





Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

**Ein Beitrag zur Entwicklung  
Telepräsenter Montagesysteme**

**Oliver Anton**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender : Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. H. Ulbrich

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Färber

Die Dissertation wurde am 9.10.2002 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
16.12.2002 angenommen.



# **Forschungsberichte**

**iwb**

***Band 175***

*Oliver Anton*

***Ein Beitrag zur Entwicklung  
telepräsenter Montagesysteme***

---

*herausgegeben von*  
*Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh*  
*Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*

---

*Herbert Utz Verlag*



# 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  
begündeten 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Analyse des Aufgabengebietes</b>	<b>11</b>
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
<b>3</b>	<b>Bestehende Ansätze und Handlungsbedarf</b>	<b>37</b>
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

## Inhaltsverzeichnis

---

3.1.4	<i>Mikromontage</i>	40
3.2	Bewertung des Standes der Technik	41
3.3	Handlungsbedarf	42
<b>4</b>	<b>Rahmenkonzept für telepräsente Montagesysteme</b>	<b>45</b>
4.1	Lösungsansatz	45
4.2	Handlungsfelder	46
<b>5</b>	<b>Strukturmodell</b>	<b>49</b>
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 Domäenschicht	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
<b>6</b>	<b>Vorgehensmodell</b>	<b>89</b>
6.1	Vorgehensübersicht	89
6.2	Frameworkeinsatz	91
6.2.1	<i>Instanzierung des Telepräsenzzenarios</i>	92
6.2.2	<i>Instanzierung erforderlicher Modalitätskanäle</i>	93
6.2.3	<i>Instanzierung der Kommunikationsverbindungen</i>	94
6.2.4	<i>Integration der Hardwaretreiber</i>	95
6.3	Frameworkanpassung	97

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



## 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 gelgenden 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."

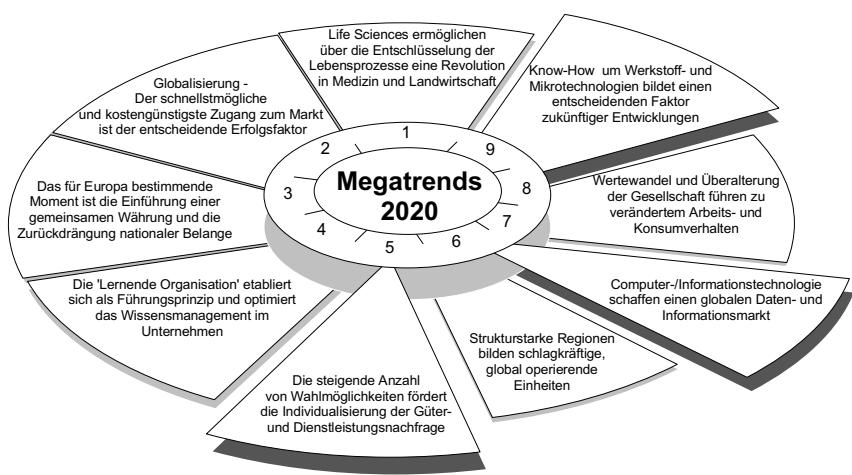


Abbildung 1: Megatrends des 21. Jahrhunderts (Little 2000)

Little 2001 bestätigt somit ein Positions Papier 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. Jahrhunderts 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*).

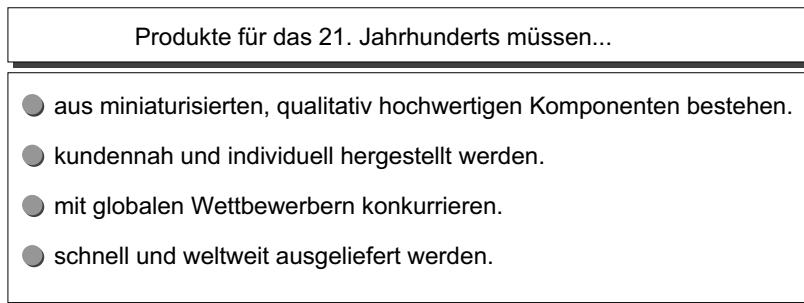


Abbildung 2: Herausforderungen für Produktionsunternehmen

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 Wettbewerben:

- 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 Television 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.

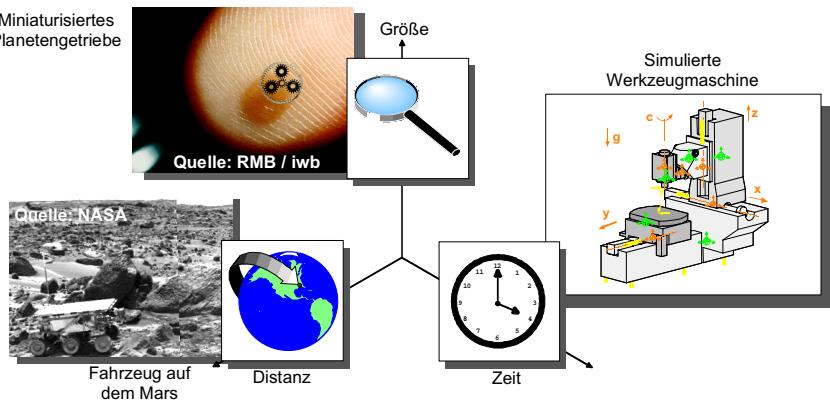


Abbildung 3: Kategorien der Telepräsenz

- *Distanzkompensierende* 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.
- *Größenkompensierende* 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*).
- *Zeitkompensierende* 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 zeitkompensierende 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 Distanzkompenstation

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 distanzkompenzierenden Telepräsenzsystemen eine vollkommen neue Qualität verliehen.

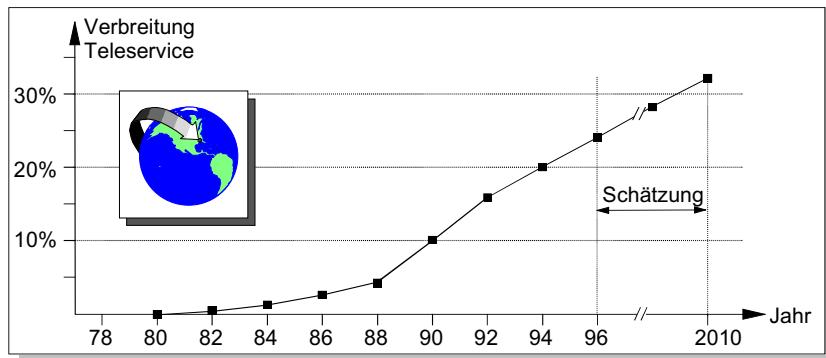


Abbildung 4: Verbreitung des Teleservice (nach *Hudetz & Harnischfeger 1997*)

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*<sup>1</sup> erreicht. Die bei herkömmlichen Serviceeinsätzen

<sup>1</sup> 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.

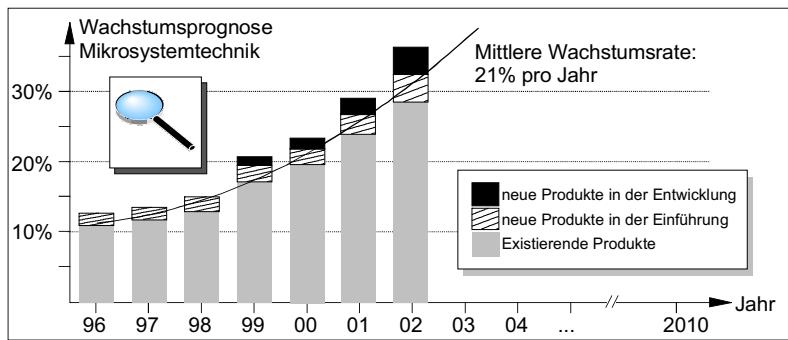


Abbildung 5: Wachstumschancen Mikrosystemtechnik (nach Wechsung 1999)

Die Handhabung kleinstter 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 kleinstter 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 haptischen<sup>2</sup> 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-Systeme<sup>3</sup> 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.

---

<sup>2</sup> Haptik bezeichnet den Tastsinn, exakte Definition siehe Kapitel 2.1

<sup>3</sup> 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.

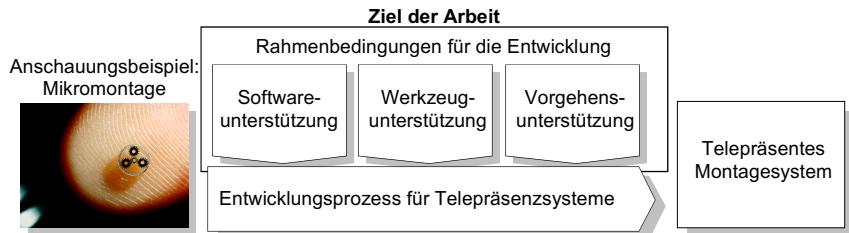


Abbildung 6: Ziel der Arbeit

Als Anschauungsbeispiel wird aufgrund der herausragenden produktionstechnischen Bedeutung der Mikrosystemtechnik ein großenkompensierendes 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.



## 2 Analyse des Aufgabengebietes

Nach der Erläuterung der Motivation dieser Arbeit in Kapitel 1 definiert dieses Kapitel 2 häufig verwendete Begrifflichkeiten im hier betrachteten Problembereich. Danach werden die Charakteristika von Telepräsenzsystemen beschrieben, wobei die Systeme als Verständnisgrundlage zunächst einer gesamtheitlichen, funktionalen Betrachtung unterworfen werden. In einem nächsten Schritt erfolgt die Dekomposition des Gesamtsystems in funktionale Einheiten sowie eine hardwareorientierte Analyse der identifizierten Teilsysteme. Auf dieser Grundlage wird ein Entwicklungsprozess für Telepräsenzsysteme skizziert sowie die dabei zu bewältigenden Herausforderungen und einzuhaltende Randbedingungen aus Sicht der Produktionstechnik aufgezeigt. Die Analyse der Herausforderungen und Randbedingungen wird zum Abschluss dieses Kapitels dazu herangezogen, den Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit einzuzgrenzen und ein produktionstechnisches Bewertungsschema für Telepräsenzsysteme zu definieren.

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Der Gedanke, an jedem beliebigen, entfernten Ort jederzeit präsent sein zu können, gilt seit langem als Menschheitstraum und wird seit Mitte der 50er Jahre in der Wissenschaft diskutiert (Sheridan 1992a). Dementsprechend werden in diesem Kontext eine Vielzahl unterschiedlicher Begriffe eingesetzt, so dass zur Einordnung und Abgrenzung der Terminologie zunächst eine Definition der wichtigsten Begriffe im Betrachtungsbereich teleoperierter Systeme vorzunehmen ist (vgl. Färber 1998, Uhl 2000 und Abbildung 8):

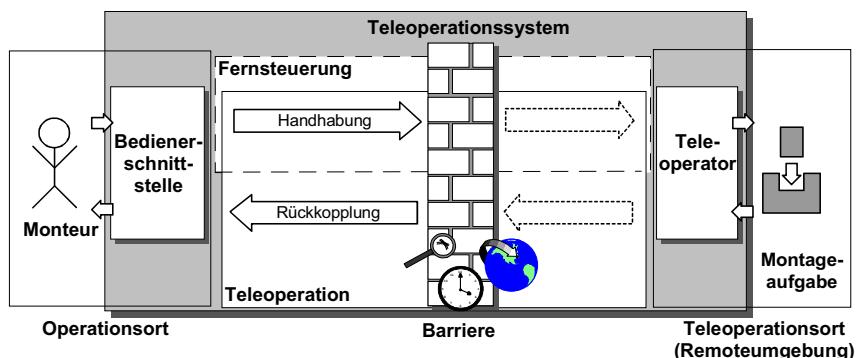


Abbildung 8: Begriffe im Betrachtungsbereich "teleoperierte Systeme"

- **Monteur (Operator)** bezeichnet den menschlichen Bediener
- **Operationsort** ist die Lokalität, von der aus der Monteur eine ferngesteuerte Handhabungsoperation durchführt.

- **Fernsteuerung** wird hier in Anlehnung an *Strytsch & Weiß 1999* als das Eingeben, Übertragen und Ausgeben von „Steuerinformationen“ zur Beeinflussung eines entfernten Objektes oder Prozesses verstanden. Zur Abgrenzung gegenüber den unten definierten Begriffen → *Teleoperation* und → *Telepräsenz* erfolgt die Rückkopplung zum Operator nicht → *multimodal*.
- **Teleoperation** umfasst die Erweiterung der sensoriellen und manipulatorischen Fähigkeiten eines Operators für das Wirken an einem nicht direkt zugänglichen Ort, dem Teleoperationsort.
- **Teleoperationsort** beschreibt die Lokalität, an dem sich das vom menschlichen Bediener ferngesteuerte System befindet, um die eigentliche Handhabungsoperation durchzuführen. Zwischen Operations- und Teleoperationsort kann eine große Distanz liegen.
- **Remoteumgebung** vgl. → *Teleoperationsort*
- **Manipulator/Teleoperator** ist ein universell einsetzbares Mensch-Maschine-System, welches es einem Operator erlaubt, Handhabungsoperationen an einem für ihn nicht direkt zugänglichen Teleoperationsort durchzuführen. Bei großen Entfernungen zwischen dem Bediener und dem Teleoperationsort spricht man häufig auch von einem Teleoperator. Charakteristikum für den Teleoperator ist die indirekte Interaktion zwischen dem Bediener und einem zu manipulierenden Gegenstand.
- **Telerobotik** ist die weiterentwickelte Form der Teleoperation, bei der der Operator lediglich als Überwacher fungiert. Die vom Operator formulierten Ziele und Randbedingungen werden quasi autonom vom Teleoperator durchgeführt und lediglich der aktuelle Stand der kommandierten Teleoperation an den Operator zurückgemeldet.
- **Taktilität** bezeichnet die taktile Sinneswahrnehmung (Hautsinn) über mechanische und thermische Rezeptoren in den verschiedenen Hautschichten.
- **Kinästhetik** umfasst die propriozeptive Sinneswahrnehmung der Lage und Bewegung des eigenen Körpers und der auf den Körper wirkenden Kräfte.
- **Haptik** wird hier als Oberbegriff für Kinästhetik und Taktilität verstanden.
- **Multimodalität** beschreibt das gleichzeitige, konsistente Ansprechen unterschiedlicher menschlicher Sinne (Audio, Video, Haptik, Olfaktorik<sup>4</sup>, Gustatorik<sup>5</sup>) zur Vermittlung bestimmter Umgebungsinformationen.
- **Modalitätskanal** bezeichnet eine modalitätsspezifische Übertragungseinheit zwischen Operator und Teleoperator, über die eine oder mehrere Informationen der gleichen Modalität transportiert werden.
- **Telepräsenz** bezeichnet das Gefühl des Operators, in der Remoteumgebung physisch präsent zu sein. Dieser Eindruck wird anhand der sensoriellen Erfassung relevanter Infor-

---

<sup>4</sup> Den Geruchssinn betreffend

<sup>5</sup> Den Geschmackssinn betreffend

mationen der Remoteumgebung und deren natürlicher und wirklichkeitsnaher Ausgabe an den Operator bewirkt. Die wirklichkeitsnahe Ausgabe umfasst eine multimodale Vermittlung von Informationen aus der Remoteumgebung. Ideale Telepräsenz ist die totale sensorielle „Immersion“ (Eintauchen) des Operators in die Remoteumgebung.

- **Telepräsenzbarriere** ist die abgrenzende Größe, die den Operator von der Teleoperatorseite separiert und die zur Durchführung der Teleoperation überwunden werden muss.
- **Telepräsenznetzwerk** ist die Kombination aus ein oder mehreren Bedienerschnittstellen und Teleoperatoren über zwischengelagerte Kommunikationsverbindungen.
- **Telepräsenzkomponente** wird als Oberbegriff für Operatoren und Teleoperatoren in ihrer Rolle als Teilnehmer in einem Telepräsenznetzwerk verwendet.
- **Telemontage** ist der Oberbegriff für die Montage mittels großen-, distanz- und zeitkompensierender Telepräsenzsysteme.

## 2.2 Funktionsweise von Telepräsenzsystemen

Funktional betrachtet erzeugt der Bediener in *klassischen* Fernsteuerungssystemen Stellbefehle (häufig Sollpositionskommandos) für den durch die Teleoperationsbarriere von ihm separierten Teleoperator (vgl. Abbildung 9).

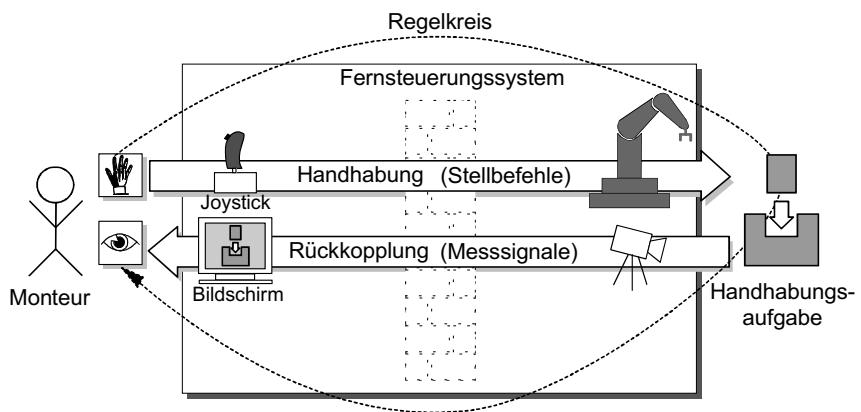


Abbildung 9: Funktionsorientierte Struktur eines Telepräsenzsystems

Die z.B. durch Handbewegungen des Bedieners erzeugten Stellbefehle werden an den Teleoperator übertragen und von diesem ausgeführt, indem er die geforderte Zielposition anfährt. Während der Verfahrbewegung werden unimodale Informationen aus der Remoteumgebung erfasst und an den Bediener zurück gemeldet. Der Bediener zieht aus den Informatio-

nen Rückschlüsse über den Erfolg der von ihm gewünschten Operation und korrigiert evtl. die Position des Teleoperators durch erneute Positionskommandos. Er schließt somit direkt den gesamten Regelkreis zur Kommandierung des Teleoperators.

In *multimodalen* Telepräsenzsystemen erfolgt neben der Aktualisierung der Ist-Position des Teleoperators eine umfangreichere Erfassung des Teleoperationsorts, um möglichst alle Empfindungsbereiche des Bedieners anzusprechen und ihm ein höchstes Maß an Realitätsnähe zu vermitteln (vgl. Abbildung 10). Für die Betrachtung von Montageoperationen spielen die Empfindungsbereiche Video, Audio, Kinästhetik und Taktilität die entscheidende Rolle (*Abe et al. 1996*), so dass sich die weiteren Ausführungen auf diese Modalitäten beschränken.

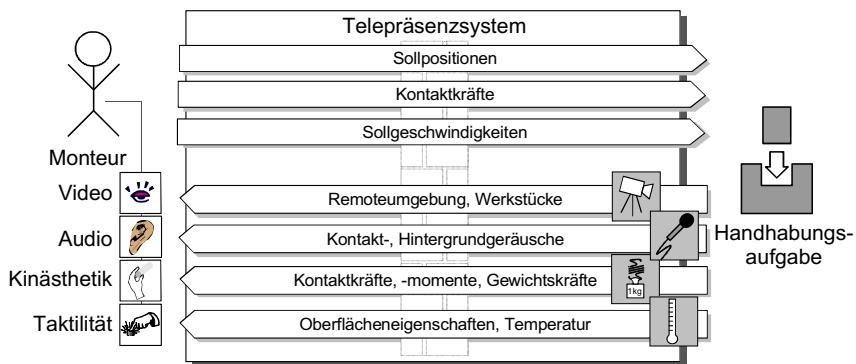


Abbildung 10: Modalitätsorientierte Struktur eines Telepräsenzsystems

Bei der telepräsenten Handhabung von Bauteilen treten unterschiedliche, telepräsenzspezifische Effekte auf, die teils abhängig, teils unabhängig von der Kategorie der Telepräsenz sind.

Als dimensionsunabhängiger Effekt ist beispielsweise zu berücksichtigen, dass sämtliche Informationen, die aus der Remoteumgebung sensorisch extrahiert worden sind, auf der Operatorseite konsistent und unverzögert ausgegeben werden müssen, um intermodale Störungen des Realitätseindruckes auszuschließen. Wird dem Bediener etwa haptisch eine Kollision durch Ausgabe von Kontaktkräften vermittelt, so muss die Kontaktssituation auch in den anderen Modalitäten z.B. als visuelle Information dargestellt werden. Intermodale Inkonsistenzen beeinflussen die Leistungsfähigkeit des Bedieners in der Montageumgebung negativ, da er dann häufig von einer kontinuierlichen Positionierstrategie auf eine „move and wait“-Strategie wechselt. Der Bediener zerlegt in diesem Fall den Weg zu seinem Ziel in einzelne Etappen und setzt die Gesamtbewegung abschnittsweise um. Nach jeder Etappe wartet er, bis der Teleoperator tatsächlich die gewünschte Position erreicht hat und nimmt erst dann die nächste Etappe in Angriff. Dies beeinträchtigt zum einen die Realitätsnähe, da kein unmittelbarer Zusammenhang mehr zwischen den kommandierten Befehlen und den ausgeführten Aktionen ersichtlich ist. Zum anderen wird durch die häufigen Wartezeiten die Effizienz und Genauigkeit bei der Durchführung der Handhabungsaufgabe erheblich reduziert. Ein ähnli-

cher Effekt ist zu beobachten, wenn die Datenübertragung zwischen Operator- und Teleoperatorseite um mehr als 300ms verzögert wird (*Bejczy et al. 1990*).

Als Beispiel für einen Effekt, der lediglich in großenkompensierenden Telepräsenzsystemen auftritt, seien so genannte Skalierungseffekte angeführt. Diese bewirken, dass beim Umgang mit Bauteilen in der Größenordnung einiger Mikro- oder Nanometer die aus der Makromontage bekannten, volumenbezogenen Kräfte (z.B. die Gravitationskraft), gegenüber flächenbezogenen Kräften (z.B. van der Val'sche Kräfte) in den Hintergrund (*Reinhart et al. 2000*) treten. Bauteile, die nach Abschluss einer Fügeoperation losgelassen werden, lösen sich somit nicht zwangsläufig vom Greifer sondern bleiben aufgrund elektrostatischer Kräfte am Greifer kleben und müssen anderweitig von diesem getrennt werden. Für weitere Details sei auf *Fearing 1995* bzw. *Danuser et al. 1997* verwiesen, die die wesentlichen Skalierungseffekte bei der Handhabung von Bauteilen auf der Mikro- bzw. Nanoebene zusammenfassen.

Die beschriebene Gesamtfunktionalität eines Telepräsenzsystems wird durch das Zusammenwirken einer Vielzahl funktionaler Einheiten ermöglicht, die teilweise als Hardware-Komponenten wie z.B. Ein-/Ausgabegeräte auf der Operator- bzw. Teleoperatorseite oder auch als Software-Komponenten in der Kommunikations-Infrastruktur dazwischen angeordnet sind. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten einer näheren Betrachtung unterzogen.

## 2.3 Struktur von Telepräsenzsystemen

In Verfeinerung der funktionsorientierten Struktur (vgl. Abbildung 8) lassen sich die in Abbildung 11 dargestellten prinzipiellen Teilsysteme einer Telepräsenzeinrichtung unterscheiden:

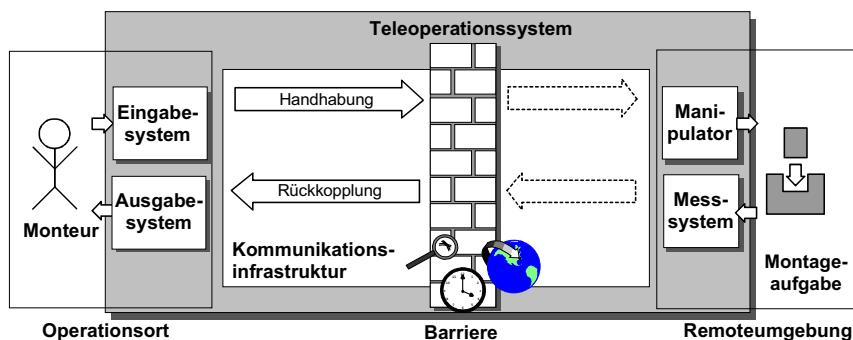


Abbildung 11: Teilsysteme eines Telepräsenzsystems

In der Remoteumgebung sind rund um den Manipulator die sensorischen Komponenten zur Erfassung relevanter Umgebungsinformationen angeordnet. Auf der Operatorseite werden die in der Remoteumgebung erfassten Daten mittels geeigneter Ausgabegeräte in den unterschiedlichen Modalitäten an den Monteur vermittelt. Die Kommunikationsinfrastruktur sorgt für die Übertragung von Informationen zwischen dem Operationsort und der Remoteumgebung. Wie in den nächsten Abschnitten gezeigt wird, kann jedes der Teilsysteme Operator, Teleoperator und Kommunikationsinfrastruktur wiederum in einzelne Komponenten zerlegt werden, die steuerungstechnisch auf ein oder mehrere unterschiedliche Hardwareplattformen verteilt sein können.

### 2.3.1 Teilsystem Operator

Das Teilsystem Operator wird dominiert von der Bedienerschnittstelle, die sich aus unterschiedlichen Geräten zur multimodalen Interaktion mit dem Bediener zusammensetzt (vgl. Abbildung 12). Die multimodale Interaktion umfasst zum einen die Eingabe von Daten (wie z.B. Positionen) in das Telepräsenzsystem durch den Bediener und zum anderen die Ausgabe von Daten an den Bediener (wie z.B. Kontaktkräfte).

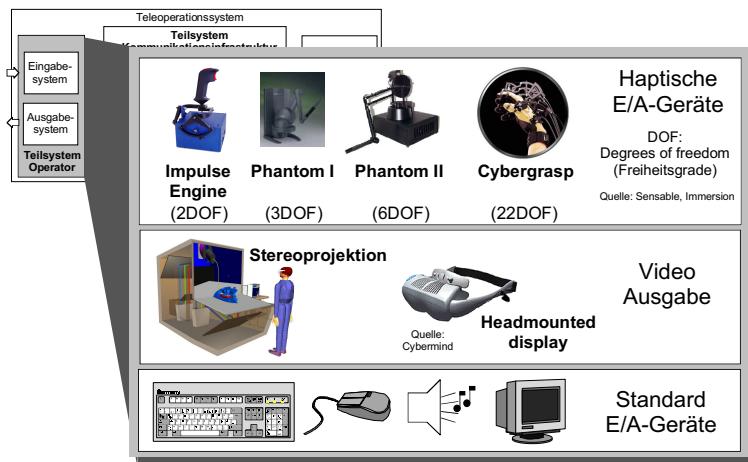


Abbildung 12: Hardwaredetails des Teilsystems Operator

Für die Interaktion mit dem Bediener stehen neben den klassischen Medien wie Tastatur, Maus und Bildschirm eine Vielzahl modalitätsspezifischer Geräte zur Verfügung, wobei im hier betrachteten produktionstechnischen Kontext nur die Modalitäten Haptik<sup>6</sup> sowie Audio

---

<sup>6</sup> Oberbegriff für Taktilität und Kinästhetik, vgl. Definition in Abschnitt 2.1

und Video eine wesentliche Rolle spielen. Schwerpunkt der Betrachtungen bildet die haptische Modalität, da dieser zur Nutzung der menschlichen Geschicklichkeit bei Montageaufgaben eine besondere Bedeutung zukommt (*Abe et al. 1996*).

### 2.3.1.1 Modalität Haptik

Für die haptische Interaktion werden Joystick-ähnliche Geräte eingesetzt, die eine Rückkopplung von Kräften und/oder Momenten an den Bediener erlauben. Die Geräte unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Anzahl der unterstützten Freiheitsgrade sowie der maximal darstellbaren Kräfte und Momente. Die Joysticks erfüllen meist neben ihrer Funktion als Kraftausgabegerät die Aufgabe der Sollpositionsauftnahme für die Steuerung des Teleoperators. Dazu werden die vom Bediener durchgeführten Handbewegungen mit dem Joystick erfasst und an den Teleoperator weitergeleitet.

Bedingt durch die hohe Sensibilität der menschlichen Rezeptoren für haptische Sinneseindrücke sind speziell die Geräte zur haptischen Ausgabe auf der Operatorseite technisch höchst anspruchsvoll. Im Gegensatz zu beispielsweise visuellen Rezeptoren, die Informationen mit einer Frequenz von bis zu 40 Hz verarbeiten können, sind haptische Rezeptoren in der Lage, Frequenzen bis zu 320 Hz zu registrieren (*Burdea 1996*). Regelmäßigkeiten zur Ausgabe haptischer Informationen sind demgemäß idealerweise mit einer Abtastrate von mindestens 1 kHz zu betreiben (*Sheridan 1992*). Die auszugebenden Kräfte und Momente können entweder durch Messung auf der Teleoperatorseite oder durch Berechnung anhand von Kontaktmodellen bereitgestellt werden. Da der menschliche Bediener in Teleoperationssystemen, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, direkt den Positionsregelkreis schließt, ist die hohe Übertragungsrate auch bei der Auswahl möglicher Kommunikationsmechanismen zwischen den verteilten Komponenten zu berücksichtigen.

Neben den Regelungstechnischen Aspekten sind haptische Ein-/Ausgabegeräte vom Zielkonflikt zwischen einer hohen Dynamik und einer hinreichenden mechanischen Steifigkeit geprägt (*Burdea 1996*). Im Sinne einer hohen Transparenz der haptischen Schnittstelle für den Bediener ist dafür zu sorgen, dass die beweglichen Teile des Gerätes aus möglichst leichten und filigranen Elementen aufgebaut sind. Die Forderung nach einer hohen Transparenz der Geräte ergibt sich aus der Vorstellung, dass die Eingabegeräte als solche für den Bediener nicht spürbar sein sollten, da dies den vermittelten Realitätseindruck schmälern würde (*Burdea 1996*). Um jedoch bei der Wiedergabe von harten Kontakten eine realitätsnahe Ausgabe von Kontaktkräften und -momenten zu ermöglichen, ist eine hohe Steifigkeit des Gerätes erforderlich.

Da die Entwicklung haptischer Geräte nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, sei für weitere Einzelheiten auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen: *Stone 2000* gibt beispielsweise einen Abriss von der historischen Entwicklung haptischer Geräte. Detailliertere Beschreibungen der Randbedingungen bei der Entwicklung haptischer Schnittstellen finden sich z.B. bei *Fischer et al. 1990* oder auch *Basdogan & Srinivasan 1997*. *Burdea* fasst übersichtlich die unterschiedlichen Probleme und Konzepte beim Aufbau von haptischen Ein-/Ausgabegeräten zusammen (*Burdea 1996*, *Burdea et al. 1996*). Die Herausforderungen bei der Modellierung

haptischer Kontakte und der dafür entwickelten Ansätze können bei *Adams et al. 1998a*, *Chang & Colgate 1997* oder *Ellis et al. 1997* nachgelesen werden. Eine gängige Methode zur Modellierung haptischer Kontakte wird bei *Salisbury & Zilles 1995* als „God-Object-Methode“ beschrieben. Zu Aspekten der Regelungstechnischen Stabilität haptischer Geräte in VR-Umgebungen sei auf die Arbeiten von *Adams et al. 1999*, *Basdogan & Srinivasan 1997*, und *Buss & Schmidt 1999* verwiesen.

Die genannten, teilweise konkurrierenden Ziele sowie die hohe Intensität der Forschungsaktivitäten spiegeln sich in einer großen Anzahl haptischer Geräte wider, die in unterschiedlichen Forschungseinrichtungen entwickelt, aber auch teilweise schon kommerziell vertrieben werden. *Patron & Petzold 2001* geben eine aktuelle Übersicht der momentan verfügbaren Geräte und stellen ein Verfahren zur applikationsabhängigen Selektion haptischer Schnittstellen vor.

### 2.3.1.2 Modalität Video

Zur Ausgabe von visuellen Informationen an den Bediener stehen sich zwei prinzipiell verschiedene Konzepte gegenüber, die grob als kamera- bzw. modellbasierte Ansätze klassifiziert werden können.

In kamerabasierten Ansätzen wird die in der Remoteumgebung mittels einer oder mehrerer Kameras erfasste gesamte Remoteszene als Realbild auf die Operatorseite übertragen und dem Bediener über unterschiedliche Ausgabemedien wie HMDs<sup>7</sup>, Monitore, Stereoprojektionswände etc. vermittelt. Die dabei anfallenden Datenströme sind sehr umfangreich und stellen höchste Anforderungen an die Bandbreite der Übertragungskanäle.

Zur Begrenzung der zu übertragenden Datenströme verfolgen modellbasierte Ansätze die Strategie, lediglich die Lage derjenigen Objekte der Remoteszene zu übertragen, die ihre Position dynamisch verändern können. Zur Lageerkennung werden wie weiter unten beschrieben (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) z.B. Bildverarbeitungs- oder Trackingsysteme eingesetzt. Voraussetzung für die modellbasierte Darstellung ist der operatorseitige Aufbau eines Modells der Remoteumgebung. Die auf der Remoteseite gemessenen Lagedaten werden auf der Operatorseite zur Aktualisierung der Lage der Objekte herangezogen. Die grafische Darstellung der Objekte kann sich auf eine rein synthetische Darstellung von Oberflächeneigenschaften stützen oder zur Steigerung der Realitätsnähe die Oberflächen mit Texturen belegen, die zuvor aus der Remoteumgebung extrahiert worden sind (*Burkert & Passig 2001*).

In beiden Ansätzen wird oft das Ziel verfolgt, das Sichtfeld in der Remoteumgebung an die Kopfposition des Bedieners anzupassen. Dazu wird die Kopfposition des Bedieners mittels eines Trackingsystems erfasst und an eine Schwenk-Neige-Aktorik auf der Teleoperatorseite weitergereicht, die den Kamerablickwinkel entsprechend dem Bedienerblickwinkel nach führt (*Baier et al. 2001*).

---

<sup>7</sup> HMD: Headmounted Display (Am Bedienerkopf befestigtes, tragbares Visualisierungssystem)

### 2.3.1.3 Modalität Audio

Zur akustischen Rückkopplung von Informationen aus der Remoteumgebung werden in der Regel Kopfhörer eingesetzt, da diese zum einen Störgeräusche der Operatorumgebung effektiv eliminieren und zum anderen das ideale Medium zur Abbildung räumlich verteilter Geräuschquellen darstellen (*Begault 1999*).

Letzterem Aspekt kommt bei der Nutzung akustischer Informationen zur Lokalisierung von Objekten eine zentrale Rolle zu, da der auditorische Sinn ohne die exakte Identifizierbarkeit einer Schallquelle seine Funktion „Gehör steuert Auge“ nicht erfüllen kann (*Wenzel 1992*). Nach *Wenzel 1992, Begault 1999* wird der auditorische Sinn während der Lokalisierung von Objekten nämlich hauptsächlich dazu eingesetzt, um die Augen auf das zu lokalisierende Objekt auszurichten und die notwendige Entfernungsschätzung dann mittels des visuellen Sinns durchzuführen. Speziell bei hoher Arbeitsbelastung oder komplexen räumlichen Handhabungsaufgaben ist durch die Interaktion der beiden Sinne eine Effizienzsteigerung zu beobachten (*Wenzel 1992*).

### 2.3.2 Teilsystem Teleoperator

Auf Seiten des Teleoperators kann - wie in den nächsten Abschnitten gezeigt - prinzipiell zwischen dem eigentlichen Arbeitssystem (dem Manipulator) und dem Registrierungssystem zur Erfassung der benötigten Daten aus der Remoteumgebung unterschieden werden (s. Abbildung 13).

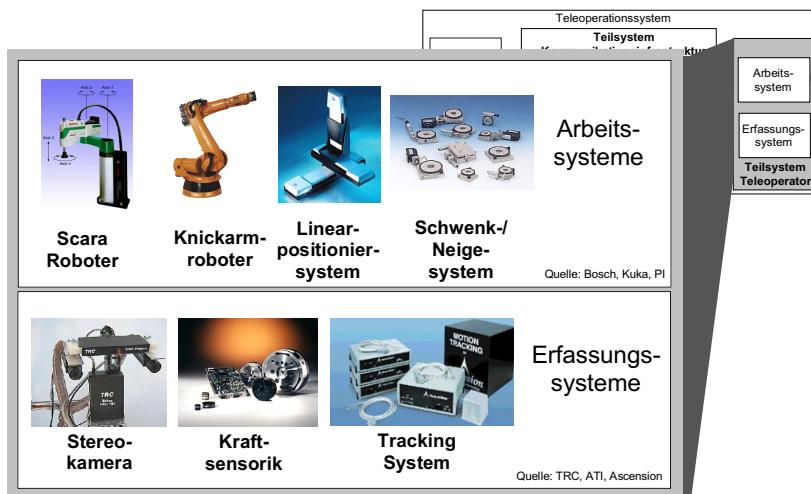


Abbildung 13: Details Teilsystem Teleoperator

Im Gegensatz zu den stark modalitätszentrierten Betrachtungen auf der Operatorseite orientieren sich die folgenden Abschnitte somit stärker an einer Unterscheidung zwischen der Ausgabe von Informationen *an* die Remoteumgebung und der Aufnahme von Informationen *aus* der Remoteumgebung. Die Motivation für die Änderung der Betrachtungsperspektive ergibt sich aus der Tatsache, dass Informationen, die in der Remoteumgebung in einer bestimmten Modalität aufgenommen werden, nicht zwangsläufig auf der gleichen Modalität an den Operator ausgegeben werden müssen. Eine visuelle Information für die Operatorseite (z.B. eine Balkenanzeige für gemessene Kräfte) kann dabei in der Remoteumgebung als haptische Information (z.B. mittels einer Kraftmessdose) aufgenommen werden, so dass hier die Grenzen zwischen den Modalitäten fliessend sind. Eine Unterscheidung zwischen Arbeits- und Erfassungssystem erscheint daher sinnvoller.

### 2.3.2.1 Arbeitssystem

Eine nähere Betrachtung des Arbeitssystems lässt erkennen, dass es grob in die Bereiche Bewegungsaktorik und -sensorik sowie die Endeffektoraktorik und -sensorik zerlegt werden kann.

Bewegungsaktorik und -sensorik sollten aus produktionstechnischer Sicht als monolithisches Zukaufteil „Manipulator“ betrachtet werden, das Sollpositionen aufnimmt und Idealerweise Istpositionen ausgibt. Als Manipulatoren werden je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Arten von Robotern wie z.B. Knickarm- oder Scararoboter aber auch Linearpositioniersysteme eingesetzt (s. Abbildung 13).

Die Roboter sind häufig mit unterschiedlichen Endeffektoren wie Greifern oder Tastnadeln aber auch Löt- oder Klebepistolen ausgestattet. Bei flexiblen Systemen kann der Endeffektor während dem Betrieb des Arbeitssystems voll- oder halbautomatisch ausgetauscht werden, um aufgabenspezifisch das richtige Werkzeug einsetzen zu können.

Bedingt durch die oben beschriebenen Skalierungseffekte sind allerdings bei der Handhabung kleinsten Bauteile die aus der Makromontage bekannten Handhabungs- und Positionierstrategien nicht direkt auf die Mikromontage übertragbar (*Anton et al. 2000*). *Chen et al. 2000*, *Höhn & Jacob 2000*, *Höhn 2001*, *Höhn & Reinhart 1997* und *Nelson et al. 1998* stellen unterschiedliche Strategien zur Handhabung und Positionierung von Mikrobauteilen vor. Als besonders zukunftsweisend sind die Arbeiten von *Höppner 1999* anzusehen, die sich mit der berührungslosen Handhabung von Mikrobauteilen beschäftigen, da dadurch deren hoher Berührungssempfindlichkeit Genüge getan wird.

Die Kommandierung des Manipulators bedingt häufig den Einsatz eines hybriden Regelungskonzeptes, das abhängig von der Kontakt situation in der Remoteumgebung ein Umschalten des Reglermodus von Positions- auf Kraftregelung erlaubt. Während der freien Bewegung im Raum wird der Manipulator üblicherweise zur Ansteuerung eines Zielortes positionsgeregelt betrieben, wohingegen im Fall des Kontaktes mit einem Objekt der Remoteumgebung auf ein kraftgeregeltes Verfahren umgestellt werden muss. Nur so lassen sich die bei der aufgetrete-

nen Kollision wirkenden Kräfte und Momente auf ein Maß beschränken, das jegliche Gefahr für Mensch und Material ausschließt.

### 2.3.2.2 Erfassungssystem

Neben den im Arbeitssystem integrierten Sensoren wird meist eine unterschiedlich große Anzahl von zusätzlichen Messsystemen zur Erfassung der Remoteumgebung eingesetzt. Die Herausforderung in diesem Kontext besteht darin, exakt die für die Durchführung einer Handhabungsaufgabe relevanten Informationen sensorisch aus der Remoteumgebung zu extrahieren, so dass dem Operator ein realitätsnaher Eindruck der Handhabungsoperation vermittelt werden kann. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es dabei nicht sinnvoll, für jede Informationsquelle in der Remoteumgebung einen eigenen Sensor vorzusehen, sondern vielmehr auf Basis von physikalischen Ursache-Wirkzusammenhängen einzelne Umgebungsinformationen zu neuen Informationen zu fusionieren. Ziel dabei ist es, durch geschickte Kombination selektiv erfasster Umgebungseindrücke ein möglichst realitätsnahes Abbild der Remoteumgebung aufzubauen.

Trotz des Wunsches der Sensorminimierung werden bestimmte Sensorkomponenten wie Kraftsensoren, Mikrofone oder Bilderfassungssysteme häufig eingesetzt (s. Abbildung 13). Letztere werden mitunter auf mobilen Plattformen angebracht, um den Blickwinkel des Bilderfassungssystems aktiv an die auf der Operatorseite erfasste Lage des Bedienerkopfes anpassen zu können.

### 2.3.3 Teilsystem Kommunikationsinfrastruktur

Die Kommunikationsinfrastruktur verknüpft wie in Abbildung 14 gezeigt die einzelnen Hardwarekomponenten, wie beispielsweise das haptische Ein-/Ausbabegerät und den Manipulator auf der Operator- bzw. Teleoperatorseite, zu einem *Telepräsenznetzwerk*. Die Anbindung der Hardwarekomponenten an das Telepräsenznetzwerk erfolgt mittels so genannter Hosts, die mittels netzspezifischer Übertragungsmedien und -protokolle miteinander kommunizieren.

#### 2.3.3.1 Übertragungsmedien und -protokolle

Die Datenübertragung zwischen den einzelnen Netzwerknoten erfolgt je nach lokaler Ausdehnung des Netzwerkes über unterschiedliche Netzarten wie Local Area Networks (LANs) oder Wide Area Networks (WANs). Zur Steuerung der Kommunikation über die einzelnen Netzwerke werden wiederum verschiedene Protokolle z.B. der TCP/IP<sup>8</sup>-Familie eingesetzt, die die Regeln und Konventionen festlegen, nach denen die Kommunikation abzuwickeln ist.

---

<sup>8</sup> TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol

In LANs sind wie in Abbildung 14 dargestellt, unterschiedliche Hosts oder Netzwerknoten über eine Verbindung zu einem Netz zusammengefasst. Auf einem Host können ein oder mehrere Netzwerkkomponenten (wie z.B. das Arbeitssystem und das Erfassungssystem) untergebracht sein, die mit anderen Netzwerkkomponenten (z.B. der haptischen Bediener-schnittstelle) interagieren. Die Kombination aus unterschiedlichen LANs mittels so genannter Teilnetze und Datenvermittlungsstellen (Router) wird als WAN bezeichnet (vgl. auch *Tanenbaum 1998*)

Das Internet als derzeit weltweit am stärksten wachsendes WAN erfreut sich aufgrund seiner einfachen Zugänglichkeit und weiten Verbreitung auch bei steuerungstechnischen Anwendungen einer zunehmenden Beliebtheit. Nachteilig für das Internet wirkt sich in zeitkritischen Steuerungsaufgaben die Nutzung von TCP/IP als Kommunikationsprotokoll aus, da TCP/IP ein verbindungsorientiertes Protokoll darstellt.

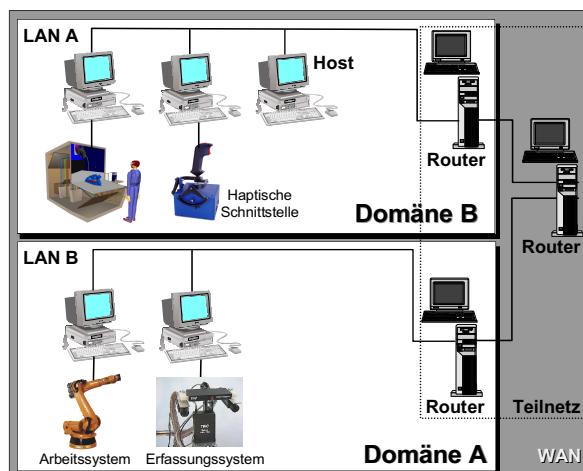


Abbildung 14: Aufbau eines Telepräsenznetzwerks

Verbindungsorientierte Protokolle bauen zur Übertragung von Daten explizit eine Verbindung zwischen dem sendenden und empfangenden Rechner auf und warten auf die Empfangsbereitschaft des Empfängers. Diese Prozedur geht auf Kosten der Übertragungszeiten, was im Fall von zeitkritischen Daten wie z.B. Kraftmesswerte für die Modalität Haptik zu schwer kompensierbaren Zeitverzögerungen führen kann.

Im Gegensatz dazu kommt das User Datagram Protocol (UDP) als verbindungsloses Protokoll ohne den Aufbau einer logischen Verbindung zwischen dem sendenden und empfangenden Rechner aus. Neben der Zeitersparnis bzgl. des Verbindungsauf- und abbaus besitzt UDP

eine höhere Dateneffizienz<sup>9</sup>, was den Einsatz von UDP für die schnelle Versendung von geringen Datenmengen nahe legt.

