

Forschungsberichte

iwb

Band 175

Oliver Anton

***Ein Beitrag zur Entwicklung
telepräsender Montagesysteme***

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben,
auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0215-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Megatrends der Wirtschafts- und Wohlstandsentwicklung	1
1.2	Potenziale und Herausforderungen für Produktionsunternehmen	2
1.3	Telepräsenz als Schlüsseltechnologie	3
1.4	Nutzen der Telepräsenz für Entwicklung und Produktion	4
1.4.1	<i>Distanzkompensation</i>	5
1.4.2	<i>Größenkompensation</i>	6
1.4.3	<i>Zeitkompensation</i>	7
1.5	Aufgabenstellung und Zielsetzung	7
1.6	Vorgehensweise	8
2	Analyse des Aufgabengebietes	11
2.1	Begriffsdefinitionen	11
2.2	Funktionsweise von Telepräsenzsystemen	13
2.3	Struktur von Telepräsenzsystemen	15
2.3.1	<i>Teilsystem Operator</i>	16
2.3.1.1	Modalität Haptik	17
2.3.1.2	Modalität Video	18
2.3.1.3	Modalität Audio	19
2.3.2	<i>Teilsystem Teleoperator</i>	19
2.3.2.1	Arbeitssystem	20
2.3.2.2	Erfassungssystem	21
2.3.3	<i>Teilsystem Kommunikationsinfrastruktur</i>	21
2.3.3.1	Übertragungsmedien und -protokolle	21
2.3.3.2	Netzwerkkoordination	23
2.3.4	<i>Fazit</i>	24
2.4	Produktionstechnische Randbedingungen	24
2.4.1	<i>Produktionstechnisches Einsatzszenario für Telepräsenzsysteme</i>	25
2.4.2	<i>Funktionale Randbedingungen</i>	26
2.4.3	<i>Strukturelle Randbedingungen</i>	28
2.4.4	<i>Organisatorische Randbedingungen</i>	29
2.5	Herausforderungen in der Entwicklung von Telepräsenzsystemen	32
2.6	Eingrenzung des Betrachtungsbereichs	32
2.7	Bewertungsschema für multimodale TPTA-Systeme	33
3	Bestehende Ansätze und Handlungsbedarf	37
3.1	Telepräsenzsysteme in Industrie und Forschung	37
3.1.1	<i>Telerobotik</i>	37
3.1.2	<i>Wartung und Service von Produktionsanlagen</i>	39
3.1.3	<i>Virtuelle Produktbewertung</i>	39

3.1.4	<i>Mikromontage</i>	40
3.2	Bewertung des Standes der Technik	41
3.3	Handlungsbedarf	42
4	Rahmenkonzept für telepräsen­te Montagesysteme	45
4.1	Lösungsansatz	45
4.2	Handlungsfelder	46
5	Strukturmodell	49
5.1	Technologien und Methoden	49
5.1.1	<i>Kommunikationstechnologie</i>	49
5.1.2	<i>Analyse- und Entwurfskonzept</i>	53
5.1.3	<i>Abstraktionsmethode</i>	56
5.1.4	<i>Analysemethode für den Entwurf der Mikroarchitektur</i>	58
5.1.5	<i>Frameworks</i>	59
5.1.5.1	Aufbau und Klassifizierung von Frameworks	61
5.1.5.2	Dokumentation von Frameworks	63
5.2	Ergebnisse	65
5.2.1	<i>Management von Telepräsenznetzwerken</i>	65
5.2.1.1	Synchronisation	66
5.2.1.2	Überwachung	67
5.2.1.3	Verbindungstypen	69
5.2.1.4	Schnittstellen	73
5.2.2	<i>Entwurfsmodell der statischen Struktur</i>	75
5.2.2.1	Metamodell "Abstraktionsschicht"	77
5.2.2.2	Schnittstellen der Präsentationsschicht	79
5.2.2.3	Schnittstellen der Applikationsschicht	80
5.2.2.4	Schnittstellen der Domänenschicht	81
5.2.2.5	Schnittstellen der Telepräsenzs­chicht	82
5.2.2.6	Schnittstellen der Telekommunikationsschicht	83
5.2.2.7	Zusammenfassung	83
5.2.3	<i>Entwurfsmodell des dynamischen Verhaltens</i>	84
5.2.3.1	Variation des Montageszenarios	84
5.2.3.2	Ablauf "Installation Telepräsenzkomponente"	85
5.2.4	<i>Struktur der Frameworkbibliotheken</i>	86
5.2.5	<i>Fazit</i>	87
6	Vorgehensmodell	89
6.1	Vorgehensübersicht	89
6.2	Frameworkeinsatz	91
6.2.1	<i>Instanziierung des Telepräsenzszenarios</i>	92
6.2.2	<i>Instanziierung erforderlicher Modalitätskanäle</i>	93
6.2.3	<i>Instanziierung der Kommunikationsverbindungen</i>	94
6.2.4	<i>Integration der Hardwaretreiber</i>	95
6.3	Frameworkanpassung	97

