gefahr des Partikeleintrags durch den Menschen, da der Werker den Vorgang getrennt von der im Reinraum untergebrachten Montagestation fernsteuert.

Der Mensch ist der zentrale Bestandteil eines Teleoperationssystems, indem er Signale eingibt oder empfängt. Diese werden über einen Kommunikationskanal an das ausführende System oder von dort zurück an den Menschen übertragen. Deshalb können die Hauptkomponenten eines Teleoperationssystems wie folgt definiert werden (Abbildung 1.5):

- der Mensch, bezeichnet als Operator,
- das ausführende technische System, genannt Teleoperator,
- sowie der Kommunikationskanal zwischen Operator und Teleoperator.

Der Operator

Der in einem Telepräsenzsystem agierende Mensch wird als Operator bezeichnet (CLARKE 2006; EHRENSTRASSER 2007). Durch ein Eingabegerät kann er an den Teleoperator Befehle adressieren. Oftmals wird dieses Eingabegerät zugleich als

1.4 Teleoperation als neue Möglichkeit in der Produktion

Ausgabegerät für haptische Rückmeldungen genutzt, um dem Operator Kontakte oder Kollisionen, die in der Remote-Umgebung auftreten, zu präsentieren. Die visuelle Rückkopplung an den Operator kann als reales Bild, beispielsweise als Video-stream, erfolgen. Des Weiteren können den Operator auch akustische Signale unterstützen.

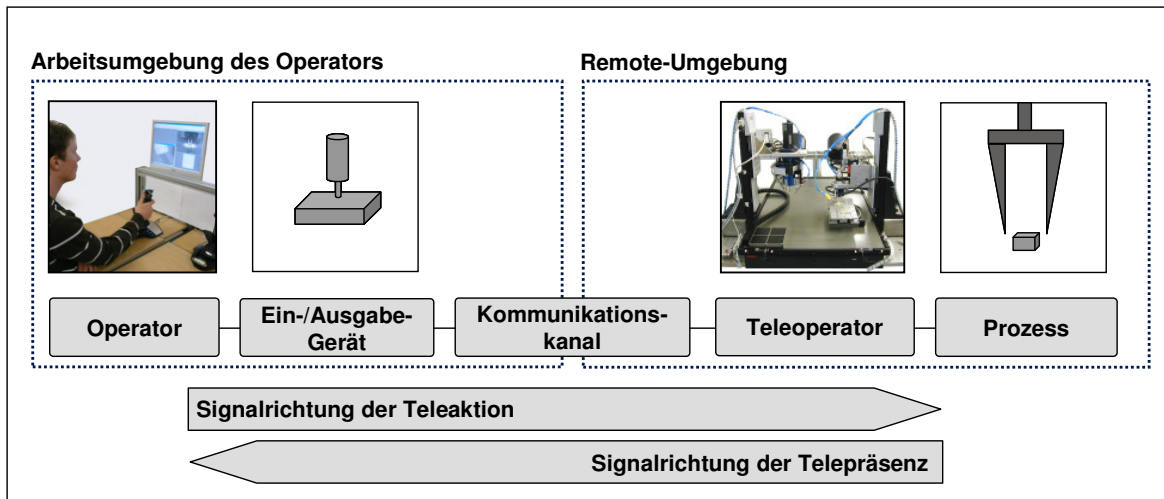


Abbildung 1.5: Teleaktions- und Telepräsenzsystem

Durch die räumliche Trennung des Operatorarbeitsplatzes vom Ort der Aufgabenausführung kann dem Operator (Werker) eine natürliche und ergonomische Arbeitsumgebung bereitgestellt werden. Abbildung 1.6 zeigt einen Prototyp eines ergonomischen Operatorarbeitsplatzes für die telepräsent ausgeführte Montage.

Der Teleoperator

Der Teleoperator ist ein technisches System, das für eine bestimmte Umgebung und Aufgaben darin konzipiert ist (PETZOLD 2007). Er verfügt über die kinematischen Komponenten mit den zur Aufgabenausführung notwendigen Freiheitsgraden und geeigneten Endeffektoren. Da die Freiheitsgrade des Bewegungssystems für den jeweiligen Einsatzfall ausgelegt werden, kann ein Teleoperator im Vergleich zum Menschen mit einem passenderen Arbeitsraum für die Aufgabenausführung ausgestattet werden. Außerdem muss er über geeignete Sensoren verfügen, so dass er die vom Operator zur Steuerung und Kontrolle des Systems benötigten Informationen aufnehmen kann.

Der Kommunikationskanal

Die Verbindung zur Signalübertragung zwischen dem Operator und dem Teleoperator bildet der Kommunikationskanal. Er ist in Teleoperationssystemen bidirektional konzipiert, so dass Signale in beide Richtungen übertragen werden können.

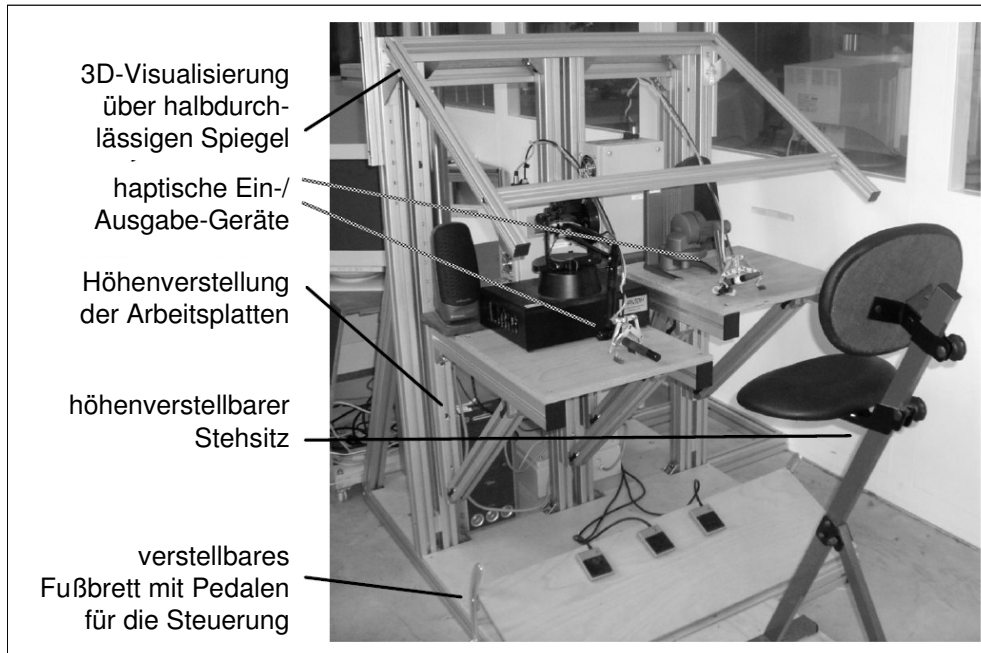


Abbildung 1.6: Operatorarbeitsplatz für die teleoperierte Mikromontage (Quelle: PETZOLD 2007, S. 137)

Je nach Art und Länge des Kommunikationskanals entstehen Verzögerungen durch Signallauf- und -verarbeitungszeiten. Nach BORING (1957) nimmt der Mensch visuelle Reize ab einer Laufzeitdifferenz von durchschnittlich 43 ms nicht mehr als synchron wahr, haptische Signale beurteilt er bei einer Differenz von mehr als 27 ms als nicht mehr gleichzeitig. Bei der Wahrnehmung visueller und zugehöriger haptischer Reize konnte sogar eine Zeitschwelle von 16 ms festgestellt werden, ab welcher die Reize nicht mehr als simultan gesendet beurteilt wurden (DINNERSTEIN & ZLOTOGURA 1968).

Verschiedene Ansätze zur Datenreduktion (HIRCHE et al. 2007; HINTERSEER et al. 2008) oder zur Prädiktion von Bewegungen und Kräften (CLARKE 2006; CLARKE et al. 2007; SCHILLHUBER & ULBRICH 2008; SCHILLHUBER 2009) verfolgen die Kompensation der Verzögerungszeiten im Kommunikationskanal, um auch bei großen Distanzen den Einsatz von Telepräsenzsystemen zu ermöglichen.

1.4.2 Telepräsenz

Wie in den Definitionen in Abschnitt 1.4.1 aufgeführt, muss für den Menschen die Wahrnehmung der Umgebung im telepräsenten System möglich sein. Hierfür nutzt er seine Sinne: Die visuelle und die auditive Wahrnehmung gehören zu den Fernsinnen, welche die wichtigsten Quellen zur Informationsgewinnung des Menschen sind (MAELICKE 1990). Die Nahsinne beziehen sich im Gegensatz dazu auf direkte körpernahe Sinneseindrücke. Hierzu zählt der Tastsinn für die haptische und die kinästhetische Wahrnehmung. Des Weiteren gehören das Riechen und das Schmecken durch die olfaktorischen und gustatorischen Sinneszellen dazu. Die moderne Physiologie unterscheidet darüber hinaus den Temperatursinn, die Schmerzempfindung, den Gleichgewichtssinn und die Körperempfindung oder Tiefensensibilität (DURIE 2005).

Einfache Telepräsenzsysteme, wie beispielsweise das Fernsehen (keine Teleaktion), sprechen das visuelle und das auditive Sinnesorgan an. Höherwertige Telepräsenzsysteme, wie sie für die Durchführung von Aufgaben in der minimalinvasiven Chirurgie eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.3.1), geben dem Menschen häufig auch haptische Eindrücke zurück. Olfaktorische und gustatorische Eindrücke werden hingegen nur sehr selten präsentiert, beispielsweise in modernen Museumsinstallationen (VILLA SINNENREICH 2009). Die Schmerzempfindung ist ungeeignet, um von Telepräsenzsystemen angesprochen zu werden, weil die Erzeugung von Schmerzen einerseits durch Arbeitsschutzgesetze verboten wird, zum anderen hätten Schmerzen auch weitreichende psychologische Effekte, wie die Entwicklung von Ängsten vor der Aufgabe. Die Tiefensensibilität oder innere Körperwahrnehmung ist ein Sinn, der nicht von der Umwelt angesprochen werden kann und somit ebenfalls nicht für eine Anwendung in der Telepräsenztechnologie in Frage kommt. Eine Übersicht der Wahrnehmungsarten und deren Eignung für die Telepräsenz ist in Tabelle 1.1 aufgelistet.

1.4.3 Teleaktion

Der Begriff *Teleaktion* beschreibt die Möglichkeit eines Menschen, eine ferngesteuerte Aktion auszuführen (tele: gr. fern, actio: lat. Handlung). Die für die Teleaktion notwendigen Steuersignale an den Teleoperator gibt der Mensch über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle ein. Sie werden durch einen Kommunikationskanal an ein Teleaktionssystem übertragen, welches die Handlung an einem anderen Ort umsetzt. Im Gegensatz zur Telepräsenz werden bei der Teleaktion Signale vom Menschen an die Umgebung übertragen, so dass der Mensch mit der entfernten Umgebung interagieren kann. Dies können Kommandos zur Positionierung, zur Geschwindigkeit oder auch zur Übermittlung von Befehlen für die Änderung von Werkzeugzuständen, Kamerablickwinkeln, usw. sein.

Um dem Menschen ein intuitives Arbeiten in einer entfernten Umgebung zu ermöglichen, werden die beiden Systeme zu einem Telepräsenz- und Teleaktionssystem vereinigt, in dem Signale in beide Richtungen übertragen werden können.

Sinneswahrnehmung	Einsetzbarkeit in Telepräsenzsystemen		
	theoretisch möglich	Bereits eingesetzt	Beispiel
visuell	ja	ja	minimalinvasive Chirurgie
akustisch	ja	ja	Computerspiele
haptisch/kinästhetisch	ja	ja	Weltraum-Reparatur-Roboter (Forschung)
olfaktorisch	ja	ja	Museumsinstallationen
gustatorisch	nein	-	
Temperatur	ja	nein	
Schmerz	nein	-	
Gleichgewicht	ja	ja	Flugsimulator
Körperwahrnehmung	nein	-	

Tabelle 1.1: Durch Telepräsenz ansprechbare Sinne des Menschen

1.4.4 Anwendungspotential der Teleoperation für die Montage

Nach LOTTER (1982) ist die manuelle Montage wie folgt definiert:

„Durch den Einsatz seiner Hände, seiner Fingerfertigkeit, seiner Sinnesorgane und seiner Intelligenz führt der Mensch, unter Inanspruchnahme von Hilfsmitteln, wie Werkzeuge, die Montagevorgänge aus.“

Ein TPTA-System bietet diese Funktionalitäten zur Realisierung einer manuellen Montage in einer vom Werker getrennten Umgebung. Insbesondere die Telepräsenz ermöglicht den Gebrauch der Sinnesorgane wie bei einer realen manuellen Montage. Stellt man nun die Problemfelder der manuellen Mikromontage (vgl. Abbildung 1.4) den Möglichkeiten der teleoperierten Montage gegenüber, wird ersichtlich,

1.4 Teleoperation als neue Möglichkeit in der Produktion

dass die Teleoperation zu deren Überwindung genutzt werden kann (siehe Abbildung 1.7).

Durch die Trennung des Menschen von seiner Wirkstätte kann eine Skalierung seiner Bewegungen, Geschwindigkeiten und Kräfte vorgenommen werden. Die Durchführung der für die Mikromontage notwendigen hochpräzisen Positioniervorgänge erfordert folglich keine geschulte Feinmotorik mehr, denn die menschlichen Steuerungsbewegungen werden durch ein Eingabegerät aufgenommen und in eine angepasste Größenordnung herunterskaliert, so dass sie am Montageort mit dem Teleoperator ausgeführt werden können. Dort werden mit geeigneten Sensoren Signale wie Kräfte, Abstände oder Geschwindigkeiten aufgezeichnet. Diese können bei der Rückübertragung an den Operatorarbeitsplatz in eine für den Werker wahrnehmbare Größenordnung hochskaliert werden. Dadurch wird es möglich, beispielsweise haptische Rückmeldungen an den Werker zu geben, welche er bei einfacher manueller Montage nicht mehr mit seinen Fingern zu spüren in der Lage wäre. Gleich verhält es sich mit anderen Sinneseindrücken.

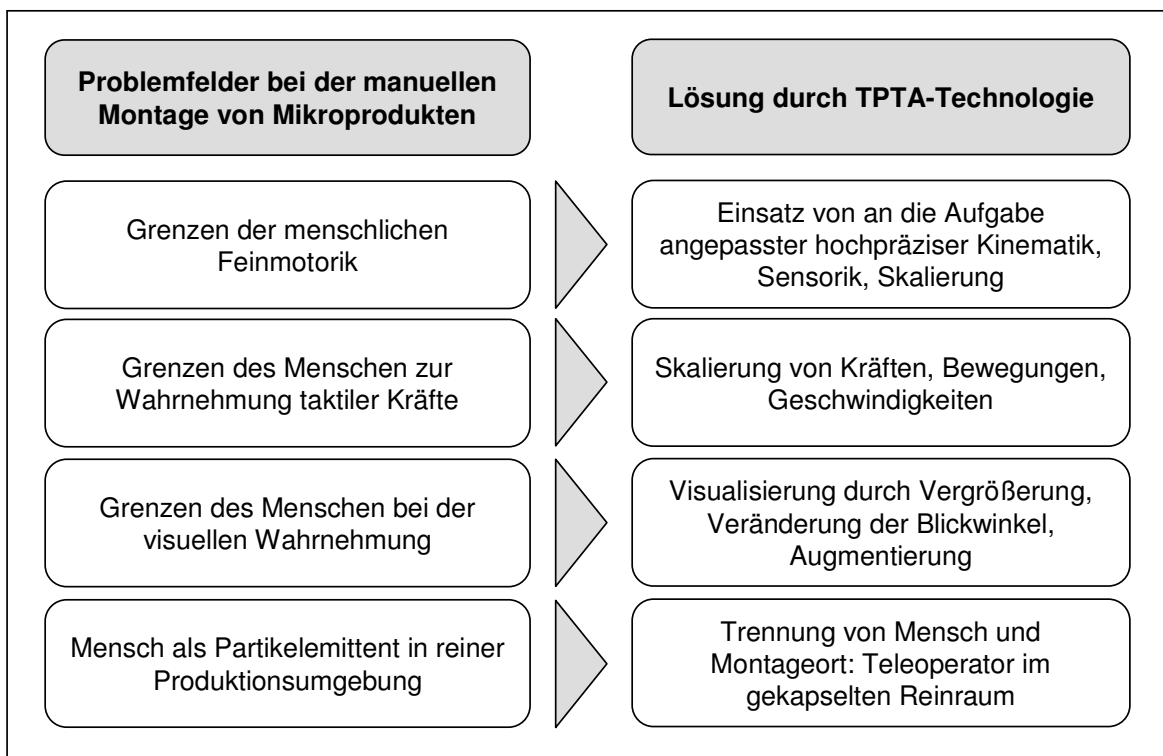


Abbildung 1.7: Teleoperationstechnologie als Lösungsansatz bei der manuellen Montage von Mikroprodukten

Ein weiterer Vorteil der Teleoperationstechnik und der damit einhergehenden Trennung von Mensch und Montageort ist die Reduzierung des Partikeleintrags durch

den Menschen am Produktionsort. Das Teleoperationssystem kann in einer gekapselten Reinraumumgebung arbeiten, wohingegen der Mensch außerhalb dieser Umgebung steuert.

Auch den allgemeinen Trends und Einflussgrößen in der Mikroproduktion (vgl. Abbildung 1.3) kann mit einem Teleoperationssystem Rechnung getragen werden. Die Forderung nach hoher Flexibilität, resultierend aus kleinen Losgrößen, wird erfüllt, indem der Mensch weiterhin für die Prozesssteuerung zuständig ist. Durch die Branchenstruktur von überwiegend kleinen und mittelständischen Unternehmen ist gefordert, die Investitionskosten möglichst gering zu halten, da dies derzeit ein großer Hinderungsgrund für den Einsatz von automatisierten Systemen ist. Da der Mensch als Steuerungs- und Kontrollinstanz erhalten bleibt, müssen keine teuren Prüf- und Überwachungssysteme wie Sensoren oder Bildverarbeitungsprogramme eingesetzt werden. Darum bietet die Teleoperation auch durch geringere Investitionskosten im Vergleich zur Automation ein deutliches Potential.

1.5 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll die Frage beantworten, welche Anforderungen für den industriellen Einsatz von Telepräsenzsystemen, insbesondere der haptischen Komponente, in der Präzisions- und der Mikromontage vorliegen. Deshalb werden folgende Forschungsfragen definiert:

Welche Anforderungen existieren für einen industriellen Einsatz von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen?

Hierbei soll erörtert werden, unter welchen Voraussetzungen die TPTA-Technologie eine Lösung für eine bestimmte Aufgabe, insbesondere aus der Produktionstechnik, darstellt. Ist die TPTA-Technologie als Lösung für ein Produktionszenario ausgewählt, muss die Frage nach der Gestaltung beantwortet werden. Dies beinhaltet einerseits die Klärung, welche Anforderungen aufgrund der Produktionsaufgabe vorliegen, andererseits sind die verwendbaren Komponenten der TPTA-Systeme auf ihre Einsatztauglichkeit im industriellen Umfeld hin zu prüfen.

Da die Haptik ein wesentliches Merkmal von Telepräsenzsystemen ist, soll zur Klärung der produktionstechnischen Relevanz folgende Frage geklärt werden:

Bringt die haptische Modalität einen Mehrwert bei der Aufgabenausführung in der Präzisions- und in der Mikromontage?

Die Ergänzung der Haptik ist ein wesentlicher Unterschied beim Vergleich von TPTA-Systemen mit bisherigen manuellen oder ferngesteuerten Arbeitsplätzen, denn eine Veränderung der Visualisierung durch vergrößerte Bild Darstellungen,

insbesondere durch digitale Kameras, sowie akustische Signale sind aus gängigen Office- und Labor-Anwendungen bereits bekannt. Das Hinzufügen von haptischen Signalen durch entsprechende Ausgabegeräte ist hingegen eine neu zu erforschende Komponente für die Arbeitsplatzgestaltung. Des Weiteren soll untersucht werden, ob haptische Signale das Erlernen von Montagebewegungen beispielsweise im Hinblick auf die Lernzeit oder die Qualität der Ausführung verbessern.

1.6 Vorgehensweise

Bisher wurden im ersten Kapitel der Trend zur Miniaturisierung und die daraus resultierenden Herausforderungen für die Produktion erläutert. Als Lösungsansatz für die Montage von Feinwerk- und Mikrobauanteilen wurde die Teleoperationstechnologie vorgestellt. In Kapitel 2 wird der Stand der Technik zur manuellen und automatisierten Montage von miniaturisierten Produkten beleuchtet. Bisherige Anwendungen der Telepräsenztechnologie sowohl in der Montage als auch in anderen Bereichen werden ebenfalls betrachtet. Außerdem wird ein Überblick über allgemeine Forschungsergebnisse zur menschlichen Arbeit in haptisch-visuell-auditiven Arbeitsräumen gegeben.

Um die erste Forschungsfrage zu beantworten, werden in Kapitel 3 und 4 die Anwendungspotentiale der TPTA-Technologie untersucht. Hierfür wird zunächst ein Kriterienkatalog erstellt, welcher die Eignung einer Aufgabe bzw. deren Notwendigkeit für eine teleoperierte Ausführung bewertet. Dabei wird hinsichtlich der Varianten *Teleaktion* und *Telepräsenz* unterschieden. Danach werden in Kapitel 4 Gestaltungsmöglichkeiten für TPTA-Systeme beleuchtet und im Hinblick auf wirtschaftliche Gesichtspunkte bewertet.

In Kapitel 5 wird die Wirkung der haptischen Rückkopplung für den Anwendungsfall der Präzisions- und der Mikromontage untersucht. Hierfür werden verschiedene Versuchsreihen zur Identifikation von Parametern für die teleoperierte Montage beschrieben.

Aus den Versuchsergebnissen des Kapitels 5 werden in Kapitel 6 Richtlinien zur Systemgestaltung eines teleoperierten Montagesystems abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einer wirtschaftlichen Bewertung der telepräsenten Präzisionsmontage. Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit und zeigt zukünftige Forschungs- und Einsatzpotentiale der Teleaktions- und Telepräsenztechnologie für die Produktion auf.

Die Gliederung der Arbeit ist in Abbildung 1.8 grafisch dargestellt.

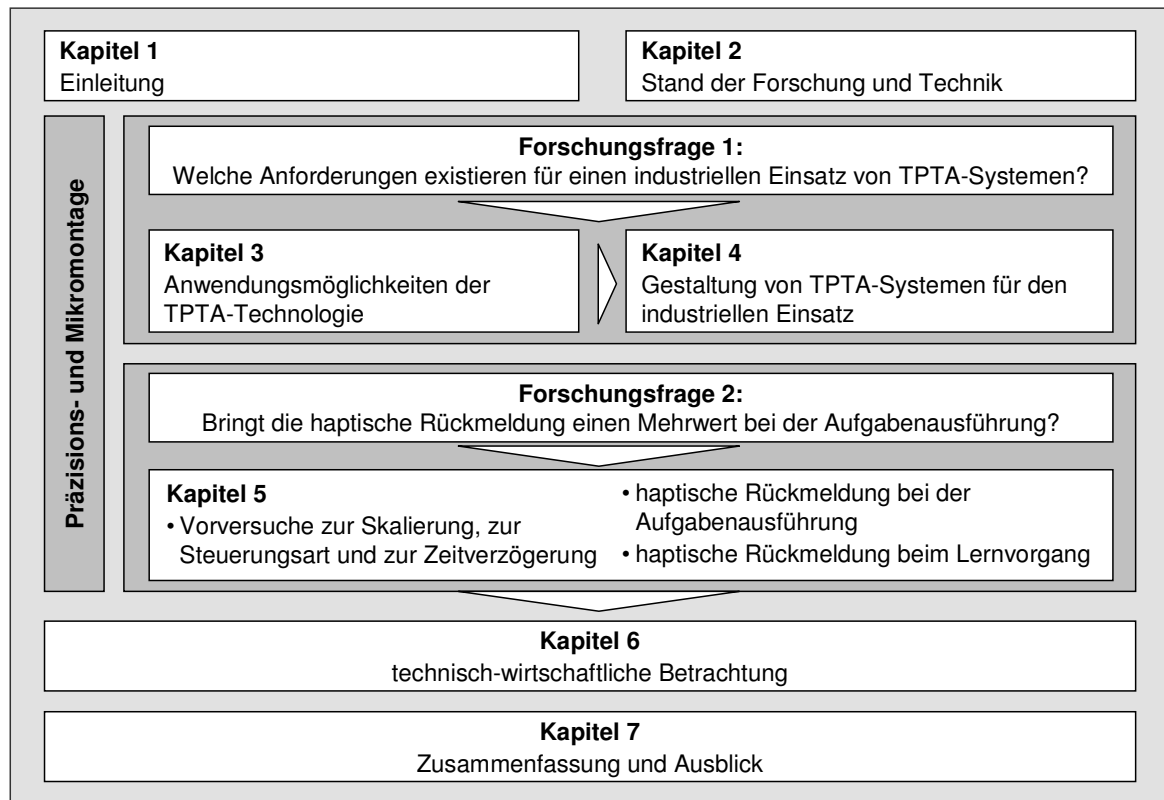


Abbildung 1.8: Vorgehensweise der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Allgemeines

In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung der TPTA-Technologie für die Montage diskutiert, wobei sich der Betrachtungsrahmen auf den Bereich der Feinwerk- und der Mikrotechnik fokussiert. Deshalb werden im Kapitel zum Stand der Forschung und Technik zunächst bereits vorhandene Lösungen und Forschungsansätze zur manuellen und automatisierten Montage miniaturisierter Systeme betrachtet. Im Anschluss daran wird auf die Teleoperationstechnologie eingegangen, insbesondere auf die Telepräsenztechnik. Hierfür werden verschiedene Anwendungsgebiete wie auch bisherige Arbeiten zur Nutzung im Bereich der Montage vorgestellt.

2.2 Montage miniaturisierter Systeme

Miniaturisierte Systeme sind sowohl auf dem Massenmarkt als auch auf dem kundenspezifischen Markt von wachsender Bedeutung. In Deutschland gilt die Kraftfahrzeugtechnik als Haupteinsatzbereich im Massenmarkt und damit als Triebfeder der Miniaturisierung. Kommunikationstechnologien, Biomedizin und Gebrauchsgüter spielen ebenfalls eine große Rolle (SCHÜNEMANN 2003, S. 25). Hierfür eignen sich beispielsweise hochautomatisierte Anlagen mit einer Kapazität von mehreren Millionen Stück pro Jahr. Diese Anlagen besitzen zwar einerseits eine hohe Ausbringung, andererseits jedoch eine geringe Flexibilität. Als Beispiel hierfür sind SMD-Montageautomaten, so genannte Bestückautomaten, zu nennen, welche bis zu 60000 Elektronik-Baueinheiten pro Stunde verarbeiten (HESSELBACH et al. 2006).

Auf dem kundenspezifischen Markt ist die Miniaturisierung in der Medizintechnik und der Präzisions- und Feinwerktechnik stark ausgeprägt (SCHÜNEMANN 2003). Aufgrund der mangelnden Flexibilität sind automatisierte Montagesysteme in diesen Märkten für geringe Stückzahlen nicht rentabel (MESSE STUTTGART 2007; STEIGER 2008). Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Einordnung von Montagekonzepten in Abhängigkeit der Stückzahl und des Flexibilitätsgrades.

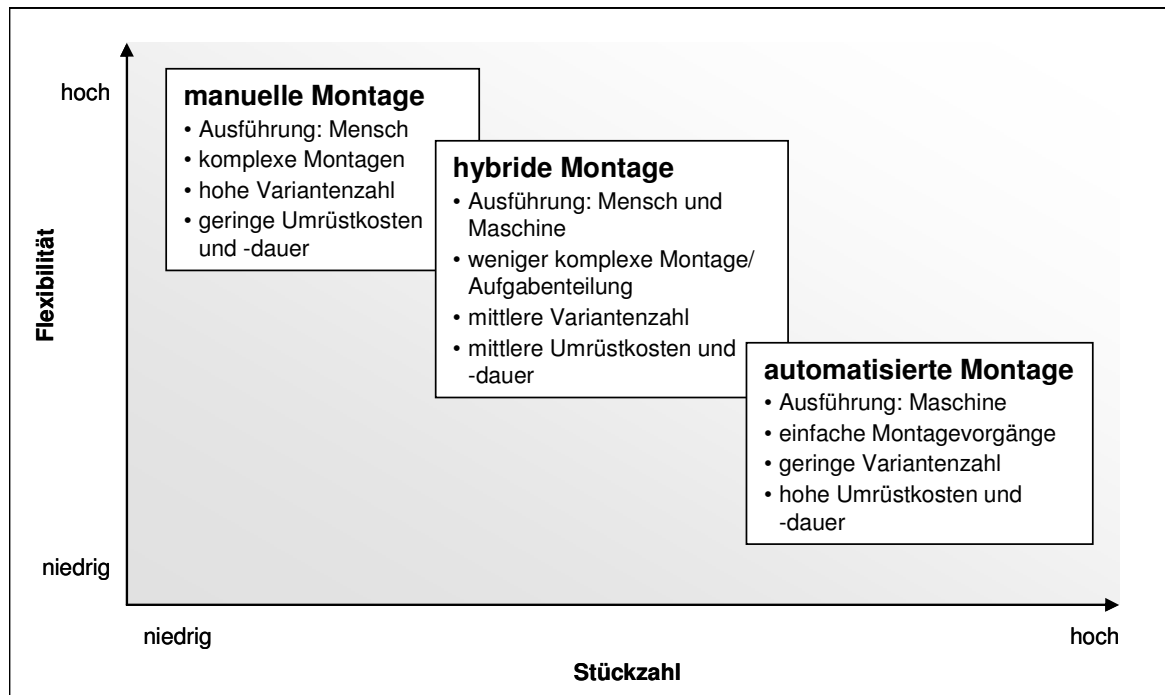


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Stückzahl und Anlagenflexibilität

2.2.1 Manuelle und teilautomatisierte Präzisionsmontage

Besondere Herausforderungen für die manuelle Montage von Präzisions- und Mikroprodukten liegen in der notwendigen Genauigkeit der Montagevorgänge und der Empfindlichkeit der Bauteile. Zur Durchführung der Aufgaben benötigt das Montagepersonal meist Hilfsmittel zur Vereinfachung der Handhabung oder Mikroskope zur Verbesserung der Sicht auf den Vorgang (HESSELBACH 2000; Abbildung 2.2). Eine Auswahl von am Markt erhältlichen Systemen, welche den Menschen bei der Montage unterstützen, wird im Folgenden vorgestellt.

Einige Montagezellen können manuell oder teilautomatisiert betrieben werden (GROSS & DIRKS 2004; GERWAH MIKROTECHNIK 2006; KORB 2005; ARTEOS GMBH 2006; ARTEOS GMBH 2008). Sie bieten ebenfalls Funktionalitäten für teleoperiertes Arbeiten, so dass eine manuelle ferngesteuerte Montage über den PC möglich ist. Als Eingabegeräte dienen hierbei Tastatur und Maus, eine Kraftrückmeldung an den Bediener während der Montageoperationen ist nicht vorgesehen. Diese Systeme eignen sich vor allem für Kleinserien, da der Automatisierungsgrad gering ist.

Auch werden Baukastensysteme angeboten, welche sich durch einen anpassbaren Automatisierungsgrad von manuell geführten Prozessen bis hin zur Teilautomatisierung und einen modularen Aufbau auszeichnen (z. B. MILASYS TECHNOLOGIES GMBH 2007).

In der meist automatisierten Produktion von elektronischen Produkten kommen zur Reparatur von elektrischen Schaltungen auf Platinen manuelle Rework-Arbeitsplätze zum Einsatz. Diese bestehen aus einem Kamerasystem, welches manuell über der fehlerhaften Stelle positioniert wird, einer Kinematik mit zwei Freiheitsgraden für die Positionierung in der x-y-Ebene und einem multifunktionalen Werkzeugkopf zur Reparatur, der bei manchen Modellen mit Kraftsensorik ausgestattet ist (ZEVAC AG 2009; EVERTEC E. K. 2010). Damit kann das Montagepersonal effizient und mit gleichbleibender Qualität z. B. manuelle oder teilautomatisierte Lötvorgänge durchführen.

Bei einer zunehmenden Verkleinerung der Produkte finden sich im Bereich der Nanomanipulation u. a. in Japan und Deutschland Ansätze zur Fernsteuerung (FATIKOW et al. 2007, KROHS et al. 2008; NAKAZATO et al. 2009). Hierbei werden Mikroobjekte, wie beispielsweise so genannte Nanotubes, kleinste Röhren mit Größen von wenigen Mikrometern bis in den Nanometerbereich, manipuliert. Als Werkzeuge werden Mikrogreifer oder Messnadeln in Rasterkraftmikroskopen (Cantileverspitzen) verwendet. Die Steuerung erfolgt in zwei oder drei Freiheitsgraden durch die Verwendung von Joysticks. Besonders schwierig ist bei der Nanohandhabung die Visualisierung der Objekte. Sie erfolgt im Rasterkraftmikroskop, wobei nur eine beschränkte Tiefendarstellung möglich ist. Ein am Markt erhältliches System der Dr. Volker Klocke Nanotechnik GmbH für die Mikro- und Nanomanipulation kann über einen Joystick gesteuert werden (DR. VOLKER KLOCKE NANOTECHNIK 2010). Die Rückkopplung von Kräften erfolgt über einen Kraftsensor des Manipulatorsystems an das Ein-/Ausgabe-Gerät des Bedieners. Damit kann der Nutzer die Nachgiebigkeit der Oberfläche fühlen und erkennt, ob es sich um ein weiches elastisches Material oder ein hartes Material handelt.



Abbildung 2.2: Manuelle Montage unter dem Mikroskop im Reinraum

2.2.2 Automatisierte Präzisionsmontage

Einen wichtigen Trend in der Montagetechnik machen flexible oder modular aufgebaute, automatisierte Montagestationen aus, welche eine Automatisierung auch für kleinere Stückzahlen erleichtern und somit eine Alternative zur manuellen Montage bieten. Die Flexibilität wird dabei entweder durch einen modularen Anlagenaufbau gewährleistet oder durch mehrere Bearbeitungs- und Transportsysteme, so dass die notwendigen Produktionsschritte je nach Produkt ausgewählt werden können. Auch der modulare Aufbau von miniaturisierten Systemen kann ein Weg zur wirtschaftlichen automatisierten Produktion sein (GROSSER et al. 2000). Des Weiteren existieren Ansätze zur Steigerung der Präzision bei den Systemen zur Bewegungsausführung, um die Präzisions- und die Mikrohandhabung sowie die -montage realisieren zu können.

Beispiele für modulare Systeme für die Präzisions- und die Mikromontage:

- Ein am Markt erhältliches System zur Mikromontage ist die „MicRohCell“. Sie bietet verschiedene Prozessmodule, die je nach Montageaufgabe eingewechselt werden können. Die Module sind mit einer lokalen Intelligenz ausgestattet, so dass sie vom Gesamtsystem automatisch erkannt und programmiert werden können (ROHWEDDER AG 2007). Das System kann teil- oder vollautomatisiert arbeiten, abhängig davon, wie viele Montageschritte in der MicRohCell ausgeführt werden.
- Insbesondere die Modularität steht bei der von der Firma Bosch entwickelten „Desktop Factory“ im Vordergrund (KLEMD 2007; MINTCHELL 2007). In einer Fertigungszelle wird jeweils ein einzelner hochautomatisierter Takt realisiert. Die Zellen können nach Bedarf neu verkettet werden, so dass das System einen hohen Wiederverwendungsgrad aufweist. Durch die Automatisierung ist ein Einsatz für mittlere bis hohe Stückzahlen sinnvoll.
- Auch das System der Deprag Schulz GmbH basiert auf einem modularen Ansatz (DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. 2009). Die in sich abgeschlossene Montageeinheit besteht dabei aus schnell austauschbaren Modulen für verschiedene Werkzeuge, wodurch sie sich flexibel an neue Produkte anpassen lässt.

Beispiele für Kinematiken für die Präzisions- und die Mikromontage:

- Im Bereich der seriellen Kinematiken sind verschiedene Roboter- und Komponentenhersteller tätig, welche Präzisionssysteme fertigen und vertreiben (SYSMELEC SA 2009; MILANESI 2009; SPI GMBH 2009).
- Darüber hinaus werden auch Parallelkinematiken entwickelt, welche höhere Genauigkeiten als serielle Kinematiken erreichen (PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & Co. KG 2009a; HEINZELMANN 2009).

Neben diesen käuflichen Plattformen sind eine Reihe von Forschungsvorhaben zu nennen, die sich mit der Problematik eines flexiblen Montagesystems beschäftigen. Auch hier sind die Auslöser für die Projekte die zunehmende Miniaturisierung von Produkten und die große Anzahl an mittelständischen Betrieben im Mikrotechniksektor. Deshalb werden flexible, modulare und rekonfigurierbare Mikromontagesysteme angestrebt, welches geringere Investitionskosten und eine leichtere Anpassbarkeit als herkömmliche automatisierte Systeme aufweist.

Ein System für die Herstellung von Mikroprodukten wird an der Universität der Bundeswehr in Hamburg, Laboratorium Fertigungstechnik, entwickelt, genannt „Square Foot Manufacturing“ (WULFSBERG et al. 2008). Eine Basisplattform in der Größe eines Quadratfußes für Bearbeitungsmaschinen und Werkstückträger kann mit mehreren Maschinen bestückt werden. Mehrere Plattformen können für die Fließbandfertigung aufgereiht werden, so dass jede einen Produktionsschritt realisiert. Die Flexibilität erlangt das System durch den modularen Aufbau und definierte Schnittstellen zwischen den Komponenten zur schnellen Rekonfiguration.

Das „MiniProd“ ist ein am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) entwickeltes Mikroproduktionssystem, welches hochflexible Transportmodule besitzt, die das Produkt zur jeweiligen Bearbeitungsstation bringen. Ein Transportmodul kann in beliebiger Reihenfolge eine Bearbeitungsstation anfahren. Die Steuerung des Systems erfolgt über eine modulare Softwarearchitektur, die je nach Produktionsaufgabe programmiert wird (GAUGEL et al. 2004a; GAUGEL et al. 2004b; BENGEL 2005; SCHMIDT & KEGELER 2005).

Mit einer Joystick-Steuerung ist die transportierbare „Microfactory“ des National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan, ausgestattet. Außerdem lassen sich die Fertigungsschritte Mikrodrehen und -fräsen, Pressen, Greifen und Manipulieren in einer transportablen Box ausführen (OKAZAKI et al. 2002). Durch Joysticks kann der Bediener zum nächsten Fertigungsschritt navigieren. Dieses System bietet somit einen Ansatz zur intuitiven Montagesteuerung jenseits der Standard-Bedienung durch die PC-Tastatur, die PC-Maus oder ein Roboter-Bedienpanel.

An intelligenten Produktionsanlagen mit integrierten Planungstools forscht die TU Kaiserslautern. Die dort aufgebaute „SmartFactory“ soll den zukünftigen Anforderungen an eine flexible und agile Produktion gerecht werden. Durch ganzheitliche Ansätze für die Prozessplanung und -steuerung und ein automatisches System zur Fehlerdiagnose soll eine effiziente und qualitativ hochwertige Produktion von Mikro- und Nanoprodukten möglich werden (ZÜHLKE et al. 2007).

Zur Durchführung von Montageaufgaben mit mehreren Freiheitsgraden entwickelte das Fraunhofer-Institut für angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) ein automatisches Mikromontage- und -fügesystem (FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK 2003). Die hohe Flexibilität erhält es durch verschie-

dene Positioniersysteme wie Piezoaktoren mit Auflösungen von bis zu 1 nm sowie Hexapod-, Scara- oder Knickarmroboter. Sie unterscheiden sich in der Positioniergenauigkeit und im Arbeitsraum, so dass verschiedene Aufgaben damit bewerkstelligt werden können. Auch ein Werkzeugkopf mit mehreren Werkzeugen ist hierfür entwickelt worden.

Im Sonderforschungsbereich 516 „Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird ein hochpräziser Parallelroboter zur automatisierten Mikromontage entwickelt (SLATTER & BURISCH 2005). Zur Erhöhung der Genauigkeit kommt dabei ein sensorgeführtes System zum Einsatz, so dass der Montageroboter eine Genauigkeit von 2 μm erreicht (HESSELBACH & HEUER 2005; KUKA ROBOTER GMBH 2009).

Mit einem methodischen Vorgehen zur Auslegung von Mikroproduktionssystemen beschäftigt sich das Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH). Durch eine angepasste MTM-Analyse für die manuelle Montage von Mikroteilen, in der ein Zeitzuschlag beispielsweise für das Nachjustieren von Bauteilen mit einbezogen wird, sowie durch eine ABC-Analyse der Prozesse konnten dabei Vorgehensweisen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit eines Montagesystems ermittelt werden (FLEISCHER et al. 2004). Darüber hinaus wird eine modulare Produktionsplattform entwickelt, welche durch einen Baukasten aus verschiedenen Fertigungs- und Montagemodulen eine flexible automatisierte Mikroproduktion für geringe Stückzahlen ermöglicht. Durch die modulare Bauweise wird außerdem eine Reduzierung der Investitionskosten angestrebt (FLEISCHER et al. 2005b).

Des Weiteren wird am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) an Logistikkonzepten für die Mikroproduktion geforscht, welche über RFID-Chips zum Bauteil gehörige Abmessungen speichern. An den Stationen können diese spezifischen Vermessungsangaben für eine genaue Bearbeitung verwendet werden (BRECHER et al. 2009). Durch dieses Produktionskonzept lässt sich die bisher starre Verkettung automatisierter Systeme auflösen (PETERSEN 2003; PESCHKE 2007, S. 15).

Auch virtuelle Simulationsumgebungen zur Aufgabenprogrammierung können bei der Planung von Fertigung und Montage in der Mikroproduktion hilfreich sein, um mögliche Kollisionen oder auftretende Kräfte zu bestimmen und die Gestaltung der Aufgabe anzupassen (FERREIRA et al. 2004).

2.2.3 Zusammenfassung

Diese Beispiele zeigen, dass einerseits für die manuelle Montage Manipulationssysteme zur Unterstützung des Menschen herangezogen werden, damit er präzisere Bewegungen durchführen kann. Insbesondere die manuell bedienbaren Manipulationssysteme nutzen und unterstützen bisher jedoch nur wenig die verschiedenen Sinneskanäle des Menschen, welche ihm bei Handlungen im makroskopischen Be-

reich zur Verfügung stehen. Andererseits werden auf dem Gebiet der automatisierten Mikromontage Anstrengungen unternommen, um eine höhere Flexibilität zu erreichen und somit Alternativen zu bisherigen hochautomatisierten Produktionsanlagen zu schaffen. Die automatisierten Systeme verwenden hierfür Sensorik, um die jeweiligen Zustände der Prozesse und Merkmale der Produkte erfassen zu können. Bei den manuell bedienten Manipulationssystemen findet die sensorielle Zustandserfassung und die Weitergabe der Information an den Werker bisher nicht oder nur in sehr geringem Maße statt.

2.3 Anwendungsgebiete der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie

In diesem Abschnitt wird auf die Hauptanwendungsgebiete für Telepräsenzsysteme eingegangen, welche meist außerhalb des produktionstechnischen Umfeldes liegen (STONE 2001), wie in der minimalinvasiven Chirurgie oder in der Nukleartechnik. Seltener Einsatzgebiete sind darüber hinaus beispielsweise eine Museumserkundung ohne physische Anwesenheit (AGAH & TANIE 1999) oder die Steuerung eines Unterwasserfahrzeugs (LIN & KUO 1999), welche hier nicht weiter erläutert werden sollen.

2.3.1 Minimalinvasive Chirurgie

Im medizinischen Bereich werden Ansätze zur Durchführung telepräsent gesteuerter Operationen entwickelt (z.B. TENDICK & CAVUSOGLU 1997; KONIETSCHKE et al. 2006). Hierbei bietet vor allem die minimalinvasive Chirurgie Potentiale, da durch TPTA-Technologie ein operativer Eingriff deutlich erleichtert werden kann. Des Weiteren sind solche Systeme für Ausbildung und Training einsetzbar, so dass ein Arzt eine Operation vorher in der Simulationsumgebung üben kann (LIU et al. 2003). Hierfür werden auch spezielle Operationsgeräte für die minimalinvasive Chirurgie entwickelt, welche mit Kraftsensorik ausgestattet sind und dem Arzt am Griff des Geräts eine Krafrückmeldung geben, beispielsweise zum Ertasten von Gewebe (SEIBOLD et al. 2007; MAYER et al. 2007).

Auch das Durchführen von Operationen über große räumliche Distanzen ist ein mögliches Szenario für die telepräsente Chirurgie. Eine erhebliche Herausforderung entsteht dabei durch die Zeitverzögerung der übertragenen Signale, da hierdurch ein TPTA-System intransparent und nicht steuerbar wird. Folglich müssen Prädiktions- und Regelungsalgorithmen entworfen werden, um die präzise durchzuführenden Bewegungen bei einer Operation mit der notwendigen Genauigkeit realisieren zu können (OTTENSMEYER et al. 2000). Hierbei ist auch die Darstellung der auftreten-

den Kräfte in Echtzeit in wichtiges Kriterium für intuitives Arbeiten (ONO et al. 2009; ONO et al. 2010).

2.3.2 Serviceroboter im Weltraum

Als weitere Anwendung der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie ist der Außeneinsatz von Reparaturrobotern für Weltraumstationen (ARTIGAS et al. 2006, STOLL et al. 2009) sowie zur Exploration von extraterrestrischem Gebiet zu nennen (SOTO et al. 2009). Hierbei wird an Szenarien geforscht, bei denen ein Roboter im Weltall von der Erde aus ferngesteuert werden kann (Abbildung 2.3). Eine Automatisierung der Tätigkeiten kommt nicht in Betracht, da die Aufgabenstellungen vielfältig und unvorhersehbar sind. Die Schwierigkeit beim Aufbau eines solchen Telepräsenzsystems liegt in der Länge der Signallaufzeit von der Bodenstation zur Raumstation. Diese extreme Zeitverzögerung von bis zu mehreren Sekunden kann zu Instabilitäten im System führen. Geeignete Regelungsstrategien sind deshalb auch hier von Bedeutung (SHERIDAN 1993).



Abbildung 2.3: Versuchsstand des DLR für den Einsatz von telepräsent gesteuerten Robotern in Weltraumstationen (Quelle: STOLL et al. 2009)

2.3.3 Handhabung gefährlicher Objekte

Ein weiteres Einsatzszenario für die Teleoperation ist die Manipulation von Gefahrstoffen bzw. gefährlichen Objekten. Durch die räumliche Trennung zwischen Handlungsort und Mensch muss letztgenannter dazu keinen Gefahren ausgesetzt werden, sondern kann die Aufgabe aus einer sicheren Umgebung heraus ausführen und kontrollieren.

Zur Entschärfung von Minen und Bomben ist ein mobiler und geländegängiger Teleoperator nötig, um zum Handlungsort gelangen zu können, ohne den Menschen in

die Gefahreinflusszone zu bringen. Ein solches System wurde beispielsweise mit einem Operatorarbeitsplatz mit 3D-Visualisierung und beidhändiger Manipulation realisiert (KRON et al. 2004; PETZOLD et al. 2004a).