### 2.3.3.2 Netzwerkkoordination

Konzeptionelle Grundlage der meisten Netzwerke bildet heute ein Client/Server-Modell, in dem ein Diensteanbieter (Server) bestimmte Ressourcen wie z.B. Algorithmen oder Daten zur Verfügung stellt, die von einem Diensteanfrager (Client) in Anspruch genommen werden können (vgl. Abbildung 15). Zur Durchführung einer Diensteanfrage muss sichergestellt sein, dass zum einen der Client weiß, an welchen Server er sich wenden möchte, d.h. der Client muss über eine Art "Adresse" des Servers verfügen. Zum anderen muss der Server sich in einem Zustand befinden, in dem er die Dienstanfrage des Clients entgegennehmen kann, d.h. der Server darf z.B. weder ausgefallen sein noch sich in einer Initialisierungsphase befinden. Falls sowohl die Adresse als auch die Verfügbarkeit des Servers gewährleistet ist, muss der Client eine Verbindung zum Server aufbauen, seine Anfrage an den Server richten sowie gegebenenfalls auf eine Antwort des Servers warten um dann die Verbindung wieder abzubauen. Zur Ressourcenschonung ist beim Aufbau von Verbindungen zwischen Client und Server die Rolle des zu übertragenden Datums im Telepräsenzsystem zu berücksichtigen. Zeitkritische Daten, wie z.B. Kraftmesswerte für die Modalität Haptik sind mit einer höheren Priorität zu behandeln als beispielsweise visuell abzubildende Daten, die vom Bediener wesentlich langsamer verarbeitet werden können.

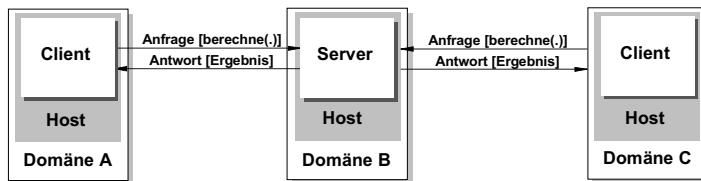


Abbildung 15: Client-Server-Beziehung

Wesentliche Voraussetzung für die korrekte Funktionsweise der Client/Server-Beziehung nach erfolgreichem Systemstart ist eine kontinuierliche Überprüfung der Kommunikationsverbindung und des Serverzustandes, um eine Bearbeitung der Dienstanforderungen sicherzustellen. Im Falle einer Kommunikationsstörung oder eines Serverausfalls ist die Sicherheit von Mensch und Material jederzeit sicherzustellen, indem geeignete Maßnahmen wie z.B. ein kontrollierter Systemstop eingeleitet werden.

Bedingt durch die Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, die in einem Telepräsenzsystem auf der Operator- wie auch der Teleoperatorseite eingesetzt werden, ist der zu betreibende

<sup>9</sup> Dateneffizienz = Nutzdaten/Telegrammlänge

Synchronisations- und Überwachungsaufwand nicht unerheblich und trägt maßgeblich zur Komplexität verteilter Systeme bei.

### 2.3.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in einem Telepräsenzsystem eine Vielzahl heterogener und anspruchsvoller Subsysteme verteilt eingesetzt wird. Die zuverlässige Beherrschung des Gesamtsystems konfrontiert die Entwickler derartiger Systeme zum einen mit einer Reihe anwendungsspezifischer Problemstellungen, wie z.B. Skalierungseffekten in der Mikromontage etc..

Zum anderen tragen anwendungsübergreifende Problemstellungen erheblich zum hohen Entwicklungsaufwand für Telepräsenzsysteme bei. Insbesondere die kommunikationstechnische Integration der Teilsysteme gestaltet sich aufwändig. So ist der Verbindungsaufbau zwischen den Subsystemen ebenso wie deren Synchronisation und Überwachung mit erheblichem Aufwand verbunden. Zwischen den Subsystemen bestehen eine Vielzahl unterschiedlicher Beziehungen zum Austausch von Steuerungs-, Überwachungs- und Konfigurationsdaten, wobei für den Datenaustausch keine einheitlichen Schnittstellen oder Datenformate zur Verfügung stehen. Erschwerend kommt hinzu, dass hinsichtlich der Anforderungen an die Qualität der Kommunikationsbeziehungen zwischen den Subsystemen modalitätsabhängige Unterschiede zu berücksichtigen sind.

Ausgedrückt in den von *Puhl 1999, S.29* definierten Dimensionen Kompliziertheit<sup>10</sup>, Konnektivität<sup>11</sup>, Verknüpfungsdichte<sup>12</sup>, Variabilität<sup>13</sup>, Varietät<sup>14</sup> weisen Telepräsenzsysteme somit einen extrem hohen Grad an Komplexität auf. Die mentale Durchdringung des Gesamtsystems im Laufe des Entwicklungsprozesses zur Verfolgung von Ursache-Wirkungsprinzipien stellt daher eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar.

## 2.4 Produktionstechnische Randbedingungen

Im vorangegangenen Abschnitt 2.3 wurden jene Aspekte von Telepräsenzsystemen analysiert, die aus rein technischer Sicht zu berücksichtigen sind, um einen höchstmöglichen Grad an Realitätsnähe zu gewährleisten. Aus Sicht der Produktionstechnik sind jedoch vorrangig wirtschaftliche Gesichtspunkte für Entwicklung und Betrieb derartiger Systeme zu beachten, die als zusätzliche Randbedingungen in die Entwicklung von Telepräsenzsystemen einfließen. Eine zentrale Rolle spielt hierbei nach *Lotter* die Beantwortung der Frage: "Was kostet ein Teil bis es seine Funktion nach durchgeführter Montage erfüllt?" (*Lotter 1986, S.10*).

---

<sup>10</sup> Anzahl inhomogener Teilsysteme

<sup>11</sup> Art und Anzahl der zwischen den Teilsystemen bestehenden Relationen

<sup>12</sup> Verhältnis zwischen theoretisch möglichen und real anzutreffenden Relationen

<sup>13</sup> Anzahl möglicher alternativer Beziehungskonstellationen

<sup>14</sup> Anzahl unterscheidbarer Zustände

Ausgangspunkt ist hier nicht wie bei der Entwicklung der Einzelgeräte die Erzielung höchstmöglicher Realitätsnähe, sondern die effiziente Durchführbarkeit der Montageaufgabe. Dabei sind auch von der Realität abweichende Eindrücke, wie z.B. die künstliche Erzeugung von Warngeräuschen erlaubt, solange sie den Bediener unterstützen und zu einer Effizienzsteigerung im Montageablauf führen.

Um die zur Beantwortung der Frage notwendige Kostenbetrachtung auf einer gemeinsamen Verständnisgrundlage durchführen zu können, wird zunächst ein produktionstechnisches Einsatzszenario für telepräsente Produktionssysteme beschrieben.

## 2.4.1 Produktionstechnisches Einsatzszenario für Telepräsenzsysteme

Im hier betrachteten Einsatzszenario steht ein Monteur vor der Aufgabe, eine bestimmte Montageaufgabe telepräsent durchzuführen (vgl. Abbildung 16). Ihm steht dazu eine multimodale Bedienerschnittstelle zur Verfügung, die in ihrer Grundstruktur von einem Systemadministrator zusammengestellt wurde. Die Bedienerschnittstelle kann so weit vom Monteur aufgabenspezifisch konfiguriert werden, dass sie in unterschiedlichen Kategorien der Telepräsenz eingesetzt werden kann. Der Monteur bindet dazu aufgabenspezifische Interfaces in das Ein-/Ausgabesystem ein (vgl. Abbildung 16, IF 1..3, IFA..C) und passt sie an seine Bedürfnisse an, indem er beispielsweise den Blickwinkel auf die Remoteumgebung an seine Körpergröße anpasst.

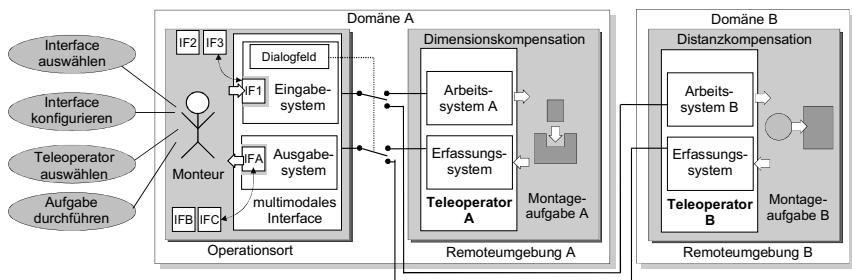


Abbildung 16: Szenario für den Einsatz eines Telemontagesystems (Symbole vgl. Anhang A)

Abhängig von der durchzuführenden Montageaufgabe A oder B kombiniert der Monteur die Bedienerschnittstelle mit unterschiedlichen Teleoperatoren (A oder B). Diese stehen ihm beispielsweise in ein und demselben Mikromontagelabor in Form verschiedenartiger Handhabungssysteme zur Verfügung oder erlauben auch standortübergreifend den Zugriff auf lokal entfernte Montagesysteme (vgl. Abbildung 16: Domäne A, B). Die Kombination der operator- und teleoperatorseitigen Geräte erfolgt interaktiv anhand eines einfachen Dialogfeldes, in dem der Monteur aus einer Liste verfügbarer Teleoperatoren das für seine Aufgabenstellung am besten geeignete System auswählt und damit automatisch die Verbindungen zwischen den Teilsystemen herstellt.

Ausgehend von dem hier skizzierten Einsatzszenario soll nun die weiter oben aufgeworfene Frage bzgl. der anfallenden Kosten bis zur Funktionsfähigkeit eines bestimmten Teils diskutiert werden.

Für den hier betrachteten Problembereich der telepräsenten Montage werden dazu aus den insgesamt zu berücksichtigenden Einflussgrößen (vgl. Abbildung 17) die Montagekosten als maßgebliche Parameter bei der Beantwortung der Kostenfrage herausgegriffen.

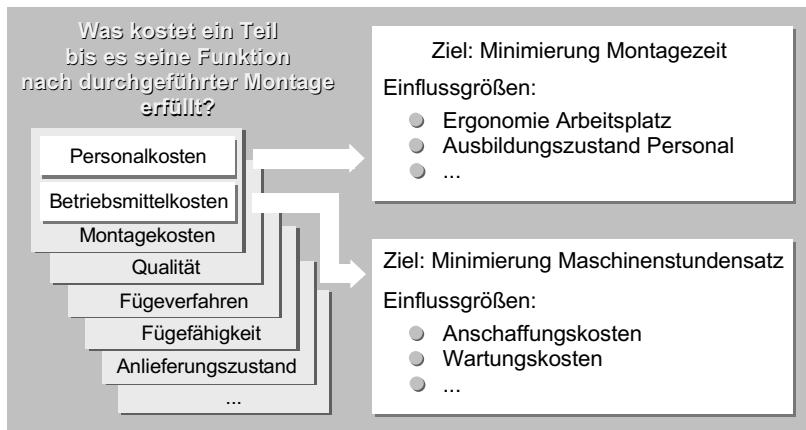


Abbildung 17: Einflussgrößen bei der Planung von Montagesystemen (Lotter 1986, S.10)

Zur Beschränkung der innerhalb der Montage anfallenden Kosten sind unterschiedliche funktionale, strukturelle und organisatorische Randbedingungen zu berücksichtigen. Funktionale und strukturelle Randbedingungen können aus den anfallenden Personal- bzw. Betriebsmittelkosten abgeleitet werden, die organisatorischen Randbedingungen werden durch den Entwicklungsprozess für Telemontagesysteme an sich vorgegeben.

### 2.4.2 Funktionale Randbedingungen

In die Berechnung der Personalkosten für manuelle Arbeitsplätze fließt als mitbestimmender Faktor die erforderliche Montagezeit ein. Diese hängt langfristig u.a. von der Ergonomie<sup>15</sup> des Arbeitsplatzes und somit von den funktionalen Eigenschaften des Montagesystems ab, da zur Erhaltung der menschlichen Arbeitsleistung "das Gestalten der Arbeitsbedingungen gemäß arbeitswissenschaftlichen Grundsätzen nicht nur notwendig [ist], sondern eine Verpflichtung, die auch im Betriebsverfassungsgesetz verankert ist" (Lotter 1986, S.39). Zur Eingrenzung

---

<sup>15</sup> Ergonomie: Wissenschaft von der körperlichen Leistungsfähigkeit des Menschen in seiner Arbeitsumgebung und der Anpassung der Arbeitsgeräte an seine Bedingungen (Drosdowski 1982)

funktionaler Randbedingungen wird daher eine tiefergehende Analyse der ergonomischen Optimierungsmöglichkeiten eines Telemontagearbeitsplatzes vorgenommen.

Aufgrund der indirekten Interaktion mit den Montagegegenständen in der Telemontage greifen *konventionelle* Beurteilungskriterien zur ergonomischen Bewertung von manuellen Montagearbeitsplätzen, wie sie z.B. in den VDI-Normen VDI 3657, 4006 festgeschrieben sind, zu kurz. Da aber *telepräsenzspezifische* Beurteilungskriterien noch Gegenstand breit gefächerter Forschungsaktivitäten darstellen (siehe z.B. *Welch 1999, Boud et al. 2000*), sei hier für die Analyse der Arbeitsplatzergonomie auf allgemeine Gestaltungs- und Bewertungsrichtlinien der Softwareergonomie zurückgegriffen (vgl. *Balzert 1996, Fraunhofer 1997*). Diese beurteilten Bedienerschnittstellen hinsichtlich der Kriterien *Aufgabenangepasstheit*, *Handlungsflexibilität* und *Kompetenzförderlichkeit* (vgl. Abbildung 18).

Im Sinne einer optimalen *Aufgabenangemessenheit* müssen Arbeitsplätze exakt an die durchzuführende Montageaufgabe adaptierbar sein, d.h. es müssen für jede Montageaufgabe die richtigen Werkstücke, Werkzeuge sowie Handlungsanweisungen vorliegen und einfach in den Arbeitsplatz integriert werden können. Übertragen auf die Telemontage bedeutet dies, dass der Austausch von Hardwarekomponenten sowohl auf der Operator- als auch der Teleoperatorseite einfach und schnell möglich sein muss.



Abbildung 18: Beurteilungskriterien für Bedienerschnittstellen

Zur Unterstützung der *Handlungsflexibilität* ist eine ausreichende Individualisierbarkeit des Arbeitsplatzes zwingend erforderlich, um diesen sowohl an das Qualifikationsniveau und die Präferenzen unterschiedlicher Bediener als auch den Komplexitätsgrad der durchzuführenden Aufgabe adaptieren zu können. Für Telemontagesysteme bedeutet dies, dass einzelne Modalitäten während der Montagedurchführung ein- und ausschaltbar sein müssen, um den indivi-

duellen Vorlieben unterschiedlicher Monteure gerecht zu werden. Idealerweise bedeutet dies weiterhin, dass einzelne modalitätsspezifische Informationen nicht nur in der jeweils originären Modalität ausgegeben werden, sondern auch auf andere Modalitäten übertragbar sein müssen. Der aktuelle Wert einer Kontaktkraft könnte dann nicht nur haptisch, sondern beispielsweise auch mittels eines visuellen oder akustischen Signals ausgegeben werden.

Zur Wahrung der *Kompetenzförderlichkeit* ist darauf zu achten, dass der Bediener ausreichend bei der Erweiterung seiner Handlungskompetenz im Umgang mit dem System unterstützt wird. Dazu zählt insbesondere die Selbstbeschreibungsfähigkeit und Funktionstransparenz des Systems. Selbstbeschreibungsfähigkeit wird gefördert durch die Intuitivität der Bedienerchnittstelle, indem z.B. Greifbewegungen zur Fixierung von Objekten auch das Schließen einer Bedienerhand erfordern. Funktionstransparenz erlaubt einem Bediener einen direkten Zusammenhang zwischen den von ihm kommandierten Befehlen und den vom System ausgeführten Kommandos zu erkennen. Im Fall der Telemontage ist eine möglichst vollständige und aktuelle Darstellung des Systemzustandes gegenüber dem Bediener als wesentliche Voraussetzung für die Funktionstransparenz anzusehen.

Neben diesen unmittelbar ergonomischen Randbedingungen wären einige zusätzliche funktionale Eigenschaften für Telepräsenzsysteme wünschenswert, um den oben kritisierten Mangel an zuverlässigen Beurteilungskriterien für Telepräsenzsysteme zu beheben. Zur systematischen Untersuchung ergonomischer Einflussgrößen in der Telemontage sollten die dafür entwickelten Systeme weiterhin die folgenden, punktuell aufgezählten Eigenschaften besitzen:

- Einstellmöglichkeiten für zentrale Systemparameter wie z.B. künstliche Kommunikationsverzögerungen, Aktualisierungsraten für Zustandsgrößen etc.
- Freie Skalierbarkeit der Gesamtanwendung, von der Simulation auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen bis zur Integration der kompletten Hardware. Dieser Aspekt ist auch wirtschaftlich interessant, da sich eine schrittweise und gestufte Vorgehensweise empfiehlt, um das Risiko eines hohen Aufwandes bei unsicherem Nutzen möglichst gering zu halten (*Bullinger 1986, S.337*)
- Protokolliermöglichkeiten für Zustandsgrößen wie kommandierte Positionen, gemessene Positionen, gemessene Kontaktkräfte etc.

### 2.4.3 Strukturelle Randbedingungen

Ergänzend zu den im vorangegangenen Abschnitt 2.4.2 aufgezählten funktionsorientierten Gesichtspunkten sind beim Aufbau von Telemontagesystemen eine Reihe struktureller Randbedingungen zu berücksichtigen, die im Wesentlichen zur Minimierung von Anschaffungs- und Wartungskosten eingehalten werden müssen.

Die Anschaffungskosten orientieren sich u.a. am Entwicklungsaufwand des betrachteten Systems, der im Fall von Telepräsenzsystemen aufgrund des Einzelstückcharakters der Anlagen und deren inhärenter Komplexität momentan unwirtschaftlich hoch ist. Angriffspunkte zur Kostensenkung sind hier in einer Reduktion des Aufwandes für Neuentwicklungen durch

Wiederverwendung sowie einer Steigerung der Effizienz im verbleibenden Neuentwicklungsanteil zu sehen.

Zur Erhöhung des Wiederverwendungsanteils ist eine Zerlegung des Gesamtsystems in kombinierbare Module sowie eine Standardisierung der Modulschnittstellen wünschenswert. Die einzelnen Module kapseln häufig verwendete Grundfunktionen und reduzieren somit den Neuentwicklungsanteil. Darüber hinaus trägt die Modularisierung zur Senkung der Wartungs- und Inbetriebnahmekosten bei, da auftretende Fehler besser lokalisiert und fehlerhafte Module ausgetauscht werden können. Unverzichtbare Voraussetzung für die Nutzung des Wiederverwendungspotenzials stellt eine umfassende Dokumentation sowohl des Gesamtsystems als auch der einzelnen Module dar.

Ansätze zur Reduktion des Aufwandes für Neuentwicklungen sind in der Einhaltung von Konstruktionsprinzipien der Systemtechnik zur Komplexitätsreduktion bzw. -beherrschung zu sehen. Wichtigstes Konstruktionsprinzip für komplexe Systeme stellt nach *Daenzer 1992* das systemhierarchische Denken mittels unterschiedlicher Abstraktionsstufen dar, das jedes System „vom Groben zum Feinen“ zerlegt. Durch Abstraktion lassen sich alle für den aktuellen Betrachtungsschwerpunkt un wesentlichen Details ausblenden, was die mentale Durchdringung von Ursache-Wirkprinzipien vereinfacht. Dadurch lässt sich auch der Austausch zwischen unterschiedlichen Fachbereichen wie Ergonomie, Anwender, Ingenieure vereinfachen und Abstimmungsfehler reduzieren.

Zur Beherrschung der Komplexität und zur Unterstützung der fachbereichsübergreifenden Diskussion sollten aussagekräftige Modelle des Gesamtsystems eingesetzt werden. Diese erlauben Idealerweise unterschiedliche Sichten auf das System, um z.B. dessen statische Strukturen oder auch das dynamische Verhalten zu analysieren. Zur Überprüfung des funktionalen Verhaltens vor der Existenz des realen Systems ist eine realitätsnahe Simulation anhand eines virtuellen Prototyps wünschenswert, um in der frühen Entwicklungsphase kostenträchtige Fehler zu erkennen. Die bei der Erstellung der virtuellen Prototypen entstehenden Modelle sollten direkt in der Entwicklung der realen Anlage verwendbar sein, um die wiederholte Generierung von Daten zu vermeiden und den Entwicklungsaufwand zu reduzieren.

Sämtliche der beschriebenen technischen, funktionalen und strukturellen Anforderungen müssen während der Entwicklung eines Telemontagesystems berücksichtigt werden. Wie im nächsten Abschnitt 2.4.4 gezeigt wird, führt dies zu neuen Planungsaufgaben im Entwicklungsprozess, die in Vorgehensmodellen für konventionelle Montagesysteme bislang nicht vorgesehen sind.

#### **2.4.4 Organisatorische Randbedingungen**

Angesichts des geringen Verbreitungsgrades von Telepräsenztechnologien in der Produktionstechnik kann bei der Entwicklung von Telemontagesystemen auf keine bewährten Entwicklungsmethoden und Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Ebenso wenig stehen geeignete Modellierungskonzepte oder Planungswerkzeuge für die Abbildung modalitätsspezifischer

Aspekte zur Verfügung, was den wichtigen interdisziplinären Austausch zwischen beispielsweise Ergonomie und Informationstechnik fehleranfällig macht.

Um hier dennoch die telepräsenzspezifisch erforderlichen Planungsschritte in einen Entwicklungskontext einordnen zu können, sei an dieser Stelle auf den Planungsablauf für manuelle Montagesysteme zurückgegriffen, wie er beispielsweise von *Bullinger 1986* und *Lotter 1986* beschrieben wird (vgl. Abbildung 19).

Die Kernaufgaben in der Planung von Montagesystemen werden nach *Bullinger 1986*, S. 51 in die Schritte: (1) Konzeption, (2) Ablaufplanung, (3) Montagesystementwurf, (4) Ausarbeitung, (5) Realisierung aufgeteilt.

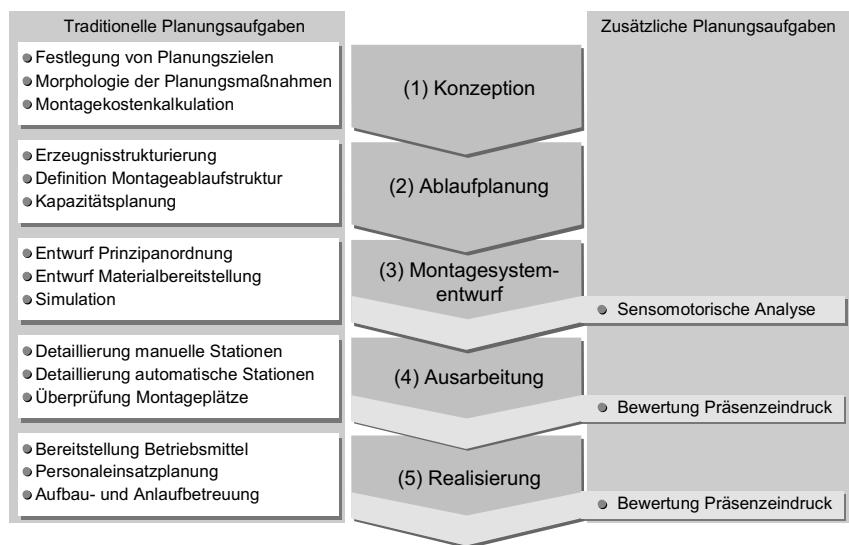


Abbildung 19: Erweiterter Planungsprozess für Telemontagesysteme

Von besonderer Bedeutung ist dabei im Montagesystementwurf eine Gestaltung und Bewertung der Arbeitsplätze nach ergonomischen Gesichtspunkten, um nicht nur den Ermüdungsgrad der Arbeitenden zu senken, sondern auch bessere Ergebnisse in Form geringerer Ausschussquoten zu erreichen (siehe auch *Lotter 1986, S.39*). Im Fall der Telepräsenz, bei der dem Operator ein indirektes Abbild der Montageumgebung präsentiert wird, setzt die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes eine exakte Kenntnis der Empfindungsbereiche voraus, die zur erfolgreichen Durchführung einer bestimmten Montageaufgabe erforderlich sind. Nur bei Kenntnis dieser Empfindungsbereiche können entsprechende Ausgabekanäle und -geräte in die Bedienerschnittstelle d.h. den Arbeitsplatz integriert werden.

Informationen über die erforderlichen Empfindungsbereiche können im Rahmen einer sensomotorischen Analyse gewonnen werden, wie sie z.B. auch bei der Planung von manuellen Arbeitsplätzen für die Mikromontage durchgeführt wird (vgl. z.B. Schelten & Gaidzik 1989, REFA 1988). Dieser Analysevorgang orientiert sich ausschließlich an einer funktionalen Dekomposition der durchzuführenden Montageaufgaben und legt fest, welche Empfindungsbereiche für eine bestimmte Montageaufgabe als unabdingbar bzw. belastend betrachtet werden.

Dabei geht es nicht um eine physikalische Darstellung bzw. Erfassung von Daten oder Modalitäten, sondern allein um deren abstrakten Informationsgehalt. Für hochpräzise Positionieraufgaben ist beispielsweise ein Räumlichkeits- und Tiefenerfassungsempfinden auf dem visuellen Kanal sowie ein Handruheempfinden<sup>16</sup> auf dem kinästhetischen Kanal unabdingbar. Starke Helligkeitswechsel werden hingegen auf dem visuellen Kanal als Empfindungsbelastung eingestuft (vgl. REFA 1988).

Die funktionale Dekomposition der Montageaufgabe erfolgt im traditionellen Entwicklungsprozess in Schritt (2), in dem im Rahmen der Ablaufplanung eine Zerlegung der eigentlichen Montageaufgabe in einzelne Montageschritte vorgenommen wird. Auf Basis der dabei entstehenden Montageablaufstruktur erfolgt die Auslegung von Vorrichtungen, Betriebsmitteln und Arbeitsplätzen, in deren Zusammenhang auch die Telemontagearbeitsplätze zu betrachten sind. Im zeitlichen Ablauf bietet es sich daher an, im Rahmen des Montagesystementwurfs eine sensomotorische Analyse vorzunehmen, um die zu unterstützenden Empfindungsbereiche festzulegen (vgl. Abbildung 19).

Im weiteren Verlauf des traditionellen Entwicklungsprozesses ist eine Überprüfung der Montagearbeitsplätze vorzunehmen, um deren Eignung für die Durchführung der Montageaufgabe zu bewerten (Schritt 4). Hier ist für das entworfene Telemontagesysteme zu prüfen, bis zu welchem Grad es dem Monteur gelingt, sich in die virtuelle Remoteumgebung zu versetzen, um die Montageaufgabe telepräsent ausführen zu können. Diese Prüfung des so genannten *Immersionsgrades* kann auf Basis einer simulierten Montageumgebung nach Abschluss der Ausarbeitung (Schritt 4) oder mittels der realen Montageanlage nach vollendeter Realisierung (Schritt 5) erfolgen.

Die in diesem Zusammenhang jeweils durchzuführende ergonomische Beurteilung des Telemontagesystems steht nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Daher sei diesbezüglich lediglich auf die entsprechende Fachliteratur (z. B. Kurtenbach et al. 1997, Waller 1999, Burdea 1996, Cobb et al. 1999, Singer & Witmer 1998, Zäh et al. 2002, Mark et al. 1997, Sheridan 1992) verwiesen, die ausführlich unterschiedliche Vorschläge zur Bewertung von Telepräsenzsystemen beschreibt.

---

<sup>16</sup> Handruheempfinden: Schwankungen (Zitterbewegungen), die die Bewegung bzw. die Ruhestellung der Hand überlagern, können wahrgenommen bzw. gesteuert werden (REFA 1988)

## 2.5 Herausforderungen in der Entwicklung von Telepräsenzsystemen

Wie die vorangegangenen Abschnitte gezeigt haben, sind während der Entwicklung von Telemontagesystemen eine Reihe anspruchsvoller Herausforderungen zu bewältigen. Diese sind teils auf anwendungsspezifische, teils auf anwendungsübergreifende Problemstellungen sowie die aus produktionstechnischer Sicht zu berücksichtigenden funktionalen, strukturellen und organisatorischen Randbedingungen zurückzuführen.

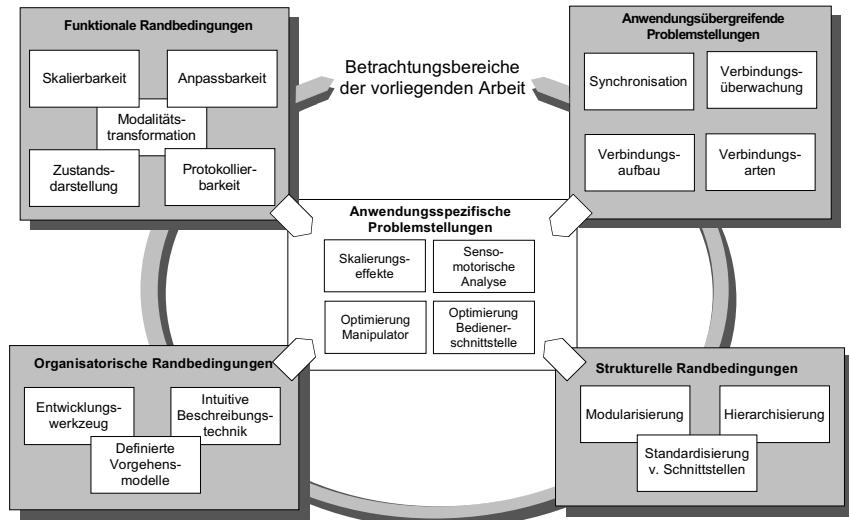


Abbildung 20: Herausforderungen im Entwicklungsprozess für Telemontagesysteme

Wie Abbildung 20 zeigt lässt die Vielzahl der zu berücksichtigenden Einzelprobleme die anwendungsspezifischen Problemstellungen in den Hintergrund rücken und wirkt somit abschreckend für potenzielle Anwender von Telemontagesystemen. Die geringe Marktdurchdringung von Telepräsenztechnologien ist vor diesem Hintergrund verständlich und weist deutlich auf den Handlungsbedarf im Entwicklungsprozess für Telemontagesysteme hin.

## 2.6 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs

Die vorliegende Arbeit ist daher darauf ausgerichtet, den Entwicklungsaufwand für Telepräsenzsysteme zu reduzieren, um dieses Hindernis auf dem Weg zur produktionstechnischen Einführung von Telepräsenztechnologien zu beseitigen.

Ansatzpunkt bildet die Reduktion des Entwicklungsaufwandes für *anwendungsübergreifende* Problemstellungen sowie die Schaffung der zugehörigen funktionalen, organisatorischen und

strukturellen Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Telepräsenzsystemen (vgl. grau hinterlegte Bereiche in Abbildung 20). Die in diesem Zusammenhang durchzuführenden Maßnahmen können gewinnbringend in unterschiedliche Arten von Telepräsenzsystemen eingebracht werden. Welche Ziele dazu im Einzelnen formuliert werden müssen, wird in Kapitel 3 aus einer Analyse bestehender Ansätze im Bereich telepräsenter Montageeinrichtungen abgeleitet. Die Grundlage der Analyse bildet das im nächsten Abschnitt 2.7 vorgestellte Bewertungsschema für multimodale Telepräsenzsysteme.

## 2.7 Bewertungsschema für multimodale TPTA-Systeme

Die in den Abschnitten 2.4 bis 2.6 dargestellten Herausforderungen und Randbedingungen bei der Entwicklung von Telemontagesystemen werden im Sinne einer einfacheren Vergleichbarkeit unterschiedlicher Telepräsenzsysteme in einem Bewertungsschema zusammengefasst (vgl. Abbildung 21). Die Bewertung einer bestimmten Telepräsenzeinrichtung anhand der im Schema angeführten Kriterien soll Auskunft darüber geben, inwiefern das System für den industriellen Einsatz in der Produktionstechnik geeignet ist. Das Schema unterscheidet zwischen entwicklungs- und anwendungsorientierten Kriterien.

*Entwicklungsorientierte* Kriterien beurteilen den Systemaufbau hinsichtlich der Maßnahmen, die zur Komplexitätsreduktion bzw. -beherrschung sowie der Anpassbarkeit des Telepräsenzsystems während der Entwicklung beitragen, um die Entwicklungskosten beherrschbar zu gestalten.

*Anwendungsorientierte* Kriterien untersuchen den Systemaufbau hinsichtlich der Einhaltung von Randbedingungen, die durch die Forderung nach weitest gehender Konfigurierbarkeit des Systems durch den Bediener vorgegeben werden. Schwerpunkt in der Bewertung beider Kriterien ist dabei die kommunikationstechnische Infrastruktur zwischen der Operator und Teleoperatoreiseite, da Verbesserungen in diesem Bereich anwendungsunabhängig in unterschiedliche Telepräsenzsysteme eingebracht werden könnten.

Anforderungen an eine flexible Telepräsenzinfrastruktur									
Entwicklungsorientiert					Anwendungsorientiert				
Komplexitäts-reduktion		Komplexitäts-beherrschung		Anpassbarkeit	Konfigurierbarkeit Hardware		Konfigurierbarkeit Software		
Modularität	Standardisierung	Abstraktion	Methodik	Offenheit	Skalierbare Kommunikation	Lokale Verteilbarkeit	Variabilität Geräte	Skalierbare Modalitäten	Skalierbare Realität
System A	●	●	●	●	○ ○	○	○ ○	○ ○	○ ○
System B	●	●	●	●	○ ○	○	○ ○	○ ○	○ ○

Legende: Kein Beitrag ○ bedingt erfüllt ● weitgehend erfüllt ●●

Abbildung 21: Bewertungsschema für multimodale Telepräsenzsysteme

Insbesondere sind folgende entwicklungsorientierte Kriterien und Fragestellungen zu untersuchen:

- Modularität/Wiederverwendbarkeit

Inwiefern wurde das Gesamtsystem in einzelne Module zerlegt, die über einen genau spezifizierten Funktionsumfang sowie eine entsprechende Schnittstelle verfügen und somit wieder verwendet werden können?

- Standardisierung

Inwiefern wird ein Konzept zur Standardisierung von Strukturen und Schnittstellen verfolgt, um die Anzahl der erforderlichen Schnittstellen zu reduzieren?

- Abstraktion

Welche Abstraktionsebenen werden im System eingesetzt, um eine schrittweise Verfeinerung von Entwicklungskonzepten zu unterstützen?

- Methodik

Bis zu welchem Grad werden eine Methode und unterstützende Werkzeuge zur Verfügung gestellt, um eine effiziente Systementwicklung zu gewährleisten?

- Offenheit

Wie offen ist das Gesamtsystem für applikationsspezifische Erweiterungen, sprich welche Schnittstellen sind dafür vorgesehen und wie sind diese dokumentiert?

- Skalierbarkeit der Kommunikation

Inwieweit kann die Kommunikation zwischen verteilten Komponenten skaliert werden, um unterschiedlichen Anforderungen an die Übertragungsqualität aus den einzelnen Modalitäten gerecht zu werden?

Aus Sicht der Anwendung sind die nachstehenden Kriterien von Bedeutung:

- Lokale Verteilbarkeit

Wie einfach können verteilte Komponenten eines Telepräsenzsystems miteinander gekoppelt werden, um eine möglichst hohe Aufgaben- und Anwenderflexibilität sicherzustellen?

- Variabilität der Geräte

Welche Möglichkeiten bestehen zum Austausch von einzelnen Ein-/Ausgabegeräten, um die Aufgabenangepasstheit des Gesamtsystems zu garantieren?

- Skalierbarkeit der Modalitäten

Inwieweit können Modalitäten skaliert werden, um zum einen fehlende Ein-/Ausgabegeräte zu ersetzen und zum anderen ergonomische Untersuchungen möglichst umfassend zu unterstützen?

- Skalierbarkeit der Realität

Welche Möglichkeiten sind vorgesehen, um einen möglichst fließenden Übergang von Montageoperationen von der Simulation zur Realität zu gewährleisten und somit frühzeitig verlässliche Aussagen über die Funktionstauglichkeit des Systems treffen zu können?

Das folgende Kapitel 3 greift die in diesem Schema zusammengefassten Bewertungskriterien auf und analysiert existierende Telepräsenzsysteme hinsichtlich der Frage, in weit sie die einzelnen Kriterien erfüllen.



### 3 Bestehende Ansätze und Handlungsbedarf

Nachdem im vorangegangenen Kapitel 2 die strategische Ausrichtung der vorliegenden Arbeit sowie ein Bewertungsschema für Telepräsenzeinrichtungen erläutert wurde, folgt nun eine Spiegelung repräsentativer Telepräsenzsysteme in Industrie und Forschung an besagtem Schema. Die Ergebnisse der Analyse werden anschließend dazu herangezogen, den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit festzulegen.

#### 3.1 Telepräsenzsysteme in Industrie und Forschung

Systeme zur teleoperierten Handhabung von Gegenständen werden seit Mitte der 50er Jahre für unterschiedliche Einsatzzwecke entwickelt, wobei nach *Sheridan 1992a* der Anwendungsschwerpunkt in der frühen Phase auf die Handhabung von Nuklearmaterial gelegt worden ist. Begünstigt durch die rapide Verbesserung der Kommunikationstechnologie wird heute die Einsetzbarkeit von Telepräsenzsystemen in weiteren Anwendungsgebieten wie z.B. der Luft- und Raumfahrt, der Fernwartung, der Medizintechnik oder auch der Mikromontage untersucht.

Wie in den folgenden Abschnitten zusammengefasst, haben die entworfenen Konzepte den Sprung aus der Forschung in die industrielle Praxis teilweise schon vollzogen, der Großteil befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung. Die betrachteten Systeme entsprechen oftmals nicht vollständig der Definition von Telepräsenzsystemen, da meist keine multimodale sondern eine selektive Rückkopplung von Umgebungsinformationen erfolgt. Dennoch werden die bekannten Systeme analysiert, um bereits bewährte Ansätze gegebenenfalls beim Entwurf berücksichtigen zu können.

Im Folgenden werden unterschiedliche produktionstechnisch relevante Konzepte aus den Bereichen des Teleservice, der virtuellen Produktbewertung sowie der Mikromontage näher untersucht. Systeme aus anderen Bereichen wie z.B. der Telemedizin werden unter dem Oberbegriff der Telerobotik nur soweit betrachtet, wie sie aufgrund der angewandten Flexibilisierungskonzepte hier von Interesse sind. Da viele der produktionstechnischen Anwendungen auf den in der allgemeinen Telerobotik erarbeiteten Grundlagen basieren, wird den produktionstechnisch relevanten Anwendungen eine Analyse der in der Telerobotik erarbeiteten Konzepte vorangestellt.

##### 3.1.1 Telerobotik

Im Bereich der Robotik werden schon seit geraumer Zeit Ansätze zur Vereinheitlichung von Architekturkonzepten diskutiert, um dadurch zu einer Vereinfachung beim Aufbau von Teleoperatoren beizutragen.

*Albus* stellt eine konzeptionelle Architektur für eine hierarchische Teleoperatorsteuerung vor, die die Ansteuerung von Robotern auf sechs unterschiedlichen Abstraktionsebenen erlaubt und somit einen Beitrag zur Reduktion der Systemkomplexität und des Kommunikationsauf-

wandes leistet (*Albus 1989, Albus et al. 1989*). Die softwaretechnische Realisierung des Konzeptes oder eine Standardisierung von Schnittstellen zwischen den Abstraktionsebenen wird von *Albus* nicht thematisiert.

Aufbauend auf den Ansätzen von *Albus* strebt *Anderson 1995* mit SMART<sup>17</sup> eine Modularisierung von Robotersteuerungen an, beschränkt sich jedoch auf die Modellierung regelungstechnischer Aspekte von Teleoperatoren und begründet den Informationsaustausch auf proprietären Kommunikationsmechanismen.

Ein alternativer Architektur zur Steuerung von Teleoperatoren wird von *Brady & Tarn 1998* vorgestellt, wobei auch hier Regelungstechnische Aspekte im Vordergrund stehen. Im Gegensatz zu *Albus* und *Anderson* setzt der dort verfolgte Ansatz allerdings auf das Internet als Kommunikationsmedium auf und untersucht die Möglichkeiten zur Kompensation der dort zu beobachtenden, nicht-deterministischen Zeitverzögerungen. Eine Erweiterung des Architekturkonzeptes für dessen Einsatz in multimodalen Telepräsenzsystemen wird jedoch dort nicht angestrebt.

Ansätze zur Verwendung offener Kommunikationsmechanismen für die Steuerung von Robotern werden von *Schäfer et al.* vorgestellt, um auf Basis von CORBA<sup>18</sup> verteilte Anwendungen miteinander zu koppeln (*Schäfer et al. 1999*). Ziel von ICa<sup>19</sup> ist die Beschleunigung des Entwicklungsvorgehens durch Erhöhung des Wiederverwendungsanteils, wobei keine weitergehenden Architekturkonzepte oder Ansätze zur Schnittstellenstandardisierung diskutiert werden. Zudem beschränkt sich die Anwendung auf die *Simulation* von Makro-Montagevorgängen. Reale Roboter oder multimodale Bedienerschnittstellen können nicht an das System gekoppelt werden.

Das von *Uhl 2000* vorgestellte Steuerungssystem für Teleroboter zielt ebenfalls auf die Erhöhung des Wiederverwendungsanteils bei der Steuerungsentwicklung ab. Das Konzept nutzt Standardisierungsansätze wie sie im europäischen Gemeinschaftsprojekt OSACA<sup>20</sup> für den Bereich offener NC-Steuerungen erarbeitet worden sind (vgl. z.B. *Korem et al. 1998*), unterstützt jedoch keine multimodale Bedienerausgaben.

Ein weitergehendes Konzept wird von *Burchard & Feddema* vorgestellt, das versucht, generische Ansätze der Steuerung intelligenter Systeme mit der Middleware CORBA zu koppeln, um dadurch die Entwicklungskosten für ferngesteuerte Systeme zu senken. In *Burchard & Feddema 1996* stellen sie eine Beschreibung der entworfenen Klassen und Funktionen einer möglichen schichtenorientierten Programmierschnittstelle vor, unterstützen jedoch keine multimodale Interaktion mit dem Bediener.

Das Problem des hohen Initialisierungsaufwandes für Telepräsenzeinrichtungen wird auch explizit von *Ghiasi et al.* aufgegriffen, die für die Zielgruppe der Hobbyprogrammierer ein internetbasiertes System vorstellen (*Ghiasi et al. 1998, Ghiasi et al. 1999*). Das Konzept dis-

---

17 SMART: Sandia Modular Architecture for Robotics and Teleoperation

18 CORBA: Common Object Request Broker Architecture (vgl. Kap.5.1.1)

19 ICa: Integrated Control architecture

20 OSACA: Open Systems Architecture for Control Systems in Automation

kutiert zwar Vorteile einer einheitlichen Architektur (einer sog. Web-based teleoperations architecture, WTA), geht jedoch nicht näher auf die dazu erforderlichen Schnittstellen oder den internen Aufbau des vorgeschlagenen Softwaresystems ein. WTA beschreibt außerdem lediglich die Positionssteuerung des Teleoperators, basiert auf proprietären Kommunikationsmechanismen und erlaubt keine multimodale Rückkopplung an den Operator.

Die oben beschriebenen Konzepte gehen von einer statischen Kopplung der Operator- und der Teleoperatorseite aus. *Graves & Czarnecki 1999* stellen hingegen ein Architekturkonzept für Teleroboter vor, das in der Lage ist, alternativ unterschiedliche Hardwaregeräte mit ein und demselben Userinterface zu steuern. Dazu werden ein Protocol for abstract control of Telerobots (PACT) und die TeleRobot Interface Language (TRIL) definiert. Die Umsetzung des Protokolls ist jedoch nur anhand eines proprietären Kommunikationsmechanismus möglich, Aspekte der Multimodalität bleiben auch hier unberücksichtigt.

*Siegwart & Saucy 1999* präsentieren ein Konzept für ein Robot Control framework, das die Steuerung von mobilen Robotern über das Internet erlaubt. Durch Anpassung eines "Robot-Definition-Files" und eines "Environment-Definition-Files" können unterschiedliche Roboter gesteuert werden. Die Kommunikation wird mittels proprietärer Kommunikationsmechanismen bewerkstelligt, die Unterstützung multimodaler Rückkopplung ist nicht vorgesehen.

### 3.1.2 Wartung und Service von Produktionsanlagen

Auch wenn dem Teleservice und der Telewartung bisher von unterschiedlicher Seite starkes Wachstumspotential vorausgesagt wurde (vgl. z.B. *Becker & Schühle 1998*, *BMFT 1997*, *Maßberg 1998*) so sind doch relativ wenige Praxisbeispiele dokumentiert.

Die meisten Teleservice-Anwendungen bauen auf Modemverbindungen auf und sehen aufgrund der damit verbundenen geringen Übertragungsrate und Bandbreite keinen steuernden Zugriff auf entfernte Produktionssysteme insbesondere Manipulatoren vor (*Trumpf 2002*, *Göhringer 2001*). Ansätze, die im Rahmen dieser Arbeit zu berücksichtigen wären, sind daher bislang nicht zu erkennen.

### 3.1.3 Virtuelle Produktbewertung

Systeme zur virtuellen Bewertung von optischen Produkteigenschaften oder zur Simulation manueller Montageabläufe haben einen hohen Verbreitungsgrad erreicht (*Bullinger et al. 1998*). Ansätze zur Bewertung haptischer Produkteigenschaften werden zwar vereinzelt verfolgt, Konzepte zur Standardisierung dieser Ansätze sind jedoch nicht zu beobachten.

So stellen *Gutierrez et al. 1998* ein integriertes CAD/Haptik-System zur Simulation von Montageabläufen vor, bauen allerdings auf einem proprietären, in sich geschlossenen 3D CAD-Programm auf und stimmen dies auf ein spezielles Eingabegerät ab.

Die von *Steffan et al. 1998* implementierte "Virtual Workbench" bindet zwar mehrere Modalitäten wie Audio, Video und Haptik in die Rückkopplung an den Bediener ein, lässt Aspekte

zur Vereinheitlichung möglicher Schnittstellen oder struktureller Eigenschaften aber unberücksichtigt.

*Reinhart et al. 2000b* beschreiben die Integration von kraftreflektierenden Geräten in eine VR-Umgebung zur Montagesimulation. Die Machbarkeit der Haptikintegration und die damit verbundenen Potenziale werden am Beispiel der Off-line Programmierung von Industrierobotern gezeigt, Standardisierungsgesichtspunkte werden jedoch nicht diskutiert.

### 3.1.4 Mikromontage

Zur Kompensation des unzureichenden Auflösungsvermögens der menschlichen Sinnesorgane wurden eine Reihe von Telepräsenzsystemen für die Mikromontage als Versuchsplattformen aufgebaut.