6.4	Fazit	98
7	Hilfsmittel	99
7.1	Beschreibungstechnik	99
7.1.1	<i>Notation für die Modellierung des Frameworkaufbaus</i>	<i>100</i>
7.1.2	<i>Notation zur Abbildung des Vorgehensmodells</i>	<i>101</i>
7.2	Werkzeug zur Unterstützung der Frameworkanwendung	103
7.2.1	<i>Hilfsmittel für die Softwareentwicklung</i>	<i>103</i>
7.2.2	<i>Unterstützung bei der Anwendung des Vorgehensmodells</i>	<i>104</i>
7.2.3	<i>Unterstützung beim Aufbau des Systemmodells</i>	<i>106</i>
7.3	Fazit	107
8	Anwendungsbeispiel	109
8.1	Anwendungsbeispiel Mikromontage	109
8.2	Versuchsplattform für die telepräsen­te Mikromontage	111
8.2.1	<i>Anwendung des Rahmenkonzeptes</i>	<i>111</i>
8.2.2	<i>Hardwarestruktur der Versuchsplattform</i>	<i>115</i>
8.3	Experimentelle Untersuchungen	116
8.3.1	<i>Vermittelbare Empfindungsgüte</i>	<i>116</i>
8.3.2	<i>Anwendungsflexibilität</i>	<i>117</i>
8.4	Fazit	118
9	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	121
9.1	Qualitative Bewertung des Rahmenkonzeptes	121
9.2	Ansätze zur quantitativen Bewertung des Rahmenkonzeptes	124
9.2.1	<i>Berechnung des Kapitalwertes</i>	<i>124</i>
9.2.2	<i>Berechnung des Optionswertes</i>	<i>125</i>
9.3	Abschließende Bewertung des Rahmenkonzeptes	128
10	Zusammenfassung und Ausblick	129
11	Literatur	131
12	Abbildungsverzeichnis	147
13	Abkürzungsverzeichnis	151
Anhang A: Überblick über die verwendeten Symbole		153
A.1	Wesentliche Elemente der UML	153
A.1.1	<i>Use-Case-Diagramme</i>	<i>153</i>
A.1.2	<i>Sequenz-Diagramme</i>	<i>154</i>
A.1.3	<i>Klassen-Diagramme</i>	<i>154</i>
A.1.4	<i>Zustands-Diagramme</i>	<i>155</i>

1 Einleitung

1.1 Megatrends der Wirtschafts- und Wohlstandsentwicklung

„Handle oder Du wirst gehandelt“: diese Feststellung des Vorstandsvorsitzenden der Siemens AG Heinrich v. Pierer 1999 charakterisiert kurz und prägnant die Wettbewerbssituation im produzierenden Gewerbe zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Unternehmen, die nicht die Fähigkeit besitzen, schnell auf Vorgaben durch Kunden oder Wettbewerber reagieren zu können, werden langfristig nicht als selbstständige Einheiten bestehen können. Verstärkt wird diese Aussage durch eine Studie von Arthur D. Little (*Little 2000*), die in einer Analyse gegenwärtiger Trends neun sogenannte *Megatrends* bis zum Jahr 2020 ausmacht (vgl. Abbildung 1). Ein Megatrend beschreibt in diesem Zusammenhang die Verdichtung mehrerer, heute bereits erkennbarer Trends zu einer übergeordneten Tendenz. Demgemäß führt die als sicher geltende weitere Zunahme in der Individualisierung der Güter- und Dienstleistungsnachfrage zu neuen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (*Little 2001*): "Der Anspruch auf ganz individuelle Vollversorgung mit allen Gütern des Lebens in höchster Qualität bei gleichzeitigem Verfall der Preise lässt Anbieter ausscheiden, die diesem Anspruch nicht mehr gerecht werden können."