Zur Manipulation von radioaktiven Stoffen werden schon seit mehreren Jahrzehnten Systeme eingesetzt, die als Telepräsenzsysteme bezeichnet werden können. In den 1950er Jahren wurden mechanische Greifsysteme verwendet, mit denen ein Mensch die radioaktiven Objekte handhaben konnte und dabei durch eine Bleiglasscheibe geschützt war (JANSEN & KRESS 1995). Die visuelle und die haptische Rückkopplung waren somit verzögerungsfrei und die Kräfte vom Greifsystem konnten durch die direkte mechanische Kopplung an den Bediener übertragen werden, allerdings war eine Skalierung nicht möglich. Neuere Forschungsansätze beschäftigen sich mit der Implementierung von mechatronischen Telepräsenzsystemen, um auch eine Skalierung von Kräften und Bewegungen zu ermöglichen (GARREC et al. 2005).

Außerdem werden u. a. Handschuhboxen zur Durchführung von Tätigkeiten mit radioaktivem Material eingesetzt, welche die manuelle Handhabung der darin befindlichen Objekte durch spezielle Gummihandschuhe gestatten. Die Sicht auf die Arbeitsumgebung in diesen Boxen ist durch mehrere Zentimeter dickes Bleiglas stark eingeschränkt, so dass nicht alle Arbeitsbereiche eingesehen werden können. Hierzu wird an Visualisierungsstrategien mittels Augmented Reality geforscht. Über Kameras in den Boxen und eine Videobrille für den Operator werden die Sicht verbessert und zugleich Zusatzinformationen wie Arbeitsanweisungen an den Operator weitergegeben (REINHART et al. 2007; REINHART & EURSCH 2008).

Für die beschriebenen und weitere Bereiche wird auch verstärkt an intuitiven und immersiven Operatorarbeitsplätzen geforscht. Der Begriff Immersion beschreibt das gefühlte Eintauchen des Operators in die teleoperierte Umgebung. Hierdurch soll die Bedienung dabei möglichst einfach sein, um im Umgang mit Gefahrstoffen Bedienfehler zu vermeiden. Hierzu werden seit den 1990er Jahren insbesondere das haptische und kinästhetische Feedback sowie die 3D-Visualisierung und Regelungsstrategien erforscht, wobei sich die Arbeiten nicht auf spezielle Anwendungsgebiete konzentrieren (TACHI et al. 1990; TACHI 1995; PEER et al. 2006; PEER et al. 2008).

2.3.4 Handhabung biologischen Materials

Für die Manipulation biologischen Materials bietet der Einsatz von Telepräsenzsystemen ebenfalls Vorteile. Die Bearbeitung von hochsensiblen Zellmaterial unter dem Mikroskop erfordert hohe Präzision und Vorsicht. Der Mensch, welcher mit Pinzetten oder Injektionsnadeln das Material bearbeitet, kann die Kontaktkräfte in der Regel nicht mehr wahrnehmen und muss sich auf die vergrößerte visuelle Darstellung des Mikroskops verlassen (SIEVERS et al. 2005). Mit dem Gebrauch von telepräsenten Manipulatoren kann eine Skalierung der Signale zwischen makrosko-

pischer und mikroskopischer Umgebung vorgenommen werden. Kraftsignale bei der Berührung des biologischen Materials können durch hochauflösende Sensoren detektiert und auf die menschliche Wahrnehmung skaliert an den Bediener rückgemeldet werden. Auch die Größenordnung der menschlichen Bewegung kann skaliert und durch μm -genaue Kinematiksysteme übersetzt werden (PALM et al. 1999; HWANG et al. 2007; ZAREINEJAD et al. 2009).

2.3.5 Steuerung von Industrierobotern

Im Bereich der Fertigung und Montage für makroskopische Anwendungen wird an Systemen zur telepräsenten Manipulation von Robotern geforscht. Ziel ist der Einsatz von Industrierobotern als Hebehilfe für schwere Lasten. Durch eine haptische Rückkopplung soll der Operator beim ersten Kontakt oder durch virtuelle Schranken vor ungewollten Kollisionen gewarnt werden (Abbildung 2.4). Zur intuitiven Bedienung eines solchen Systems ist aufgrund der hohen auftretenden Kräfte eine stabile Regelung notwendig (REINHART & RADİ 2008). Darüber hinaus wird auch der Einsatz von Robotern oder Minibaggern mit Greifaufsätzen als Hebehilfen für schwere Materialien beim Bau von Gebäuden betrachtet (LEE et al. 2007).

Visuelle Rückmeldungen, beispielsweise über Kamerasysteme, sind bei diesen Systemen nicht immer vorgesehen, da sich der Arbeiter in einigen Fällen direkt neben dem Roboter befindet und einen freien Blick auf das Geschehen hat. In anderen Robotersystemen wird zusätzlich auch die Verbesserung des Operatorsichtfelds vorangetrieben. Augmentierte Darstellungen können beispielsweise die Orientierung des Operators verbessern und die Robotersteuerung somit intuitiver gestalten, jedoch ist eine komplett virtuelle Bildgebung für industrielle Anwendungen nicht sinnvoll, da es immer unvorhergesehene Zustände, Bewegungen oder veränderte Aufenthaltsorte der Objekte geben kann (DAI 2001).



Abbildung 2.4: TPTA-System zur Handhabung schwerer Lasten (Quelle: REINHART & RADI 2008)

2.3.6 Präzisions- und Mikromontage

Wie auch bei der Manipulation biologischer Materialien liegt der Vorteil von TPTA-Systemen für die Präzisions- und die Mikromontage in der Skalierung von Kräften und Bewegungen zwischen Mensch und Mikrobauenteil, wodurch die Konzentrationsbelastung zur Durchführung der hochgenauen Bewegungen auf die eines normalen Bewegungsniveaus reduziert wird. PETZOLD (2007) entwarf hierfür einen Operatorarbeitsplatz, der die Montage von Feinwerk- und Mikrobauteilen erleichtert. Beispielsweise ist darin das Eingabegerät für den menschlichen Bewegungsradius angepasst. Zur beidhändigen Arbeit wird ihm für die dominante und die nichtdominante Hand eine unterschiedliche Skalierung geboten, da im täglichen Leben die hauptsächlich verwendete dominante Hand alle feinmotorisch anspruchsvollen Tätigkeiten übernimmt, wohingegen die nichtdominante Hand großflächigere grobmotorische Bewegungen ausführt (PETZOLD et al. 2004b).

EHRENSTRASSER (2007) widmet sich der sensoruellen Signalerfassung eines Telepräsenzsystems zur Mikromontage. Er diskutiert eine Sensorrahmenarchitektur, welche es ermöglicht, je nach Aufgabe den Teleoperator mit den dafür notwendigen Sensoren auszustatten. Die tatsächlich als Hardware vorhandene Sensorik erweitert er zusätzlich um die Klasse der logischen Sensoren. Die Art der Aufgabenausführung oder die Gestaltung des Gesamtsystems werden nicht näher beleuchtet.

ANDO et al. (2001) entwickelten an der Kyoto Universität ein Telepräsenzsystem zur Mikromanipulation. Eine dafür konstruierte präzise 6-DOF-Parallelkinematik mit einer Spitze als Endeffektor wird auf der Teleoperatorseite genutzt und kann mit

einer Genauigkeit von 10 μm verfahren. Der Operator steuert das System mit einem 6-DOF-Ein-/Ausgabe-Gerät. Die Visualisierung erfolgt durch ein digitales Mikroskop auf der Teleoperatorseite und einen Bildschirm auf der Operatorseite. Die Greiftechnik für eine tatsächliche Anwendung in der Mikrohandhabung bleibt dabei aber unberücksichtigt. Die Forscher betrachten die Realisierung haptischer Rückmeldungen durch verschiedene Skalierungsfaktoren sowie regelungstechnische Fragestellungen für eine präzise Abbildung der Operatorbewegungen ohne Überschwingungen.

Eine andere Forschergruppe präsentiert ein teleoperiertes System zur Handhabung von Mikroobjekten mit haptischem Feedback, welches sowohl manuell teleoperiert als auch automatisiert betrieben werden kann (KIM et al. 2001; KIM et al. 2006). Der Fokus liegt auf einer intuitiven Steuerung, welche entweder im teleoperierten Modus oder im semi-automatischen Modus arbeitet. Als Beispiel diente die Montage eines opto-elektronischen Bauteils, wobei die Handhabung teleoperiert und die Feinjustage und Montage durch automatische Vorgänge realisiert wurden.

Um die Vorteile von Mensch und Roboter für die Mikromontage zu nutzen, bauten SHEN et al. (2006) ein telepräzentes System auf, das dem gerade beschriebenen ähnelt. Die Visualisierung erfolgt bei diesem über Mikroskop und Bildschirm. Ein 3-DOF-Kinematiksystem und ein Manipulator mit integriertem Kraftsensor bilden den Teleoperatoraufbau. Als Mensch-Maschine-Schnittstelle verwendet Shen einen handelsüblichen Force-Feedback-Joystick und eine Phantom Desktop (SENSABLE TECHNOLOGIES INC. 2009). Eine industrielle Anwendung wird nicht näher betrachtet.

Für die 3D-Mikromontage mit 4 bis 6 Freiheitsgraden wurde an der University of Minnesota ein System entwickelt, bei dem der Schwerpunkt auf der Umsetzung robuster pick-and-place-Vorgänge lag (YANG et al. 2001). Der dabei konzipierte Mikrogreifer kann die Greifkraft überwachen, so dass empfindliche Bauteile ohne Beschädigungen gehandhabt werden können. Der Operator übernimmt in diesem Telepräsenzsystem die Feinjustage, grobe Positioniervorgänge erfolgen automatisch.

Mit der Manipulation und Handhabung von Mikro- und Nano-Objekten befasst sich eine Forschergruppe um Fatikow (FATIKOW 2000; FAHLBUSCH & FATIKOW 2001; FAHLBUSCH et al. 2002). Von KORTSCHACK et al. (2005) wird in diesem Zusammenhang ein telepräzentes steuerbares System zur Manipulation von Mikro- und Nanobauteilen vorgestellt. Als Teleoperatoren agieren verschiedene selbst entwickelte Mikroroboter, welche in drei Freiheitsgraden verfahrbar sind und eine Bewegungsauflösung im Nanometerbereich aufweisen. Auf der Bewegungseinheit werden verschiedene Endeffektoren angebracht. Diese sind mit Kraftsensoren ausgestattet, so dass bei Kontakten eine Rückmeldung an den Operator möglich ist. Als Eingabegerät für den Operator wurde ein Joystick entwickelt. Er besteht aus vier Drehgelenken mit Motoren, welche Force Feedback generieren können. Die Visualisierung für

den Operator erfolgt über ein Sekundärelektronenmikroskop (SEM), dessen Vakuumkammer die räumlich getrennte Arbeitsumgebung der Teleoperatoren darstellt.

Für die manuell gesteuerte Manipulation von Nanoobjekten, z.B. Nanotubes oder Nanowires, wird ebenfalls an Lösungen mit visuell-haptischer Rückkopplung geforscht (SITTI 2003; LI et al. 2005). Im Rasterkraftmikroskop wird dabei die Cantilever-Spitze zur Erfassung von Oberflächen oder Objekten genutzt, wodurch eine taktile Rückmeldung an den Operator gegeben werden kann.

2.4 Signaldarstellung im HVA-Arbeitsraum

2.4.1 Visualisierung

In allen zuvor genannten Umgebungen für Telepräsenz- und Teleaktionssysteme erhält der Operator visuelle, akustische und/oder haptische Signale, weshalb in diesem Zusammenhang von einem haptisch-visuell-akustischen Arbeitsraum (kurz: HVA-Arbeitsraum) gesprochen wird. In diesem Abschnitt wird zunächst der Stand der Forschung und Technik für die visuelle Rückmeldung beleuchtet.

Zur Visualisierung in virtuellen und TPTA-Umgebungen wurde an der Entwicklung oder Verbesserung der verschiedenen Displays gearbeitet (PAUSCH et al. 1993; BOWMAN et al. 2001) und es wurden bestimmte Typen von Displays verglichen, wie Head-Mounted-Displays (HMD) und CAVEs (Cave Automatic Virtual Environment) zur 3D-Projektion (BOWMAN et al. 2006; BOWMAN et al. 2007). Eine CAVE ist ein Raum, in den an mehrere Wände eine virtuelle Umwelt projiziert wird, wobei der Nutzer zur Erzeugung der dreidimensionalen Wahrnehmung zusätzlich eine Filterbrille trägt. Ein HMD ist eine Videobrille, bei der jedem Auge über einen eigenen Bildschirm eine Perspektive gezeigt wird, so dass eine dreidimensionale Sicht erzeugt wird. Da ein HMD den Nutzer von seiner eigentlichen Umgebung separiert, wird dadurch Teamarbeit erschwert (LANTZ 1996). Im Vergleich zum Arbeiten in einer CAVE bietet ein HMD aber eine leichtere räumliche Orientierung und die Nutzer bewegen sich natürlicher (BOWMAN et al. 2002).

Eine ältere Untersuchung zum Vergleich eines konventionellen Bildschirms mit einem HMD mit und ohne Stereosichtweise ergab, dass die Aufgabenausführung am Standardbildschirm im Mittel am längsten dauerte und mit einem Stereo-HMD die kürzeste gemittelte Zeit erreicht wurde (TACHI et al. 1990).

Beim Vergleich eines HMD, welches stereoskopisches Sehen ermöglicht, und eines monoskopischen Bildes mit der Darstellung von Schatten wurde festgestellt, dass das letztgenannte eine höhere Performanz der Operatoren brachte (ESCRIBANO et al. 2000). Auch ein Greifversuch mit verschiedenen Arten der Rückmeldung ergab

keine signifikanten Verbesserungen mit einem Stereodisplay im Vergleich zu monoskopischer Sichtweise (RICHARD & COIFFET 1995).

Bei einer Untersuchung einer Montageaufgabe von LIM et al. (2007), bei der ein Bolzen in ein Loch eingeführt werden sollte, erwies sich die Stereodarstellung mit haptischer Rückkopplung hingegen als die beste Variante. Ohne Stereobild benötigten die Testpersonen 24 bis 43 % mehr Zeit in Abhängigkeit der Gestaltung des Bolzens. Ohne haptische Rückkopplung wurden die Leistungen der Personen ebenfalls erheblich schlechter, was in diesem Fall auf einen höheren Einfluss der Haptik gegenüber der visuellen Darstellung hindeutet.

Die Untersuchungen lassen folglich darauf schließen, dass eine 3D-Visualisierung über HMDs, CAVEs oder andere 3D-Bildgeräte zur Einschätzung von Raumtiefe nicht zwingend nötig ist, sondern sich der Operator bei einer 2D-Darstellung an anderen Hilfsmitteln wie dem Schattenwurf orientieren kann.

Speziell für die Mikromontage untersuchten ZAEH & PETZOLD (2005), ob eine Realbild-Darstellung oder eine virtuelle Bilddarstellung bei einem Mikromontageszenario bessere Ergebnisse erzielen. Die Autoren stellten fest, dass bei der Realbild-Darstellung die durchschnittliche Bearbeitungszeit um 30 % höher war als bei einer virtuellen Darstellung. Auch die aufgebrachten Kräfte bei einem pick-and-place-Vorgang waren bei der Realbildgruppe signifikant höher.

2.4.2 Akustik

Neben seinem wichtigsten Sinn, dem Sehsinn, orientiert sich der Mensch im Alltag auch nach seinem Gehör, denn viele Tätigkeiten sind von Geräuschen begleitet. Besonders sicherheitsrelevant sind Warntöne, um dem Menschen unabhängig von seiner aktuellen Blickrichtung eine Information mitzuteilen, da der akustische Reiz im Gegensatz zum Sehsinn ungerichtet ist (KEYROUZ & DIEPOLD 2007).

Akustische Meldungen können in Form von tatsächlich auftretenden Geräuschen oder durch die Wiedergabe künstlicher Töne erfolgen. Der künstliche Ton muss dann derart gestaltet sein, dass der Bediener ihn seinem Zweck zuordnen kann. Oft wird dabei durch ein akustisches Signal ein anderer Reiz substituiert. Ein Beispiel hierfür ist der Signalton der Einparkhilfe von Fahrzeugen, welcher die visuelle Einschätzung des Abstands ersetzt. In vielen Fällen wird nicht nur ein Reiz angesprochen, sondern es liegt eine Kopplung beispielsweise von akustischen Signalen mit visuellen oder haptischen Reizen vor. Im Folgenden werden Versuchsergebnisse zum Nutzen von akustischen Wahrnehmungen in telepräsenten oder virtuellen Umgebungen diskutiert. Meist wird der akustische Reiz dabei nicht alleine dargeboten, sondern als Ergänzung zu anderen Sinneseindrücken.

Akustische und visuelle Reizkopplung

In einem Experiment zur Beurteilung von Reibung wurde der in der realen Welt gefühlte haptische Reiz durch ein akustisches Signal sowie durch eine visuelle Bildverzögerung ersetzt (AVANZINI et al. 2004). Am besten konnten die Probanden eine Erhöhung der Reibung einschätzen, wenn diese sowohl durch das akustische Signal als auch durch die Bildverzögerung dargeboten wurde. Eine Leistungsverbesserung bei alleiniger akustischer Darstellung der Reibung wurde nicht festgestellt.

Bei einer pick-and-place-Aufgabe² zur Einschätzung der Gewichtskraft verschiedener Objekte war die Aufgabenzeit bei einer uni-modalen Rückmeldung (visuell durch Farbänderung, akustisch durch Änderung der Tonhöhe und taktil durch Änderung der Vibrationsfrequenz) bedeutend schlechter als bei multimodaler Rückmeldung (visuell-akustisch, visuell-taktil, visuell-akustisch-taktil) (HERBST & STARK 2005). Wurden die Rückmeldearten jeweils einzeln präsentiert, gab es nur geringe Leistungsunterschiede.

Eine multimodale Rückmeldung scheint jedoch nicht automatisch zu einer erhöhten Leistung zu führen. Bei der Ausführung einer peg-in-hole-Aufgabe³ genügte den Probanden eine visuelle Rückmeldung (LÉCUYER et al. 2002). Die Kombination von visuellem mit akustischem Feedback brachte in diesem Fall keine signifikante Leistungssteigerung.

Akustische und haptische Reizkopplung

Die Kopplung von akustischer und haptischer Rückmeldung zur Wiedergabe eines quasi-realen Vorgangs an den Operator wird in der Forschung ambivalent diskutiert. In einer Studie zur Montage von virtuellen Bauteilen wurde ein negativer Einfluss der akustischen Signale auf das Immersionsempfinden der Probanden festgestellt, wenn gleichzeitig haptisches Feedback geboten wurde (PETZOLD et al. 2004b). Bei anderen Versuchen erhöhte sich die Performanz der Probanden bei gleichzeitiger akustischer und haptischer Rückmeldung (RICHARD & COIFFET 1995; ZAHARIEV 2004). Fehlte haptisches Feedback, wurden auch durch zusätzliche akustische Rückmeldung zur Visualisierung bessere Ergebnisse festgestellt (AVANZINI et al. 2004; PETZOLD et al. 2004b).

² Erklärung des Aufgabentyps pick-and-place siehe Glossar

³ Erklärung des Aufgabentyps peg-in-hole siehe Glossar

2.4.3 Haptik

Im produktionstechnischen Umfeld kommt der menschliche Tastsinn bei manuellen Arbeitsschritten, beispielsweise bei Greif- und Absetzvorgängen (pick-and-place), gegebenenfalls mit Anschlägen oder Einführschrägen (peg-in-hole), zum Einsatz. Hier kann in TPTA-Systemen die haptische Rückmeldung wirkungsvoller als eine Stereosichtweise sein. Eine Vielzahl an Untersuchungen zeigt eine deutliche Verbesserung der Operatorleistung, sobald dem Operator neben visuellem auch haptisches Feedback zur Verfügung steht (KONTARINIS & HOWE 1995; SHEN et al. 2000; SALLNÄS 2001; UNGER et al. 2002; DEML et al. 2005; HERBST & STARK 2005; HWANG & HASHIMOTO 2007; WAGNER et al. 2007). Hierfür konnte auch eine Abhängigkeit von der Aufgabenstellung festgestellt werden, wobei Präzisionsaufgaben und Manipulationsaufgaben (Tracking-Aufgaben) untersucht wurden (SWAPP et al. 2006). Die Präzisionsaufgabe wurde mit haptischer Rückmeldung signifikant schneller erledigt als ohne, die Manipulationsaufgabe hingegen nicht, jedoch war auch dort tendenziell ein Trend zu geringeren Zeiten sichtbar.

Auch die Art der Kraftdarstellung, taktil und haptisch, hatte in verschiedenen Untersuchungen einen Einfluss auf die Operatorleistung. Taktile Reize werden häufig durch Vibration wiedergegeben, Krafrückkopplung hingegen als eine statische Kraft, wobei beide Arten die Zeit zur Zielerreichung merklich verkürzten (AKAMATSU et al. 1995; AKAMATSU & MACKENZIE 1996; TÄHKÄPÄÄ & RAISAMO 2002) oder die Fehlerquote des Operators reduzierten (JIANG et al. 2005). Auch eine zusätzliche Dämpfung in Form von simulierter Reibung führte zu einer Verbesserung der gemessenen Zeit (LIM et al. 2007).

Einige Untersuchungen förderten jedoch keine Unterschiede in der Zeit zur Aufgabenerfüllung für die verschiedenen Feedback-Arten zutage (z. B. WALL et al. 2002; LÉCUYER et al. 2002), wobei durch haptische Rückkopplung dann jeweils andere Leistungskriterien verbessert werden konnten (z. B. die Anzahl der Fehlversuche).

Des Weiteren wurde der Einfluss der Visualisierungsart und gleichzeitiger bzw. fehlender haptischer Rückmeldung untersucht. Probanden, welche eine stereoskopische Darstellung der virtuellen Umgebung bekamen, zeigten keinen Unterschied im Ergebnis bzgl. des Einsatzes bzw. des Fehlens von Krafrückkopplung (WALL et al. 2002). War die Darstellung hingegen monoskop, verbesserte die haptische Meldung das Versuchsergebnis signifikant. Ein anderer Versuch zum Greifen mit verschiedenen Rückmeldungen (visuell, auditiv, haptisch und die Substitution von Krafrückkopplung durch visuelle Anzeigen) und den Sichtarten stereoskop und monoskop ergab jedoch keinen Unterschied zwischen den beiden visuellen Anzeigen (RICHARD & COIFFET 1995).

In einer Studie zur kollaborativen Arbeit von zwei Operatoren in einem virtuellen System konnten der Grad des Zusammengehörigkeitsgefühls und die Leistung der

Operatoren durch Krafrückkopplung signifikant verbessert bzw. erhöht werden (BASDOGAN et al. 2000).

SWAPP et al. (2006) erweiterten die Untersuchung der Rückkopplung um den Aspekt der Gleichzeitigkeit. Wurden die visuellen und haptischen Reize zu einem Ereignis gleichzeitig angeboten, verbesserte sich die Leistung. Ergaben sich Abweichungen, so dass der haptische Reiz räumlich oder zeitlich nicht exakt mit dem visuellen übereinstimmte, verschlechterte sich die Leistung signifikant.

Auch die Tiefenwahrnehmung im dreidimensionalen virtuellen Arbeitsraum wird durch eine haptische Rückmeldung erleichtert (BOUGUILA et al. 2000a). In Arbeiten zum Einsatz von Haptik in der minimalinvasiven Chirurgie wurde außerdem festgestellt, dass haptische Rückmeldung die Ermüdung des Operators verringerte (BRAUN et al. 2007; MAYER et al. 2007).

2.4.4 Lernen in multimodalen Arbeitsräumen

Die Erweiterung der beim Lernen angesprochenen Sinne, insbesondere auf die haptische oder die taktile Sinneswahrnehmung, wird ambivalent diskutiert.

In einigen Studien hinsichtlich des haptisch unterstützten Lernens wurden keine Unterschiede zum visuellen Lernen, bei dem der zu lernende Vorgang beobachtet wird, festgestellt (JIANG et al. 2005; LIU et al. 2006; SWAPP et al. 2006). Es wurde dabei vermutet, dass die gestellte Manipulationsaufgabe so einfach war, dass ein standardmäßiges visuelles Lernen ausreichte und Effekte der haptischen Rückmeldung keinen Einfluss mehr hatten. Diese Aufgabenabhängigkeit zeigte sich auch bei einem Versuch von RICHARD & COIFFET (1995), da haptisches Feedback nur beim schwierigsten Aufgabentyp zu einer Reduktion der Zeiten zur Aufgabenerfüllung um bis zu 50 % führte.

Andere Untersuchungen zeigten hingegen Verbesserungen durch haptisches Lernen (YOKOKOHI et al. 1996; AMOKRANE et al. 2008). Diese Verbesserungen bezogen sich auf die Genauigkeit der zeitlichen Abfolge von Bewegungen und auf die gemessene Greifkraft. Hinsichtlich der Lernzeit wurden die größten Verbesserungen beim zweiten Versuchslauf gemessen (RICHARD & COIFFET 1995; YOKOKOHI et al. 1996; TENDICK & CAVUSOGLU 1997).

Des Weiteren existieren mehrere Ansätze für virtuelle Trainingseinrichtungen, beispielsweise von AMOKRANE et al. (2008). Das dort vorgestellte System, genannt HERA (Helpful agent for safety learning in virtual environment) besteht aus verschiedenen Modulen, um den Lernenden auf mehreren Ebenen zu unterstützen, beispielsweise durch Experten- oder Tutor-Funktionen. Über die Nutzung von haptischen Ein-/Ausgabe-Geräten oder den tatsächlichen Nutzen der Architektur wird jedoch nicht berichtet. Weitere virtuelle Trainingseinrichtungen wurden beispielsweise für die Fernsteuerung von Unterwasserroboterfahrzeugen (OTTENSMEYER et

al. 2000) oder zum Training von medizinisch anspruchsvollen Operationen entworfen (LIU et al. 2003).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die vorgestellten Arbeiten widersprüchliche Ergebnisse für visuell-haptisches Lernen zeigen. Dies könnte von der Art der Aufgabenstellung abhängen, wie in einigen Studien diskutiert wird. Für ein Szenario in der Mikromontage soll deshalb der Effekt haptischen Lernens konkret untersucht werden, um daraus abzuleiten, ob dessen Einsatz wirtschaftliche Vorteile, beispielsweise eine Verkürzung der Lernzeit, bringt.

2.4.5 Latenzzeiten

Der Kommunikationskanal kann, abhängig von seiner Gestaltung, unterschiedliche Verzögerungszeiten hervorrufen. Ist der Kommunikationskanal ein internes Netzwerk (Local Area Network: LAN), bewegen sich typische Signallaufzeiten im Bereich weniger Millisekunden. Das Internet hat mit Laufzeiten (sogenannten Round Trip Times) bis zu 400 Millisekunden deutlich längere Laufzeiten (OBOE 2003; AKAN & AKYILDIZ 2004). Drahtlose Netzwerke (Wireless Local Area Network: WLAN) erscheinen sehr unterschiedlich bei der Messung ihrer Signallaufzeiten. Diese können im Bereich kleiner als 100 ms bis zu einer Sekunde liegen (LETSCHNIK 2008). Signale für extraterrestrische Anwendungen, beispielsweise zur Steuerung von Teleoperatoren im Weltall, haben abhängig von ihrer Entfernung zur Erde zwischen einigen 100 ms (STOLL et al. 2009) bis zu 6000 ms Laufzeit (RICARD 1994). Diese Verzögerungen in der Übermittlung von Signalen in Telepräsenz- und virtuellen Systemen haben Auswirkungen auf die Performanz des Operators und die Stabilität des TPTA-Systems, was schon in frühen ferngesteuerten Systemen in den 1960er Jahren deutlich wurde und seither ein wichtiger Gegenstand der Forschung ist (OTTENSMEYER et al. 2000).

Im Bereich von 1 bis 1000 ms Verzögerungszeit verschlechtern sich die Aufgabenleistung und das Telepräsenzepfinden bis ca. 150 ms Verzögerungszeit nicht, danach reduziert sich die Operatorleistung mit einem quadratischen Verlauf in Abhängigkeit der Verzögerungszeit und ab ca. 500 ms Verzögerung nimmt sie linear ab (PONGRAC 2008, S. 201, Abbildung 2.5). Der Typ der durchgeführten Aufgabe wurde dabei nicht unterschieden. Bei Greifversuchen in einem Telepräsenzaufbau für die minimalinvasive Chirurgie zeigten die Probanden eine um bis zu 400 % erhöhte Zeit zur Aufgabenerfüllung bei einer Latenzzeit von 1,2 Sekunden im Vergleich zum verzögerungsfreien Zustand (FERRELL 1964, MASSIMINO 1990). In anderen Versuchsreihen zum Greifen von Objekten mit Robotern wurden ebenfalls Leistungsver schlechterungen um bis zu 400 % hinsichtlich der Bearbeitungsdauer bei mehreren Sekunden Verzögerungszeit festgestellt (CHONG et al. 2002a; CHONG et al. 2002b; WATSON et al. 2003). Auch bei reinen Tracking- und Platzierungsaufgaben zeigten Experimente, dass Verzögerungszeiten die Schnelligkeit und die Ge-

2.4 Signaldarstellung im HVA-Arbeitsraum

naugigkeit der Versuchsteilnehmer signifikant beeinflussten (FITTS 1954). In diesen Versuchsreihen wurde neben der Verzögerungszeit auch der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe einbezogen, welcher nach dem Gesetz von Fitts einen berechenbaren Einfluss auf die Zeit zur Aufgabenerfüllung hat (DATA VISUALIZATION RESEARCH LAB 2009; STOLL et al. 2009). Diese von Fitts empirisch ermittelte Regel besagt, dass die Zeit zur Zielerreichung eine Funktion der Distanz und der Größe des Zielobjekts ist (FITTS 1954). Sie wird vor allem in der Ergonomie und der Mensch-Maschine-Interaktion angewandt.

Die genannten Beispiele verdeutlichen, dass der Einfluss von Verzögerungszeiten zwischen Operator und Teleoperator erhebliche Auswirkungen auf die Aufgabenleistung hat. Auch bei der Durchführung von Montagevorgängen in einem Telepräsenzsystem könnten sich deshalb Signalverzögerungen auf die Montagezeit auswirken. Für die Manipulation von Mikroobjekten wurden keine Studien gefunden, welche die Skalierungseffekte der Miniaturisierung wie die eingeschränkte Sichtweise in die Untersuchung der Zeitverzögerung mit einbeziehen.

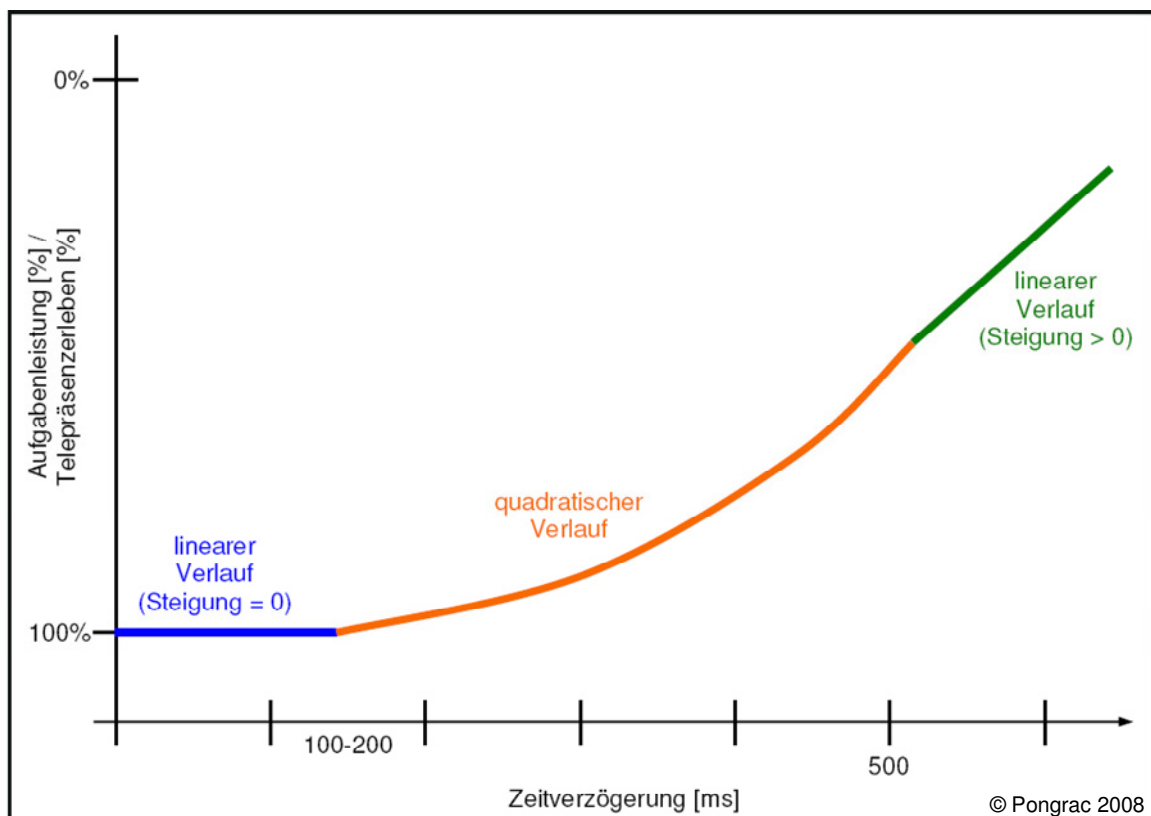


Abbildung 2.5: Performanz des Operators in Abhängigkeit der Verzögerung der Signallaufzeiten (Quelle: PONGRAC 2008, S. 201)

2.5 Handlungsbedarf

Die Teleoperation wird für eine große Bandbreite an Einsatzszenarien erforscht, wobei die Unterstützung der menschlichen Motorik von sehr feinen Bewegungen, z. B. der Handhabung biologischen Materials, bis hin zur Handhabung schwerer und die menschlichen Kräfte übersteigender Bauteile, wie bei der Nutzung eines Roboters als Hebehilfe in der Produktion, untersucht werden. Auch die Überwindung großer Entfernungen kann eine Anwendung notwendig machen, wie sie für Reparaturroboter im Weltraum erprobt wird. Durch diese beiden Merkmale, die Skalierung der Kräfte bzw. Bewegungsräume sowie die Überbrückung einer räumlichen Trennung ist die Teleoperation auch eine interessante Lösung für die Mikroproduktion. Wie bereits vorgestellt, fokussieren sich die Forschungsansätze zur Nutzung von Teleoperationsstrategien für die Mikromontage auf die technische Realisierung. Für den industriellen Einsatz sind jedoch nicht alle Ausprägungen telepräsenster Systeme wirtschaftlich einsetzbar, da beispielsweise sehr teures Equipment sowie die menschliche Arbeitsleistung als zusätzlicher Kostenfaktor hohe Investitions- und Betriebskosten erzeugen. Es fehlt eine systematische Betrachtung dessen, welche Aspekte der Telepräsenz im industriellen Umfeld der Präzisions- und Mikromontage wirtschaftlich sinnvoll sind.

Aus der Betrachtung des Standes der Technik und der wissenschaftlichen Arbeiten in den Bereichen der Mikromontage und der Teleoperationstechnologie lässt sich der Handlungsbedarf daher wie folgt eingrenzen: Bisher entwickelte Teleoperationssysteme für die Mikromontage verdeutlichen die Anwendbarkeit dieser Technologie. Jedoch wurde noch nicht erforscht, welche Teilaspekte der TPTA-Technologie für die wirtschaftliche Montage von Feinwerk- und Mikrobauteilen einen Mehrwert bringen. Hierfür soll insbesondere die haptische Rückkopplung betrachtet werden.

3 Kriterien für die Anwendung der Teleoperationstechnologie

3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage diskutiert, wann die Teleaktions- oder die Telepräsenztechnologie eine mögliche Lösung für eine bestimmte Aufgabenstellung ist. Hierfür wird ein zweistufiger Kriterienkatalog vorgestellt, anhand dessen eine Aufgabe auf ihre Eignung für eine telepräsenzte Ausführung hin überprüft werden kann.

In der Literatur sind in der Regel Methoden oder Strategien zur Planung und Auslegung von Produktionssystemen zu finden, welche sich auf die Ausgestaltung eines Systems konzentrieren. In den 1990er Jahren wurden zur Entwicklung und Verbesserung von virtuellen oder telepräsenten Systemen beispielsweise die Umgebungen VEPAB und VRMAT konzipiert (VEPAB: Virtual Environment Performance Assessment Battery, LAMPTON et al. 1995, VRMAT: Virtual Reality Manipulation Assessment Testbed, POUPYREV et al. 1997). Ziel war die Durchführung von Studien zur Manipulation von Objekten durch Teleaktion und die Ableitung von Empfehlungen zur Systemgestaltung. Einen neuen Ansatz zur Ableitung von Gestaltungsrichtlinien für Telepräsenzsysteme präsentiert beispielsweise DEML (2004) mit dem Presence Design Guide. Dieser dient zur Ermittlung der Umsetzungsmöglichkeiten, mit welchen Komponenten die Aufgabe am besten telepräsent ausgeführt werden kann, beispielsweise hinsichtlich der Geräteauswahl. In allen drei vorgestellten Systemen wird bereits vorausgesetzt, dass eine beliebige Aufgabe durch Telepräsenz- und Teleaktionstechnologien umgesetzt werden soll.

Eine Anforderungsliste, unter welchen Voraussetzungen eine zu realisierende Aufgabe durch das jeweils beschriebene System wirtschaftlich ausführbar ist, ist dabei kein Bestandteil. Dieser primäre Auswahlschritt der Entscheidung für eine Montagestrategie wird zuvor anhand nicht näher spezifizierter Kriterien vom Bearbeiter oder vom Projektteam gefällt. Deshalb dient der im vorliegenden Kapitel vorgestellte Kriterienkatalog nicht zur Auswahl von Gestaltungsmöglichkeiten für Montage-systeme, sondern zur Bewertung, ob die allgemeinen Lösungen *Teleaktion* oder *Telepräsenz* Alternativen für die Ausführung einer formulierten Produktionsaufgabe darstellen, ohne Vorschläge zur Umsetzung zu unterbreiten.

3.2 Kriterienkatalog

Der Grundgedanke der TPTA-Technologie, die Trennung von Operator und Teleoperator, bedeutet übertragen auf die Produktion, dass ihre Einsetzbarkeit in denjenigen Anwendungsfällen sinnvoll ist, bei welchen der Werker vom Produktionsort separiert werden soll. Ist außerdem der Mensch als hochflexible kognitive Ressource als notwendig identifiziert, kann geprüft werden, inwiefern eine teleoperierte Arbeitsweise im Unterschied zu einer herkömmlichen manuellen Arbeitsform erforderlich ist. Da sie oftmals eine langsamere Aufgabenausführung zur Folge hat als eine direkte manuelle oder eine automatisierte Ausführung, muss die Taktzeit für das Produktionssystem außerdem von untergeordneter Bedeutung sein (vgl. ADAMS et al. 2001; DEML 2004, S. 97). Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Gründe für einen Einsatz der Teleaktionstechnologie ableiten:

- Notwendigkeit des Menschen als Produktionsfaktor
 - aufgrund seiner kognitiven Fähigkeiten (Flexibilität)
 - weil die Aufgabe nicht bzw. nur schwer automatisierbar ist (Anlagentechnik)
- Notwendigkeit zur Trennung von Mensch und Produktionsort

In Tabelle 3.1 sind diese Kriterien näher spezifiziert. Die genannten Hauptkategorien werden darin in mögliche Ausprägungsformen des jeweiligen Kriteriums weiter unterteilt und diese werden durch Beispiele beschrieben.

Zur Bewertung des Teleaktionspotentials einer Aufgabe muss der Erfüllungsgrad der Kriterien festgelegt werden. Hierbei ist zu entscheiden, ob die einzelnen Ausprägungsformen auf die betrachtete Aufgabe zutreffen. Die Spalte „Bewertung“ dient der Feststellung, ob auf Grundlage der festgestellten zutreffenden Kriterien die Teleaktion als Lösung sinnvoll ist. Da die Teleoperation sowohl die Teleaktion als auch die Telepräsenz beinhaltet (vgl. Abschnitt 1.4), muss im zweiten Schritt untersucht werden, ob zusätzlich die Telepräsenztechnologie notwendig ist. Hierauf deutet die Erfüllung folgender Merkmale hin (Tabelle 3.2):

- Visualisierung: mangelnde Sicht, eingeschränkte Tiefenwahrnehmung des Operators, in der Folge erschwerte Koordination/Steuerung des Teleoperators
- Taktile oder haptische Wahrnehmung: keine Erkennung von Kontakten zwischen Teleoperator und Umwelt
- Akustische Wahrnehmung: keine Wahrnehmung von Geräuschen und Tönen aufgrund der räumlichen Separation

Die Bewertung des Teleaktions- bzw. Telepräsenzpotentials erfolgt durch die Berechnung des Erfüllungsgrads G der jeweiligen Ausprägungsformen und ihrer Beispiele:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n K_{erf,i}}{\sum_{i=1}^n K_{Aus,i}} \quad (1)$$

mit K_{erf} : erfüllte beispielhafte Ausprägungsform der Hauptkategorie: $K_{erf} = 1$ bei Erfüllung, $K_{erf} = 0$ bei Nichterfüllung

K_{Aus} : Beispiel der Ausprägungsform

n : Anzahl der Kriterien.

Ein hoher Erfüllungsgrad deutet auf ein hohes Potential der Teleaktions- und Telepräsenztechnologie zur Systemgestaltung für eine untersuchte Aufgabe hin.

Die Kataloge wurden an verschiedenen Szenarien getestet und ihre Anwendbarkeit überprüft (siehe Beispiele im Anhang 9.1). Dennoch kann für andere Fragestellungen eine Ergänzung der Kataloge sinnvoll werden. In diesem Fall sind die Hauptkategorien, die Ausprägungen oder deren Beispiele zu erweitern und der Erfüllungsgrad der Kriterien an den Einsatzfall anzupassen. Ebenfalls möglich ist eine Gewichtung, welche, sollte es für die Evaluation eines Einsatzfalls oder einer Aufgabe zweckmäßig erscheinen, eingeführt werden kann. Um eine möglichst allgemeine Bewertung zu erhalten, sollte auf eine Gewichtung jedoch zunächst verzichtet und diese nur angewendet werden, wenn es sich durch die Konstellation der Aufgabe als unbedingt erforderlich herausstellt.

3 Kriterien für die Anwendung der Teleoperationstechnologie

Kriterien für die Teleaktion			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
Trennung von Werker und Produktionsort	Gefährdung des Menschen	Einsatz von Gefahrstoffen		Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Einsatz von gefährlichen Prozessen		
	Mensch als gefährdender oder störender Einflussfaktor	Einbringung von Kontaminationen		
		hohes Risiko der Beschädigung von Gegenständen		
		ungenügende Prozessstabilität bei manueller Tätigkeit		
	faktische räumliche Trennung von Werker und Einsatzort	Einsatzort für den Menschen unerreichbar		
		Erreichbarkeit mit Reisetätigkeit verbunden		
	Grenzen menschlicher Handlungsfähigkeit	Krafteinbringung		
		Präzision		
		Bewegungsradius		
Beschleunigung oder Geschwindigkeit				
Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten	schnelle Anpassung der Arbeitsschritte bei Veränderungen	hohe Wahrscheinlichkeit des Eintretens unvorhersehbarer Ereignisse		Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Flexibilität des Menschen	hohe Variantenvielfalt bzw. Einzigartigkeit der Problemstellung		
		hohe Komplexität der Vorgänge, so dass eine Automatisierung nicht möglich/zu aufwändig ist		
Sicherheit	Sicherheit des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	gefährliche Folgen bei Versagen		Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Qualität des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	hohe Qualitätsanforderungen, Erfolg des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit		

Tabelle 3.1: Kriterienkatalog für den Einsatz der Teleaktionstechnologie

3.3 Anwendung des Kriterienkatalogs

Kriterien für die Telepräsenz			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
keine Wahrnehmung wichtiger Sinnes- eindrücke	keine Wahrnehmung wichtiger visueller Informationen	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens		Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Tiefenwahrnehmung eingeschränkt		
		Einschätzung von Abständen erschwert		
		Sicht durch Hindernisse verdeckt		
	keine Wahrnehmung notwendiger haptischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens		
		keine Erkennung von Kontakten		
		keine Erkennung von Gewichts- oder Reibungskräften		
	keine Wahrnehmung notwendiger akustischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens		
		kein Hören von Geräuschen		
		kein Hören von Warntönen		

Tabelle 3.2: Kriterienkatalog für den Einsatz der Telepräsenztechnologie

3.3 Anwendung des Kriterienkatalogs

Mit Hilfe des im vorherigen Abschnitt definierten Kriterienkatalogs wird nun die Eignung der TPTA-Technologie für die Präzisions- und die Mikromontage überprüft. Hierfür wird eine Montageaufgabe mit diesen Spezifikationen betrachtet:

- Spezialprodukt mit geringer Stückzahl (1 bis 300 Stück pro Jahr)
- Handhabungsproblematik resultierend durch die Bauteilgröße: Handhabung und Montage nur mit Pinzetten oder anderen Handhabungshilfen unter dem Mikroskop

- Hohe Empfindlichkeit der Bauteile gegenüber Verunreinigungen (Verarbeitung im Reinraum) und Krafteinwirkung

Ein derartiges Produktionsszenario findet sich häufig im Mikrotechnik-Segment (HESSELBACH et al. 2003; FLEISCHER et al. 2004). Im Gegensatz dazu steht die Großserien- und Massenfertigung, welche beispielsweise für die Produktion von Handy-Mikrofonen und Druckerdüsen sowie für die Verarbeitung von Mikrochips eine Rolle spielt (THE NEXUS ASSOCIATION 2005).

Teleaktionspotential

Die für die Teleaktion gefundenen Kriterien aus Tabelle 3.1 werden herangezogen, um die Anwendung *Präzisions- und Mikromontage* auf den Einsatz der Teleaktionstechnologie hin zu prüfen:

Das Kriterium zur Trennung von Werker und Einsatzort wird durch viele Randbedingungen in der Mikromontage unterstrichen. So stellt der Mensch ein Gefährdungspotential für die empfindlichen Mikrobauteile dar, weil er sie kontaminieren oder beschädigen könnte. Auch die ordnungsgemäße Durchführung des Montageprozesses durch den Werker ist unsicher, da angenommen werden muss, dass er die Prozesse nicht mit der geforderten Stabilität erledigen kann. Des Weiteren werden die menschlichen Wahrnehmungsgrenzen bei visuellen, akustischen und haptischen Sinneseindrücken erreicht. Davon ist auch die menschliche Handlungsfähigkeit betroffen, da die im Mikrobereich geforderte Krafteinbringung zu klein ist, als dass sie der Mensch noch kontrolliert umsetzen könnte. Die erforderliche Präzision und die Bewegung im vorgegebenen Arbeitsraum im Mikrometerbereich kann der Mensch mit seinen motorischen Fähigkeiten nicht mehr leisten. Die Kriterien *Gefährdung des Menschen* und *faktische räumliche Trennung von Werker und Einsatzort* spielen in der Mikromontage hingegen keine Rolle, da im Normalfall keine gefährlichen (giftigen oder strahlenden) Substanzen oder Bauteile verwendet werden und sich der Werker somit am Produktionsort aufhalten kann. Die Notwendigkeit zur Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten ist für die Mikromontage gegeben, weil die Automatisierung aufgrund der geringen Bauteilgrößen und Toleranzen aufwändig und kostenintensiv ist. Das letzte Kriterium aus Tabelle 3.1 für den Einsatz von Teleaktion ist die Forderung, dass die sichere Durchführung der Aufgabe wichtiger ist als die erreichbare Taktzeit, da bei einer Teleoperation der Prozess in der Regel langsamer ausgeführt wird als bei einer direkten manuellen Tätigkeit. Dies ist dann für die Montage akzeptabel, wenn dies die einzige Möglichkeit zur Realisierung ist oder hohe sicherheitstechnische oder qualitätsbezogene Standards gefordert sind. Der sich aus diesen Überlegungen ergebende Kriterienkatalog für die Mikromontage ist im Anhang, Abschnitt 9.1 „Kriterienkatalog“, zu finden.