So wird z.B. von *Yokokoshji et al. 1994* ein modellgestütztes Teleoperationssystem für die Mikromontage präsentiert. Im Vordergrund steht die Kompensation von Skalierungseffekten zwischen der Mikro- und Makrowelt. *Codourney et al. 1997* stellen ein teleoperiertes, semi-autonomes Mikromontagesystem vor, in dem einzelne Arbeitsschritte nach einer Lernphase automatisch unter Supervisory Control ausgeführt werden.

Im Mittelpunkt der von *Alex et al. 1998* und *Sulzmann et al. 1996* vorgestellten teleoperierten Mikromontagesysteme steht der Einsatz von VR-Systemen zur Darstellung der Remoteumgebung. Zur Sicherstellung weitgehender Plattformunabhängigkeit ist das System von *Alex* auf Basis von Java<sup>21</sup> aufgebaut, verfolgt jedoch keine weiteren Standardisierungsansätze.

*Hashimoto 1998* und *Taylor 1994* untersuchen anhand eines Tunnel-Elektronenmikroskopes die Möglichkeiten, Telepräsenztechnologien auch auf der Nanometerebene einzusetzen. Forschungsschwerpunkt ist hier die mathematische Modellierung von Kräften in der Nanowelt sowie der Aufbau geeigneter Kraftausgabegeräte.

Der von *Bejczy et al. 1995* beschriebene Versuch überwindet neben der Telepräsenzbarriere „Dimension“ zusätzlich die Barriere „Distanz“, indem ferngesteuert Mikrogravitationsexperimente in Weltraumlabors durchgeführt werden sollen. Auch hier bildet die Optimierung der Roboterhardware den Schwerpunkt der Forschungsarbeiten.

*Kunstmann 1999* baut ein kraftrückkoppelndes System zur Handhabung von Mikrobauteilen auf, konzentriert sich in seiner Arbeit jedoch auf den Hardware-Entwurf des Handhabungssystems und implementiert dafür eine maßgeschneiderte Softwarelösung. Ein aufgaben- oder bedienerspezifischer Austausch des Handhabungssystems ist nicht vorgesehen, so dass Aspekte zur Flexibilisierung oder Standardisierung auch hier unberücksichtigt bleiben.

Die angeführten Systeme zur ferngesteuerten oder telepräsenten Handhabung von miniaturisierten Bauteilen beschäftigen sich größtenteils mit der Optimierung der Hardwarekomponenten und der mathematischen Modellierung von Effekten in der Mikro- und Nanowelt. Au-

---

<sup>21</sup> Java ist eine von der Firma sun herausgebrachte Programmiersprache vgl. <http://java.sun.com/>

Bei den von *Alex et al. 1998* vorgestellten Ansätzen zur Integration unterschiedlicher Betriebssystemplattformen mittels Java sind keine Konzepte zur Standardisierung und Flexibilisierung von telepräsenten Mikromontagesystemen erkennbar. Die oben formulierten Voraussetzungen für den industriellen Einsatz von Telepräsenzsystemen werden nicht diskutiert.

### 3.2 Bewertung des Standes der Technik

Die vorangegangene Analyse repräsentativer Telepräsenzsysteme lässt erkennen, dass bereits zahlreiche Systeme zur Erforschung der unterschiedlichen Kategorien von unimodaler und multimodaler Telepräsenz (Zeit, Distanz, Größe) aufgebaut wurden. Forschungsgegenstand stellt dabei oft die prinzipielle Realisierbarkeit der Telemanipulation sowie die Optimierung des Realitätseindrucks dar. Die einzelnen Systeme sind teilweise zwar technologisch ausgereift, folgen jedoch keinem übergreifenden Architekturmuster. Die eingesetzten Subsysteme sind über uneinheitliche Schnittstellen miteinander gekoppelt (vgl. Abbildung 22).

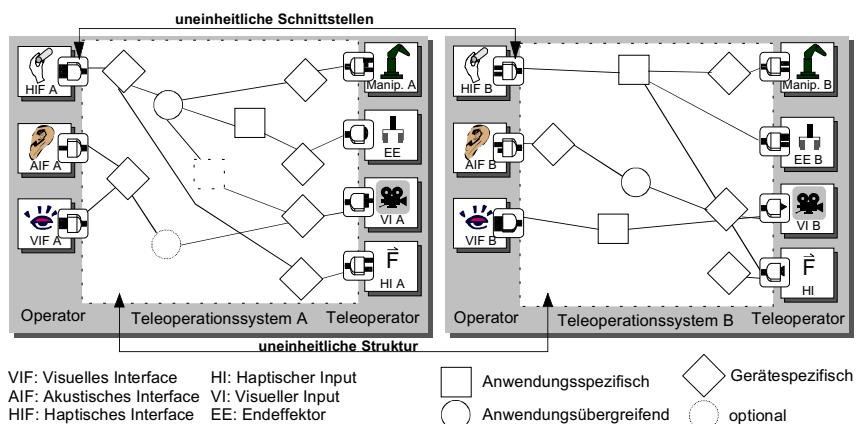


Abbildung 22: Uneinheitliche Struktur und Schnittstellen von Teleoperationssystemen

Somit entstehen einzigartige Gesamtsysteme, die - wenn überhaupt - nur mit einem erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand an neue Randbedingungen angepasst werden können.

Speziell die kommunikationstechnische Integration der Teilsysteme stellt einen wesentlichen Kostenfaktor dar, da für jedes Telepräsenzsystem „das Rad neu erfunden wird“, um eine effiziente Datenübertragung zu ermöglichen. Viel Entwicklungsaufwand ist in die Implementierung von Basisfunktionen der Kommunikationstechnik zu investieren, der zur optimalen Gestaltung der eigentlichen Handhabungsaufgabe, d.h. der Auslegung des Telemanipulators sowie der Bedienerschnittstelle, hinzuzurechnen ist. Der zum Aufbau der Systeme zu betreibenden

der hohe Aufwand wird zwar als Hindernis für eine weitere Verbreitung der Technologie erkannt. Er steht jedoch bei der Implementierung der Systeme im Hintergrund und treibt somit den nach *Bender 1999* heute üblichen Anteil der Software an den Entwicklungsaufwendungen von 40% und mehr weiter nach oben.

Anforderungen an eine flexible Telepräsenzinfrastruktur										
Entwicklungsorientiert										
Komplexitätsreduktion		Komplexitätsbeherrschung		Anpassbarkeit			Konfigurierbarkeit Hardware		Konfigurierbarkeit Software	
Modularität	Standardisierung	Abstraktion	Methodik	Offenheit	Skalierbare Kommunikation		Lokale Verteilbarkeit	Variabilität Geräte	Skalierbare Modalitäten	Skalierbare Realität
Albus	●	●	●	○	○		○	○	○	○
Alex et al.	○	○	○	○	●		●	○	●	○
Anderson	●	●	●	●	○		○	○	○	○
Bejczy et al.	○	○	○	○	○		○	○	○	●
Brady & Tarn	○	●	●	○	○		○	○	○	○
Burchard et al.	●	●	●	○	●		●	●	○	○
Coudermey et al.	○	○	○	○	○		○	●	○	●
Ghiasi et al.	●	●	●	○	○		●	●	○	○
Graves et al.	●	●	●	○	○		●	●	○	○
Gutierrez et al.	○	○	○	○	○		○	○	○	●
Hashimoto et al.	○	○	○	○	○		○	○	●	○
Kunstmann	○	○	○	○	○		○	○	●	●
Reinhart et al.	●	○	○	○	○		○	●	○	●
Schäfer et al.	●	○	○	○	●		●	○	○	○
Siegwart et al.	○	●	●	●	○		●	●	○	○
Steffan et al.	○	○	○	○	○		●	●	●	○
Sulzmann et al.	○	○	○	○	●		●	○	●	●
Taylor	○	○	○	○	○		○	○	○	●
Uhl	●	●	○	○	●		●	●	○	○
Yokokohji et al.	○	○	○	○	○		○	●	●	●

Abbildung 23: Eigenschaften ausgewählter Telepräsenzsysteme

Auch wenn vereinzelt Ansätze zur Standardisierung und Flexibilisierung der kommunikationstechnischen Infrastruktur zwischen Operator- und Teleoperatorseite erkennbar sind (vgl. Abbildung 23), so ist ein ganzheitliches Konzept zur Reduktion des kommunikationstechnischen Entwicklungsaufwandes bislang nicht erkennbar.

### 3.3 Handlungsbedarf

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Entwickler von Telepräsenzsystemen beim Aufbau der erforderlichen kommunikationstechnischen Infrastruktur zu entlasten, um seine Effizienz im Entwicklungsprozess zu steigern. Die Beschreibung der Funktionsweise und des Standes der Technik lassen erkennen, dass der Weg zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels über die drei folgenden Teilziele führt:

1. Erhöhung der Transparenz von Telepräsenzsystemen im Sinne der Komplexitätsreduktion und -beherrschung, um deren mentale Durchdringung zu vereinfachen und Fehlerquellen zu eliminieren.
2. Standardisierung der kommunikationstechnischen Infrastruktur, um damit eine Erhöhung des Anteils an wiederverwendbaren Softwarekomponenten bei der Implementierung von Telepräsenzsystemen zu ermöglichen.
3. Implementierung von grundlegenden Telepräsenzfunktionen und deren Integration in ein wiederverwendbares, kommunikationstechnisches Softwaresystem.

Die folgenden Kapitel stellen ein Gesamtkonzept für telepräsente Montagesysteme vor, das die Maßnahmen, die zur Umsetzung der oben formulierten Teilziele erforderlich sind, in einen umfassenden Rahmen einbettet.



## 4 Rahmenkonzept für telepräsente Montagesysteme

Aufbauend auf dem im vorangegangenen Kapitel 3 formulierten Handlungsbedarf im Entwicklungsprozess für Telemontagesysteme gibt dieses Kapitel einen Überblick über den hier entwickelten Lösungsansatz und grenzt die zu bearbeitenden Handlungsfelder ein. Die folgenden Kapitel 5 bis 7 beschreiben detailliert die auf den einzelnen Handlungsfeldern erzielten Ergebnisse und erläutern die dabei eingesetzten Technologien und Methoden.

### 4.1 Lösungsansatz

Grundsätzlich sieht der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Ansatz eine Entlastung des Entwicklers von Telemontagesystemen durch die Bereitstellung eines Softwarerahmens in Form mehrerer Softwarebibliotheken vor, deren Einsatz von einem Vorgehensmodell und einem zugehörigen Software-Werkzeug unterstützt wird (vgl. Abbildung 24).

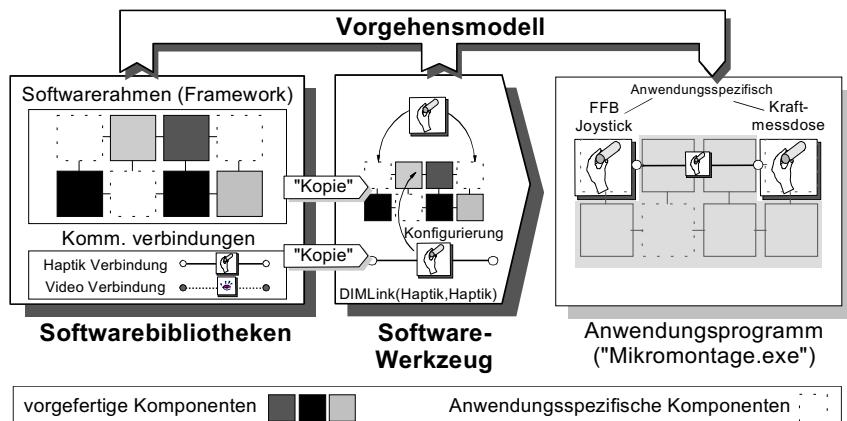


Abbildung 24: Lösungsansatz für die kommunikationstechnische Integration von Telemontagesystemen

Der Entwickler von Telemontagesystemen hat sein Anwendungsprogramm unter Integration dieses Softwarerahmens aufzubauen und bekommt dadurch modalitätsspezifische Kommunikationsverbindungen zur Verknüpfung von Ein- und Ausgabegeräten zur Disposition gestellt. Kommunikationstechnische Grundfunktionen zum Management eines Telepräsenznetzwerkes sind als interagierende Softwarebibliotheken bereits in den Rahmen integriert und können vom Entwickler ohne detaillierte Kenntnis der internen Struktur des so genannten "Frameworks" genutzt werden. Dem Entwickler wird somit die Möglichkeit gegeben, sich auf anwendungsspezifische Problemstellungen - beispielsweise die Optimierung der Bedienerchnittstelle - zu konzentrieren. Die dazu notwendige Kommunikationstechnik wird ihm vom

Framework zur Verfügung gestellt. Zur Sicherstellung einer systematischen und effizienten Anwendung des Frameworks während der Entwicklung wird das hier erarbeitete Rahmenkonzept wie in Abbildung 24 dargestellt von einem entsprechenden Vorgehensmodell und einer werkzeugunterstützten Beschreibungstechnik getragen.

Falls beispielsweise bei einer telepräsenten Mikromontage die Kopplung eines Kraftsensors auf der Teleoperatorseite mit einem haptischen Ein-/Ausgabegerätes auf der Operatorseite erforderlich ist, so hat der Entwickler mit Hilfe des Softwarewerkzeuges eine "Kopie" des Frameworks und der passenden Verbindung in sein Anwendungsprogramm zu integrieren (Abbildung 24: "*DIMLinkOP(Haptik,Haptik)*", vgl. Kapitel 5.2.1.3).

Der folgende Abschnitt 4.2 gibt einen Überblick über die weiteren Ausführungen in den Kapiteln fünf bis sieben, die detailliert beschreiben, welche Arbeiten zur Umsetzung dieses Ansatzes auf unterschiedlichen Handlungsfeldern geleistet und welche Ergebnisse dabei erzielt wurden.

## 4.2 Handlungsfelder

Auf dem Handlungsfeld *Strukturmodell* (vgl. Abbildung 25) wird zunächst das dem Rahmenkonzept zugrunde liegende Kommunikations- und Architekturmodell dargelegt. Zentrale Fragestellungen dabei sind, in welche Teilsysteme ein telepräentes Produktionssystem allgemein zerlegt werden kann, wie die Teilsysteme zu strukturieren sind und anhand welcher Kommunikationsverbindungen bzw. Schnittstellen diese miteinander kommunizieren. Grundlage der Erläuterungen bildet eine Beschreibung der bei der Strukturierung angewandten Methoden und der zur Flexibilitätssicherung genutzten Technologien.

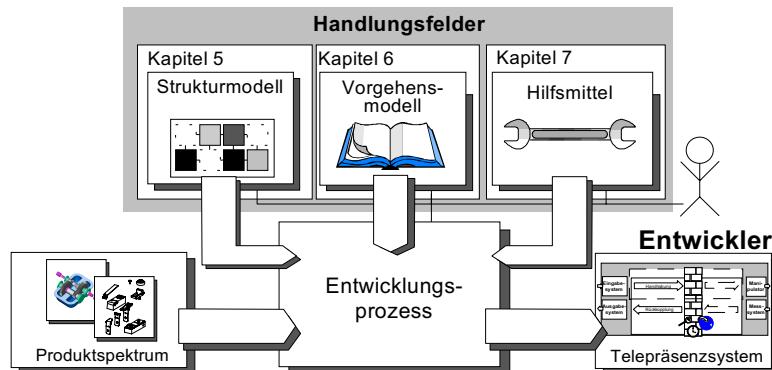


Abbildung 25: Handlungsfelder der vorliegenden Arbeit

Im Anschluss wird der auf dem Handlungsfeld *Vorgehensmodell* entwickelte Referenzprozess zur Anwendung und Anpassung des Rahmenkonzeptes beschrieben. Im Vordergrund steht hier die Vorgabe einer Gebrauchsanweisung, nach der das oben vorgestellte Architekturmodell im Rahmen der Entwicklung von telepräsenten Produktionssystemen eingesetzt werden soll.

Abschließend erfolgt eine Charakterisierung der zur Darstellung der Modelle vorgesehenen Beschreibungstechniken und Werkzeuge, wie sie auf dem Handlungsfeld *Hilfsmittel* realisiert wurden. Die Arbeiten auf diesem Handlungsfeld beschäftigen sich in erster Linie damit, wie das zuvor entworfene Modell grafisch abgebildet und dokumentiert werden kann, um die Nachhaltigkeit der Ergebnisse sicherzustellen.



## 5 Strukturmodell

Das vorliegende Kapitel 5 beschreibt den softwaretechnischen Kern des hier vorgestellten Rahmenkonzeptes für telepräsente Montagesysteme. Im Vordergrund steht die Erläuterung der zur Komplexitätsreduktion eingeführten mehrschichtigen Systemarchitektur sowie die Mechanismen zum Management eines Telepräsenznetzwerkes.

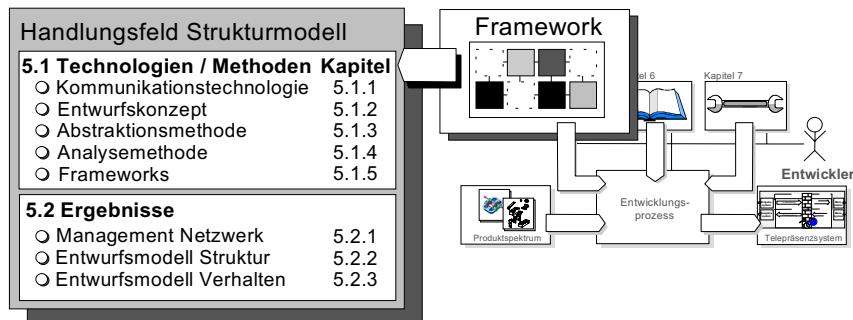


Abbildung 26: Überblick über das Handlungsfeld Strukturmodell

Als Verständnisgrundlage werden zunächst die Technologien und Methoden erläutert, die in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle spielen.

### 5.1 Technologien und Methoden

Ausgangspunkt der grundlegenden Beschreibungen ist die Erläuterung der Kommunikationstechnologie, die zum Informationsaustausch zwischen den verteilten Komponenten eingesetzt wird. Im Anschluss wird dargelegt, auf welchen konzeptionellen und methodischen Grundlagen die Analyse des Problembereiches sowie der Entwurf der Softwarearchitektur erfolgte und welche Abstraktionskriterien dabei angewendet wurden. Abschließendes Kapitel der grundlegenden Erläuterungen bildet eine Veranschaulichung der prinzipiellen Funktionsweise von Frameworks, die zur Sicherstellung der Wiederverwendbarkeit der entworfenen Softwarearchitektur herangezogen werden.

#### 5.1.1 Kommunikationstechnologie

Telepräsenzsysteme bzw. Computernetzwerke allgemein bestehen meist aus heterogenen, verteilten Einzelrechnern, die sich hinsichtlich der eingesetzten Hardwareplattformen und Betriebssysteme unterscheiden (Henning & Vinoski 1999). Beispielsweise können im Intranet einer Firma neben Einzelplatzrechnern mit diversen Microsoft-Betriebssystemen (z.B. Windows NT, Windows 98) auch unterschiedliche Mainframe-Rechner und UNIX-Workstations

angetroffen werden. Der Aufbau von verteilten Softwareanwendungen impliziert die Koppelung dieser Vielfalt von Betriebssystemen und deren jeweils proprietären Kommunikationsmechanismen. Die meisten verteilten Softwareanwendungen orientieren sich an einem Client/Server Modell (vgl. Kapitel 2.3.3.2), wobei Client und Server nicht unbedingt im gleichen Adressraum, d.h. auf dem gleichen Host angesiedelt sein müssen.

Zur Reduktion des anfallenden Programmieraufwandes wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Ansätze vorgestellt, wobei lediglich die Technologien Remote Method Interface (RMI), Common Object Request Broker Architecture (CORBA) und Distributed Component Object Model (DCOM) eine weitere Verbreitung gefunden haben.

Der von der Firma sun/JavaSoft vorgestellte Ansatz RMI erlaubt den Aufruf von Methoden innerhalb verteilter Anwendungen und entbindet den Programmierer weitgehend vom Verbindungsmanagement. Nachteilig bei der Beurteilung von RMI wirkt sich die Tatsache aus, dass RMI bislang nur zwischen Java-basierten Programmen eingesetzt werden kann.

Die Middleware<sup>22</sup> CORBA wurde von der Object Management Group (OMG<sup>23</sup>) Anfang der 90er Jahre vorgestellt und erlaubt den Methodenauftrag zwischen beliebig verteilten Clients und Servern. Beim Dienste-Aufruf spielt es für den Client weder eine Rolle, wo und auf welchem Betriebssystem der Server läuft noch in welcher Sprache der Server programmiert wurde. Kernstück von CORBA bildet der Object Request Broker (ORB), der für die Vermittlung von Dienstanfragen zwischen Clients und Servern verantwortlich ist.

DCOM wurde von der Firma Microsoft ursprünglich als Gegengewicht zu RMI auf den Markt gebracht und bietet einen ähnlichen Funktionsumfang wie CORBA. Bislang erlaubt DCOM aber lediglich die Integration von Programmen, die auf Betriebssystemen der Firma Microsoft basieren.

Für das hier vorgestellte Rahmenkonzept wurde die Middleware CORBA ausgewählt, da diese am ehesten Betriebssystem- und Herstellerunabhängigkeit garantiert und somit langfristig die Erweiterbarkeit des Rahmenkonzeptes sowie der damit aufgebauten Telemontagesystemen sicherstellt. Der einzige Nachteil beim Einsatz von CORBA stellt die Tatsache dar, dass nach heutigem Stand der Technik alle in der Praxis eingesetzten CORBA-Implementierungen sich auf eine Unterstützung des TCP/IP-Protokolls beschränken. Für die Datenübertragung zwischen zwei Netzwerknoten kann daher nicht von garantierten Antwortzeiten ausgegangen werden. Dennoch wurde der CORBA-Ansatz im Rahmen dieser Arbeit weiter verfolgt, da während der Analyse dieser Problematik zwei Aspekte den Ausschlag gaben:

Zum einen wurde eine Spezifikation von Real-Time-CORBA durch die OMG verabschiedet (vgl. *OMG 2002*), in der ein Lösungsansatz für das Problem der nicht deterministischen Antwortzeiten vorgelegt wurde. Dementsprechend wird in naher Zukunft mit einer CORBA-Implementierung gerechnet, die die besagte Problematik beseitigt. Wie weiter unten während

---

<sup>22</sup> Middleware entkoppelt Anwenderprogramme von Betriebssystemen durch die Einführung einer zwischengelagerten Kommunikationsvermittlungsschicht

<sup>23</sup> Die OMG ist ein Zusammenschluss mehrerer internationaler Großunternehmen, die sich die Standardisierung von objektorientierter Software zum Ziel gesetzt hat (vgl. auch *OMG 2002*)

der Erläuterung der Systemarchitektur beschrieben (vgl. Kapitel 5.2.2.6), ist die nachträgliche Anpassung des hier entworfenen Frameworks mit geringem Aufwand möglich.

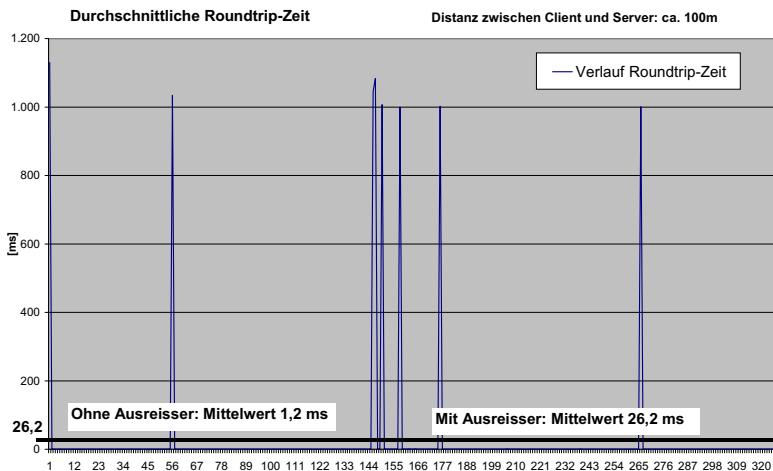


Abbildung 27: Durchschnittliche Netzwerk Roundtripzeit

Zum anderen ist im hier gewählten Anschauungsbeispiel der telepräsenten Mikromontage nicht von größeren Distanzen zwischen der Operator- und Teleoperatorseite auszugehen, so dass eventuell auftretende Kommunikationsverzögerungen keinen nachteiligen Einfluss auf die Datenübertragung nehmen sollten. Beispielsweise wurden zur Beurteilung der anfallenden Kommunikationsverzögerungen Messungen der durchschnittlichen Roundtrip-Zeit<sup>24</sup> unter verschiedenen Lastbedingungen im hier betrachteten Rechnernetz des iwb<sup>25</sup> vorgenommen (vgl. Abbildung 27). Wie der Kurvenverlauf erkennen lässt, liegen die durchschnittlichen Verzögerungszeiten selbst unter Berücksichtigung sporadischer Ausreißer mit 26,2 ms deutlich unter dem maximal tolerierbaren Wert von 300 ms (vgl. Kapitel 2.2). Somit konnten die Bedenken hinsichtlich des Einsatzes von CORBA in diesem Zusammenhang zerstreut werden.

Wie in Abbildung 28 dargestellt, besteht CORBA im Wesentlichen aus den Bestandteilen IDL-Stubs, IDL-Skeletons, ORB-Core, dem Object-Adapter sowie dem ORB Interface und dem Dynamic Invocation Interface (DII) (vgl. z.B. *Henning & Vinoski 1999*).

<sup>24</sup> Zeit zwischen Anfrage und Antwort bei einer Dienstanforderung inklusive Datenübertragungszeit

<sup>25</sup> Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München

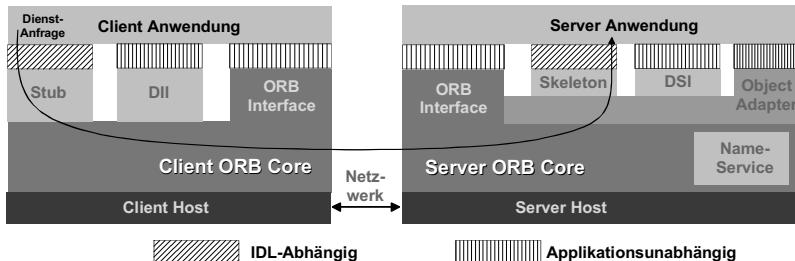


Abbildung 28: Details der Common Object Broker Request Architecture

Der ORB-Kern (engl.: Core) bildet die Transportschicht von CORBA, die die Netzwerkverbindungen zwischen Clients und Servern verwaltet und einige Basisdienste zur Verfügung stellt. Ein Server, der eine bestimmte Methode zur Verfügung stellen will, muss die bereitgestellte Methode in einer Schnittstelle (engl.: Interface) mittels einer speziellen Sprache, der Interface Definition Language (IDL) beschreiben. Die Schnittstellenbeschreibung wird in einer Beschreibungsdatei abgelegt, die von einem IDL-Generator (eng.: IDL-Compiler) weiterverarbeitet werden kann. Der Compiler erzeugt aus der Beschreibungsdatei einen IDL-Rumpf (engl.: IDL-Stub) für den Client, der in Form von Bibliothekskomponenten eingesetzt werden kann, um den spezifizierten Dienst vom Server anzufordern. Falls zum Zeitpunkt der Programmierung des Clients die IDL-Beschreibung eines bestimmten Dienstes noch nicht vorliegt, so kann der Client zur Laufzeit über das DII die dem ORB bekannten Schnittstellen abfragen und somit online eine Dienste-Anforderung generieren.

Neben dem IDL-Stub erzeugt der IDL-Compiler ein IDL-Skelett (engl.: Skeleton) für den Server, das vom Programmierer des Servers mit Code zu befüllen ist. Der Code wird abgearbeitet, sobald eine Dienste-Anforderung seitens des Clients eintrifft.

Dienste-Anforderungen werden vom Client über den IDL-Stub, den ORB-Core und den Object-Adapter zum IDL-Skeleton und schließlich den Server geleitet (vgl. Abbildung 28). Der Object-Adapter übernimmt dabei die Rolle eines entkoppelnden Elementes zwischen den IDL-Stubs und dem ORB-Core, um die Verbindung zwischen Server und Core an unterschiedliche Anwendungsbereiche oder Programmiersprachen anpassen zu können.

Zur Vermittlung von Dienste-Anforderungen zwischen Client und Server wird für gewöhnlich einer der zentralen ORB-Dienste, der Name-Service eingesetzt. Der Name-Service fungiert als "gelbe Seiten" eines CORBA-Netzwerkes und verwaltet die Adressen aller im Netz verfügbaren Server. Die Eintragung in die gelben Seiten erfolgt während der Initialisierung eines Servers durch Registrierung seiner Adresse (auch: Objektreferenz) beim Name-Server. Ein Client, der eine Anforderung an einen bestimmten Server richten möchte, fordert beim Name-Server die Objektreferenz des Servers an und kann sich dann direkt an den gewünschten Server wenden. Der Name-Server trägt somit zur Entkopplung von Client und Server bei und unterstützt die freie Verteilbarkeit von Client und Server innerhalb eines CORBA-Netzwerkes.

Wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von CORBA als Kommunikations-Middleware stellt die Definition geeigneter Schnittstellenbeschreibungen in Form von IDL-Files dar. Die wesentlichen innerhalb von Telepräsenznetzwerken erforderlichen Schnittstellen sind im Ergebnisteil Informationsverteilung zusammengefasst.

Für weitere technische Details sei auf die entsprechenden Fachliteratur verwiesen: Grundlagen und aktuelle Themen zu CORBA können beispielsweise unter *OMG 2002b* und *Schmidt 2002* nachgelesen werden. Aspekte zum Einsatz von CORBA mit C++ werden u.a. von *Henning & Vinoski 1999* diskutiert.

### 5.1.2 Analyse- und Entwurfskonzept

Um die systemimmanente Komplexität technischer Systeme beherrschbar zu machen, schlägt die Systemtheorie u.a. das Hilfsmittel der Abstraktion vor (*Patzak 1982*). Mittels der Abstraktion komplexer Zusammenhänge und deren Abbildung in einem Modell gelingt es, Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Systemkomponenten zu identifizieren, zu isolieren und gegebenenfalls auf Basis von modellbasiertem Wissen zu reduzieren oder zu substituieren.

Die Abbildung der Realität in einem Modell und die Identifikation häufig auftretender Strukturen verbessert nach *Booch 1996* das Verständnis für das Gesamtsystem, was eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb, die Erweiterbarkeit und Wartbarkeit komplexer Systeme darstellt. Durch eine modellbasierte Reduktion oder Substitution von Abhängigkeiten zwischen verteilten Komponenten lässt sich darüber hinaus eine Verringerung des Kommunikationsaufwandes erzielen.

Je nach Problemdomäne<sup>26</sup> umfassen Modelle beispielsweise algorithmische oder geometrische Modelle, wie sie z.B. beim Regelungsentwurf oder in der mechanischen Konstruktion eingesetzt werden. Für jede Domäne wurde im Laufe der Zeit eine eigene Notation<sup>27</sup> festgelegt, die zur Darstellung der für die jeweilige Domäne charakteristischen Aspekte am geeignetsten erschien.

Aus dem Evolutionsprozess im Bereich der Softwareentwicklung haben sich in den letzten Jahren objektorientierte Analyse- und Entwurfsansätze als das bestimmende Paradigma herauskristallisiert, das die integrierte Betrachtung dynamischer (funktionaler) und statischer (struktureller) Aspekte in einem Modell erlaubt (*Balzert 1996*). Frühere Entwurfskonzepte wie SD (structured Design, vgl. z.B. *Yourdan & Constantine 1979*) konzentrierten sich im Gegensatz dazu auf eine rein funktionale Abstraktion zur Beschreibung von Operationen. Die Modellierung von Datenobjekten wurde nicht unterstützt, was sich in datenlastigen Anwendungen als gravierender Nachteil herausstellt (*Balzert 1996*). Zur grafischen Abbildung objektorientierter Modelle hat sich in den letzten Jahren als Quasi-Standard die Unified Modeling Language (UML, vgl. *OMG 2002c* und Anhang A) durchgesetzt.

---

<sup>26</sup> Domäne: „Arbeits-, Wissensgebiet auf dem jemand besonders gut Bescheid weiß“ (*Drosdowski 1982*)

<sup>27</sup> Notation: „Darstellung von Informationen durch Symbole“ (*Drosdowski 1982*)

Im objektorientierten Ansatz wird die physikalische Realität als eine Menge miteinander kooperierender Objekte modelliert, die anhand von Nachrichten (Methodenaufrufen) miteinander interagieren. Gleichartige Objekte werden zu einer so genannten "Klasse" als dem zentralen Modellierungselement zusammengefasst (vgl. Abbildung 29 (1)). Eine Klasse ist charakterisiert durch eine gekapselte Menge von Eigenschaften (Attributnen) sowie Operationen (Methoden) zur Manipulation der Attribute und vereint somit statische und verhaltensorientierte Aspekte.

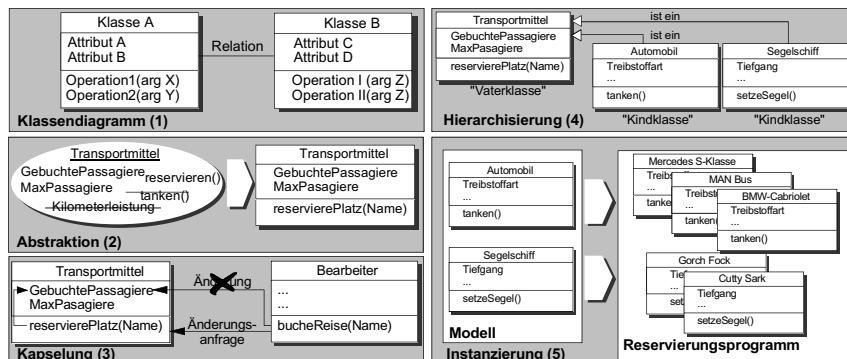


Abbildung 29: Konzepte des objektorientierten Paradigmas

Statische Beziehungen zwischen einzelnen Klassen werden mittels der UML in so genannten *Klassendiagrammen* abgebildet. Das Diagramm in Abbildung 29 (1) stellt beispielsweise die Klassen "A" und "B" anhand eines Kastens dar. Als Charakteristika der Klassen werden die Attribute "A" bzw. "B" und die Methode "Operation1()" in den Kasten geschrieben. Eine Relation als Ausdruck einer Kooperation zwischen den Klassen ist mittels einer Linie abgebildet.

Das objektorientierte Paradigma lebt im Wesentlichen von der Einhaltung der Prinzipien Abstraktion, Kapselung, Modularität und Hierarchisierung.

Das *Prinzip der Abstraktion* wird herangezogen, um aus einer bestimmten Sicht beim Systementwurf die für den Betrachtungsblickwinkel irrelevanten Aspekte eines physikalischen Objektes auszublenden und nur die Charakteristika zu betrachten, die es von anderen Objekten unterscheidet (vgl. Abbildung 29 (2)). Geht es beispielsweise um die Modellierung der Fahrzeugflotte aus Sicht der Reservierungsabteilung eines Reiseveranstalters, so kann für alle Fortbewegungsmittel, über die das Unternehmen verfügt, eine Klasse "Transportmittel" definiert werden, das als bestimmende Attribute die aktuelle Anzahl der angemeldeten Passagiere ("GebuchtePassagiere") sowie eine maximal zulässige Anzahl von Passagieren ("MaxPassagiere") besitzt. Eine Methode, die von der Klasse "Transportmittel" zur Verfügung gestellt wird, könnte beispielsweise "Platz reservieren" sein. Eigenschaften wie "aktuelle Kilometerleistung" oder Methoden wie "tanken" sind für die Reservierungsabteilung irrelevant und

werden in diesem Modell ausgeblendet, auch wenn sie z.B. aus Sicht der Wartungsabteilung interessant wären.

Die Einhaltung des *Prinzips der Kapselung* sorgt dafür, dass interne Details einer Klasse von anderen Klassen nicht eingesehen oder manipuliert werden können (vgl. Abbildung 29 (3)). Die Interaktion zwischen einzelnen Klassen hat ausschließlich unter Verwendung der nach außen hin sichtbaren Methoden-Schnittstellen zu erfolgen. Kapselung verhindert somit eine zu starke Abhängigkeit zwischen einzelnen Klassen und trägt zur Komplexitätsreduktion bei, da die interne Komplexität einer Klasse nach außen hin verborgen bleibt. Angewendet auf das Beispiel der Klasse "Transportmittel" bedeutet dies, dass das Attribut "GebuchtePassagiere" nur durch Anforderung der Methode "Platz reservieren" und nicht direkt von einer externen Klasse manipuliert werden kann.

Eng verknüpft mit den Prinzipien der Abstraktion und Kapselung ist das Prinzip der Modularität, das es erlaubt ein komplexes System in einige weniger komplexe Teilsysteme (Module) zu zerlegen. Diese wiederum können nur anhand definierter Schnittstellen adressiert werden. Ein Modul setzt sich aus unterschiedlichen, fachlich verwandten Klassen zusammen, deren Zusammenwirken ein bestimmtes funktionales Verhalten an den Modulgrenzen zur Verfügung stellt.

*Hierarchisierung*<sup>28</sup> als letztes der angeführten Prinzipien erlaubt die Einführung einer Rangordnung von Abstraktionen, um ein System auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen immer genauer zu beschreiben (vgl. Abbildung 29 (4)). In einer Hierarchie erweitern die Elemente auf einer niedrigen Abstraktionsstufe die Charakteristika der Elemente der nächst höheren Abstraktionsstufe. Wiederum angewendet auf das Beispiel der Klasse "Transportmittel" könnte zur Berücksichtigung von Betriebsaspekten die nächst niedrigere Abstraktionsstufe aus den Klassen "Automobil" und "Segelschiff" bestehen, die sich hinsichtlich spezieller Eigenschaften und Methoden unterscheiden können. Dennoch verfügt sowohl das Automobil als auch das Segelschiff über die Attribute "GebuchtePassagiere" und "MaxPassagiere" sowie die Methode "Platz reservieren" (in Abbildung 29 nicht dargestellt).

Einen weiteren, wesentlichen Begriff bei der Anwendung objektorientierter Modellierungskonzepte stellt der Begriff der Instanzenbildung (oder Instanzierung) dar, der das Anlegen eines Objektes von einer bestimmten Klasse in einem Anwendungsprogramm umschreibt. In Abbildung 29 (5) werden u. a. die Objekte "Mercedes-S-Klasse" bzw. "Gorch Fock" als Instanzen der Klassen *Automobil* bzw. *Segelschiff* im *Reservierungsprogramm* angelegt.

Da die Identifikation von geeigneten Klassen im Problembereich eine nicht triviale Aufgabe darstellt und stark vom Blickwinkel des Modellierers abhängt, sollte beim Aufbau eines Klassenmodells möglichst nach einer allgemeinen Abstraktions- und Modellierungsmethode vorgegangen werden, um die entstehenden Modelle vergleichbar und wiederverwendbar zu machen. Der folgende Abschnitt 5.1.3 geht daher näher auf die hier beim Aufbau des Softwaremodells eingesetzte Abstraktionsmethode ein.

---

<sup>28</sup> Hierarchisierung wird auch als Vererbung zwischen "Vater-" und "Kindklassen" bezeichnet

### 5.1.3 Abstraktionsmethode

Das hier vorgestellte Architekturmodell strukturiert das Gesamtmodell einer telepräsenten Montageeinrichtung im Sinne der Komplexitätsbeherrschung in mehrere Abstraktionsebenen. Es dient zum einen als Diskussionsgrundlage bei der Entwicklung eines Telepräsenzsystems und zum anderen zur Abgrenzung von Softwaremodulen, die unabhängig voneinander entwickelt werden können. Das Modell resultiert aus einer Gegenüberstellung des weiter oben skizzierten Vorgehens bei der Entwicklung von telepräsenten Montagesystemen und kognitiven Ansätzen der menschlichen Informationsverarbeitung nach *Rasmussen 1986* (vgl. Abbildung 30)

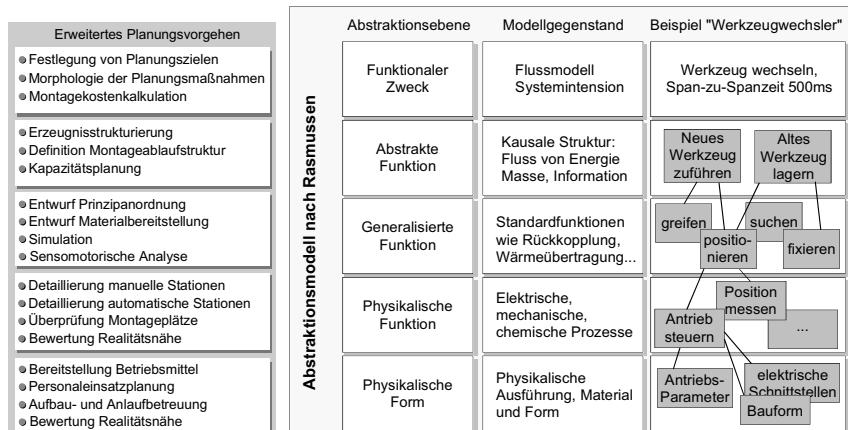


Abbildung 30: Erweitertes Planungsvorgehen im Vergleich zur Mittel-Zweck-Hierarchie nach Rasmussen 1986

Die funktionalen Eigenschaften eines Supervisory-Control Systems sollten nach Rasmussen idealer Weise in Form einer Mittel-Zweck-Hierarchie dargestellt werden. Eine derartige Hierarchie beschreibt bottom-up, wozu einzelne Funktionen und Komponenten verwendet werden und wie sie in einen übergeordneten Zusammenhang eingebettet werden können (*Rasmussen 1986, S.14*).

*Rasmussen* unterscheidet die fünf in Abbildung 30 dargestellten Abstraktionsebenen, die bei einer Interpretation von oben nach unten ein technisches System ausgehend von einer abstrakten Zweckfunktion bis hin zur technischen Umsetzung schrittweise detaillieren. Jede Schicht erfüllt eine bestimmte Aufgabe und bindet zu deren Umsetzung die Funktionen der nächst tiefer liegenden Schicht ein. Ein Vergleich der Abstraktionsebenen mit dem Entwicklungsvorgehen für telepräsente Montagesysteme lässt unschwer erkennen, dass im Rahmen des Entwicklungsvorgehens die gleichen Abstraktionsschritte durchlaufen werden müssen.

In Ergänzung des Abstraktionsmodells nach *Rasmussen* ist in verteilten Systemen die Lokalität der betrachteten Teilsysteme sowie der zwischen den Teilsystemen eingesetzte Kommunikationsmechanismus zu berücksichtigen. Da diese beiden Aspekte unabhängig voneinander

variiert werden können, wird die Mittel-Zweck-Hierarchie um die zusätzlichen Schichten "Domäne" und Kommunikation" erweitert (Abbildung 31).

Abstraktionsebene		Modellgegenstand	Beispiel "Werkzeugwechsler"	
Abstraktionsmodell nach Rasmussen	(7) Funktionaler Zweck	Flussmodell Systemintension	Werkzeug wechseln, Span-zu-Spanzeit 500ms	Softwaretechnisch irrelevant
	(6) Abstrakte Funktion	Kausale Struktur: Fluss von Energie Masse, Information	Neues Werkzeug zuführen Altes Werkzeug lagern	
	(5) Generalisierte Funktion	Standardfunktionen wie Rückkopplung, Wärmeübertragung...	greifen suchen positio-nieren fixieren	
	(4) Physikalische Funktion	Elektrische, mechanische, chemische Prozesse	Antrieb steuern Position messen ...	Softwaretechnisch relevant  Applikationsspezifische Modellinhalte (Applikationsschicht)
	(3) Physikalische Form	Physikalische Ausführung, Material und Form	Antriebs-Parameter elektrische Schnittstellen Bauform	
	(2) Domäne	Lokalität, Punkt-zu-Punkt-Verbindung, Broadcastverbindung	Halle 1, Platz 12 Halle 2, Platz 3	
	(1) Kommunikation	Funk, Richtfunk, Kabel	Profibus DP	Topologiespezifische Modellinhalte (Domäenschicht)  Technologie spezifische Modellinhalte (Kommunikationsschicht)

Abbildung 31: Softwaretechnisch relevante Ebenen der erweiterten Mittel-Zweck-Hierarchie

Die Domänenebene (2) beschreibt die topologisch relevanten Aspekte eines Telepräsenznetzwerkes, also die unterschiedlichen Arten von Netzwerkverbindungen zwischen den einzelnen Netzwerklementen sowie deren lokale Anordnung. Die darunter liegende Kommunikationsebene (1) modelliert kommunikationsspezifische Aspekte, die in erster Linie von der eingesetzten Kommunikationstechnologie abhängen.

Das somit entstehende Abstraktionsmodell beschreibt alle für die technische Entwicklung relevanten Aspekte eines Telepräsenzsystems, wobei den obersten drei Abstraktionsebenen (5-7) aufgrund des hohen Abstraktionsgrades lediglich für die frühe Konzeptionsphase eine wesentliche Bedeutung beigemessen werden kann. Für die softwaretechnische Umsetzung des Gesamtsystems sind die unteren vier Schichten (Abbildung 31: 1-4) relevant, da hier die umzusetzenden funktionalen, hardwaretechnischen und kommunikationstechnischen Systemeigenschaften in hinreichendem Detaillierungsgrad vorliegen.

Die softwaretechnisch relevanten Abstraktionsschichten werden im Ergebnisteil für den Entwurf der Makro-Architektur herangezogen (vgl. Kapitel 5.2.2). In einem nächsten Schritt sind

im Rahmen einer tiefergehenden Analyse alle schichtspezifischen, funktionsbestimmenden Dienste und deren Relationen festzulegen (Entwurf der Mikroarchitektur). Diese Analyse wird unter Anwendung und Modifikation einer bestehenden Analysemethode vorgenommen, wie sie im folgenden Abschnitt 5.1.4 beschrieben ist.

### 5.1.4 Analysemethode für den Entwurf der Mikroarchitektur

Im Laufe der Evolution von objektorientierten Analysemethoden wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze entwickelt, von denen sich langfristig nur einige wenige behaupten konnten (vgl. z.B. Stein 1997 für eine detaillierte Analyse existierender Methoden).