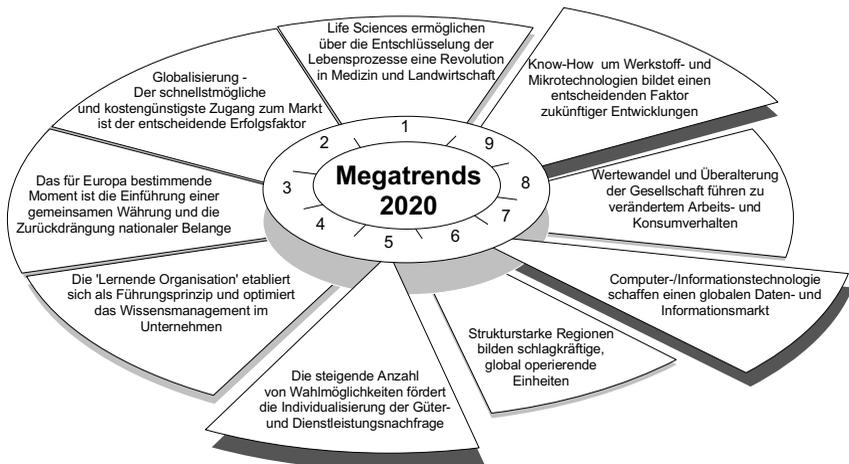


Abbildung 1: Megatrends des 21. Jahrhunderts (*Little 2000*)

Little 2001 bestätigt somit ein Positionspapier der Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM) aus dem Jahr 1998 (VDE 1998), in der speziell die Mikrosystemtechnik als eine Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert identifiziert wird. Die entscheidende Rolle für das produzierende Gewerbe spielen insbesondere die in Abbildung 1

hervorgehobenen Megatrends, da sich diese direkt auf das bereit zu stellende Produktspektrum und die verfügbaren Fertigungstechnologien auswirken.

1.2 Potenziale und Herausforderungen für Produktionsunternehmen

Die Forderung nach qualitativ hochwertigen, individuellen Produkten (vgl. Abbildung 2) bei geringen Stückzahlen sowie kurzen Lieferzeiten auf der einen und einer globalen Vergleichbarkeit der Produkte unterschiedlicher Hersteller auf der anderen Seite beschreiben das Spannungsfeld, indem sich Produktionsunternehmen heute bewegen (*Gausemeier et al. 2000*).

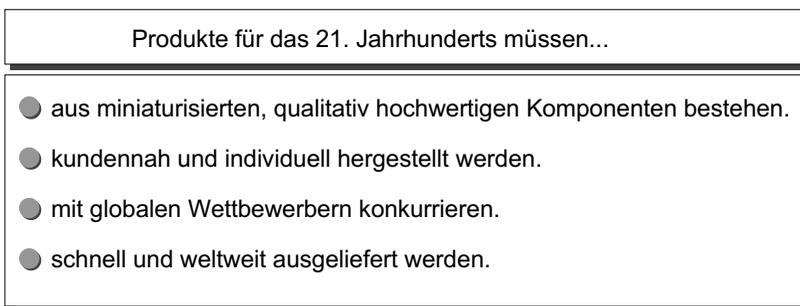


Abbildung 2: Herausforderungen für Produktionsunternehmen

Die hergestellten Produkte zeichnen sich aus durch eine hohe Integrationsdichte und eine fortschreitende Miniaturisierung der eingesetzten Komponenten (*BMBF 1999, VDE 1998*). Um sich unter diesen Bedingungen auf dem Markt behaupten zu können, setzen die Unternehmen Produktionssysteme zunehmender Komplexität ein, die sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen müssen:

- Hoher Grad an technischer Verfügbarkeit zur Gewährleistung maximaler Rentabilität
- Hohe Prozesssicherheit zur Sicherstellung der Produktqualität
- Hohe Flexibilität zur Anpassbarkeit an sich rasch verändernde Kundenanforderungen

Die Produktionssysteme werden an kundennahen Produktionsstandorten eingesetzt, um kurze Lieferzeiten und den direkten Kontakt zum Kunden zu gewährleisten (*Reinhart et al. 2000c*).

Für die Hersteller von Produktionssystemen eröffnen sich damit unter anderem zwei unterschiedliche Strategien zur Abgrenzung gegenüber den Wettbewerbern:

- Ausbau der globalen Service-Dienstleistungen zur Sicherstellung der "totalen Kundenzufriedenheit" (*Little 2000*) als Kernkompetenz (*Westkämper 1998*)

- Technologische Neuausrichtung ihrer Maschinen hinsichtlich der Abmessungen der zu handhabenden Produkte (*Wicht et al. 2001*)

Die Dynamik bei der Umsetzung beider Strategien wird durch unterschiedliche Arten von Barrieren gebremst, die in Form von Technologiesprüngen überwunden werden müssen: Im Fall der globalen Verteilung unterschiedlicher Produktionsstandorte stellt deren lokale Distanz oft eine wesentliche Barriere dar, im Fall der Miniaturisierung schränkt die mangelnde Auflösungsvermögen der menschlichen Sinnesorgane die direkte Handhabbarkeit von sehr kleinen Bauteilen ein (*Anton et al. 2000*). In beiden Fällen kann die abgrenzende Barriere durch den Einsatz von *Telepräsenzsystemen* überwunden werden.

1.3 Telepräsenz als Schlüsseltechnologie

Telepräsenzsysteme erlauben es dem Menschen, sich an entfernten oder nicht zugänglichen Orten, sog. *Teleoperationsorten*, präsent zu fühlen, um die gewünschten Aufgaben an einem davon separierten Ort, dem *Operationsort*, durchführen zu können. Sie kompensieren somit die mangelnden Möglichkeiten der direkten Präsenz eines Menschen in der gewünschten Operationsumgebung.

Im Gegensatz zu heutigen Tele-X-Anwendungen, bei denen einem Anwender nur Ausschnitte aus der entfernten Umgebung präsentiert werden (wie z.B. ein Videobild im Fall der Televisi-on oder ein akustisches Signal bei der Telekommunikation) zeichnen sich Telepräsenzsysteme durch eine ganzheitlichere Erfassung des Operationsorts aus. Es werden unterschiedliche Sinnesorgane des Anwenders gleichzeitig mit konsistenten Eindrücken der Remoteumgebung beaufschlagt.

Die in den letzten Jahren vollzogenen Quantensprünge in der Informations- und Kommunikationstechnik lassen die technische Realisierbarkeit derartiger Telepräsenzsysteme zwar in greifbare Nähe rücken, wohingegen deren Wirtschaftlichkeit noch nicht gegeben ist. Insbesondere die zunehmende Verlagerung der Entwicklungsaufwendungen vom Hardware- auf den Softwareanteil stellt die Unternehmen vor eine Reihe neuer Probleme, da neben der historisch gewachsenen Hardwarekompetenz immer mehr Softwarekompetenz aufgebaut oder zugekauft werden muss.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden drei grundlegende Kategorien der Telepräsenz unterschieden, die jede für sich ein bislang ungenutztes Potenzial hinsichtlich möglicher Wettbewerbsvorteile im produktionstechnischen Umfeld bergen.