3.3 Anwendung des Kriterienkatalogs

Die Bewertung des Potentials zum Einsatz der Teleaktionstechnologie erfolgt durch die Errechnung des Erfüllungsgrads G der einzelnen Kriterien. Der minimale Erfüllungsgrad G_{min} ist erreicht, wenn genau ein Kriterium erfüllt wird (siehe Tabelle 3.3). Auf eine Gewichtung der Kriterien wurde verzichtet, da alle Kriterien in gleichem Maße berücksichtigt werden sollten und aufgrund der Aufgabenstellung keines mit besonders hoher oder geringer Bedeutung im Vergleich zu anderen stand.

Hauptkategorie	$\sum K_{erf}$	$\sum K_{Aus}$	$G_{Kriterium}$	G_{min} ($K_{erf} = 1$)	Ergebnis $G_{Kriterium} > G_{min}$
Trennung von Werker und Produktionsort	6	11	55%	9%	Kriterium erfüllt
Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten	3	3	100%	33%	Kriterium erfüllt
Sicherheit	1	2	50%	50%	Kriterium erfüllt

Tabelle 3.3: Bewertung der Eignung der Teleaktionstechnologie für die Präzisions- und die Mikromontage

Telepräsenzpotential

Anschließend wird die Eignung der Telepräsenztechnologie für die Präzisions- und die Mikromontage bewertet (siehe Tabelle 3.4):

Durch die Bauteilabmessungen im Mikrometerbereich und die daraus resultierende Notwendigkeit von Sehhilfen für den Menschen folgt eine eingeschränkte Tiefenwahrnehmung. Dies erschwert die Einschätzung von Abständen, was Koordinationschwierigkeiten zur Folge hat. Auch die Wahrnehmung haptischer Signale, wie Kontakt- oder Gewichtskräfte, ist bei der Handhabung von mikrosystemtechnischen Produkten eingeschränkt oder unmöglich. Wird ein Kontakt nicht erkannt, kann es zur Beschädigung von Bauteilen, Greifern, Teleoperator oder Umgebung kommen. Auch akustische Signale können hier vom Menschen in der Regel nicht mehr wahrgenommen werden, da bei der Mikromontage auftretende Geräusche von sehr geringer Lautstärke sind.

Die Berechnung des Erfüllungsgrades G der Telepräsenzkriterien zeigt, dass die Mikromontage auch die Einsatzkriterien für die Telepräsenztechnologie erfüllt (siehe Tabelle 3.4).

Fazit

Die beiden für die Mikromontage bewerteten Kriterienkataloge für die Teleaktion wie auch für die Telepräsenz zeigen, dass alle notwendigen Voraussetzungen für die Zweckmäßigkeit der Teleaktion – bzw. im engeren Sinn sogar der Telepräsenztechnologie – erfüllt sind.

Ausprägung	$\sum K_{\text{erf}}$	$\sum K_{\text{Aus}}$	$G_{\text{Kriterium}}$	G_{min} ($K_{\text{erf}} = 1$)	Ergebnis $G_{\text{Kriterium}} > G_{\text{min}}$
keine Wahrnehmung wichtiger visueller Informationen	3	4	75%	25%	Kriterium erfüllt
keine Wahrnehmung notwendiger haptischer Signale	3	3	100%	33%	Kriterium erfüllt
keine Wahrnehmung notwendiger akustischer Signale	2	3	67%	33%	Kriterium erfüllt

Tabelle 3.4: Bewertung der Eignung der Telepräsenztechnologie für die Präzisions- und die Mikromontage

Für eine Entscheidung zur Teleaktion sprechen vor allem die in hohem Maße erfüllten Kriterien zur Trennung von Werker und Einsatzort. Die weiteren Rubriken zum Einsatz von kognitiven Fähigkeiten und zur Sicherheit konnten ebenfalls positiv beantwortet werden. Auch für die abgefragten Aspekte zur Anwendung von Telepräsenztechniken ergaben sich hohe Übereinstimmungen in allen Rubriken. Sowohl die visuelle Wahrnehmung als auch die Erkennung von Kontakten sind stark eingeschränkt. Die Telepräsenztechnologie, welche insbesondere der Darstellung von akustischen und haptischen Reizen zusätzlich zum visuellen Sinneseindruck dient, ist damit eine Lösung zur Gestaltung eines Mikromontagesystems, welches für geringe Stückzahlen und häufig wechselnde Montageaufgaben ausgelegt ist.

3.4 Zusammenfassung

Der Fokus des Kapitels 3 lag auf der Beantwortung der ersten Forschungsfrage:

Welche Anforderungen existieren für einen industriellen Einsatz von TPTA-Systemen?

Zur Lösung wurden zwei aufeinander aufbauende Kriterienkataloge erstellt. Zunächst wurden die Kriterien für einen Einsatz von Teleaktionstechniken zusammengetragen und detailliert. Daran anschließend wurden relevante Kriterien für die Verwendung von Telepräsenztechnologien in einem weiteren Katalog erfasst.

Mit Hilfe dieser beiden Kataloge lässt sich die Frage beantworten, ob die Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie für die betrachtete Aufgabe eine zweckmäßige Lösung ist. Es wurde bisher noch nicht darauf eingegangen, auf welche Weise diese Technologien für den industriellen Einsatz mit dessen spezifischen Randbedingungen umgesetzt werden können. Kapitel 4 beleuchtet nun die konkrete Gestaltung von TPTA-Systemen für diesen Einsatzzweck.

4 Gestaltung von Teleoperationssystemen für den industriellen Einsatz

4.1 Allgemeines

Ausgehend von der Forschungsfrage, welche Anforderungen für einen industriellen Einsatz von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen zu stellen sind, wird in diesem Kapitel die Gestaltung der TPTA-Systeme diskutiert. Hierfür wird zunächst auf die Möglichkeiten zur Darstellung der genannten Modalitäten auf Operatorseite eingegangen, anschließend werden diese im Hinblick auf deren Immersionsgrad sowie auf wirtschaftliche Einflussgrößen wie die Investitionskosten oder die Ergonomie bewertet. Danach wird die Gestaltung der Teleoperatorseite mit dem Fokus auf eine produktionstechnische Anwendung betrachtet.

4.2 Gestaltung der Operatorseite

4.2.1 Visualisierung

MAELICKE (1990, S. 25) bezeichnet das Auge als das wichtigste menschliche Sinnesorgan, da etwa 60 % aller Informationen, welche das Gehirn aus der Umwelt verarbeitet, über den Sehsinn aufgenommen werden. Deshalb ist die Visualisierung eines Vorgangs, welchen der Mensch im telepräsenten Arbeitsraum steuert, von besonderer Wichtigkeit und die Art der visuellen Darstellung ein für die Operatorleistung entscheidendes Kriterium.

Hierfür ist eine Vielzahl von Geräten am Markt erhältlich, wobei zwischen einer zweidimensionalen (2D) und einer dreidimensionalen (3D) Bildwiedergabe (Abbildung 4.1) sowie dem Immersionsgrad der Systeme unterschieden werden kann. Im Alltag gebräuchliche Monitore zur Wiedergabe von Videostreams liefern nur ein zweidimensionales Abbild der dreidimensionalen Umwelt. Es wird dabei nur ein geringer Immersionsgrad hervorrufen, da für den Betrachter die reale Umgebung immer im Sichtfeld bleibt. Im Entertainmentbereich ist seit kurzem ein Trend zur 3D-Visualisierung erkennbar. So werden in Kinos Filme in 3D-Darstellung gezeigt (SCHULZ 2009), was bisher nur in speziellen 3D-Kinos möglich war (z. B. AUTO & TECHNIK MUSEUM SINSHEIM E.V. 2010). Darüber hinaus sind auch Neuentwicklungen für den Home-Entertainment-Markt zu nennen, welche für eine dreidimensionale Sicht von Filmen oder PC-Spielen geeignet sind (STÖCKER 2008).

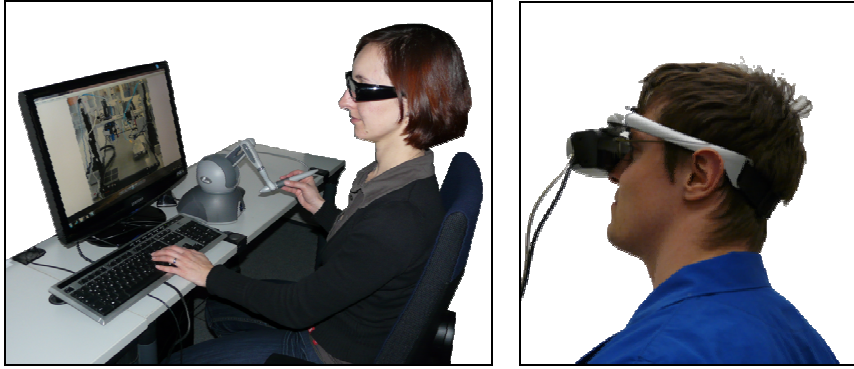


Abbildung 4.1: PC-System mit Shutterbrille für eine dreidimensionale Sichtweise (links) und Head Mounted Display (rechts)

Die umfassendste Möglichkeit zur Erzeugung eines 3D-Bildes bei einer vollständigen Immersion des Nutzers ist die Verwendung eines räumlich immersiven Displays (engl. spatially immersive display: SID), beispielsweise einer CAVE. Auch ein Head Mounted Display (HMD) erzeugt eine dreidimensionale Wahrnehmung und eine hohe Immersion. Visualisierungsgeräte, bei denen der Nutzer auch seine reale Umwelt ebenfalls noch wahrnimmt, sind mitunter so genannte Holobenches. Hierbei wird ein 3D-Bild durch einen 2-Flächen-Projektionstisch erzeugt. Sie werden, genauso wie CAVEs, beispielsweise zur Simulation und Erprobung einer anspruchsvollen Operation (SØRENSEN et al. 2001) oder zur Visualisierung von Montagevorgängen (TALABA et al. 2006) eingesetzt. Tabelle 4.1 fasst die Visualisierungsgeräte zusammen und kategorisiert sie nach der Anzahl darstellbarer Dimensionen, dem Immersionsgrad, dem Platzbedarf sowie den Kosten der Geräte.

Des Weiteren können folgende Visualisierungsarten unterschieden werden:

- Darstellung des Realbildes: Die Wiedergabe eines realen Bildes an den Operator (Bediener) eines Telepräsenzsystems ist die häufigste Visualisierungsform (PETZOLD 2007, S. 35). Dabei nehmen eine oder mehrere Kameras Bilder auf, die dem Operator angezeigt werden.
- Virtuelle Bilddarstellung: Das Gegenteil zur realen Bilddarstellung ist die Darstellung eines virtuellen Bildes. Diese setzt sich aus Objekten zusammen, bei welchen die Geometrie, deren Textur und ihr physikalisches Verhalten definiert und simuliert werden (SPITZWEG 2009). Nachteile bei der Nutzung in TPTA-Systemen sind, dass bei einer Veränderung der realen Umgebung erneuter Modellierungsaufwand zur Anpassung der virtuellen Umgebung anfällt. Des Weiteren ist die Übereinstimmung der virtuellen mit der realen Teleoperator-Umgebung nicht oder nur sehr aufwändig zu gewährleisten.
- Augmentierte Darstellung: Die augmentierte Darstellung ist eine Mischform aus realem und virtuellem Bild (lat. augmen: Zuwachs, Erweiterung). Die

4.2 Gestaltung der Operatorseite

erweiterte Realität, überwiegend als Augmented Reality oder kurz „AR“ bezeichnet, kombiniert ein reales Bild mit (virtuellen) Einblendungen. Umgekehrt kann auch die Darstellung einer virtuellen Realität mit realen Bildern angereichert werden, was zur sogenannten Augmented Virtuality führt (MILGRAM et al. 1994).

Produkt	Darstellung	Immersionsgrad	Platzbedarf	Aufwand der Inbetriebnahme	Anschaffungskosten
TFT-Monitor	2D	gering	gering	gering	gering
Head Mounted Display	3D	hoch	gering	mittel	mittel
Holobench	3D	hoch	mittel	hoch	hoch
Shutterbrille + Bildschirm	3D	hoch	gering	mittel	mittel
CAVE	3D	sehr hoch	hoch	hoch	sehr hoch

Tabelle 4.1: Geräte zur Visualisierung in TPTA-Systemen

Kriterien für die Geräteauswahl

Die verwendete Hardware hat einen großen Einfluss auf die Immersion und auf die Bildqualität, weshalb folgende Parameter bei deren Auswahl berücksichtigt werden müssen:

- Art der Darstellung: Realbild, augmentierte oder virtuelle Umgebung
- Art der Tiefendarstellung: zweidimensional (z. B. monoskopische Darstellung, Augmented-Reality-Einblendungen), dreidimensional (Stereobild)
- Sichtfeld und Präsenzepfinden: Sicht der Umwelt und des gezeigten Bildes, Immersionsgrad des Gerätes
- Ergonomie/Langzeitarbeit: Körperhaltung des Operators und notwendiger Bewegungsradius, Auftreten der sogenannten Cyber Sickness

Verschiedene Untersuchungen berichten gerade bei stereoskopischer Bildwiedergabe von Fällen der sogenannten Cyber Sickness, bei der Übelkeit und Schwindelgefühl auftreten, wenn Menschen eine längere Zeit in ein stereoskop dargestelltes Bild blicken (vgl. BURDEA & COIFFET 2003, S. 263; STÖCKER 2008). Dies legt die Schluss-

folgerung nahe, dass bei andauernder Arbeit eine nicht-stereoskopische Darstellung gewählt werden sollte, um die Cyber Sickness zu vermeiden.

Wirtschaftliche Randbedingungen für den Einsatz von Technologien zur Visualisierung

In die Bewertung der Visualisierungsarten sollen auch wirtschaftliche Gesichtspunkte einfließen, da ein Telepräsenzsystem als Montagesystem anderen Randbedingungen genügen muss als ein Laborsystem. Damit eng verbunden sind die Kriterien der Wartungsfreundlichkeit und der Robustheit. Häufige Wartungen sind ein bedeutender Kostenfaktor. Auch die Robustheit, also die Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigung, ist ein wichtiges Kriterium, da die Dauerbelastung als ständiges Arbeitsgerät für bisher im Labor verwendete Visualisierungskonzepte zu hoch sein kann. Des Weiteren müssen die Geräte robust gegenüber Bedienungsfehlern sein. Auch der Platzbedarf des Gesamtsystems spielt eine Rolle.

Da diese Kriterien nicht nur für das bildgebende Gerät, sondern auch für die Ein-/Ausgabe-Geräte gelten, werden sie in den folgenden Abschnitten ebenfalls zur Bewertung herangezogen.

Bewertung

Wendet man die wirtschaftlichen und darstellungsspezifischen Kriterien in einer einfachen Punktbewertung auf ausgewählte Geräte zur Visualisierung an, wird deutlich, dass Standardmonitore bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gegenüber Head-Mounted-Displays oder CAVEs die beste Bewertung erzielen (Tabelle 4.2). Diese Standardgeräte sind robust, wartungsarm, haben einen geringen Platzbedarf am Arbeitsplatz und kosten erheblich weniger in der Anschaffung als die spezialisierten VR-Geräte. Aufgrund mangelnder Möglichkeiten zur 3D-Darstellung zur Erzeugung eines Tiefeneindrucks und eines eingeschränkten Sichtfeldes ist das Präsenzepfinden bei Standardgeräten hingegen deutlich geringer. Lediglich bei der Langzeitbenutzung haben sie Vorteile, denn ein HMD verursacht bei dauerhafter Benutzung eine merkliche Belastung der Kopf- und Nackenmuskulatur. Sowohl ein HMD als auch eine CAVE bieten einen großen Bewegungsraum. Dies kann jedoch bei einer mehrstündigen Arbeit als belastend empfunden werden, da die Beanspruchung der Muskulatur durch den großen Bewegungsraum hoch ist.

Darstellung des visuellen Signals		TFT-Monitor, Kamera mit Realbildübertragung	TFT-Monitor, mehrere Kameras und Perspektiven	TFT-Monitor mit virtueller Bilddarstellung	HMD (Stereosichtweise)	CAVE mit virtueller Bilddarstellung
Wirtschaftlichkeit	Kosten	4	4	2	2	1
	Wartungsaufwand	4	3	3	3	3
	Robustheit	4	4	1	2	3
	Platzbedarf	4	3	4	2	1
Darstellung	Tiefendarstellung	1	3	4	4	4
	Ergonomie/ Langzeitarbeit	4	4	2	2	3
	Sichtfeld	2	3	3	4	4
	Präsenzempfinden	2	3	3	4	4
Summe		25	27	22	23	23

Tabelle 4.2: *Bewertung ausgewählter Visualisierungsmodi*
(Bewertungseinheiten:
4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig)

4.2.2 Akustische Wiedergabe

Ein akustisches Signal an einem telepräsenten Arbeitsplatz unterscheidet sich nach seiner Erzeugungsart und seiner Darbietungsform: Es kann sich entweder um einen real in der Teleoperatorumgebung erzeugten und an den Operator übertragenen Ton handeln oder um ein künstliches akustisches Signal, welches nicht am Teleoperator entstanden ist. Da künstlich erzeugten Tönen kein realer Laut in der Teleoperatorumgebung zugrunde liegen muss, können sie auch für die cross-modale Vermittlung von Signalen verwendet werden. Cross-modal bedeutet, dass dem Operator ein Signal in einer anderen Modalität als seiner ursprünglichen präsentiert wird (STEIN & MEREDITH 1993). Dies ist der Fall, wenn beispielsweise ein visuelles Merkmal wie ein bestimmter Abstand des Teleoperators durch ein akustisches Signal für den Operator substituiert wird. Die Wiedergabe sowohl realer als auch künstlicher Sig-

nale erfolgt über Lautsprecher oder Kopfhörer, wobei zur Schaffung eines sehr realitätsnahen Hörempfindens eine Stereowiedergabe oder eine binaurale Präsentation dargeboten werden kann:

- Mit Stereophonie werden Techniken bezeichnet, welche dem Hörer durch im Raum verteilte Lautsprecher einen räumlichen Schalleindruck vermitteln. Das menschliche Gehör erreicht durch interaurale, also zwischen beiden Ohren auftretende, Unterschiede der Schallpegel oder -laufzeiten die Lokalisation der Schallquellen.
- Binaurales Hören erfolgt hingegen über die Platzierung von Mikrofonen in einer Nachbildung eines Kopfes (sog. Kunstkopf) anstelle des Trommelfells, so dass die Tonaufzeichnung abbildet, was der Mensch hören würde. Unterschiede ergeben sich in den von Mensch zu Mensch verschiedenen Ohrabständen und -muscheln. Diese für jeden Menschen individuellen Parameter werden in der sogenannten Head Related Transfer Function (HRTF) abgebildet. Ist die HRTF bekannt, so wird das akustische Signal darauf abgestimmt und der Hörer kann das Signal korrekt im Raum lokalisieren (KEYROUZ & DIEPOLD 2007). Die Wiedergabe binauraler Aufzeichnungen muss über Kopfhörer erfolgen, um dem Hörer einen korrekten räumlichen Eindruck der Schallquellen zu vermitteln.

Kriterien für die Geräteauswahl

Zur Präsentation akustischer Meldungen stehen diese Optionen zur Verfügung:

- monoskopische oder stereoskopische Darstellung
- Übertragung realer oder künstlicher Töne

Auch die Arten akustischer Rückmeldung werden nach den im vorherigen Abschnitt verwendeten Kriterien zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit gemessen. Dies sind die Kosten, die Robustheit, der Wartungsaufwand sowie der Platzbedarf.

Bewertung

Sobald die Wiedergabe realer Geräusche im telepräsenten Arbeitsraum nötig ist, steigen Kosten, Wartungsaufwand und Platzbedarf aufgrund der zu installierenden Mikrofone. Deshalb erzielt die Bereitstellung künstlicher Töne eine bessere Bewertung als die direkte Übertragung von Originalgeräuschen (Tabelle 4.3). Ob eine stereoskope Präsentation der Schallquellen angebracht ist, damit der Operator eine Lokalisation im Raum wahrnehmen kann, muss in Abhängigkeit des Anwendungsfalls untersucht werden.

Wiedergabe des akustischen Signals		Kriterien	direkte Geräuschübertragung mono	direkte Geräuschübertragung stereo	künstliche Töne mono	künstliche Töne stereo
Wirtschaftlichkeit	Kosten		2	2	4	2
	Wartungsaufwand		2	2	4	4
	Robustheit		3	2	4	4
	Platzbedarf		2	1	3	3
Darstellung	3D-Hören		2	4	2	4
	reale Geräusche		4	4	1	1
	synthetische Geräusche		1	1	4	4
Summe			16	16	22	22

Tabelle 4.3: Bewertung ausgewählter Geräte für die akustische Wiedergabe (Bewertungseinheiten: 4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig)

4.2.3 Haptische Rückkopplung

Eine haptische Rückkopplung erfolgt im Alltag meist passiv, wenn ein Mensch spürt, dass er beispielsweise eine Taste gedrückt hat. Im Gegensatz dazu wird bei einer aktiven haptischen Rückkopplung im Gerät eine eigene – also aktive – Kraft erzeugt, so dass dem Bediener eine Kraft vermittelt wird, was für TPTA-Systeme von Bedeutung ist. Hierfür gibt es eine Reihe von am Markt erhältlichen Geräten sowie Eigenentwicklungen für die TPTA-Forschung (z. B. Systeme von BOUGUILA et al. 2000a; BOUGUILA et al. 2000b; SIROUSPOUR et al. 2000; LÉCUYER et al. 2002; UNGER et al. 2002; KORTSCHACK et al. 2005; PREUSCHE & HIRZINGER 2007; UNGER et al. 2004).

Generell kann für die Geräte zur Krafrückkopplung nach den erreichbaren Dimensionen für die Ein- und Ausgabe von Bewegungen und Kräften sowie nach der Art der Krafrückkopplung unterschieden werden. Einfache Geräte erfassen die Naviga-

tion des Bedieners in zwei Dimensionen (2D, beispielsweise die Standard-PC-Mouse und der konventionelle Game-Joystick). Ein-/Ausgabe-Geräte für mehrere Dimensionen mit Krafrückkopplung haben häufig einen deutlich höheren Anschaffungspreis als Standard-Consumer-Geräte und werden überwiegend im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt (z. B. FORCE DIMENSION INC. 2009; SENSABLE TECHNOLOGIES INC. 2009; QUANSER CONSULTING INC. 2008; LINDE et al. 2002; siehe Abbildung 4.2). Auf einem anderen Funktionsprinzip für die Navigation in mehreren Dimensionen beruhen Datenhandschuhe. Hierbei steuert der Nutzer nicht ein feststehendes lokales Bediengerät, sondern der Datenhandschuh wird direkt an seiner Hand mitgeführt. Kräfte können durch ein exozentrisches Skelett ausgeübt werden (vgl. DIPIETRO et al. 2008; KIM et al. 2009). Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über am Markt erhältliche und als Prototypen in der Forschung eingesetzte Ein-/Ausgabe-Geräte und gliedert sie nach Freiheitsgraden und der Art der Krafrückkopplung.



Abbildung 4.2: Virtuelle Mikromontage mit dem Haptic Master (links), virtuelle Roboterarmontage mit dem Immersion Joystick (rechts)

Kriterien für die Geräteauswahl

Die Art der aktiven Krafrückmeldung eines Geräts kann verschiedene Ausprägungen haben. Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:

- der Kraftauflösung,
- der darstellbaren Freiheitsgrade,
- der Maximalkraft und
- der Ergonomie/Langzeitarbeit.

4.2 Gestaltung der Operatorseite

Freiheitsgrade	Gerät (z. B.)	Aktive Kraft-rückkopplung	Hersteller	Anschaffungskosten (€)
2 DOF	PC-Mouse	keine	z. B. Logitech	gering
	Game Joystick	abhängig vom Modell	z. B. Saitek	gering
	Joystick	8,9 N	Immersion Inc.	mittel
3 DOF	Space-Mouse	keine	3D connexion Inc.	gering
	Falcon Novint	< 10 N	Novint Technologies Inc.	gering
	Haptic Master	max. 250 N	FCS Robotics	sehr hoch
	Omega/Delta Haptic Device	12 - 20 N	Force Dimension Inc.	sehr hoch
> 3 DOF	Phantom Serie	3,3 N - 37,5 N	Sensable Tech. Inc.	mittel
	Magnetic Levitation Device	25 N	Butterfly Haptics, LLC	Prototyp
	Cyber Grasp	12 N pro Finger	VR Realities	sehr hoch
	versch. Quanser Products	ca. 10 N	Quanser Consulting Inc.	hoch/sehr hoch

Tabelle 4.4: Auswahl von Ein-/Ausgabe-Geräten

Bei der Auswahl eines Bediengeräts für die haptische Rückmeldung sind wirtschaftliche Faktoren von hoher Bedeutung, da viele Ein-/Ausgabe-Geräte mit Krafrückmeldung nur als Einzelanfertigung oder in Kleinserien hergestellt werden und dadurch im Vergleich zu Massenprodukten einen sehr hohen Anschaffungspreis haben. Insbesondere gegenüber den bildgebenden oder den akustischen Systemen, welche für TPTA-Systeme eingesetzt werden, führt dieser hohe Preis für haptische Spezialgeräte dazu, dass die krafrückkopplenden Komponenten zum kostenintensivsten Bestandteil des Operator-Arbeitsplatzes werden. Deshalb muss für eine Anwendung hinterfragt werden, ob Force Feedback tatsächlich erforderlich ist.

Bewertung

Tabelle 4.5 zeigt den Vergleich von fünf Kategorien von haptischen Ein-/Ausgabe-Geräten, vom Standard-Game-Joystick bis hin zu Spezialgeräten, welche derzeit überwiegend für den Forschungsbedarf vertrieben werden. Es wird deutlich, dass konventionelle Lösungen wie Joysticks bei den die Wirtschaftlichkeit betreffenden Kriterien den Spezial-Systemen überlegen sind. Bei der Darstellung der Krafrückkopplung und den ausführbaren Freiheitsgraden sind sie den Spezialgeräten jedoch unterlegen (vgl. auch Geräteeigenschaften, siehe Tabelle 4.4). In Bezug auf die Ergonomie ist bei einer Nutzung eines Eingabegeräts über einen längeren Zeitraum darauf zu achten, dass es nicht zu muskulären Ermüdungserscheinungen kommt. Diese können entstehen, wenn beispielsweise der Arm dauerhaft frei bewegt werden muss, wie dies bei der Nutzung von Datenhandschuhen der Fall ist. Auch bei einem haptischen Zeigegerät wie einem Phantom Desktop kann der Nutzer nur selten seinen Ellenbogen ablegen, um den Arm abzustützen, was zu Ermüdung führt.

Für einen Dauereinsatz in der Produktion sind Standard-Geräte wie Joysticks besser geeignet, da sie kostengünstig sind und eine hohe Robustheit gegen äußere Einflüsse und unsachgemäßen Umgang aufweisen. Ist jedoch eine feinfühlig haptische Rückkopplung gefragt oder soll eine Bewegung in vielen Freiheitsgraden umgesetzt werden und kommt es dabei nicht auf die Investitionskosten und die Haltbarkeit im Dauerbetrieb an, ist die Anwendung von Spezialgeräten vorteilhaft.

Darstellung des haptischen Signals		Kriterien				
		Game Joystick	High Resolution Joystick (z. B. Immersion Joystick)	Handschuh mit Krafrückkopplung (z.B. Cyber Grasp)	Haptischer Zeiger (z. B. Phantom Desktop)	Stationäre haptische Geräte > 4 DOF
Wirtschaftlichkeit	Kosten	4	2	1	2	1
	Wartungsaufwand	4	4	2	3	2
	Robustheit	4	2	1	2	2
	Platzbedarf	4	4	4	3	2
Darstellung	Kraftauflösung	2	4	3	3	4
	darstellbare Freiheitsgrade	1	1	4	3	4
	Maximalkraft	2	2	3	2	4
	Ergonomie/ Langzeitarbeit	4	4	1	2	3
Summe		25	23	19	20	22

*Tabelle 4.5: Bewertung haptischer Ein-/Ausgabe-Geräte
(Bewertungseinheiten:
4: sehr günstig, 3: günstig, 2: ungünstig, 1: sehr ungünstig)*

4.3 Gestaltung des Teleoperators

4.3.1 Freiheitsgrade

Da der Teleoperator im produktionstechnischen Umfeld als eine flexible Station für die Montage von Produkten konzipiert sein soll, muss er in der Lage sein, alle relevanten Montagestellen zu erreichen. Diese Anforderung bezieht sich nicht nur auf die tatsächliche aktuelle Produktpalette, sondern auch auf die zukünftige. Für ein Telepräsenzsystem, das einerseits seine Flexibilität aus der Vielfältigkeit des menschlichen Handelns und andererseits aus einem universell nutzbaren oder anpassbaren Teleoperator gewinnt, ist die Anpassbarkeit und die Nutzbarkeit für zu-

künftige Produkte von zentraler Bedeutung. Hierfür liegt die Ausgangsbasis in der Wahl eines Bewegungssystems, welches

- die geforderte Genauigkeit und Geschwindigkeit für die Mikromontage zu realisieren erlaubt und
- genügend Freiheitsgrade zur Ausführung der Montageaufgabe besitzt.

Diesen Anforderungen steht der Kostenaspekt gegenüber, so dass die benötigte Genauigkeit möglichst exakt abgeschätzt und die Bewegungsparameter für jetzige und zukünftige Montagevorgänge festgelegt werden müssen, um überhöhte Investitionskosten zu vermeiden. Dabei ist zu beachten, dass eine zu großzügige Kalkulation der zukünftigen Anforderungen ein enormes Kostenrisiko birgt. Mit einer Erhöhung der Genauigkeit wachsen auch die Kosten des Systems an (FLEISCHER et al. 2005a).

Je nach der angestrebten Genauigkeit stehen im Mikrobereich verschiedene einsetzbare kinematische Prinzipien zur Verfügung. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der erreichbaren Wiederholgenauigkeit (vgl. SCHÖTTLER 2008, S. 8 ff.). Knickarmroboter gehören zur Gruppe der seriellen Kinematiken mit einer offenen kinematischen Kette (vgl. beispielsweise DENSO ROBOT B.V. ROBOTICS DEPARTMENT 2009; KUKA ROBOTER GMBH 2009). Somit erreichen sie ein gutes Verhältnis von Bauraum zu Arbeitsraum, büßen aber an Präzision ein, was sich in der schlechteren erreichbaren Wiederholgenauigkeit ausdrückt. Eine höhere Präzision erzielen Modelle vom Typ der SCARA-Roboter (SCARA: Selective Compliance Assembly Robot Arm), welche durch ihre Konstruktionsart und weniger Freiheitsgrade steifer sind als Knickarmroboter (vgl. beispielsweise STÄUBLI GMBH 2009). Noch höhere Pose-Genauigkeiten können mit Parallelstrukturen erreicht werden, zum Beispiel als Hexapod-Kinematiken (vgl. PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & CO. KG 2009a; NEWPORT CORPORATION 2009b). Neben diesen käuflichen Produkten gibt es Forschungsarbeiten über hochgenaue Roboter für die Mikroproduktion. Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig wird an einem Parallelroboter geforscht, welcher eine Genauigkeit $< 1 \mu\text{m}$ erreichen soll (BURISCH et al. 2007; INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSTECHNIK 2009). Um ein Vielfaches präziser als Roboter sind einzelne lineare und rotatorische Positioniersysteme verschiedener Hersteller. Sie weisen Genauigkeiten bis in den Nanometerbereich auf (SMARACT GMBH 2009; NEWPORT CORPORATION 2009a; PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & CO. KG 2009b).

Neben der Genauigkeit hängt die Wahl eines Systems außerdem maßgeblich von der Anzahl der benötigten Freiheitsgrade ab. Um die zur Nutzung des Teleoperators benötigten Freiheitsgrade (translatorisch beispielsweise x-, y- und z-Richtung, rotatorisch Θ) zu bestimmen, sind alle zur Aufgabenbewältigung notwendigen Bewegungen, insbesondere die Handhabungs- und Fügevorgänge, für die Montageaufgabe zu definieren (vgl. Abbildung 4.3). Zur Montage sind alle Handhabungsvorgänge, Fügeverfahren und Hilfsvorgänge, wie z. B. Prüfvorgänge (VDI 2860 1990;

DIN 8593 2002), hinzuzuzählen. Zur Festlegung der benötigten Freiheitsgrade FG_{Gesamt} werden zunächst alle Prozessschritte analysiert. Danach muss festgelegt werden, welche der gefundenen benötigten Freiheitsgrade $FG_{Prozess}$ vom Operator gesteuert werden (Freiheitsgrade $FG_{Operator}$), denn es ist auch möglich, dass bestimmte Bewegungen teilautomatisch erfolgen und vom Operator nicht beeinflussbar sind. Falls ein Freiheitsgrad überhaupt nicht mehr vom Operator gesteuert werden muss, erhält er die Bezeichnung $FG_{Automation}$. Als Grund für eine solche Teilautomatisierung kann die Wiederholung gleichbleibender Bewegungen genannt werden. Auch die ungenügende Sicht auf eine Montagestelle kann ein Grund für eine sensorgesteuerte teilautomatische Bewegung sein. Es gilt:

$$FG_{Prozess} = FG_{Operator} + FG_{Automation} \quad (2)$$

Daraus ergibt sich für die Gesamtanzahl der Freiheitsgrade am Teleoperator:

$$FG_{Gesamt} \geq FG_{Prozess} \geq FG_{Operator} \quad (3)$$

4.3.2 Werkzeuge

Nachdem der kinematische Aufbau des Teleoperators bestimmt wurde, werden die Werkzeuge für die Montageprozesse ausgewählt. Damit ein Operator ein Werkzeug bedienen kann, werden ihm in TPTA-Systemen Signale als Sinneseindrücke rückgekoppelt, welche am Teleoperator über geeignete Sensoren registriert werden müssen. Dies sind häufig zu übertragende Informationen:

- Abstand des Werkzeugs zum Objekt oder zur Umgebung
- Krafteinwirkung, z. B. Greifkraft, Druckkraft
- Zustand des Werkzeugs, z. B. Erkennung, ob ein Greifer offen oder geschlossen ist.

Genutzt werden können dazu Sensoren wie Abstandssensoren oder Kraftmessdosen. Auch die Auswertung von Daten aus dem Werkzeug selbst ist möglich, beispielsweise die Messung des Stroms bei elektrischen Greifern.

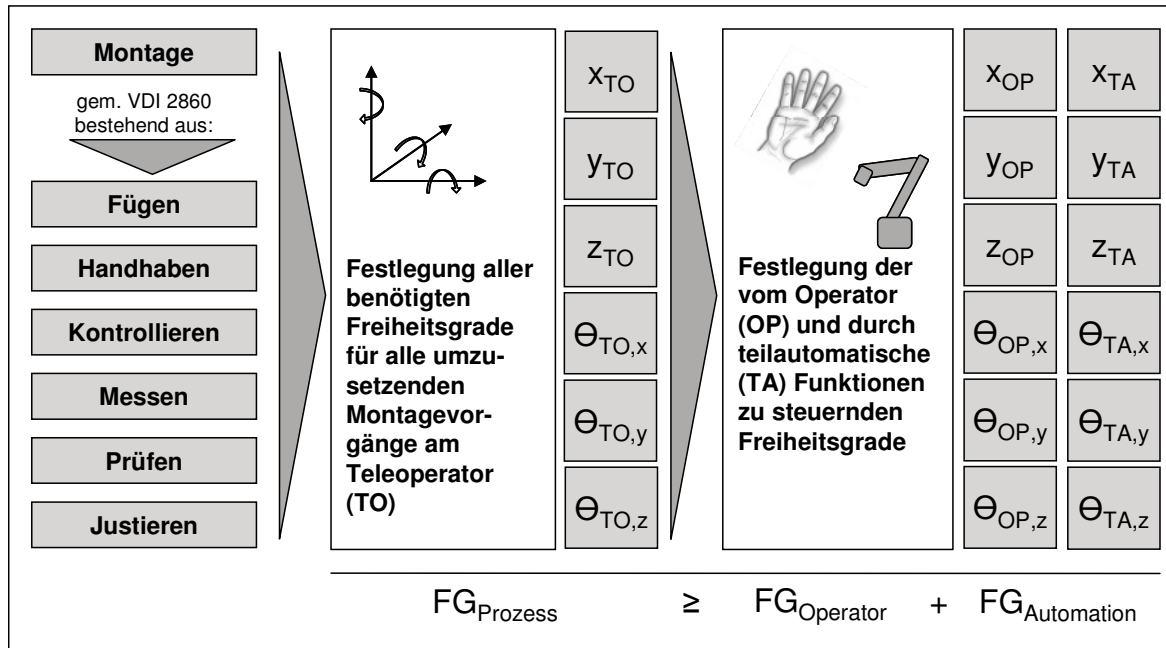


Abbildung 4.3: Montageprozesse und Ableitung der Freiheitsgrade

In Abbildung 4.4 sind die Teilvorgänge für einen durch den Menschen selbst händisch ausgeführten Greifvorgang gemäß den MTM-Regeln (MTM: Methods of Time Measurement) (vgl. BOKRANZ & LANDAU 2006) den Teilvorgängen bei maschineller Ausführung gegenübergestellt. Beim Menschen sind überwiegend visuelle und haptische Reize für die Ausführung des Greifvorgangs ausschlaggebend. Eine direkte Entsprechung der taktilen Fähigkeiten des Menschen in Greifsystemen ist die Implementierung einer Greifkraftmessung (vgl. FAHLBUSCH et al. 2002). Außerdem können durch Positions- und Abstandsmessungen Rückschlüsse auf die Zustände eines automatischen Systems gezogen werden.

Neben der Diskrepanz zwischen den vom Menschen fühlbaren und den aufzubringenden Montagekräften treten im Mikrobereich Adhäsionskräfte auf, wohingegen im Makrobereich die Gewichtskräfte überwiegen. Durch die Adhäsion bleiben Bauteile beispielsweise am Greifer haften, obwohl die Greifzangen zum Ablegen des Objekts geöffnet sind. Zur Überwindung dieses Problems wurden angepasste Endeffektoren und Montagestrategien entwickelt (HESSELBACH 2004; BRUSSEL et al. 2000; TIETJE & RATCHEV 2007). Die genannten Randbedingungen der sensorischen Erfassung von Prozessinformationen und deren Wiedergabe an den Operator führen zu dem in Abbildung 4.5 dargestellten Vorgehen zur Auswahl von Werkzeugen und Sensoren für die telepräsenste Mikromontage, welches in die Auswahl der Teilprozesse und der zugehörigen Signale unterteilt ist.

4.3 Gestaltung des Teleoperators

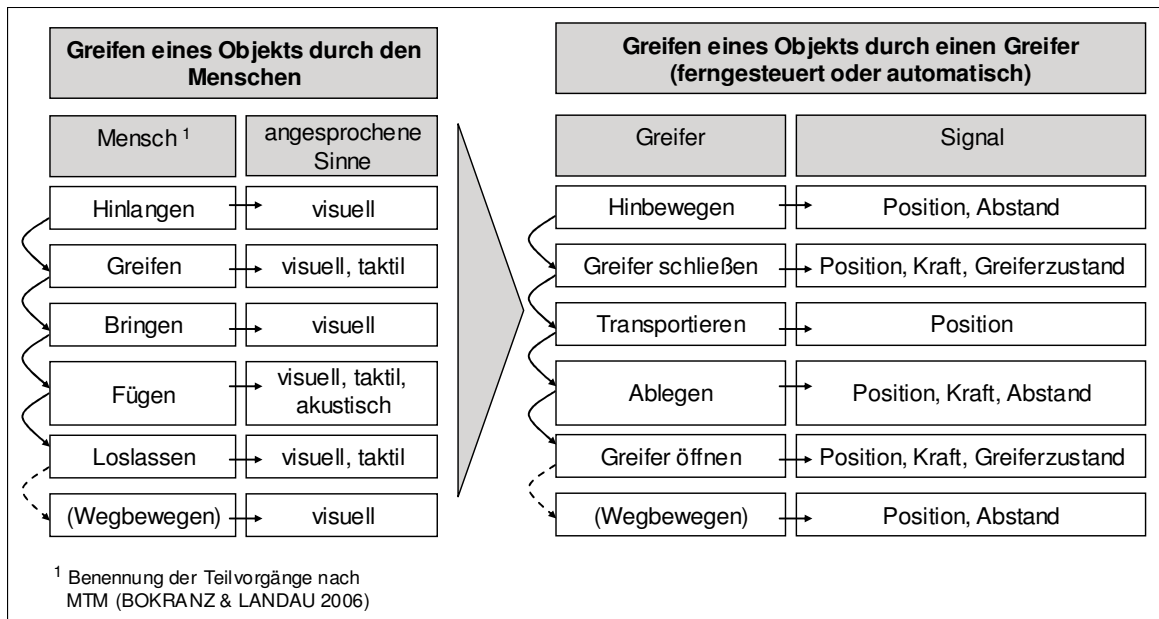


Abbildung 4.4: Menschliches und maschinelles Greifen mit Zuordnung der angesprochenen Sinne zu den Einzeltätigkeiten sowie deren Entsprechungen als messbare Signale bei Fernsteuerung und Automatisierung

Hierfür werden in einem ersten Schritt diejenigen Prozessschritte bestimmt, für welche Werkzeuge oder andere Betriebsmittel benötigt werden. Für diese sind anschließend die an den Operator zu übertragenden Signale zu bestimmen, damit er den Prozess ausführen kann. Danach erfolgt die konkrete Auswahl der Werkzeuge bzw. Betriebsmittel und der Sensoren, welche relevante Prozesssignale aufzeichnen. Damit diese an den Operator weitergegeben werden können, muss im letzten Schritt ein Konzept zur Steuerung der Werkzeuge hinterlegt werden, welches sowohl die Darstellung der Signale (Telepräsenzfunctionalitäten) als auch die Steuerung (Teleaktionsfunktionen) enthält.

In Tabelle 4.6 sind für dieses Vorgehen beispielhaft Möglichkeiten zur Rückkopplung von Signalen bei verschiedenen Greifprinzipien aufgelistet, welche für den Teilschritt 3 in Abbildung 4.5 für die Anwendung in der Präzisions- und der Mikromontage relevant sind. In der Auflistung wurden gängige Greifprinzipien gewählt und deren Wirkprinzip bestimmt. Darüber hinaus existieren eine Reihe weiterer physikalischer Prinzipien, um Mikroobjekte zu handhaben (z. B. CLÉVY et al. 2006; CLÉVY et al. 2008). Da für die manuelle Durchführung von Montageaufgaben die Visualisierung von hoher Bedeutung ist, wurde sie für alle Greifprinzipien bewertet, unterteilt in die Möglichkeit zur vertikalen und zur horizontalen Sicht auf den Greifvorgang. Darüber hinaus sind die weiteren sensorischen Optionen zur Erfassung des Greifzustands genannt.

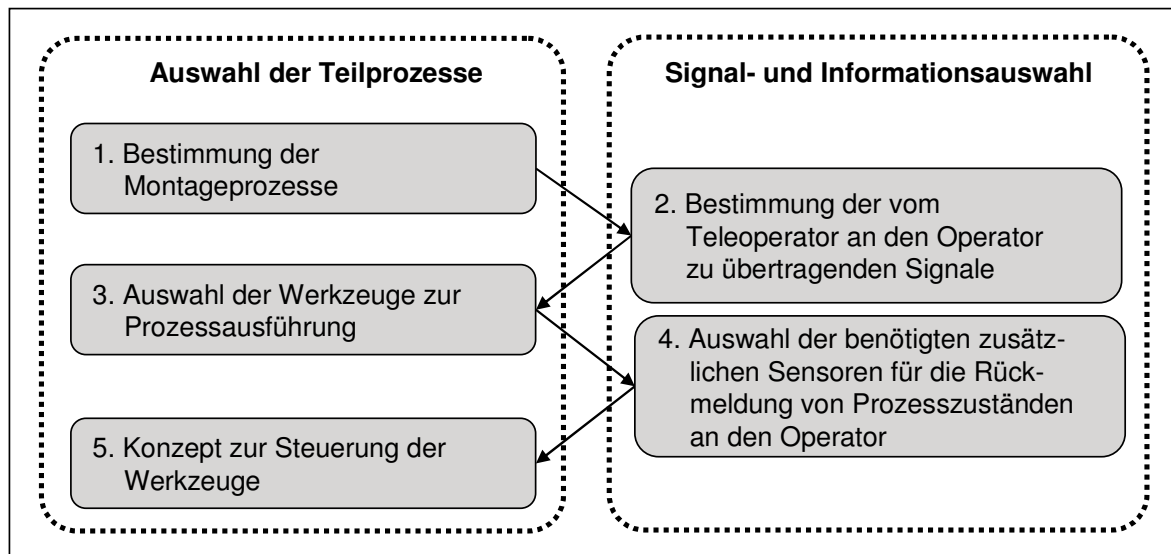


Abbildung 4.5: Vorgehen zur Werkzeugauswahl für Telepräsenzsysteme für Anwendungen im industriellen Einsatz am Beispiel der Montage

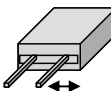
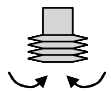
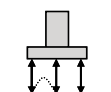
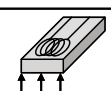

Greifer	Wirkprinzip	Visualisierung des Greifvorgangs		Erfassung des Greifzustands
		Blickrichtung vertikal	Blickrichtung horizontal	
Zangengreifer 	Formschluss/ Kraftschluss	ja	ja	elektrisch: Strom pneumatisch: Druck
Sauggreifer 	Kraftschluss durch Unterdruck	nein	ja	Änderung des Volumenstroms
Ultraschall- Vakuum-Greifer 	Ultraschall	nein	ja	Änderung des Volumenstroms
Elektrostatischer Greifer 	Kraftschluss durch Elektrostatik	nein/ eingeschränkt	ja	keine
Nadelspitze (Cantilever-Nadel) 	Adhäsion	nein/ eingeschränkt	ja	Dehnmessstreifen, Piezo

Tabelle 4.6: Mikrogreifprinzipien und die Möglichkeiten zu Prozessrückmeldungen durch die Visualisierung des Vorgangs sowie die Erfassung des Greifzustands

4.4 Versuchsaufbau für die telepräsenste Präzisions- und Mikromontage

4.4.1 Systemkomponenten

Die vorhergehenden Abschnitte bewerteten eine Auswahl von visuellen, akustischen und haptischen Signaldarstellungen auf Operatorseite und erläuterten Kriterien für den Teleoperatoraufbau. Für die Präzisions- und die Mikromontage kann hiermit folgende Lösung für die allgemein gestellte Forschungsfrage nach dem Aufbau eines industriell einsetzbaren TPTA-Systems zusammengestellt werden (siehe Abbildung 4.6). Diese wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die in Kapitel 5 beschriebenen Experimente zur telepräsensten Montage genutzt:

Zur Visualisierung der Montageaufgabe wurde ein TFT-Monitor unter Verwendung verschiedener Kameraperspektiven am besten bewertet, da er als dauerhafter Arbeitsplatz gute ergonomische Eigenschaften besitzt und in den Kriterien zur Darstellung des Bildes ebenfalls geeignet sind. Eine dreidimensionale Bildwiedergabe wird nicht angestrebt, da die zitierten veröffentlichten Versuche dazu keine eindeutige Verbesserung belegen und der Aufwand sowie die Kosten hoch sind.