Die hier angewandte Methode beim Entwurf der Mikro-Architektur orientiert sich an der Methode COMET<sup>29</sup> nach Gooma 2000, in der ausgehend von einer Analyse möglicher Anwendungsfälle (Use-Cases, vgl. Anhang A) des zu entwerfenden Systems ein statisches Modell des Problemkontextes entworfen wird. Auf Basis dieses statischen Modells wird dann ein grobes dynamisches Modell aufgebaut und anhand von Sequenz- und Zustandsdiagrammen (vgl. Anhang A) beschrieben. Die Sequenz- und Zustandsdiagramme schließlich werden dazu herangezogen, um die im statischen Modell identifizierten Klassen mit Attributen und Methoden zu versehen. Nach dem Entwurf des statischen und dynamischen Modells für jeden Use-Case werden die einzelnen Klassen-, Sequenz- und Zustandsdiagramme zu jeweils einem Gesamtdiagramm vereinigt, die dann das Gesamtmodell des betrachteten Systems darstellen.

Die Methode COMET unterscheidet dabei nicht nach funktionalen Abstraktionsebenen sondern ist auf den Entwurf einer flachen Systemhierarchie ausgerichtet. Die entstehenden Modelle werden sehr komplex, da alle Aspekte von der anwendungsorientierten, funktionalen Beschreibung bis hin zur Spezifikation der physikalischen Geräte auf ein und derselben Abstraktionsebene abgebildet werden.

Im hier verfolgten Ansatz wird die COMET-Methode auf jede einzelne der oben vorgestellten Abstraktionsschichten angewendet, um in der Modellierung jeweils eine wesentliche Sicht auf das Gesamtsystem zu fokussieren.

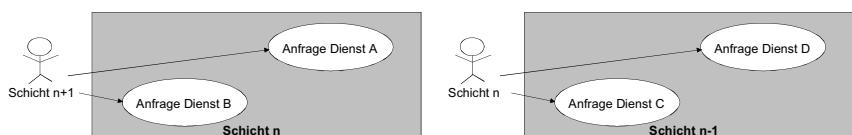


Abbildung 32: Schichtspezifische Use-Cases für die Analyse

Zur verständlichen Abbildung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Dienst-Anfragen einer Abstraktionsschicht an die nächst tiefer liegende Schicht werden schichten-

---

<sup>29</sup> COMET: Concurrent Object Modeling and Architectural Design Method

spezifische Use-Cases eingesetzt. In diesen tritt die dienstanfragende Schicht als Aktor gegenüber der dienstanbietenden Schicht auf und bindet diese in einen oder mehrere Use-Cases ein (Abbildung 32).

Die im Entwurf der Mikro- und Makroarchitektur entstehende Modul- und Klassenstruktur ist in wiederverwendbare Software-Komponenten zu gießen, um diese während der Entwicklung von Telepräsenzanwendungen nutzen zu können. Der folgende Abschnitt 5.1.5 beschreibt, welches Wiederverwendungskonzept dabei verfolgt wird und auf welchen Prinzipien dieses beruht.

### 5.1.5 Frameworks

Zur Umsetzung des Gedankens der Software-Wiederverwendung stehen Ansätze unterschiedlicher Leistungsfähigkeit wie Funktions- oder Klassenbibliotheken aber auch Entwurfsmuster und Frameworks zur Verfügung (*Balzert 1996, S. 802 u. S. 864 ff.*). Die einzelnen Konzepte unterscheiden sich wie in Abbildung 33 dargestellt hinsichtlich der von ihnen berücksichtigten Wiederverwendungssaspekte. Funktionsbibliotheken sind beispielsweise darauf ausgerichtet, einzelne Algorithmen - etwa zur Berechnung der Konstante Pi - zur Verfügung zu stellen.

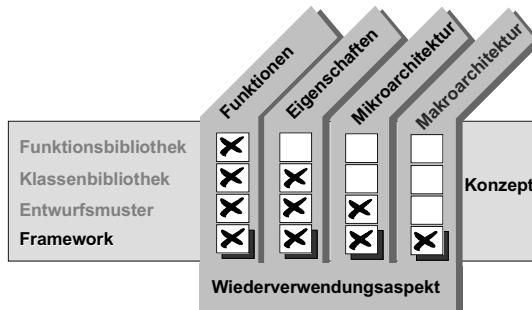


Abbildung 33: Aspekte und Konzepte der Wiederverwendung

Frameworks hingegen bestehen aus einer Menge zusammenarbeitender Klassen, die einen wiederverwendbaren Entwurf für einen bestimmten Anwendungsbereich implementieren (vgl. z.B. *Balzert 1996, S. 285*). Im Gegensatz zu einfachen Klassen- bzw. Funktionsbibliotheken, die „lediglich“ eine strukturierte Sammlung von Klassen bzw. Funktionen darstellen, erzwingen Frameworks eine ganz bestimmte Anwendungsarchitektur. Dieser „Zwang“ wird erzeugt, indem die einzelnen Klassen des Frameworks bereits in einem definierten Kontext zu einander stehen und damit einen bestimmten Kontrollfluss festlegen.

Während in Anwendungen auf Basis von Klassenbibliotheken der Kontrollfluss meist aus dem Anwendungsprogramm heraus in Richtung der Bibliotheken erfolgt, ist er in framework-basierten Systemen entgegengesetzt gerichtet (vgl. Abbildung 34).

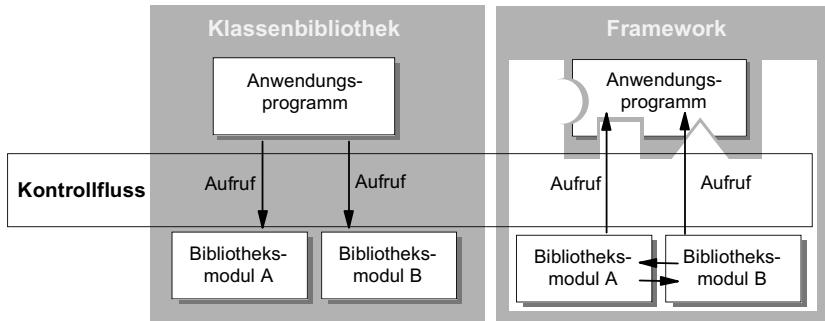


Abbildung 34: Kontrollfluss und Struktur von Klassenbibliotheken und Frameworks

Somit wird durch Frameworks nicht nur die Wiederverwendung von Programmiercode ermöglicht, sondern auch die nach *Landin & Niklasson 1995* wesentlich wichtigere Wiederverwendung von Analyse- und Designkonzepten. Der Einsatz von Frameworks hat somit nach *Balzert 1996, S. 285* nicht nur eine Verkürzung der Entwicklungszeit und des time-to-market, sondern aufgrund der Anwendung ähnlicher Strukturen auch die einfachere Wartbarkeit der Software zur Folge. Durch den Einsatz von Frameworks wird darüber hinaus der Testumfang für das Gesamtsystem reduziert, da ein Großteil der Funktionalität bereits vorab getestet worden ist. Die Systemzuverlässigkeit steigt, da im Laufe des Lebenszyklus eines Frameworks kontinuierlich Fehler ausgemerzt werden und somit auch Wartungskosten reduziert werden können (*Ho & Jezequel 1998*).

Programmierer setzen Frameworks in erster Linie dazu ein, um Know-How in einem bestimmten Problembereich nutzen zu können, ohne dieses neu entwickeln zu müssen (*Adair 1995*). Frameworks tragen daher zum Wissensmanagement bei, indem sie Erfahrungen in einer bestimmten Problemdomäne konservieren. So wurden beispielsweise Frameworks für grafische Benutzeroberflächen (ET++, vgl. *Weinand & Gamma 1994*), für die computerintegrierte Produktion (CIM, vgl. *Sematech 2002*) oder auch für verteilte Informationssysteme (ACE, vgl. *Schmidt 1998*) entworfen, setzen sich jedoch nicht mit den Herausforderungen multimodaler Telepräsenzsysteme auseinander.

Den beschriebenen Vorteilen steht ein erhöhter Initialisierungsaufwand bei der Frameworkentwicklung und der Frameworkeinarbeitung gegenüber. Der höhere Entwicklungsaufwand ergibt sich aus dem gegenüber von Einzellösungen erhöhten Analyse- und Implementierungsaufwand, da es länger dauert, eine tragfähige Gesamtarchitektur zu entwerfen, als ein einziges, applikationsspezifisches Programm (*Froehlich et al. 1998*). Der erhöhte Einarbeitungsaufwand ist bedingt durch die Tatsache, dass ein Softwareentwickler sich zur Anwendung

eines Frameworks ein gewisses Grundverständnis über dessen Funktionsweise aneignen muss, ein Aufwand der bei maßgeschneiderten Einzellösungen nicht anfällt.

In den nachstehenden Abschnitten werden die wichtigsten Bestandteile eines Frameworks vorgestellt und die wesentlichen Konzepte zu deren Dokumentation erläutert.

### 5.1.5.1 Aufbau und Klassifizierung von Frameworks

Wie in Abbildung 35 (rechts) dargestellt, zerfällt ein frameworkbasiertes Softwaresystem in die Blöcke Framework-Kern, Framework-Bibliothek, anwendungsspezifische Erweiterungen und die Anwendung selbst (vgl. *Froehlich et al. 1998*).

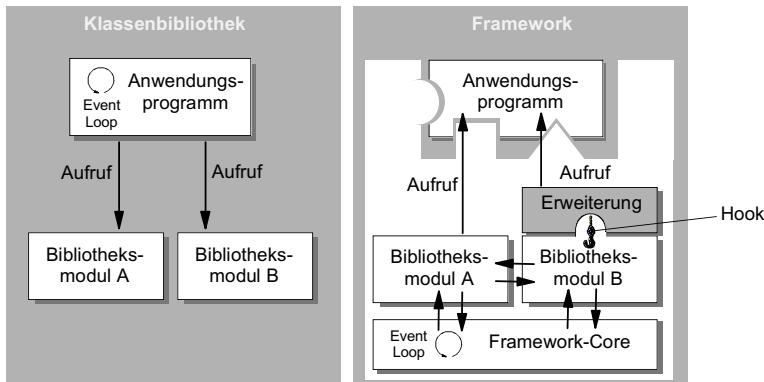


Abbildung 35: Wesentliche Bestandteile eines Frameworks

Der Rahmen (engl.: Frame) für das Softwaresystem wird aufgespannt durch die Framework-Bibliotheken, die vom Anwender des Frameworks in applikationsspezifische Erweiterungen des Frameworks eingebunden werden können. Die Bibliotheken bestehen aus einzelnen Klassen, die auf den Framework-Kern zugreifen und somit die vorgefertigte Funktionalität des Frameworks nutzen können. Der Framework-Kern und die Frameworkbibliotheken legen bereits einen Großteil der Gesamtarchitektur des zu entwickelnden Softwaresystems fest, in dem nur an einzelnen Stellen noch applikationsspezifische Erweiterungen vorgenommen werden müssen. Dadurch wird der Applikationsentwickler gezwungen, sein System nach den Vorgaben des Frameworks zu strukturieren und damit für die oben als vorteilhaft bewertete Vereinheitlichung unterschiedlicher Anwendungen zu sorgen.

An den Teilen des Frameworks, an denen anwendungsspezifische Erweiterungen vorgenommen werden können, werden vom Frameworkentwickler so genannte "Hooks" (vgl. *Froehlich et al. 1997*, Abbildung 35, Bibliotheksmodul B) vorgesehen. Mittels eines Hooks können vor-

handenen Bibliotheksmodulen durch Vererbungsmechanismen neue Elemente hinzugefügt werden.

Gemäß *Froehlich et al. 1998* können Frameworks nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert werden. Je nach Betrachtungsschwerpunkt kann eine Einteilung hinsichtlich des Problembereiches, der Anpassbarkeit oder auch des Kontrollflusses - vgl. Abschnitt 5.1.5 - erfolgen (vgl. Abbildung 36).

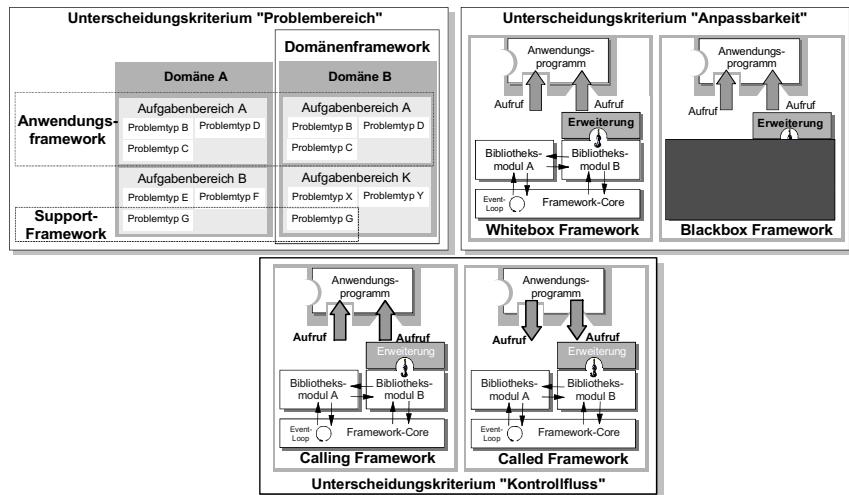


Abbildung 36: Unterschiedliche Kategorien von Frameworks

Eine Einteilung von Frameworks hinsichtlich des *Problembereichs* unterscheidet zwischen Anwendungs-, Domänen- und Supportframeworks.

- Anwendungsframeworks bieten domänenübergreifende, horizontale Unterstützung für ein weites Feld an Problemen. Als typisches Beispiel seien Frameworks für Bedienerchnittstellen genannt, die für viele unterschiedliche Problemdomänen eingesetzt werden können.
- Domänenframeworks hingegen offerieren eher vertikales Know-How für einen ganz genau eingrenzbaren Problembereich. Typische Beispiele sind Frameworks für Betriebssysteme, Fertigungseinrichtungen oder Finanzanwendungen.
- So genannte Supportframeworks schließlich bieten Unterstützung für häufig verwendete Einzelprobleme, die in andere Frameworks eingebunden werden können. Supportframeworks bieten beispielsweise Unterstützung für die Handhabung von Dateien oder der Systemzeit.

Aus Sicht der *Anpassbarkeit* werden Frameworks nach *Adair 1995* auch in "Black" und "White Box" Ansätze eingeteilt, die sich hinsichtlich des notwendigen Wissens unterscheiden, das zur Anwendung der Frameworks erforderlich ist.

- Zur Anwendung von "White Box" Frameworks werden häufig Vererbungsmechanismen eingesetzt, so dass neu hinzuzufügende Klassen von einzelnen Frameworkklassen ableiten sind. Zur effizienten Nutzung des Vererbungsmechanismus ist allerdings ein tiefes Verständnis der dem Framework zugrunde liegenden Vererbungshierarchie erforderlich.
- "Black Box" Frameworks hingegen greifen eher auf Mechanismen der Komposition vorhandener Elemente zurück, um neue Funktionen zur Verfügung zu stellen. Sie sind daher leichter anzuwenden und werden daher ausgehend von einem "White Box" Framework in einer frühen Phase der Frameworkentwicklung nach *Fayad & Schmidt 1999, S. 10* oft als eigentliches Entwicklungsziel angestrebt, auch wenn der Aufbau eines "Black Box" Frameworks eines größeren Entwicklungsaufwandes bedarf.

Das hier entworfene Framework ist als „Gray Box“ Anwendungsframework für die kommunikationstechnische Integration von Telemontagesystemen konzipiert. In „Gray Box“ Frameworks ist ein Teil der Funktionen für den Anwender sichtbar, ein anderer Teil bleibt vollkommen verborgen. In diesem Sinne sind beispielweise Funktionen zur Integration neuer Modalitäten in das Framework für den Entwickler sichtbar, die Mechanismen zum Auf- und Abbau von Kommunikationsverbindungen hingegen werden als nicht einsehbar zur Verfügung gestellt.

### 5.1.5.2 Dokumentation von Frameworks

Wesentlicher Bestandteil eines jeden Frameworks stellt eine umfassende Dokumentation der Funktionsweise und Anwendung des Frameworks dar, da nach *Booch 1994* für deren effizienten Einsatz gilt:

"The most profoundly elegant framework will never be used unless the cost of understanding it and then using its abstractions is lower than the programmer's perceived cost of writing them from scratch."

Die optimale Dokumentation von Frameworks stellt Gegenstand einer kontrovers geführten Diskussion dar, in der sich unterschiedliche Techniken gegenüber stehen (vgl. z.B. *Johnson 1992, Froehlich et al. 1998, Fayad & Schmidt 1999, Butler & Denommee 1997*). Nach *Fayad & Schmidt 1999, S. 500* können Frameworks u.a. anhand von Framework-Übersichten, Beispielen, "Kochrezepten" bzw. "Kochbüchern", Entwurfsmustern oder Referenz-Handbüchern beschrieben werden.

*Frameworkübersichten* ordnen ein Framework in den betrachteten Problemkontext ein, indem wesentliche Begriffe des Problembereichs sowie der vom Framework abgedeckte Funktionsumfang erläutert werden. Übersichten stellen somit für den Programmierer eine Einstiegsmöglichkeit bei der Anwendung eines Frameworks dar.

*Beispiele* beschreiben anhand des Sourcecodes von lauffähigen Anwendungen, die auf Basis des Frameworks entworfen worden sind, wie das Framework einzusetzen ist und stellen häufig die einzige Art der Dokumentation dar, die über ein Framework zur Verfügung steht. Programmieranfängern fällt es oft schwer, diese Art der Dokumentation nachzuvollziehen und das Framework zu verstehen.

*Kochrezepte* hingegen greifen punktuell einzelne Wiederverwendungaspekte beim Einsatz des Frameworks heraus und beschreiben anhand von natürlich sprachlichem Text, Bildern und Codesegmenten, wie einzelne Teile des Frameworks eingesetzt und erweitert werden können. Gewöhnlich werden mehrere zusammengehörende Kochrezepte zu einem *Kochbuch* zusammengefasst, das der einfacheren Orientierung halber mit Übersichtsdarstellungen der einzelnen Rezepte sowie deren Beziehungen untereinander ausgestattet ist.

In konzeptioneller Nähe zu Kochrezepten sind so genannte *Entwurfsmuster* angesiedelt, die allerdings auf höherem Abstraktionsniveau eine Beschreibung für ein bestimmtes, allgemeines Entwurfsproblem liefern. Im Vordergrund steht dabei häufig die Gewährleistung der Frameworkflexibilität, indem für bestimmte, immer wiederkehrende Entwurfsprobleme eine bewährte, generische Lösung zur Verfügung gestellt wird (vgl. *Balzert 1996, S.874*). Jedes Entwurfsmuster wird für gewöhnlich mit einem charakteristischen Namen, dem Problemkontext, für den das Muster eine Lösung bietet, sowie den Bestandteilen des Lösungsansatzes beschrieben. So werden sowohl für vielfältige Entwurfsprobleme auf niedriger als auch hoher Abstraktionsebene Lösungen in der Literatur vorgeschlagen (vgl. z.B. *Gamma et al. 1995, Buschmann et al. 2000, Schmidt et al. 2001*).

Auf niedriger Abstraktionsebene bieten so genannte Strukturmuster z.B. in Form des Musters "Kompositum" eine Lösung für den flexiblen Aufbau von Baumstrukturen zur Darstellung von Teil-Ganzes-Hierarchien. Für weitere Details zum Thema Struktur-, Erzeugungs- und Verhaltensmustern sei auf die Arbeiten von *Buschmann et al. 2000* verwiesen, die als Vorreiter in der Beschreibung und Zusammenfassung verbreiteter Entwurfsmuster anzusehen sind.

Architekturmuster hingegen bieten auf hohem Abstraktionsniveau so genannte Schablonen für die optimale Zusammenarbeit "...vordefinierter Subsysteme, spezifiziert deren Zuständigkeitsbereich und enthält Regeln zur Regelung der Beziehungen zwischen den Subsystemen." (vgl. *Buschmann et al. 2000, S. 12*). Als Beispiel sei hier die Einteilung eines komplexen Systems in mehrere Schichten unterschiedlichen Abstraktionsgrades genannt, wie sie das Muster "Layers" (vgl. *Buschmann et al. 2000, S. 32*) beschreibt. Dieses Muster wird im Rahmen dieser Arbeit beispielsweise dazu herangezogen, um das Abstraktionsmodell nach Rasmussen softwaretechnisch abzubilden.

Das hier erarbeitete Rahmenkonzept sieht zur Dokumentation des aufgebauten Frameworks eine werkzeugunterstützte Integration der oben beschriebenen Dokumentationskonzepte vor, wie in Kapitel 7 näher erläutert wird.

## 5.2 Ergebnisse

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt auf abstrakter Ebene die wesentlichen technologischen und methodischen Grundlagen beim Aufbau des Frameworks für Telemontagesysteme erläutert worden sind, werden nun die Funktionsweise und die Architektur des Frameworks selbst erörtert.

Dazu wird zunächst dargelegt, welche Mechanismen und Standardisierungsansätze zum Management von Telepräsenzsystemen im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden. Im Anschluss folgt eine Erläuterung des mehrschichtigen Struktur- und Verhaltensmodells, in das die entwickelten Mechanismen und Standardisierungskonzepte im Zuge der softwaretechnischen Umsetzung eingebettet wurden.

### 5.2.1 Management von Telepräsenznetzwerken

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit soll das hier entwickelte Framework den Entwickler eines Telepräsenzsystems von der Programmierung grundlegender Funktionen der Kommunikationstechnik entbinden. Im hier verfolgten Ansatz wählt der Entwickler für die Einrichtung von Kommunikationsverbindungen aus einem vordefinierten Auswahlkatalog die für seine Problemstellung geeignete Verbindung aus und bindet sie als Baustein in sein anwendungspezifisches Softwaresystem ein (z.B. eine haptische Verbindung für die Aktualisierung von gemessenen Kräften). Alle weiteren Funktionen zum Verbindungsaufbau, zur Synchronisation und Überwachung von Netzwerkteilnehmern (vgl. Abbildung 37) werden dann automatisch vom Framework übernommen.

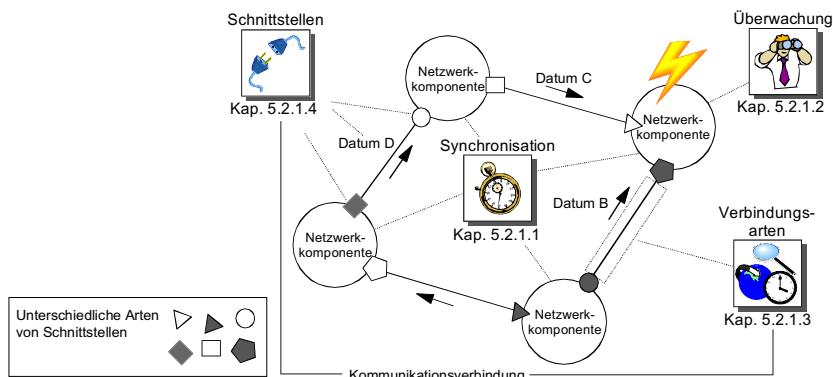


Abbildung 37: Problembereiche beim Management von Telepräsenznetzwerken

Voraussetzung für die Umsetzung dieses Ansatzes bildet die Vereinheitlichung von Synchronisations- und Überwachungsmechanismen sowie möglicher Kommunikationsverbindungen, um diese in Form wiederverwendbarer Softwarebausteine ablegen zu können.

Die folgenden Kapitel stellen zunächst dar, welche Mechanismen hier zur Synchronisation (Abschnitt 5.2.1.1) bzw. Überwachung von Netzwerkkomponenten (Abschnitt 5.2.1.2) eingesetzt werden. Des Weiteren wird erläutert, welche Arten von Verbindungen zwischen den einzelnen Netzwerkkomponenten abhängig von Parametern wie dem Telepräsenzzenario<sup>30</sup>, Modalitäten und der Datenflussrichtung (Abschnitt 5.2.1.3) unterschieden werden. Zum Abschluss der Ausführungen über das Management eines Telepräsenznetzwerkes beschreibt Abschnitt 5.2.1.4, nach welchen Kriterien für eine Vereinheitlichung der Schnittstellen und Datenformate gesorgt wurde.

### **5.2.1.1 Synchronisation**

Die Synchronisation der einzelnen Netzwerkkomponenten ist darauf ausgerichtet, einen konsistenten Zustand aller Kommunikationsteilnehmer zu erreichen. Speziell während des Aufbaus des Kommunikationsnetzwerkes ist es von fundamentaler Bedeutung, dass alle Netzwerkelemente ihre Initialisierungsprozedur abgeschlossen haben, bevor Anfragen von Kommunikationsteilnehmern an sie gerichtet werden.

Im hier verfolgten Konzept wird zur Sicherstellung dieses konsistenten Zustandes jeder Netzwerkeinheit von jeweils einem Zustandsautomaten gesteuert. Der Zustandsautomat unterscheidet die in Abbildung 38 dargestellten Zustände, die Schritt für Schritt während der Initialisierung und des Betriebs der Netzwerkkomponenten durchlaufen werden.

---

<sup>30</sup> Größenkompensation, Distanzkompensation, Zeitkompensation

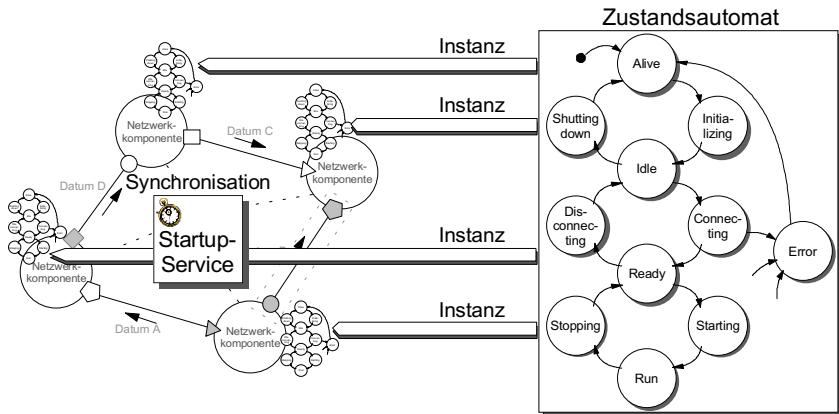


Abbildung 38: Zustandsautomat eines Netzwerkteilnehmers

Als zentrale Elemente des Automaten sind die Zustände „Idle“ und „Run“ zu benennen, die die korrekte Anmeldung einer Komponente im Telepräsenznetzwerk bzw. den aktiven Zustand der Komponente bezeichnen. Im Zustand „Idle“ hat sich beispielsweise ein haptisches Eingabegerät bei der Adressverwaltung des Netzwerkes angemeldet und wartet darauf, dass es durch eine Bedienereingabe zur Übertragung von Sollpositionen mit einem Manipulator verbunden wird. Nach abgeschlossenem Verbindungsaufbau ist das haptische Gerät bereit ("Ready"), mit der Teleoperation zu beginnen, die durch ein Startsignal seitens des Bedieners eingeleitet wird. Erst ab dem Startsignal beginnt das haptische Gerät im Zustand „Run“ mit der Übertragung von Sollpositionen an den Manipulator. Falls während irgendeines Betriebszustandes ein Fehler auftritt, geht das System in den Zustand "Error" über. In diesem Zustand werden so lange keine Steuerungskommandos - z.B. zur Bewegung eines Manipulators -, mehr ausgeführt, bis die Netzwerkkomponente beispielsweise durch eine Reinitialisierung wieder in einen ordentlichen Betriebszustand überführt wurde.

Die Ansteuerung der Zustandsautomaten erfolgt durch den zentralen Dienst „Startup-Service“, der sicherstellt, dass alle Komponenten in der richtigen Reihenfolge gestartet werden. Jede Netzwerkkomponente muss sich während ihrer Anmeldung im Netzwerk auch beim Startup-Service registrieren lassen und übergibt damit ihre Zustandsverwaltung an den Startup-Service. Dieser ermöglicht beispielsweise erst dann eine Aktivierung der Datenübertragung, wenn der erfolgreiche Verbindungsaufbau aller Netzwerkkomponenten abgeschlossen wurde.

### 5.2.1.2 Überwachung

Während des Netzwerkbetriebs muss zur Vermeidung von Materialbeschädigungen jederzeit sichergestellt sein, dass die einzelnen Netzwerkkomponenten korrekt funktionieren und die von ihnen zur Verfügung gestellten Dienste erbringen können. Zur kontinuierlichen Überwa-

chung der Netzwerkkomponenten wurde ein zweistufiger Kontrollmechanismus eingeführt, aufgeteilt in eine standort-interne und eine standort-übergreifende Überwachung (Abbildung 39).

Die standort-interne Überwachung prüft lokal, ob alle an einem Telepräsenzstandort registrierten Netzwerkkomponenten verfügbar sind. Die standort-übergreifende Überwachung prüft, ob alle Verbindungen zu externen Telepräsenzstandorten funktionstüchtig sind.

Ebenso wie sich jede Komponente während ihrer Netzwerkregistrierung beim „Startup-Service“ anmelden muss, hat sie sich daher bei einem lokalen „Watchdog-Service“ einzutragen, um in eine lokale Überwachungsliste aufgenommen zu werden. Der Eintrag in die Überwachungsliste ist für den Watchdog-Service das Zeichen dafür, dass er ab dem Beginn einer Teleoperation in regelmäßigen Abständen mit einem „Alive“-Signal des Netzwerkteilnehmers rechnen kann. Mittels des „Alive“-Signals teilt der Netzwerkteilnehmer dem Watchdog-Service mit, dass seine Funktionstüchtigkeit sichergestellt ist und die von ihm im Netzwerk zur Verfügung gestellten Dienste abrufbereit sind.

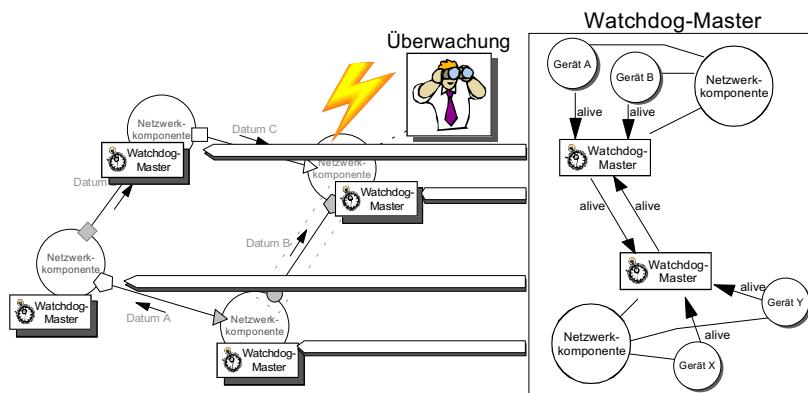


Abbildung 39: Überwachung eines Telepräsenznetzwerkes

Die standort-übergreifende Überwachung erfolgt zur Reduktion des Datenaufkommens zwischen den einzelnen Telepräsenzstandorten durch eine bilaterale Überwachung der lokalen Watchdog-Services. Jeder Watchdog-Service trägt sich dazu während des Verbindungsaufbaus zu einem externen Telepräsenzstandort in die Überwachungsliste des jeweils anderen Watchdog-Services ein und sendet diesem zyklisch ein „Alive“-Signal.

Durch die bilaterale Überprüfung der Funktionstüchtigkeit ist sichergestellt, dass beiden Seite einer Telepräsenzverbindung über den Ausfall einer Kommunikationsverbindung in Kenntnis gesetzt werden und geeignete Maßnahmen zur Störungsbehandlung einleiten können. Beim Ausbleiben eines lokalen oder standort-übergreifenden „Alive“-Signals benachrichtigt jeder

Watchdog-Service den lokalen „ErrorHandler“, der Maßnahmen zur lokalen Störungsbehandlung initiiert. Primäre Maßnahme auf der Teleoperatorseite stellt die Überführung des Manipulators in einen sicheren Zustand dar, beispielsweise durch Abbruch der aktuell ausgeführten Bewegung oder durch Anfahren einer Referenzposition.

### 5.2.1.3 Verbindungstypen

Wie während der Analyse der strukturellen Eigenschaften von Telepräsenzsystemen erläutert (vgl. Abschnitt 2.3) werden in Telepräsenzsystemen eine Vielzahl unterschiedlicher Daten verteilt, die ungleiche Anforderungen an die einzusetzenden Übertragungskanäle richten. Wie im Folgenden gezeigt, lassen sich diese Anforderungen an die Übertragungskanäle auf unterschiedliche *Verbindungstypen* abbilden, die sich hinsichtlich ihrer *Adressierungsart* sowie ihrer *internen Datenverarbeitung* unterscheiden.

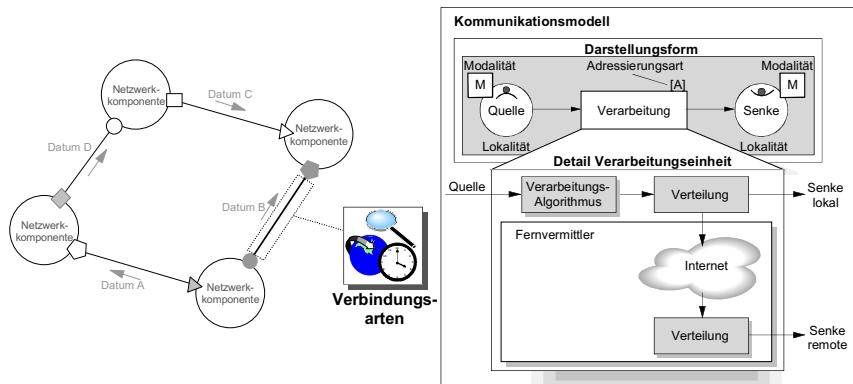


Abbildung 40: Kommunikationsmodell und Datenfluss

Das allen Verbindungstypen zugrundeliegende Kommunikationsmodell (vgl. Abbildung 40) geht davon aus, dass Daten innerhalb eines Telepräsenznetzwerkes von einer modalitätsspezifischen Datenquelle (z.B. Kraftsensor) zu einer entsprechenden Datensenke (z.B. haptisches Ausgabegerät) übertragen werden, wobei zwischen Quelle und Senke eine Verarbeitungseinheit angeordnet ist<sup>31</sup>. Die Verarbeitungseinheit kapselt in diesem Modell die Verarbeitungsalgorithmen z.B. zur Anpassung von Datenformaten oder zur Modalitätstransformation sowie die Intelligenz zur Informationsverteilung.

Bei lokaler Datenübertragung, wie sie beispielsweise während der offline-Simulation von Montageoperationen innerhalb eines abgeschlossenen Anwendungsprogramms erforderlich

<sup>31</sup> Wie in Abbildung 41 gezeigt, wird die Modalitätszugehörigkeit und die Datenflussrichtung von Quelle und Senke mit einem entsprechenden Icon symbolisiert.

ist, werden die Daten von einer Datenquelle zu einer lokalen Datensenke vermittelt (vgl. Abbildung 40, Detail Verarbeitungseinheit). Bei realen Montageoperationen hingegen, beispielsweise in der Mikromontage, werden die Daten von der Quelle mittels eines Fernvermittlers über das Internet an eine entfernte Senke übertragen.

Bei der Vermittlung der Daten zwischen Quelle und Senke wird zwischen den Adressierungsarten Punkt-zu-Punkt (P2P) und Multi- bzw. Broadcast unterschieden (MC/BC, vgl. Abbildung 41). P2P-Verbindungen stellen eine *einige* Verbindung zwischen einer Quelle und einer dezierten Senke her. MC- bzw. BC-Verbindungen hingegen verteilen die Quelldaten an *mehrere* dezierte (MC) oder alle (BC) Netzwerkteilnehmer.

Zur Datenaktualisierung wendet sich die Quelle mit einem Methodenauftrag "update()" an die Verarbeitungseinheit, die die Daten nach Abschluss eventuell durchzuführender Verarbeitungsschritte an eine oder mehrere Senken verteilt. P2P-Verbindungen gewährleisten daher die geringsten Übertragungsverzögerungen, da nur eine bestimmte Senke zu benachrichtigen ist, wohingegen bei MC/BC-Verbindungen mehrere oder beliebig viele Senken zu aktualisieren sind.

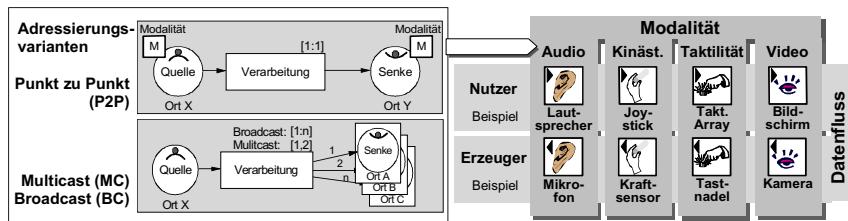


Abbildung 41: Adressierungs- und Modalitätsvarianten im Telepräsenznetzwerk

Dieses Kommunikationsmodell bildet die Grundlage für die Klassifizierung der in einem Telepräsenzsystem eingesetzten Verbindungen, die im Wesentlichen von den folgenden drei Einflussgrößen abhängen:

- Telepräsenzszenario: Dimensions-, Orts-, Zeitkompensation
- Modalität: Haptik, Audio, Video
- Informationsflussrichtung: vom Operator zum Teleoperator und umgekehrt

Das *Telepräsenzszenario* legt fest, welche Art von Datenverarbeitungsalgorithmen vorzusehen sind<sup>32</sup> und ob plattformübergreifende Fernübertragungsmechanismen eingesetzt werden müssen. Wie in Abbildung 42 dargestellt, werden entsprechend der möglichen Telepräsenzzenarien die drei unterschiedliche Verbindungstypen "DISTLink()", "TIMElink()" und "DIMLink()" eingeführt.

---

<sup>32</sup> z.B. zum Ausgleich von Kommunikationstotzeiten für den Fall der Distanzkompensation oder Skalierungsfaktoren in der Dimensionskompensation

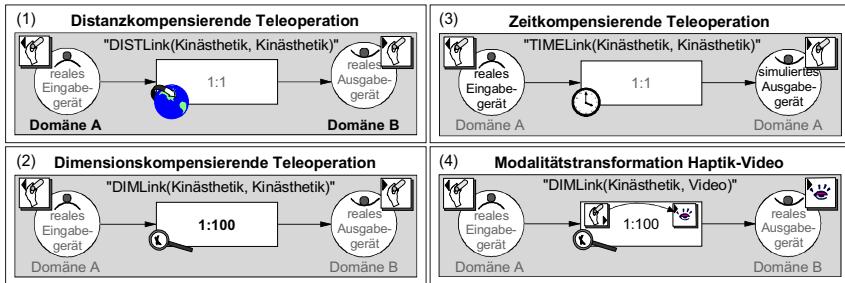


Abbildung 42: Szenariovarianten im Telepräsenznetzwerk

Primäre Aufgabe eines DISTLink (1) ist die Verknüpfung einer Datenquelle am Ort A mit einer Datensenke an einem davon weit entfernten Ort B. Die Verarbeitungseinheit zwischen Quelle und Senke kann in diesem Fall z.B. mittels geeigneter Algorithmen (vgl. z.B. Baier et al. 2000) zur Kompensation von Zeitverzögerung eingesetzt werden.

Eine DIMILink (2) verknüpft in einem Mikromontageszenario eine Quelle mit einer Senke, wobei der Verarbeitungseinheit die Aufgabe der Anpassung der Größenordnungen zwischen Quelle und Senke zukommt. Beispielsweise ist bei der Übertragung von Sollpositionen vom Operator an den Teleoperator eine Untersetzung der Handbewegungen vorzunehmen, um eine vom Monteur durchgeführte Bewegung von 10 cm auf eine Distanz von 0,1 mm herunter zu skalieren.

Eine TIMELink (3) verknüpft in einem simulierten Montageszenario eine von einem *realen* Eingabegerät gespeiste Datenquelle mit einer Datensenke, die ein *simuliertes* Ausgabegerät bedient. Entscheidender Unterschied zu DISTLink bzw. DIMILink ist die Tatsache, dass Simulationsszenarien in der Regel innerhalb eines abgeschlossenen Anwendungsprogramms stattfinden und daher keiner aufwändigen Kommunikationstechnologie bedürfen. Die Anbindung an ein Telepräsenznetzwerk erfolgt erst dann, wenn entweder das simulierte Ausgabegerät durch ein reelles Ausgabegerät ersetzt wird oder eine verteilte Simulationsumgebung erforderlich ist (z.B. zur Abstimmung von Produkteigenschaften mit einem distanziell entfernten Kunden).

Jeder der einzelnen Links kann auch zur Transformation von Modalitäten eingesetzt werden, um z.B. gemessene Kraftwerte nicht als haptisches sondern als visuelles Signal in Form eines Balkens auszugeben (4).

Anhand der *Modalität* wird festgelegt, ob hohe oder niedrige Aktualisierungsraten von der gewählten Verbindung einzuhalten sind. Innerhalb der einzelnen Telepräsenzszenarien können Kommunikationsverbindungen für haptische, visuelle oder akustische Signale eingesetzt werden, die sich hinsichtlich der erforderlichen Aktualisierungsraten unterscheiden. Für den Austausch von äußerst zeitkritischen haptischen Informationen werden dementsprechend schnelle P2P-Verbindungen eingesetzt, wohingegen für visuelle und akustische Signale auch MC-Verbindungen verwendet werden können.

Die *Informationsflussrichtung* schließlich legt fest, ob die Daten von der Operator- zur Teleoperatorseite oder umgekehrt fließen.

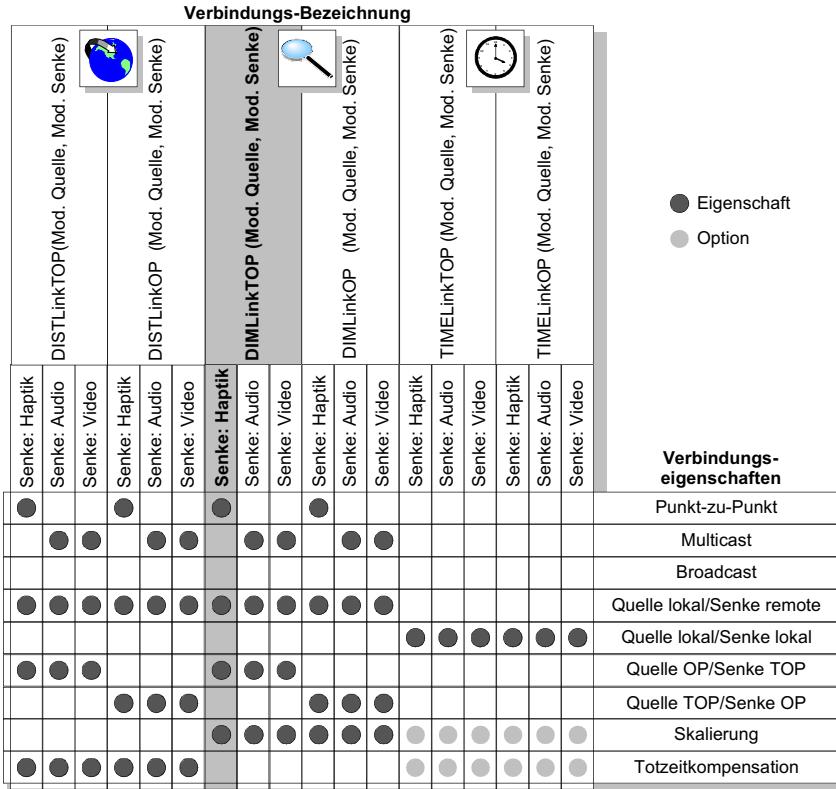


Abbildung 43: Verbindungstypen in einem Telepräsenznetzwerk

Abbildung 43 zeigt im Überblick alle Verbindungstypen, wie sie für die unterschiedlichen Telepräsenzszenarien als einzelne Klassen in das Framework integriert worden sind und vom Entwickler eingesetzt werden können. Die dargestellten Verbindungstypen legen fest, auf welchem Weg und in welche Richtung Daten in unterschiedlichen Szenarien von einer Datenquelle zu einer Datensenke gelangen. Wie in Abbildung 43 hervorgehoben, ist beispielsweise ein DIMLinkTOP(Haptik, Haptik) dadurch gekennzeichnet, dass er eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einer lokalen Datenquelle auf der Operatorseite und einer davon entfernten Datensenke auf der Teleoperatorseite herstellt, die mit Skalierungsfunktionen ausgestattet ist.

Der nächste Abschnitt 5.2.1.4 erläutert, welche Datenformate anhand der Verbindungstypen ausgetauscht werden können und welche Schnittstellen dazu von den eingesetzten Hardwarekomponenten zur Verfügung gestellt werden müssen.

#### 5.2.1.4 Schnittstellen

Wesentliche Voraussetzung für die einfache Austauschbarkeit einzelner Hardwarekomponenten, wie sie z.B. im Rahmen von Anpassungsmaßnahmen für die Bedienerschnittstelle erforderlich sind, ist die Standardisierung der kommunikationstechnischen Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten. Dies beinhaltet die Vereinheitlichung der von den einzelnen Komponenten zur Verfügung gestellten *Methoden* sowie der *Datentypen* der dabei übergebenen Parameter (vgl. Abbildung 44).

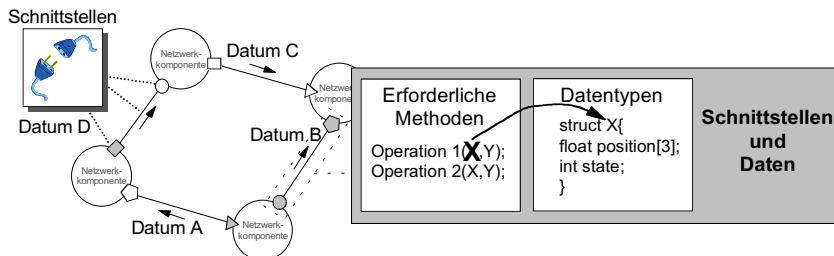


Abbildung 44: Methoden und Datentypen für den Informationsaustausch

Eine Analyse gängiger Ein-/Ausgabegeräte führt zu einer Klassifizierung der erforderlichen Methoden in die Kategorien "Steuerung", "Parametrierung", "Synchronisation", "Überwachung" und "Netzkonfiguration".