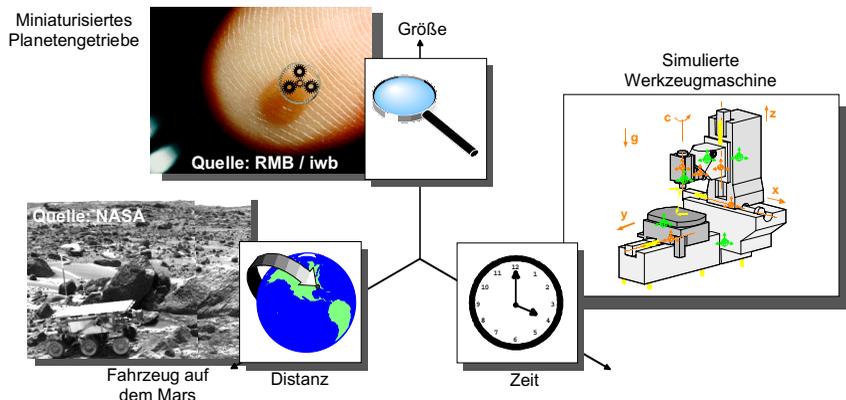


Abbildung 3: Kategorien der Telepräsenz

- *Distanzkompenzierende* Telepräsenzsysteme haben zum Ziel, eine lokale Distanz zwischen dem Operationsort und dem Teleoperationsort zu überbrücken. So kann z.B. - wie während der Mission Pathfinder (NASA 2002) öffentlichkeitswirksam gezeigt - ein Roboter im Weltall von einer Kontrollstation auf der Erde aus ferngesteuert werden, um bestimmte Explorationsaufgaben an weit entfernten Orten durchzuführen.
- *Größenkompenzierende* Telepräsenzsysteme gleichen unterschiedliche Größenverhältnisse zwischen der Welt des Operators und des Operationsgegenstandes aus. Als Anwendungsbeispiele seien hier die Handhabung von miniaturisierten Bauteilen in der Halbleiterindustrie (Höhn & Reinhart 1997) oder die Bearbeitung von schweren Bauelementen bei der Bearbeitung von Schiffsmotoren genannt (TeleroB 2002).
- *Zeitkompenzierende* Telepräsenzsysteme dienen der Überwindung von zeitlichen Restriktionen, indem einerseits einmalig durchgeführte und aufgezeichnete Aktionen zu einem späteren Zeitpunkt beliebig oft exakt von neuem erlebt werden können. Derartige Systeme können zur Übertragung individueller Fertigkeiten eingesetzt werden, um z.B. angehenden Chirurgen die Möglichkeit zu bieten, einzelne, von einem Experten durchgeführte Operationsschritte nachzuvollziehen. Andererseits kann auch die heute schon weit verbreitete Simulation komplexer Systeme anhand von virtuellen Prototypen (vgl. z.B. Gausemeier et al. 2000) als zeitkompenzierende Telepräsenz betrachtet werden. Hier werden zukünftige Eigenschaften eines Systems bereits vorab realitätsnah untersucht und somit die zeitliche Barriere bis zum realen Aufbau des Systems überbrückt.

1.4 Nutzen der Telepräsenz für Entwicklung und Produktion

Jede einzelne der vorgestellten Kategorien der Telepräsenz lässt sich –wie in den folgenden Abschnitten gezeigt- gewinnbringend in die Produktionstechnik einbringen. Voraussetzung

dafür ist, dass der Bedeutung der Telepräsenz für die industrielle Praxis mehr Aufmerksamkeit geschenkt und die grundlegenden technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für ihren effizienten Einsatz geschaffen werden.

1.4.1 Distanzkompensation

Eine internationale Studie belegt, dass die Investitionsgüterindustrie sich zunehmend als Service-Dienstleister positioniert, da sich langfristig mit den Dienstleistungen rund um die angebotenen Produkte mehr Geld verdienen lässt als mit den Produkten selbst (Hudetz & Harnischfeger 1997). Dem zunehmend wichtigen Bereich des Teleservice (vgl. Abbildung 4), dem auch für die Profilierung gegenüber Wettbewerbern zunehmend Vorrang eingeräumt wird (Hudetz & Harnischfeger 1997), wird durch konsequente Nutzung von distanzkompensierenden Telepräsenzsystemen eine vollkommen neue Qualität verliehen.