Als haptisches Ein-/Ausgabe-Gerät erhielt der Joystick die beste Bewertung, insbesondere aufgrund seiner geringen Kosten, des niedrigen Wartungsaufwandes und der hohen Robustheit, da er ein käufliches Standard-Produkt aus dem Consumer-Bereich ist. Auch sein Platzbedarf ist gering. Hinsichtlich der Ausprägungsformen für die haptische Rückkopplung und die übertragbaren Freiheitsgrade ist er zwar limitiert, für den industriellen Einsatz überwiegen jedoch die wirtschaftlichen Kriterien.

Die Teleoperatorseite wird für Montagebewegungen in vier Dimensionen gestaltet, da zur Präzisions- und Mikromontage häufig die folgenden grundlegenden Bewegungen notwendig sind:

- Bewegung in der Ebene: Zum Transport der Bauteile kann sie in x- und y-Richtung sowie durch eine Drehung um die z-Achse ausgeführt werden.
- Bewegung in vertikaler (z-)Richtung: Sie erfolgt meist zum Heran- bzw. zum Wegführen von Werkzeugen.
- Drehung um die z-Achse: Sie ist beispielsweise notwendig, um bei Greifvorgängen die Orientierung von Bauteilen zu ändern.

Hierfür werden Lineardirektantriebe und eine Plattform aus Reluktanzmotoren verwendet, um drei Freiheitsgrade in x-, y- und z-Richtung zu realisieren. Die Positionsgenauigkeit einer solchen Anwendung beträgt ca. 1,0 μm . Zur Nutzung verschiedener Werkzeuge wird am Teleoperator eine Werkzeugwechselschnittstelle

integriert (HÖHN 2001), bei welcher die Werkzeuge senkrecht über der Vergrößerungskamera eingefahren werden. Der Operator sieht das gewählte Werkzeug somit immer im Kameramittelpunkt. Für die Experimente in Kapitel 5 wird ein Zweiba-ckengreifer verwendet, da er die Sicht auf das Greifobjekt nicht verdeckt. Zur Erfassung von Kräften wird ein Kraftsensor mit einem Messbereich von 0,01 bis 1,0 N genutzt, welcher im Werkzeugträger integriert ist. Die Übertragung von Videostreams wird über zwei Kameras mit unterschiedlichen Darstellungsräumen ausgeführt.

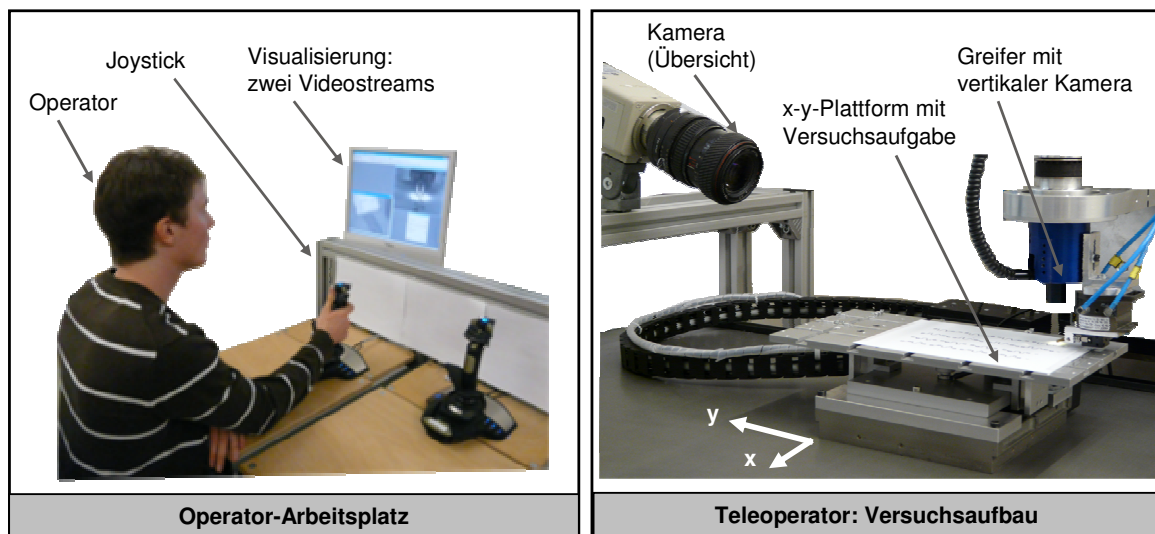


Abbildung 4.6: TPTA-System für die Präzisions- und die Mikromontage

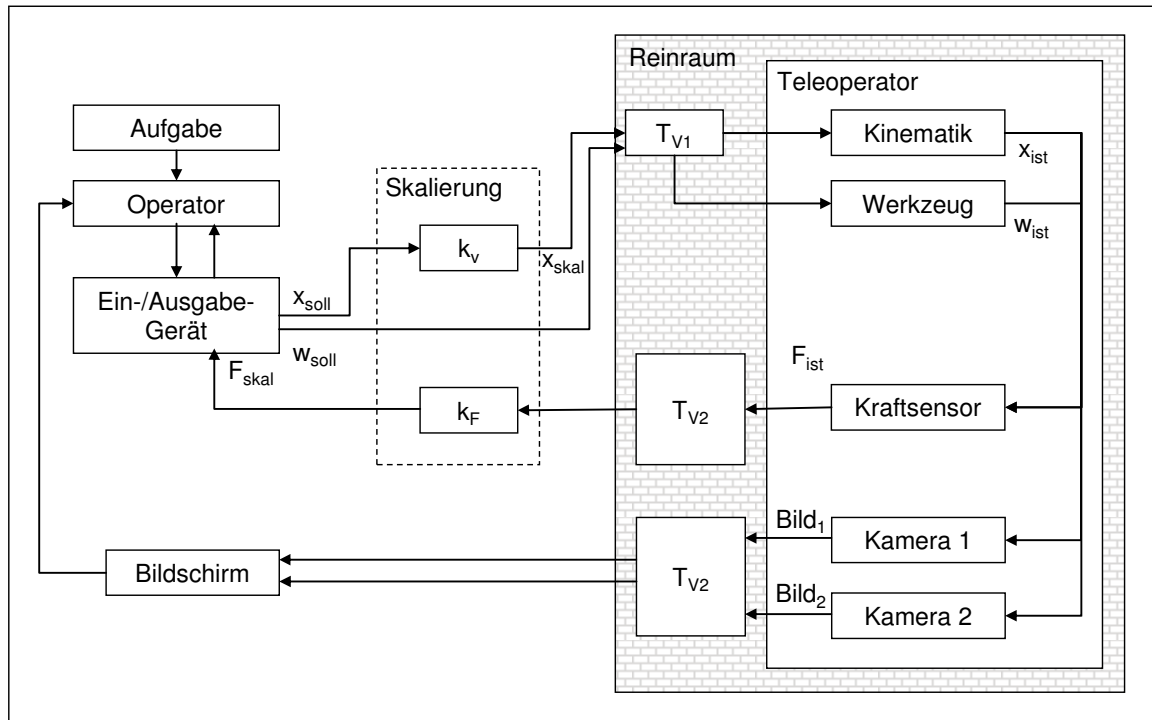
4.4.2 Telepräsenzfunktionen

Abbildung 4.7 zeigt den schematischen Aufbau des TPTA-Systems und dessen Signalflüsse für visuelle und haptische Rückmeldungen an den Operator.

Visualisierung

Die Visualisierung erfolgt als Videostream. Eine Kamera vermittelt dem Operator eine vergrößerte Draufsicht auf das Montageobjekt, eine zweite bietet einen Überblick über den gesamten Arbeitsraum und ist zur Abschätzung von Abständen in z-Richtung in einem Winkel von 30° gegenüber der Horizontalen angebracht (Abbildung 4.8). Eine räumliche Sichtweise ist mit dem System nicht möglich. Hierauf wurde aus ergonomischen Gründen verzichtet, um Cyber Sickness zu vermeiden.

4.4 Versuchsaufbau für die telepräzente Präzisions- und Mikromontage



- | | |
|---|---|
| Bild ₁ : Videosequenz der Vergrößerungskamera | w_{soll} : Sollzustand des Werkzeugs |
| Bild ₂ : Videosequenz der Überblickskamera | w_{ist} : Istzustand des Werkzeugs |
| F_{ist} : gemessene Kraft am Werkzeug | T_{V1} : Verzögerungszeit der Kommunikation Operator-Teleoperator |
| F_{skal} : skalierte Kraft | T_{V2} : Verzögerungszeit der Kommunikation Teleoperator-Operator |
| k_F : Skalierungsfaktor für die Kraft | x_{soll} : Positionseingabe |
| k_V : Skalierungsfaktor für die Geschwindigkeit bzw. Position | x_{skal} : skalierte Positionseingabe |
| | x_{ist} : skalierte Position des Teleoperators |

Abbildung 4.7: Schematischer Aufbau des TPTA-Systems für die Präzisions- und die Mikromontage

Akustik

Hinsichtlich der akustischen Signalwiedergabe werden an den Operator nur reale Geräusche übertragen, da sich die in Kapitel 5 folgenden Untersuchungen auf andere Aspekte von TPTA-Systemen beziehen. Die Wahrnehmung von Zustandsänderungen an Werkzeugen oder Motorengeräusche der Antriebsachsen ist somit für den Operator neben visuellen oder haptischen Rückmeldungen auch akustisch möglich.

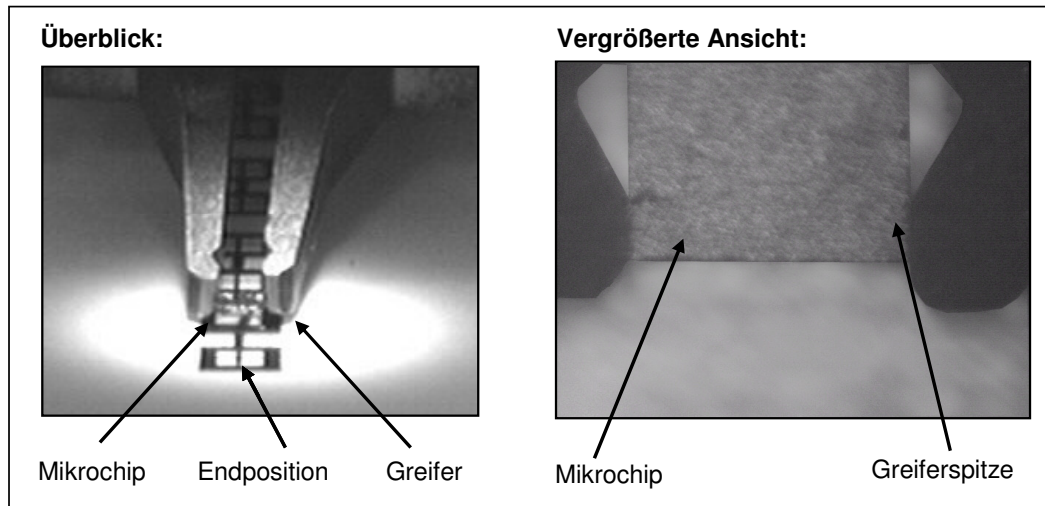


Abbildung 4.8: Visualisierung: schräg gestellte Überblickskamera (links), Vergrößerungskamera in Draufsicht auf einen gegriffenen Mikrochip (rechts)

Haptik

Durch den Joystick erhält der Operator die Rückkopplung von Sensorsignalen. Diese ist als Vibration und als statische Gegenkraft möglich. Für die in Kapitel 5 beschriebenen Versuche gibt ein Kraftsensor die vertikal auf den Werkzeugträger ausgeübte Kraft wieder, welche beispielsweise beim Kontakt mit dem Greifer während des Aufnehmens oder Ablegens von Objekten entsteht.

Bedienung

Da der Teleoperator drei translatorische und einen rotatorischen Freiheitsgrad besitzt, das gewählte Ein-/Ausgabe-Gerät, ein Joystick, jedoch nur zwei translatorische und einen rotatorischen Freiheitsgrad aufweist, muss eine Mapping-Strategie angewendet werden, um die unterschiedlichen Freiheitsgrade ansteuern zu können. Durch Mapping werden diese einander zugeordnet bzw. aufeinander abgebildet, so dass der Operator mit dem Eingabegerät alle Freiheitsgrade des Teleoperators kommandieren kann. Bei der Ansteuerung der x- und y-Achse sowie der Drehung um die z-Achse entsprechen die Richtungen des Joysticks im Versuchsaufbau denjenigen des Teleoperators. Nicht abgebildet werden kann die Steuerung der z-Achse, da der Joystick nicht in der Höhe veränderlich ist. Um auch in diese Richtung kommandieren zu können, wird im hier realisierten System die Bewegung der y-Achse auf Tastendruck auf die Steuerung der z-Achse umgeschaltet. Hierdurch ergibt sich für den Operator eine serielle Ansteuerung der drei translatorischen Bewegungsrichtungen, eine gleichzeitige Bewegung in allen drei Richtungen ist nicht möglich.

4.5 Zusammenfassung

Ausgehend von der Frage, wie ein Telepräsenz- und Teleaktionssystem für den industriellen Einsatz gestaltet werden kann, wurden in diesem Kapitel sowohl der Aufbau der Operator- als auch der Teleoperatorseite diskutiert. Abschließend wurde ein Versuchsaufbau für die Präzisions- und die Mikromontage abgeleitet, welcher eine telepräsenste Arbeitsweise erlaubt und wirtschaftliche Kriterien hinsichtlich der Robustheit, der Kosten, des Wartungsaufwands und des Platzbedarfs erfüllt. Dessen Verwendung zur Durchführung verschiedener Versuche für die telepräsenste Präzisions- und Mikromontage wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Die in den Kapiteln 3 und 4 betrachtete Forschungsfrage wurde damit in zwei Teilschritten beantwortet:

„Welche Anforderungen existieren für einen industriellen Einsatz von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen?“

1. Prinzipielle Anwendungsmöglichkeit der TPTA-Technologie für eine Aufgabensstellung:

Hierfür wurde ein Kriterienkatalog entwickelt, mit welchem überprüft werden kann, ob die Teleaktions- oder die Telepräsenztechnologie als Lösungsmöglichkeit zweckmäßig sind (Kapitel 3).

2. Gestaltung von industriellen TPTA-Systemen:

Es wurden Gestaltungsrichtlinien für die Operator- und die Teleoperatorseite aufgeführt, um ein TPTA-System nach wirtschaftlichen Kriterien für den industriellen Einsatz zu gestalten (Kapitel 4).

5 Untersuchung von Einsatzfaktoren

5.1 Allgemeines

Nach der Gestaltung des Systems für die telepräsenste Präzisions- und Mikromontage soll nun die zweite Forschungsfrage betrachtet werden. In diesem Kapitel werden hierfür verschiedene Einflussfaktoren auf die Leistung des Operators bei einem Montagevorgang herangezogen. Dabei stellt die Haptik die entscheidende Modalität dar, welche telepräsenste von herkömmlichen ferngesteuerten Systemen unterscheidet. Aus diesem Grund soll sie genauer hinsichtlich ihres Nutzens für industrielle telepräsenste Aufgabenstellungen untersucht werden.

In einem Vorversuch wurde die Skalierung der Geschwindigkeit zwischen der Bewegung des Eingabegeräts auf Operatorseite und der Bewegung des Teleoperator-systems bewertet und ein idealer Arbeitsbereich identifiziert. Des Weiteren wurde die Auswirkung von Zeitverzögerungen in der Übertragungsstrecke betrachtet und es wurden verschiedene Steuerungsarten getestet. Nach der Abschätzung dieser Parameter wurde der Einfluss der haptischen Rückmeldung am Beispiel eines Greifprozesses evaluiert, um die Forschungsfrage zu beantworten. Auch der Nutzen des Lernens mit und ohne haptische Unterstützung wurde abgeschätzt, um Rückschlüsse auf die Einsetzbarkeit eines Telepräsenzsystems als Trainingsstation für mikroskopische Montageaufgaben zu erhalten. Da nach LOTTER (1986, S. 225) 70 % aller Aufgaben in der Produktion von Präzisions- und Elektronikprodukten auf die Handhabung und den Montageprozess selbst entfallen (Abbildung 5.1), werden in den Versuchen diese Produktionsschritte exemplarisch herangezogen.

5.2 Vorversuch: Skalierung der Operatoreingabe

Versuchsziel und Durchführung

Der Mensch kann mit seinen feinmotorischen Fähigkeiten die Anforderungen der Präzisionsmontage hinsichtlich der Positions- und Bewegungsgenauigkeit nicht mehr erfüllen. Ein Telepräsenzsystem schafft die Möglichkeit, diese Barriere zu überwinden, indem die Bewegungsvorgaben des Operators skaliert werden.

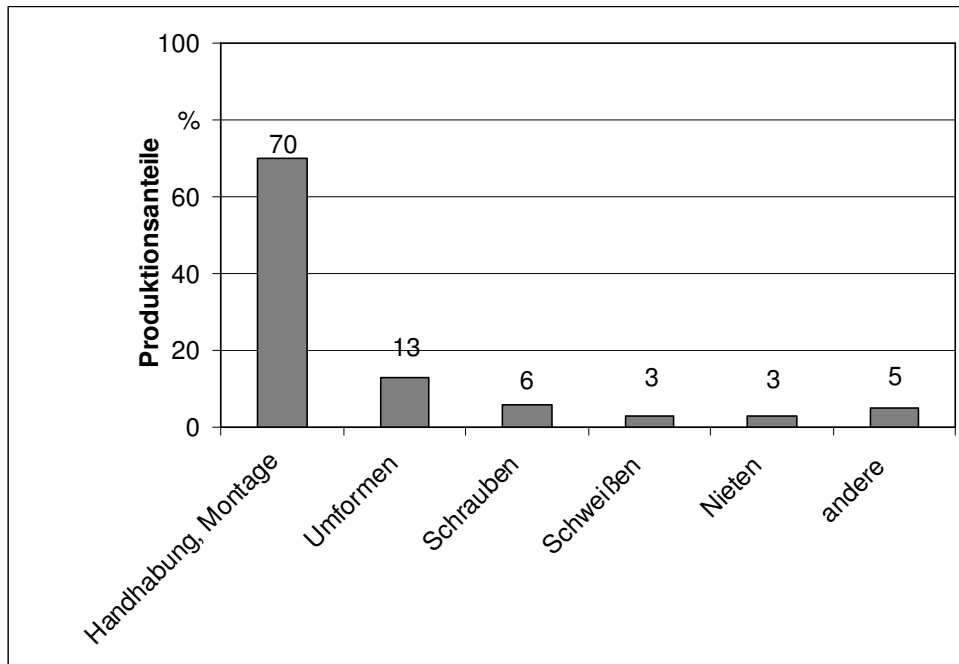


Abbildung 5.1: Prozentuale Verteilung von Produktionsvorgängen (nach LOTTER 1986)

Der Teleoperator führt nach der Skalierung eine wesentlich langsamere Bewegung in kleineren Schritten aus (downscaling), als dies der Mensch tut:

$$v_{\text{Teleoperator}} = k_v \cdot v_{\text{Operator}} \quad (4)$$

mit $v_{\text{Teleoperator}}$: Geschwindigkeit, welche am Teleoperator ausgegeben wird

v_{Operator} : Geschwindigkeit, welche vom Operator vorgegeben wird

k_v : Faktor zur Skalierung der Geschwindigkeit, für die Präzisionsmanipulation gilt $k_v < 1$

Ebenfalls skaliert werden muss die Kraft, welche am Teleoperator durch Sensoren gemessen wird. Da bei der Manipulation von Mikrobauteilen nur sehr geringe Kräfte übertragen werden, würde sie der Operator bei einer 1:1-Übertragung nicht fühlen bzw. das Ausgabegerät die geringe Krafrückmeldung nicht darstellen können. Erst die Hochskalierung der gemessenen Kraft macht sie für den Menschen fühlbar, so dass er darauf reagieren kann. Es gilt:

$$F_{\text{Operator}} = k_F \cdot F_{\text{Teleoperator}} \quad (5)$$

mit $F_{\text{Teleoperator}}$: Kraft, welche am Teleoperator gemessen wird

F_{Operator} : Kraft, welche am Ein-/Ausgabe-Gerät des Operators ausgegeben wird

5.2 Vorversuch: Skalierung der Operatoreingabe

k_F : Faktor zur Skalierung der Kraft,
bei Präzisionsmanipulation: $k_F \gg 1$

Die Skalierungen der Geschwindigkeit und der Kraft unterscheiden sich in ihrer Wirkrichtung: Die Geschwindigkeit wird vom Operator vorgegeben, die Kraft hingegen vom Teleoperator (vgl. Abbildung 5.2). Die Kontrollierbarkeit des Teleoperators hängt dabei stark von der Skalierung der Geschwindigkeit ab.

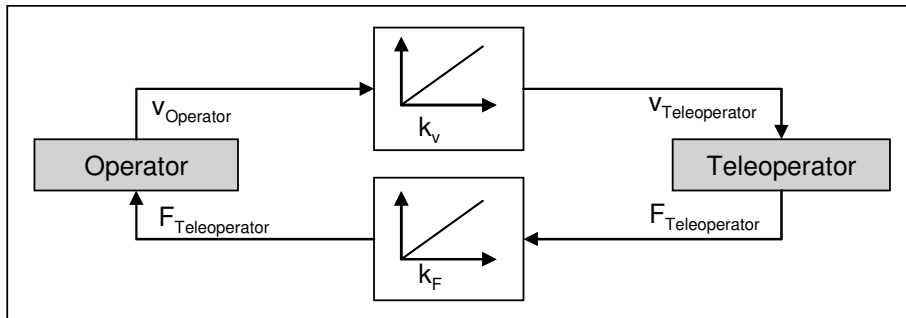


Abbildung 5.2: Skalierung und Wirkrichtung der Übertragungsgrößen zwischen Operator und Teleoperator

Die Navigation in virtuellen Umgebungen ist ein bedeutender Einflussfaktor auf die Leistung des Bedieners (BOOTSMA et al. 1994). Dessen Performanz kann durch verschiedene Variablen, z. B. die Anzahl der Kollisionen, die Zeit zur Aufgabenerfüllung, oder durch die Messung von Körperreaktionen, z. B. Stress, ermittelt werden. Wird die Wirkung der Geschwindigkeit betrachtet, so wird in der Literatur häufig ein gegenläufiges Verhalten zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit festgestellt. Je höher die Geschwindigkeit ist, desto ungenauer wird die Bewegung (MURAKAMI et al. 2002).

Ziel des Versuchs ist es, den Faktor k_v zu bestimmen (vgl. Formel 4), um eine optimale Geschwindigkeitseinstellung am Teleoperator und damit einhergehend eine optimale Einstellung zur Skalierung zu finden. Des Weiteren wird die Frage betrachtet, ob die optimale Skalierung vom Aufgabentyp abhängt. Hierfür werden die beiden Komponenten von pick-and-place-Aufgaben, Positionierung und Tracking (PONGRAC et al. 2007), betrachtet. Beim Greifen und Absetzen kommt es auf die Genauigkeit an, beim Transport (Tracking) muss ein vorgegebener Weg verfolgt werden, so dass keine Kollisionen auftreten.

Am Versuch nahmen 12 Personen (8 männlich, 4 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren teil. Die Versuchsaufgabe wurde so konzipiert, dass sie sowohl Positionier- als auch Tracking-Elemente enthielt. Die teilnehmenden Personen wurden gebeten, von einer Startposition aus einen durch eine Linie vorgegebenen Pfad bis zu einer Endposition nachzufahren. Die Größe der Endposition ent-

sprach dabei einem Mikrochip von 1,5 x 1,5 x 0,7 mm Größe, wie er später in einem Versuch zur Haptik in Kapitel 5.6 ebenfalls verwendet wurde.

Skalierungsstufe	Geschwindigkeitsmittelwert (mm/s)
1	0,3
2	0,6
3	0,9
4	1,12
5	1,50

Tabelle 5.1: Skalierungsstufen des Teleoperators zur Übertragung der Bewegungen des Operators auf Geschwindigkeiten des Teleoperators

Es wurden fünf Geschwindigkeitsstufen, welchen fünf verschiedenen Faktoren k_v entsprechen, getestet (vgl. Tabelle 5.1). Dieser Bereich wurde anhand von Vorversuchen ausgewählt. Die Bereichsgrenze der hohen Skalierungsstufe wurden so gewählt, dass die Aufgabe für geübte Nutzer nur schwer durchführbar war. Die Probanden wiederholten die vorgegebene Aufgabe für jede Stufe zwei Mal, wobei diese durch Spiegelung an der x- und der y-Achse verändert wurde, um Lern- und Langeweile-Effekten vorzubeugen, ohne den Weg und damit die Aufgabenstellung zu verändern (Abbildung 5.3). Die Reihenfolge der Geschwindigkeitsstufen für die Teilnehmer wurde nach dem Zufallsprinzip festgelegt.

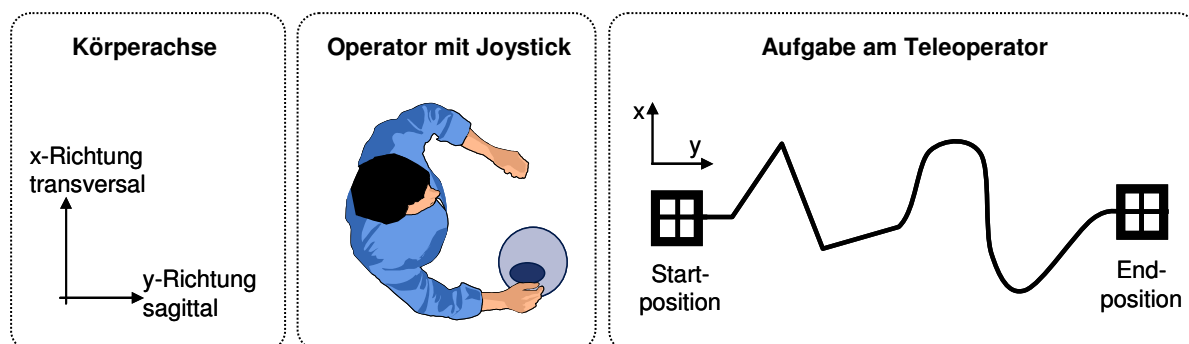


Abbildung 5.3: Versuchsaufgabe zur Untersuchung der Skalierung zwischen Operator- und Teleoperatorbewegung mit Blickrichtung des Operators (vergrößert)

Ergebnisse

Für die Auswertung der Versuche wurde der Mittelwert der Abweichung für die Tracking-Aufgabe (M_{tracking}) wie folgt berechnet (vgl. PONGRAC et al. 2007):

$$M_{\text{Tracking}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(x_i - x_{\text{opt}})^2 + (y_i - y_{\text{opt}})^2}{2}} \quad (6)$$

mit x_i, y_i : x- bzw. y-Position bei Intervall i

x_{opt} bzw. y_{opt} : ideale x- bzw. y-Position bei Intervall i

Für den Mittelwert der Positionsabweichung (M_{Position}) wurde der arithmetische Mittelwert verwendet, da die gemessenen Werte an der Endposition der Versuchsaufgabe statischen Charakter hatten:

$$M_{\text{Position}} = \frac{|x| + |y|}{2} \quad (7)$$

Die Genauigkeit, mit welcher der Tracking-Pfad bewältigt wurde, ist abhängig vom gewählten Skalierungsfaktor. Eine Analyse ergab, dass hierfür die Skalierungsstufen 1 und 5 signifikant differierten (Signifikanzniveau⁴ $p = 0,01$), wodurch belegt wird, dass eine höhere einstellbare Geschwindigkeit am Joystick rasch die Durchführung von präzisen Bewegungen im μm -Bereich erschwert.

Ein interessantes Ergebnis ist die Abhängigkeit der Positionsabweichung von der Fahrriechung. In transversaler Richtung (x) waren die Abweichungen signifikant höher als in sagittaler Richtung (y) ($p = 0,00$, vgl. Abbildung 5.4). Dieser Richtungseffekt wird auch als „plane effect“ bezeichnet (vgl. CLARKE et al. 2005). Daraus geht hervor, dass die Steuerung von Bewegungen einer Richtungsabhängigkeit unterliegt und die sagittale Ebene besser steuerbar ist. Deshalb sollten Bewegungen mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit in dieser Körperrichtung ausgeführt werden.

Bei der Präzisionsaufgabe, dem exakten Erreichen der Endposition, hatte die Skalierung keinen signifikanten Einfluss. Bei der Betrachtung der Auswertung kann qualitativ abgeleitet werden, dass mit dem Level 2 vergleichsweise das beste Resultat erzielt wurde. Auffällig ist, dass Level 1 als langsamste Geschwindigkeitsstufe schlechtere Ergebnisse brachte. Dies widerspricht der Annahme, dass sich Geschwindigkeit und Präzision indirekt proportional zueinander verhalten. In diesem Fall kann der Effekt damit erklärt werden, dass aufgrund der langsamen Geschwin-

⁴ Das Signifikanzniveau ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Nullhypothese zu unrecht abgelehnt wird (Fehler erster Art, vgl. BOSCH 1993, S. 362 ff.). Im vorliegenden Versuch lautet die Nullhypothese: Die Skalierungsstufen haben keinen Einfluss auf die zurückgelegte Distanz.

digkeit ein Langweile-Effekt eintrat. Die Teilnehmer wurden unachtsam und reagierten zu spät.

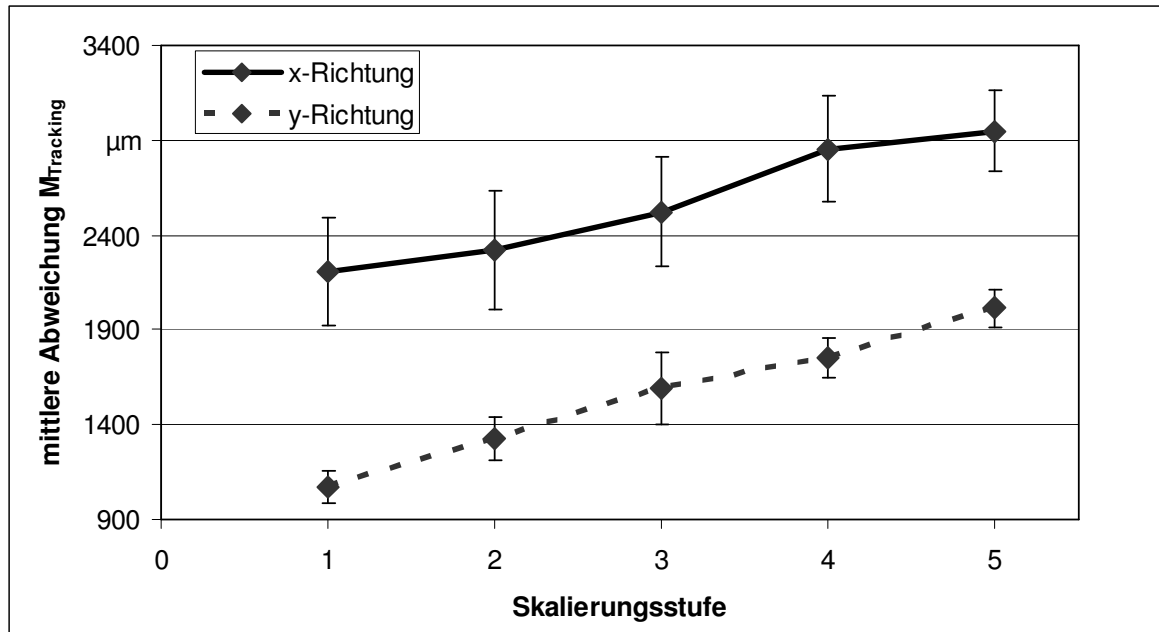


Abbildung 5.4: Abweichungen bei der Trackingaufgabe, dargestellt als mittlere Abweichungen mit Standardfehler in Abhängigkeit der Skalierungsstufe

Zur Betrachtung der Zeit zur Aufgabenerfüllung wurde die zurückgelegte Distanz herangezogen. Damit wurde die Zeit gegenüber der Geschwindigkeit normiert, so dass die unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen das Ergebnis nicht verfälschten. Die Skalierungsstufen hatten signifikanten Einfluss auf die zurückgelegte Distanz bei der Trackingaufgabe (Signifikanzniveau $p = 0,00$, Abbildung 5.5). Ausgenommen bei Level 1 stieg die zurückgelegte Distanz mit zunehmendem Geschwindigkeitslevel. Dies lässt erkennen, dass bei schnelleren Bewegungen mehr Korrekturbewegungen gemacht wurden. Auch bei der Positionieraufgabe hatte die Geschwindigkeit einen Einfluss auf die zurückgelegte Distanz. Die Stufen 4 und 5 unterscheiden sich signifikant von den Stufen 1 bis 3 ($p = 0,00$). Dies bedeutet, dass für hochgenaue Positionieraufgaben am gewählten Versuchsaufbau eine Geschwindigkeit von 0,9 mm/s am Teleoperator nicht überschritten werden sollte.

Fazit

Der Versuch zum Transportieren und Positionieren von Bauteilen zeigt, dass die Skalierung zwischen Operator und Teleoperator einen wesentlichen Einfluss auf die

5.2 Vorversuch: Skalierung der Operatoreingabe

Beherrschbarkeit der Aufgabe hat. Tabelle 5.2 enthält die Zusammenfassung der Schlussfolgerungen.

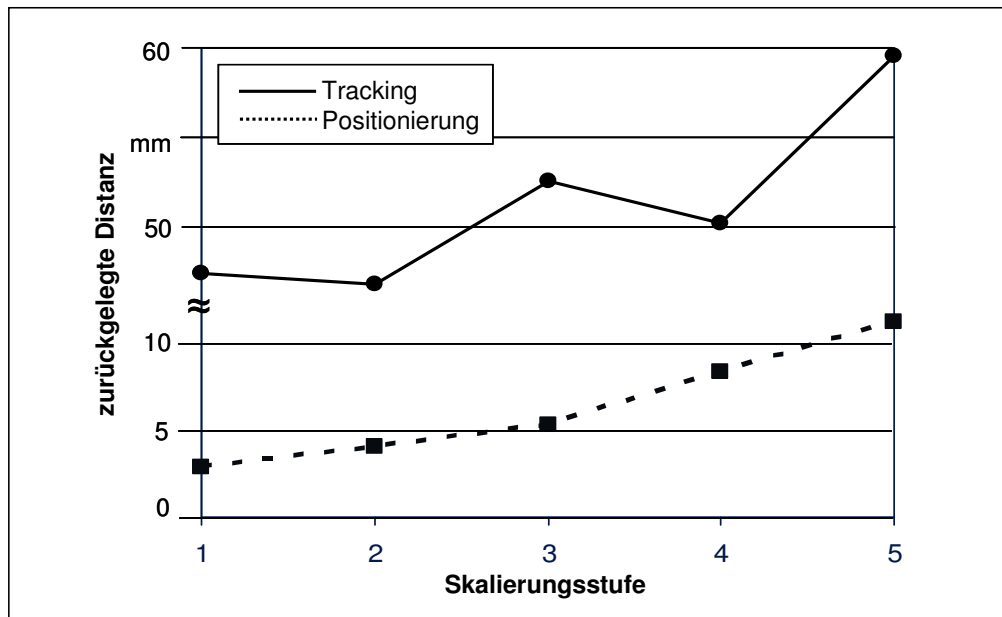


Abbildung 5.5: Insgesamt zurückgelegte Distanz bei Tracking und Positionierung im Versuch bei verschiedenen Skalierungsstufen

Parameter	Ergebnis
Geschwindigkeitsskalierung	Die Skalierung der Geschwindigkeit am Teleoperator entspricht der Sensitivität des Joysticks (oder eines anderen Eingabegeräts) auf Operatorseite. Diese Skalierung ist in einem mittleren Bereich zu wählen, so dass Langeweile-Effekte und Unachtsamkeit vermieden werden und die Steuerung kontrollierbar bleibt.
Aufgabenrichtung	Bei Trackingaufgaben ist eine sagittale Arbeitsrichtung zu bevorzugen.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Analysen zur Geschwindigkeitsskalierung

Die Abweichung von einer vorgegebenen Strecke steigt erwartungsgemäß bei einer Skalierungsstufe mit hoher Maximalgeschwindigkeit am Teleoperator. Neben diesem erwarteten Ergebnis wurde jedoch auch festgestellt, dass bei sehr langsamer Geschwindigkeit (vgl. Skalierungsstufe 1) ein Langeweile-Effekt des Operators auftrat und seine Bewegungen nicht mehr präziser wurden, sondern sich auch hier die

Abweichung von der Ideallinie wieder vergrößerte. Darüber hinaus konnte eine Richtungsabhängigkeit der Aufgabe festgestellt werden. Die zurückgelegte normierte Distanz in x-Richtung war deutlich höher als in y-Richtung. Folglich lässt sich ableiten, dass Transportaufgaben möglichst in sagittaler Richtung ausgeführt werden sollten, um Abweichungen und damit gegebenenfalls Kollisionen mit anderen Gegenständen zu vermeiden.

5.3 Vorversuch: Steuerungsart des Teleoperators

Versuchsziel und Durchführung

Im oben beschriebenen Versuch wurde eine geschwindigkeitsbasierte Steuerung verwendet, also ein bestimmter Auslenkungswinkel des Joysticks einer entsprechend definierten Geschwindigkeit am Teleoperator zugeordnet. Die positionsbasierte Steuerung ist eine alternative Steuerungsmethode hierzu, wobei jeder Position des Eingabegeräts eine entsprechende Position im Arbeitsraum des Teleoperators entspricht. Anders als bei der Geschwindigkeitssteuerung, bei welcher der Operator eine Geschwindigkeit vorgibt, kommandiert er bei dieser am Eingabegerät eine definierte Position des Teleoperators. Dies hat zur Folge, dass eine bestimmte Auslenkung des Joysticks einen definierten Verfahrensweg am Teleoperator hervorruft (REINHART et al. 2010, Abbildung 5.6).

Im durchgeführten Versuch verhält sich der Auslenkungswinkel des Joysticks direkt proportional zur gefahrenen Strecke am Teleoperator (hier dargestellt für die x-Richtung, auch gültig in y- und z-Richtung):

$$\alpha_{x, \text{Joystick}} \sim x_{\text{Teleoperator}} \quad (8)$$

mit $\alpha_{x, \text{Joystick}}$: Auslenkwinkel in x-Richtung am Joystick,

$x_{\text{Teleoperator}}$: x-Koordinate des Teleoperators.

Es wurde untersucht, mit welcher der beiden Steuerungsmethoden, geschwindigkeits- oder positionsbasierte Steuerung, der Operator schneller eine Aufgabe ausführen konnte. Hierfür wurden 10 Probanden gebeten, einen Trackingpfad ähnlich dem in Abbildung 5.3 abzufahren und über einer Endposition anzuhalten. Sowohl für die Positions- als auch für die Geschwindigkeitssteuerung führte jeder Proband jeweils vier Versuchsdurchgänge aus. Die Geschwindigkeitssteuerung erfolgte mit der im vorhergehenden Abschnitt 5.2 als günstig identifizierten Geschwindigkeit von 0,9 mm/Sek. (entsprechend Skalierungsstufe 3).

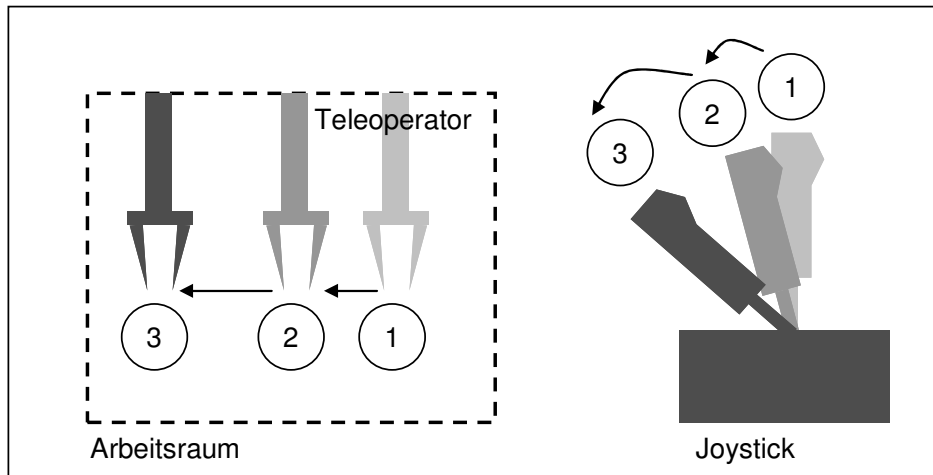


Abbildung 5.6: Positionssteuerung eines Teleoperators bei Auslenkung des Joysticks in die Positionen 1 bis 3

Ergebnisse und Fazit

Eine Umfrage zeigte, dass neun der zehn Probanden die Geschwindigkeitssteuerung bevorzugten (Tabelle 5.3). Dies kann auf das Wegfallen des Indexing zurückgeführt werden. Der Begriff „Indexing“ beschreibt, dass der Arbeitsraum in seiner vollen Größe genutzt wird, indem der Joystick beim Erreichen der maximalen Auslenkung wieder in seine Nulllage gebracht wird, ohne den Teleoperator zu bewegen, und somit wieder ein neuer Bewegungsbereich innerhalb des Arbeitsbereiches des Teleoperators zur Verfügung steht. Hierdurch wird die Aufgabe in mehrere Einzelschritte unterteilt und eine durchgängige Steuerung verhindert. Die Versuchsteilnehmer beurteilten es ebenfalls als einfacher, die geforderte Zielposition mit der Geschwindigkeitssteuerung anzufahren als mit der Positonssteuerung.

Steuerung	Welche Steuerungsart ist intuitiver?	Welche Steuerungsart erleichtert das präzise Anfahren einer Zielposition?	durchschnittliche Zeit zur Aufgabenerfüllung
Geschwindigkeitssteuerung	9	7	25,7 Sek.
Positionssteuerung	1	3	40,3 Sek.

Tabelle 5.3: Ergebnisse einer Umfrage zum subjektiven Empfinden der Probanden bezüglich der Art der Steuerung (Anzahl der Nennungen der Probanden) und durchschnittliche Zeit zur Aufgabenerfüllung

Auch die Auswertung der Zeit zur Aufgabenerfüllung verdeutlicht, dass die Geschwindigkeitssteuerung besser geeignet war, da sich die Durchschnittszeit um 36 % verringerte. Dies unterstreicht den Mehraufwand, der durch das Indexing bei Positionssteuerung für den Operator anfällt.

Beim Vergleich der Steuerungsmodi „Position“ und „Geschwindigkeit“ resultiert damit, dass die Geschwindigkeitssteuerung tendenziell besser von den Operatoren angenommen wurde und zusätzlich zu einer schnelleren Aufgabenerledigung führte. Tabelle 5.4 fasst diese Ergebnisse zusammen. Aufgrund dieses Versuchs mit der zuvor ermittelten optimalen Geschwindigkeitseinstellung am Teleoperator (Abschnitt 5.2) wurde für die weiteren Versuche die Geschwindigkeitssteuerung verwendet.

Parameter	Ergebnis
Nutzerakzeptanz	Die geschwindigkeitsbasierte Steuerung erfährt gegenüber der Positionssteuerung für Trackingaufgaben eine höhere Nutzerakzeptanz und führt folglich zu einer intuitiveren Bedienung.
Zeit zur Aufgabenerfüllung	Die geschwindigkeitsbasierte Steuerung erlaubt ein schnelleres Arbeiten bei Aufgaben in einem großen Arbeitsbereich, welcher bei Positionssteuerung ein sogenanntes Indexing notwendig machen würde.

Tabelle 5.4: Ergebnisse zum Vergleich der geschwindigkeits- und der positionsbasierten Steuerung

5.4 Vorversuch: Steuerung der Vertikalen

Versuchsziel und Durchführung

Für die Transformation der horizontalen Joystick-Bewegung auf die vertikale Teleoperator-Bewegung stehen zwei Alternativen zur Auswahl (siehe Abbildung 5.7). Für die nach unten gerichtete vertikale Bewegung kann der Operator den Joystick zu sich ziehen oder er kann ihn von sich wegdrücken. Auf die letztgenannte Weise ist die Steuerung der Flughöhe bei Flugzeugen realisiert. Die Mapping-Strategien, welche der Operator für die jeweilige Steuerungsart anwendet, sind folgende:

- objektbezogene Steuerung: Der Operator hat das imaginäre Bild, dass der Joystick am zu bewegenden Objekt vor ihm festgemacht ist. Eine Abwärts-

5.4 Vorversuch: Steuerung der Vertikalen

bewegung des Objekts geht damit einher, dass der Joystick also zum Operator hin ausgelenkt wird.

- körperbezogene Steuerung: In der Vorstellung ist der Joystick mit dem Körper des Operators verbunden, so dass die Steuerung einer Abwärtsbewegung mit dem Wegschieben des Joystickhebels verknüpft ist.

Da die telepräsenste Versuchsanlage verschiedene Kamerablickwinkel bietet, wurde in einer Umfrage analysiert, auf welche Weise ein Bediener ein Objekt mit einem Joystick intuitiv nach oben bzw. unten steuern würde. Befragt wurden 20 Personen (Durchschnittsalter 27,7 Jahre), indem ihnen vier verschiedene Perspektiven von Objekten in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden, welche sie jeweils mit einem Joystick nach oben oder unten steuern sollten.

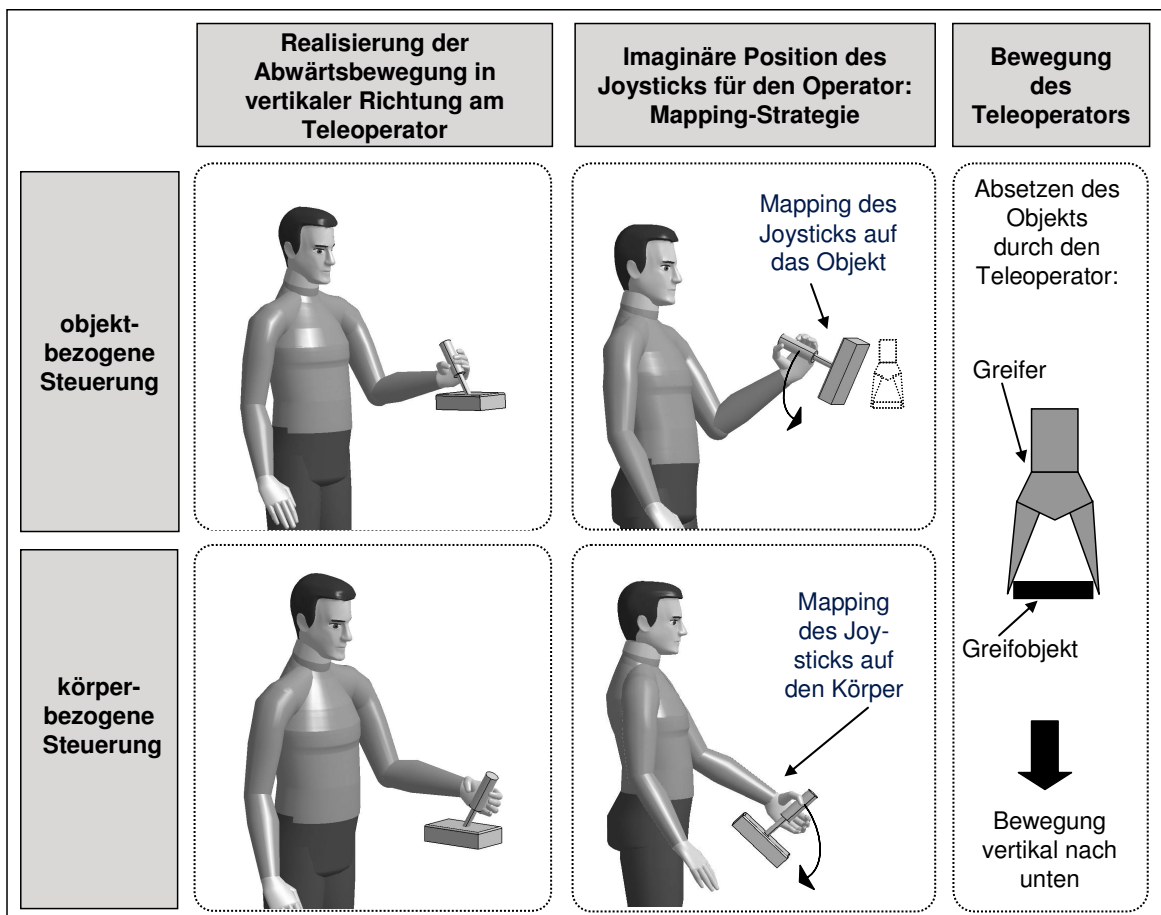


Abbildung 5.7: Ansteuerung der vertikalen z-Richtung mit einem 2D-Joystick mit zwei unterschiedlichen Mapping-Strategien: objekt- und körperbezogen

Ergebnisse und Fazit

Die körperbezogene Steuerung wird von 80 % der Probanden intuitiv für die Steuerung verwendet (vgl. Tabelle 5.5). Die objektbezogene Steuerung wurde kaum verwendet, nur von einigen Personen ohne Erfahrung mit PC-Spielen.