*Steuerungsmethoden* werden zur Aktualisierung von Steuerungsdaten während des Systembetriebs eingesetzt. Beispielsweise werden die Sollpositionen eines Manipulators durch zyklischen Aufruf der Funktion *set(Sollposition)* aktualisiert. *Parametrierungsmethoden* dienen der Einstellung von charakteristischen Parametern einzelner Netzwerkkomponenten. So kann z.B. die maximale Verfahrgeschwindigkeit eines Manipulators durch den Methodenauftrag *setParameter(MaxVelocity, 1.2)* auf den Wert 1,2 m/s eingestellt werden. *Synchronisations-* bzw. *Überwachungsmethoden* werden gemäß den oben beschriebenen Mechanismen zur Ansteuerung von Zustandsautomaten bzw. der Statuskontrolle der Netzwerkteilnehmer herangezogen. Die Methoden zur *Netzkonfiguration* schließlich ermöglichen den Verbindungsauflauf zwischen einzelnen Netzwerkteilnehmern. Ein Kraftsensor kann beispielsweise durch den Aufruf *connect(Adresse Senke)* dazu aufgefordert werden, seine Kraftdaten ab sofort an die als Übergabeparameter spezifizierte Informationssenke zu versenden.

Für jede der einzelnen Methodenkategorien ist eine Grundmenge an Methoden und zugehörigen Datenformaten festgelegt. So sind beispielsweise für die Kategorie "Steuerung" Metho-

den zur Übergabe (set(.)) und Abfrage (get(.)) von Steuerungsparametern (wie Sollpositionen etc.) oder auch zur Aktivierung (activate(.)) und Deaktivierung (deactivate(.)) der Komponente definiert (vgl. Abbildung 45).

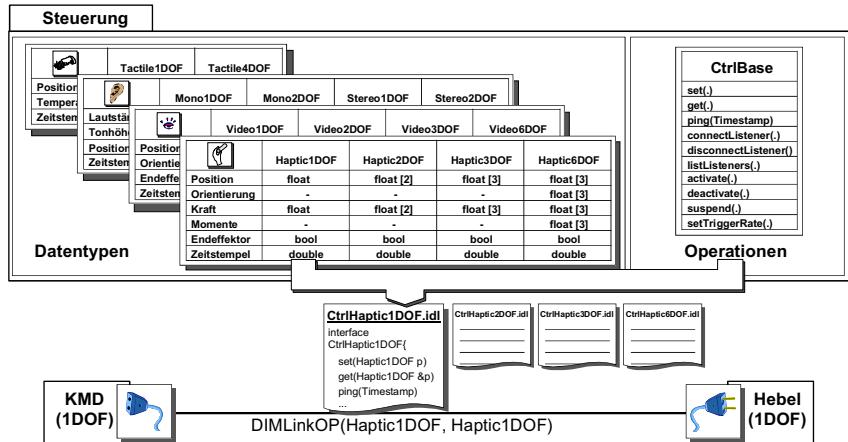


Abbildung 45: Datentypen und Operationen für die Datenübertragung

Abhängig von den einzelnen Modalitäten werden die identifizierten Methoden mit modalitäts-spezifischen Datentypen versehen und zu einer Schnittstellendefinition zusammengefasst. Beispielsweise existiert für die Ansteuerung eines haptischen Gerätes mit einem Freiheitsgrad (z.B. ein Hebel) die Schnittstelle "CtrlHaptic1DOF", wie sie in Abbildung 45 dargestellt ist. Alle Schnittstellendefinitionen sind in zugehörigen IDL-Dateien<sup>33</sup> abgelegt und können innerhalb des Frameworks genutzt werden.

Die hier getroffenen Schnittstellendefinitionen sind dazu mit einem der oben beschriebenen Verbindungstypen zu kombinieren und spezifizieren eine komplett Kommunikationsverbindung zwischen einer Datenquelle und einer Datenquelle. Beispielsweise ist zur Übertragung eines gemessenen Kraftwertes zwischen einer Kraftmessdose mit 1 Freiheitsgrad und einem entsprechenden Kraftausgabegerät eine Kommunikationsverbindung "DIMLinkOP(Haptic1DOF, Haptic1DOF)" einzurichten (vgl. Abbildung 45).

An die Erläuterungen der vorangegangenen Abschnitte hinsichtlich der Mechanismen und Standardisierungsansätze zum Management von Telepräsenzsystemen schließt sich nun eine Beschreibung des Softwaresystems (Framework) an, das zur Umsetzung der beschriebenen Konzepte aufgebaut wurde.

<sup>33</sup> IDL: Interface Definition Language (vgl. Kapitel 5.1.1)

## 5.2.2 Entwurfsmodell der statischen Struktur

Aufbauend auf der erweiterten Abstraktionshierarchie nach Rasmussen (vgl. Kap. 5.1.3) wird das Telemontagesystem in mehrere Abstraktionsschichten aufgeteilt, um die unterschiedlichen Problembereiche bei der Entwicklung eines Telepräsenzsystems voneinander zu entkoppeln. Das in Abbildung 46 dargestellte Architekturmodell bildet alle softwaretechnisch relevanten Schichten des in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Abstraktionsmodells ab und ergänzt sie um die sog. *Präsentationsschicht*.

Die in der Präsentationsschicht abgebildeten Softwarekomponenten dienen der direkten Interaktion mit den Bedienern eines Telemontagesystems und stellen beispielsweise Bedienerdialoge für den Zugriff auf die verfügbaren Hard- und Softwarekomponenten zur Verfügung.

In der Applikationsschicht werden zum einen die für eine bestimmte Montageaufgabe erforderlichen Hardwarekomponenten der Operator- und Teleoperatorseite modelliert. Zum anderen wird festgelegt, welche haptischen, visuellen etc. Daten zwischen Operator und Teleoperator ausgetauscht werden müssen.

In der Domänenschicht werden die für den Datenaustausch zur Verfügung stehenden Verbindungsarten (vgl. Kap. 5.2.1.3) sowie die zur Synchronisation der Netzwerkkomponenten (vgl. Kap. 5.2.1.1) entwickelten Mechanismen abgebildet.

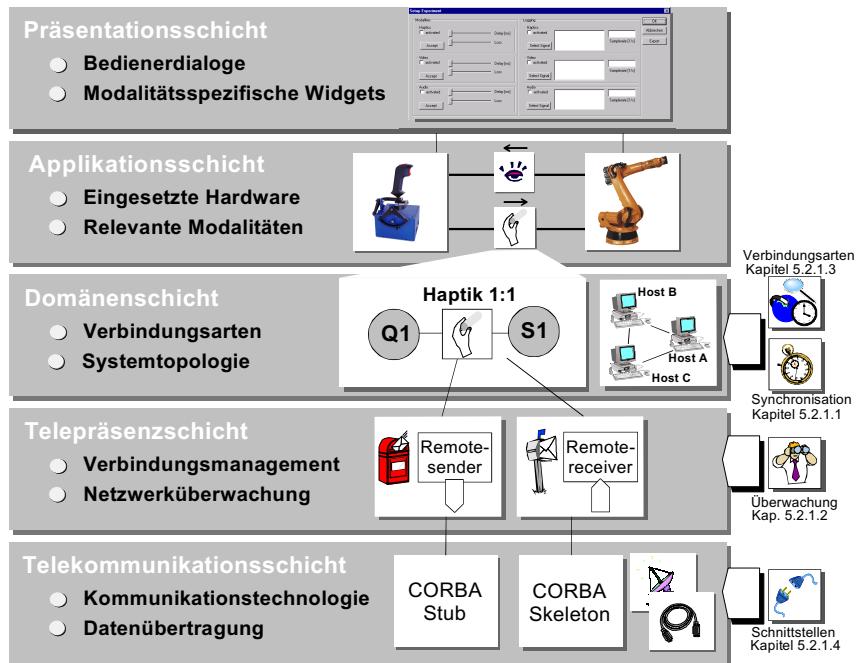


Abbildung 46: Architekturkonzept eines telepräsenten Montagesystems

Die für die eigentliche Kommunikationstechnik erforderlichen Funktionen zur Datenübertragung und das Verbindungsmanagement werden in der Telepräsenz- und Telekommunikationsschicht abgebildet, die die in Kapitel 5.1.3 eingeführte Kommunikationsschicht repräsentieren. Die Telepräsenzschicht dient der Entkopplung von Telekommunikations- und Domänenschicht, um die nachträgliche Anpassbarkeit der Kommunikationstechnologie ohne grundlegende Modifikationen an den anderen Schichten zu gewährleisten. Sie kapselt dazu allgemeine Funktionen für das Verbindungsmanagement und die Netzwerkuüberwachung, die von der Domänenschicht zur Verteilung und dem Empfang von Daten genutzt werden können. Welche Kommunikationstechnologie dabei eingesetzt werden soll (z.B. CORBA), wird in der Telekommunikationsschicht abgebildet. Falls nun z.B. eine neue CORBA-Version zur Verfügung stehen sollte, so kann diese relativ einfach in das Framework integriert werden (vgl. Abschnitt 5.2.2.6), ohne grundlegende Modifikationen an den anderen Schichten vornehmen zu müssen.

Das dem Framework zugrundeliegende Rahmenkonzept sieht vor, dass Implementierungsarbeiten während des Aufbaus eines Telepräsenzsystems maßgeblich in der Applikations- und der Präsentationsschicht vorzunehmen sind, um beispielsweise anwendungsspezifische Ein-/Ausgabegeräte bzw. Bedienerdialoge nutzen zu können. Der Framework-Kern bleibt davon - nach der Integration der gewünschten Kommunikationstechnologie - unberührt.

Die folgenden Abschnitte gehen zunächst auf das zugrundeliegende Metamodell aller Abstraktionsschichten ein, beschreiben also ihren prinzipiellen Aufbau, unabhängig von ihrer Rolle im gesamten Schichtenmodell. Anschließend werden schichtspezifisch die wesentlichen von den einzelnen Schichten zur Verfügung gestellten Funktionen erläutert und dargelegt, wie und in welchem Zusammenhang diese von der jeweils darüber liegenden Schicht genutzt werden können.

### 5.2.2.1 Metamodell "Abstraktionsschicht"

Jede der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Abstraktionsschichten besteht wie in Abbildung 47 (links) dargestellt aus den Grundkomponenten "Schichtmanager", "Beobachter", "Subjekt", "Service", "Fehlermanager" und „Infopunkt“.

Der *Schichtmanager* bündelt alle in einer Schicht angeordneten Elemente und wird zur schichtübergreifenden und schichtinternen Initialisierung eingesetzt. Die schichtübergreifende Initialisierung (vgl. Abbildung 47, „Initialisierungssequenz“) erfolgt ausgehend von der obersten Abstraktionsschicht durch rekursiven Aufruf der nächst tiefer liegenden Abstraktionsschicht, so dass das gesamte System sequentiell von unten nach oben gestartet wird. Im Rahmen der schichtübergreifenden Initialisierung erfolgt die schichtinterne Initialisierung, die jeweils alle innerhalb einer Schicht vorhandenen Dienste startet und die erforderlichen Assoziationen zwischen kommunizierenden Diensten herstellt.

Zum schichtübergreifenden Austausch von Informationen werden gemäß dem Beobachtermuster (vgl. Buschmann et al. 2000, S.287) so genannte *Beobachter* und *Subjekte* eingeführt, um das Prinzip der undirektionalen Kopplung zwischen unterschiedlichen Schichten gewährleisten zu können. Ein Beobachter meldet sich dabei während der Initialisierung bei einem für ihn relevanten Subjekt der nächst tiefer liegenden Schicht an und wird in der Folge von diesem über eintretende Statusänderungen informiert.

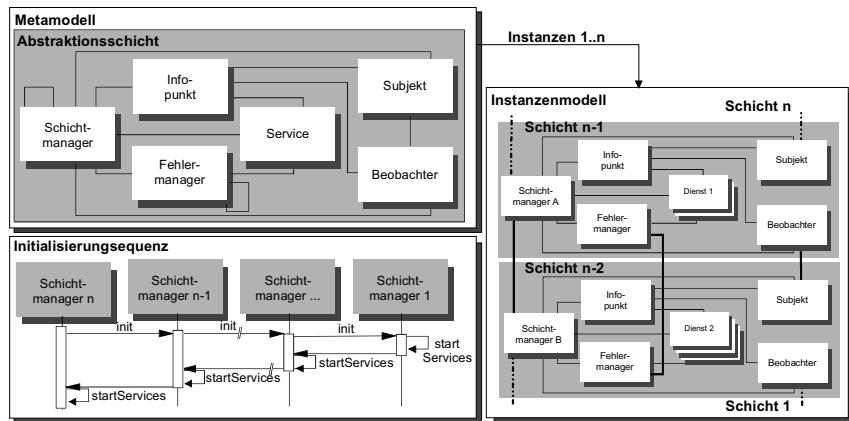


Abbildung 47: Metamodell "Abstraktionsschicht"

Der Fehlermanager ist für die schichtinterne Behandlung von auftretenden Fehlern zuständig. Falls etwa die Durchführung eines Dienstes scheitert, so wird zunächst der schichtinterne Fehlermanager versuchen, den Fehler durch beispielsweise einen erneuten Dienstauftrag zu beheben. Falls die Fehlerbehebung in der betreffenden Schicht nicht möglich ist, so wird der Fehlermanager der nächst höheren Schicht benachrichtigt oder eine Systemmeldung über den Infopunkt ausgegeben.

Alle in den folgenden Abschnitten beschriebenen Architektureschichten sind nach dem eben skizzierten Muster „Abstraktionsschicht“ aufgebaut. Bei der Erläuterung der einzelnen Schichten wird daher nur auf die wesentlichen schichtspezifischen Funktionen eingegangen, wobei die in Abbildung 48 veranschaulichte grafische Darstellungsform gewählt wird:

Für jede der einzelnen Schicht werden die wesentlichen von ihr zur Verfügung gestellten Dienste sowie die zum Dienstauftrag vorgesehenen Schnittstellen abgebildet. Die Interaktion des Bedieners mit der Präsentationsschicht wird dabei zur Abgrenzung von Dienstaufträgen zwischen einzelnen Abstraktionsschichten als Anwendungsfall abgebildet.

Die Einordnung der Schichten in das gesamte Architekturmodell erfolgt jeweils anhand einer miniaturisierten Darstellung des Gesamtmodells.

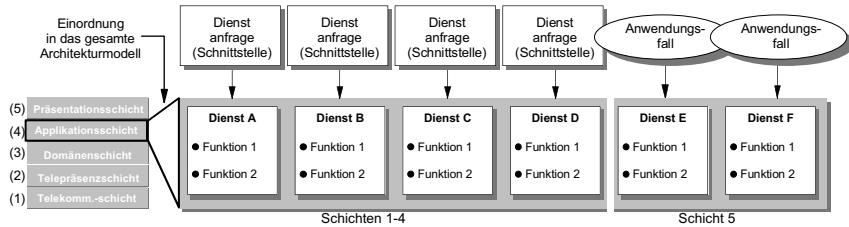


Abbildung 48: Grafische Darstellungsform zur Schichtenbeschreibung

### 5.2.2.2 Schnittstellen der Präsentationsschicht

In der Präsentationsschicht werden die zur Interaktion des Bedieners mit dem Telepräsenzsystem erforderlichen Elemente abgebildet. Es werden insbesondere die multimodalen Bedienerschnittstellen zur Steuerung, Überwachung und Konfiguration des Systems modelliert (s. Abbildung 49). Die in der Präsentationsschicht abgebildeten Dialogfelder (A-D) ermöglichen dem Bediener den Zugriff auf das Telemontagesystem in unterschiedlichen Anwendungsfällen wie z.B. bei der Montageplanung (1), der Montagedurchführung (2) oder der Systembeurteilung (3) und Administration (4) etc..

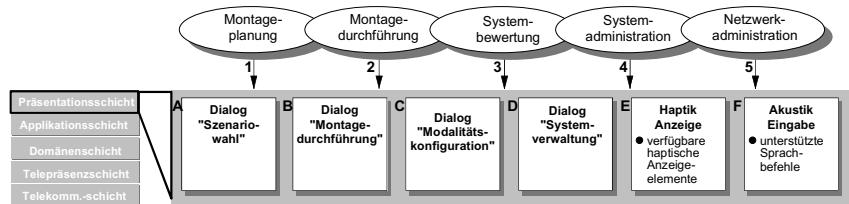


Abbildung 49: Wesentliche "Schnittstellen" der Präsentationsschicht

Des Weiteren wird hier der Aufbau und die Funktionsweise modalitätsspezifischer Widgets<sup>34</sup> modelliert, die in der multimodalen Bedienerschnittstelle eingesetzt werden können. Beispielsweise können visuell dargestellte Drehknöpfe mit einem haptischen Eindruck versehen werden (E), um dem Bediener durch die Vorgabe von Rastpositionen die Einstellung einer gewünschten Position zu erleichtern. Ebenso ist die Eingabe von Steuerungsbefehlen zur Aktivierung/Deaktivierung von Fügehilfen mittels Spracheingabe denkbar (F).

<sup>34</sup> Widget: Element einer Bedienoberfläche, z.B. ein Text-Eingabefeld einer grafischen Bedienoberfläche

Die einzelnen Dialogfelder und Anzeigeelemente der Präsentationsschicht binden zur Realisierung der Anwendungsfälle die Dienste der darunter liegenden Applikationsschicht ein, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

### 5.2.2.3 Schnittstellen der Applikationsschicht

Die Applikationsschicht bildet die anwendungsspezifischen Aspekte in der Planung, Durchführung und Bewertung einer telepräsenten Montageaufgabe ab und stellt sie als Dienste der darüber liegenden Präsentationsschicht zur Verfügung. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen hier die möglichen Telepräsenzszenarien, die durchzuführenden Montageschritte, sowie die für die einzelnen Schritte vorgesehenen Manipulatoren, Werkzeuge und Hilfsmittel (s. Abbildung 50).

So wird beispielsweise das gewünschte Telepräsenzszenario (Mikro-/Makro-/Simulierte Montage) mittels eines entsprechenden Dienstes (A) eingestellt (1). Das hier eingestellte Szenario entscheidet darüber, welche Arten von Telepräsenzverbindungen beim Aufbau eines Telepräsenznetzwerkes eingerichtet werden. (vgl. Abschnitt 5.2.1.3). Ein weiterer von der Applikationsschicht zur Verfügung gestellter Dienst Montageplanung (B) ermöglicht die Offline-Planung von Montageschritten (2), um während der Montagedurchführung den Monteur durch die Einblendung (Augmentierung) von Handlungsanweisungen oder virtuellen Fügehilfen (C) zu unterstützen. Virtuelle Fügehilfen bezeichnen in diesem Zusammenhang beispielsweise künstliche Ebenen im Blickfeld des Bedieners, die dieser während der Durchführung von Montageaufgaben zur Orientierung im Raum nutzen kann.

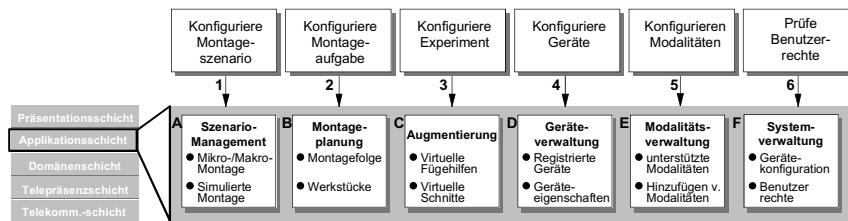


Abbildung 50: Wesentliche Schnittstellen der Applikationsschicht

Mittels der Geräteverwaltung (D) werden während des Aufbaus eines Telepräsenzsystems die anwendungsspezifischen Ein-/Ausgabegeräte in die Applikationsschicht integriert und konfiguriert (4). Falls ein neu integriertes Ein-/Ausgabegerät einen bislang nicht berücksichtigten Modalitätskanal (neben Audio, Video, Haptik) unterstützt, so kann dieser während der Systementwicklung mittels der Modalitätsverwaltung (E) in das Framework eingefügt werden. Während der Durchführung von Montageoperationen ermöglicht die Modalitätsverwaltung die Aktivierung und Deaktivierung einzelner Modalitätskanäle, um das Telemontagesystem beispielsweise an Bedienerbedürfnisse anzupassen (5).

Die Systemverwaltung (F) wird schließlich zur Kontrolle von Benutzerrechten eingesetzt, um einen nicht autorisierten Zugriff auf kritische Netzwerkkomponenten zu verhindern. Jedes im Telepräsenznetzwerk registrierte Gerät wird dazu mit einem Zugriffsschlüssel versehen, der darüber entscheidet, in weit jeder Bediener auf das Gerät zugreifen darf (6).

Ein Großteil der anwendungsspezifischen Dienste der Applikationsschicht wie z.B. die Modalitäts-, Geräte- oder Systemverwaltung sind zur Umsetzung ihrer Funktionalität auf die Nutzung anwendungsübergreifender Funktionen der Domänenschicht angewiesen, wie sie in der Folge vorgestellt werden.

#### 5.2.2.4 Schnittstellen der Domänenschicht

In der Domänenschicht werden in erster Linie die Topologie von Telepräsenznetzwerken sowie die unterschiedlichen, modalitätsspezifischen Arten von Telepräsenzverbindungen modelliert (vgl. Abbildung 51). Verbindungen für die Übertragung von haptischen Informationen werden beispielsweise gemäß Abschnitt 5.2.1.3 als direkte 1:1 Kommunikationsverbindungen zwischen Informationsquelle und -senke realisiert, wohingegen Videoinformationen mittels 1:n Broadcastverbindungen umgesetzt werden.

Die Einrichtung neuer oder die Auflistung existierender Kommunikationsverbindungen kann über eine entsprechende Schnittstelle (1-3), von den Diensten Verbindungsverwaltung (A) bzw. Netzmonitor (B) unter Spezifikation der gewünschten Modalität angefordert werden.

Darüber hinaus beinhaltet die Domänenschicht Mechanismen zur Synchronisation zwischen lokalen und externen Geräten und zur Einstellung von Aktualisierungsraten zwischen Datensenken und Datenquellen (F, 6 und Abschnitt 5.2.1.1).

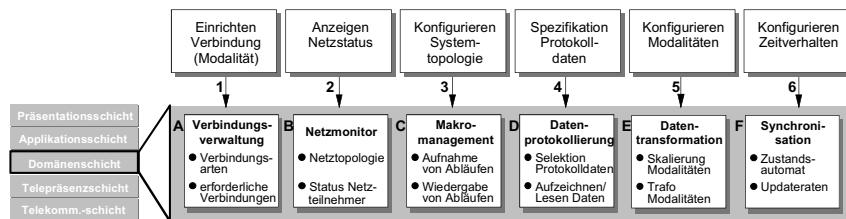


Abbildung 51: Wesentliche Schnittstellen der Domänenschicht

Neben diesen verbindungsorientierten Schnittstellen stellt die Domänenschicht Funktionen zur Spezifikation zu protokollierender Zustandsdaten (D, 4) oder auch zur Konfiguration von Transformationsalgorithmen (E, 5) für die intermodale Konvertierung von Umgebungsinformationen zur Verfügung. Das Makromanagement (C) erlaubt die automatisierte Ausführung mehrerer vordefinierter Einzelschritte, wie sie z.B. im Rahmen von Kalibrieraufgaben notwendig sein können.

Die in der Domänenschicht gekapselten Dienste zur Abbildung und Verwaltung der Netzwerktopologie greifen zur Einbindung einzelner Netzwerkknoten auf die im nächsten Abschnitt beschriebenen Funktionen der Telepräsenzschicht zu.

### 5.2.2.5 Schnittstellen der Telepräsenzschicht

Die Telepräsenzschicht als entkoppelndes Element zwischen der Domänen- und der Telekommunikationsschicht stellt generische Funktionen zur Verwaltung und Überwachung einzelner Netzwerkknoten zur Verfügung (vgl. Abbildung 52). Sie erlauben u.a. die Verteilung von Statusinformationen einzelner Komponenten im gesamten Telepräsenznetzwerk (A), wie sie zur Beobachtung des Gesamtsystems erforderlich ist. Zustandsänderungen des Telemanipulators oder andere Debuginformationen können so beispielsweise gleichzeitig sowohl auf der Teleoperator- als auch der Operatorseite ausgegeben werden (1).

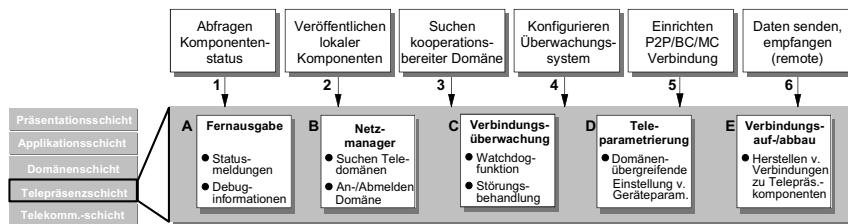


Abbildung 52: Wesentliche Schnittstellen der Telepräsenzschicht

Mittels des Netzmanagers (B) können alle in einem Telepräsenznetzwerk angemeldeten Telepräsenzdomänen gesucht und hinsichtlich ihrer Kooperationsbereitschaft für Telemontageaufgaben überprüft werden (3). Darüber hinaus wird der Netzmanager dazu herangezogen, um die in der aktuellen Domäne vorhandenen Komponenten - wie etwa Manipulatoren - im Telepräsenznetz an- und abzumelden (2). Mittels der Verbindungsüberwachung (C) wird das gesamte Überwachungssystem konfiguriert (4) und die registrierten Netzwerkeinheiten kontinuierlich hinsichtlich möglicher Störungen überprüft.

Zur Einstellung von Parametern entfernt angeordneter Telepräsenzkomponenten steht der Dienst "Teleparametrierung" (D) zur Verfügung, mit dem Größen wie etwa die Maximalgeschwindigkeit eines Manipulators von der operatorseitigen Bedienerschnittstelle aus eingestellt werden können. Die Einrichtung von Kommunikationsverbindungen (5) bzw. das Versenden von Daten an entfernte Komponenten (6) erfolgt anhand eines Dienstes zum Verbindungsau- und -abbau (E).

### 5.2.2.6 Schnittstellen der Telekommunikationsschicht

Die Telekommunikationsschicht kapselt die eigentliche Kommunikationstechnologie, die zum Betrieb des gesamten Telepräsenznetzwerkes ausgewählt wurde. Hier können unterschiedliche Übertragungstechnologien (z.B. funk- oder kabelbasiert) bzw. Middlewarekonzepte installiert werden. Die Kommunikationsschicht spezifiziert die Schnittstellen, die zum Betrieb eines Telepräsenznetzwerkes erforderlich sind, in Form von IDL-Definitionen<sup>35</sup> (vgl. Abbildung 53). Neu zu integrierende Middlewarekonzepte oder Kommunikationstechnologien sind an die vorgegebenen Schnittstellen anzupassen, um in das Telepräsenzframework integriert werden zu können.

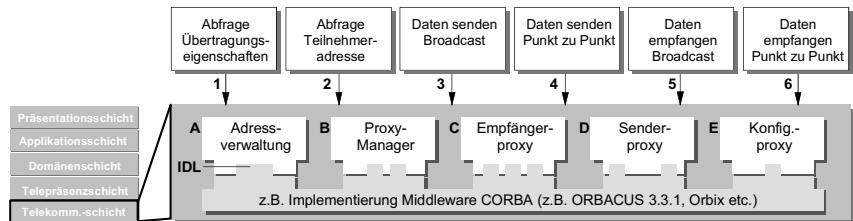


Abbildung 53: Wesentliche Schnittstellen der Telekommunikationsschicht

Wesentlichen Bestandteil der Telekommunikationsschicht bilden so genannte "Proxy"-Objekte (C-E), die als Stellvertreter von entfernt angeordneten Kommunikationspartnern fungieren. Mittels entsprechender Schnittstellen (3-6) greift die Telepräsenzschicht auf die einzelnen Proxies zur Datenübertragung zu. Für die Verwaltung (1-2) der Proxy-Objekte bzw. der Netzwerkadressen der einzelnen Kommunikationspartner stehen ein Proxymanager (B) bzw. die Adressverwaltung (A) zur Verfügung.

### 5.2.2.7 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Makro- und Mikroarchitektur der unterschiedlichen Schichten des hier entwickelten Frameworks vorgestellt sowie die Aufgaben der einzelnen Schichten und deren Abgrenzung untereinander erläutert. Zur Vervollständigung des Systemmodells und der Frameworkbeschreibung ist neben diesen rein strukturellen, statischen Eigenschaften eines Telemontagesystems die Beschreibung des dynamischen Verhaltens, d.h. der Interaktion der einzelnen Architekturelemente erforderlich.

<sup>35</sup> IDL: Interface Definition Language, vgl. Abschnitt 5.1.1

### 5.2.3 Entwurfsmodell des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Modell beschreibt die Reaktion sowie die internen Abläufe eines Systems bei Eintreten eines bestimmten Ereignisses. Ereignisse bezeichnen in diesem Zusammenhang beispielsweise Bedienereingaben, die Aktualisierung von Messwerten oder auch systeminterne Überwachungssignale.

Repräsentativ für die Vielzahl der auftretenden Ereignisse und Abläufe zur Steuerung, Überwachung und Konfiguration eines Telemontagesystems werden an dieser Stelle beispielhaft zwei unterschiedliche Sichten zur Beschreibung der wesentlichen frameworkinternen Abläufe herausgegriffen. Dabei handelt es sich zum einen um die Beschreibung der frameworkinternen Abläufe in unterschiedlichen Telemontageszenarien und zum anderen um die Erläuterung der Sequenz, wie sie bei der Neuinstallation einer Telepräsenzkomponente im Netzwerk durchlaufen wird.

#### 5.2.3.1 Variation des Montageszenarios

Abbildung 54 zeigt die frameworkinternen Abläufe für die Szenarien „Lokale, simulierte Telemontage“ (I) und „Verteilte, reale Telemontage“ (II).

In Szenario I wird ein reales Eingabegerät (z.B. ein haptischer Joystick) und ein simuliertes Ausgabegerät (z.B. ein simulierter Manipulator) innerhalb einer Domäne eingesetzt, um ein Montageszenario zu simulieren. Dabei werden Stellbefehle vom Eingabegerät aus der Applikationsebene an eine Datenquelle der Domänenenschicht gegeben und von dieser an eine Verarbeitungskomponente weitergereicht. Diese skaliert beispielsweise im Fall einer Mikromontage die empfangenen Stellbefehle und vermittelt sie an eine Datensenke. Die Datensenke reicht die Informationen an das simulierte Ausgabegerät weiter, das die Daten z.B. zur Berechnung und Ausgabe einer neuen Sollposition für den Manipulator verwendet. Die unteren Schichten des Telepräsenzframeworks werden dabei nicht in Anspruch genommen.

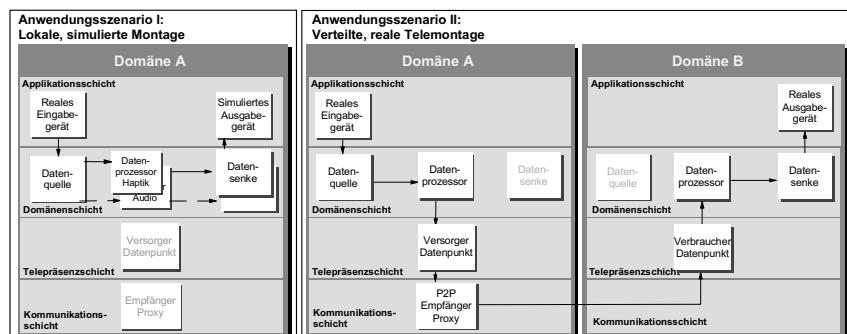


Abbildung 54: Kommunikationsszenarien für Teleoperationen

In Szenario II hingegen wird das reale Eingabegerät in der Domäne A mit einem realen Ausgabegerät der Domäne B gekoppelt, um eine verteilte Telemontage durchzuführen. Die Umleitung der Stellbefehle an die entfernte Komponente wird vom Datenprozessor angestoßen (vgl. Kap. 5.2.1.3). Dieser reicht die Daten nicht mehr an eine lokale Datensenke sondern an einen so genannten "Versorgerdatenpunkt" in der Telepräsenzschicht weiter. Der Versorgerdatenpunkt übernimmt die in Kapitel 5.2.1.3 beschriebene Aufgabe der Fernübermittlung, indem er anfallende Daten unter Nutzung der Telekommunikationsschicht an eine oder mehrere entfernte Datensenken verteilt. Vom entsprechenden "Verbraucherdatenpunkt" der entfernten Domäne werden die Stellbefehle an das reale Ausgabegerät weitergereicht.

Aus Sicht des Eingabegerätes in der Applikationsschicht ist kein Unterschied zwischen der realen und der simulierten Montageoperation erkennbar, da der Verbindungsauflauf zu den entsprechenden Datensenken komplett im Framework-Kern gekapselt ist. Der Aufbau der dazu erforderlichen Infrastruktur erfolgt während der Installation einer neuen Telepräsenzkomponente, wie im folgenden Abschnitt 5.2.3.2 erläutert wird.

### 5.2.3.2 Ablauf "Installation Telepräsenzkomponente"

Der in Abbildung 55 dargestellte Vorgang beschreibt die einzelnen Schritte, die zur Installation einer neuen Telepräsenzkomponente (z.B. eines haptischen Eingabegerätes) im Telepräsenznetzwerk vorgenommen werden in Form eines Sequenzdiagramms (vgl. Anhang A).

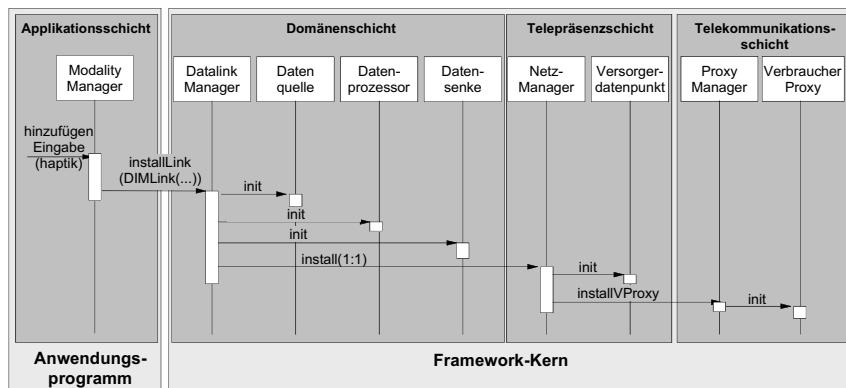


Abbildung 55: Sequenz für die Registrierung einer Telepräsenzkomponente

In der Abbildung werden die beiden wesentlichen Bereiche *Anwendungsprogramm* und *Framework-Kern* unterschieden. Die im Bereich *Anwendungsprogramm* beschriebenen Funktionsaufrufe sind vom Entwickler eines Telepräsenzsystems während der Implementierung explizit für jede Telepräsenzkomponente zu programmieren. Die im Bereich *Framework-Kern* beschriebenen Abläufe zur Einrichtung der erforderlichen Elemente Datenquelle, -senke und

-prozessor sowie die Einrichtung eines Versorgungsdatenpunktes etc. werden hingegen automatisch beim Aufruf des Framework-Kerns (Funktion „installLink“) durchgeführt.

So hat der Entwickler wie in Abbildung 55 dargestellt eine neue Eingabemöglichkeit beim Modalitätsmanager unter Angabe der betreffenden Modalität anzufordern. Der Modalitätsmanager sorgt dann unter Einbindung des sog. "Datalinkmanagers" in der Domänenenschicht für die Einrichtung der zugehörigen Elemente "Datenquelle", "-senke" und "-prozessor". Der Datalinkmanager seinerseits bindet die Telepräsenzschicht in die Installationsprozedur ein und veranlasst die Einrichtung eines Versorgerdatenpunktes, der mit einem Proxy-Objekt der Telekommunikationsschicht verknüpft wird.

Der Großteil der für die Einrichtung erforderlichen Operationen wird somit innerhalb des Framework-Kerns automatisch ausgeführt, ein wesentlich geringerer Teil der Operationen ist auf der Applikationsebene vom Entwickler durchzuführen.

Das hier beschriebene Verhaltens- und Architekturmodell ist programmiertechnisch gemäß Abschnitt 5.1.5.1 (Aufbau und Klassifizierung von Frameworks) in Form mehrerer interagierender Softwarebibliotheken realisiert, wie sie im folgenden Abschnitt 5.2.4 beschrieben sind.

### 5.2.4 Struktur der Frameworkbibliotheken

Die vom Telepräsenzframework gekapselten Funktionen werden dem Entwickler eines Telepräsenzsystems gemäß Abschnitt 5.1.5.1 in Form mehrerer Softwarebibliotheken zur Verfügung gestellt. Die in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Architekturen sind wie in Abbildung 56 veranschaulicht in einzelnen Bibliotheken abgelegt, die vom Entwickler in sein anwendungsspezifisches Telepräsenzsystem eingebunden werden können.

Soll beispielsweise ein großenkompensierendes Telepräsenzsystems bestehend aus den folgenden Komponenten aufgebaut werden, so sind zwei Anwendungsprogramme zu entwickeln:

Operatorseite	Teleoperatorseite
1 haptisches Ein-/Ausgabegerät (Haptic IO)	1 Manipulator
1 visuelles Ausgabegerät (Video Out)	1 Kraftmessdose (KMD)
	1 Kamera

Der Entwickler hat dazu unter Nutzung der Frameworkbibliotheken das gewünschte Szenario, die erforderlichen Modalitätskanäle sowie die zugehörigen Kommunikationsverbindungen in den Anwendungsprogrammen zu instanzieren. Die entstehenden Programme sind sehr ähnlich zueinander, so dass in Abbildung 56 lediglich die Operatorseite detailliert dargestellt ist.

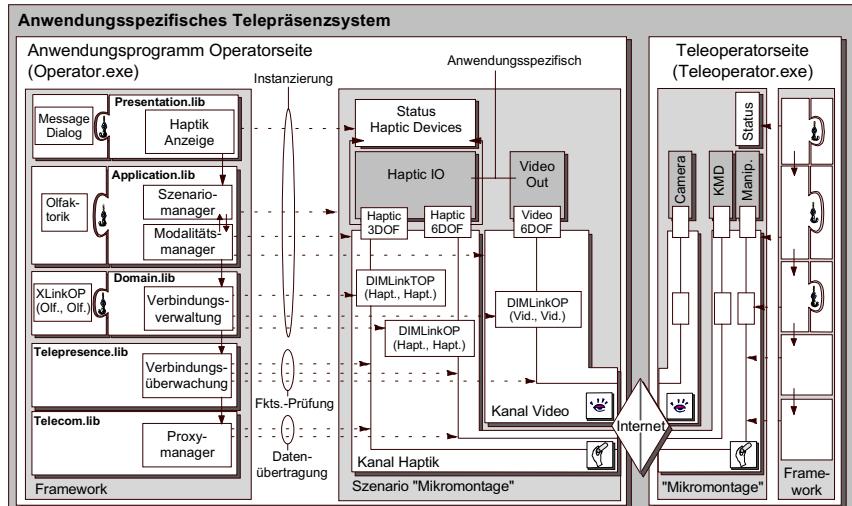


Abbildung 56: Integration der Frameworkbibliotheken in ein Telepräsenzsystem

Wie aus Abbildung 56 ersichtlich, ist im hier gewählten Beispiel das haptische Ein-/Ausgabegerät (Haptic IO) über den haptischen Kanal mit dem Manipulator und der Kraftmessdose verbunden. Mittels eines DIMLinkTOP(Haptik, Haptik) werden skalierte Sollpositionen in 3 Freiheitsgraden an den Manipulator übertragen, wohingegen der DIMLinkOP(Haptik, Haptik) für die Vermittlung der skalierten Kräfte (6 Freiheitsgrade) von der Kraftmessdose (KMD) zum haptischen Gerät verantwortlich ist. Als Übertragungsmedium wird das Internet genutzt, um die einzelnen anwendungsspezifischen Komponenten kommunikationstechnisch miteinander zu verknüpfen.

Wie in Abschnitt 5.2.3.2 beschrieben, werden während der Instanzierung der Verbindungen automatisch die für das Netzwerkmanagement erforderlichen Elemente in den verschiedenen Frameworkschichten angelegt, um etwa wie in Abbildung 56 dargestellt die Datenübertragung und Funktionsüberwachung des Telepräsenzsystems sicherzustellen.

Für einzelne Frameworkbibliotheken sind Erweiterungsmöglichkeiten in Form von Hooks vorgesehen, die zur anwendungsspezifischen Erweiterung des Frameworks eingesetzt werden können. Soll beispielsweise ein Modalitätskanal für die Olfaktorik eingerichtet werden, so kann dies anhand eines Hooks der Applikationsschicht bewerkstelligt werden (vgl. Abbildung 56, links).

## 5.2.5 Fazit

Die vorangegangenen Abschnitte haben das auf dem Handlungsfeld Strukturmodell entwickelte Framework dargestellt. Ausgangspunkt stellte die Erläuterung grundlegender Methoden

zum Management telepräsenter Montageeinrichtungen dar, die anschließend auf die Makro- und Mikroarchitektur des hier entworfenen Frameworks abgebildet wurden. Anhand zweier Beispiele wurde die dynamische Interaktion zentraler Frameworkelemente erläutert. Abschließend wurde gezeigt, wie das Architektur- und Verhaltensmodell auf einzelne miteinander interagierende Softwarebibliotheken abgebildet wurde und wie diese prinzipiell in anwendungsspezifische Programme einzubinden bzw. zu erweitern sind.

Zum effizienten Umgang mit den Softwarebibliotheken sieht das hier entwickelte Rahmenkonzept spezielle Methoden, Beschreibungstechniken und Werkzeuge vor, die den Entwickler von Telepräsenzsystemen bei der kommunikationstechnischen Integration der erforderlichen Telepräsenzkomponenten unterstützen. Das folgende Kapitel 6 erläutert das dem Rahmenkonzept für telepräsente Montagesysteme zugrundeliegende Vorgehen zur Anwendung und Erweiterung des soeben vorgestellten Softwaresystems.

## 6 Vorgehensmodell

Das vorliegende Kapitel beschreibt, wie das oben vorgestellte Framework während der Entwicklung von Telepräsenzsystemen für die kommunikationstechnische Integration der verteilten Hard- und Softwarekomponenten einzusetzen ist.

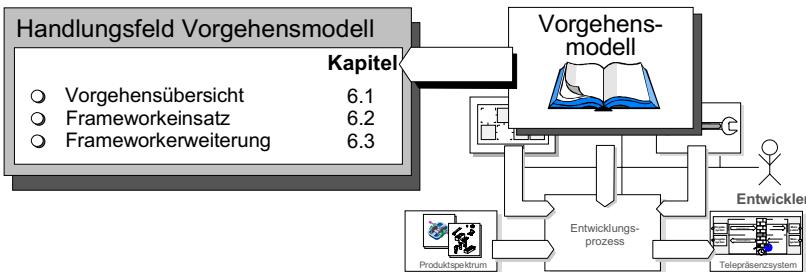


Abbildung 57: Überblick Handlungsfeld Vorgehensmodell

Ausgangspunkt der Beschreibung bildet der in Abschnitt 2.4.4 skizzierte Entwicklungsablauf für Telepräsenzsysteme, dessen *telepräsenzspezifische* Schritte nun detaillierter beschrieben werden. Für jeden Schritt werden die vom Entwickler durchzuführenden Aktionen dargestellt und dabei der Umgang mit dem Telepräsenzframework erläutert. Prämisse für das hier entwickelte Vorgehensmodell bildet die Annahme, dass es sich beim Entwurf des Telepräsenzsystems um eine Neuentwicklung handelt und nicht auf ein bereits existierendes System aufgesetzt werden muss. Aspekte zur Entwicklung und Auslegung von telepräsenzauglichen externen Geräten, wie Robotern oder haptischen Schnittstellen, werden dabei nur soweit berührt, wie es zum Verständnis des Referenzprozesses erforderlich ist. Als Grundlage für die weiteren Ausführungen beschreibt der nächste Absatz das der Frameworkanwendung zugrundeliegende Vorgehensmodell im Überblick.

### 6.1 Vorgehensübersicht

Wie in Abbildung 58 dargestellt, sind während des Entwurfs der Sensomotorik im Wesentlichen die folgenden vier Schritte sequentiell durchzuführen, die sich mit unterschiedlichen Fragestellungen beschäftigen:

1. Festlegung des angestrebten Telepräsenzszenarios (3a.1)
 

Welche Art von Telepräsenzsystem soll aufgebaut werden (Größenkompensierend, Distanzkompensierend, Zeitkompensierend) ?
2. Festlegung der für die Montage erforderlichen Empfindungen (3a.2)

Welche Empfindungen (z.B. Härteempfinden) und Empfindungsbereiche (Haptik, Audio, ...) sind dem Monteur für die Durchführung der Montageaufgabe zu vermitteln? Dieser Schritt stützt sich auf die Montageablaufstruktur (s. Abbildung 58, Schritt 3a.2), die als Ergebnis der Ablaufplanung vorliegt.

### 3. Festlegung der Ausgabeformate für die einzelnen Empfindungen (3a.3)

In welchem Format (z.B. haptisch in drei oder sechs Freiheitsgraden) sind die einzelnen Empfindungen an den Monteur auszugeben und welche Kommunikationsverbindungen sind dazu erforderlich?

### 4. Festlegung geeigneter Hardwarekomponenten für die Ein-/Ausgabe (3a.4)

Welche Geräte sind zur Ausgabe der Empfindungen geeignet und in wieweit sind sie kompatibel zu den erforderlichen Kommunikationsverbindungen?

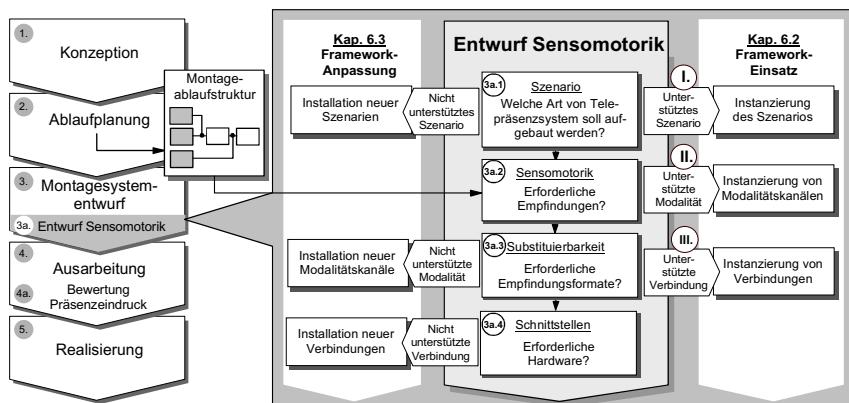


Abbildung 58: Vorgehensmodell beim Entwurf der Sensomotorik

In jedem der zu bearbeitenden Schritte sind unterschiedliche Teile des Frameworks anzuwenden, wobei zwischen dem *Einsatz* und der *Anpassung* des Frameworks zu unterscheiden ist (s. Abbildung 58):

- Während des *Einsatzes* (vgl. Abschnitt 6.2) wird das Framework unmittelbar zum Aufbau eines speziellen Telepräsenzsystems herangezogen, ohne dass anwendungsspezifische Änderungen an den Frameworkbibliotheken vorgenommen werden müssen. Die Programmierarbeiten konzentrieren sich auf die Präsentations- und Applikationsschicht, um die erforderlichen Modalitätskanäle zu konfigurieren und die entsprechenden Kommunikationsverbindungen vorzubereiten.