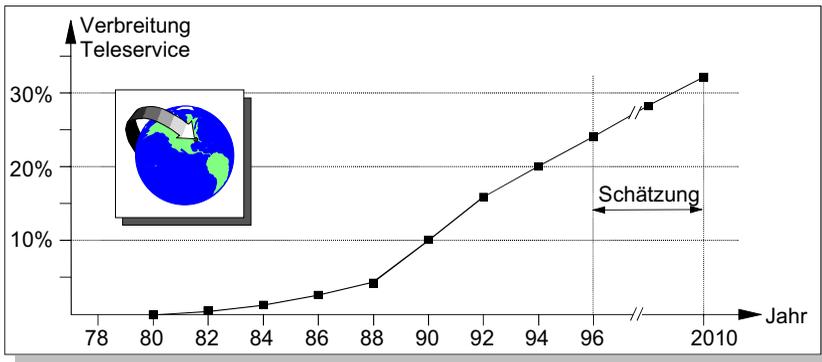


Abbildung 4: Verbreitung des Teleservice (nach Hudetz & Harnischfeger 1997)

Servicetechniker können sich z.B. durch die „virtuelle“ Präsenz vor Ort ein umfassenderes Bild vom momentanen Anlagenzustand sowie der lokalen Umgebung verschaffen, als dies durch die heute bereits realisierte Übertragung einzelner Sensorwerte (Göhringer 2001) möglich wäre. Das nach Wagner 1996 für die Behebung von Störungen so wichtige Verständnis des Gesamtsystems wird damit gefördert und die erforderliche Zeit zur Störungsbehebung gesenkt (vgl. auch Anton et al. 2002).

Aus Sicht des Servicetechnikers nimmt sein Aktionsradius und seine Verfügbarkeit deutlich zu, da er innerhalb kürzester Zeit Arbeiten an unterschiedlichen Orten durchführen kann und somit einen gewissen Grad an *Omnipräsenz*¹ erreicht. Die bei herkömmlichen Serviceeinsät-

¹ Omnipräsenz: Allgegenwart (Drosdowski 1982)

zen anfallenden Kosten werden durch die vergleichsweise geringen Datenübertragungskosten ersetzt.

1.4.2 Größenkompensation

Begünstigt durch die von den Technologieführern, wie z.B. der Automobil- und der Telekommunikationsindustrie, mit Hochdruck vorangetriebene Miniaturisierung von hybriden Komponenten erhalten dimensionskompensierende Telepräsenzsysteme zunehmende Bedeutung für die Produktionstechnik (Höhn & Reinhart 1997, Wechsung 1999, vgl. auch Abbildung 5). Neben den für die voll automatisierte Mikromontage in mittleren bis großen Stückzahlen entwickelten Handhabungssystemen, wie sie z.B. von Büchi et al. 1994, Höhn & Jacob 2000 oder Höhn & Reinhart 1997 vorgestellt wurden, entstehen unterschiedliche Systeme auf Basis von Telepräsenztechnologien für die Montage von kleinen Stückzahlen.

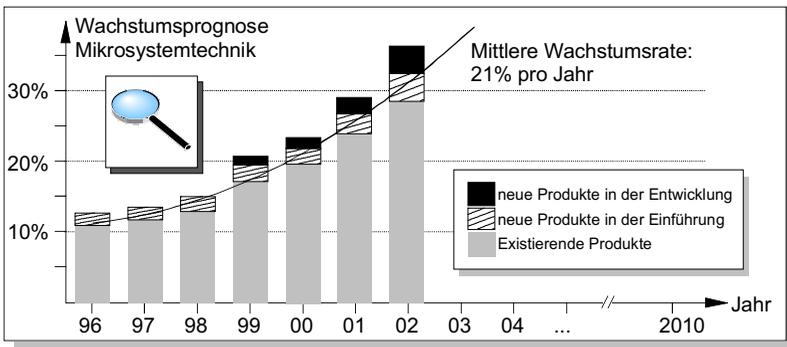


Abbildung 5: Wachstumschancen Mikrosystemtechnik (nach Wechsung 1999)

Die Handhabung kleinster Bauteile in der Größenordnung einiger Mikro- oder Nanometer im Rahmen von Produktions- oder Wartungsprozessen ist mit herkömmlichen Mitteln wie Pinzetten und Mikroskopen aufgrund des unzulänglichen Auflösungsvermögens der menschlichen Sensorik und Aktorik nicht mehr beherrschbar (Vikramaditya 1997). Telepräsenzsysteme gleichen diese Unzulänglichkeit aus und erlauben die indirekte Handhabung kleinster Bauteile unter Nutzung der menschlichen Geschicklichkeit.