Da die körperbezogene Steuerung in allen Perspektiven von der Mehrheit der Probanden gewählt wurde, sollte sie als Mapping-Strategie verwendet werden, um eine intuitive Übertragung der Steuerungssignale des Operators zu gewährleisten.

Art der Steuerung	Welche Steuerungsart wählen Sie, um das Flugzeug bzw. das Mikrosystem nach oben bzw. unten zu navigieren?			
	Seitenansicht (Flugzeug)	Innenansicht (Flugzeug, Cockpit)	Seitenansicht (Mikrosystem)	Draufsicht (Mikrosystem)
objektbezogen	4	1	4	2
körperbezogen	16	19	16	18

Tabelle 5.5: Ergebnisse einer Befragung zur Steuerungsweise der z-Richtung (Höhe) bei verschiedenen Perspektiven, Anzahl der Nennungen für verschiedene Ansichten eines Flugzeugs und eines Mikrosystems

Parameter	Ergebnis
Steuerung in senkrechter Richtung mit Joystick (nur horizontale Freiheitsgrade)	Die Steuerung der Höhe ist in Anlehnung an die körperbezogene Steuerung vorzunehmen.

Tabelle 5.6: Ergebnis für die Befragung zur Steuerung der Senkrechten mit einem zweidimensionalen Joystick

5.5 Vorversuch: Einfluss der Zeitverzögerung auf die Performanz

Versuchsziel und Durchführung

Eine weitere wichtige Einflussgröße zur Kontrollierbarkeit eines telepräsenten Systems ist die Zeitverzögerung. Diese resultiert aus der Laufzeit, welche ein Signal von seiner Entstehung bis zu seiner Verarbeitung im Kommunikationskanal und der Ausgabe auf Operator- bzw. Teleoperatorseite benötigt. Wie in Abbildung 5.8 dar-

5.5 Vorversuch: Einfluss der Zeitverzögerung auf die Performanz

gestellt, beläuft sich die Zeitverzögerung für den Operator von der Aussendung eines Signals, beispielsweise eines Steuerungsbefehls, bis zur Rückmeldung, welche visueller, akustischer oder haptischer Natur sein kann, auf $2 \cdot \Delta t$. Sollten die Signalverarbeitungssysteme für die Hinsendung zum Teleoperator und die Rücksendung an den Operator differieren, müssen sogar unterschiedliche Laufzeiten Δt berücksichtigt werden. Im vorliegenden Versuchsaufbau zur Präzisionsmontage wurde eine Gesamtlaufzeit simuliert, indem die visuelle Signalarückführung verzögert wurde.

Ziel dieses Versuches war es, die Auswirkung von Verzögerungen in der Signalübertragung zwischen Operator und Teleoperator bei der Durchführung von typischen pick-and-place-Aufgaben in der Mikromontage zu evaluieren.

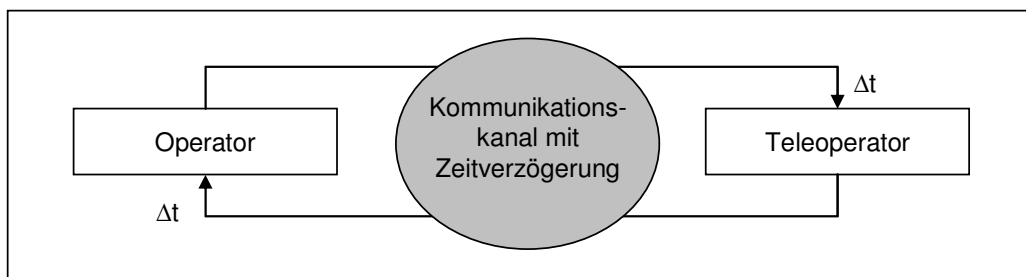


Abbildung 5.8: Signallaufzeiten im telepräsenten System

Am Versuch nahmen elf Personen (Altersdurchschnitt 25 Jahre, 8 männlich, 3 weiblich). Keine der Personen hatte Erfahrung mit der Steuerung des Versuchsaufbaus. Für den Versuch wurde der aus den vorhergehenden Experimenten bekannte Aufbau für den Operator und den Teleoperator verwendet, wobei ebenfalls auf die Durchführung eines realen Greifvorgangs verzichtet wurde, um zusätzliche Fehlerquellen auszuschließen. Die Zeitverzögerung wurde bei der Visualisierung berücksichtigt. Für die Aufgabe erhielt der Operator Steuerungsmöglichkeiten in der x-y-Ebene (vgl. Abbildung 5.3).

Die verschiedenen zu testenden Latenzzeiten wurden für diesen Versuch mit 0, 500, 1000 und 2000 Millisekunden Verzögerung festgelegt. Eine Latenzzeit von 0 Sekunden bedeutete hier, dass keine zusätzliche Verzögerungszeit zur minimalen Signallaufzeit des Systems (ca. 50 ms) hinzugefügt wurde.

Ergebnisse

Um die gemessenen Zeiten unabhängig von den individuellen Leistungen der einzelnen Personen zu bewerten, wurden die Zeiten zur Aufgabenerfüllung mit Latenz-

zeit T_{Latenz,k_T} jeweils durch die Zeit ohne Verzögerung $T_{(0)}$ dividiert und somit normiert:

$$T_{normiert,k_T} = \frac{T_{Latenz,k_T}}{T_{(0)}} \quad (9)$$

mit T_{Latenz,k_T} : Zeit zur Aufgabenerfüllung bei der Zeitverzögerung k_T
 k_T : Stufe der Latenzzeit [500, 1000, 2000]

Für die weitere Auswertung wurde die normierte Zeit $T_{normiert,k_T}$ verwendet.

Ein signifikanter Unterschied bei der Durchführung der Tracking-Aufgabe wurde zwischen den Stufen 500 und 1000 ms Latenzzeit festgestellt. Die Ergebnisse der Stufen 0 und 500 ms unterscheiden sich nicht signifikant. Bei der Positionierung gibt es signifikante Unterschiede zwischen 0 und 500 ms sowie 500 und 1000 ms Latenzzeit. Über einer Sekunde Latenzzeit konnte keine statistisch belegbare Verschlechterung mehr gemessen werden, die durchschnittliche Zeit zur Aufgabenerfüllung erhöhte sich aber weiterhin. Ein Vergleich der normierten Zeiten für die Tracking- und die Positionierungsaufgabe (Abbildung 5.9) zeigt, dass eine Verzögerung der visuellen Darstellung insbesondere die Leistung bei Positionieraufgaben stark verschlechtert. Die Auswirkungen auf die Durchführung von Tracking-Aufgaben sind im Vergleich dazu geringer.

Fazit

Insbesondere bei der exakten Positionierung von Objekten benötigten die Probanden ein Vielfaches der Aufgabenzeit ohne Verzögerung. Bei der Planung von Montageaufgaben ist deshalb darauf zu achten, dass für die Positionierung möglichst zusätzliche Hilfsmaßnahmen vorgesehen werden, wie beispielsweise Anschläge. Auf die Ausführung von Tracking-Aufgaben hingegen wirken sich die Zeitverzögerungen geringer aus. Der Operator konnte die Verzögerungen bei diesen frei steuerbaren Bewegungen gut kompensieren, so dass die Genauigkeit der Ausführung weniger beeinflusst wurde (Tabelle 5.7).

5.6 Einfluss haptischer Rückmeldung

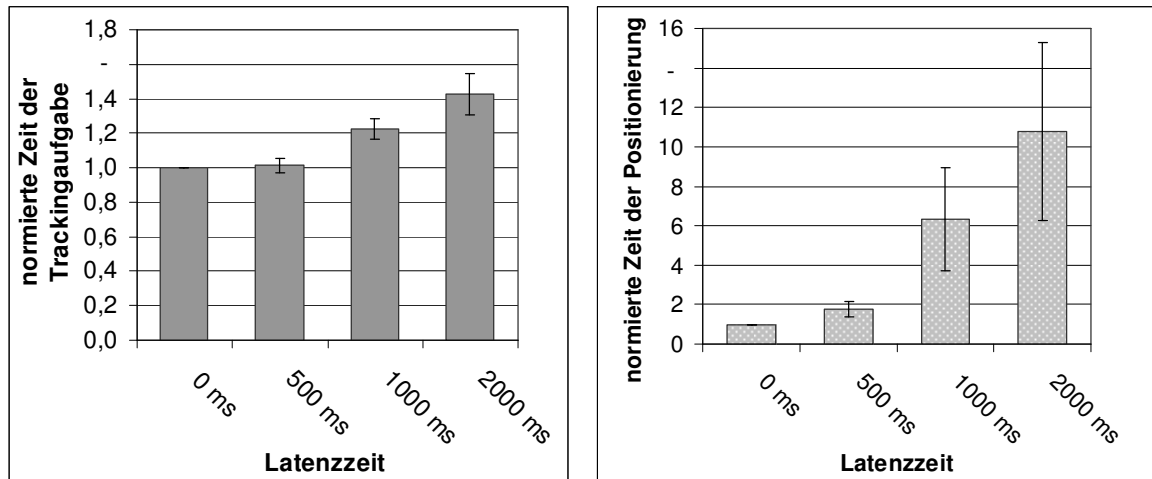


Abbildung 5.9: Ergebnisse für die Tracking- (links) und die Positionieraufgabe (rechts) bei unterschiedlichen Latenzzeiten

Parameter	Ergebnis
Latenzzeiten bei Trackingaufgaben	Auch Latenzzeiten > 1 Sekunde können vom Operator noch kompensiert werden.
Latenzzeiten bei Positionieraufgaben	Für Positionieraufgaben ist die Latenzzeit möglichst gering zu halten (< 500 ms), da eine präzise Steuerung des Teleoperators sonst nicht mehr möglich ist bzw. viele Korrekturbewegungen notwendig sind.

Tabelle 5.7: Ergebnisse für den Einfluss der Latenzzeit

5.6 Einfluss haptischer Rückmeldung

5.6.1 Versuchsziel und Durchführung

In den beschriebenen Vorversuchen wurden die Teleaktionskriterien Skalierung und Steuerungsmodus sowie der Einfluss von Verzögerungszeiten betrachtet. Anschließend sollte die haptische Rückmeldung als Alleinstellungsmerkmal eines Telepräsenzsystems untersucht werden. Da ein manuell ausgeführter Montageprozess einen hohen Anteil an Tätigkeiten mit taktile Wahrnehmung beinhaltet, beispielsweise die auszuführenden Greifprozesse, wird hier der Einfluss von haptischer Rückmeldung auf die Performanz des Operators betrachtet. In der (Mikro-)Montage werden sehr oft einfache Greifvorgänge (pick-and-place) ausgeführt (FEYGIN et al. 2002),

bei denen ein empfindliches Objekt sicher gegriffen und abgesetzt werden muss. Besonders wichtig ist dabei die Kraftaufbringung beim Absetzen, da zu hohe Kräfte das Objekt oder den Objektträger zerstören können.

Ziel des Experiments war es, zu bestimmen, ob haptisches Feedback eine Greif- und Absetzbewegung unterstützt. Des Weiteren soll die Frage geklärt werden, ob sich die Art der Krafrückkopplung auf die Aufgabenerfüllung auswirkt.

Die Aufgabe der Probanden war es, einen Mikrochip zu greifen und auf einer definierten Position wieder kontrolliert abzulegen. Als abhängige Variable wurden die Zeit zur Erfüllung der Aufgabe sowie die Druckkraft des Greifers auf den Ablagetisch gemessen. Es wurde in einem ersten Versuchsaufbau mit 10 Versuchspersonen getestet (Durchschnittsalter 22 Jahre). Zur Nivellierung von Lerneffekten wurde die Reihenfolge der Feedback-Modi randomisiert.

Die Testpersonen erhielten zunächst diese Feedback-Arten:

1. Visuelles Feedback: visueller Modus (VIS). Die Probanden hatten zwei Kameraeinstellungen zur Verfügung, erhielten aber keine Krafrückkopplung beim Kontakt zwischen Greifer und Ablagetisch.
2. Direkte Krafrückkopplung: Force-Feedback-Modus (FF). Hierbei spürten die Versuchspersonen eine Gegenkraft, sobald sie den Greifer in Kontakt mit dem Ablagetisch gebracht hatten. Die Kraft $F_{Operator}$ wurde proportional wiedergegeben und in Abhängigkeit der real gemessenen Kraft $F_{Teleoperator}$ mit einem Faktor k_F skaliert ($k_F > 1$):

$$F_{Operator} = k_F \cdot F_{Teleoperator} \quad (10)$$

In einem ergänzenden zweiten Versuch wurde neben visuellem und Kraft-Feedback ein Modus mit einem einfachen Vibrationsmodus getestet. Hierfür führten zwölf Probanden (alle männlich, Durchschnittsalter 27,1 Jahre) jeweils vier Durchgänge in jedem Modus aus. Die Beschreibung des Vibrationsmodus ist dabei die folgende:

3. Krafrückmeldung als Assistenzfunktion: Vibrations-Assistenz-Modus (VA). Als Assistenzfunktion wird in diesem Zusammenhang ein Signal bezeichnet, das den Operator unterstützen soll, aber nicht die Realität abbildet. Im Experiment wurde im Kontaktfall eine Vibration des Joysticks erzeugt. Somit wird die Kontaktkraft nicht statisch als Gegenkraft dargestellt, sondern in veränderter Form, welche aber trotzdem Rückschlüsse auf das Ereignis auf Teleoperatorseite zulässt, also dem Operator assistiert:

$$F_{Operator} = k_F \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

mit ω : Kreisfrequenz der Vibration des Joysticks,
 t : Zeit.

5.6.2 Ergebnisse

Wie in Abbildung 5.10 zu erkennen, fallen die durchschnittlichen Kräfte beim Absetzen des Objekts in allen Versuchsmodi geringer aus als beim Aufnehmen des Bauteils. Ein Grund hierfür ist, dass einige Versuchspersonen das Bauteil aus der Luft fallen ließen, anstatt das Bauteil platziert abzulegen, so dass keine Kraft beim Absetzvorgang gemessen werden konnte. Beim Aufnehmen des Bauteils war ein deutlich messbarer Kontakt mit dem Ablagetisch aufgrund der flachen Objektgeometrie zwingend nötig, so dass dort in jedem Fall eine Druckkraft detektiert wurde. Es waren große Unterschiede in der Druckkraft messbar. Für das Aufbringen der Kraft war ein hohes Limit gesetzt worden, welches weit über der zum Ablegen oder Aufnehmen benötigten Kraft lag, so dass die Probanden mit dem Greifer nahezu beliebig fest auf die Unterlage aufdrücken konnten.

In der ersten Versuchsreihe lagen die mittleren Kraftwerte F_M beim pick-Prozess beim Force-Feedback-Modus bei $F_{M,FF} = 2,7$ N, beim rein visuellen Modus waren sie deutlich höher ($F_{M,VIS} = 6,5$ N). In der zweiten Versuchsreihe mit drei Feedback-Modi lagen die Mittelwerte der Kräfte bei $F_{M,VIS} = 6,2$ N, $F_{M,FF} = 4,0$ N und $F_{M,VA} = 5,6$ N. Wenn die Probanden keine haptische Rückmeldung erhielten, waren auch die Maximalkräfte am höchsten ($F_{max,VIS} = 37,9$ N), wohingegen sie im Force-Feedback-Modus am geringsten waren ($F_{max,FF} = 17,1$ N). Im Assistenz-Modus lag die Maximalkraft zwischen den anderen beiden Versuchstypen ($F_{max,VIS} = 32,4$ N). Vergleicht man die gemittelten Greifkräfte beim pick-Vorgang im ersten Versuch zwischen visuellem und direktem Kraft-Feedback, so sind die aufgebrachten Kräfte beim Force-Feedback-Modus (FF) signifikant geringer als ohne Krafrückkopplung (VIS) (Signifikanzniveau $p < 0,05$). Die Erweiterung des Versuchs durch den Vibrations-Assistenz-Modus (VA) brachte jedoch keinen signifikanten Unterschied gegenüber der rein visuellen Rückmeldung (VIS) und somit keine Verbesserung. Bei den aufgebrachten Kräften während des Ablegens des Objekts (place-Vorgang) konnte zwischen den drei Rückkopplungsarten kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Die Zeit zur Aufgabenerfüllung unterschied sich nicht signifikant und nur in sehr geringem Maße zwischen den verschiedenen Modi. Betrachtet man nur die Tendenz der Mittelwerte, so ist zu erkennen, dass die Modi mit Krafrückkopplung eine um bis zu 10 % erhöhte Erfüllungszeit aufweisen (Abbildung 5.11). Eine Erklärungsmöglichkeit hierfür liegt in der sorgsameren Ausführung der Greif- (pick) und Absetzvorgänge (place) durch die Operatoren, denn in Erwartung der Krafrückkopplung als Indikator für Berührungen war ein langsames Heranfahren an den Werkstückträger sinnvoll. Hingegen bewegte der Operator das Werkzeug bei ausschließlich visueller Rückmeldung schnell bis an die Position, welche er für das Ziel hielt. Er tastete sich nicht langsamer heran, da er hierdurch keine zusätzlichen Informationen bekam.

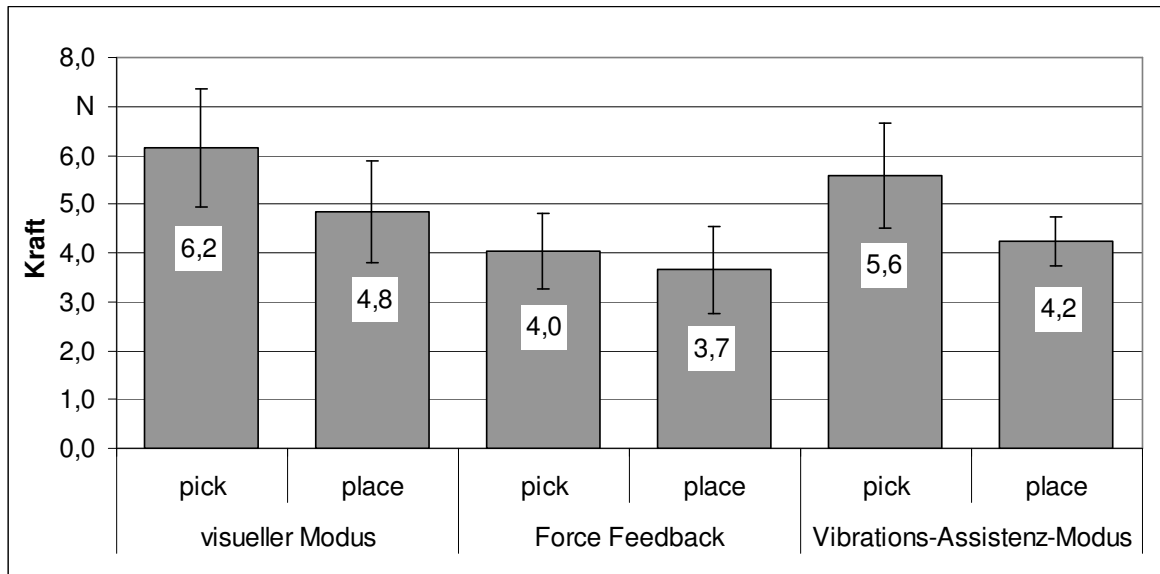


Abbildung 5.10: Kräfte beim pick-and-place-Vorgang (mit Standardfehler)

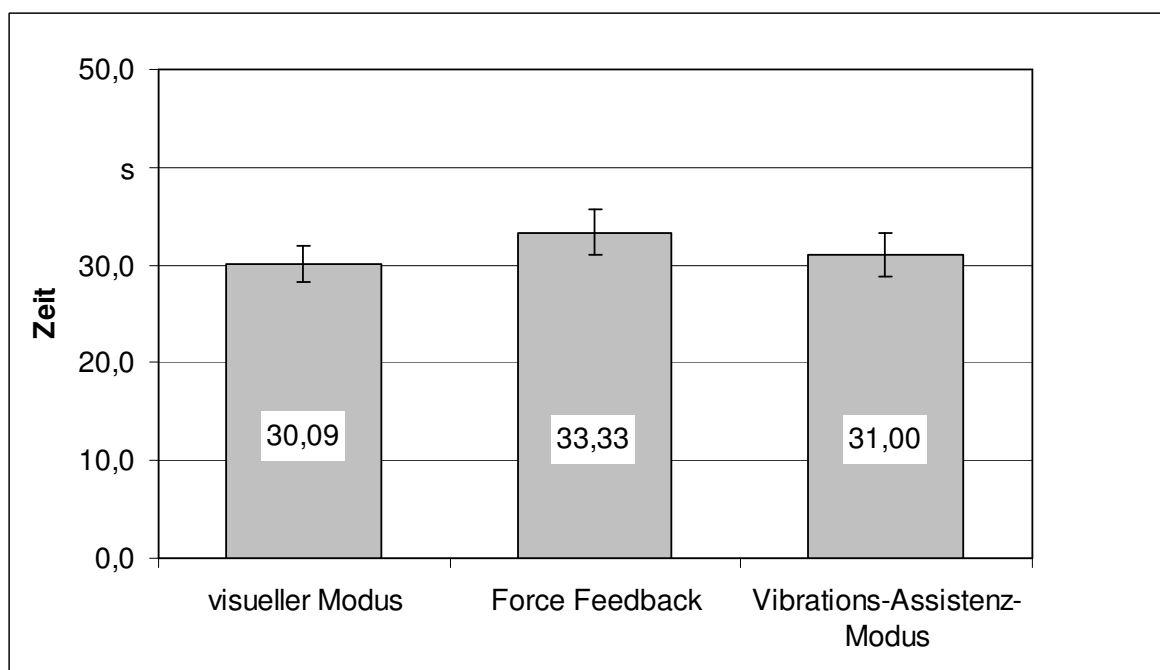


Abbildung 5.11: Zeit zur Erfüllung der Aufgabe (mit Standardfehler) bei verschiedenen Arten der Rückkopplung des Greiferkontakts

Neben den quantitativ gemessenen Variablen Kraft und Zeit wurden die Probanden im zweiten Versuchsaufbau mit Vibrations-Feedback auch über ihre Eindrücke befragt. Force Feedback fanden 50 % der Probanden hilfreich (keine Angabe: 8 %),

5.6 Einfluss haptischer Rückmeldung

den Assistenz-Modus 41,1 % im Vergleich zu rein visueller Rückmeldung (Abbildung 5.12).

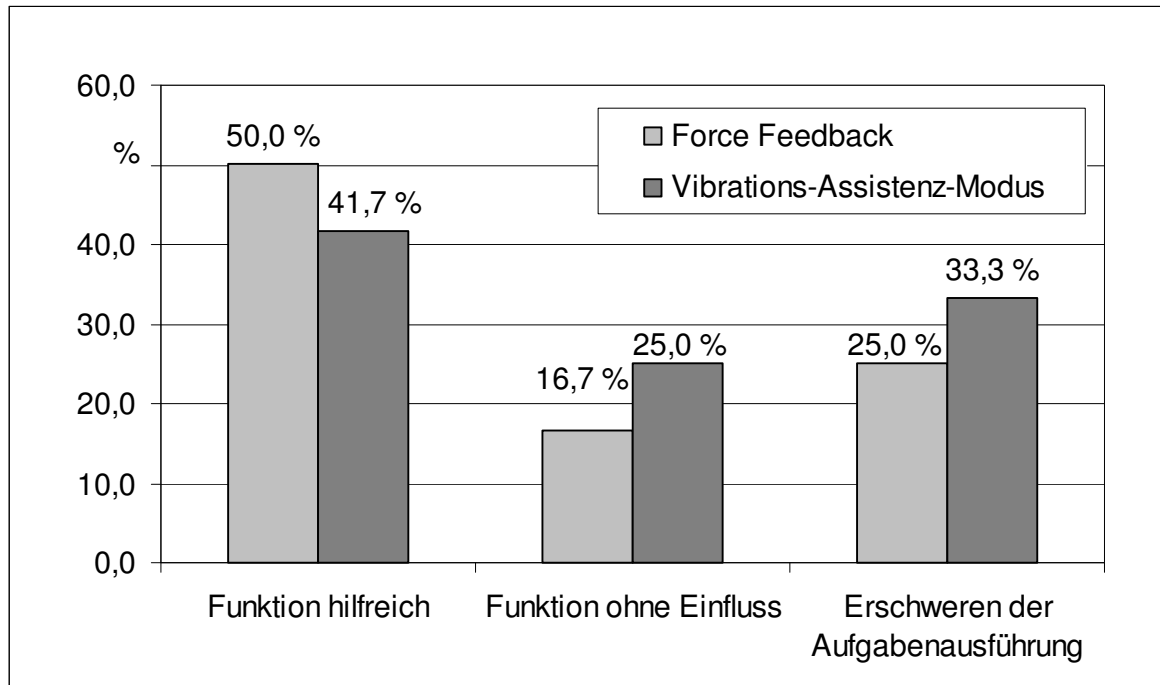


Abbildung 5.12: Ergebnis der Probandenbefragung zum Einfluss von haptischer Rückkopplung auf die Aufgabenausführung

5.6.3 Fazit

Die Ergebnisse unterstützen die These, dass eine Krafrückkopplung dann sinnvoll ist, wenn sie den realen Vorgang direkt widerspiegelt (siehe Tabelle 5.8), da der Force-Feedback-Modus die Greifkraft signifikant gegenüber der rein visuellen Darstellung verringerte (vgl. auch RADI et al. 2010). Die Assistenzfunktion in Form einer Vibration brachte hingegen nur geringe Verbesserungseffekte. Dies bedeutet, dass die Probanden die Vibration seltener mit dem Kontakt ereignis „Greifer auf Ablegefläche“ in Verbindung brachten und sich nicht daran orientierten. Die Befragung verdeutlichte außerdem, dass ein hoher Anteil der Probanden die Assistenzfunktion sogar als störend oder erschwerend empfand oder sie nicht als Orientierungsmittel nutzte. Wie schon in anderen Experimenten festgestellt worden war (vgl. Abschnitt 2.4.3), verbesserte sich die Zeit zur Aufgabenerfüllung durch eine haptische Rückmeldung nicht.

Parameter	Ergebnis
direkte Krafrückkopplung	Eine realitätsnah skalierte Krafrückkopplung unterstützt den Operator und reduziert während der Aufgabenausführung eingebrachte Kräfte am Teleoperator.
Vibrations-Assistenz-Kraft	Die Übertragung einer Vibration (hier im Vibrations-Assistenz-Modus), welche unabhängig von der Stärke der realen Kräfte am Teleoperator ist, unterstützt den Operator nur in geringem Maße.
Zeit zur Aufgabenerfüllung	Sie wurde weder durch den Force-Feedback-Modus noch durch den Vibrations-Assistenz-Modus gesenkt. Eine haptische Rückmeldung reduziert die Zeit zur Aufgabenerfüllung bei pick-and-place-Aufgaben demzufolge nicht.

Tabelle 5.8: *Ergebnisse der haptischen Rückkopplung bei Montageaufgaben*

5.7 Visuelles und haptisches Lernen

5.7.1 Versuchsziel und Durchführung

Der Einsatz der Telepräsenztechnologie eröffnet dem Bediener neue Möglichkeiten für die Fernsteuerung eines Vorgangs. Wie aber erlernt er die Ausführung der Aufgabe? In der „normalen“ Umwelt kann der Mensch über Beobachtung und Nachahmung oder durch die Umsetzung von verbalen (Gespräche, Einweisungen) oder semiotischen (Texte, Grafiken, Symbole) Instruktionen lernen. So eignet er sich einen Montagevorgang beispielsweise dadurch an, dass ihm der Vorgang gezeigt wird und er dabei zusieht. Dieses Vormachen wird meist durch verbale Instruktionen unterstützt. Danach ahmt der Lernende den Vorgang nach.

Die Telepräsenztechnologie, wie sie in den vorangehenden Kapiteln vorgestellt wurde, bietet neben der visuellen und auditiven Übertragung von Signalen die Möglichkeit, haptische Vorgänge an einen oder sogar mehrere Operatoren weiterzugeben. Übertragen auf das Lernen bedeutet dies, dass demjenigen Operator, der angelehrt werden soll („Schüler“-Operator), ein Montagevorgang nicht nur gezeigt wird, sondern dass dieser auch fühlen kann, welche Steuerbewegungen der geübte Operator („Lehrer“-Operator) ausführt und welche Krafrückmeldungen er bekommt (Abbildung 5.13).

Das Ziel des hier beschriebenen Versuchs war es daher, den Nutzen von haptischer Unterstützung zusätzlich zum visuellen Lernen zu untersuchen. Die hierzu formulierte Hypothese lautet, dass visuell-haptisches Lernen den Lernvorgang im Unterschied zum rein visuellen Lernen beschleunigt.

5.7 Visuelles und haptisches Lernen

Aufgrund von Untersuchungen, welche die Verbesserung der Tiefenwahrnehmung bzw. der aufgebrachtten Greifkraft durch Kraftrückkopplung belegen (BOUGUILA et al. 2000a; PÉRUCH & MESTRE 1999), lautet die zweite Hypothese, dass der visuell-haptische Lernprozess eine Reduktion der Druckkraft beim Greifprozess während einer Standard-pick-and-place-Aufgabe erzielt. Demzufolge wurden als zu messende Variablen die Zeit zur Aufgabenerfüllung und die während der Aufgabenausführung aufgebrauchte Druckkraft herangezogen.

Der Versuchsaufbau (Abbildung 5.13) und die Aufgabe ähneln denen der vorhergehenden Abschnitte. Die von den Probanden durchgeführte Aufgabe beinhaltete eine Tracking- und eine Positionieraufgabe. Die Tracking-Strecken waren aus rechtwinkligen sowie aus abgerundeten Teilen aufgebaut und mündeten in einer Zielmarkierung, innerhalb derer der Mikrochip positioniert werden sollte. Es wurden vier Versuchsstrecken verwendet, wobei eine Strecke durch Ansehen einer Videoaufzeichnung und durch entsprechendes haptisches Feedback gelernt werden konnte. Die anderen Strecken stellten sowohl ähnliche als auch verschiedene Aufgabenstellungen dar, so dass die Probanden das gelernte Wissen auch übertragen mussten.

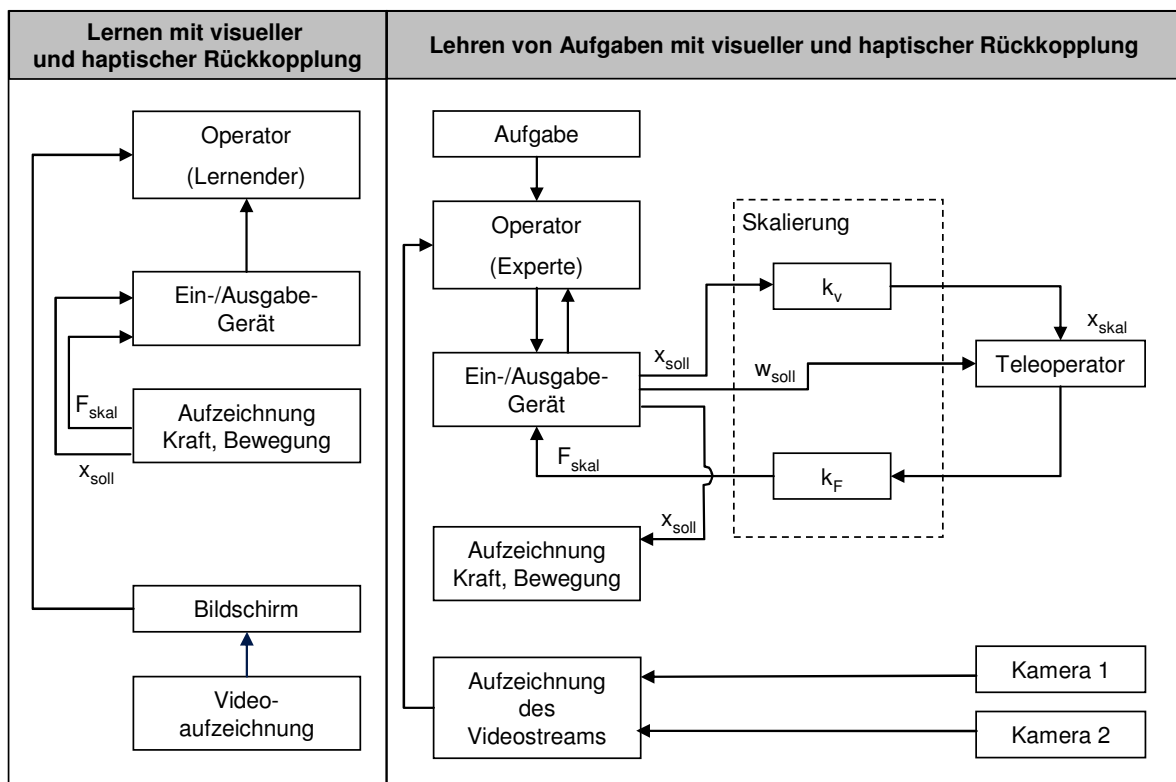


Abbildung 5.13: Schematischer Versuchsaufbau für den Lernvorgang (links) und die Aufzeichnung der Aufgabe durch einen Experten (Lehrvorgang, rechts) unter Verwendung des in Abschnitt 4.4 beschriebenen TPTA-Systems (Bezeichnungen siehe Abbildung 4.7)

Der Versuch wurde mit 32 Probanden mit einem Durchschnittsalter von 24 Jahren durchgeführt. Die erste Gruppe der Probanden erhielt ein Video, welches die auszuführende Aufgabe zeigte (visuelles Lernen), die zweite bekam das Video zu sehen und fühlte gleichzeitig die Joystickbewegungen (visuell-haptisches Lernen).

5.7.2 Ergebnisse

Die erste Hypothese, bei der angenommen wurde, dass durch haptisches Lernen der Lernvorgang beschleunigt wird, bestätigte sich nicht. Bei der Betrachtung der Lernkurve über die durchgeführten 16 Versuchsläufe jedes Probanden, wird ersichtlich, dass die größten Verbesserungen gleich beim zweiten Versuchslauf auftraten. Dieser Effekt war für beide Gruppen signifikant ($p = 0,05$). Jedoch konnte kein weiterer Unterschied zwischen der Gruppe mit visuell-haptischem Lernen und der Gruppe mit rein visuellem Lernen festgestellt werden. Qualitativ gesehen sind die Durchschnittszeiten zur Ausführung der Trackingaufgabe bei der visuell-haptischen Lerngruppe geringfügig länger, nur die letzten beiden Durchgänge wurden schneller ausgeführt als in der Vergleichsgruppe.

Außerdem wurde untersucht, ob eine neue Aufgabe, welche sich in der Bewegungsausführung deutlich von der gelernten unterschied, durch die Gruppe mit visuell-haptischem Lernen schneller ausgeführt werden konnte. Hierbei wurde jedoch kein Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen festgestellt.

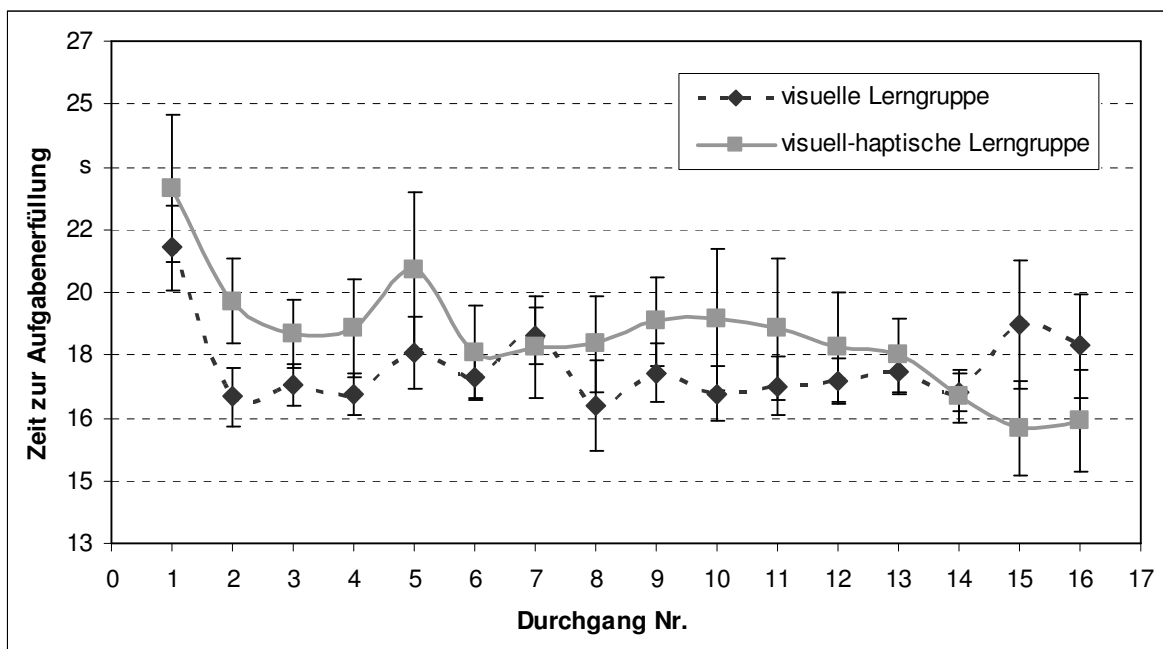


Abbildung 5.14 Mittelwerte der Trackingzeiten je Durchgang, unterschieden nach der Lernbedingung (mit Standardabweichung)

Die zweite Hypothese drückte die Vermutung aus, dass haptisches Lernen die Tiefenwahrnehmung unterstütze und somit die aufgebrachten Druckkräfte beim Berühren der Objekte geringer ausfielen als mit einfachem visuellem Lernen. Betrachtet man die Lerneffekte bei einer visuellen Aufgabenausführung (der Proband erhält bei der Erledigung der Aufgabe keine haptische Rückkopplung, je nach Gruppenzugehörigkeit jedoch ggf. beim Lernvorgang), unterscheiden sich die Lerngruppen um 26,4 % beim Greifvorgang (Abbildung 5.15, links). Beim Absetzen des Objekts ergaben sich geringere Unterschiede (9,7 %). Eine Erklärung hierfür ist, dass einige Probanden das Objekt aus der Luft fallen ließen und somit keine Druckkraft beim Absetzen messbar war (vgl. auch Abschnitt 5.6.2).

Wurde die Aufgabenausführung mit haptischer Rückkopplung unterstützt, so zeigten sich sowohl beim Greif- als auch beim Absetzvorgang deutliche Unterschiede zwischen den Lerngruppen (Abbildung 5.15, rechts). Die Druckkräfte waren bei der visuell-haptischen Lerngruppe um 58,0 % (place-Vorgänge) bzw. 66,8 % (pick-Vorgänge) geringer.

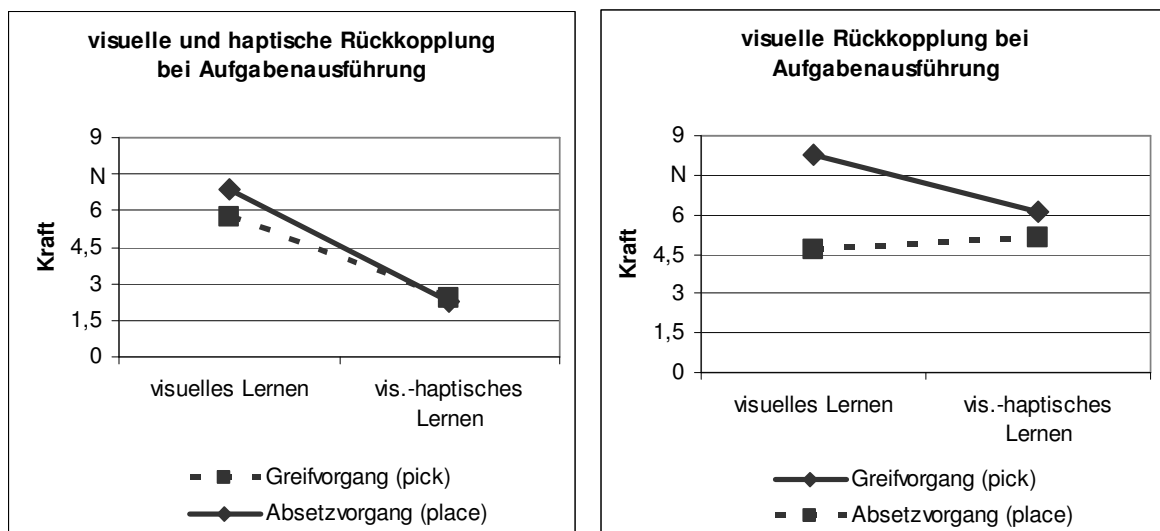


Abbildung 5.15: Mittelwerte für die aufgebrachte Druckkraft bei pick-and-place-Aufgaben

5.7.3 Fazit

Die Annahme, dass visuell-haptisches Lernen den Lernprozess bei pick-and-place-Aufgaben beschleunigt, konnte nicht bestätigt werden. Gründe hierfür können in der nicht ausreichend realitätsnahen oder nicht hinreichend gut auflösenden Kraftdarstellung während des Lernprozesses gesucht werden. Die Ergebnisse stützen die These, dass die gestellte Aufgabe, einen vorgegebenen Weg nachzufahren und eine Feinpositionierung des Bauteils vorzunehmen, mit rein visuellem Lernen hinrei-

chend gut erlernt werden kann, so dass eine zusätzliche haptische Unterstützung keinen weiteren Einfluss mehr hatte. Der haptische Lernvorgang wurde somit vom visuellen Lernen überlagert. Die Vermutung der Aufgabenabhängigkeit beim visuell-haptischen Lernen wurde auch schon in anderen Arbeiten (vgl. Abschnitt 2.4.4) geäußert. Hierbei wird angenommen, dass der visuelle Sinn über andere Sinnesindrücke, beispielsweise akustische oder taktile, dominiert und folglich kein Unterschied zwischen rein visuellem und visuell-haptischem Lernen festgestellt werden kann, da der Operator in beiden Fällen überwiegend durch das Zusehen lernt.

Betrachtet man nicht nur die Zeit, sondern auch die Qualität der Aufgabenerfüllung, welche im vorliegenden Experiment durch die aufgebrachte Druckkraft gemessen wurde, ergibt sich ein anderes Ergebnis. Hierfür brachte das haptische Lernen einen Mehrwert, ausgedrückt durch die Reduktion der Druckkraft. Besonders deutlich fiel der Lerneffekt aus, wenn auch die Aufgabe mit haptischem Feedback ausgeführt wurde. Dies verdeutlicht, dass diese Gruppe das Feedback schneller in Zusammenhang mit dem Kontaktereignis brachte und dadurch den Greifer nicht weiter auf den Objektträger absenkte. Da sich der visuell-haptische Lernvorgang bei der Aufgabenausführung mit rein visueller Rückmeldung nicht auswirken konnte, sind hier die mittleren gemessenen Druckkräfte deutlich höher.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Unterstützung des Lernvorgangs durch eine haptische Bewegungsführung zwar die Lernzeit nicht reduziert, aber bei der Einschätzung der benötigten Kraft in einem Telepräsenzsystem unterstützt (Tabelle 5.9).

Parameter	Ergebnis
Lernzeit	Die Zeit zum Erlernen der verwendeten typischen Montageaufgabe war sowohl bei der visuellen als auch bei der visuell-haptischen Lernbedingung gleich. Die Haptik brachte folglich keine Verbesserung.
Bedienung des Telepräsenzsystems	Bei der Aufgabenausführung nach dem Lernen konnte die Gruppe mit visuell-haptischem Lernvorgang die Telepräsenzfunktion der Krafrückkopplung besser nutzen und wendete niedrigere Kräfte am Teleoperator auf. Für die Bedienung eines Telepräsenzsystems erweist sich demzufolge visuell-haptisches Lernen als vorteilhafter.

Tabelle 5.9: Ergebnisse für visuelles und visuell-haptisches Lernen bei Mikro-montagevorgängen

5.8 Schlussfolgerungen

Die beschriebenen Versuche geben Aufschluss über wichtige Kriterien zum Aufbau und zur Einsetzbarkeit eines TPTA-Systems, insbesondere für die Präzisions- und die Mikromontage. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

Untersuchte Größe	Ergebnis
Skalierung der Geschwindigkeit	Die Geschwindigkeit sollte nicht zu langsam gewählt werden, da sonst Langeweile-Effekte entstehen, was der Forderung nach langsamen Geschwindigkeiten am Teleoperator zur Durchführung präziser Bewegungen entgegensteht. Eine variable Anpassung des Skalierungsfaktors an die jeweilige Aufgabe ist dann zielführend.
Steuerungsmodus	Die geschwindigkeitsbasierte Steuerung als intuitiver bedienbar eingestuft. Sie führt außerdem zu einer schnelleren Aufgabenerfüllung im Vergleich zur Positionsteuerung.
Zeitverzögerung	Bei Positionieraufgaben mit hohen Präzisionsanforderungen wirkt sich die Zeitverzögerung sehr stark aus. Hier sind Maßnahmen gefordert, um die Auswirkungen möglichst gering zu halten. Bei Tracking-Aufgaben hat sie geringere Auswirkungen. Der Mensch kann diesen Aufgabentyp auch mit Zeitverzögerung ausführen, ohne dass sich die Bearbeitungszeit stark erhöht.
haptische Rückmeldung	Eine haptische Rückkopplung erleichtert es dem Operator, eine Aufgabe auszuführen. Insbesondere bei Aufgabenstellungen, bei denen keine hohen Kräfte aufgebracht werden sollen, kann durch Kraftrückkopplung die am Teleoperator aufgebrachte Kraft reduziert werden.
visuell-haptisches Lernen	Visuell-haptisches Lernen reduziert die Lernzeit für Montageaufgaben nicht. Lediglich die haptische Rückkopplung wird bei der späteren Arbeit mit einem Telepräsenzsystem schneller erkannt und schneller richtig interpretiert.

Tabelle 5.10: Einsatzfaktoren in der telepräsenten Präzisions- und Mikromontage

Betrachtet man noch einmal die Forschungsfrage dieses Kapitels, so können nachstehende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Bringt die haptische Rückmeldung einen Mehrwert bei der Aufgabenausführung?

Aufgrund der beschriebenen Versuche wird die Frage ambivalent beantwortet: Die haptische Rückkopplung bringt eine Verbesserung der Aufgabenerfüllung hinsichtlich der Qualität, sie reduziert jedoch nicht die Durchführungszeit.

Für das Erlernen von Montageaufgaben ist ein visuell-haptischer Lernvorgang nicht notwendig, da keine Reduktion der Lernzeit festgestellt werden konnte.