- Während der *Anpassung* (vgl. Abschnitt 6.3) des Frameworks werden einzelne Frameworkbibliotheken auf anwendungsspezifische Anforderungen abgestimmt, um beispielsweise neue Verbindungstypen oder Modalitätskanäle zu integrieren.

## 6.2 Frameworkeinsatz

Beim Einsatz des hier entwickelten Softwaresystems ist für eine korrekte Integration der einzelnen Frameworkbestandteile in das neu zu entwickelnde Telepräsenzsystem zu sorgen, wobei gemäß der oben getroffenen Unterscheidung keine Änderungen oder Ergänzungen am Framework selbst vorgenommen werden. Die Erweiterungspunkte der einzelnen Frameworkbibliotheken bleiben somit ungenutzt (vgl. Abbildung 59, links).

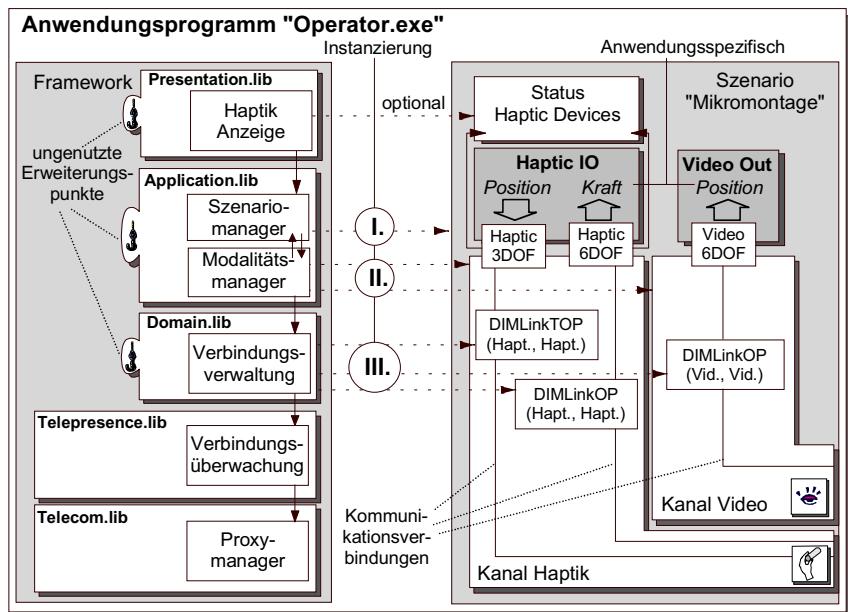


Abbildung 59 : Reihenfolge bei der Eindbindung der Frameworksbibliotheken in ein Anwendungsprogramm

Entsprechend dem in Abschnitt 6.1 skizzierten Vorgehensmodell sind während des Einsatzes des Frameworks die in Abbildung 59 dargestellten Bibliothekselemente zur Implementierung eines Anwendungsprogramm zu nutzen:

- Szenariomanagement (vgl. Abschnitt 6.2.1)
- Modalitätsmanagement (vgl. Abschnitt 6.2.2)

- Verbindungsverwaltung (vgl. Abschnitt 6.2.3)

Die Integration der erforderlichen Hardwarekomponenten erfolgt anwendungsspezifisch und wird nicht explizit durch eine Frameworkbibliothek unterstützt (in Abbildung 59: *Haptic IO* bzw. *Video Out*). Dennoch wird der Vollständigkeit halber in Abschnitt 6.2.4 erläutert, nach welchen Gesichtspunkten die Auswahl und softwaretechnische Integration der erforderlichen Geräte erfolgt.

Die folgenden Abschnitte gehen anhand von vereinfachten Beispielen detaillierter auf die in den einzelnen Schritten durchzuführenden Aktivitäten und die dabei im Anwendungsprogramm zu instanzierenden Elemente ein.

### 6.2.1 Instanzierung des Telepräsenzszenarios

Erster Schritt zur Einbindung des Telepräsenzframeworks in ein Anwendungsprogramm stellt die Festlegung des Telepräsenzszenarios (vgl. Abschnitt 5.2.1.3) dar, in dem das Telepräsenzsystem eingesetzt werden soll. Für den Aufbau eines großenkompensierenden Telepräsenzsystems ist mittels des Szenariomanagements (vgl. 5.2.2.2) etwa ein Szenario „Mikromontage“ im Anwendungsprogramm zu instanzieren (vgl. Abbildung 60), für den Aufbau eines distanzkompensierenden Systems dementsprechend ein Szenario „Telemontage“.

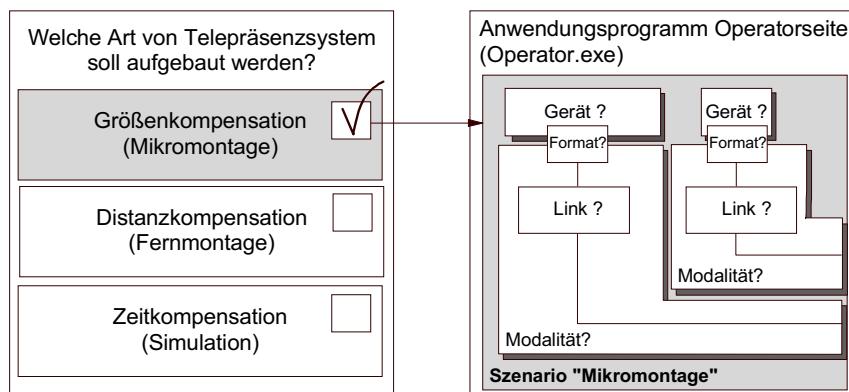


Abbildung 60: Instanzierung des Telepräsenzszenarios

Die Instanzierung des Szenarios legt innerhalb des Anwendungsprogramms ein Grundgerüst fest, in das in den folgenden Schritten die erforderlichen Modalitätskanäle sowie die zugehörigen Kommunikationsverbindungen eingebettet werden.

## 6.2.2 Instanzierung erforderlicher Modalitätskanäle

Nach der Instanzierung des Szenarios sind in einem zweiten Schritt die Empfindungen festzulegen, die dem Monteur für die erfolgreiche Durchführung der Montageaufgabe normalerweise<sup>36</sup> vermittelt werden sollten. Grundlage dieses Analyseprozesses bildet die Montageablaufstruktur, die während der Ablaufplanung aus der Ergebnisstrukturierung abgeleitet worden ist (hier nicht näher betrachtet, vgl. Bullinger 1986, S. 94).

In Erweiterung der von Reinhart 2001 und REFA 1988 beschriebenen sensomotorischen Analyse wird dazu die Rolle einzelner Empfindungen bei der Durchführung der geplanten Montageschritte untersucht (vgl. Abbildung 61). Für alle Montageschritten ist jeder der hier betrachteten Empfindungsbereiche Audio, Video und Haptik gesondert hinsichtlich der Frage zu analysieren, ob einzelne Empfindungen für die Aufgabenverrichtung erforderlich sind (in Abbildung 61 markiert) oder nicht.

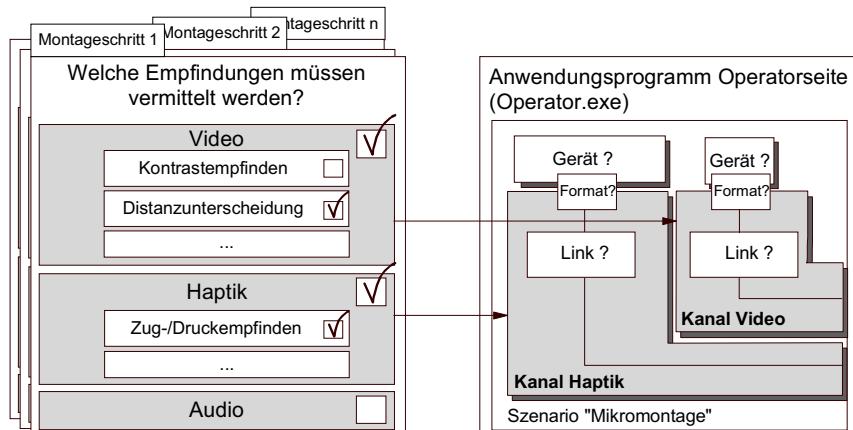


Abbildung 61: Instanzierung relevanter Modalitätskanäle

Für einen Montageschritt 1 "Relative Positionierung zweier Körper zueinander" ist beispielsweise ein visuelles Distanzempfinden erforderlich, wohingegen auf ein visuelles Kontrastempfinden verzichtet werden kann (vgl. markierte Empfindungen in Abbildung 61).

Durch die Festlegung der zu vermittelnden Empfindungen wird eine Vorauswahl der zu unterstützenden Empfindungsbereiche getroffen und es kann - abhängig von der durchzuführenden Montageaufgabe - gegebenenfalls auf die Darstellung einzelne Empfindungsbereiche vollständig verzichtet werden (in Abbildung 61: Audio). Für die relevanten Empfindungsbe-

<sup>36</sup> ohne Einsatz eines Telepräsenzsystems

reiche sind im Anwendungsprogramm mittels des Modalitätsmanagements die zugehörigen Modalitätskanäle einzurichten.

Im hier gewählten Beispiel sind somit ein haptischer und ein visueller Kanal zu instanzieren, die für die Bündelung der im folgenden Abschnitt spezifizierten Datenübertragungsverbindungen (Links) verantwortlich sind.

### 6.2.3 Instanzierung der Kommunikationsverbindungen

Als dritter Schritt während des Entwurfs der Sensomotorik sind die für die Datenübertragung erforderlichen Kommunikationsverbindungen (vgl. 5.2.1.3) festzulegen und zu instanzieren. Die notwendigen Verbindungen richten sich nach den Formaten, in denen die erforderlichen Empfindungen an den Monteur ausgegeben werden (E/A-Formate). Ein Empfinden für die während der Montage auftretenden Zug-/Druckkräfte kann beispielsweise durch eine haptische oder visuelle Darstellung (z.B. als Balkengraph) vermittelt werden, so dass je nach der gewählten Ausgabeviariante eine andere Modalitätskanal genutzt werden muss.

Innerhalb eines jeden Empfindungsbereiches sind eine Reihe von E/A-Formaten denkbar, die zur Abbildung der einzelnen Empfindungen eingesetzt werden können. So kann ein Zug-/Druckempfinden (vgl. Abbildung 62) haptisch in drei oder sechs Freiheitsgraden vermittelt werden (3 DOF bzw. 6 DOF). In visueller Form hingegen wäre eine Ausgabe anhand einer zwei- oder dreidimensionalen modellgestützten Darstellung der Remoteumgebung möglich (2 D VR bzw. 3 D VR).

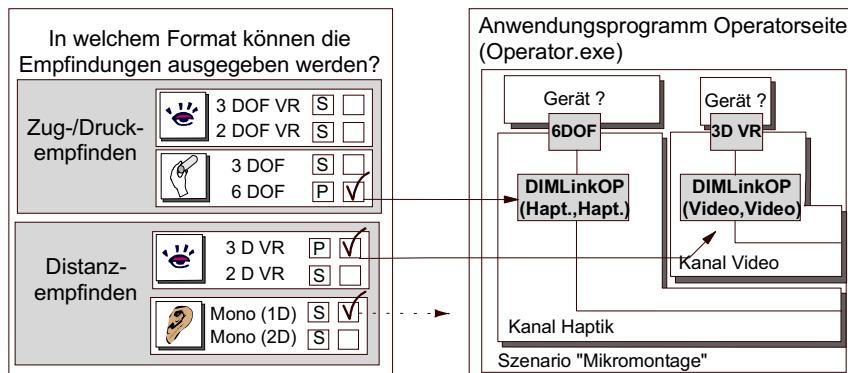


Abbildung 62: Instanzierung von Kommunikationsverbindungen anhand der Empfindungsformate

Zur Klassifizierung der E/A-Formate wird zwischen Primär- und Sekundärformaten unterschieden. Das *Primärformat* legt fest, in welchem Format die Empfindung bevorzugt vom Monteur aufgenommen wird (in Abbildung 62: *P*). Das *Sekundärformat* bestimmt, in wel-

---

chem Format die Empfindung alternativ bzw. ergänzend ausgegeben werden kann, um den Sinneseindruck beim Monteur zu erzeugen bzw. zu verstärken (Abbildung 62: S).

Die Festlegung des Primär- und Sekundärformates orientiert sich an empirisch gesammelten Erfahrungswerten, die allgemeine Empfindungspräferenzen widerspiegeln. So werden beispielsweise gemäß einer von *Deml 2002* zusammengestellten Studie Form und Größe bevorzugt visuell wahrgenommen, während die haptische Wahrnehmung eher bei der Verarbeitung von Konsistenzegenschaften vorgezogen wird (vgl. auch *Klatzky & Lederman 1995*).

Um den Empfindungeindruck zu intensivieren, kann eine Empfindung auch redundant sowohl im Primär- als auch dem Sekundärformat dargestellt werden. Das in Abbildung 62 veranschaulichte „Distanzempfinden“ etwa wird primär mittels des Formats 3D VR an den Monteur ausgegeben und sekundär über ein akustisches Signal mit variabler Lautstärke (Mono 1D) vermittelt. In diesem Fall ist neben den Kanälen Haptik und Video noch zusätzlich der Modalitätskanal „Audio“ im Anwendungsprogramm zu instanzieren (in Abbildung 62 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt).

Anhand der Spezifikation der Empfindungen und Ausgabeformate können nun die erforderlichen Kommunikationsverbindungen in den einzelnen Modalitätskanälen instanziert werden. So sieht das in Abbildung 62 dargestellte Szenario für den haptischen und visuellen Kanal jeweils eine Verbindung von der Teleoperator- zur Operatorseite vor (DIMLinkOP(.....)). Die Haptik-Verbindung wird zur Vermittlung eines Zug-/Druckempfindens in sechs Freiheitsgraden eingesetzt, wohingegen die Video-Verbindung für die dreidimensionalen Darstellung von Objekten vorgesehen ist.

Neben den Verbindungen vom Teleoperator zum Operator ist die zur Steuerung des Manipulators erforderliche Verbindung zwischen Operator und Teleoperator einzurichten. Für Mikromontageszenarien wird dafür standardmäßig eine Verbindung DIMLINK-TOP(Haptik6DOF, Haptik6DOF) eingesetzt, da dieser Verbindungstyp sowohl die Übertragung von Sollpositionen als auch Sollkräften erlaubt (in Abbildung 62 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt, vgl. Abschnitt 5.2.1.3).

Nach der nun abgeschlossenen Einrichtung der erforderlichen Kommunikationsverbindungen sind in einem letzten Schritt die Hardwarekomponenten auszuwählen und in das Anwendungsprogramm zu integrieren, die für die Darstellung der spezifizierten Empfindungen geeignet sind.

#### 6.2.4 Integration der Hardwaretreiber

Für die Ein- und Ausgabe der Daten, die mittels der oben eingerichteten Kommunikationsverbindungen zwischen Operator- und Teleoperator übertragen werden, sind in einem letzten Schritt geeignete Hardwarekomponenten (z.B. haptische Geräte, Videosysteme etc.) in das Telepräsenzsystem zu integrieren. Aus den im Handel verfügbaren Komponenten sind dazu die für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeigneten Geräte auszuwählen und softwaretechnisch in die Anwendungsprogramme einzubinden.

Die Beurteilung der Einsatztauglichkeit der im Handel verfügbaren Hardwarekomponenten orientiert sich neben ergonomischen Gesichtspunkten hauptsächlich daran, ob die erforderlichen Ein-/Ausgabeformate unterstützt werden oder nicht. Für die Ausgabe von Kräften und Momenten in sechs Freiheitsgraden, wie sie z.B. zur Vermittlung eines Zug-/Druckempfindens erforderlich sind, kommen daher nur solche Geräte in Frage, die wie etwa das *Phantom 6DOF* (vgl. Abbildung 63) sechs Freiheitsgrade unterstützen.

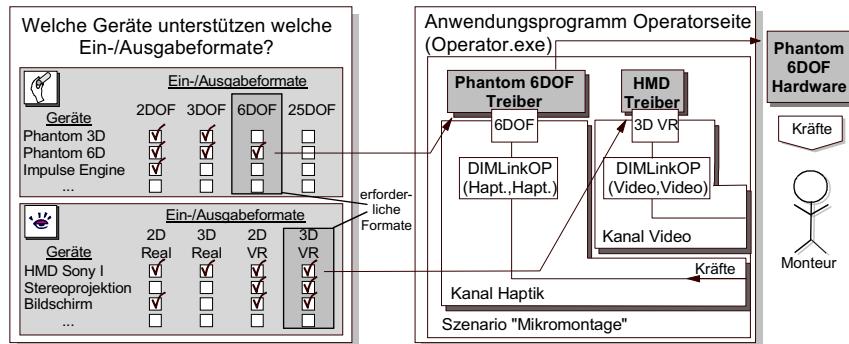


Abbildung 63: Auswahl von Hardwarekomponenten

Wie aus Abbildung 63 ersichtlich, wird im hier betrachteten Beispiel aufgrund der erforderlichen Empfindungsformate neben dem haptischen Gerät *Phantom 6 DOF* ein Head-Mounted-Display (HMD) als visuelles Gerät ausgewählt.

Softwaretechnisch erfolgt die Integration der Hardwarekomponenten mittels hardwarespezifischer Treiberbausteine, die meist von den Geräteherstellern in Form von Softwarebibliotheken zur Verfügung gestellt werden und Funktionen für den Hardwarezugriff bereitstellen. Durch softwaretechnische Verknüpfung der Kommunikationsverbindungen mit den Treiberbausteinen können somit die beispielsweise von der Teleoperatorseite empfangenen, gemessenen Kräfte über das *Phantom 6DOF* an den Monteur ausgegeben werden (vgl. Abbildung 63).

Durch die Vereinheitlichung der Ein-/Ausgabeformate können einzelne Hardwarekomponenten mit geringem Programmieraufwand gegeneinander ausgetauscht werden, solange sie die entsprechenden Formate unterstützen. Das in Abbildung 63 gewählte HMD kann somit schnell durch eine Stereoprojektionssystem ersetzt werden, ohne Änderungen an der Kommunikationsinfrastruktur vornehmen zu müssen.

## 6.3 Frameworkanpassung

Falls die vom Framework standardmäßig zur Verfügung gestellten Funktionen die anwendungsspezifischen Anforderungen z.B. hinsichtlich der unterstützten Modalitätskanäle nicht erfüllen, so sind Anpassungsarbeiten am Framework-Kern unumgänglich. Die dabei einzuhaltende Vorgehensweise wird hier beispielhaft an der Integration eines neuen Algorithmus für die Dimensionsskalierung in einem Mikromontagelink (DIMLink, vgl. Abschnitt 5.2.1.3) verdeutlicht.

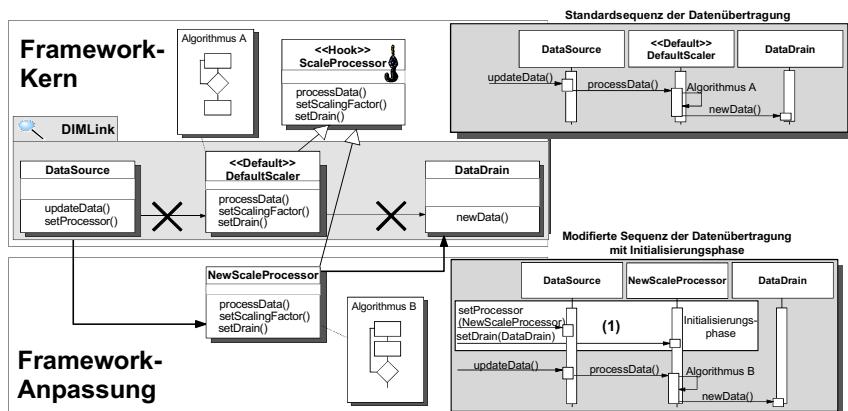


Abbildung 64: Erweiterung des Frameworks um einen Algorithmus

Wie in Abbildung 64 dargestellt ist in einem DIMLink jede Datenquelle (DataSource) innerhalb des Framework-Kerns über einen Standard-Skalierungsprozessor (DefaultScaler) mit einer Datensenke (DataDrain) verbunden. Die einzelnen Verbindungen werden automatisch während des Anlegens eines DIMLinks aufgebaut, so dass sich der Entwickler eines Frameworks nicht damit befassen muss. Der Skalierungsfaktor kann über eine entsprechende Methode "setScalingFactor(..)" des Skalierungsprozessors eingestellt werden.

Zur Integration eines neuen Skalierungsalgorithmus (Abbildung 64, Algorithmus B) ist der in Form eines Hooks vom Framework zur Verfügung gestellte Erweiterungspunkt zu nutzen. Der Entwickler hat dazu für den alternativen Skalierungsprozessor eine neue Klasse von der Hookklasse "ScaleProcessor" abzuleiten und in diese den neuen Algorithmus einzubetten. Zur Einbindung des neuen Skalierungsprozessors in den Datenfluss sind abschließend die Kommunikationsverbindungen der Datenquelle und des neuen Prozessors durch die entsprechenden Funktionsaufrufe "setDrain(...)" bzw. "setProcessor(...)" zu aktualisieren, bevor die Verbindung zur Datenübertragung eingesetzt werden kann (Abbildung 64, (1)). Wie der Vergleich der beiden Datenübertragungssequenzen zeigt, ist der Implementierungsaufwand für die Erweiterung des Frameworks verhältnismäßig gering. Die Softwarearchitektur des ge-

samten Anwendungsprogramms bleibt dabei erhalten, was dessen Wartung und Pflege wesentlich vereinfacht.

## 6.4 Fazit

Aufbauend auf der Beschreibung der auf dem Handlungsfeld *Strukturmodell*entworfenen Softwarearchitektur haben die vorangegangen Abschnitte die Vorgehensweise beim Einsatz und der Erweiterung des Telemontageframeworks dargelegt.

Im Mittelpunkt der Beschreibungen zum Frameworkeinsatz standen die einzelnen telepräzenzspezifischen Schritte zur aufgabespezifischen Auswahl der erforderlichen Modalitäten und Ein-/Ausgabegeräten sowie deren Integration in das Telemontageframework.

Die Ausführungen hinsichtlich der Erweiterungsmöglichkeiten des Frameworks konzentrierten sich auf die Erläuterung der prinzipiellen Funktionsweise des Erweiterungsmechanismus und verdeutlichten den verhältnismäßig geringen Implementierungsaufwand.

Unter Vervollständigung des hier vorgestellten Rahmenkonzeptes stellt das folgende Kapitel 7 die Beschreibungstechniken und Werkzeuge vor, die für den effizienten Einsatz des Frameworks und zur Unterstützung des Vorgehensmodells zur Verfügung gestellt werden.

## 7 Hilfsmittel

Wie im vorliegenden Kapitel gezeigt wird, kann der Umgang mit dem in den Kapiteln 5/6 beschriebenen Telemontageframework/Vorgehensmodell durch den Einsatz grafischer Beschreibungsmittel sowie einem unterstützenden Werkzeug entscheidend vereinfacht werden.

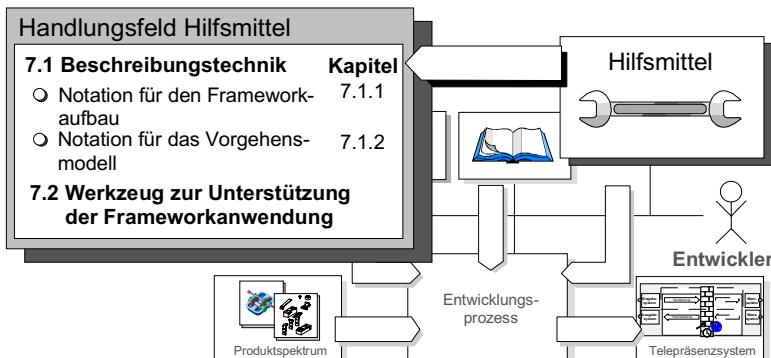


Abbildung 65 : Überblick über das Handlungsfeld Hilfsmittel

Im ersten Teil dieses Kapitels wird dazu erläutert, welche grafischen Beschreibungstechniken für die Modellierung und Dokumentation des Rahmenkonzeptes eingeführt wurden und inwiefern diese zur Komplexitätsbeherrschung beitragen.

Der zweite Teil des Kapitels veranschaulicht, welches Werkzeug bei der Frameworkanwendung zur Unterstützung der Beschreibungstechnik eingesetzt wird und wie dieses im Entwicklungsprozess wirkungsvoll genutzt werden kann.

### 7.1 Beschreibungstechnik

Wie in Abschnitt 5.1.2 ausführlich erläutert, wird das Verständnis komplexer Zusammenhänge durch die Nutzung geeigneter Modellierungskonzepte wesentlich vereinfacht. Elementare Bestandteil beim Aufbau eines Modells bildet gemäß der Volksweisheit „Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ die grafische Darstellung der Modellinhalte, da „eine wohldefinierte und ausdrucksstarke Notation [...] für den Prozess der Softwareentwicklung sehr wichtig [ist]“ (*Booch 1996, S. 217*). Wesentliche Voraussetzung für die interdisziplinäre Nutzung und Diskussion grafischer Modelle im Entwicklungsprozess stellt die Festlegung eines einheitlichen Darstellungsformates dar (vgl. auch *Anton & Lercher 2001*). Diesbezügliche Ansätze spiegeln sich im Bereich des Softwareengineering durch die Standardisierungsbestrebungen von Beschreibungstechniken in Form der UML wider (vgl. Kap. 5.1.2 und Anhang A).

Die einzelnen von der UML zur Verfügung gestellten Diagrammtypen, wie beispielsweise Klassen- oder Zustandsdiagramme, ermöglichen die Darstellung unterschiedlicher statischer und dynamischer Aspekte eines Softwaresystems. Die grafischen Symbole abstrahieren dabei soweit wie möglich vom betrachteten Problembereich, um alle Problemdomänen mit den gleichen Diagrammtypen beschreiben zu können. Die Lesbarkeit der Diagramme leidet unter diesem hohen Abstraktionsgrad, da z.B. die konzeptionelle Nähe ähnlicher Klassen innerhalb eines Klassendiagramms nicht ohne weiteres erkennbar ist. Geht es beispielsweise wie in Abbildung 66 veranschaulicht, um die Modellierung des in Kapitel 5.1.2 eingeführten Reiseunternehmens, so ist in dem links dargestellten Klassendiagramm eine Unterscheidung der verschiedenen Transportmittelarten "Schiff" bzw. "Automobil" ohne tiefergehendes Vorwissen über die einzelnen Namen "Gorch Fock", "Mercedes-S-Klasse" etc. nicht möglich.

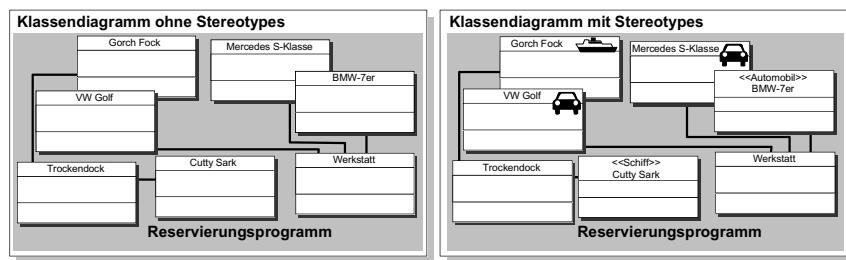


Abbildung 66 : Klassendiagramme und Stereotypes

Für die Zuordnung der Transportmittel zu den zugehörigen Wartungseinrichtungen *Trockendock* oder *Werkstatt*, wäre eine Unterscheidung der Transportmittelarten jedoch hilfreich. Die UML stellt zur Zusammenfassung gleichartiger oder Einführung neuer Modellelemente das Konstrukt "Stereotype" zur Verfügung, das sich in Diagrammen durch den Beschreibungszusatz <<Stereotype>> widerspiegelt. Zur Versinnbildlichung des Stereotypes kann auch ein grafisches Symbol eingesetzt werden, wie es in Abbildung 66 beispielhaft dargestellt ist.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die zur Modellierung des Frameworkaufbaus und zur Dokumentation des Vorgehensmodells eingeführten Stereotypes.

### 7.1.1 Notation für die Modellierung des Frameworkaufbaus

Das weiter oben beschriebene Anwendungskonzept für das entworfene Framework sieht vor, dass der Großteil der Implementierungsarbeiten zum Einsatz des Frameworks auf der Applikationsebene stattfindet. Der intuitiven Darstellung der entsprechenden Frameworkelemente kommt daher eine besondere Rolle beim Entwurf anwendungsspezifischer Programme zu.

Wie in Abbildung 67 in Auszügen veranschaulicht, werden für die Modellierung der Applikationsschicht eine Reihe modalitäts- und kommunikationsorientierter Stereotypes unterschieden.

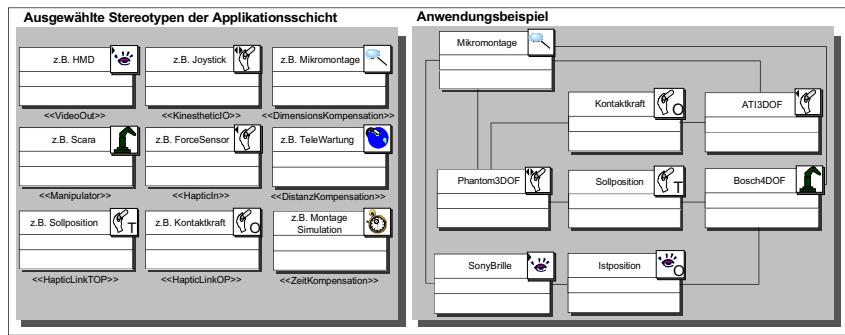


Abbildung 67 : Stereotypes der Applikationsschicht

Die Stereotypes <<VideoOut>> und <<KinestheticIO>> dienen in erster Linie der Modellierung von Elementen der Bedienerschnittstelle, wohingegen <<Manipulator>> und <<HapticIn>> eher zur Beschreibung der Teleoperatorseite eingesetzt werden. Mittels des <<HapticLinkOP>> und des <<HapticLinkTOP>> wird der Fluss haptischer Daten von der Teleoperator- zur Operatorseite (<<HapticLinkOP>>) und umgekehrt modelliert. Des Weiteren wurde für jede Dimension der Telepräsenz ein eigener Stereotype festgelegt, durch den implizit eine Vorauswahl der einzurichtenden Verbindungsarten getroffen wird.

Manche Icons (z.B. <<VideoOut>>) bringen neben der Zugehörigkeit der Klasse zu einem bestimmten Empfindungsbereich auch die Rolle des betreffenden Stereotypes im Informationsfluss aus Sicht des Frameworks zum Ausdruck (Pfeil nach rechts: modalitätsspezifische Information wird ausgegeben, Pfeil nach links: Information wird aufgenommen).

Unter Nutzung der dargestellten Stereotypes kann nun relativ einfach ein intuitives Modell eines Telemontagesystems aufgebaut werden, wie es beispielhaft in Abbildung 67 veranschaulicht ist. Das Beispiel modelliert ein Mikromontageszenario, in dem ein Manipulator "Bosch4DOF" und ein Kraftsensor "ATI3DOF" auf der Teleoperatorseite sowie ein kraftrückkoppelnder Joystick "Phantom3DOF" und ein HMD "SonyBrille" zum Einsatz kommen. Zwischen den Komponenten auf Operator- und Teleoperatorseite werden kommandierte und gemessene Positionen sowie gemessene Kraftwerte ausgetauscht.

### 7.1.2 Notation zur Abbildung des Vorgehensmodells

Da der ausführlichen Dokumentation eines Frameworks eine zentrale Rolle bei dessen Einsatz und der Erweiterung zukommt (s. Kap. 5.1.5.2), wurde das in Kapitel 6 beschriebene Vorgehensmodell mittels der UML abgebildet und dem Frameworkmodell zur Seite gestellt.

Zur Beschreibung des Vorgehensmodells werden erweiterte Use-Case-Diagramme eingesetzt, die einen direkten Zusammenhang zwischen den einzelnen Aspekten bei der Frameworkanwendung und den jeweils betroffenen Teilen des Frameworks herstellen (vgl. Abbildung 68).

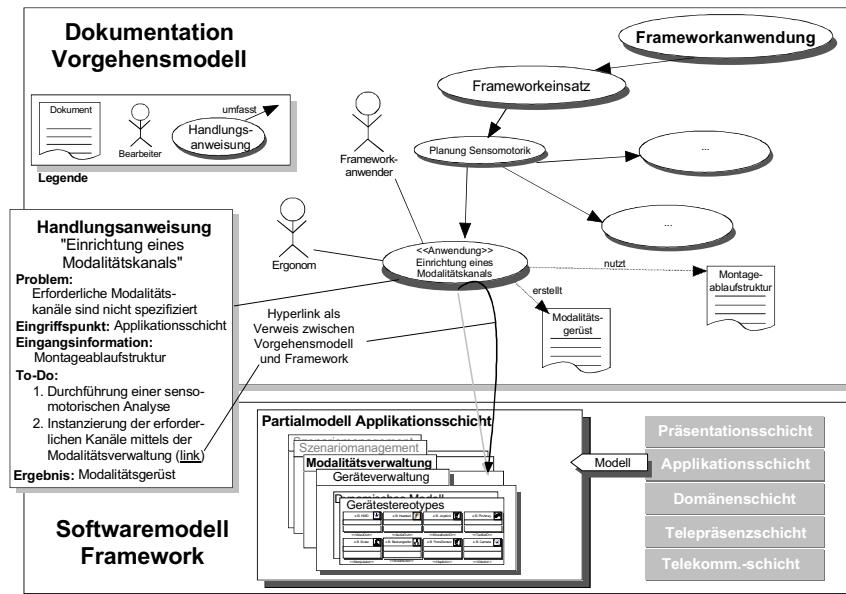


Abbildung 68: Verknüpfung zwischen Entwicklungsschritt und Frameworkausschnitt

Ein Use-Case als Bestandteil der Vorgehensdokumentation beschreibt in diesem Zusammenhang die Aktivitäten, die von einzelnen Bearbeitern während eines bestimmten Schrittes beim Frameworkeinsatz durchzuführen sind. Ebenso werden die dazu benötigte Eingangsinformationen und die produzierten Ergebnisse angeführt. Jeder Use-Case ist mit einer Handlungsanweisung versehen, in dem die innerhalb des Use-Cases behandelte Problemstellung, die betroffene Abstraktionsschicht sowie die einzelnen zur Beseitigung des Problems durchzuführenden Maßnahmen beschrieben sind. Alle Use-Cases und Handlungsanweisungen sind mit einem direkten Verweis auf die betroffene Stelle im Softwaremodell des Frameworks ausgestattet, so dass mit dem weiter unten beschriebenen Werkzeug per Hyperlink<sup>37</sup> direkt von der Handlungsanweisung in das Framework navigiert werden kann.

Abbildung 68 illustriert beispielsweise die in Zusammenarbeit der Bearbeiterrollen „Frameworkanwender“ und „Ergonom“ durchzuführende Aktivität „Einrichtung eines Modalitätskanals“, die im Rahmen der Planung der Sensomotorik durchzuführen ist. Die Aktivität nutzt die Montageablaufstruktur als Eingangsinformation und produzierte als Ergebnis das „Modalitätsgerüst“, das die in den Anwendungsprogrammen einzurichtenden Modalitätskanäle spezifiziert (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die zugehörige Handlungsanweisung beschreibt ausgehend von dem Problem der nicht spezifizierten Modalitätskanäle die einzelnen durchzuführenden

<sup>37</sup> Ein Hyperlink ist ein elektronischer Verweis zwischen unterschiedlichen Stellen innerhalb oder zwischen Dateien (Beispiel: Verlinkte Internetseiten)

Schritte. Mittels des Hyperlinks zum Modalitätsmanagement, das in der Applikationsschicht angesiedelt ist (vgl. Abschnitt 5.2.2.3) kann der Entwickler direkt auf das betroffene Frameworkelement zugreifen.

## 7.2 Werkzeug zur Unterstützung der Frameworkanwendung

Zum effizienten Umgang mit einem Softwaremodell ist nach heutigem Stand der Technik ein Werkzeug für das computerunterstützte Softwareengineering, ein so genanntes CASE<sup>38</sup>-Tool, unerlässlich. Die folgenden Abschnitte erläutern als Verständnisgrundlage zunächst die prinzipielle Funktionsweise eines CASE-Tools und gehen kurz darauf ein, welches Werkzeug im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird (Abschnitt 7.2.1). Im Anschluss wird dargelegt, wie das hier eingesetzte Werkzeug erweitert wurde, um den Entwickler von Telepräsenzsystemen sowohl bei der Anwendung des in Kap. 6 beschriebenen Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 7.2.2) als auch beim Aufbau einzelner Klassendiagramme (vgl. Abschnitt 7.2.3) zu unterstützen.

### 7.2.1 Hilfsmittel für die Softwareentwicklung

CASE-Tools unterstützen mittels einer grafischen Bedienoberfläche den interaktiven Aufbau von Klassendiagrammen und erlauben die automatische Generierung von Sourcecode-Fragmenten (vgl. Abbildung 69). Die Codefragmente können dann entweder direkt im CASE-Tool weiter detailliert oder in externe Softwareentwicklungsumgebungen exportiert werden. Durch die grafische Darstellung von Klassen und deren Relationen leisten CASE-Tools einen wesentlichen Beitrag zur Übersichtlichkeit, Wartbarkeit und effektiven Entwicklung von komplexen Softwaresystemen (*Balzert 1998, S. 16*).

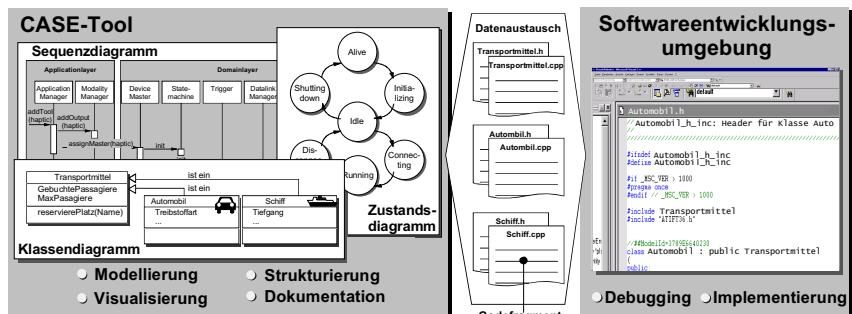


Abbildung 69: Funktionsweise eines CASE-Tools

<sup>38</sup> CASE: Computer Aided Software Engineering

Das hier entworfene Rahmenkonzept wurde daher in einem kommerziell erhältlichen CASE-Tool abgebildet, das um die in Abschnitt 7.1 dargestellten Beschreibungselemente erweitert wurde. Aus einer Marktrecherche gängiger CASE-Tools<sup>39</sup> wurde unter Berücksichtigung von Auswahlkriterien wie Bedienerfreundlichkeit, Anpassbarkeit, Erweiterbarkeit und Import-/Exportschnittstellen schließlich das Werkzeug "Together (V6.0)" der Firma TogetherSoft ausgewählt.

## 7.2.2 Unterstützung bei der Anwendung des Vorgehensmodells

Einen der entscheidenden Faktoren für den effizienten Einsatz des hier entwickelten Frameworks bildet der zielgerichtete Zugriff auf einzelne Frameworkelemente, um diese in anwendungsspezifische Programme integrieren zu können. Zur Unterstützung des zielgerichteten Zugriff wurde das in Kapitel 6 beschriebene Vorgehensmodell im hier gewählten CASE-Tool Together abgebildet (vgl. Abbildung 70).

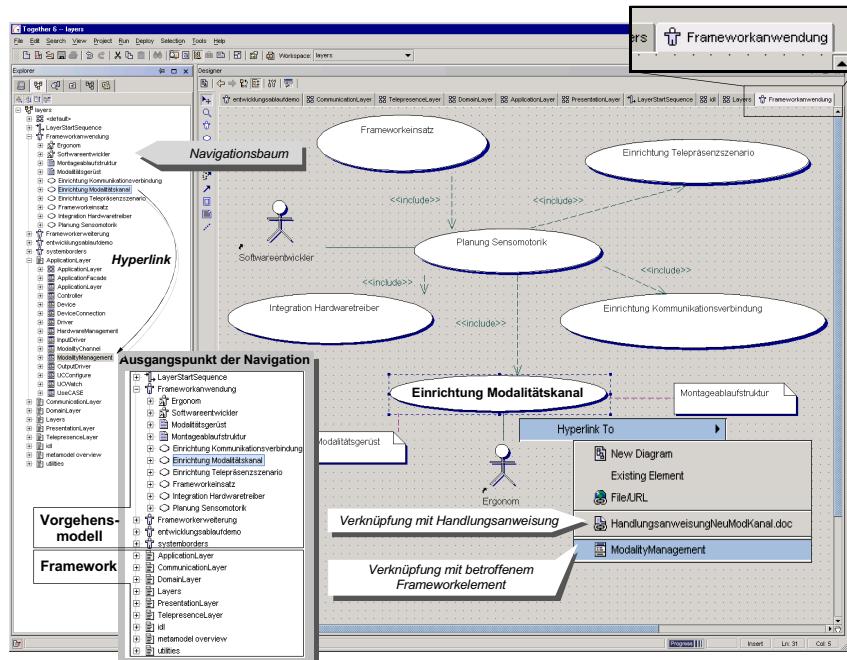


Abbildung 70: Verbindung zwischen Vorgehensdokumentation und Framework

<sup>39</sup> Untersucht wurden die CASE-Tools Rational Rose ([www.rational.com](http://www.rational.com)), Software through Pictures ([www.aonix.com](http://www.aonix.com)) und Together ([www.togethersoft.com](http://www.togethersoft.com))

Die einzelnen Anwendungsfälle für die Anwendung und Anpassung des Frameworks sind wie in Abbildung 70 dargestellt in Form von Use-Case-Diagrammen beschrieben. Jeder Use-Case ist mit mehreren Hyperlinks versehen, die sowohl Verbindungen zu Handlungsanweisungen für die Bearbeitung des Use-Cases und als auch zu den betroffenen Frameworkelementen herstellen.

Die Verknüpfungen können vom Entwickler beispielsweise dazu genutzt werden, um ausgehend von einem bestimmten Anwendungsfall (in Abbildung 70: Einrichtung Modalitätskanal) direkt zum betroffenen Frameworkelement "Modalitätsmanagement" in der Applikationsschicht zu navigieren. Aufwändige Suchprozeduren zum Auffinden der relevanten Klassen während der Frameworkanwendung werden somit vermieden.

Um den Zugriff auf das Modell nicht ausschließlich auf einen Personenkreis zu beschränken, der im Besitz einer Softwarelizenz für das hier eingesetzte CASE-Tool ist, steht das gesamte Softwaremodell auch in Form einer browserfähigen HTML-Version zur Verfügung (Abbildung 71).

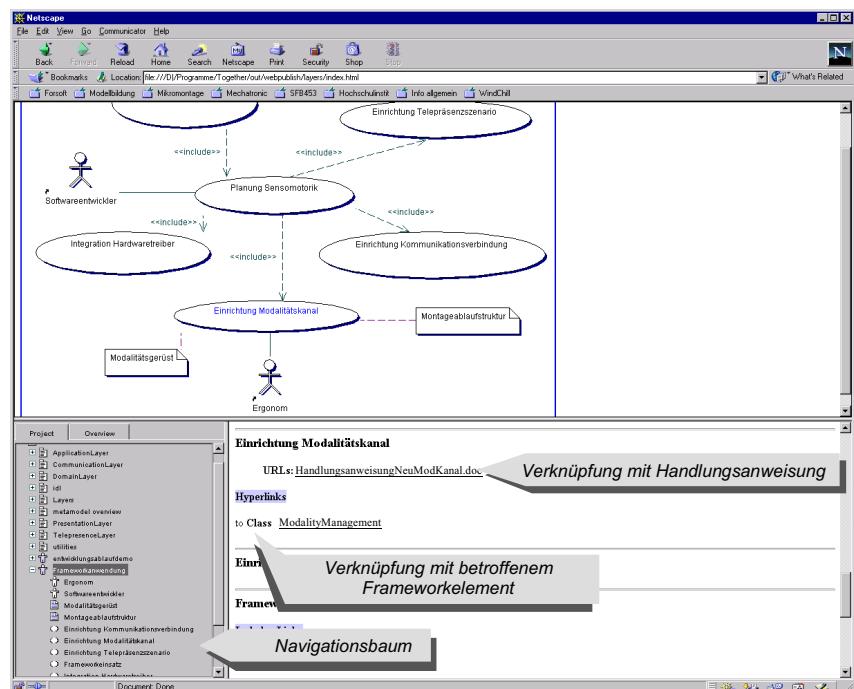


Abbildung 71: Browserfähige Dokumentation des Vorgehensmodells

Diese kann mit jedem handelsüblichen Internetbrowser geöffnet werden, wobei die Interaktion mit dem Softwaremodell in diesem Fall auf einen rein lesenden Zugriff, wie er z.B. im Rahmen der Frameworkanalyse erforderlich ist, beschränkt ist. Die Navigationsmöglichkeiten innerhalb des Frameworks und die entsprechenden Handlungsanweisungen bleiben jedoch vollständig erhalten.

### 7.2.3 Unterstützung beim Aufbau des Systemmodells

Da neben dem schnellen Zugriff auf die wesentlichen Frameworkelemente auch die einfache Lesbarkeit der einzelnen Framework-Diagramme eine wesentliche Rolle spielt, wurden das CASE-Tool gemäß des in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Konzepts um grafisch repräsentierte Stereotypes erweitert.

Wie in Abbildung 72 verdeutlicht, erleichtern beispielsweise die Stereotypes für die unterschiedlichen Abstraktionsebenen die Einordnung einzelner Layer-Klassen in das in Kapitel 5 vorgestellte mehrschichtige Abstraktionsmodell.