1.4.3 Zeitkompensation

Die bedeutende Rolle von Simulationssystemen zur entwicklungsbegleitenden Überprüfung von Produkteigenschaften ist seit einigen Jahren in Industrie und Forschung anerkannt (vgl. z.B. *Lindemann et al. 1997, Rix & Schroeder 2000*). Es steht bereits ein breites Spektrum an Simulationssystemen kommerziell zur Verfügung, die zur zwei oder dreidimensionalen Darstellung unterschiedlichster Abläufe eingesetzt werden können. Die Anwendungsfälle der Systeme reichen von der Simulation lokal konzentrierter Montageabläufe (vgl. z.B. *Cisek & Effert 2001*) bis hin zur Simulation von dezentralen Produktionsstrukturen (*Reinhart & Lulay 1998*).

Zur Erhöhung der Realitätsnähe und zur Steigerung der Aussagekraft der Simulationsergebnisse wird in letzter Zeit immer häufiger die Integration des haptischen² Sinneskanals in die Simulationsumgebungen und somit implizit deren Erweiterung in Richtung zeitkompensierender Telepräsenzsysteme gefordert: Nach *Kalawsky 1999* und *Richard et al. 1999* stellt die effektive Integration unterschiedlicher Sinneseindrücke in VR-Systeme³ den Schlüsselfaktor für den Erfolg zukünftiger VR-Systemen dar.

Speziell für die Planung von komplexen Montagevorgängen leistet die Integration von haptischem Feedback einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Realitätsnähe und eröffnet Einsparungspotenzial beim Bau realer Prototypen. Nach *Reinhart et al. 2001* wird darüber hinaus durch die Rückkopplung haptischer Informationen die Positioniergenauigkeit entscheidend verbessert, die insbesondere bei der Simulation von Mikromontageaufgaben erforderlich ist.

1.5 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zusammenfassend lässt sich folgern, dass in der industriellen Nutzung von Telepräsenztechnologien ein hohes Potenzial für die Sicherung und den Ausbau der Wettbewerbsposition produktionstechnischer Unternehmen zu sehen ist. Trotz dieses hohen Potenzials haben sich Telepräsenzsysteme in der industriellen Praxis bis heute nicht durchsetzen können, so dass sich die Frage stellt: Worin sind die Hürden für eine zügige Verbreitung dieser viel versprechenden Technologie zu sehen und wie können sie überwunden werden?

Wie weiter unten detailliert erläutert wird (vgl. Kap. 2 und 3), können als Antwort auf diese Frage hauptsächlich die hohe Komplexität von Telepräsenzsystemen sowie der Mangel an Erfahrungswerten und Hilfsmitteln für deren effiziente Entwicklung als Hindernisse angeführt werden. Die finanziellen Aufwendungen zur Realisierung der Systeme bewegen sich somit auf einem unwirtschaftlich hohen Niveau und wirken abschreckend auf Entwickler und Anwender.

² Haptik bezeichnet den Tastsinn, exakte Definition siehe Kapitel 2.1

³ VR: Virtuelle Realität = "A computer system used to create an **artificial** world in which the user has the impression of being in that world and with the ability to navigate through the world and manipulate objects in the world." (*Manetta & Blade 1995*)

Ziel dieser Arbeit soll es daher sein, die geeigneten Rahmenbedingungen für die effiziente Entwicklung von Telepräsenzsystemen zu schaffen (vgl. Abbildung 6), um ausgehend von einer Montageaufgabe zum zugehörigen Montagesystem zu gelangen. Dazu soll insbesondere der Aufwand für die zu entwickelnden Softwarekomponenten reduziert sowie Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses zur Verfügung gestellt werden.