6 Technisch-wirtschaftliche Betrachtung

6.1 Technische Gestaltungsaspekte

6.1.1 Erweiterung der Krafrückkopplung beim Greifen

Die Ergebnisse zur Leistungssteigerung des Operators durch haptische Rückmeldung legen eine möglichst realitätsnahe und vielfältige Rückmeldung haptischer Reize nahe. Deshalb wurde aufgrund der Versuchsergebnisse ein Greifer mit integrierter Erfassung der Greifkraft entwickelt. Somit kann der Operator nicht nur das Auftreffen des Greifers auf dem Werkstückträger, sondern auch die Zustände „Bauteil gegriffen“ = *Greifbacken in Kontakt mit dem Bauteil*, „Bauteil abgelegt“ = *Greifbacken ohne Bauteilkontakt* oder auch unbeabsichtigte Zustände wie „Bauteil verloren“ = *Greifbacken ohne Bauteilkontakt* erfahren, ohne auf den visuellen Bildeindruck angewiesen zu sein. Hierfür wurde ein sensibler Endeffektor entwickelt, dessen Funktionsprinzip auf der Erfassung der Durchbiegung der Greiferspitzen beim Greifvorgang beruht (Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2).

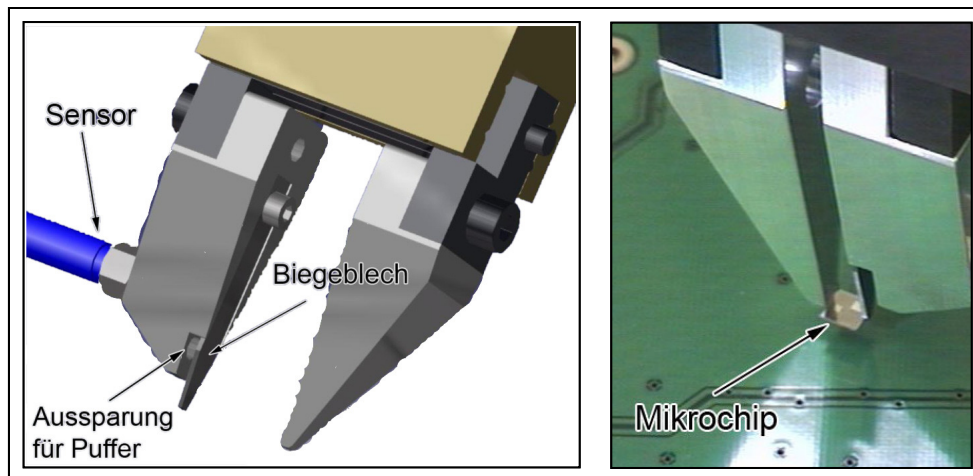


Abbildung 6.1: Greifer zur Krafterfassung: schematisch im CAD (links) und real mit gegriffenem Mikrochip (rechts)

Die Realisierung erfolgte durch eine Greifbacke, welche elastisch ist und sich bei Kontakt mit einem Objekt verformt. Diese Durchbiegung wird durch einen Sensor, in diesem Fall induktiv durch Erfassung der Abstandsänderung, registriert. Das Sensorsignal wird zur Wiedergabe der Krafrückkopplung verwendet. Somit kann

der Operator haptisch erfassen, ob er ein Objekt gegriffen hat oder nicht. Die Darstellung der Greifkraft muss je nach verwendetem Ein-/Ausgabe-Gerät angepasst werden. Sie darf nicht redundant mit Darstellungsformen anderer haptischer Eindrücke sein, beispielsweise der Krafrückkopplung bei Kontakt des Greifers mit anderen Objekten oder bei Kollisionen, um eine eindeutige Erkennung zu gewährleisten.

Zustand	Greifer offen kein Kontakt	Erster Kontakt ohne Kraft	Greifen Kontakt mit Kraft
Schematische Darstellung			
Kraftwert des Sensors	$F_{\text{Sensor}} = 0 \text{ N}$	$F_{\text{Sensor}} = 0 \text{ N}$	$F_{\text{Sensor}} > 0 \text{ N}$

Abbildung 6.2: Endeffektor mit Sensorik zur Zustandserfassung (schematisch, Draufsicht)

Durch einen zusätzlichen Sensor zur Erfassung der tatsächlichen Greifkraft kann genau detektiert werden, wann ein Objekt zwischen den Greifbacken geklemmt wird (Abbildung 6.3, Zeitpunkt t_1), da zuvor beim Start des Greifvorgangs eine gewisse Leerstrecke von den Greifbacken überwunden werden muss, bevor diese das Objekt berühren (Abbildung 6.3, Zeitpunkt t_0). Wenn ein Objekt stabil gegriffen ist, bleiben Greifkraft und Greifweg konstant (Abbildung 6.3, Zeitpunkt t_2). Erst bei einer Zustandsänderung, beispielsweise wenn das Objekt unbeabsichtigt aus dem Greifer herausgleiten würde, wird ein erneutes Signal an den Operator gesendet.

Zur Unterscheidung der Krafrückmeldung von derjenigen bei Kollision des Greifers mit anderen Objekten wird das Greifen durch eine Vibration angezeigt. Da dem Operator die Information „gegriffen“ oder „offen“ über den Greifer genügt, müssen nur zwei Zustände angezeigt werden, wofür diese Art der Rückmeldung ausreichend ist.

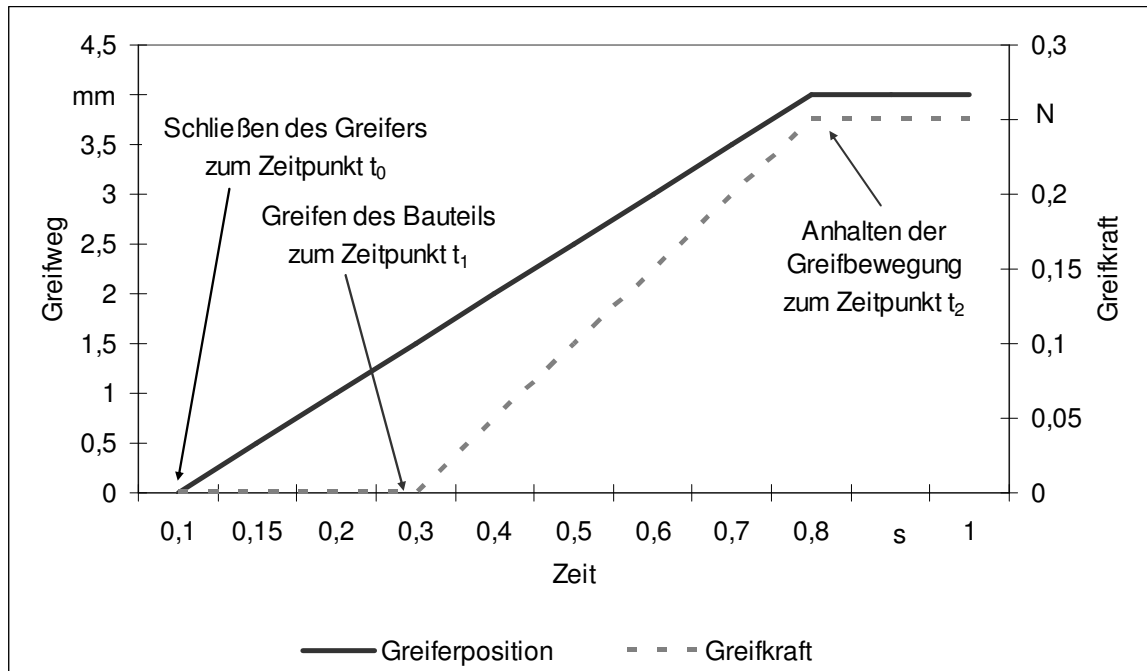


Abbildung 6.3: Verlauf von Greifweg und Greifkraft bei einem pick-Vorgang

6.1.2 Krafterückkopplung bei unebenen Oberflächen

Zur Erleichterung der Einschätzung von Abständen ist bei Montagevorgängen für sensible Produkte auch die Erfassung der Oberflächentopologie von Mikroprodukten eine Möglichkeit zur Verhinderung von Kollisionen. Durch eine Abstandsmessung über die Oberfläche kann eine Kollision vermieden und ein kontrolliertes Aufsetzen von Endeffektoren und Werkzeugen sichergestellt werden.

Exemplarisch wurde dies mit einem Lasertriangulationssensor am Versuchsaufbau umgesetzt. Die Oberflächentopologie eines Substrats wurde vermessen und die Ergebnisse konnten zur Berechnung des Fahrwegs bis zum Kontakt herangezogen werden. Steuert der Operator über diese Werte hinaus weiterhin in das Substrat hinein, kann die Bewegung zur Verhinderung einer Beschädigung des Effektors oder des Objekts unterbrochen werden. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich, wenn die Objektoberflächen verschiedene Eigenschaften aufweisen. Durch die Sensorik können die Oberflächen unterschieden und an den Operator Signale ausgegeben werden.

Für die Mikromontage kann dieses Prinzip zum Auffinden von Montagepositionen verwendet werden. In Abbildung 6.4 wurde exemplarisch eine Platine mit 15 μm hohen Leiterbahnen vermessen. Die Krümmung der Kurve spiegelt die Krümmung der Platine wider, welche eine Höhendifferenz um 34 μm aufweist. Die Ausschläge im Höhenprofil des Werkstücks stellen die Erhebungen durch die 15 μm hohen Lei-

terbahnen dar. Steuert ein Operator einen Effektor mit Abstandssensor über die Oberfläche, kann das Sensorsignal in eine haptische Rückmeldung für jede Erhebung umgewandelt werden. Die visuelle Aufmerksamkeitsbelastung des Operators wird somit reduziert.

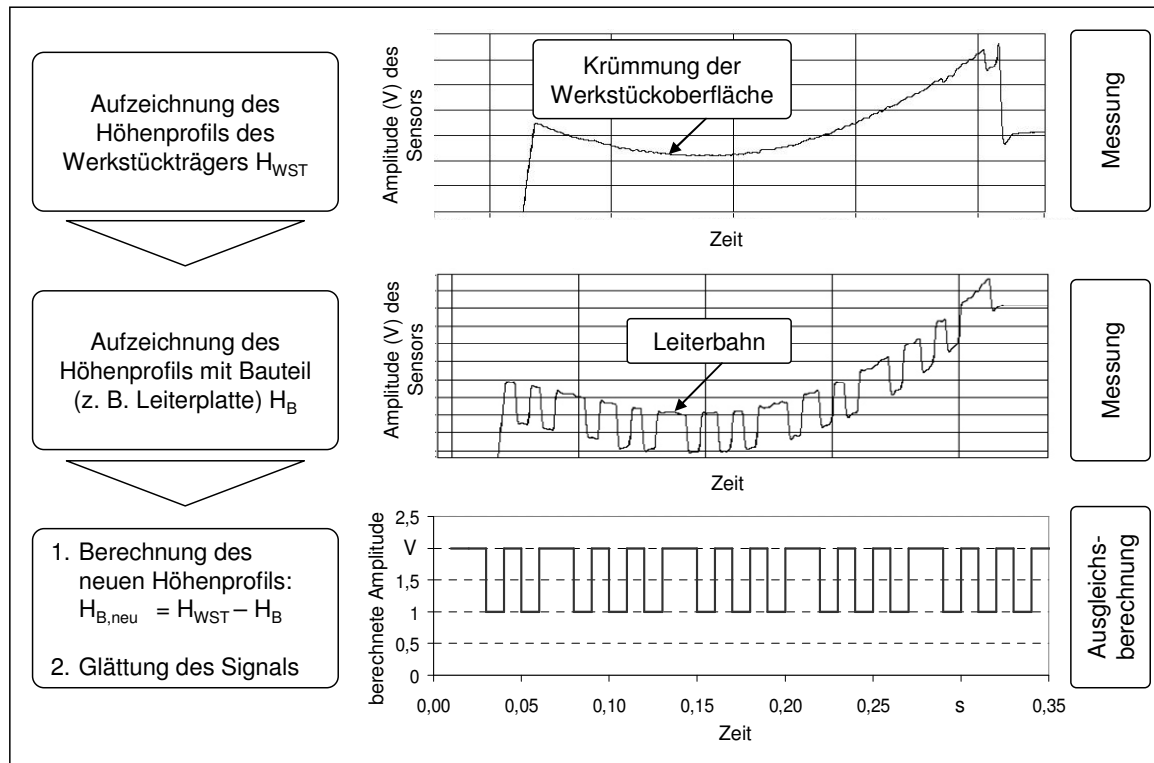


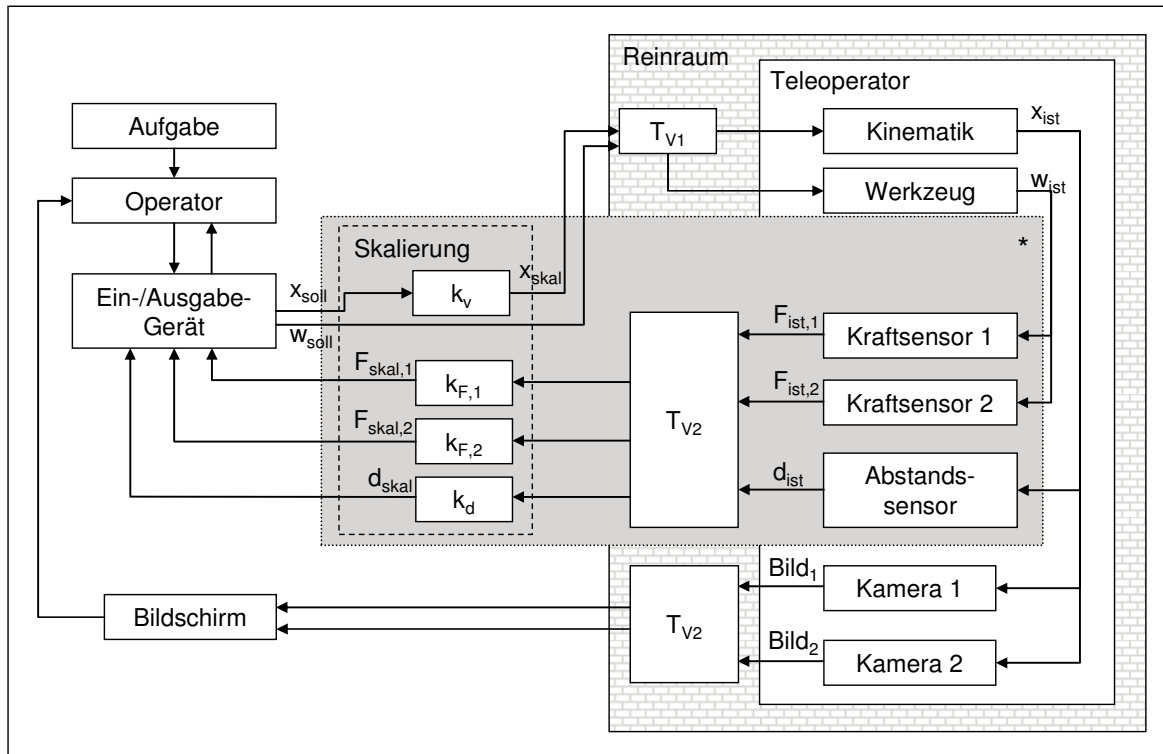
Abbildung 6.4: Vermessung der Oberfläche einer Platine

Die Integration der Abstands- bzw. Oberflächenvermessung und eines Sensors zur Messung der Greifkräfte sowie die zugehörigen Rückmeldungen an den Operator führen zu einer Erweiterung des TPTA-Systems. Dies ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

6.1.3 Vorgehen zur Planung telepräsent gesteuerter Montageanlagen

Zur Analyse, wie ein Telepräsenz- oder Teleaktionssystem für eine Produktionsaufgabe gestaltet sein muss, werden die Produktionsaufgabe und die -bedingungen betrachtet. Die Entscheidung für den Einsatz der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie muss zuvor durch den in Abschnitt 3.2 entwickelten Kriterienkatalog herbeigeführt werden. Die Planung und Kozeptionierung des Montagesystems wird durch die Anforderungen des zu montierenden Produktes und die produktionstechnischen Anforderungen bestimmt. Im Anschluss wird eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit und damit der Zweckmäßigkeit durchgeführt.

6.1 Technische Gestaltungsaspekte



* Neue oder erweiterte Funktionen:

$F_{ist,1}$: gemessene Kraft am Werkzeug in z-Richtung

$F_{ist,2}$: gemessene Kraft an der Greifbacke des Werkzeugs

d_{ist} : gemessener Abstand

$F_{skal,1}$: skalierte Kraft des Werkzeugs

$F_{skal,2}$: skalierte Kraft der Greifbacke

d_{skal} : skaliertes Abstand

k_d : Skalierungsfaktor für den Abstand und für die Position

k_F : Skalierungsfaktor für die Kraft

Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des verbesserten TPTA-Systems für die Präzisions- und die Mikromontage (vgl. Bezeichnungen auch mit Abbildung 4.7)

Abbildung 6.6 verdeutlicht das Vorgehen von der Entscheidung für die Teleoperationstechnologie über die Konzeption des Teleoperationssystems bis zur Bewertung:

- Entscheidungsebene:

In Abschnitt 3.2 wurde je ein Kriterienkatalog zusammengestellt, anhand dessen die Eignung der Teleaktions- oder Telepräsenztechnologie für die Ausführung einer Aufgabe bewertet werden kann.

- Analyseebene:

Falls die Entscheidung zugunsten eines Teleoperationssystems ausfällt, muss im nächsten Schritt die Analyse des Prozesses hinsichtlich der folgenden Konstruktion vorgenommen werden. Hierbei bedarf es der Anforderungsklä- rung des Produkts und der für die Montage zu verwendenden Prozesse. Dies

sind beispielsweise die Montagereihenfolge, die benötigten Freiheitsgrade und die Eigenschaften der einzelnen Bauteile sowie die Analyse der Produktionsbedingungen, insbesondere der auf die Wirtschaftlichkeit bezogenen Größen wie Stückzahl oder Qualität.

- **Konzeptionsebene:**

Nach der Analyse wird das TPTA-System gemäß den dabei ermittelten Anforderungen konzipiert. Methoden aus der Produktentwicklung hierfür sind morphologische Kästen zur Lösungsauswahl und paarweise oder gewichtete Vergleiche von Kriterien und Komponenten.

- **Bewertungsebene:**

Das in den vorhergehenden Schritten erstellte Montagekonzept wird abschließend nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Hierfür werden je nach Anwendungsfall Kriterien und Kennzahlen definiert. Die Bewertung erfolgt durch die Erstellung einer Prognose für das konzipierte System und dessen Vergleich mit den geforderten Kriterien und Kenngrößen.

Die Bewertung und die Konzeption können in einem iterativen Prozess vorgenommen werden (vgl. auch das sogenannte Münchener Vorgehensmodell zur Produktentwicklung, MVM, LINDEMANN 2007).

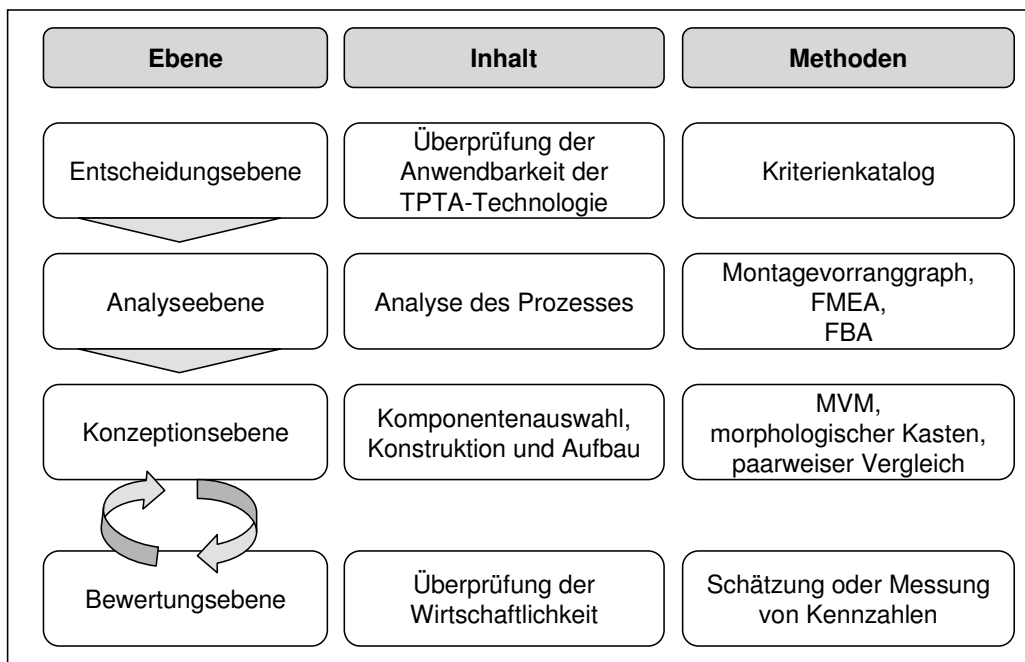


Abbildung 6.6: Vorgehen zur Bewertung der Telepräsenz- und Teleaktionstechnologie als Lösung für die Ausführung einer Aufgabe

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

6.2.1 Ressourcenverbrauch

Der effiziente Umgang mit Ressourcen ist ein wichtiger Zukunftstrend, dem Bevölkerungswachstum und Globalisierung zugrunde liegen. Für die Produktion ist die Ressourceneffizienz daher von besonderer Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit. In diesem Kapitel soll deshalb ein telepräsenes Montagesystem im Hinblick auf seine benötigten Ressourcen mit einem manuellen und einem teil- und einem vollautomatisierten alternativen System verglichen werden. Hierfür werden folgende Ressourcen betrachtet:

- Produktionszeit
- Produktionsmittel
- Energie
- Mensch

Tabelle 6.1 fasst diese Ressourcen und deren Beeinflussung durch Teleoperationstechniken in einer Gegenüberstellung zu bisherigen manuellen Arbeitsplätzen durch einen jeweils paarweisen Vergleich zusammen.

Abbildung 6.7 zeigt grafisch den Vergleich zwischen einem manuellen und einem teleoperierten Produktionssystem (resultierend aus den Bewertungen von Tabelle 6.1) und bezieht darüber hinaus die teilautomatisierte und die automatisierte Produktion mit ein.

Hierbei wurden in einer Punktbewertung die einzelnen Produktionssysteme für jedes Kriterium jeweils mit 0, 25, 50, 75 oder 100 Bewertungseinheiten (BE) belegt. 100 BE wurden dann vergeben, wenn die Ressource bei einer Produktionsart im Vergleich zu den übrigen den höchsten Ressourcenverbrauch hatte. Davon ausgehend wurden die übrigen im direkten Vergleich mit dem schlechtesten und dem besten System bewertet.

Das teleoperierte System erhält bei einer Summation die beste Bewertung mit 400 BE. Danach folgen das teil- und das vollautomatisierte Produktionssystem (450 BE und 475 BE), sowie das manuelle System mit der höchsten Bewertung (625 BE) und damit dem höchsten Ressourcenverbrauch, resultierend aus der großen benötigten Reinraumfläche und deren Energieverbrauch sowie der hohen ergonomischen Beanspruchung des Menschen. Gemäß dieser Bewertung stellt der Einsatz eines Telepräsenzsystems für die Präzisions- oder Mikromontage eine Verbesserung gegenüber bisherigen manuellen oder automatisierten Lösungen dar.

Ressource		Beeinflussung durch Teleoperation im Vergleich zur manuellen Ausführung	Effizienz der Teleoperation im Vergleich zur manuellen Ausführung	Gesamteffizienz: Teleoperation im Vergleich zur manuellen Tätigkeit
Zeit	Bearbeitungszeit pro Produkt	→	→	→
	Rüstzeiten	→	→	
Produktionsmittel	Größe des Reinraums	↓	↑	↑
	Reinraumzubehör (z. B. Schutzkleidung)	↓	↑	
	Ausstattung am Arbeitsplatz	↑	↓	
Energie	Reinraum	↓	↑	↑
	Produktionsanlage	→	↘	
Mensch	Anzahl der benötigten Werker	→	→	↑
	Ergonomie	↑	↑	
	Einsatzmöglichkeit leistungsgewandelter Mitarbeiter	↑	↑	

Legende: → unverändert gleichbleibend
 ↑ steigend
 ↓ fallend

Tabelle 6.1: Einfluss der Teleoperation auf Produktionsressourcen im Vergleich zur manuellen Präzisionsmontage

Die Ressource Zeit wurde bei der Bewertung der Ressourceneffizienz in die Bearbeitungszeit pro Produkt und in die Rüstzeiten des Systems bei Produktwechseln unterteilt. Die Bearbeitungszeit bleibt tendenziell durch den Einsatz von Telepräsenzsystemen gleich oder erhöht sich durch die Trennung von Werker und Produktionsort leicht im Vergleich zur direkten manuellen Arbeit (vgl. Abschnitt 3.2). Eine automatisierte Produktion weist eine um ein Vielfaches niedrigere Taktzeit als die manuelle oder telepräsenste Produktion auf. Jedoch senkt ein Teleoperationssystem anfallende Rüstzeiten aufgrund der vom Menschen eingebrachten Flexibilität gegenüber einem automatisierten System, bei welchem neben Werkzeugwechseln auch Umprogrammierungen anfallen.

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

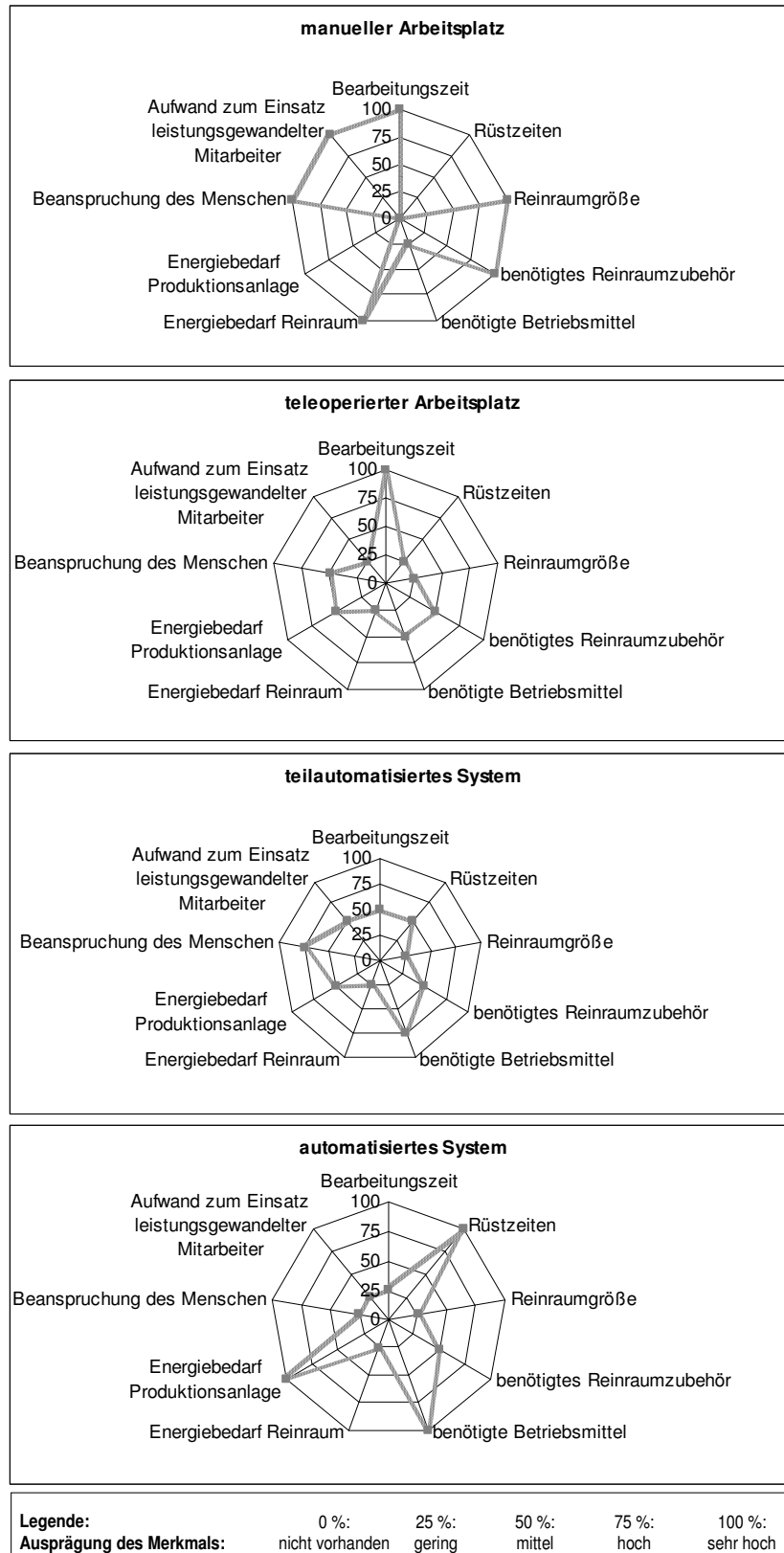


Abbildung 6.7: Ressourcenverbrauch im manuellen, im teleoperierten, im teil- und im vollautomatisierten Montagesystem

Bei der Betrachtung der Produktionsmittel im Vergleich mit einem herkömmlichen manuellen Arbeitsplatz fällt bei Teleoperationssystemen insbesondere die Verkleinerung des Reinraums ins Gewicht, da keine manuellen Arbeitsplätze bereitgestellt werden müssen. Verglichen mit einem automatisierten System, welches ebenfalls in einer lokalen Reinraumumgebung untergebracht werden kann, bleibt der Platzbedarf ungefähr gleich. Des Weiteren entfallen Kleidung und Reinigungsmittel für die manuelle Arbeit in reiner Umgebung. Die technische Ausstattung des Arbeitsplatzes liegt bei einem Teleoperationssystem deutlich über einem manuellen Standard-Arbeitsplatz. Sie ist jedoch weniger umfangreich als für ein vollautomatisiertes System, da der Mensch Funktionalitäten übernimmt, welche andernfalls einer aufwändigen Automatisierung unterlägen.

Der Energiebedarf der Produktionssysteme hängt maßgeblich von dem des Reinraums ab. Da ein Teleoperationssystem nur einen kleinen Reinraum um den Teleoperator benötigt, ist hier die Energiebilanz um ein Vielfaches besser als bei manueller Arbeit im Reinraum. Weil die Teleoperationsanlage mehr technische Ausstattung benötigt, ist der Energieverbrauch für den Arbeitsplatz (ohne Reinraum) hingegen höher anzusiedeln als am manuellen Arbeitsplatz.

Die Ergonomie des Arbeitsplatzes ist ein wichtiger Faktor, welcher die Leistung und die Gesundheit des Menschen beeinflusst. Da in Zukunft verstärkt mit einer leistungsgewandelten und alternden Belegschaft umgegangen werden muss (ZÄH et al. 2005), ist auch die Integrationsfähigkeit leistungsgewandelter Mitarbeiter ein Bewertungskriterium. Die Arbeitsplatzergonomie und damit zusammenhängend die Gesundheit des Menschen kann sowohl durch eine telepräsenz als auch durch eine (teil-)automatisierte Aufgabenausführung im Vergleich zur manuellen Tätigkeit für Präzisionsaufgaben gesteigert werden. Hierdurch und durch die Implementierung spezieller unterstützender Funktionen am Operatorarbeitsplatz kann auch die Möglichkeit zum Einsatz leistungsgewandelter Mitarbeiter verbessert werden. Diese Funktionen können die Skalierung von Bewegungen, die Glättung von Zittern oder eine vergrößerte Visualisierung beinhalten.

6.2.2 Zuverlässigkeit

Dieser Abschnitt erweitert die bisherigen Fragestellungen zur industriellen Einsetzbarkeit um den Begriff der Zuverlässigkeit. Definiert wurde die Zuverlässigkeit zunächst als „die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter angegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt“ (MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM GMBH 1977, BERTSCHE & LECHNER 1990). Da dieser Definition eine nähere Erläuterung des Systemausfalls fehlte, wurde die allgemeine Definition verändert. Die Zuverlässigkeit ist gemäß der DIN 40041 (1990) die „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während

oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen“.

Der Ersatz von rein manueller Arbeit durch ein TPTA-System bringt dann Vorteile, wenn die Fehlerquote hierdurch gesenkt werden kann. Dies drückt sich in der Zuverlässigkeit aus, wobei zwischen der Zuverlässigkeit des Menschen und derjenigen des technischen Systems unterschieden wird.

6.2.2.1 Allgemeine Berechnung der Zuverlässigkeit

Zur Berechnung der Zuverlässigkeit wird das Gesamtsystem zunächst in Teilsysteme, z. B. einzelne Teilaufgaben oder -funktionen, mit bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeiten zerlegt und die Zusammenhänge zwischen diesen in einem Zuverlässigkeitsnetzwerk abgebildet. Der Zusammenhang zwischen den Teilfunktionen ist dabei seriell, parallel oder eine Kombination hieraus (DHILLON 1988, S. 19).

Für eine Serienkonfiguration gilt für die Gesamtzuverlässigkeit R_s :

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (12)$$

mit R_i : Zuverlässigkeit einer Teilfunktion
 n : Anzahl der in Serie geschalteten Teilfunktionen.

Für eine Parallelschaltung gilt für die Gesamtzuverlässigkeit R_p :

$$R_p = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - R_j) \quad (13)$$

mit R_j : Zuverlässigkeit einer Teilfunktion
 m : Anzahl der parallel geschalteten Teilfunktionen.

Liegt eine Kombination aus einer Parallelschaltung mit jeweils mehreren seriellen Teilfunktionen pro Parallelzweig vor, gilt die Zuverlässigkeit R_{ps} :

$$R_{ps} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^n R_{i,j}) \quad (14)$$

mit $R_{i,j}$: Zuverlässigkeit einer Teilfunktion.

Bei Fertigungs- oder Montageaufgaben wird in der Regel eine Baugruppe in seriell aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten produziert und dabei jede Tätigkeit mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit R_i ausgeführt. In Abbildung 6.8 (links) ist exemplarisch für eine Serienschaltung eine Aufgabe zum Kleben eines Bauteils aufgeführt. Eine Parallelschaltung der Montagetätigkeiten liegt beispielsweise vor, wenn redundante Baugruppen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit eines Produkts montiert

werden (in Abbildung 6.8 rechts gekoppelt mit den seriellen Unterkategorien zur Montage der Baugruppen). Dieses Prinzip kommt häufig in sicherheitskritischen Bereichen zum Einsatz, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt.

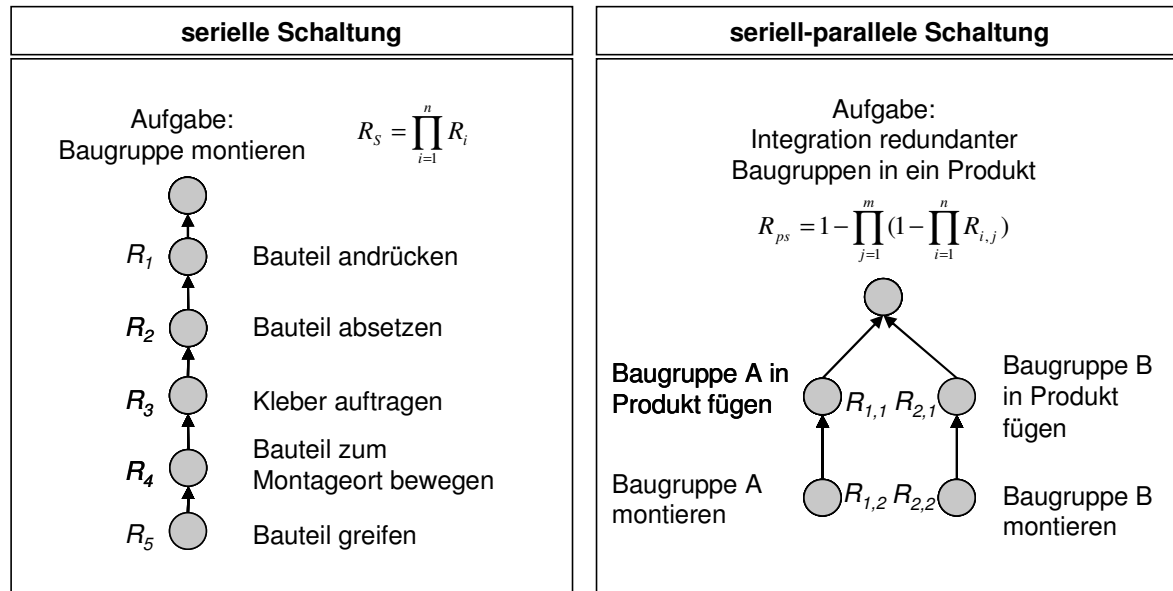


Abbildung 6.8: Beispiele für Zuverlässigkeitsnetzwerke bei der Montage

6.2.2.2 Zuverlässigkeit des Menschen

Die menschliche Zuverlässigkeit wird als die Fähigkeit definiert, „eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen“ (BUBB 1994). Da der Mensch in allen technischen Systemen mindestens Wartungstätigkeiten oder bei einem vorliegenden Notfall manuelle Bedienfunktionen ausführt, wird seit den 1960er Jahren an Modellen geforscht, welche die Zuverlässigkeit des Menschen in die Betrachtung eines technischen Gesamtsystems einbeziehen.

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit eines Systems besteht das Problem, dass zuerst aufwändig Daten über die Fehlerhäufigkeiten erhoben werden müssen. Deshalb wird seit den 1960er Jahren an verschiedenen Ansätzen zur Bildung von Datenbanken gearbeitet, aus denen Richtwerte für Teilfunktionen entnommen werden können, so dass die Systemzuverlässigkeit schnell berechnet werden kann. Einen Überblick über die Entwicklung verschiedener Ansätze und Systeme zur Bestimmung der menschlichen Zuverlässigkeit geben STREIFINGER (1983), TAYLOR-ADAMS & KIRWAN (1995), KIRWAN (1996) und GROZDANOVIC & STOJILJKOVIC (2006). In den Arbeiten werden außerdem für ausgewählte Tätigkeiten Fehlerwahrscheinlichkeiten des Menschen angegeben. In Tabelle 6.2 ist eine für die Montage relevante Auswahl daraus zusammengestellt.

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

Nr.	Tätigkeitsbeschreibung	menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit (human error probability HEP)
1	komplizierte nicht routinemäßige Aufgabe unter Stress	0,3
2	nicht routinemäßige Aufgabe mit anderen gleichzeitig zu erledigenden Pflichten	0,1
3	kein Entdecken eines Fehlers durch den Kontrolleur	0,1
4	Erinnerungsfähigkeit des Menschen bei digitalen Displays	0,03
5	generelle Fehlerrate bei mündlicher Kommunikation	0,03
6	Fehler bei einer mit Sorgfalt auszuführenden Routineaufgabe	0,01
7	Fehler bei einfacher Routineaufgabe	0,001
8	Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit bei einem Operator, welcher eine Tätigkeit ausführt	0,0001
9	Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit bei einem Team von Operatoren, welche eine Aufgabe gemeinsam ausführen	0,00001

Tabelle 6.2: Fehlerwahrscheinlichkeiten des Menschen (Quellen: KIRWAN 1996, GROZDANOVIC & STOJILJKOVIC 2006) bei verschiedenen Tätigkeiten, welche in Produktionsumgebungen auftreten

6.2.2.3 Zuverlässigkeit von TPTA-Systemen

Die im vorherigen Abschnitt aufgeführten menschlichen Fehlerraten (engl. human error probability: HEP) beziehen sich auf Aufgaben, bei denen der Mensch nicht weiter unterstützt wird. Führt das Personal eine Aufgabe nicht manuell, sondern durch ein TPTA-System aus, so können die menschlichen Wahrnehmungen und Leistungen beeinflusst und verbessert werden. Möglichkeiten für eine solche Unterstützung sind:

Teleaktion:

- Begrenzungen hinterlegt in den Steuerungsfunktionalitäten, beispielsweise das Setzen von Schranken bei auftretenden Kräften zur Vermeidung von Bauteilerstörungen oder die Definition von Arbeitsraumgrenzen zur Verhinderung von Kollisionen mit anderen Bauteilen

Telepräsenz:

- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch verbesserte Sinneswahrnehmungen (Skalierung von Signalen)
- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Substitution von Sinneswahrnehmungen (cross-modale Darstellung von Signalen, beispielsweise durch Umwandlung eines Abstands in ein akustisches Signal)

Um eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Aufgabenausführung zu erreichen, gibt es zwei allgemeine Strategien, welche auf die soeben genannten Möglichkeiten in TPTA-Systemen angewendet werden können:

1. Reduktion der Fehlerwahrscheinlichkeit (HEP) bei einzelnen Teilprozessen durch Erhöhung der menschlichen Zuverlässigkeit bei der Aufgabenausführung
2. Reduktion der Zahl der Teilprozesse durch Aufgabenintegration bzw. Teilautomatisierung

Zu 1.: Die in Tabelle 6.2 genannten Fehlerwahrscheinlichkeiten Nr. 1 und 2 (nicht routinemäßige Aufgaben, $HEP = 0,3$ bzw. $0,1$) lassen sich durch TPTA-Technologien in einfachere Aufgaben mit höherer Zuverlässigkeit überführen, weil der Mensch bei komplexen Tätigkeiten vom Telepräsenzsystem unterstützt wird und das Aufgabenniveau somit auf das einer einfachen Aufgabe gesenkt werden kann, vgl. Nr. 6 (sorgfältig auszuführende Routineaufgabe) mit $HEP = 0,01$ oder Nr. 7 (einfache Routineaufgabe) mit $HEP = 0,001$. Für die Durchführung einer manuellen pick-and-place-Aufgabe mit Klebstoffauftrag (vgl. Aufgabenablauf in Abbildung 6.8 links, serielle Aufgabenbearbeitung) ist in Tabelle 6.3 die Zuverlässigkeit der Aufgabenausführung des Menschen exemplarisch berechnet. Wenn die Zuverlässigkeit der Teilfunktionen durch Telepräsenztechnologie um 20 % erhöht werden kann, so verbessert sich die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bereits um 10,7 %. Bei einer Reduktion der menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeit um 50 % würde sich die Gesamtzuverlässigkeit sogar um 24,6 % erhöhen. Folglich ist durch Teleoperation ein großes Potential vorhanden, um die Fehlerwahrscheinlichkeit des Menschen im Montageprozess zu reduzieren.

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

Ereignis	Bauteil greifen	zum Montageort bewegen	Kleber auftragen	Bauteil absetzen	Bauteil andrücken
Bezug zu Tabelle 4.5	Nr. 2	Nr. 6	Nr. 2	Nr. 2	Nr. 2
Wahrscheinlichkeit eines Fehlereignisses	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1
Zuverlässigkeit eines Einzelereignisses	0,9	0,99	0,9	0,9	0,9
Zuverlässigkeit des Gesamtsystems	0,650				
Wahrscheinlichkeit eines Fehlereignisses bei Verbesserung um 10 %	0,09	0,009	0,09	0,09	0,09
Zuverlässigkeit eines Einzelereignisses	0,91	0,991	0,91	0,91	0,91
Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei Verbesserung der Zuverlässigkeit pro Einzel-funktion um 10 %	0,680				
Wahrscheinlichkeit eines Fehlereignisses bei Verbesserung um 20 %	0,08	0,008	0,08	0,08	0,08
Zuverlässigkeit eines Einzelereignisses	0,92	0,992	0,92	0,92	0,92
Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei Verbesserung der Zuverlässigkeit pro Einzel-funktion um 20 %	0,711				
Wahrscheinlichkeit eines Fehlereignisses bei Verbesserung um 50 %	0,05	0,005	0,05	0,05	0,05
Zuverlässigkeit eines Einzelereignisses	0,95	0,995	0,95	0,95	0,95
Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei Verbesserung der Zuverlässigkeit pro Einzel-funktion um 50 %	0,810				

Tabelle 6.3 Zuverlässigkeiten von Teilschritten und resultierende Gesamtzuverlässigkeiten bei einem Beispielprozess

Zu 2.: Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems besteht neben der Methode, die Zuverlässigkeit der Teilfunktionen zu erhöhen, ebenfalls die Möglichkeit, durch Aufgabenintegration die Anzahl der Teilfunktionen und damit die Anzahl der Fehlerquellen zu reduzieren. Auch hierfür bietet die Teleaktions- und Telepräsenztechnologie Ansätze, denn durch die Fernsteuerung können Standard-Aufgaben teilautomatisiert werden, so dass der menschliche Operator nur noch die Teilfunktionen mit Neuheitsgehalt oder schwer automatisierbarem Inhalt übernimmt.

Abbildung 6.9 zeigt die Zuverlässigkeit eines aus mehreren Teilfunktionen bestehenden Gesamtsystems in Abhängigkeit von deren Einzel-Zuverlässigkeiten. Es wurde angenommen, dass alle Teilfunktionen dieselbe Zuverlässigkeit besitzen. Wird die Anzahl der Teilfunktionen durch Aufgabenintegration reduziert, wird eine Erhöhung der Gesamtzuverlässigkeit erreicht. Auch eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der einzelnen Teilschritte führt zu einer Zuverlässigkeitserhöhung im Gesamtsystem. Welche Variante umgesetzt werden kann bzw. die höhere Gesamtzuverlässigkeit erzielt, muss im Einzelfall abgeschätzt werden.

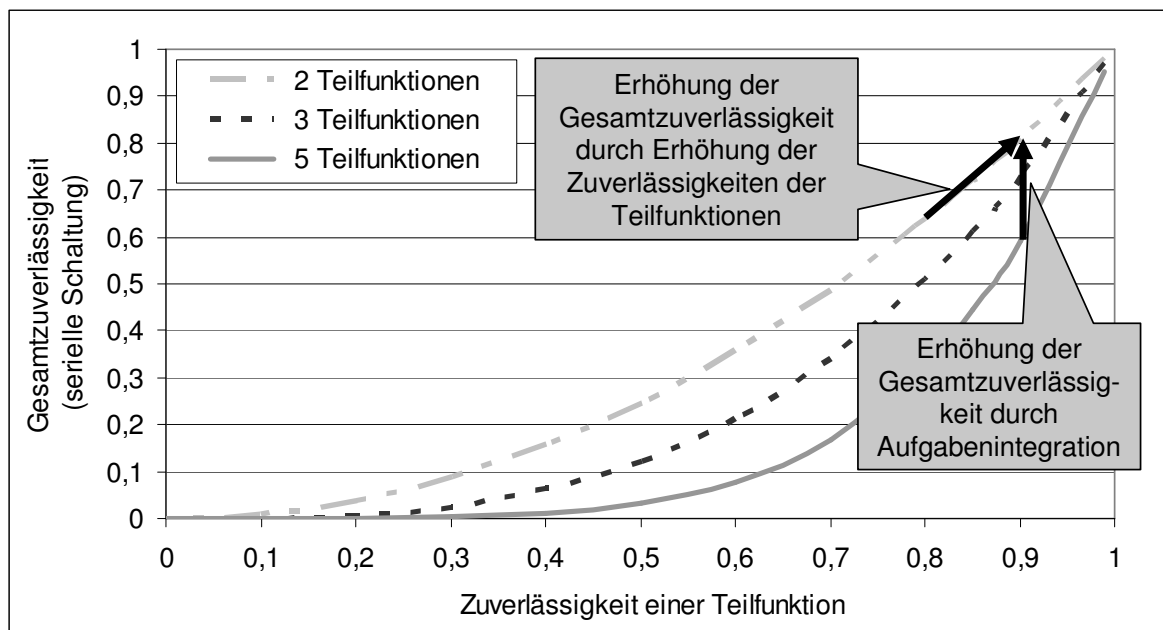


Abbildung 6.9: Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Teleoperation bzw. die damit verbundene Erhöhung der Zuverlässigkeit einer Teilfunktion

Neben der hier diskutierten menschlichen Zuverlässigkeit muss bei der Nutzung von TPTA-Systemen auch die Zuverlässigkeit des technischen TPTA-Systems mit betrachtet werden. Jedoch liegen die Zuverlässigkeiten für technische Systeme im industriellen Einsatz in der Regel bei $R > 0,95$, häufig gilt $R > 0,99$ (STANNEY et al.