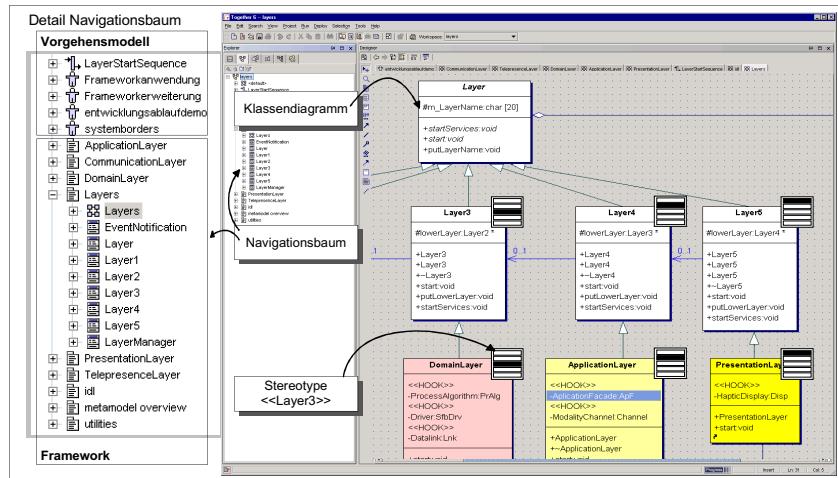


Abbildung 72: Hilfsmittel für den Einsatz des Telepräsenzframeworks

Das Klassendiagramm in Abbildung 72 beschreibt die Vererbungshierarchie zwischen einer abstrakten Klasse "Layer" und den davon abgeleiteten Klassen "Layer 1" bis "Layer 5" (Layer 1 bis 3 nicht dargestellt). Die Klassen der untersten Vererbungsebene repräsentieren die in Kapitel 5 beschriebenen Abstraktionsschichten (DomainLayer, ApplicationLayer, PresentationLayer) und lassen allein anhand ihrer Namensgebung keinerlei Rückschlüsse auf ihre Einordnung innerhalb des Architekturmodells zu. Mittels der Stereotypes für die unterschied-

lichen Abstraktionsschichten wird diese für das Verständnis des Gesamtsystems wichtige Information anschaulich in das Diagramm integriert.

### 7.3 Fazit

Die vorangegangenen Kapitel haben die im Rahmen dieser Arbeit auf unterschiedlichen Handlungsfeldern erzielten Ergebnisse beschrieben. Es wurde erläutert, auf welchem technologischen und methodischen Fundament das Rahmenkonzept für die kommunikationstechnische Integration von telepräsenten Montagesystemen errichtet wurde. Auf dieser Basis wurde dargelegt, welche architektonischen Maßnahmen im Sinne der Komplexitätsreduktion zur Modularisierung und Flexibilisierung des entstandenen Frameworks ergriffen worden sind. Zur Vervollständigung des angestrebten Rahmenkonzeptes wurde abschließend in Form eines werkzeugunterstützten Vorgehensmodells aufgezeigt, wie das entwickelte Framework im Entwicklungsablauf für telepräsente Montagesysteme einzusetzen ist.

Die Kombination aus Methode, Notation und Werkzeug ermöglicht den systematischen, übersichtlichen und effizienten Einsatz des hier erarbeiteten Softwaresystems. Dem Entwickler von Telepräsenzsystemen wird somit ein softwaretechnisches Grundgerüst zur Hand gegeben, das wesentliche Kernfunktionalitäten eines Telepräsenzsystems kapselt und ihm einen schnellen Zugriff auf die zu erweiternden Stellen der Kommunikationsinfrastruktur ermöglicht.

Zum Nachweis der Funktionstauglichkeit des vorgestellten Rahmenkonzeptes und zur Beurteilung seiner Vor- und Nachteile wurde anhand des beschriebenen Rahmenkonzeptes eine Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage aufgebaut, die im folgenden Abschnitt 8 näher beschrieben ist.



## 8 Anwendungsbeispiel

Aufbauend auf den Erläuterungen in den Kapiteln 4 bis 7 hinsichtlich der Struktur und des Einsatzes des hier entworfenen Rahmenkonzeptes stellt das vorliegende Kapitel dar, welche Schritte zum Nachweis der Funktionstauglichkeit des vorgestellten Ansatzes vollzogen wurden. Anhand des Funktionsnachweises sollte einerseits verifiziert werden, dass das Rahmenkonzept aus technologischer Sicht für den Aufbau eines Telepräsenzsystems geeignet ist. Zum anderen sollte experimentell überprüft werden, ob aus ergonomischer Sicht die Güte eines Framework-basierten Telepräsenzsystems für die Durchführung einer teleoperierten Montageaufgabe ausreicht.

Ausgangspunkt bildet eine kurze Erläuterung der beispielhaft ausgewählten Mikromontageaufgabe, die anhand eines dimensionskompensierenden Telemontagesystems ausgeführt werden sollte. Daran anschließend wird die zur Durchführung der Telemontage aufgebaute Versuchsplattform hardwareorientiert beschrieben und die Szenarien zur experimentellen Bewertung der Funktionstauglichkeit erläutert. Zum Abschluss des Kapitels werden die während des Aufbaus der Versuchsplattform und der Anwendung des Frameworks gesammelten Erfahrungen kurz zusammengefasst.

### 8.1 Anwendungsbeispiel Mikromontage

Als Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage wurde in einem ersten Schritt ein miniaturisiertes Uhrwerk gewählt, wie es in Abbildung 73 vergrößert dargestellt ist.

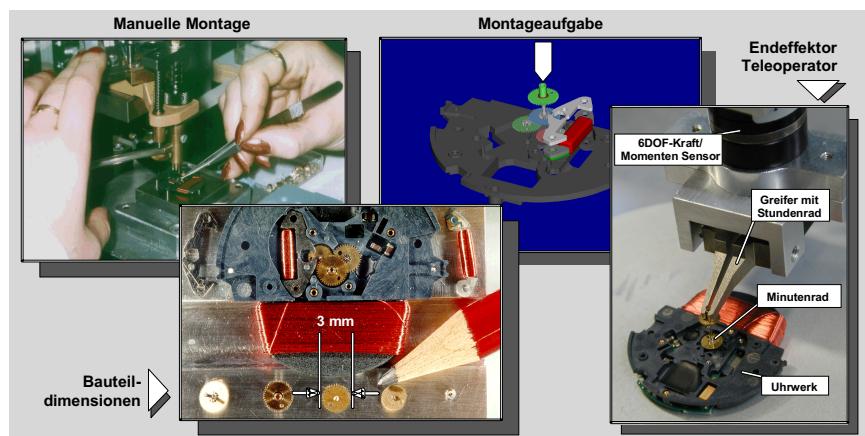


Abbildung 73: Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage

Die zu bewältigende Montageaufgabe bestand darin, das Stundenrad des Uhrwerks auf die Achse des darunter liegenden Minutenrades zu stecken, wobei aufgrund der geringen Abmessungen des Zahnrades eine Positioniergenauigkeit von 30 Mikrometern erforderlich ist. Derartige Montageoperationen werden heute häufig manuell anhand von Pinzetten und speziellen Vorrichtungen durchgeführt (vgl. Abbildung 73). Zur Durchführung der Montage waren insbesondere die folgenden Schritte durchzuführen:

1. Lokalisieren eines Stundenrads in einem Bereitstellungspuffer
2. Aufnehmen des Stundenrads mit einem Pinzettengreifer
3. Positionieren des Stundenrads über dem im Uhrwerk befindlichen Minutenrad
4. Fügen des Stundenrads auf das Minutenrad

Die beschriebene Montageaufgabe ordnet sich aufgrund der Bauteilgröße und der erforderlichen Positioniergenauigkeit in den Grenzbereich zwischen Präzisions- und Mikromontage ein (vgl. Abbildung 74, eingekreister Bereich).

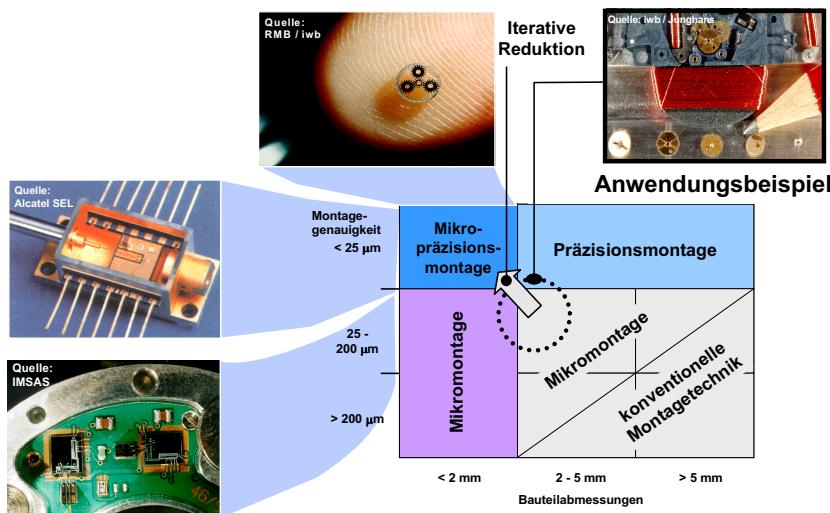


Abbildung 74: Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage (Bild nach Reinhart & Höhn 1999)

Die Auswahl dieses Anwendungsbeispiels hat seine Berechtigung darin, dass zur Reduktion der Aufgabenkomplexität bei der Entwicklung des Telepräsenzsystems ein iterativer Ansatz gewählt wurde. Die erste Iteration, während der das hier vorgestellte Framework aufgebaut und getestet wurde, war auf die stabile kommunikationstechnische Beherrschung des Systems ausgerichtet. Daher sollten mikromontagespezifische Randeffekte zur Einschränkung von

Störungsquellen so weit wie möglich ausgeklammert werden. In weiteren Iterationen wird die Dimension der zu handhabenden Bauteile sowie die einzuhaltende Montagegenauigkeit schrittweise zu reduzieren sein (vgl. Pfeil in Abbildung 74).

## 8.2 Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage

Zur Durchführung der Montageaufgabe wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) ein verteiltes System für die telepräsente Mikromontage aufgebaut<sup>40</sup> (vgl. Anton et al. 2000, Reinhart et al. 2000, Anton et al. 2001). Das hier vorgestellte Frameworkkonzept wurde im Rahmen der dabei durchgeführten Entwicklungsarbeiten iterativ aufgebaut und umgesetzt.

Die folgenden Abschnitte erläutern, wie das entwickelte Rahmenkonzept beim Aufbau des Mikromontagesystems angewendet wird und wie dieses strukturiert ist.

### 8.2.1 Anwendung des Rahmenkonzeptes

Gemäß Schritt 1 des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 6.2.1) ist zunächst das gewünschte Telepräsenzszenarios festzulegen, so dass gemäß dem hier gewählten Anwendungsbeispiel „Uhrwerksmontage“ ein Szenario <>Mikromontage<> in den Anwendungsprogrammen für die Operator- und Teleoperatorseite instanziert wird.

Entsprechend Schritt 2 (vgl. 6.2.2) sind als nächstes die Modalitätskanäle zu spezifizieren, die vom Monteur während der Durchführung der Montageaufgabe genutzt werden. Die erforderlichen Modalitätskanäle werden aus einer sensomotorischen Analyse der Montagefolge abgeleitet, in deren Rahmen die zu vermittelnden Empfindungen festgelegt werden (vgl. tabellarische Darstellung in Abbildung 75).

---

<sup>40</sup> Der Aufbau der Versuchsplattform erfolgte im Rahmen des SFB453 in enger Zusammenarbeit der am iwb bearbeiteten Teilprojekte A1, A2 und B5. Das hier vorgestellte Rahmenkonzept wurde im Teilprojekt A1 erarbeitet.

**Welche Empfindungen sind erforderlich?**

Bedeutung	unverzichtbar	1
	irrelevant	0

**Montageschritte "Uhrwerksmontage"**

Zahnrad lokalisieren	1	0	0	1	1	1	0
Zahnrad aufnehmen	0	0	0	1	1	1	1
Zahnrad positionieren	1	0	0	0	1	1	1
Zahnrad fügen	0	0	0	1	1	0	1

**Sensomotorische Analyse**

**Empfindungen**

Helligkeitsunterscheidung	Schärfeempfinden	Distanzunterscheidung	Räumlichkeitsempfinden	Ziel-/Richtungssicherheit	Härteunterscheidung	Mobilität	Oberflächenunterscheidung	Substanzunterscheidung	Temperaturunterscheidung	Elastizitätsunterscheidung	Formunterscheidung	Zug-/Druckempfinden	Ziel-/Richtungssicherheit	
Farbunterscheidung	Kontrastempfinden												Lautstärkeunterscheidung	
													Schallquellenunterscheidung	
													Tonhöheunterscheidung	

Abbildung 75: Sensomotorische Analyse der Uhrwerksmontage

Abbildung 75 zeigt, dass für die hier betrachtete Uhrwerksmontage in erster Linie der visuelle und kinästhetische Modalitätskanal erforderlich sind, um dem Monteur die unterschiedlichen Empfindungen wie z.B. eine Distanzunterscheidung oder ein Zug-/Druckempfinden zu vermitteln. Dementsprechend werden in den Anwendungsprogrammen jeweils der haptische und visuelle Modalitätskanal instanziert.

Für die in Schritt 3 vorzunehmende Instanzierung der Kommunikationsverbindungen (vgl. 6.2.3) ist zunächst zu analysieren, in welchem Format die in Schritt 2 festgelegten Empfindungen an den Monteur ausgegeben werden sollen. Wie der tabellarischen Zusammenfassung in Abbildung 76 zu entnehmen ist, werden alle visuellen Empfindungen primär anhand einer dreidimensionalen VR-Darstellung ausgegeben. Diese Wahl liegt für das hier betrachtete Mikromontageszenario im eingeschränkten Tiefenschärfebereich von kamerabasierten Visualisierungssystemen begründet. Die für die Aufnahme, Positionierung und das Fügen erforderlichen kinästhetischen Empfindungen werden primär in 6 Freiheitsgraden an den Monteur vermittelt.

Die prinzipiell mögliche, sekundäre Ausgabe von redundanten Empfindungsformaten, wie z.B. akustische Signale zur Verstärkung der Distanzunterscheidung (s. Abbildung 76: Spalte Mono 1D) wird aus Gründen der Anschaulichkeit im hier gewählten Szenario nicht genutzt.

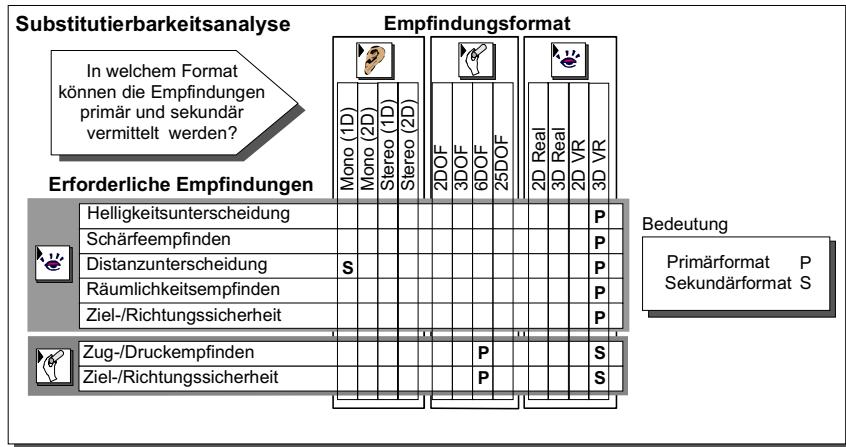


Abbildung 76: Festlegung von Empfindungsformaten

In Zusammenfassung der Primärformate aus Abbildung 76 lässt sich somit schließen, dass zwischen Teleoperator und Operator folgende Kommunikationsverbindungen instanziert werden müssen:

- 1 DIMLinkOP(Haptik6DOF, Haptik6DOF) für die Übertragung von Kräften und Momenten (Vermittlung kinästhetischen Empfindungen)
- 1 DIMLinkOP(Video3D\_VR, Video3D\_VR) für die Übertragung der aktuellen Positionen der Objekte in der Remoteumgebung (Vermittlung der visuellen Empfindungen)

Zusätzlich wird zwischen Operator und Teleoperator zur Übertragung von Sollpositionen für den Manipulator ein DIMLinkTOP(Haptik6DOF, Haptik6DOF) eingerichtet.

Als vierter und letzter Schritt sind entsprechend Abschnitt 6.2.4 die geeigneten Hardwarekomponenten in die Anwendungsprogramme der Operator- und Teleoperatorseite einzubinden. Wie in Abbildung 77 am Beispiel der Haptik gezeigt, wird für die Darstellung des Empfindungsformats „Kinästhetik 6DOF“ aus einer Gegenüberstellung handelsüblicher haptischer Ein-/Ausgabegeräte ein Phantom 1.5 für die Operatorseite ausgewählt. Für die Teleoperatorseite wird eine entsprechende Kraftmessdose ausgewählt, die Kräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden aufnehmen kann.

Schnittstellenanalyse Kinästhetik									
Erforderliche Hardware									
Operatorseite					Teleoperatorseite				
Impulse Engine	Feel it Mouse	Microsoft Sideweinder	Phantom 1.0	<b>Phantom 1.5</b>	Cybergrasp	...	...		
1	1	1	1	<b>1</b>	0				
0	0	1	1	1	0				
0	0	0	0	<b>1</b>	0				
0	0	0	0	0	1				
<b>Empfindungsformat</b>									
2DOF	3DOF	6DOF	25DOF						
1 1 1 1 0	0 1 1 1 0	0 0 0 1 0	0 0 0 0 1						
1 1 1 1	0 1 1 0	0 0 1 0	0 0 0 0						

Abbildung 77: Festlegung haptischer Ein-/Ausgabegeräte

Insgesamt ergibt sich die in Abbildung 78 dargestellte kommunikationstechnische Infrastruktur für das entworfene Telemontagesystem. Neben dem Phantom 1.5 bzw. der Kraftmessdose werden ein Scara-Roboter sowie ein stereoskopetaugliches Visualisierungssystem eingesetzt, um Kontaktkräfte sowie kommandierte und gemessene Objektpositionen zwischen Operator- und Teleoperatorseite auszutauschen.

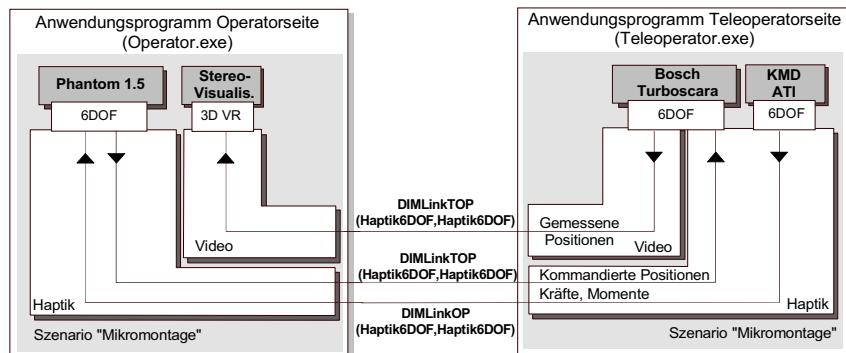


Abbildung 78: Kommunikationsstruktur der Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage

Die beiden Anwendungsprogramme bilden den softwaretechnischen Kern der hier aufgebauten Mikromontageplattform, deren Hardwarestruktur im folgenden Abschnitt näher beschrieben ist.

### 8.2.2 Hardwarestruktur der Versuchsplattform

Als Teleoperator wird ein Standard-Roboter vom Typ Bosch SR6-Turboscara verwendet. Der Roboter besitzt einen Arbeitsraum von ca. 60cm x 60cm x 60cm und eine Positioniergenauigkeit von 20µm. Im Arbeitsraum des Roboters sind ein Greiferbahnhof, ein Werkstücklager sowie ein Träger für das Uhrwerk angebracht (vgl. Abbildung 79). Zur Erfassung der kinästhetischen Informationen wird ein 6DOF-Kraft-Momentensensor vom Typ FT Nano der Fa. ATI eingesetzt, der Fügekräfte- und Momente mit einem Auflösungsvermögen von bis zu 0,0125 N bzw. 0,0625 Nmm aufnehmen kann. In die Handwurzel des Endeffektors ist eine Zoomkamera integriert, die primär zur Überwachung des Systems während der Entwicklung und Inbetriebnahme eingesetzt wird.

Zur Steuerung des Roboters und zur Darstellung der gemessenen Kräfte dient ein PHANTOM 6DOF der Firma Sensable mit 3 translatorischen und 3 rotatorischen Force-Feedback-Freiheitsgraden. Das Gerät ist in der Lage, Kräfte und Momente bis maximal 22 N bzw. 0,67 Nm auszugeben.

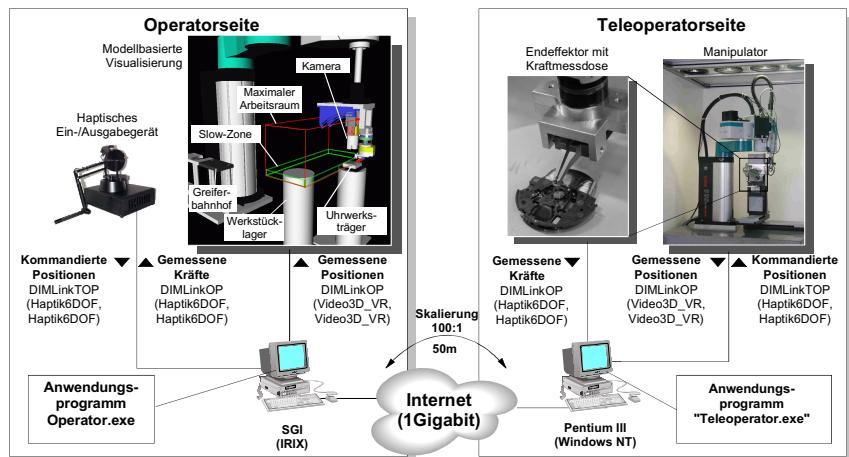


Abbildung 79: Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage

Die Hardwarekomponenten werden mittels zweier Steuerungsrechner kontrolliert, die über eine Internetverbindung miteinander kommunizieren. Die Entfernung zwischen den Kompo-

nenten der Operator- und Teleoperatorseite ist mit 50m relativ gering, da sich alle Subsysteme in ein und demselben Mikromontagelabor befinden.

Der Nachweis der Funktionstauglichkeit der aufgebauten Versuchsplattform wurden mittels experimenteller Untersuchungen erbracht, wie sie im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

## 8.3 Experimentelle Untersuchungen

Die im Rahmen zweier Versuchsreihen durchgeführten Experimente waren darauf ausgerichtet, die Aspekte Empfindungsgüte und Anwendungsflexibilität beim Einsatz des Telemontagesystem zu untersuchen.

Im Mittelpunkt des Experiments I (Abschnitt 8.3.1) stand die Bewertung der an den Monteur vermittelten Empfindungen, um sicherzustellen, dass die auf einzelnen Modalitätskanälen vermittelten Informationen in einer vom Monteur nutzbaren Qualität vorliegen.

In Experiment II (Abschnitt 8.3.2) wurde untersucht, ob das ursprünglich rein großenkompen-sierende Telemontagesystem trotz der Restriktionen des TCP/IP-Protokolls (vgl. Abschnitt 5.1.1) flexibel genug ist, um auch als distanzkompensierendes System eingesetzt zu werden.

### 8.3.1 Vermittelbare Empfindungsgüte

In Experiment I wurden 60 Probanden in zwei Gruppen mit der Durchführung der oben beschriebenen Montageaufgabe betraut. Beiden Gruppen wurde bei der Montage visuelles und haptisches Feedback aus der Remoteumgebung zurückgemeldet, wobei Gruppe A mit einem video-basierten und Gruppe B mit einem VR-basierten Display zu interagieren hatte.

Die Mitglieder beider Gruppen hatten nach einer kurzen Übungsphase dreimal hintereinander die beschriebene Montageaufgabe durchzuführen. Zur Beurteilung der Empfindungsgüte wurden als objektive Bewertungskriterien die auftretenden Kontaktkräfte sowie die benötigte Montagezeit aufgezeichnet.

Der subjektive Eindruck wurde mittels eines in der Literatur bewährten Fragebogens nach *Singer & Witmer 1998* untersucht. Die Auswertung der gemessenen Zeit- und Kraftwerte zeigten (vgl. Abbildung 80 und *Anton et al. 2001*), dass von beiden Gruppen die zusätzlich zur visuellen Darstellung vermittelten haptischen Informationen als sehr vorteilhaft und effizienzsteigernd beurteilt wurden. Zusätzlich war festzustellen, dass die VR-Gruppe im Durchschnitt 30% weniger Zeit für die Montagedurchführung benötigte als die auf die Kameradarstellung angewiesene Gruppe und dass die dabei auftretenden Kontaktkräfte um 20% geringer ausfielen (vgl. Abbildung 80).

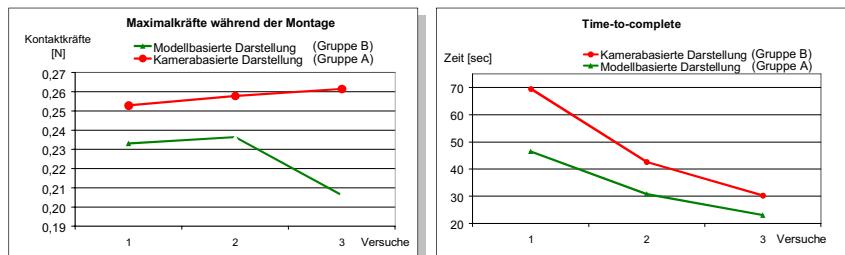


Abbildung 80: Maximalkräfte und Montagezeit in Experiment I

Insgesamt konnten alle Probanden die gestellte Montageaufgabe erfolgreich abschließen, was darauf hinweist, dass die dem Monteure vermittelten multimodalen Informationen in ausreichender Güte vorlagen.

### 8.3.2 Anwendungsflexibilität

In einem weiteren Experiment wurde das Mikromontagesystem in zwei unterschiedlichen Szenarien (Szenario A, B) getestet, um die Flexibilität des Softwaresystems hinsichtlich unterschiedlicher Kategorien der Telepräsenz und unterschiedlicher Ein-/Ausgabegeräte zu untersuchen. Das Experiment II setzt die ursprünglich als rein großenkompensierendes Telepräsenzsystem konzipierte Mikromontageplattform in einem distanzkompensierenden Telemontagesystem ein (vgl. Abbildung 81 und Hoogen *et al.* 2002).

Dazu wurde zum einen im Rahmen eines lokalen Setups (Szenario A) der Teleoperator mit einer multimodalen Bedienerschnittstelle am iwb gesteuert. Zum anderen wurde in Szenario B der Teleoperator in einem weiträumig verteilten Setup mit einer Bedienerschnittstelle gekoppelt, die ca. 30 km vom Teleoperator entfernt war. Als haptisches Ein-/Ausgabegerät wurde in Szenario A ein Phantom 6DOF eingesetzt, wohingegen in Szenario B ein Phantom 3DOF zur Verfügung stand.

In beiden Fällen waren die durchschnittlich gemessenen Roundtrip-Zeiten mit bis zu 4 ms bzw. 10 ms relativ gering (vgl. Abbildung 81), da beide Standorte über einen direkten Zugang an das deutsche Wissenschaftsnetz verfügen und somit eine Bandbreite von 1 Gigabit genutzt werden konnte.

In beiden Szenarien konnten auch ungeübte Monteure die oben beschriebene Montageaufgabe unter Rückkopplung von Kontaktkräften mit unterschiedlichen Ein-/Ausgabegeräten durchführen, was die hinreichende Güte der Datenübertragung belegt. Kommunikationsverzögerungen, die eventuell durch den Einsatz der Middleware CORBA in das System eingebracht worden waren, haben somit keinen messbar nachteiligen Einfluss auf das Kommunikationsverhalten erkennen lassen.

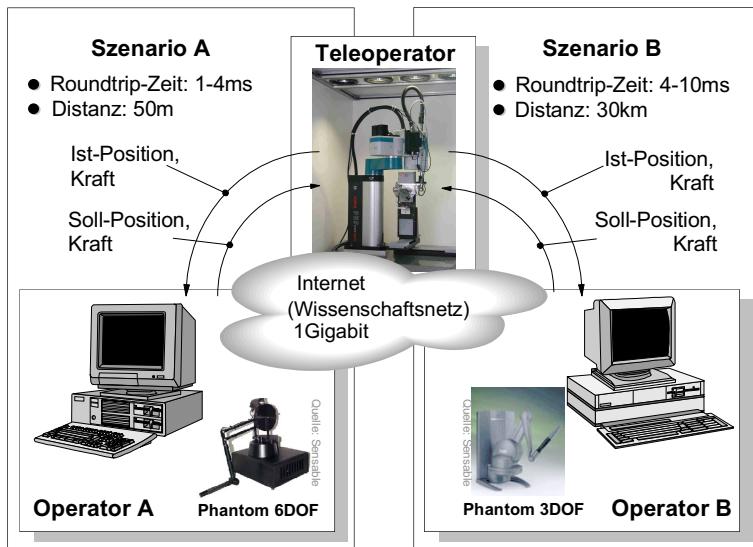


Abbildung 81: Szenarien für die Evaluierung der telepräsnten Mikromontage

Die Flexibilität des Softwaresystems hinsichtlich zweier Kategorien der Telepräsenz sowie der eingesetzten Ein-/Ausgabegeräte konnte somit prinzipiell nachgewiesen werden. Dem operator- und teleoperatorseitigen direkten Zugang zum leistungsfähigen deutschen Wissenschaftsnetz muss allerdings bezüglich der Einsatztauglichkeit des Systems zur Distanzkompenstation sicherlich eine funktionsentscheidende Rolle eingeräumt werden.

## 8.4 Fazit

Die Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten haben unter technischen und ergonomischen Gesichtspunkten das hier vorgestellte Rahmenkonzept betrachtet, um den Nachweis für dessen Funktionstauglichkeit zu erbringen. Es wurde am Beispiel der telepräsenten Mikromontage gezeigt, wie das Rahmenkonzept aus technischer Sicht zum Aufbau von Telemontagesystemen eingesetzt werden kann.

Mittels zweier Versuchsreihen wurde zum einen gezeigt, dass anhand des aufgebauten Telemontagesystems auch ungeübte Systembediener in der Lage sind, telepräsente Mikromontageoperationen durchzuführen. Zum anderen wurde der Nachweis erbracht, dass unterschiedliche Subsysteme - etwa zur Visualisierung oder Steuerung - flexibel in das Telemontagesystem eingebunden werden können.

Es konnte des Weiteren belegt werden, dass die ursprünglich als großenkompensierendes Telemontagesystem konzipierte Versuchsplattform auch als distanzkompensierendes System

eingesetzt werden kann und auch in dieser Hinsicht ein erhebliches Maß an Flexibilität aufweist.

In Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse kann somit gefolgert werden, dass das in dieser Arbeit vorgestellten Rahmenkonzepts prinzipiell für den Aufbau von funktionstauglichen Telemontagesystemen geeignet ist. Neben dem Nachweis der Funktionstauglichkeit ist zur endgültigen Bewertung des Konzepts abschließend eine Kosten-Nutzen-Betrachtung vorzunehmen, um zu entscheiden zu können, ob Entwicklung und Einsatz des Telemontageframeworks auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu befürworten ist (s. Kapitel 9).

## Anwendungsbeispiel

## 9 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Nachdem in Kapitel 8 der prinzipielle Nachweis der Funktionstauglichkeit des Rahmenkonzepts für telepräsente Montagesysteme erbracht werden konnte, soll dieses Kapitel in Form einer abschließenden qualitativen und quantitativen Bewertung zur Abrundung des vorgestellten Rahmenkonzepts beitragen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Beurteilung der Vor- und Nachteile beim Einsatz des Telepräsenzframeworks während der Entwicklung von Telemontagesystemen. Die Motivation für den Einsatz eines Telepräsenzsystems an sich bleibt davon unberührt.

Die folgenden Abschnitte reflektieren zunächst im Rahmen einer qualitativen Betrachtung, in welchen Aufgabenbereichen der Entwickler durch den Einsatz des Rahmenkonzepts entlastet wird. Im Anschluss wird analysiert, inwiefern das vorgestellte Framework den in Abschnitt 2.7 spezifizierten Anforderungen an eine Kommunikationsinfrastruktur für Telepräsenzsysteme gerecht wird.

Die monetäre Quantifizierung des Einsparungspotenzials durch den Einsatz des Telepräsenzframeworks gestaltet sich aufgrund der kontrovers geführten Diskussion über die monetäre Bewertung von Softwareentwicklungskosten, speziell im Zusammenhang mit der Frameworkentwicklung, als äußerst schwierig. Als weitere Hürde bei der Kostenkalkulation kommt hinzu, dass aufgrund des geringen Verbreitungsgrades von Telepräsenztechnologien in der industriellen Praxis bislang keine aussagekräftigen Zahlen über den Betrieb derartiger Systeme vorliegen. Daher werden im Abschnitt 9.2 *Ansätze zur quantitativen Bewertung des Rahmenkonzepts* unterschiedliche Ansätze zur Einschätzung des Einsparungspotenzials vorgestellt, um dem Leser einen Einblick in die Problematik zu geben und ihm die Möglichkeit zu eröffnen, selbstständig eine Kostenabwägung vorzunehmen.

### 9.1 Qualitative Bewertung des Rahmenkonzepts

Grundlage für eine qualitative Bewertung des Einsparungspotenzials, das durch den Einsatz des vorgestellten Rahmenkonzepts ausgeschöpft wird, bildet eine Betrachtung der Aufgabenbereiche, die ein Softwareentwickler ohne und mit Einsatz des Telepräsenzframeworks zu bearbeiten hat (vgl. Abbildung 82).

Vergleichsgrundlage bildet der gesamte Zeitbedarf (=100%), der ohne den Einsatz eines Frameworks für die Entwicklung eines Telemontagesystems einzurechnen ist. Dieser Zeitbedarf ist auf unterschiedliche Aufgabenbereiche verteilt (vgl. Abbildung 82), für deren exakten Zeitanteile in der Literatur allerdings keine Angaben zu finden sind. Die hier vorgenommene Schätzung basiert daher auf folgenden, vereinfachenden Annahmen:

1. Die erfassten Aufgabenbereiche beschreiben vollständig die zentralen Entwicklungsaufgaben für Telemontagesysteme.
2. Der gesamte Zeitbedarf teilt sich gleichmäßig auf die unterschiedlichen Aufgabenbereiche. Lediglich für die Optimierung der Bedienerschnittstelle und des Manipulators wird

aufgrund des dabei erforderlichen Aufwandes für die Hardwareanalyse mit geringfügig erhöhten Zeitanteile kalkuliert.

3. Der Aufwand zur Abdeckung eines bestimmten Aufgabenbereiches mittels des Frameworks ist dreimal so hoch, wie der Aufwand zur Entwicklung einer problemspezifischen Lösung. Diese Annahme wird aus der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erfahrung abgeleitet, dass für die Entwicklung eines annähernd stabilen Frameworks drei Iterationen notwendig waren.
4. Die während der Entwicklung eines Telemontagesystems gewonnenen Erfahrungen wirken sich auch ohne Einsatz eines Frameworks beschleunigend auf zukünftige Entwicklungsprojekte aus. Die hier vorgenommene Schätzung geht von einer Zeitersparnis von 50% aus.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen lässt sich der relative Zeitbedarf für die Entwicklung frameworkbasierter Telemontagesysteme dem Aufwand gegenüberstellen, der ohne den Einsatz eines Frameworks zu betreiben wäre. Zur Berücksichtigung des Initialisierungsaufwandes für die Frameworkentwicklung und des Lerneffektes (vgl. Annahme 4) wird in Abbildung 82 zwischen dem Zeitbedarf für die Entwicklung des ersten und dem für ein darauf folgendes Telemontagesystem unterschieden.

Aufgabenbereiche während der Entwicklung eines Telemontagesystems	Geschätzter Zeitanteil			
	für das 1. Telemontagesystem		für das n. Telemontagesystem	
	ohne Framework	mit Framework	ohne Framework	mit Framework
Einarbeitung Kommunikationstechnik	8%	24%	4%	0%
Einarbeitung Framework	0%	8%	0%	8%
Festlegung Entwicklungsvorgehen	8%	24%	4%	0%
Architekturentwurf	8%	24%	8%	0%
Initialisierung	8%	24%	4%	0%
Synchronisation	8%	24%	4%	0%
Verbindungsaufbau	8%	24%	4%	0%
Statusüberwachung	8%	24%	4%	0%
Entwurf Arbeitssystem	8%	8%	4%	8%
Optimierung Manipulator	10%	10%	10%	10%
Optimierung Bedienerschnittstelle	10%	10%	10%	10%
Aufzeichnung von Systemdaten	8%	24%	4%	0%
Bewertung Realitätsnähe	8%	8%	8%	8%
<b>Gesamter Zeitbedarf</b>	<b>100%</b>	<b>236%</b>	<b>76%</b>	<b>44%</b>

Abbildung 82: Aufgabenbereiche des Entwicklers und des Telepräsenzframeworks

Der aufsummierte Zeitbedarf für das erste frameworkbasierte Telemontagesystem lässt erkennen, dass der anfallende Aufwand mehr als doppelt so hoch ist, wie der für eine problemspezifische Sonderlösung. Wie in Abbildung 82 verdeutlicht, werden dem Entwickler durch das Framework jedoch eine Reihe von Problemstellungen abgenommen, die er ohne Einsatz des

Frameworks für jedes Telepräsenzsystem erneut zu bearbeiten hätte. Speziell beim Architekturentwurf sowie dem Netzwerkmanagement (Verbindungsaubau, Statusüberwachung, Synchronisation) werden durch die Einbindung der vorgefertigten Frameworkfunktionen Entwicklerkapazitäten frei gesetzt, die zur Lösung anwendungsspezifischer Problemstellungen wie z.B. der Optimierung der Bedienerschnittstelle oder des Manipulators genutzt werden können. Alle weiteren Telemontagesysteme lassen sich somit aufgrund der vom Framework abgedeckten Aufgabenbereiche mit einem um bis zu ca. 50% reduzierten Zeitaufwand realisieren. Dies gilt selbst dann, wenn ein Lerneffekt bei der Frameworkanwendung unberücksichtigt bleibt und auch beim n-ten Telemontagesystem der volle Einarbeitungsaufwand veranschlagt wird. Das Argument des erhöhten Einarbeitungsaufwandes zur Erlernung des Frameworks wird darüber hinaus durch das vom Rahmenkonzept vorgegebene, werkzeugunterstützte Vorgehensmodell weiter relativiert.

Neben der Einschränkung der vom Entwickler anwendungsspezifisch zu bearbeitenden Aufgabenbereiche reduziert das hier vorgestellte Framework die Komplexität von Telemontagesystemen. Das erarbeitete Architekturmodell strukturiert und modularisiert die Kommunikationsinfrastruktur, was wesentlich zur Übersichtlichkeit und schnellen Orientierung innerhalb des Softwaresystems beiträgt. Die Kapselung häufig verwendeter Funktionen in Dienste auf den unterschiedlichen Abstraktionsebenen verbirgt an einzelnen Stellen die Systemkomplexität vor dem Entwickler und erleichtert das Systemverständnis. Die HTML-basierte Dokumentation unterstützt die Einarbeitung in das Framework, da sie unabhängig von der Verfügbarkeit eines CASE-Tools und dem Standort des Entwicklers den verteilten Zugriff auf die Systembeschreibung erlaubt.

Aus Sicht der Softwarewartung ist festzustellen, dass der Pflegeaufwand für die entstehenden Telepräsenzsysteme durch den Einsatz des Frameworks aufgrund der damit einhergehenden Vereinheitlichung der Systemarchitekturen deutlich reduziert wird. Frameworkbasierte Telepräsenzsysteme sind in ihrem Kern keine Einzellösungen mehr, sondern können eher zu Produktfamilien mit einer einheitlichen Funktionsweise zusammengefasst werden, die während ihres Produktlebenszyklus gezielter an Kundenwünsche angepasst werden können.

Gegenüber dem Bediener von Telepräsenzsystemen kann sowohl in seiner Rolle des Werkers als auch des Ergonomen durch die flexible Struktur ein höheres Maß an Anwenderfreundlichkeit gewährleistet werden. Der hohe Grad an Variabilität z.B. im Bereich der Modalitätsanpassbarkeit stellt dem Bediener weitreichende Möglichkeiten zur Abstimmung der Bedienerschnittstelle auf seine Präferenzen zur Verfügung und trägt somit zu einer Akzeptanzsteigerung gegenüber Telepräsenzsystemen bei.

Insgesamt kann das vorgestellte Rahmenkonzept für telepräsente Montagesysteme, wie in Abbildung 83, veranschaulicht in das zu Beginn aufgestellte Bewertungsschema eingeordnet werden.

Anforderungen an eine flexible Telepräsenzinfrastruktur									
Entwicklungsorientiert					Anwendungsorientiert				
Komplexitäts-reduktion		Komplexitäts-beherrschung		Anpassbarkeit	Konfigurierbarkeit Hardware		Konfigurierbarkeit Software		
Modularität	Standardisierung	Abstraktion	Methodik	Offenheit	Skalierbare Kommunikation	Lokale Verteilbarkeit	Variabilität Geräte	Skalierbare Modalitäten	Skalierbare Realität
Rahmenkonzept für die Telemontage	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Legende: Kein Beitrag ○ bedingt erfüllt ● weitgehend erfüllt ■

Abbildung 83 : Einordnung des Rahmenkonzeptes in das Bewertungsschema

Wie anhand der vorangegangen Ausführungen und experimentellen Untersuchungen gezeigt wurde, erfüllt das Rahmenkonzept für telepräsente Montagesysteme die formulierten Anforderungen weitgehend. Das Kriterium „Skalierbare Realität“, das den fließenden Übergang zwischen realen und simulierten Montageoperationen bewertet (vgl. Abschnitt 2.4.4 und 2.7), wird konzeptionell ebenfalls vom Rahmenkonzept abgedeckt. Da die experimentelle Verifikation jedoch noch aussteht, wird dieses Kriterium vorläufig als „bedingt erfüllt“ bewertet.

## 9.2 Ansätze zur quantitativen Bewertung des Rahmenkonzepts

Wie einleitend bereits angedeutet, stellt die quantitative Bewertung des durch Frameworkeinsatz realisierbaren Einsparungspotenzials Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten dar und kann deswegen hier nicht auf einer allgemein anerkannten Basis erfolgen. Johnson (*Johnson 1997, S.15*) merkt dazu an: „...The Value of a framework depends more on its context than on the framework itself, so there is no magic formula to evaluate them.“

Die hier angeführten Ansätze zur quantitativen Bewertung sind dem Werk von *Fayad & Schmidt 1999* entnommen. Sie geben dort eine sehr gute Einführung in die Problematik, wobei auch sie auf die damit verbundenen Schwierigkeiten hinweisen: „...disciplined economic evaluation of information technology investments has never been an easy proposition.“ (*Fayad & Schmidt 1999, S.578*). Die von *Fayad & Schmidt* diskutierten Vorschläge zur Kosten einschätzung beim Frameworkeinsatz umfassen Methoden aus der Investitionsrechnung, gestützt auf den Kapitalwert, oder auch Methoden zur Risikoeinschätzung im Optionshandel am Aktienmarkt.

### 9.2.1 Berechnung des Kapitalwertes

Der von *Fayad & Schmidt 1999, S.578* als Bewertungsgrundlage herangezogene Kapitalwert  $K$  gibt Aufschluss darüber, ob eine Investition getätigt werden sollte ( $K>0$ ) oder nicht ( $K<0$ ). Zur Errechnung des Kapitalwerts wird die in Gleichung 1 dargestellten Formel herangezogen:

$$K = \frac{C_o + C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Dabei definiert  $C_i$  den Cashflow im Zeitraum  $i$ , also die Differenz aus Einnahmen und Ausgaben, wobei  $C_0$  eine einmalige Anfangsinvestition im ersten Betrachtungszeitraum widerspiegelt.  $r$  bildet den anzunehmenden prozentualen Verzinsungsaufwand ab und repräsentiert das mit der Investition verbundene Risiko. Dementsprechend ist im Fall eines hohen Risikos ein hoher Wert für  $r$  einzusetzen, im Fall eines geringen Risikos ein niedrigerer Wert.

Unter Anwendung dieser Formel wird in *Fayad & Schmidt 1999* für ein fiktives Framework eine Kostenkalkulation durchgeführt, wobei die in Abbildung 84 dargestellten Phasen im Frameworklebenszyklus unterschieden werden.

Beispielberechnung des Kapitalwertes K			
Cash-Flow	Entwicklung Framework	Entwicklung v. Systemen	Betrieb v. Systemen
Einnahmen	100	350	600
Programmierung	-600	-100	-25
Wartung	-100	-50	-25
Netto Cash flow	-600 ( $C_0$ )	200 ( $C_1$ )	550 ( $C_2$ )
$r = 15\%$ $C_0 = 0$	$K = \frac{C_0 + C_1}{(1+r)} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} = -8,9$		

Abbildung 84: Beispiel für die Errechnung des Kapitalwertes

Die dabei angenommenen Kosten wurden auf Erfahrungswerte aus der Softwareentwicklung gestützt, so dass sich für das Beispiel ein Kapitalwert von ca. -10 ergibt und die Entwicklung des Frameworks somit abzulehnen wäre.

Da jedoch die Betrachtung des Kapitalwertes die sich durch die Entwicklung des Frameworks für den Frameworkhersteller ergebenden Marktvoorteile wie z.B. eine kürzere time-to-market nicht berücksichtigt, wird dieser Art der Kosteneinschätzung nur eine geringe Aussagekraft beigemessen. Zur Erweiterung des Kostenmodells wurden daher von *Fayad & Schmidt* Ansätze zur Einschätzung des Investitionsrisikos im Aktienhandel untersucht, die im nachfolgenden Kapitel 9.2.2 dargestellt werden.

## 9.2.2 Berechnung des Optionswerts

Aktienoptionen werden seit vielen Jahren an der Börse gehandelt und räumen einem Kaufinteressenten das Recht ein, zu einem festgelegten Zeitpunkt einen bestimmten Handelsgegenstand zu vorab definierten Konditionen zu kaufen (Call-Option) oder zu verkaufen (Put-Option). Somit können Investoren beispielweise darauf setzen, dass zu einem Stichtag X in der Zukunft der Preis für ein Barrel Rohöl 100 US\$ betragen wird und kaufen daher bei einem Anbieter Call-Optionen zu einem bestimmten Optionspreis. Falls nun am Stichtag ein Barrel

mehr Wert ist als 100 US\$, so kann der Investor - muss aber nicht - durch Einlösen der Call-Option das Öl erwerben und gewinnbringend weiterverkaufen. Beträgt der Preis weniger als 100 US\$, so wird der Investor die Option nicht ausüben, hat aber den für den Erwerb der Call-Option verrichteten Optionspreis als Verlust hinzunehmen.