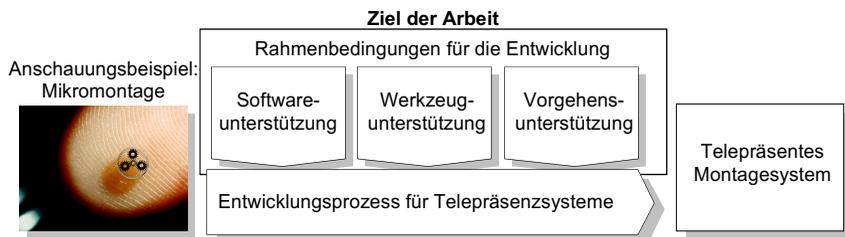


Abbildung 6: Ziel der Arbeit

Als Anschauungsbeispiel wird aufgrund der herausragenden produktionstechnischen Bedeutung der Mikrosystemtechnik ein größenkompensierendes Telepräsenzsystem herangezogen.

1.6 Vorgehensweise

Ausgehend von der in *Kapitel 1* beschriebenen Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit gehen die folgenden Kapitel auf den Stand der Technik im Bereich von Telepräsenzsystemen ein, stellen das Konzept zur Erreichung der formulierten Zielsetzung vor und verifizieren schließlich die Einsatztauglichkeit des vorgeschlagenen Konzepts (vgl. Abbildung 7).

In *Kapitel 2* wird dazu als Grundlage für die Ausführungen zum Stand der Technik eine Definition wichtiger Begriffe des hier betrachteten Problembereichs sowie eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise von Telepräsenzsystemen gegeben. Anhand der Systembeschreibung sowie einer Skizze des Entwicklungsablaufes von Telepräsenzsystemen werden die wesentlichen Herausforderungen bei deren Entwicklung beschrieben und zu einem Bewertungsschema zusammengefasst.



Abbildung 7: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Auf Basis dieses Bewertungsschemas werden in *Kapitel 3* repräsentative Telepräsenzsysteme aus Industrie und Forschung vorgestellt und bestehende Ansätze zur Bewältigung der Herausforderungen analysiert. Die Analyseergebnisse werden schließlich dazu herangezogen, um den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abzuleiten.

Kapitel 4 stellt den im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Ansatz zur Deckung des Handlungsbedarfs im Überblick dar und grenzt drei zu bearbeitende Handlungsfelder ein. In den *Kapiteln 5 bis 7* werden die auf den einzelnen Handlungsfeldern durchgeführten Maßnahmen erläutert, die die Bereitstellung einer softwaretechnischen, methodischen und werkzeugtechnischen Unterstützung des Entwicklers von Telepräsenzsystemen ermöglichen. Soweit erforderlich, wird der Erläuterung der erzielten Ergebnisse eine Beschreibung der Technologien und Methoden vorangestellt, die während der Entwicklung eingesetzt wurden.

Kapitel 8 dokumentiert die praktische Umsetzung und Verifikation des vorgestellten Konzeptes mittels eines Anwendungsbeispiels aus der telepräsenten Mikromontage. Neben der Anwendung des Konzeptes zum Aufbau einer Mikromontageanlage wird dabei anhand experimenteller Untersuchungen überprüft, ob die so entwickelte Anlage zur telepräsenten Durchführung von Mikromontageaufgaben geeignet ist.

Die in *Kapitel 9* vorgenommene Diskussion der erzielten Ergebnisse bewertet den vorgestellten Lösungsansatz aus qualitativer und quantitativer Sicht. Im Vordergrund steht dabei die Abwägung der wesentlichen Vor- und Nachteile des vorgeschlagenen Konzeptes, um daraus eine Aussage über die Einsatztauglichkeit des Ansatzes abzuleiten. *Kapitel 10* schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick darauf ab, wie die vorgestellten Konzepte langfristig in zukünftige Einsatzfelder von Telepräsenztechnologien einfließen können.