1998, S. 22), ihre Fehlerwahrscheinlichkeit liegt demnach bei $HEP < 0,05$. Der Mensch erzielt diese Leistungen nur im Routinebereich.

6.2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

6.2.3.1 Investitionskosten

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Teleoperationssystemen werden zunächst exemplarisch die Investitionskosten für vier unterschiedlich ausgestattete Teleoperationssysteme kalkuliert. Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5 zeigen die berechneten Investitionskosten für Teleaktions- und Telepräsenzsysteme, jeweils in einer günstigen Low-Cost-Variante und einer kostenintensiven und gut ausgestatteten High-Cost-Alternative. Jedes System besteht aus einem Operator-Arbeitsplatz und einem Teleoperator. Dazu kommen Kosten für die Systementwicklung, worunter sowohl der Aufbau als auch die Programmierung der Steuerungssoftware fallen. Ein gut ausgestattetes Telepräsenzsystem ist die teuerste der vier Varianten, da angenommen wird, dass es neben teuren Komponenten auch die höchsten Kosten für Aufbau und Programmierung verursacht (zum Kostensatz für Aufbau und Programmierung vgl. auch WERNER 2008). Am günstigsten ist erwartungsgemäß ein Low-Cost-Teleaktionssystem, da bei diesen ein nur mit Basis-Funktionen ausgestatteter Operatorarbeitsplatz zum Einsatz kommt und am Teleoperator Sensorik für Rückmeldungen an den Operator entfällt. Da in Abschnitt 5.6 die Haptik als positiver Einflussfaktor auf die menschliche Leistung in einem Telepräsenzsystem identifiziert wurde, werden in den weiteren Betrachtungen nur die mit Krafrückkopplung ausgestatteten Telepräsenzsysteme jeweils als Low-Cost- und als High-Cost-Varianten berücksichtigt.

6.2.3.2 Maschinenstundensatz

Nach der Schätzung der Investitionskosten für verschiedene Teleoperationssysteme werden die beiden Telepräsenzsysteme mit den Kosten bei der manuellen und der automatisierten Montage verglichen. Hierfür wird der Maschinenstundensatz für die genannten Systeme berechnet (Tabelle 6.6).

Die Reinraumkosten werden dabei auf Basis von Erfahrungswerten kalkuliert. Beim manuellen Montageszenario arbeitet der Mensch im Reinraum, wodurch zusätzliche Kosten für Reinraumbekleidung anfallen. Dies wird in einem erhöhten Betriebskostensatz für den Reinraum berücksichtigt. Bezüglich der Instandhaltungskosten wird bei manueller Montage ein geringerer Wert veranschlagt, da die Betriebsmittel vergleichsweise einfach gestaltet sind und deshalb von einem reduzierten Aufwand für die Instandhaltung ausgegangen werden kann. Hinsichtlich des Maschinenstundensatzes ergibt sich, dass ein manuelles Montagesystem erwartungsgemäß am kosten-

günstigsten ist. Ein hochautomatisiertes System hat im Vergleich einen um den Faktor 16 höheren Maschinenstundensatz, die beiden Telepräsenzsysteme weisen einen drei- bis fünffachen Satz auf.

Szenario		Teleaktion			
		Low-Cost-Ansatz	Kosten [€]	High-Cost-Ansatz	Kosten [€]
Operator	Visualisierung	TFT-Monitor	200	Head Mounted Display	20.000
	Ein-/Ausgabe-Geräte	Joystick ohne Force Feedback	100	Data Glove mit Gyrotracker	2.500
	Akustik	keine	0	keine	0
	Arbeitsplatz Grundausstattung	Schreibtisch, Bürostuhl	1.000	Schreibtisch, Bürostuhl	1.000
Teleoperator	Kinematik	Roboter	20.000	Roboter	20.000
	Sensorik	keine zusätzlich		keine zusätzlich	
	Visualisierung	eine Kamera	500	2 Kameras aus versch. Perspektiven	1.000
	Endeffektoren	ohne Zustandsüberwachung	1.000	ohne Zustandsüberwachung	1.000
Kommunikationskanal		echtzeitfähiges Betriebssystem	3.000	echtzeitfähiges Betriebssystem	3.000
Summe Gerätekosten		Hardware und käufliche Software-Programme	25.800	Hardware und käufliche Software-Programme	48.500
Systementwicklung		Aufschlag 30 % der Gerätekosten	7.740	Aufschlag 30 % der Gerätekosten	14.550
Kosten [€]		33.540		63.050	

Tabelle 6.4: Investitionskostenschätzung für Teleaktionssysteme

Die Berechnung der Rüst- bzw. Anlernkosten wird exemplarisch gemäß Tabelle 6.7 vorgenommen. Die verwendeten Werte basieren auf Kosten- und Zeitschätzungen für das jeweilige Montagesystem. Hierfür wurden folgende Annahmen zur Berechnung herangezogen:

- Die Anlernzeiten für neue Aufgaben sind bei manuellen Systemen länger als bei telepräsenten Systemen, da letztgenannte eine intuitivere Arbeitsumgebung bereitstellen und das zu montierende Produkt leichter richtig montiert werden kann.

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

- Bei einem automatisierten System ist die Umprogrammierung bzw. der Werkzeugwechsel für neue Lose aufwändig. Für alle Tätigkeiten, welche mit dem Umrüstvorgang verbunden sind (Logistik, Programmierung, Werkzeugbereitstellung und Einrichtung usw.), wird eine höhere Zeit als für den Lernvorgang bei telepräsenten Systemen veranschlagt.

Szenario		Telepräsenz			
		Low-Cost-Ansatz	Kosten [€]	High-Cost-Ansatz	Kosten [€]
Operator	Visualisierung	TFT-Monitor	200	Head Mounted Display	20.000
	Ein-/Ausgabe-Geräte	Joystick mit Force Feedback (2 DOF)	200	hochauflösendes haptisches Gerät (6 DOF), z.B. Phantom 1.5	20.000
	Akustik	Lautsprecher	100	Stereokopfhörer	200
	Arbeitsplatz Grundausstattung	Schreibtisch, Bürostuhl	1.000	Schreibtisch, Bürostuhl	1.000
Teleoperator	Kinematik	Roboter	20.000	Roboter	20.000
	Sensorik	Sensoren zur Messung von Kräften, Abständen, etc.	5.000	Sensoren zur Messung von Kräften, Abständen, etc.	5.000
	Visualisierung	eine Kamera	500	2 Kameras aus versch. Perspektiven	1.000
	Endeffektoren	mit Zustandsüberwachung	1.800	mit Zustandsüberwachung	1.800
Kommunikationskanal		echtzeitfähiges Betriebssystem	3.000	echtzeitfähiges Betriebssystem	3.000
Summe Gerätekosten		Hardware und käufliche Software-Programme	31.800	Hardware und käufliche Software-Programme	72.000
Systementwicklung		Aufschlag 40 % der Gerätekosten	12.720	Aufschlag 40 % der Gerätekosten	28.800
Kosten [€]		44.520		103.800	

Tabelle 6.5: Investitionskostenschätzung für Telepräsenzsysteme

- Die Rüstkosten für Betriebsmittel sind bei einem automatisierten System wesentlich höher als bei manuellen oder telepräsenten Systemen, da bei diesen Systemen einfache und flexibel einsetzbare Werkzeuge verwendet werden, welche durch den intelligenten Gebrauch durch den Werker für eine Vielzahl

6 Technisch-wirtschaftliche Betrachtung

an Aufgaben ausreichend sind. Dies sind beispielsweise produktunspezifische Pinzetten oder Greifer, da der Mensch durch seine eingebrachte Intelligenz Greifer und Greiffläche am Produkt abstimmen kann.

Unter Berücksichtigung der genannten Annahmen kann vorausgesetzt werden, dass die Rüst- und Anlernkosten von manuellen und telepräsenten Systemen in derselben Größenordnung liegen, bei der automatisierten Produktion jedoch um den Faktor 5 höhere Kosten anfallen (Tabelle 6.7).

Kategorie	Formelzeichen/ Formel	Einheit	Manuelle Montage	Automatisierte Montage	Telepräsenz Low Cost	Telepräsenz High Cost
Wiederbeschaffungswert	W	€	10.000	300.000	44.520	103.800
Nutzungsdauer	T	a	5	5	5	5
Nutzungszeit (220 Tage/Jahr, 8 h/Tag)	T_n	h/a	1760	1760	1760	1760
kalkulatorischer Zinssatz	z	%	10	10	10	10
kalkulatorische Abschreibungen	$K_A = \frac{W}{T \cdot T_n}$	€/h	1,14	34,09	7,02	12,73
kalkulatorische Zinsen	$Z = \frac{W}{2} \cdot z \cdot \frac{1}{T_n}$	€/h	0,28	8,52	1,76	3,18
<i>Reinraumkosten</i>						
Fläche	A	m ²	20	2	2	2
Betriebskosten	K_B	€/hm ²	0,09	0,07	0,07	0,07
Gesamtkosten Betrieb Reinraum	$K_{\text{Reinraum}} = A \cdot K_B$	€/h	1,80	0,14	0,14	0,14
<i>Instandhaltung</i>						
Instandhaltungskostensatz	i	%	3	7	7	7
Instandhaltungskosten	$K_I = W \cdot i \cdot \frac{1}{T_n}$	€/h	0,17	11,93	2,46	4,45
Maschinenstundensatz	$M = K_A + Z + R_K + K_I$	€/h	3,39	54,69	8,21	18,99

Tabelle 6.6: Maschinenstundensätze für die manuelle Montage sowie für automatisierte und TPTA-Systeme im Vergleich

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

Kategorie	Formelzeichen/ Formel	Einheit	Manuelle Montage	Automatisierte Montage	Telepräsenz Low Cost	Telepräsenz High Cost
Rüst-/Anlernzeit	$T_{rüst}$	h/Los	2,00	2,00	1,00	1,00
Stundensatz Personal	$K_{Personal}$	€/h	40,00	40,00	40,00	40,00
Rüstkosten	$K_{rüst}$	€/Los	20,00	500,00	50,00	50,00
Reinraumkosten	$K_{Reinraum}$	€/h	1,80	0,14	0,14	0,14
Rüstkosten gesamt pro Los	$K_{rüst,Los}$	€/Los	103,60	580,24	90,12	90,12
Rüstkosten normiert	$K_{rüst,Los}$		1,00	5,60	0,87	0,87

Tabelle 6.7: Rüstkosten für die manuelle Montage sowie für automatisierte und Telepräsenzsysteme im Vergleich

6.2.3.3 Variable Kosten

Da der Maschinenstundensatz keine Personalkosten enthält, jedoch sowohl die manuelle als auch die teleoperierte Montage mit manuellen Tätigkeiten verbunden ist, werden als variable Kosten auch diese mit einbezogen. Berücksichtigt werden hierbei die Personalkosten pro Stunde, die Taktzeit sowie die Ausschuss- und Anlernkosten. Die nachfolgenden Diagramme zeigen den Einfluss dieser Variablen auf die Rentabilität der Montagesysteme.

Bei der vergleichweisen Berechnung der Kosten pro Los bei einer für alle Systeme gleichen Ausschussrate von 10 % sowie bei unterschiedlichen Ausschussraten, festgelegt gemäß Tabelle 6.2, wird ersichtlich, dass bei geringen Losgrößen bis hin zur Einzelteillfertigung das Low-Cost-Telepräsenzsystem bis zu einer Losgröße von 63 günstiger ist als die manuelle Montage (Abbildung 6.10). Im Vergleich zu einem High-Cost-Telepräsenzsystem ist die manuelle Montage ab Losgröße 20 kostengünstiger, wenn bei allen Systemen die gleiche Ausschussrate von 10 % und die gleiche Taktzeit angenommen werden. Dies resultiert aus dem niedrigeren Maschinenstundensatz des manuellen Montagesystems, welcher sich bei höheren Losgrößen gegenüber den steigenden Rüst- bzw. Anlernkosten positiv auswirkt. Bei manueller Montage wird durch die große feinmotorische Belastung eine längere Anlernzeit als bei der telepräsenten Montage kalkuliert, so dass die Rüst-/Anlernkosten um ca 30 % höher liegen, vgl. Tabelle 6.7. Vorausgesetzt wird, dass die manuelle Aus-

führung prinzipiell möglich ist und eine Trennung von Werker und Produktionsort kein obligatorisches Kriterium ist.

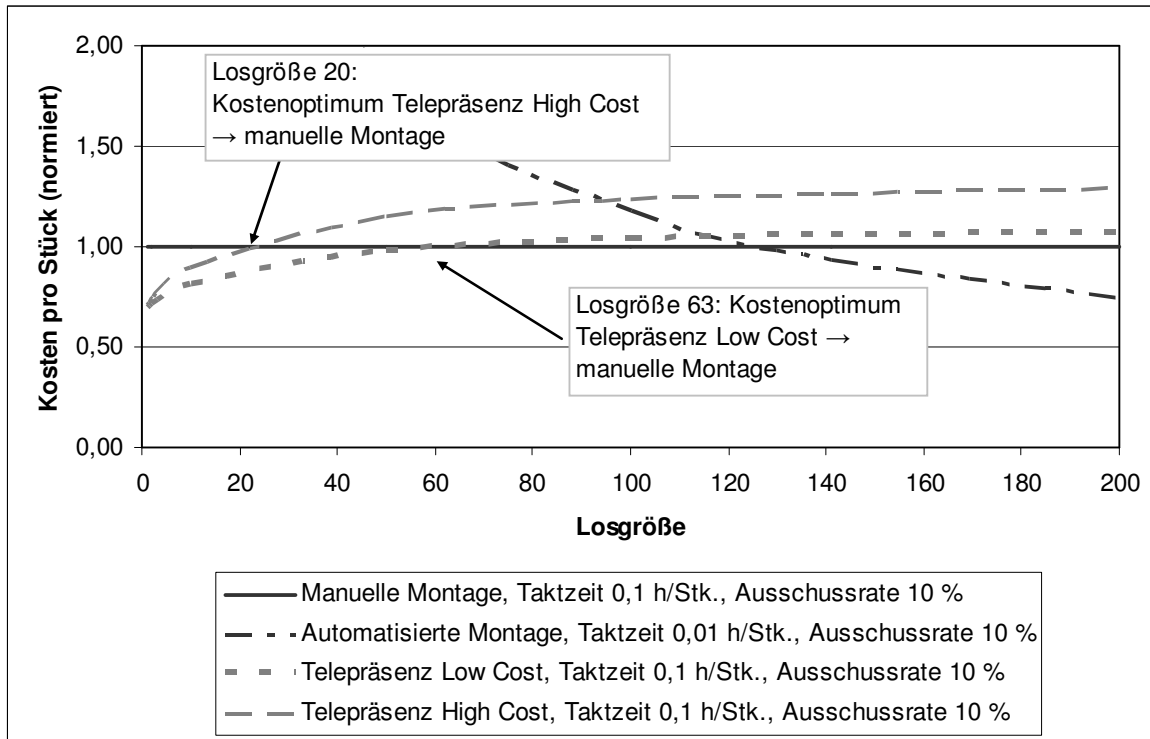


Abbildung 6.10: Kosten pro Stück, Ausschussrate bei allen Systemen bei 10 %, in Abhängigkeit der Taktzeit, normiert auf die Kosten der manuellen Montage

Bei einer Anpassung der Ausschussrate an die voraussichtlichen Systemeigenschaften verschiebt sich die Rentabilitätsgrenze für Telepräsenzsysteme auf eine Losgröße von 125 Stück pro Los für Telepräsenz-Low-Cost-Systeme, bevor das automatisierte System kostengünstiger ist, bei einem High-Cost-System auf Losgröße 100 (Abbildung 6.11). Die Stückkosten des Telepräsenz-Low-Cost-Systems sind bereits immer unter denjenigen der manuellen Montage durch die höhere kalkulierte Ausschussrate.

Unter der Annahme einer noch höheren Ausschussrate von 30 % bei der manuellen Montage, wie sie in Tabelle 6.2 für komplexe und nicht routinemäßige Aufgaben angegeben wird, ist ein Low-Cost-Telepräsenzsystem immer kostengünstiger als die manuelle Montage. Bis zu einer Losgröße von 80 ist auch die High-Cost-Telepräsenz-Variante von Vorteil (Abbildung 6.12).

6.2 Aspekte zur Wirtschaftlichkeit

Falls die manuelle Montage eine längere Taktzeit als die telepräsenste Ausführung aufweist, verschieben sich die berechneten Losgrößen weiter zugunsten der Telepräsenzsysteme.

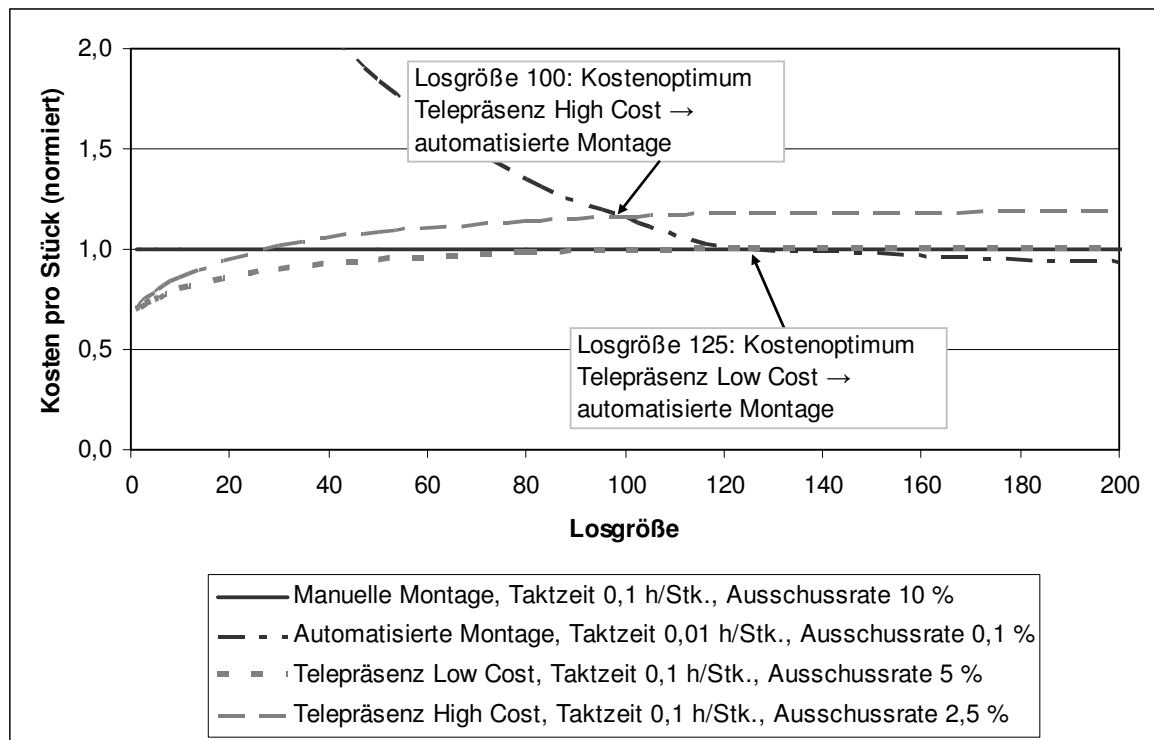


Abbildung 6.11: Kosten pro Stück in Abhängigkeit der Taktzeit und der Ausschussrate bei mittlerer Fehlerrate (10 %) der manuellen Montage (vgl. HEP Nr. 2 für eine nicht routinemäßige Aufgabe in Tabelle 6.2), normiert auf die Kosten der manuellen Montage

Aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird ersichtlich, dass der Einsatz von Telepräsenzsystemen in Abhängigkeit des Einsatzfalls genau geprüft werden muss. Ist eine manuelle oder automatisierte Montage ebenfalls umsetzbar, können auch diese Alternativen eine kostengünstigere Produktion erlauben. Stellt die manuelle Montage keine Alternative dar, beispielsweise weil der Mensch nicht mehr in der Lage ist, die Mikrobauteile zu handhaben, ist ein telepräsenste System gegenüber einem automatisierten für kleine Losgrößen kostengünstiger.

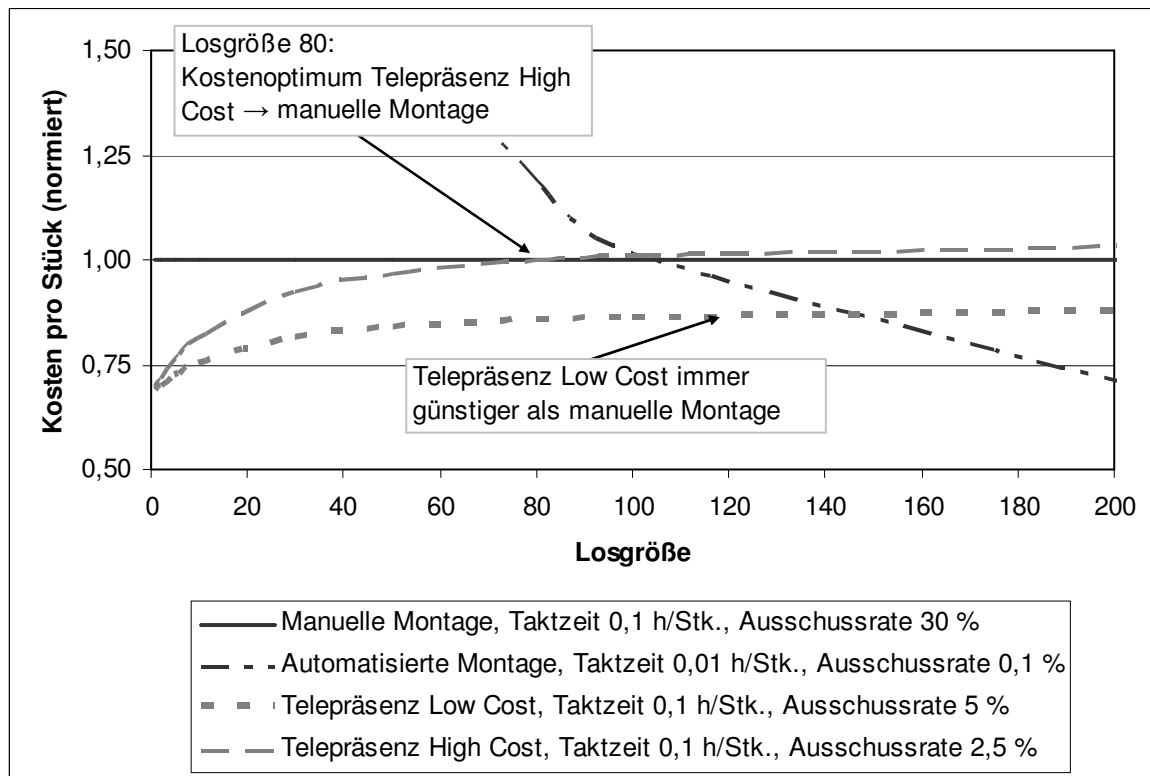


Abbildung 6.12: Kosten pro Stück in Abhängigkeit der Taktzeit und der Ausschussrate bei hoher Fehlerrate (30 %) der manuellen Montage (vgl. HEP Nr. 1 für eine komplizierte nicht routinemäßige Aufgabe in Tabelle 6.2), normiert auf die Kosten der manuellen Montage

7 Zusammenfassung und Ausblick

Neue Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung von immer kleineren Bauteilen und Produkten. Sie sind damit Initiator und gleichzeitig Motor für einen Trend zur Miniaturisierung in nahezu allen Produktbereichen. Jedoch stellen sie auch wachsende Anforderungen an die Handhabung und die Montage, beispielsweise in Bezug auf die notwendige Montagegenauigkeit und die Greifkräfte, so dass ein Mensch hier an die Grenzen seiner feinmotorischen Leistungsfähigkeit gelangt. Als Lösungsansatz für die Montage dieser miniaturisierten Produkte wurde die Telepräsenztechnologie vorgestellt, welche seit mehreren Jahren für die Anwendung in der Präzisions- und der Mikromontage erforscht wird.

Um die Einsetzbarkeit eines Teleaktions- oder eines Telepräsenzsystems für eine Aufgabenstellung zu bestimmen, wurde in der vorliegenden Arbeit zunächst ein Bewertungskatalog erstellt. Mit diesem kann die Eignung der TPTA-Technologie für die Ausführung einer bestimmten Aufgabe überprüft werden. Hierfür wurden zwei Stufen unterschieden: Die erste Stufe ist die Teleaktion, also im weitesten Sinne eine Fernsteuerung der Aufgabe. Die zweite Stufe beinhaltet die Telepräsenz, unter der die Rückmeldung von Signalen an den Operator verstanden wird. Für die Präzisions- und die Mikromontage wurde hiermit im Bereich kleiner und mittlerer Stückzahlen oder Prototypen, bei welchen die feinmotorischen Fähigkeiten des Menschen für die Handhabung nicht mehr genügen, sowohl die Teleaktion als auch die Telepräsenztechnologie als eine sinnvolle Möglichkeit zur Realisierung identifiziert.

Anschließend wurde die Konzipierung eines TPTA-Systems im Hinblick auf einen industriellen Einsatz mit den in der Produktion vorherrschenden Randbedingungen vorgenommen. Als Bewertungsgrößen für die Eignung der Endgeräte für die Befehlseingabe und die visuelle, akustische und haptische Rückmeldung wurden hinsichtlich der wirtschaftlichen Einsetzbarkeit die Kosten, der Wartungsaufwand, die Robustheit und der Platzbedarf sowie für die technische Realisierbarkeit die Ergonomie und jeweils spezifische Kriterien herangezogen.

Mit dem daraus entwickelten teleoperierten Arbeitsplatz für die Präzisions- und die Mikromontage wurden anschließend verschiedene Einsatzfaktoren wie die Skalierung, die Zeitverzögerung und die Steuerungsart untersucht, da deren Anpassung die Steuerung maßgeblich beeinflusst. Danach wurde die Auswirkung haptischer Rückkopplung auf die Operatorleistung evaluiert. Dabei zeigte sich, dass eine proportionale – wirklichkeitsnahe aber skalierte – Krafterückmeldung den Operator bei der Durchführung hochpräziser Handhabungsvorgänge unterstützt. Da eine haptische Rückmeldung die vom Operator induzierten Kräfte reduzierte, bietet ein tele-

präsenes, also kraftrückkoppelndes, System potentiell Vorteile gegenüber einer reinen Teleaktion oder gar einer manuellen Ausführung der Aufgabe. Für mikro-technische Komponenten ist es für den Werker meist schwer einschätzbar, welche Kräfte während des Montagevorgangs tatsächlich auf die Bauteile wirken, so dass mit Krafrückkopplung das Risiko einer Beschädigung gesenkt werden kann. Bei einem Versuch zum gleichzeitigen visuellen und haptischen Lernen konnte keine Reduzierung der Lernzeit festgestellt werden, weshalb eine haptische Unterstützung von Lernvorgängen nicht weiter in Betracht gezogen wurde.

Trotz der Vorteile von haptischen Rückmeldungen bei der Manipulation, Handhabung und Montage von hochsensiblen Produkten werden telepräsenete Systeme zukünftig nur dann eingesetzt werden, wenn die Kosten für die zusätzlich benötigte Ausstattung, hauptsächlich kraftrückkoppelnde Ein-/Ausgabe-Geräte, im Vergleich zu den übrigen Anlagenkomponenten in einem akzeptablen Rahmen liegen, was aktuell durch am Markt käufliche Produkte noch nicht in ausreichendem Maße gegeben ist. Hierfür sind einerseits hochsensible Laborgeräte mit sehr gut auflösender Krafrückmeldung erhältlich, welche jedoch teilweise weit über 10.000 Euro kosten und nicht für einen ständigen Gebrauch ausgelegt sind. Andererseits sind Geräte aus der Computerspieleindustrie verfügbar, die sich durch einen geringen Preis, aber auch eine geringe Qualität der Krafrückkopplung auszeichnen. Neue Entwicklungen aus diesem Marktbereich offenbaren jedoch verstärkt einen Trend zu neuen und innovativen Ein-/Ausgabe-Geräten mit mehreren Freiheitsgraden oder zur Erfassung von Beschleunigungen. Somit ergibt sich in den kommenden Jahren möglicherweise auch ein wachsendes Potential für die Nutzung dieser oder ähnlicher Geräte im industriellen Umfeld und damit für einen wirtschaftlichen Einsatz von TPTA-Systemen.

8 Literaturverzeichnis

ADAMS et al. 2001

Adams, R. J.; Klowden, D.; Hannaford, B.: Virtual Training for a Manual Assembly Task. *Haptics-e* 2 (2001) 2, S. 1-7.

AGAH & TANIE 1999

Agah, A.; Tanie, K.: Multimedia Human-Computer Interaction for Presence and Exploration in a Telemuseum. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 8 (1999) 1, S. 104-111.

AKAMATSU et al. 1995

Akamatsu, M.; MacKenzie, I. S.; Hasbroucq, T.: A Comparison of Tactile, Auditory, and Visual Feedback in a Pointing Task Using a Mouse-Type Device. *Ergonomics* 38 (1995) 4, S. 816-827.

AKAMATSU & MACKENZIE 1996

Akamatsu, M.; MacKenzie, I. S.: Movement Characteristics Using a Mouse with Tactile and Force Feedback. *International Journal of Human-Computer Studies* 45 (1996) 4, S. 483-493.

AKAN & AKYILDIZ 2004

Akan, Ö. B.; Akyildiz, I. F.: ATL: An Adaptive Transport Layer Suite for Next-Generation Wireless Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 22 (2004) 5, S. 802-817.

AMOKRANE et al. 2008

Amokrane, K.; Lourdeaux, D.; Burkhardt, J.-M.: HERA: Learner Tracking in a Virtual Environment. *The International Journal of Virtual Reality* 7 (2008) 3, S. 23-30.

ANDO et al. 2001

Ando, N.; Korondi, P.; Hashimoto, H.: Development of Micromanipulator and Haptic Interface for Networked Micromanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 6 (2001) 4, S. 417-427.

ANTON 2002

Anton, O.: Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme. Diss. Technische Universität München 2002 (Forschungsberichte *iwb* 175).

ARTEOS GMBH 2006

Arteos GmbH (Hrsg.): arteosHM - halbmanuelles, teleoperiertes Arbeiten und Montieren im Mikrobereich. Seligenstadt: 2006.

ARTEOS GMBH 2008

TOMM 1- Mikromontage von kleinen Stückzahlen
<http://www.arteos.de/downloads/Flyer_TOMM_1.pdf> - 30. Oktober 2008.

ARTIGAS et al. 2006

Artigas, J.; Kremer, P.; Preusche, C.; Hirzinger, G.: Testbed for Telepresent On-Orbit Satellite Servicing. In: Second International Workshop on Human-Centered Robotic Systems (HCRS '06). München, 2006.

AUTO & TECHNIK MUSEUM SINSHEIM E.V. 2010

Auto & Technik MUSEUM SINSHEIM e.V.: IMAX 3D Filmtheater <<http://sinsheim.technik-museum.de/imax-3d-filmtheater>> - 8. November 2010.

AVANZINI et al. 2004

Avanzini, F.; Rocchesso, D.; Serafin, S.: Friction Sounds for Sensory Substitution. In: Proceedings of Tenth Meeting of the International Conference on Auditory Display (ICAD '04). Sydney, Australien, 6.-9. Juli 2004.

BALDWIN & CLARK 2000

Baldwin, C. Y.; Clark, K. B.: The power of modularity. The MIT Press 2000. ISBN: 0-262-02466-7.

BASDOGAN et al. 2000

Basdogan, C.; Ho, C.-H.; Srinivasan, M. A.: An Experimental Study on the Role of Touch in Shared Virtual Environments. ACM Transactions on Computer-Human Interaction 7 (2000) 4, S. 443-460.

BENGEL 2005

Bengel, M.: Miniaturisierte Produktion. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 3, S. 127-130.

BERTSCHE & LECHNER 1990

Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Berlin: Springer 1990.

BOKRANZ & LANDAU 2006

Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2006.

BOOTSMA et al. 1994

Bootsma, R. J.; Marteniuk, R. G.; MacKenzie, C. L.; Zaal, F. T.: The Speed-Accuracy Trade-off in Manual Prehension: Effects of Movement Amplitude, Object Size and Object Width on Kinematic Characteristics. *Experimental Brain Research* 98 (1994) 3, S. 535-541.

BORING 1957

Boring, E. G.: *A History of Experimental Psychology*. 2. Aufl. New York, New York, USA: Appleton Century Crofts 1957.

BOROWSKI 1961

Borowski, K.-H.: *Das Baukastensystem in der Technik*. Diss. Technische Hochschule Hannover 1961.

BOSCH 1993

Bosch, K.: *Statistik-Taschenbuch*. 2. Aufl. München: R. Oldenbourg 1993. ISBN: 3-486-22685-1.

BOUGUILA et al. 2000a

Bouguila, L.; Ishii, M.; Sato, M.: Effect of Coupling Haptics and Stereopsis on Depth Perception in Virtual Environment. In: *1st Haptic Human-Computer Interaction Workshop*. Glasgow, Großbritannien, 31. August - 1. September 2000, S. 54-62.

BOUGUILA et al. 2000b

Bouguila, L.; Ishii, M.; Sato, M.: A Large Workspace Haptic Device For Human-Scale Virtual Environments. In: *1st Haptic Human-Computer Interaction Workshop*. Glasgow, Großbritannien, 31. August - 1. September 2000, S. 86-91.

BOWMAN et al. 2001

Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J. J.; Poupyrev, I.: An Introduction to 3-D User Interface Design. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 10 (2001) 1, S. 96-108.

BOWMAN et al. 2002

Bowman, D. A.; Datey, A.; Ryu, Y. S.; Farooq, U.; Vasnaik, O.: Empirical Comparison of Human Behavior and Performance with Different Display Devices for Virtual Environments. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Baltimore, Maryland, USA, 29. September - 4. Oktober 2002, S. 2134-2138.

BOWMAN et al. 2006

Bowman, D. A.; Chen, J.; Wingrave, C. A.; Lucas, J.; Ray, A.; Polys, N. F.; Li, Q.; Haciahmetoglu, Y.; Kim, J.-S.; Kim, S.; Boehringer, R.; Ni, T.: New Directions in 3D User Interfaces. The International Journal of Virtual Reality 5 (2006) 2, S. 3-14.

BOWMAN et al. 2007

Bowman, D. A.; Badillo, B.; Manek, D.: Evaluating the Need for Display-Specific and Device-Specific 3D Interaction Techniques. In: Shumaker, R. (Hrsg.): Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer 2007, S. 195-204. ISBN: 978-3-540-73334-84563).

BRAUN et al. 2007

Braun, E. U.; Hasselbeck, C.; Mayer, H.; Freyberger, F.; Knoll, A.; Wildhirt, S. M.; Lange, R.; Bauernschmitt, R.: The Significance of Haptic Feedback for Telemanipulated Heart Surgery. In: IFMBE Proceedings, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006, Bd 18. Berlin, Heidelberg: Springer 2007, S. 3134-3136.

BRECHER et al. 2009

Brecher, C.; Freundt, M.; Wenzel, C.: Automation of a Diode Laser Assembly Process. Proceedings of the euspen International Conference. San Sebastian, Spanien, 2.-5. Juni 2009.

BRUSSEL et al. 2000

Brussel, H. V.; Peirs, J.; Reynaerts, D.; Delchambre, A.; Reinhart, G.; Roth, N.; Weck, M.; Zussman, E.: Assembly of Microsystems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2 (2000) 49, S. 451-472.

BUBB 1994

Bubb, H.: Menschliche Zuverlässigkeit, Sicherheit und Risikobeurteilung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 48 (1994) 1, S. 8-13.

BURDEA & COIFFET 2003

Burdea, G. C.; Coiffet, P.: Virtual Reality Technology. 2. Aufl. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. 2003.

BURISCH et al. 2007

Burisch, A.; Degen, R.; Hesselbach, J.; Raatz, A.: Assembly of Micro Systems with the High Precision Robot Parvus. In: Gessner, T. (Hrsg.): Smart Systems Integration. Paris, Frankreich, 27.-28. März 2007. Berlin: VDE 2007.

BUTALA et al. 2002

Butala, P.; Kleine, J.; Wingen, S.; Gergs, H.: Assessment of Assembly Processes in European Industry. 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems. Seoul, Südkorea, 12.-15. Mai 2002.

CHONG et al. 2002a

Chong, N. Y.; Kawabata, S.; Ohba, K.; Kotoku, T.; Komoriya, K.: Multioperator Teleoperation of Multirobot Systems with Time Delay: Part I - Aids for Collision-Free Control. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 11 (2002) 3, S. 277-291.

CHONG et al. 2002b

Chong, N. Y.; Kotoku, T.; Ohba, K.; Sasaki, H.; Komoriya, K.; Tanie, K.: Multioperator Teleoperation of Multirobot Systems with Time Delay: Part II - Test-bed Description. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 11 (2002) 3, S. 292-303.

CLARKE et al. 2005

Clarke, S.; Zäh, M. F.; Naghdy, F.: An Analysis of the Feasibility of Telepresent Robot Control Across an International Network. Proceedings of 4th Asian Conference on Industrial Automation and Robotics (ACIR). Bangkok, Thailand, 11.-13. Mai 2005. S. 352-356.

CLARKE 2006

Clarke, S.: Overcoming Network Delays in Telepresence Systems with Prediction and Inertia. Diss. Technische Universität München 2006 (Forschungsberichte *iwb* 205).

CLARKE et al. 2007

Clarke, S.; Schillhuber, G.; Zaeh, M. F.; Ulbrich, H.: The Effects of Simulated Inertia and Force Prediction on Delayed Telepresence. *Presence - Teleoperators and Virtual Environments* 16 (2007) 5, S. 543-558.

CLÉVY et al. 2006

Clévy, C.; Hubert, A.; Chaillet, N.: Micromanipulation and Micro-Assembly Systems. In: *IEEE/RAS International Advanced Robotics Programm (IARP'06)*. Paris, Frankreich, 2006.

CLÉVY et al. 2008

Clévy, C.; Hubert, A.; Chaillet, N.: Flexible Micro-Assembly System Equiped with an Automated Tool Changer. *Journal of Micro - Nano Mechatronics, Special Issue on Automation in Micro and Nanohandling* 4 (2008) 1-2, S. 59-72.

DAI 2001

Dai, F.: Remote Supervision and Task-level Control of Industrial Robot Systems Using Augmented Vision. *at Automatisierungstechnik* 49 (2001) 7, S. 329-335.

DATA VISUALIZATION RESEARCH LAB 2009

Data Visualization Research Lab (University of New Hampshire): Fitts' Law <<http://www.ccom-jhc.unh.edu/vislab/VisCourse/Fitts.html>> - 14. Mai 2009.

DEML 2004

Deml, B.: *Telepräsenzsysteme: Gestaltung der Mensch-System-Schnittstelle*. Diss. Universität der Bundeswehr München 2004.

DEML et al. 2005

Deml, B.; Ortmaier, T.; Seibold, U.: The Touch and Feel in Minimally Invasive Surgery. In: *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE '05)*. Ottawa, Kanada, 1.-2. Oktober 2005.

DENSO ROBOT B.V. ROBOTICS DEPARTMENT 2009

Denso Robot B.V. Robotics Department: VPserie <www.densorobot.com> - 8. März 2009.

DEPRAG SCHULZ GMBH & CO. 2009

Deprag Schulz GmbH & Co.: *Auf kleinstem Raum montieren. Mikroproduktion* 7 (2009) 2, S. 21.

DHILLON 1988

Dhillon, B. S.: Zuverlässigkeitstechnik - Einfluss des Menschen. Weinheim: VCH-Verlagsgesellschaft 1988. ISBN: 3-527-26845-6.

DIN 8593 2002

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2002.

DIN 40041 1990

DIN 40041: Zuverlässigkeit. Berlin: Beuth 1990.

DIN EN ISO 14644 1999

DIN EN ISO 14644, Blatt 1: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche. Berlin: Beuth 1999.

DINNERSTEIN & ZLOTOGURA 1968

Dinnerstein, A. J.; Zlotogura, P.: Intermodal Perception of Temporal Order and Motor Skills: Effects of Age. *Perceptual and Motor Skills* 26 (1968) 3, S. 987-1000.

DIPIETRO et al. 2008

Dipietro, L.; Sabatini, A. M.; Dario, P.: A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews* 4 (2008) 38, S. 461-482.

DR. VOLKER KLOCKE NANOTECHNIK 2010

Dr. Volker Klocke Nanotechnik (Hrsg.): Nanomanipulation with Force Feedback. <http://www.nanomotor.de/pdf/FF_e_lo.PDF> - 2. Februar 2010

DRAPER et al. 1998

Draper, J. V.; Kaber, D. B.; Usher, J. M.: Telepresence. *Human Factors* 40 (1998) 3, S. 354-375.

DURIE 2005

Durie, B.: Senses Social: Doors of Perception. *NewScientist* 49 (2005) 2484.

EHRENSTRASSER 2007

Ehrenstrasser, M.: Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage. Diss. Technische Universität München 2007 (Forschungsberichte *iwb* 206).

ESCRIBANO et al. 2000

Escribano, J.; Cerrada, C.; Gomez, S. R.; Cerrada, J. A.: Stereo Vision vs. Projected Shadows in Performance Evaluation of Teleoperated Systems. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Osaka, Japan, 27.-29. September 2000, S. 378-381.

EURSCH 2009

Eursch, A.: Expertengespräch am 24.07.2009. Fa. Lotus Technologie GmbH, 2009.

EURSCH 2010

Eursch, A.: Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen. Diss. Technische Universität München 2010 (Forschungsberichte *iwb* 241).

EVERTEC E. K. 2010

EVERTEC e. K. (Hrsg.): IR-XT5 Professional - PDR's fokussierte IR-SMT/BGA Reworksysteme.

<<http://www.evertec.de/pdf/PDR%20-%20XT5%20Professional%20BGA%20Rework-%20German.pdf>> - 25. Februar 2010.

FAHLBUSCH & FATIKOW 2001

Fahlbusch, S.; Fatikow, S.: Micro Force Sensing in a Micro Robotic System. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. 21.-26. Mai 2001. Seoul, Südkorea: 2001, S. 3435-3440.

FAHLBUSCH et al. 2002

Fahlbusch, S.; Shirinov, A.; Fatikow, S.: AFM-based Micro Force Sensor and Haptic Interface for a Nanohandling Robot. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Schweiz, 30. September - 5. Oktober 2002, S. 1772- 1777.

FATIKOW 2000

Fatikow, S.: Mikroroboter und Mikromontage: Aufbau, Steuerung und Planung von flexiblen mikroroboterbasierten Montagestationen. Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner 2000. ISBN: 3-519-06264-X.

FATIKOW et al. 2007

Fatikow, S.; Wich, T.; Sievers, T.; Jähnisch, M.; Eichhorn, V.; Mircea, J.; Hül-
sen, H.; Stolle, C.: Automatic Nanohandling Station Inside a Scanning Electron
Microscope. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:
Journal of Engineering Manufacture 222 (2007) 1, S. 117-128.

FED-STD-209E 1992

FED-STD-209E: Federal Standard Airborne Particulate Cleanliness Classes in
Cleanrooms and Clean Zones, 1992.

FERREIRA et al. 2004

Ferreira, A.; Cassier, C.; Hirai, S.: Automatic Microassembly System Assisted by
Vision Servoing and Virtual Reality. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
9 (2004) 2, S. 321-233.

FERRELL 1964

Ferrell, W. R.: Remote Manipulation with Transmission Delay. Diss. Massachu-
setts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA, 1964.

FEYGIN et al. 2002

Feygin, D.; Keehner, M.; Tendick, F.: Haptic Guidance: Experimental Evaluation
of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill. In: Proceedings of the
10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator
Systems (HAPTICS '02). Orlando, Florida, USA, 24.-25. März 2002, S. 40-47.

FITTS 1954

Fitts, P. M.: The Information Capacity of the Human Motor System in Control-
ling the Amplitude of Movement. Journal of Experimental Psychology 47 (1954)
6, S. 381-391.

FLEISCHER et al. 2004

Fleischer, J.; Volkmann, T.; Krahtov, L.: Wirtschaftliche Automatisierung der
Mikromontage in der Kleinserienfertigung. wt Werkstattstechnik online 94
(2004) 9, S. 390-395.

FLEISCHER et al. 2005a

Fleischer, J.; Munzinger, C.; Driess, W.; Strümper, M.; Wauer, J.; Rudolf, C.:
Adaptronische Strebe zur Genauigkeitssteigerung. wt Werkstattstechnik online
95 (2005) 9, S. 632-636.

FLEISCHER et al. 2005b

Fleischer, J.; Volkmann, T.; Krahtov, L.: Konzeption einer skalierbaren Mikroproduktion. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 705-711.

FLEISCHER et al. 2007

Fleischer, J.; D. Löhe, J. K.; Schulze, V.; Deuchert, M.; Halvadjiysky, G.; Haupt, S.; Kienzler, A.: Fertigungsverfahren in der Mikrotechnik. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 11/12, S. 847-851.

FORCE DIMENSION INC. 2009

Force Dimension Inc. (Hrsg.): Products Overview. Nyon, Schweiz: 2009.
<<http://www.forcedimension.com/products>> - 19. August 2009.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK 2003

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF: Mikromontagesystem. <http://www.iof.fraunhofer.de/departments/precision-engineering/microassembly/microassembly2/index_d.html> - 15. Oktober 2008.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG 2006

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hrsg.): Neue Kundengruppen für Industrieroboter, PI-Mitteilung 38. Karlsruhe: 2006.

FREYBERGER 2008

Freyberger, F.: Gestaltung visuell-haptischer Telepräsenz- und Teleaktionssysteme mittels psychologischer Grundlagen. Diss. Universität der Bundeswehr München 2008.

GARREC et al. 2005

Garrec, P.; Piolain, G.; Lamy-Perbal, S.; Friconneau, J.-P.: The Telerobotics System MT200-TAO Replaces Mechanical Telemanipulators in CO-GEMA/AREVA-La Hague Hot Cells. European Nuclear Conference. Versailles, Frankreich, 11.-14. Dezember 2005, S. 1-12.

GAUGEL et al. 2004a

Gaugel, T.; Bengel, M.; Malthan, D.: Building a Mini-Assembly System from a Technology Construction Kit. Assembly Automation 24 (2004) 1, S. 43-48.

GAUGEL et al. 2004b

Gaugel, T.; Bengel, M.; Malthan, D.; Schließer, J.; Kegeler, J.; Munz, G.: Miniaturized Reconfigurable Micro-Assembly System. In: Ratchev, S. et al. (Hrsg.): International Precision Assembly Seminar. Nottingham: University of Nottingham, 2004, S. 157-166.

GERWAH MIKROTECHNIK 2006

Gerwah Mikrotechnik (Hrsg.): Mikro-Manufaktur-System MHS-PL3. Großwallstadt: 2006.

GREITMANN 1998

Greitmann, G.: Micromechanical Tactile Gripper System für Micro Assembly. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1998.

GROSS & DIRKS 2004

Gross, M.; Dirks, V.: Mikro-Manufaktur. Mikroproduktion 2 (2004) 1, S. 1-4.

GROSSER et al. 2000

Grosser, V.; Reichl, H.; Kergel, H.; Schuenemann, M.: A Fabrication Framework for Modular Microsystems. *mstnews* 10 (2000) 1, S. 4-8.

GROZDANOVIC & STOJILJKOVIC 2006

Grozdanovic, M.; Stojiljkovic, E.: Framework for Human Error Quantification. *Philosophy, Sociology and Psychology* 5 (2006) 1, S. 131-144.

HAGEMANN 2008

Hagemann, F.: Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen. Diss. Technische Universität München 2008 (Forschungsberichte *iwb* 226).

HAHN et al. 2010

Hahn, L.; Schwartz, G.; Saile, V.; Schulz, J.: First Automated Production Line for X-Ray-LIGA (FELIG) Is Brought on Line. *Microsystem Technologies* 16 (2010) 8-9, S. 1287-1292.

HARASHIMA & OHNO 2009

Harashima, S.; Ohno, K.: Reconfigurability of Flexible Manufacturing Systems Corresponding to Quantitative Fluctuation Developed in DENSO CORPORATION. In: 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München, 5.-7. Oktober 2009, S. 122-131.

HEINZELMANN 2009

Heinzelmann, E.: Mikromontage-Power im Pocket-Format. Mikroproduktion 7 (2009) 2, S. 10-12.

HELD & DURLACH 1991

Held, R.; Durlach, N.: Telepresence, Time Delay, and Adaptation. In: Ellis, S. R. (Hrsg.): Pictorial Communication in Virtual and Real Environments. Bristol, Connecticut, USA: Taylor & Francis, Inc. 1991, S. 232-246. ISBN: 0-74840-008-7.

HENRICH & WÖRN 2000

Henrich, D.; Wörn, H. (Hrsg.): Robot Manipulation of Deformable Objects. London, Großbritannien: Springer 2000. ISBN: 1-85233-250-6.

HENSCHKE 1994

Henschke, F.: Miniaturgreifer und montagegerechtes Konstruieren in der Mikro-technik. Diss. Technische Hochschule Darmstadt 1994 (Fortschrittsberichte VDI 242).

HERBST & STARK 2005

Herbst, I.; Stark, J.: Comparing Force Magnitudes by Means of Vibro-tactile, Auditory, and Visual Feedback. In: IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE '05). Ottawa, Kanada, 1.-2. Oktober 2005, S. 67-71.

HESELBACH 1997

Hesselbach, J.: Neue Anwendungsbereiche der Montagetechnik: Mikromontage - Demontage. International Journal Automation Austria 5 (1997) 1, S. 1-11.

HESELBACH 2000

Hesselbach, J.: Montage miniaturisierter Bauteile. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): Stuttgarter Impulse: Technologien für die Zukunft - Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart. Berlin, Heidelberg: Springer 2000, S. 198-208. ISBN: 3-540-67984-7.

HESELBACH et al. 2003

Hesselbach, J.; Raatz, A.; Wrege, J.; Herrmann, H.; Weule, H.; Buchholz, C.; Tritschler, H.; Knoll, M.; Elsner, J.; Klocke, F.; Weck, M.; Bodenhausen, J. v.; Klitzing, A. v.: mikroPRO - Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003) 3, S. 119-128.

HESELBACH 2004

Hesselbach, J.: Mikrotechnik – Mikroproduktion. *Akademie-Journal* (2004) 1, S. 4-11.

HESELBACH & HEUER 2005

Hesselbach, J.; Heuer, K.: Sensorgeführte Mikromontage. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 3, S. 142-146.

HESELBACH et al. 2006

Hesselbach, J.; Wrege, J.; Raatz, A.: Mikromontage. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 463-482. ISBN: 978-3-540-21413-7.

HINTERSEER et al. 2008

Hinterseer, P.; Hirche, S.; Chaudhuri, S.; Steinbach, E.; Buss, M.: Perception-based Data Reduction and Transmission of Haptic Data in Telepresence and Teleaction Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing* 56 (2008) 2, S. 588-597.

HIRCHE et al. 2007

Hirche, S.; Hinterseer, P.; Steinbach, E.; Buss, M.: Transparent Data Reduction in Networked Telepresence and Teleaction Systems. Part I: Communication without Time Delay. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 16 (2007) 5, S. 523-531.

HÖHN 2001

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. Diss. Technische Universität München 2001 (Forschungsberichte *iwb* 149).

HWANG et al. 2007

Hwang, G.; Chantanakajornfung, P.; Hashimoto, H.: Versatile Robotic Biomani-
pulation with Haptic Interface. *Journal of Robotics and Mechatronics* 19 (2007) 5, S. 585-589.

HWANG & HASHIMOTO 2007

Hwang, G.; Hashimoto, H.: Development of a Human-Robot-Shared Controlled Teletweezing System. IEEE Transactions on Control Systems Technology 15 (2007) 5, S. 960-966.

INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND FERTIGUNGSTECHNIK 2009

Burisch, A.: Parvus - größenangepasster Präzisionsroboter für die Mikromontage. Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Universität Braunschweig (Hrsg.). <<http://www.iwf.tu-bs.de/f+e/fawm/Parvus.pdf>> 2. August 2009.

JANSEN & KRESS 1995

Jansen, J. F.; Kress, R. L.: Control Issues for a Hydraulically Powered Dissimilar Teleoperated System. In: American Nuclear Society Winter Meeting. San Francisco, Kalifornien, USA, 29. Oktober - 2. November 1995.

JIANG et al. 2005

Jiang, L.; Girotra, R.; Cutkosky, M. R.; Ullrich, C.: Reducing Error Rates with Low-cost Haptic Feedback in Virtual Reality-based Training Applications. In: First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics Conference. Pisa, Italien, 18.-20. März 2005, S. 420-425.

KEYROUZ & DIEPOLD 2007

Keyrouz, F.; Diepold, K.: Binaural Source Localization and Spatial Audio Reproduction for Telepresence Applications. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 16 (2007) 5, S. 509-522.

KIM et al. 2006

Kim, B.; Kang, H.; Kim, D.-H.; Park, J.-O.: A Flexible Microassembly System Based on Hybrid Manipulation Scheme for Manufacturing Photonics Components. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 28 (2006) 3-4, S. 379-386.

KIM et al. 2001

Kim, D.-N.; Kim, K.; Kim, K.-Y.; Cha, S.-M.: Dexterous Teleoperation for Micro Parts Handling Based on Haptic/Visual Interface. In: International Symposium on Micromechatronics and Human Science. Nagoya, Japan, 9.-12. September 2001, S. 211-217.

KIM et al. 2009

Kim, K. H.; Nam, Y. J.; Yamane, R.; Park, M. K.: Smart Mouse: 5-DOF Haptic Hand Master Using Magneto-Rheological Fluid Actuators. 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Journal of Physics: Conference Series 149 (2009) 1, S. 1-6.

KIRWAN 1996

Kirwan, B.: The Validation of Three Human Reliability Quantification Techniques - THERP, HEART and JHEDI: Part 1 - Technique Descriptions and Validation Issues. Applied Ergonomics 27 (1996) 6, S. 359-373.

KLEMD 2007

Klemd, O.: Desktop Factory – New Approaches for Lean Micro Assembly. In: International Symposium on Assembly and Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 22.-25. Juli 2007.

KOELEMEIJER & JACOT 1999

Koelemeijer, S.; Jacot, J.: Cost Efficient Assembly of Microsystems. mstnews (1999) 1, S. 30-32.

KOELEMIJER CHOLLET et al. 1999

Koelemijer Chollet, S.; Benmayor, L.; Uehlinger, J.-M.; Jacot, J.: Cost Effective Micro-System Assembly Automation. 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '99). Barcelona, Spanien, 18.-21. Oktober 1999, S. 359-366.

KONIETSCHKE et al. 2006

Konietschke, R.; Ortmaier, T.; Ott, C.; Hagn, U.; Le-Tien, L.; Hirzinger, G.: Concepts of human-robot cooperation for a new medical robot. Proceedings of the 2nd International Workshop on Human-Centered Robotic Systems. München, 6.-7. Oktober 2006, S. 1-6.

KONTARINIS & HOWE 1995

Kontarinis, D. A.; Howe, R. D.: Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 4 (1995) 4, S. 387-402.

KORB 2005

Korb, W.: Mit Pepp zur wirtschaftlichen Mikromontage. Mikroproduktion 3 (2005) 1, S. 21-22.

KORTSCHACK et al. 2005

Kortschack, A.; Shirinov, A.; Trüper, T.; Fatikow, S.: Development of Mobile Versatile Nanohandling Microrobots: Design, Driving Principles, Haptic Control. *Robotica* 23 (2005) 1, S. 419-434.

KROHS et al. 2008

Krohs, F.; Luttermann, T.; Stolle, C.; Fatikow, S.; Brousseau, E.; Dimov, S.: Towards Automation in AFM Based Nanomanipulation and Electron Beam Induced Deposition for Microstructuring. In: 4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. Cardiff, Großbritannien, 9.-11. September 2008, S. 118-123.

KRON et al. 2004

Kron, A.; Schmidt, G.; Petzold, B.; Zäh, M. F.; Hinterseer, P.; Steinbach, E.: Disposal of Explosive Ordnances by Use of a Bimanual Haptic Telepresence System. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, Louisiana, USA, 26. April - 1. Mai 2004, S. 1968-1973.

KUKA ROBOTER GMBH 2009

Kuka Roboter GmbH (Hrsg.): KR 5 sixx R650.
<http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/industrial_robots/small_robots/kr5_sixx_r650/start.htm> - 31. Juli 2009.

KUMAR et al. 1999

Kumar, R.; Goradia, T. M.; Barnes, A. C.; Jensen, P.; Whitcomb, L. L.; Stoianovici, D.; Auer, L. M.; Taylor, R. H.: Performance of Robotic Augmentation in Microsurgery-Scale Motions. *Lecture Notes In Computer Science, Proceedings of the Second International Symposium on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* 1679 (1999), S. 1108-1115.

LAMPTON et al. 1995

Lampton, D. R.; Knerr, B. W.; Goldberg, S.; Bliss, J. P.; Moshell, M. J.; Blau, B. S.: The Virtual Environment Performance Assessment Battery: Development and Evaluation. U.S. Army Research Institute: Technical Report 1029, 1995.

LANTZ 1996

Lantz, E.: The Future of Virtual Reality: Head Mounted Displays Versus Spatially Immersive Displays. In: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New Orleans, Louisiana, USA, 4.-9. August 1996, S. 485-486.

LÉCUYER et al. 2002

Lécuyer, A.; Lim, T.; Coquillart, S.: The Effect of Haptic, Visual and Auditory Feedback on an Insertion Task on a 2-Screen Workbench. In: Proceedings of the Immersive Projection Technology Symposium (IPT). Orlando, Florida, USA, 2002.

LEE et al. 2007

Lee, S. Y.; Lee, K. Y.; Lee, S. H.; Kim, J.; Han, C. S.: Human-Robot Cooperation Control for Installing Heavy Construction Materials. *Autonomous Robots* 22 (2007) 3, S. 305-319.

LEHMANN 2008

Lehmann, J.: Kombinierte multifunktionale Arbeitsräume zur Restrukturierung der Mikroproduktion. Diss. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg 2008.

LETSCHNIK 2008

Letschnik, J.: Laufzeitverhalten telepräsenster Raumfahrtssysteme. Diss. Technische Universität München 2008.

LI et al. 2005

Li, G.; Xi, N.; Chen, H.; Pomeroy, C.; Prokos, M.: "Videolized" Atomic Force Microscopy for Interactive Nanomanipulation and Nanoassembly. *IEEE Transactions on Nanotechnology* 4 (2005) 5, S. 605-615.

LIM et al. 2007

Lim, T.; Ritchie, J. M.; Dewar, R. G.; Corney, J. R.; Wilkinson, P.; Calis, M.; Desmulliez, M.; Fang, J.-J.: Factors Affecting User Performance in Haptic Assembly. *Virtual Reality* 11 (2007) 4, S. 241-252.

LIN & KUO 1999

Lin, Q.; Kuo, C.: Assisting the Teleoperation of an Unmanned Underwater Vehicle Using a Synthetic Subsea Scenario. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 8 (1999) 5, S. 520-530.

LINDE et al. 2002

Linde, R. Q. V. d.; Lammertse, P.; Frederiksen, E.; Ruiters, B.: The HapticMaster, a New High-Performance Haptic Interface. In: Proceedings of the EuroHaptics Conference. Edinburgh, Großbritannien, 8.-10. Juli 2002.

LINDEMANN 2007

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 2. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-37435-0.

LIU et al. 2003

Liu, A.; Tendick, F.; Cleary, K.; Kaufmann, C.: A Survey of Surgical Simulation: Applications, Technology, and Education. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 12 (2003) 6, S. 599-614.

LIU et al. 2006

Liu, J.; Cramer, S.; Reinkensmeyer, D.: Learning to Perform a New Movement with Robotic Assistance: Comparison of Haptic Guidance and Visual Demonstration. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 3 (2006) 20, S. 20-29.

LOOCK & SCHÖMER 2001

Loock, A.; Schömer, E.: A Virtual Environment for Interactive Assembly Simulation: From Rigid Bodies to Deformable Cables. In: 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, Florida, USA, 22.-25. Juli 2001, S. 325-332.

LOTTER 1982

Lotter, B.: Arbeitsbuch der Montagetechnik. Mainz: Vereinigte Fachverlage 1982. ISBN: 378-30-0185-4.

LOTTER 1986

Lotter, B.: Manufacturing Assembly Handbook. London: Butterworths 1986. ISBN: 0-408-03561-7.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Berlin Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 103-540-21413-5.

MAELICKE 1990

Maelicke, A. (Hrsg.): Vom Reiz der Sinne. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1990. ISBN: 3-527-28058-8.

MASSIMINO 1990

Massimino, M. J.: Teleoperator Tracking Performance in Six Degrees of Freedom. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA 1990.

MAYER et al. 2007

Mayer, H.; Nagy, I.; Knoll, A.; Braun, E. U.; Bauernschmitt, R.; Lange, R.: Haptic Feedback in a Telepresence System for Endoscopic Heart Surgery. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 16 (2007) 5, S. 459-470.

MESSE STUTTGART 2007

Messe Stuttgart (Hrsg.): Minimalismus à la carte. Stuttgart: 2007.
<http://cms.messe-stuttgart.de/cms/index.php?id=14944&L=0&spr=0&messe_id=10004&txt_id=810> - 31. Juli 2009.

MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM GMBH 1977

Messerschmidt-Bölkow-Blohm GmbH (Hrsg.): Technische Zuverlässigkeit. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 1977. ISBN: 3-540-08237-9.

MEYER et al. 2008a

Meyer, P.; Saile, V.; Schulz, J.; Klein, O.; Arendt, M.: Launching Into a Golden Age: Gears (mm parts) made by the deep x-ray LIG(A) Process. International Journal of Technology Transfer and Commercialisation 7 (2008) 4, S. 362-370.

MEYER et al. 2008b

Meyer, P.; Schulz, J.; Hahn, L.; Saile, V.: Why You Will Use the Deep X-ray LIG(A) Technology to Produce MEMS? Microsystem Technologies 14 (2008) 9-11, S. 1491-1497.

MILANESI 2009

Milanesi, F.: Mikromontage mit chirurgischer Präzision. Mikroproduktion 7 (2009) 2, S. 14-17.

MILASYS TECHNOLOGIES GMBH 2007

MiLaSys Technologies GmbH: Autarke Prozessmodule aus dem Systembaukasten. Mikroproduktion 5 (2007) 2, S. 60.

MILGRAM et al. 1994

Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In: SPIE Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies, Bd 2351. 1994, S. 282-292.

MINTCHELL 2007

Mintchell, G.: Bosch Rexroth Showcases Technologies. Automationworld 2007, S. 18.

MURAKAMI et al. 2002

Murakami, E. A. Y.; Yamada, T.; Kondo, T.; Ito, K.: Performance Evaluation of Bilateral Micro-Teleoperation Systems based on Man-Machine Dynamic Characteristics. In: Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. Osaka, Japan, 5.-7. August 2002, S. 2706-2711.

NAKAZATO et al. 2009

Nakazato, Y.; Yuasa, T.; Sekine, G.; Miyazawa, H.; Jin, M.; Takeuchi, S.; Ariga, Y.; Murakawa, M.: Micromanipulation System Using Scanning Electron Microscope. Microsystem Technologies 16 (2009) 6, S. 859–864.

NEWPORT CORPORATION 2009a

Newport Corporation (Hrsg.): NPX Series NanoPositioning Linear Stages. <<http://www.newport.com>> - 3. August 2009.

NEWPORT CORPORATION 2009b

Newport Corporation (Hrsg.): Hexapod 6-Axis Parallel Kinematic Positioning System. <<http://www.newport.com>> - 3. August 2009.

OBOE 2003

Oboe, R.: Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet: The JBIT Project. Proceedings of the IEEE 91 (2003) 3, S. 449-462.

OKAZAKI et al. 2002

Okazaki, Y.; Mishima, N.; Ashida, K.: Microfactory and Micro Machine Tools. In: 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology. Daejeon, Südkorea, 2002, S. 150-155.

ONO et al.. 2009

Ono, K.; Schillhuber, G.; Ulbrich, H.: XFFEM Approach to Real-Time Incision Haptic Feedback for Surgical Simulation. In: International Conference on Extended Finite Element Method – Recent Developments and Applications XFEM. Aachen, 28.-29. September 2009.

ONO et al.. 2010

Ono, K.; Berghofer, J.; Wurm, S.; Schös, F.; Ulbrich, H.: FEM-based Incision Force Compensation for Medical Telepresence with Time-Delay. In: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Mechatronics. Osaka, Japan, 4.-6. Oktober 2010.

OTTENSMEYER et al. 2000

Ottensmeyer, M. P.; Hu, J.; Thompson, J. M.; Ren, J.; Sheridan, T. B.: Investigations into Performance of Minimally Invasive Telesurgery with Feedback Time Delays. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 9 (2000) 4, S. 369-382.

PALM et al. 1999

Palm, S.; Mori, T.; Sato, T.: Teleoperation via Bilateral Behavior Media: Control, Accumulation, and Assistance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, Michigan, USA, 10.-15. Mai 1999, S. 1882-1889.

PAUSCH et al. 1993

Pausch, R.; Shackelford, M. A.; Proffitt, D.: A User Study Comparing Head-Mounted and Stationary Displays. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality. San Jose, Kalifornien, USA, 25.-26. Oktober 1993, S. 46-52.

PEER et al. 2006

Peer, A.; Unterhinninghofen, U.; Buss, M.: Tele-Assembly in Wide Remote Environments. Proceedings of the 2nd International Workshop on Human Centered Robotic Systems (HCRS 06). München, 6.-7. Oktober 2006.

PEER et al. 2008

Peer, A.; Hirche, S.; Weber, C.; Krause, I.; Buss, M.; Miossec, S.; Evrard, P.; Stasse, O.; Neo, E. S.; Kheddar, A.; Yokoi, K.: Intercontinental Multimodal Tele-Cooperation Using a Humanoid Robot. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nizza, Frankreich, 22.-26. September 2008, S. 405-411.

PÉRUCH & MESTRE 1999

Péruch, P.; Mestre, D.: Between Desktop and Head Immersion: Functional Visual Field During Vehicle Control and Navigation in Virtual Environments. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 8 (1999) 1, S. 54–64.

PESCHKE 2007

Peschke, C.: Mehr-Achs-Mikrogreifer zur Handhabung von Drähten und Fasern. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 2007 (Berichte aus der Produktionstechnik 2/2007).

PETERSEN 2003

Petersen, B.: Flexible Handhabungstechnik für die automatisierte Mikromontage. Diss., Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 2003 (Berichte aus der Produktionstechnik 17/2003).

PETZOLD et al. 2004a

Petzold, B.; Kron, A.; Deml, B.: How to Design a Haptic Telepresence System for the Disposal of Explosive Ordnances. In: IARP Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining and Similar Risky Situations. Brüssel, Belgien, 16.-18. Juni 2004.

PETZOLD et al. 2004b

Petzold, B.; Zaeh, M. F.; Faerber, B.; Deml, B.; Egermeier, H.; Schilp, J.; Clarke, S.: A Study on Visual, Auditory and Haptic Feedback for Assembly Tasks. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 13 (2004) 1, S. 16-21.

PETZOLD 2007

Petzold, B.: Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage. Diss. Technische Universität München 2007 (Forschungsberichte *iwb* 217).

PFEIFER et al. 2001

Pfeifer, T.; Freudenberg, R.; Dussler, G.; Bröcher, B.: Quality Control and Process Observation for the Micro Assembly Process. Measurement 30 (2001) 1, S. 1-18.

PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & CO. KG 2009a

Physik Instrumente GmbH & Co. KG (Hrsg.): M-824 Kompakter 6-Achsen-Hexapod.
<http://www.physikinstrumente.de/de/pdf/M824_Datenblatt.pdf> - 31. Juli 2009.

PHYSIK INSTRUMENTE GMBH & CO. KG 2009b

Physik Instrumente GmbH & Co. KG (Hrsg.): P-611.Z Piezohubtisch.
<http://www.physikinstrumente.de/de/pdf/P611_Z_Datenblatt.pdf> - 31. Juli 2009.

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass Customization. 4. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2006. ISBN: 3-8350-0355-0.

PONGRAC et al. 2007

Pongrac, H.; Reiter, A.; Faerber, B.; Zaeh, M. F.: Evaluation of Joystick Sensitivity in Telemanipulative Microassembly. In: IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE). Ottawa, Kanada, 12.-14. Oktober 2007, S. 71-75. ISBN: 978-1-4244-1571-7.

PONGRAC 2008

Pongrac, H.: Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden. Diss. Universität der Bundeswehr München 2008.

POUPYREV et al. 1997

Poupyrev, I.; Weghorst, S.; Billingham, M.; Ichikawa, T.: A Framework and Testbed for Studying Manipulation Techniques for Immersive VR. In: ACM Virtual Reality Systems and Technology Conference (ACM VRST '97). Lausanne, Schweiz, 12.-15. September 1997, S. 21 - 28. ISBN: 0-89791-953-X.

PREUSCHE & HIRZINGER 2007

Preusche, C.; Hirzinger, G.: Haptics in Telerobotics. The Visual Computer 23 (2007) 4, S. 273-284.

QUANSER CONSULTING INC. 2008

Quanser Consulting Inc. (Hrsg.): 5 DOF Telepresence System, Product Information Sheet S39.

<http://www.quanser.com/english/downloads/solutions/5DOF_Telep_PIS_032008.pdf> - 6. August 2008.

RADI et al. 2010

Radi, M.; Reiter, A.; Zaidan, S.; Nitsch, V.; Färber, B.; Reinhart, G.: Telepresence in Industrial Applications: Implementation Issues for Assembly Tasks. *Presence - Teleoperators and Virtual Environments* 19 (2010) 5, S. 415-429.

REINHART & SCHILP 2006

Reinhart, G.; Schilp, J.: Agile Micro-Assembly Strategies Based on Telepresence Technologies. *WGP Annals* 13 (2006) 2, S. 225-229.

REINHART et al. 2007

Reinhart, G.; Eursch, A.; Zeilinger, T.: Augmented Reality-Unterstützung für die Produktion von radioaktiven Stoffen in abgeschirmten Handschuhboxen. In: Gausemeier, J. e. a. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Bd 209. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2007, S. 129-144. ISBN: 978-3-939350-28-6.

REINHART & EURSCH 2008

Reinhart, G.; Eursch, A.: A Camera-Based Support System with Augmented Reality Functions for Manual Tasks in Radioactive Production Environments. *Production Engineering - Research and Development* 2 (2008) 2, S. 139-147.

REINHART & RADI 2008

Reinhart, G.; Radi, M.: Some Issues on Integrating Telepresence Technology into Industrial Robotic Assembly. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 49 (2008) 1, S. 843-848.

REINHART et al. 2010

Reinhart, G.; Radi, M.; Zaidan, S.: Workspace Scaling Techniques for Haptic Robot Guidance Systems. 3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2010). Trondheim, Norwegen, 1.-3. Juni 2010, S. 127-132.

RICARD 1994

Ricard, G. L.: Manual Control with Delays: a Bibliography. ACM SIGGRAPH Computer Graphics: Special Issue on Interactive Entertainment Design, Implementation and Adrenaline 28 (1994) 2, S. 149-154.

RICHARD & COIFFET 1995

Richard, P.; Coiffet, P.: Human Perceptual Issues in Virtual Environments: Sensory Substitution and Information Redundancy. In: IEEE international Workshop on Robot and Human Communication. Tokyo, Japan: 1995, S. 301-306. ISBN: 0-7803-2904-X.

ROHWEDDER AG 2007

Rohwedder AG: Mikromontagezelle in neuer Ausbaustufe. Mikroproduktion 5 (2007) 2, S. 58-59.

SALLNÄS 2001

Sallnäs, E.-L.: Improved Precision in Mediated Collaborative Manipulation of Objects by Haptic Force Feedback. In: Brewster, S. et al. (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin, Heidelberg: Springer 2001, S. 69-75. ISBN: 978-3-540-42356-0.

SCHILLHUBER & ULBRICH 2008

Schillhuber, G.; Ulbrich, H.: Haptic Simulation of Deformable Bodies with Consideration of the Human Sensation of Continuous Forces. In: The 16th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems. Reno, Nevada, USA, 13.-14. März 2008, S. 137-138. ISBN: 978-1-4244-2005-6.

SCHILLHUBER 2009

Schillhuber, G.: Robotergestützte Modellidentifikation und Simulation von deformierbaren Körpern für haptische Anwendungen. Diss. Technische Universität München 2009.

SCHMIDT & KEGELER 2005

Schmidt, D.; Kegeler, J.: MiniProd – Miniaturisiertes Produktionssystem. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 3, S. 146-149.

SCHÖTTLER 2008

Schöttler, K.: Planung und Untersuchung automatisierter Mikromontageprozesse unter besonderer Berücksichtigung der Einflussgrößen. Diss. Technische Universität Braunschweig 2008.

SCHUH et al. 2008

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Gulden, A.; Hilchner, R.; Pyschny, N.; Buchner, T.; Haubrich, T.: Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 9, S. 670-674.

SCHULZ 2009

Spiegel Online: Eine neue Dimension
<<http://www.spiegel.de/spiegel/0,1518,635846-2,00.html>> - 12. April 2010.

SCHÜNEMANN et al. 1999

Schünemann, M.; Huentrup, V.; Bierhals, R.: Economic Potentials of Miniaturization from the Industrial Viewpoint. mstnews (1999) 2, S. 34-36.

SCHÜNEMANN 2003

Schünemann, M.: Ein modulares Baukastensystem für anwendungsspezifische Mikrosysteme. Diss. Universität Stuttgart 2003 (IPA-IAO Forschung und Praxis 387).

SEIBOLD et al. 2007

Seibold, U.; Kuebler, B.; Hirzinger, G.: Prototypic force feedback instrument for minimally invasive robotic surgery. In: Bozovic, V. (Hrsg.): Medical Robotics. Wien, Österreich: I-Tech Education and Publishing 2007, S. 526-537. ISBN: 978-3-902613-18-9.

SENSABLE TECHNOLOGIES INC. 2009

SensAble Technologies Inc. (Hrsg.): Haptic Devices.
<<http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>> - 19. August 2009.

SHEN et al. 2000

Shen, Y.; Liu, Y.; Li, K.: Haptic Tactile Feedback in Teleoperation of a Multifingered Robot Hand. In: Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei, China, 28. Juni - 2. Juli 2000.

SHEN et al. 2006

Shen, Y.; Xi, N.; Song, B.; Li, W. J.; Pomeroy, C. A.: Networked Human/Robot Cooperative Environment for Tele- Assembly of MEMS Devices. Journal of Micromechatronics 3 (2006) 3-4, S. 239-266.

SHERIDAN 1993

Sheridan, T. B.: Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis. IEEE Transactions on Robotics and Automation 9 (1993) 5, S. 592-606.

SHERRICK & CHOLEWIAK 1986

Sherrick, C. E.; Cholewiak, R. W.: Cutaneous Sensitivity. In: K. Boff et al. (Hrsg.): Handbook of Perception and Human Performance - Sensory Processes and Perception. New York, New York, USA: John Wiley & Sons 1986.

SIEVERS et al. 2005

Sievers, T.; Garnica, S.; Tautz, S.; Trüper, T.; Fatikow, S.: Microrobot Station for Automatic Cell Handling. In: ICGST Conference on Automation, Robotics and Autonomous Systems (ARAS). Kairo, Ägypten, 19.-21. Dezember 2005.

SIROUSPOUR et al. 2000

Sirouspour, M. R.; DiMaio, S. P.; Salcudean, S. E.; Abolmaesumi, P.; Jones, C.: Haptic Interface Control - Design Issues and Experiments with a Planar Device. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, Kalifornien, USA, 24.-28. April 2000, S. 789-794. ISBN: 0-7803-5886-4-00.

SITTI 2003

Sitti, M.: Teleoperated and Automatic Nanomanipulation Systems using Atomic Force Microscope Probes. In: IEEE Conference on Decision and Control. Maui, Hawaii, USA, 9.-12. Dezember 2003.

SLATTER & BURISCH 2005

Slatter, R.; Burisch, A.: Kleine Desktop-Montagelinie mit hoher Präzision. Mechatronik - Sonderdruck (2005) 5-6, S. 2-6.

SMARACT GMBH 2009

SmarAct GmbH (Hrsg.): Product Catalogue.
<<http://www.smaract.de>> - 3. August 2009.

SØRENSEN et al. 2001

Sørensen, T. S.; Therkildsen, S. V.; Makowski, P.; Knudsen, J. L.; Pedersen, E. M.: A New Virtual Reality Approach for Planning of Cardiac Interventions. Artificial Intelligence in Medicine 22 (2001) 3, S. 193-214.

SOTO et al. 2009

Soto, A. L.; Roney, A. J.; Giardini, G.: Vision-Based Tele-Operation for Lunar Exploration. In: AIAA Region IV Student Conference. Houston, Texas, USA, 17.-19. April 2009.

SPI GMBH 2009

SPI GmbH (Hrsg.): SPI GmbH Roboter und Systeme.
<www.spi-robot.de> - 25. August 2009.

SPITZWEG 2009

Spitzweg, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. Diss. Technische Universität München 2009 (Forschungsberichte *iwb* 233).

STANNEY et al. 1998

Stanney, K. M.; Mourant, R. R.; Kennedy, R. S.: Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 7 (1998) 4, S. 327-351.

STÄUBLI GMBH 2009

Stäubli GmbH (Hrsg.): Ein einzigartiges Portfolio an Robotern.
<<http://www.staubli.com/>> - 13. August 2009.

STEIGER 2008

Steiger, H.: Hightech und Handarbeit. *VDI nachrichten* (2008) 44, S. 3.

STEIN & MEREDITH 1993

Stein, B. E.; Meredith, M. A. (Hrsg.): *The Merging of Senses*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press 1993. ISBN: 0-262-19331-0. (Cognitive Neuroscience Series 3).

STEUER 1995

Steuer, J.: Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. In: Biocca, F. et al. (Hrsg.): *Communication in the Age of Virtual Reality*. Hillsdale, New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1995, S. 33-56. ISBN: 0-8058-1550-3.

STÖCKER 2008

Stöcker, C.: So sieht 3D-Kino der nächsten Generation aus. In: Spiegel Online, 2008 <<http://www.spiegel.de/netzwelt/tech/0,1518,573643,00.html>> - 14. März 2010.

STOLL et al. 2009

Stoll, E.; Walter, U.; Artigas, J.; Preusche, C.; Kremer, P.; Hirzinger, G.; Letschnik, J.; Pongrac, H.: Ground Verification of the Feasibility of Telepresent On-Orbit Servicing. *Journal of Field Robotics* 26 (2009) 3, S. 287–307.

STONE 2001

Stone, R. J.: Haptic Feedback: A Brief History, from Telepresence to Virtual Reality. In: Brewster, S. et al. (Hrsg.): *Haptic Human-Computer Interaction*. Berlin, Heidelberg: Springer 2001, S. 1-16. ISBN: 978-3-540-42356-0. (Lecture Notes in Computer Science 2058).

STREIFINGER 1983

Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel unter besonderer Berücksichtigung von Kollisionen im Arbeitsraum. Diss. Technische Universität München 1983 (Forschungsberichte *iwb* 1).

SWAPP et al. 2006

Swapp, D.; Pawar, V.; Loscos, C.: Interaction with Co-located Haptic Feedback in Virtual Reality. *Virtual Reality* 10 (2006) 1, S. 24-30.

SYSMELEC SA 2009

Sysmelec SA (Hrsg.): *Sysmelec SA - robot & automation*. <www.sysmelec.ch> - 25. August 2009.

TACHI et al. 1990

Tachi, S.; Arai, H.; Maeda, T.: Tele-Existence Master Slave System for Remote Manipulation. In: *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*. Ibaraki, Japan, 3.-6. Juli 1990, S. 343-348.

TACHI 1995

Tachi, s.: Recent Progress in Tele-Existence and/or Virtual Reality. In: *Proceedings of the 3rd Industrial Virtual Reality Show & Conferenc (IVR 95)*. Tokyo, Japan, 28.-30. Juni 1995, S. 6-13.

TÄHKÄPÄÄ & RAISAMO 2002

Tähkääpää, E.; Raisamo, R.: Evaluating Tactile Feedback in Graphical User Interfaces. In: EuroHaptics Conference. Edinburgh, Großbritannien, 8.-10. Juli 2002.

TALABA et al. 2006

Talaba, D.; Mogan, G.; Antonya, C.; Girbacia, F.; Butnaru, T.; Aron, C.; Sisca, S.: Virtual Reality in Product Design and Robotics. In: Workshop on Virtual Reality in Product Engineering and Robotics: Technology and Applications. Brasov, Rumänien, 2006.

TAYLOR-ADAMS & KIRWAN 1995

Taylor-Adams, S.; Kirwan, B.: Human Reliability Data Requirements. International Journal of Quality & Reliability Management 12 (1995) 1, S. 24-46.

TENDICK & CAVUSOGLU 1997

Tendick, F.; Cavusoglu, M. C.: Human-Machine Interfaces for Minimally Invasive Surgery. In: 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Chicago, Illinois, USA, 30. Oktober - 2. November 1997, S. 2771-2776.

THE NEXUS ASSOCIATION 2005

The Nexus Association (Hrsg.): Market Analysis for Microsystems III 2005-2009. Grenoble, Frankreich: 2005. ISBN: 2-9518607-2-2.

TIETJE & RATCHEV 2007

Tietje, C.; Ratchev, S.: Design for Microassembly – A Methodology for Product Design and Process Selection. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, 22.-25. Juli 2007, S. 178-183.

UNGER et al. 2002

Unger, B.; Nicolaidis, A.; Berkelman, P.; Thompson, A.; Lederman, S.; Klatzky, R.; Hollis, R.: Virtual Peg-In-Hole Performance using a 6-DOF Magnetic Levitation Haptic Device: Comparison with Real Forces and with Visual Guidance Alone. In: Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 2002). Orlando, Florida, USA, 8.-10. Juli 2002, S. 263-270.

UNGER et al. 2004

Unger, B. J.; Klatzky, R. L.; Hollis, R. L.: Teleoperation Mediated Through Magnetic Levitation: Recent Results. In: Mechatronics and Robotics. Aachen, 13.-15. September 2004, S. 1453-1457.

VAHRENKAMP 2008

Vahrenkamp, R.: Produktionsmanagement. 6. Aufl. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag 2008. ISBN: 978-3-486-58784-5.

VDI 2860 1990

VDI 2860, Teil 3: Montage- und Handhabungstechnik. Berlin: Beuth 1990.

VILLA SINNENREICH 2009

Villa Sinnenreich (Hrsg.): Museum der Sinne. 2009. <<http://www.villa-sinnenreich.at/index.html>> - 10. August 2009.

WAGNER et al. 2007

Wagner, C.; Stylopoulos, N.; Jackson, P.; Howe, R.: The Benefit of Force Feedback in Surgery: Examination of Blunt Dissection. Presence: Teleoperators & Virtual Environments 16 (2007) 3, S. 252-262.

WALL et al. 2002

Wall, S. A.; Paynter, K.; Shillito, A. M.; Wright, M.; Scali, S.: The Effect of Haptic Feedback and Stereo Graphics in a 3D Target Acquisition Task. EuroHaptics. Edinburgh, Großbritannien, 8.-10. Juli 2002.

WATSON et al. 2003

Watson, B.; Walker, N.; Woytiuk, P.; Ribarsky, W.: Maintaining Usability During 3D Placement Despite Delay. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2003 (VR'03). Los Angeles, Kalifornien, USA, 22.-26. März 2003, S. 133-140.

WERNER 2008

Werner, J.: Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität München 2008 (Forschungsberichte *iwb* 225).

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL et al. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 783-809.

WILDEMANN 2004

Wildemann, H.: Weiterentwicklung von Produktionssystemen. Industrie Management 23 (2004) 3, S. 19-22.

WULFSBERG et al. 2008

Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L.: Square Foot Manufacturing. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 5, S. 337-344.

YANG et al. 2001

Yang, G.; Gaines, J. A.; Nelson, B. J.: A Flexible Experimental Workcell for Efficient and Reliable Wafer-Level 3D Microassembly. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Südkorea, 21.-26. Mai 2001, S. 133-138.

YOKOKOHI et al. 1996

Yokokohji, Y.; Hollis, R.; Kanade, T.; Henmi, K.; Yoshikawa, T.: Toward Machine Mediated Training of Motor Skills -Skill Transfer from Human to Human via Virtual Environment. 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Tsukuba, Japan, 11.-14. November 1996, S. 32-37.

ZAEH & PETZOLD 2005

Zaeh, M. F.; Petzold, B.: An Operator Workplace for a Telepresent Micro-Assembly System. Joint International COE/HAM – SFB 453 Workshop on Human Adaptive Mechatronics and High Fidelity Telepresence. Tokyo, Japan, 10. Juni 2005, S. 45-50.

ZÄH et al. 2005

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Prash, M.: Montagestrukturen für alternde Belegschaften. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 637-642.

ZAHARIEV 2004

Zahariev, M. A.: Multimodal Cues for Object Manipulation in Augmented and Virtual Environments. In: M. Masoodian et al. (Hrsg.): Computer Human Interaction. Berlin, Heidelberg: Springer 2004, S. 687-691. ISBN: 0302-9743. (Lecture Notes in Computer Science 3101).

ZAREINEJAD et al. 2009

Zareinejad, M.; Rezaei, S. M.; Abdullah, A.; Ghidary, S. S.: Development of a Piezo-actuated Micro-teleoperation System for Cell Manipulation. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 5 (2009) 1, S. 66-76.

ZEVAC AG 2009

Zevac AG (Hrsg.): Zevac.
<www.zevac.de> - 3. Juni 2009.

ZÜHLKE et al. 2007

Zühlke, D.; Flörchinger, F.; Stephan, P.; Bödcher, A.: Micro and Nano Technologies in Intelligent Manufacturing Environments. *mstnews* (2007) 2, S. 7-9.

9 Anhang

9.1 Kriterienkataloge für verschiedene Aufgabenstellungen

Kriterienkatalog für die Anwendung der Teleaktions- und Telepräsenztechnologie in der Mikromontage:

Anwendungsfall: Präzisions- und Mikromontage				
Kriterien Telepräsenz			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewertung
Hauptkategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
keine Wahrnehmung wichtiger Sinnesindrücke	keine Wahrnehmung wichtiger visueller Informationen	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		eingeschränkte Tiefenwahrnehmung	ja	
		erschwerte Einschätzung von Abständen	ja	
		verdeckte Sicht durch Hindernisse	nein	
	keine Wahrnehmung notwendiger haptischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	
		keine Erkennung von Kontakten	ja	
		keine Erkennung von Gewichts- oder Reibungskräften	ja	
	keine Wahrnehmung notwendiger akustischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	
		kein Hören von Geräuschen	ja	
		kein Hören von Warntönen	nein	

Abbildung 9.1: Kriterienkatalog für die Telepräsenz zur Anwendung in der Präzisions- und in der Mikromontage

Anwendungsfall: Präzisions- und Mikromontage				
Kriterien für die Teleaktion			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
Trennung von Werker und Produktionsort	Gefährdung des Menschen	Einsatz von Gefahrstoffen	nein	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Einsatz von gefährlichen Prozessen	nein	
	Mensch als gefährdender oder störender Einflussfaktor	Einbringung von Kontaminationen	ja	
		hohes Risiko der Beschädigung von Gegenständen	ja	
		ungenügende Prozessstabilität bei manueller Tätigkeit	ja	
	faktische räumliche Trennung von Werker und Einsatzort	Einsatzort für den Menschen unerreichbar	nein	
		Erreichbarkeit mit Reisetätigkeit verbunden	nein	
	Grenzen menschlicher Handlungsfähigkeit	Krafteinbringung	ja	
		Präzision	ja	
		Bewegungsradius	ja	
Beschleunigung oder Geschwindigkeit		nein		
Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten	schnelle Anpassung der Arbeitsschritte bei Veränderungen	hohe Wahrscheinlichkeit des Eintretens unvorhersehbarer Ereignisse	möglich, bei unsicheren Prozessen	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Flexibilität des Menschen	hohe Variantenvielfalt bzw. Einzigartigkeit der Problemstellung	ja	
		hohe Komplexität der Vorgänge, so dass eine Automatisierung nicht möglich/zu aufwändig ist	ja	
Sicherheit	Sicherheit des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	gefährliche Folgen bei Versagen	nein	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Qualität des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	hohe Qualitätsanforderungen, Erfolg des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	möglich, z. B. für sicherheitsrelevante Produkte	

Abbildung 9.2: Kriterienkatalog für die Teleaktion zur Anwendung in der Präzisions- und in der Mikromontage

Kriterienkatalog für die Anwendung der Teleaktions- und Telepräsenztechnologie in der minimalinvasiven Chirurgie:

Anwendungsfall: minimalinvasive Chirurgie				
Kriterien Telepräsenz			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
keine Wahrnehmung wichtiger Sinnes- eindrücke	keine Wahrnehmung wichtiger visueller Informationen	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Tiefenwahrnehmung eingeschränkt	ja	
		Einschätzung von Abständen erschwert	ja	
		Sicht durch Hindernisse verdeckt	ja, möglich	
	keine Wahrnehmung notwendiger haptischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja, durch Operationsgeräte und geringe auftretende Kräfte	
		keine Erkennung von Kontakten	ja	
		keine Erkennung von Gewichts- oder Reibungskräften	nein	
	keine Wahrnehmung notwendiger akustischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	
		kein Hören von Geräuschen	ja	
		kein Hören von Warntönen	nein	

Abbildung 9.3: Kriterienkatalog für die Telepräsenz bei Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie

Anwendungsfall: minimalinvasive Chirurgie				
Kriterien für die Teleaktion			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewertung
Hauptkategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
Trennung von Werker und Produktionsort	Gefährdung des Menschen	Einsatz von Gefahrstoffen	nein	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Einsatz von gefährlichen Prozessen	nein	
	Mensch als gefährdender oder störender Einflussfaktor	Einbringung von Kontaminationen	ja	
		hohes Risiko der Beschädigung von Gegenständen	ja	
		ungenügende Prozessstabilität bei manueller Tätigkeit	nein	
	faktische räumliche Trennung von Werker und Einsatzort	Einsatzort für den Menschen un erreichbar	nein, jedoch ist eine minimale Eingriffsöffnung am Körper ein Ziel	
		Erreichbarkeit mit Reisetätigkeit verbunden	evtl. bei Anreise eines spezialisierten Chirurgen	
	Grenzen menschlicher Handlungsfähigkeit	Krafteinbringung	nein	
		Präzision	ja	
		Bewegungsradius	ja	
Beschleunigung oder Geschwindigkeit		nein		
Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten	schnelle Anpassung der Arbeitsschritte bei Veränderungen	hohe Wahrscheinlichkeit des Eintretens unvorhersehbarer Ereignisse	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Flexibilität des Menschen	hohe Variantenvielfalt bzw. Einzigartigkeit der Problemstellung	ja	
		hohe Komplexität der Vorgänge, so dass eine Automatisierung nicht möglich/zu aufwändig ist	ja	
Sicherheit	Sicherheit des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	gefährliche Folgen bei Versagen	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Qualität des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	hohe Qualitätsanforderungen, Erfolg des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	ja	

Abbildung 9.4: Kriterienkatalog für die Teleaktion bei Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie

Kriterienkatalog für die Anwendung der Teleaktions- und Telepräsenztechnologie für Reparatursätze an Raumschiffen im Weltall:

Randbedingungen der Aufgabe:

- Weltraumspaziergang für die Besatzung mit großen Risiken verbunden
- Reparaturaufgabe nicht vorhersehbar, individuell
- Raumanzüge behindern die menschliche Bewegungsfreiheit und die Möglichkeit zum Tasten (Haptik, Kinästhetik)

Anwendungsfall: Reparatursatz im Weltraum				
Kriterien Telepräsenz			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
keine Wahrnehmung wichtiger Sinnes- eindrücke	keine Wahrnehmung wichtiger visueller Informationen	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Tiefenwahrnehmung eingeschränkt	ja	
		Einschätzung von Abständen erschwert	ja	
		Sicht durch Hindernisse verdeckt	nein	
	keine Wahrnehmung notwendiger haptischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	nein	
		keine Erkennung von Kontakten	ja, durch den Raumanzug ungenügende haptische Wahrnehmung	
		keine Erkennung von Gewicht- oder Reibungskräften	ja, da keine Gewichtskraft im Weltall	
	keine Wahrnehmung notwendiger akustischer Signale	Reiz außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens	nein	
		kein Hören von Geräuschen	ja, durch den Raumanzug ungenügende akustische Wahrnehmung	
		kein Hören von Warntönen	ja, durch den Raumanzug ungenügende akustische Wahrnehmung	

Abbildung 9.5: Kriterienkatalog für die Telepräsenz beim Anwendungsfall eines Weltraumeinsatzes

Anwendungsfall: Reparatursatz im Weltraum				
Kriterien für die Teleaktion			trifft zu/ trifft nicht zu	Bewer- tung
Haupt- kategorie	Ausprägung	Beispiele der Ausprägung		
Trennung von Werker und Produktionsort	Gefährdung des Menschen	Einsatz von Gefahrstoffen	nein	Erfüllung mindestens eines Merkmals
		Einsatz von gefährlichen Prozessen	ja	
	Mensch als gefährdender oder störender Einflussfaktor	Einbringung von Kontaminationen	nein	
		hohes Risiko der Beschädigung von Gegenständen	ja	
		ungenügende Prozessstabilität bei manueller Tätigkeit	ja	
	faktische räumliche Trennung von Werker und Einsatzort	Einsatzort für den Menschen unerreichbar	möglicherweise, bei unbemannten Raumflugobjekten, sonst Gefährdung des Menschen	
		Erreichbarkeit mit Reisetätigkeit verbunden	ja, Mensch muss sich aus der Raumstation ausschleußen	
	Grenzen menschlicher Handlungsfähigkeit	Krafteinbringung	ja	
		Präzision	ja	
		Bewegungsradius	ja	
Beschleunigung oder Geschwindigkeit		nein		
Nutzung der menschlichen kognitiven Fähigkeiten	schnelle Anpassung der Arbeitsschritte bei Veränderungen	hohe Wahrscheinlichkeit des Eintretens unvorhersehbarer Ereignisse	ja	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Flexibilität des Menschen	hohe Variantenvielfalt bzw. Einzigartigkeit der Problemstellung	ja	
		hohe Komplexität der Vorgänge, so dass eine Automatisierung nicht möglich/zu aufwändig ist	ja	
Sicherheit	Sicherheit des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	gefährliche Folgen bei Versagen	ja, je nach Schweregrad der notwendigen Reparatur	Erfüllung mindestens eines Merkmals
	Qualität des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	hohe Qualitätsanforderungen, Erfolg des Prozesses wichtiger als Geschwindigkeit	ja	

Abbildung 9.6: Kriterienkatalog für die Teleaktion beim Anwendungsfall eines Weltraumeinsatzes