Aus den unterschiedlichen Formeln, die zur Einschätzung eines fairen Optionspreises unter Berücksichtigung von externen Einflussgrößen entwickelt wurden, greifen *Fayad et al.* die in Gleichung 2 angeführte Formel nach Black/Scholes heraus und wenden diese auf den hier betrachteten Kontext der Frameworkentwicklung an.

$$OW = CALL (W, O, T, RFV, STABW) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Da die detaillierte Vorstellung dieser Formel den hier vorgegebenen Rahmen sprengen würde, sei für weitere Details auf *Fayad & Schmidt 1999, S.582* bzw. die dort zitierten Arbeiten von *Black & Scholes 1973* verwiesen. Für das Verständnis der weiteren Erläuterungen ist eine Beschreibung der berücksichtigten Einflussgrößen ausreichend:

- OW: Optionswert, positive Werte weisen auf eine Befürwortung der Investition hin  
W: Aktueller Marktwert des Handelsgegenstandes  
O: Optionspreis, der für den Erwerb der Call-Option zu entrichten ist  
T: Anzahl der Tage bis zur Ausübung der Option (Stichtag)  
RFV: Risikofreie Verzinsungsrate, entspricht  $r$  aus Gleichung 1  
STABW: Standardabweichung der Wertentwicklung des Handelsgegenstandes

Auf Basis der Formel nach *Black & Scholes* werden die sich aus dem Einsatz von Frameworks ergebenden Chancen aus dem Blickwinkel verschiedener unternehmerischer Strategien wie z.B. die Eroberung neuer Marktsegmente, die Aufgabe unrentabler Märkte etc. betrachtet. Aufgrund der geringen Marktverbreitung von Telepräsenztechnologien wird die Eroberung neuer Märkte beispielhaft aus den von *Fayad et al.* betrachteten Strategien herausgegriffen und die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst.

Erfolg oder Misserfolg hängen bei der Eroberung neuer Marktsegmente wesentlich von der Volatilität des Marktes ab, da sich die bei der Entscheidung zum Markteintritt gültigen Randbedingungen bis zur Markteinführung des Produktes grundlegend geändert haben können. Der zuvor prognostizierte Unternehmenserfolg kann somit zum Zeitpunkt der Markteinführung nicht realisiert werden. Die in diesem Zusammenhang zu beantwortende Frage lautet daher: Wie können die Optionen oder Chancen, die sich aus der Entwicklung eines Frameworks ergeben, unter Berücksichtigung der Marktvolatilität ökonomisch bewertet werden?

In einem weiteren, hier nicht näher erläuterten, fiktiven Entwicklungsbeispiel gilt es, zwei unterschiedliche Strategien bei der Durchführung eines Kundenauftrages auf einem neuen Marktsegment gegeneinander abzuwägen: Strategie A sieht eine maßgeschneiderte, kunden-spezifische Softwarelösung vor, wohingegen Strategie B den Mehraufwand zur Entwicklung eines Frameworks in Kauf nehmen würde, um sich auf dem neu entwickelnden Marktsegment strategische Vorteile zu sichern (vgl. Abbildung 85).

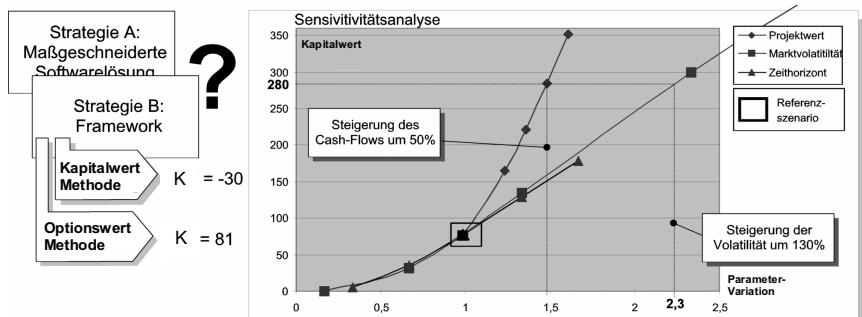


Abbildung 85: Sensitivität des Kapitalwertes

Eine Kosteneinschätzung mittels des klassischen Kapitalwerts kommt zu einem negativen Ergebnis ( $K = -30$ ), womit die Investition abzulehnen wäre. Eine Berechnung des  $K$  unter Einsatz der Black-Formel, in die eine geschätzte Volatilität  $V_g = 30\%$  in Form der Standardabweichung STABW einfließt, kommt hingegen zu einem positiven Ergebnis ( $K = 81$ ). Zur Erhöhung der Aussagekraft dieses Ergebnisses führen die Autoren eine Sensitivitätsanalyse durch, die Aufschluss darüber geben soll, wie empfindlich der berechnete Wert auf eine Variation der Parameter Marktvolatilität, Cash-Flow und Zeithorizont reagiert.

Bezugspunkt der Analyse ist ein Referenzszenario, in dem alle genannten Parameter mit bestimmten Ausgangswerten versehen wurden, die in Abbildung 85 als Normierungsgrundlage herangezogen wurden. Im Referenzszenario wurde die zu tätige Investition für die Entwicklung eines Frameworks mit  $K=81$  bewertet. Ausgehend von diesem Referenzszenario wurden jeweils einem Parameter vier vom Ausgangszustand abweichende Werte zugewiesen und der daraus resultierende Kapitalwert erneut bestimmt.

Wie in Abbildung 85 dargestellt führt beispielsweise eine Steigerung des geschätzten Cash-Flows um 50% zu einer Verdreifachung des Kapitalwertes auf 280. Die Sensitivität des Rechenmodells bezüglich der Marktvolatilität bzw. des Zeithorizonts ist hingegen wesentlich geringer, da zur Erzielung derselben Veränderung von  $K$  eine Erhöhung der Marktvolatilität um 130% erforderlich ist.

Die Kurvenverläufe in Abbildung 85 veranschaulichen die intuitiven Annahmen, dass bei kurzen Zeithorizonten bzw. geringer Marktvolatilität der Mehraufwand für die Frameworkentwicklung nicht gerechtfertigt wäre. In kurzen Zeiträumen bzw. bei geringer Veränderung der Marktsituation kann nicht mit einer entscheidenden Ausweitung des neuen Marktsegmentes gerechnet werden, so dass keine wesentlichen Gewinne in diesen neuen Segmenten erwirtschaftet werden könnten und darüber hinaus die hohen Anfangsinvestitionen die Bilanz trüben.

Bei größeren Betrachtungszeiträumen und insbesondere bei einem erhöhten Cash-Flow - also einem boomenden Marktsegment - bestehen wesentlich bessere Aussichten auf die Erwirt-

schaftung von Gewinnen, da zum einen die Anfangsinvestitionskosten nicht mehr so sehr ins Gewicht fallen und zum anderen mit einem erhöhten Marktvolumen gerechnet werden kann. Unter solchen Umständen wäre zur Befriedigung der Kundenwünsche die Entwicklung eines entsprechenden Frameworks unter Hinnahme der zusätzlich anfallenden Kosten angeraten, um dem Frameworkhersteller langfristig Wettbewerbsvorteile zu sichern.

### **9.3 Abschließende Bewertung des Rahmenkonzepts**

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, ist aus technischer Sicht die Nutzung des hier vorgestellten Rahmenkonzepts beim Aufbau von telepräsenten Montageeinrichtungen eindeutig zu befürworten. Die mittels des Frameworks aufgebauten Telemontagesysteme sind qualitativ hochwertiger und können durch die Nutzung vorgefertigter Grundfunktionen um bis zu 50% schneller entwickelt werden, als anwendungsspezifische Sonderlösungen. Sie sind im Vergleich zu traditionell entwickelten Systemen aufgrund ihrer Modularität und Dokumentation einfacher zu erweitern bzw. zu warten und bieten eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Austauschbarkeit von Einzel-Komponenten.

Auch wenn aufgrund des Mangels an anerkannten Maßstäben für die monetäre Bewertung von Frameworks derzeit keine eindeutige, quantitative Kostenbetrachtung zulässig ist, so kann als Anhaltspunkt folgende Richtlinie gelten, die jedoch anwendungsspezifisch unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen kritisch überprüft werden muss: Der wirtschaftliche Einsatz des hier vorgestellten Rahmenkonzeptes ist immer dann gewährleistet, wenn von langfristigen Planungshorizonten und einem vielfältigen Frameworkeinsatz ausgegangen werden kann.

Erstere Bedingung kann für die hier betrachtete Zielgruppe – Hersteller von Produktionssystemen – als erfüllt betrachtet werden, da in diesem Industriezweig zwischen Auftragseingang und Anlagenübergabe häufig ein Jahr oder mehr liegen kann. Unter Berücksichtigung der Vielfalt der bereits jetzt diskutierten Anwendungsfelder der Telepräsenz (vgl. Abschnitt 1.4) ist davon auszugehen, dass sich mit zunehmendem Verbreitungsgrad von Telepräsenztechnologien langfristig zusätzliche Anwendungsfelder etablieren werden. Der vielfältige Einsatz der entwickelten Frameworks wird somit begünstigt, so dass auch die zweite Bedingung als erfüllt angesehen werden kann.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass das hier entwickelte Rahmenkonzept für Telemontagesysteme unter funktionalen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten dazu geeignet ist, die Hersteller von Produktionssystemen bei der Einführung von Telepräsenztechnologien in die industrielle Praxis zu unterstützen.

## **10 Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Entwicklungsaufwand für Telemontagesysteme zu senken. Diese Zielsetzung wurde als ein wesentlicher Beitrag zur Einführung von Telepräsenztechnologien in die industrielle Praxis identifiziert. Die Anwendung dieser Technologien versetzt Produktionsunternehmen in die Lage, sich den Herausforderungen, die sich aus den Folgen der Miniaturisierung und Globalisierung ergeben, anzunehmen um sich auf ihren traditionellen Geschäftsfeldern zu behaupten, diese auszuweiten und gegebenenfalls neue zu erschließen.

Eine Analyse der prinzipiellen Funktionsweise sowie repräsentativer Telepräsenzsysteme ließ erkennen, dass - bedingt durch den Mangel an Standards und wiederverwendbaren Komponenten - ein Großteil des Entwicklungsaufwandes in die kommunikationstechnische Integration der inhomogenen Hardwarekomponenten fließt. Die entstehenden Telepräsenzsysteme sind dementsprechend als individuelle, inflexible und schwer zu wartende Sonderlösungen zu betrachten, die für den industriellen Einsatz schwerlich geeignet sind.

Das hier als Lösungsansatz entwickelte Rahmenkonzept begegnet dieser Problematik durch die Einführung eines modularen, hierarchisierten Telemontageframeworks, das dem Entwickler von Telemontagesystemen die kommunikationstechnisch relevanten Funktionen in Form wieder verwendbarer Softwarebibliotheken zur Hand gibt. Das Framework stellt einen anwendungsunabhängigen Rahmen von Softwarekomponenten zur Verfügung, in den der Entwickler von Telemontagesystemen anwendungsspezifische Komponenten einzubetten hat. Der systematische Einsatz und die Anpassung des Frameworks wird unterstützt durch die Definition eines werkzeugunterstützten Vorgehensmodells sowie einer Beschreibungstechnik zur einheitlichen Darstellung wesentlicher Betrachtungsgegenstände.

Die Einsatztauglichkeit des Rahmenkonzepts unter funktionalen und ergonomischen Gesichtspunkten wurde durch den Aufbau einer Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage verifiziert. Im Rahmen einer qualitativen und quantitativen Bewertung des vorgestellten Konzeptes wurde nachgewiesen, dass sich der hohe Entwicklungsaufwand für ein Telemontageframework bei langfristigen Planungshorizonten bezahlt macht. Ausschlaggebend hierfür war sowohl die qualitative Verbesserung der entstehenden Telemontagesysteme als auch die verkürzten Entwicklungszeiten, die maßgeblich auf den Einsatz des Frameworks zurückzuführen sind.

Für eine weitere Evolution des Rahmenkonzepts empfiehlt sich, dessen Anwendung für die Entwicklung von Montagesystemen in anderen Kategorien der Telepräsenz voranzutreiben. Erste Ansätze dazu werden bereits am iwb verfolgt, wo derzeit ein distanzkompensierendes System auf Basis des Frameworks aufgebaut wird. Begünstigt durch die Reduktion des Entwicklungsaufwandes kann darüber hinaus die Erschließung neuer Anwendungsbereiche beispielsweise in der Mikrobiologie, Genetik oder Medizintechnik forciert werden.



## 11 Literatur

*Abe et al. 1996*

Abe, N.; Zhang, J.Y.; Tanaka, K.; Taki, H.: A training system using virtual machines for teaching assembly/dissassembling operations to novices. In: Proceedings of International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Peking. Peking: IEEE 1996, 2096-2101.

*Adair 1995*

Adair, D.: Designing successfull frameworks. AIXpert online (<http://www.developer.ibm.com/library/aixpert/feb95/feb95toc.html>), Februar 1995.

*Adams et al. 1998*

Adams, R.; Moreyra, M.; Hannaford, B.: Stability and Performance of Haptic Displays: Theory and Experiments. Proceedings of the ASME WAM Haptics Workshop, 1998.

*Adams et al. 1998a*

Adams, R. J.; Hannaford, B.: A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces. In: Proceedings of the Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 1998, S. 1254-1259.

*Adams et al. 1999*

Adams, R. J.; Hannaford, B.: Stable Haptic Interaction with Virtual Environments. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation. No.3 Vol. 15 1999, S. 465-474.

*Albus 1989*

Albus, J.S.: A Control Architecture for Cooperative Intelligent Robots. In: Proceedings of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems. Il Ciocco, Italien. 1989, S. 713-747.

*Albus et al. 1989*

Albus, J.S., Lumia, R., Fiala, J.C., Waerding, A.J., NASREM -- The NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture, Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, October 4-6, 1989, (1989).

*Albus 1993*

Albus, J.S.: A Reference Model Architecture for Intelligent Systems Design. In: An introduction to intelligent and autonomous control. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers 1993, S. 27-56.

*Alex et al. 1998*

Alex, Joseph; Vikramaditya, Barmeshwar; Nelson, Bradley J.: A Virtual Reality Teleoperator Interface for Assembly of Hybrid MEMS Prototypes. In: Proceedings of DETC'98 1998 ASME Design Engineering Technical Conference, September 13-16. Atlanta 1998.

*Anderson 1995*

Anderson, R.J.: SMART: A Modular Control Architecture for Telerobotics. In: IEEE Robotics and Automation Society Magazine, 2 (1995) 3, S. 10-18.

*Anton & Lercher 2001*

Anton, O.; Lercher, B.: Babylon der Fachsprachen. *it-industrielle Informationstechnik* 38 (2001) 11-12, S. 48-49.

*Anton et al. 2000*

Anton, O.; Cuiper, R.; Ehrenstrasser, M.; Patron, C.; Reinhart, G.: Telepresent Microassembly for Industrial Applications. In: Nair, S. (Hrsg.): Proceedings of the ASME Dynamic Systems. ASME 2000.

*Anton et al. 2001*

Anton, O.; Ehrenstrasser, M.; Patron, C.; Petzold, B.: Component-Oriented Framework for Telepresence Systems. In: Schmidt (Hrsg.): Proceedings of Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, München: Hieronymus 2001.

*Anton et al. 2002*

Anton, O.; Lercher, B.; Reinhart, G.: Modelling of faults and fault recovery: an essential aspect of mechatronic system design. In: Annals of 2002 Int'l CIRP Design Seminar, Hong Kong 2002.

*Baier et al. 2000*

Baier, H.; Buss, M.; Schmidt, G.: Stabilität und Modusumschaltung von Regelkreisen in Teleaktionssystemen. *at-Automatisierungstechnik* 48 (2000) 2, S. 51 ff.

*Baier et al. 2001*

Baier, H.; Freyberger, F.; Schmidt, G.: A High-Fidelity Interactive Stereo Vision System and its Application to Teleoperation Tasks. In: Färber, G.; Hoogen, J.: Proceedings of the Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, München: Hieronymus 2001, S.33-42.

*Balzert 1996*

Balzert, Helmut: Lehrbuch der Softwaretechnik: Software-Entwicklung. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996.

*Balzert 1998*

Balzert, Helmut.: Lehrbuch der Softwaretechnik: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1998.

*Balzert 1999*

Balzert, Heide: Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag, 1999.

### *Basdogan & Srinivasan 1997*

Basdogan, C.; Srinivasan, M. A.: Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status, and Challenges. *Computer & Graphics* 21 (1997) 4.

### *Becker & Schühle 1998*

Becker, E.; Schühle, R.: Telediagnostic systems – the key to worldwide teleservice in power transmission engineering. In: AKIDA – Aachener Beiträge zur angewandten Rechnertechnik, Seeliger, A. (Hrsg.), Aachen 1998, S. 341-351.

### *Begault 1999*

Begault, D.R.: Auditory and Non-auditory Factors that potentially influence virtual acoustic Imaginairy. In: Proceedings of AES 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction, Rovaniemi, Finnland. Rovaniemi, Finnland: AES 1999.

### *Bejczy et al. 1990*

Bejczy, A.K.; Kim, W.S.; Venema, S.C.: The Phantom Robot: Predictive Displays for Teleoperation with Time Delay. In: Proceedings of the IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation 1990, Cincinnati. Cincinnati: IEEE 1990, 546-551.

### *Bejczy et al. 1995*

Bejczy, A.; Buttolo, P.; Hannaford, B.; Moreyra, M.; Venema, S.: Mini-Teleoperation Technology for Space Research. In: Proceedings of MIMR-95, Sendai, Japan 1995, S. 524-527.

### *Bender 1999*

Bender, K.: Herausforderungen in der Entwicklung eingebetteter Systeme. Vortrag im Rahmen der vordringlichen Aktion "Entwicklung, Produktion und Service von Software für eingebettete Systeme in der industriellen Produktion" am 29.11.1999. Verfügbar unter [www4.informatik.tu-muenchen.de/proj/va/VortragBender.pdf](http://www4.informatik.tu-muenchen.de/proj/va/VortragBender.pdf).

### *Black & Scholes 1973*

Black, F.; Scholes, M.: The pricing of options and corporate liabilities. In: *Journal of Political Economy* 81 (1973), S. 637-659.

### *BMBF 1999*

BMBF: Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen". Troisdorf: Rautenberg multipress-verlag GmbH, 1999.

### *BMFT 1997*

Teleservice hat für den Produktionsstandort Deutschland strategische Bedeutung, <http://www.iid.de/aktuelles/presse/presse/pm01797.html>, Pressemitteilung des BMFT vom 1.7.1997.

### *Booch 1994*

Booch, G.: Designing an application framework. *Dr. Dobb's Journal* 19 (1994) 2.

### *Booch 1996*

Booch, G.: Objektorientierte Analyse und Design mit praktischen Anwendungsbeispielen. 2. Nachdruck Bonn: Addison-Wesley, 1996.

*Boud et al. 2000*

Boud, A.C.; Baber, C.; Steiner, S.J.: Virtual reality: A tool for assembly?.  
Presence-Teleoperators and virtual environments 9 (2000) 5, S. 486-497.

*Brady & Tarn 1998*

Brady, K., Tarn, T.: Internet-Based Remote Teleoperation. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium 1 May 1998.

*Büchi et al. 1994*

Büchi, R.; Codourney, A.; Siegwart, R.; Zesch, W.: High Precision Robots for Automated Handling of Micro Objects. In: Proceedings of Seminar on Handling and Assembly of Microparts, Wien. Wien: 1994.

*Bullinger 1986*

Bullinger, H.J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis. München: Hanser, 1986.

*Bullinger et al. 1998*

Bullinger, H. J.: Advances in Bridging the Gap: Using Virtual Reality to Enhance Productivity. In: Göbel, M.; Lang, U.; Landauer, J.; Wapler, M. (Hrsg.): Eurographics Workshop Proceedings: Virtual Environments, Stuttgart. Stuttgart: IEEE 1998.

*Burchard & Feddema 1996*

Burchard, R.L., Feddema, J.T: Generic robotic and motion control API based on GISC-Kit technology and CORBA Communications, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Minneapolis, USA April 1996.

*Burdea 1996*

Burdea, G.: Force and Touch feedback for virtual reality. New York: John Wiley & Sons, 1996.

*Burdea et al. 1996*

Burdea, G., Richard, P., Coiffet, P.: Multimodal Virtual Reality: Input-Output Devices, System Integration, and Human Factors. In: International Journal of Human-Computer Interaction (IJHCI) , Special Issue on Human-Virtual Environment Interaction, invited article, 8 (1996) 1, S. 5-24.

*Burkert & Passig 2001*

Burkert, T.; Passig, G.: A Photo-Realistic Predictive Display for Telepresence Applications. In: Färber, G.; Hoogen, J.: Proceedings of the Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, München. München: Hieronymus 2001, S. 43-53.

*Buschmann et al. 2000*

Buschmann, F., Meunier, R., Rohnert, H., Sommerlad, P., Stal, M.: Patternorientierte Software Architektur, Ein Pattern System. München: Addison-Wesley, 2000.

*Buss & Schmidt 1999*

Buss, M.; Schmidt, G.: Control Problems in Multi-Modal Telepresence Systems. In: Frank, P.M. (Hrsg.): Advances in Control - Highlights of ECC'99, München: Springer 1999, S. 65-100.

*Butler & Denommee 1997*

Butler, G.; Denommee, P.: Documenting frameworks. In: Proceedings of 8th Workshop on Software Reuse (WISR'8), Columbus. Columbus: Ohio State University 1997.

*Chang & Colgate 1997*

Chang, B.; Colgate, J.E.: Real-time impulse based simulation of rigid body systems for haptic display. In: ASME: Proceedings of the Int'l Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Dallas, Texas. ASME 1997.

*Chen et al. 2000*

Chen, M.L.; Kume, S.; Rizzi, A.A., Hollis, R.L.: Visually Guided Coordination for distributed precision assembly. In: Proceedings of IEEE Int'l Conference on Robotics & Automation, San Francisco. San Francisco: IEEE 2000, S. 1651 - 1656.

*Cisek & Effert 2001*

Cisek, R.; Effert, C.: Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug. In: Reinhardt, G.: Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug, München: Herbert Utz 2001, S. 1.1-1.18. (iwb Seminarberichte 56)

*Cobb et al. 1999*

Cobb, S.V.G., Nichols, S., Ramsey, A., Wilson, J.: Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). Presence, 8 (1999) 2. S. 169-186.

*Codourney et al. 1997*

Codourney, A.; Rodriguez, M.; Pappas, I.: A task-oriented teleoperation system for assembly in the microworld. In: Proceedings of ICAR '97 Int. Conference on Advanced Robotics, Monterey.

*Daenzer 1992*

Daenzer, W.F. (Hrsg.): Systems Engineering. 7. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1992.

*Danuser et al. 1997*

Danuser, G.; Pappas, I.; Vögeli, B.; Zesch, W.; Dual, J.: Manipulation of microscopic objects with nanometer precision: Potentials and limitations in nano-robot design. Submitted to: International Journal of Robotic Research 1997.

*Deml 2002*

Deml, B.: In sieben Schritten zur Gestaltung einer multimodalen Schnittstelle. In: Workshop "Gestaltungsrichtlinien für multimodale Telepräsenz und Teleaktionssysteme". München, 2002.

*Drosdowski 1982*

Drosdowski, G. (Hrsg): Duden Fremdwörterbuch. 4. Auflage Mannheim: Bibliographisches Institut, 1982.

*Ellis et al. 1997*

Ellis, R.E.; Jenkins, M.A.; Sakar, N.: Numerical Methods for the Force Reflection of Contact. ASME Transactions on Dynamic Systems, Measurement and Control 4 (1997) 4, S. 768-774.

*Färber 1998*

Färber, G. (Hrsg.): Finanzierungsantrag 1999-2001 des Sonderforschungsbereiches 1731: "Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion". München: Hieronymus 1998.

*Farzin et al. 1999*

Farzin, B. R.; Goldberg, K.; Jacobs, A.: A Minimalist Telerobotic Installation on the Internet. In: Proceedings of IEEE Int'l Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan. Detroit: IEEE 1999.

*Fayad & Schmidt 1999*

Fayad, M.; Schmidt, D.C. (Hrsg.): Building application frameworks: Object-oriented foundations fof framework design. New York: John Wiley & Sons, 1999.

*Fearing 1995*

Fearing, R. S.: Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling. In: Proceedings of the Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, PA. Pittsburgh: IEEE 1995.

*Fischer et al. 1990*

Fischer, P.; Daniel, R.; Siva, K. V.: Specifications and Design of Input Devices for Teleoperation. In: Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990, S. 540-545.

*Fowler & Scott 2000*

Fowler, M.; Scott, K.: UML Distilled: A brief guide to the standard object modelling language. Addison Wesley, Boston 2000.

*Fraunhofer 1997*

Fraunhofer IAO (Hrsg.): Styleguide Werkzeugmaschinen - Ein Handbuch zur Gestaltung von Benutzungsoberflächen für Werkzeugmaschinen. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 1997.

*Froehlich et al. 1997*

Froehlich, G.; Hoover, H.J.; Liu, L.; Sorenson, P.: Hooking into object-oriented application frameworks. In: Proceedings of International Conference of Software Engineering, Boston. Boston: IEEE 1997.

*Froehlich et al. 1998*

Froehlich, G.; Hoover, H.J.; Liu, L.; Sorenson, P.: Designing Object-Oriented Frameworks. In: Zamir, S.: CRC Handbook of Object Technology. Boca Raton: CRC Press 1998.

*Gamma et al. 1995*

Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R.; Vlissides, R.: Design Patterns-Elements of Reusable Object-Oriented Software. Boston: Addison Wesley, 1995.

*Gausemeier et al. 2000*

Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: Kooperatives Produktengineering: ein neues Selbstverständnis des ingenieurmässigen Wirkens. Paderborn: HNI, 2000.

*Ghiasi et al. 1998*

Ghiasi, S.; Keaton, D.; Seidl, M.; Zorn, B.: A reusable framework for web-based teleoperation. In: Proceedings of SPIE Conference on Telemanipulator and Telepresence Technologies V. Boston: SPIE 1998.

*Ghiasi et al. 1999*

Ghiasi, S., Seidl, M., Zorn. B.: A generic web-based teleoperations architecture: Details and experience. In: Proceedings of SPIE Conference on Telemanipulator and Telepresence Technology VI. Boston: SPIE 1999, S. 234-247.

*Göhringer 2001*

Göhringer, J.: Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen. Bamberg: Meisenbach, 2001. (Fertigungstechnik-Erlangen 111)

*Gooma 2000*

Gomaa, H.: Designing concurrent, distributed and real-time applications with UML. Boston: Addison-Wesley, 2000.

*Graves & Czarnecki 1999*

Graves, A.R., Czarnecki, C.: A Generic Control Architecture for Telerobotics. In: Nehmzow, U., Mehuish, C. (Hrsg.): Proceedings of Towards intelligent mobile Robots '99 Bristol, UK, Univ. of Manchester, dep. Of Computer Science, technical Report Series, Rep. No. UMCS-99-3-1 1999.

*Gutierrez et al. 1998*

Gutierrez, T.; Barabero, J.I.; Aizpitarte, M.; Cariilo, A.R.; Eguidazu, A.: Assembly Simulation through haptic virtual prototypes. In: Salisbury, JK and Srinivasan (Hrsg.): Proceedings of the 3<sup>d</sup> PHANToM User Group Workshop. MIT: AI Lab Technical Report No.1643 and RLE Technical Report No. 624, 1998.

*Hashimoto 1998*

Hashimoto, H.; Horiguchi, S.; Sitti, M.: Virtual Reality User Interface for Teleoperated Nanometer Scale Object Manipulation. In: Proceedings of the IEEE ROMAN'98 Workshop, Takamatsu, Japan. Takamatsu: IEEE 1998, S. 142-147.

*Henning & Vinoski 1999*

Henning, M.; Vinoski, S.: Advanced CORBA Programming with C++. Reading, Massachusetts: Addison Wesley, 1999.

*Ho & Jezequel 1998*

Ho, W.M.; Jezequel, J.M.: Object-Oriented Frameworks, Rapport de recherche No 3590. Rennes: Institut national de recherche de informatique et en Automatique 1998.

*Höhn & Reinhart 1997*

Höhn, H. Reinhart, G.: Flexible Microassembly Automation. In: Annals of the CIRP, Vol. 46/1 1997, S. 7 – 10.

*Höhn & Jacob 2000*

Höhn, H. Reinhart, G.: Flexible Microassembly Automation. In: Annals of the CIRP, Vol. 46/1 1997, S. 7 – 10.

*Höhn 2001*

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. München: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte)

*Hollis & Gowdy 1998*

Hollis, R.; Gowdy, J.: Mini factories for precision assembly. In: Proceedings of International Workshop on Micro-Factories, Tuskuba, Japan, 1998.

*Hoogen et al. 2002*

Hoogen, J.; Preusche, C.; Anton, O.; Schmidt, G.; Hirzinger, G., Reinhart, G.: Multimodale Mikro- und Makro-Montage über das Internet. In: Proceedings of Robotik 2002, Ludwigsburg. Ludwigsburg: VDI 2002.

*Höppner 1999*

Höppner, J.: Berührungslose Handhabung von Bauteilen in der Mikromontage. Reinhart, G. (Hrsg.): Automatisierte Mikromontage, München. Utz 1999 (iwb Forschungsberichte 44)

*Hudetz & Harnischfeger 1997*

Hudetz, W.; Harnischfeger, M.: Teleservice für die industrielle Produktion – Potenziale und Umsetzungshilfen. Leituntersuchung innerhalb des Rahmenkonzeptes “Produktion 2000”. In: FZKA-PFT Bericht Nr. 186 (1997) Forschungszentrum Karlsruhe.

*Jacobsen et al. 1992*

Jacobsen, I.; Christerson, M.; Jonsson, P.; Övergaard, G.: Object-Oriented Software Engineering: A use case driven approach. Workingham, England: Addison-Wesley, 1992.

*Johnson 1992*

Johnson, R. E.: Documenting Frameworks using patterns. In: Proceedings of OOPSLA, Vancouver, B.C. Canada. Vancouver: SIGPLAN 1992.

*Johnson 1997*

Johnson, R.E.: Components, frameworks, patterns. In: Proceddings of International Conference of Software Engineering, Boston. Boston: ACM Press 1997, S. 10-17.

*Kalawsky 1999*

Kalawsky, R.S.: The future of virtual reality and prototyping. In : Proceedings of the First International Workshop on Virtual Reality and Prototyping, Laval, Frankreich. Laval: Town Council of Laval 1999.

*Klatzky & Lederman 1995*

Klatzky, R.L., Lederman, S.J.: Identifying Objects from a Haptic Glance. Perception & Psychophysics, 8 (1995) 57, S. 1111-1123.

*Korem et al. 1998*

Korem, Y.; Jovane, F.; Pritschow, F. (Hrsg.): Open architecture control systems. ITIA Series Vol. 2, 1998.

*Kunstmann 1999*

Kunstmann, C.: Handhabungssystem mit optimierter Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Mikromontage. Düsseldorf: VDI, 1999. (Fortschritt-berichte VDI Reihe 8 Nr. 751)

*Kurtenbach et al. 1997*

Kurtenbach, G.; Fitzmaurice, G.; Baudel, T.; Buxton, B.: The Design and Evaluation of a GUI Paradigm based on Tablets, Two-hands and Transparency. In: Proc. of CHI 97, New York 1997.

*Landin & Niklasson 1995*

Landin, N.; Niklasson, A.: Developing object oriented frameworks (Master Thesis). Lund: Lund University, 1995.

*Lindemann et al. 1997*

Lindemann, U.; Irlinger, R.; Gaul, H.D.: Virtual Reality im Praxiseinsatz. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 92 (1997) 4, S. 172-174.

*Little 2000*

Arthur D. Little: Chancen für Bayern 2020. München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, 2000.

*Little 2001*

Arthur D. Little: Spezifizierung der Trendstudie Bayern 2020 für die Branchen des VDMA Bayern. München: VDMA, 2001.

*Lotter 1986*

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage: e. Handbuch für Elektrogerätebau u. Feinwerkstechnik. Düsseldorf: VDI, 1986.

*Manetta & Blade 1995*

Manetta, C., Blade, R.: Glossary of Virtual Reality Terminology. In: International Journal of Virtual Reality, 1 (1995) 2.

*Mark et al. 1997*

Mark, M.; Brooks Jr., F.P.; Sequin, C.: Moving Objects in Space: Exploiting Proprioception in Virtual-Environment Interaction. In: Proceedings of SIGGRAPH Computer Graphics, Annual Conf. Series, Los Angeles, USA. Los Angeles: ACM 1997.

*Maßberg 1998*

Maßberg, W.: Teleservice in Life-cycle-übergreifenden Engineering-Netzwerken. In: Seminarband F29 zum Fraunhofer IPA-Technologieforum "Teleservice", Stuttgart 1998, S. 49-74.

*NASA 2002*

NASA: Mars Pathfinder-The <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/index0.html>, 7.6.02. latest News,

*Nelson et al. 1998*

Nelson, B.J.; Vikramaditya, B. Zhou, Y. Fusing Force and Vision Feedback for Micromanipulation. In: Proceedings of IEEE Int'l Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgien 1998.

*Oesterreich 1997*

Oesterreich, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung mit der UML, 3. Auflage. München: Oldenbourg 1997.

*OMG 2002*

Object Management Group (OMG): <http://www.omg.org/technology/corba/corba3releaseinfo.htm>, 7.6.02 ???;

*OMG 2002b*

Object Management Group (OMG): Introduction to CORBA; <http://www.omg.org>, 7.4.02

*OMG 2002c*

Object Management Group (OMG): Unified Modelling Language; <http://www.uml.org/>, 01.07.02

*Patron & Petzold 2001*

Patron, C.; Petzold, B.: Leitfaden zur Klassifizierung von haptischen Eingabegeräten. München: iwb 2001 (interner iwb Bericht).

*Patzak 1982*

Patzak, G.: Systemtechnik-Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin: Springer, 1982.

### Puhl 1999

Puhl, H.: Komplexitätsmanagement-Ein Konzept zur ganzheitlichen Erfassung, Planung und Regelung der Komplexität in Unternehmensprozessen. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern, 1999. (FBK Produktionstechnische Berichte 31)

### Rasmussen 1986

Rasmussen, J.: Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering. Noth Holland Series 12, Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 1986.

### REFA 1988

Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (REFA) (Hrsg.): Montage in der Mikrowelt - Hinweise zur Gestaltung von Arbeiten mit Seh- und Handhabungshilfen. Darmstadt: REFA, 1988.

### Reinhart & Höhn 1999

Reinhart, G.; Höhn, M.: Strategien und Werkzeuge für die präzise Positionierung in der Mikromontage. VDI-Z 141 (1999) 9/10, S. 52-54.

### Reinhart & Lulay 1998

Reinhart, G.; Lulay, W. E.: Koordination dezentraler Produktionsstrukturen durch betriebsbegleitende Simulation. ZWF 93 (1998) 1-2, S. 35-38.

### Reinhart et al. 2000

Reinhart, G.; Anton, O.; Ehrenstrasser, M.; Patron, C.: Telepresent Microassembly. PURS 2000. In: M. Harders, S. Huber (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Phantom Users Research Symposium, Zürich. Konstanz: Hartung-Goerre 2000.

### Reinhart et al. 2000b

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Patron, C.: Mit Simulation die Komplexität beherrschen. Aufgezeigt am Beispiel der dynamischen Simulation mechatronischer Systeme und des Einsatzes von Virtual Reality. Industriemanager 17 (2001) 3, S. 34-37.

### Reinhart et al. 2000c

Reinhart, G.; Effert, C.; Grunwald, S.; Piller, F.; Wagner, W.: Minifabriken für die marktnahe Produktion. ZWF 95 (2000) 12, S. 597-600.

### Reinhart 2001

Reinhart, G.: Sensorbaukasten für die Telepräsenz und die telepräsenzgerechte Gestaltung von Produktionseinrichtungen. In: Ergebnis und Arbeitsbericht des Sonderforschungsbereichs SFB453, 1999-2001. München: Hieronymus, 2001. S. 133-144.

### Reinhart et al. 2001

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Patron, C.: Perspektiven und Lösungsansätze für die integrierte virtuelle Produktentstehung. wt Werkstatttechnik 90 (2000), S. 278-281.

*Richard et al. 1999*

Richard, P.; England, R.; Kheddar, A.; Coiffet, P.: Effect of Tactual Feedback on Performance in Virtual Manipulation Tasks. In: Proceedings of the First International Workshop on Virtual Reality and Prototyping, Laval: Town Council of Laval 1999.

*Rix & Schroeder 2000*

Rix, J.; Schroeder, K.: Virtual Reality als integraler Bestandteil des Virtual Engineering Konzeptes. Industrie Management 16 (2000) 1, S. 70-75.

*Rumbaugh et al. 1993*

Rumbaugh, J. et al.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen. Hanser, 1993.

*Salisbury & Zilles 1995*

Salisbury, J.K.; Zilles, C.B.: A Constraint-based God-object Method for Haptic Display. In: Proceedings of the Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh. Pittsburgh: IEEE 1995.

*Schäfer et al. 1999*

Schäfer, C, de Antonio, A., Clavijo, J.A, Segarra, M, Sanz, R.: Teleoperation of a virtual Robot using an Industrial, CORBA-Based Control Architecture. In: Stein, M. (Hrsg.): Proceedings of SPIE Conference on Telemanipulator and Teleepresence Technologies, Boston. Boston: SPIE 1999, S.113-123.

*Schelten & Gaidzik 1989*

Schelten, A.; Gaidzik, S.: Sensumotorische Analyse von Mikromontagearbeiten und Arbeitsplatzgestaltung. REFA-Nachrichten JAHRGANG (1989) 4, S. 19-27.

*Schmidt 1998*

Schmidt, D.C.: An architectural overview of the ACE framework. USENIX Login JAHRGANG (1998).

*Schmidt et al. 2001*

Schmidt, D.C.; Stal, M.; Rohnert, H.; Buschmann, F.: Pattern-oriented software architecture. 2. Aufl. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

*Schmidt 2002*

Schmidt, D.C.: Homepage von Douglas C. Schmidt.  
<http://www.cs.wustl.edu/~schmidt/research.html> vom 7.4.02

*Sematech 2002*

Fa: International Sematech:  
[http://www.sematech.org/public/resources/stds/cim\\_frmw.htm](http://www.sematech.org/public/resources/stds/cim_frmw.htm), 27.4.02.

*Sheridan 1992*

Sheridan, T.B.: Musings on telepresence and virtual presence. Presence-Teleoperators and virtual environments, 1 (1992) 1, S. 120-126.

*Sheridan 1992a*

Sheridan, T.B.: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control. Cambridge: MIT Press, 1992.

*Siegwart & Saucy 1999*

Siegwart, R.; Saucy, P.: Interacting mobile robots on the web. In: Proceedings of IEEE Int'l Conference on Robotics & Automation, Detroit. Detroit: IEEE 1999.

*Singer & Witmer 1998*

Singer, M. J.; Witmer, B. G.: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence-Teleoperators and virtual environments* 7 (1998) 3, S.225-240.

*Steffan et al. 1998*

Steffan R.; Kuhlen T.; Loock A.: A Virtual Workspace Including a Multimodal Human Computer Interface for Interactive Assembly Planning. In: Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES'98), Wien, 1998.

*Stein 1997*

Stein, W.: Objektorientierte Analysemethoden. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1997.

*Stone 2000*

Stone, R.J.: Haptic Feedback: A Potted History, From Telepresence to Virtual Reality. In: S. Brewster, R. Murray-Smith (Hrsg.): *Haptic Human-Computer Interaction*, Glasgow. Glasgow: Springer 2000.

*Strytsch & Weiß 1999*

Strytsch, M.; Weiß, J. (red. Leitung): Der Brockhaus: in 15 Bänden. Leipzig: Brockhaus. Bd. 4, 1999.

*Sulzmann et al. 1996*

Sulzmann, A.; Breguet, J.M.; Carlier, J.; Jacot, J.: Virtual reality and high accuracy vision feedback as key information for microrobot telemanipulation. In: Sulzmann, A. (Hrsg.): *Proceedings of SPIE Vol. 2906, Microrobotics: Components and Applications*, 1996, S. 38-57.

*Tanenbaum 1998*

Tanenbaum, A.S.: Computernetzwerke. 3. Aufl. München [i.e.] Haar: Prentice Hall, 1998.

*Taylor 1994*

Taylor, R. M.: The Nanomanipulator: A Virtual-Reality Interface to a Scanning Tunneling Microscope. Chapel Hill: University of North Carolina, 1994. (Dissertation, verfügbar unter <http://www.cs.unc.edu/Research/nano/publications/index.html>)

*Telerob 2002*

telerob Gesellschaft für Fernhantierungstechnik mbH (2002):  
<http://www.telerob.de/>, 26.6.02.

*Trumpf 2002*

Trumpf: "Schnell, direkt, pauschal - die Teleservice-Vereinbarung",  
[http://www.trumpf.com/1.service\\_uebersicht.html](http://www.trumpf.com/1.service_uebersicht.html), 2.5.02.

*Uhl 2000*

Uhl, A.: "Flexibles Telerobotersteuerungssystem auf der Basis offener numerischer Steuerungen", Dissertation Univ. Stuttgart (isw 136), 2000.

*v. Pierer 1999*

v. Pierer, H.: "Handle oder Du wirst gehandelt". Vortrag im Rahmen des 103. Kammergesprächs der IHK Nürnberg, IHK-Magazin Nürnberg, 11/1999.

*VDE 1998*

VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM): Mikrosystemtechnik 2000 - Überlegungen zur Rolle der Mikrosystemtechnik in Deutschland. Frankfurt/Main: VDE/VDI, 1998.

*Vikramaditya 1997*

Vikramaditya, B.: Micropositioning using active vision techniques. Illinois: University of Illinois at Chicago, 1997. (Master Thesis)

*Wagner 1996*

Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe. Berlin: Springer, 1996. (iwb-Forschungsberichte 106)

*Waller 1999*

Waller, D.: Factors affecting the perception of interobject distances in virtual environments. Presence-Teleoperators and Virtual environments, 8 (1999) 6, S. 657-670.

*Wechsung 1999*

Wechsung, R.: Market analysis for microsystems 1996-2000: A Nexus task force report. In: Stuttgarter Messe- und Kongressgesellschaft mbH (Hrsg.): Proceedings of Congress for Microsystems and Precision Engineering '99, Stuttgart, 1999, S. 44-46.

*Weinand & Gamma 1994*

Weinand, A.; Gamma, E.: ET++ - a portable, homogenous class library and application framework. In: Proceedings of UBILAB Conference, Konstanz: Universitätsverlag Konstanz 1994.

*Welch 1999*

Welch, R.B.: How can we determine if the sense of presence affects task performance. Presence-Teleoperators and virtual environments 8 (1999) 5, 574-577.

*Wenzel 1992*

Wenzel, E.M.: Localization in Virtual Acoustic Displays. *Presence-Teleoperators and virtual environments*, 1 (1992) 1, S. 80 - 104.

*Wenzel 1999*

Wenzel, E.M.: Effect of Increasing System Latency on Localization of Virtual Sounds. In: *Proceedings of AES 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*, Rovaniemi, Finnland. Rovaniemi, Finnland: AES 1999, S. 42-50.

*Westkämper 1998*

Westkämper, E.: Perspektiven im technischen Kundendienst durch Teleservice. In: *Fraunhofer IPA-Technologieforum F29*, Stuttgart Vaihingen. Stuttgart: IPA 1998, S. 11 - 36.

*Wicht et al. 2001*

Wicht, H.; Bouchaud, J.; Bahle, C.: Vergebene Liebesmüh oder Wachstumsmark?. In: *inno* Nr.20, 2001.

*Yokokoshji et al. 1994*

Yokokoshji, Y., Hosotani, N., Ueda, J., Yoshikawa, T.: A Micro Teleoperation System for Compensating Scaling effects based on Environment Model. In: *Proceedings of 1994 Japan-USA-Symp. on flexible Automation*, Kobe, Japan.

*Yourdon & Constantine 1979*

Yourdon, E.N.; Constantine, L.L.: *Structured Design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

*Zäh et al. 2002*

Zäh, M.F.; Färber, B.; Anton, O.; Deml, B.; Egermeier, H.; Petzold, B.; Schilp, J.: Telepresent Micro-Assembly on the Verge of Industrial Applicability: Human Factors and Design Implications. *Presence-Teleoperators and virtual environments*, 11 (2003) 1 (in Begutachtung).



## **12 Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Megatrends des 21. Jahrhunderts	1
Abbildung 2: Herausforderungen für Produktionsunternehmen	2
Abbildung 3: Kategorien der Telepräsenz	4
Abbildung 4: Verbreitung des Teleservice (nach Hudetz & Harnischfeger 1997)	5
Abbildung 5: Wachstumschancen Mikrosystemtechnik (nach Wechsung 1999)	6
Abbildung 6: Ziel der Arbeit	8
Abbildung 7: Aufbau der vorliegenden Arbeit	9
Abbildung 8: Begriffe im Betrachtungsbereich "teleoperierte Systeme"	11
Abbildung 9: Funktionsorientierte Struktur eines Telepräsenzsystems	13
Abbildung 10: Modalitätsorientierte Struktur eines Telepräsenzsystems	14
Abbildung 11: Teilsysteme eines Telepräsenzsystems	15
Abbildung 12: Hardwaredetails des Teilsystems Operator	16
Abbildung 13: Details Teilsystem Teleoperator	19
Abbildung 14: Aufbau eines Telepräsenznetzwerks	22
Abbildung 15: Client-Server-Beziehung	23
Abbildung 16: Szenario für den Einsatz eines Telemontagesystems (Symbole vgl. Anhang A)	25
Abbildung 17: Einflussgrößen bei der Planung von Montagesystemen (Lotter 1986, S.10)	26
Abbildung 18: Beurteilungskriterien für Bedienerschnittstellen	27
Abbildung 19: Erweiterter Planungsprozess für Telemontagesysteme	30
Abbildung 20: Herausforderungen im Entwicklungsprozess für Telemontagesysteme	32
Abbildung 21: Bewertungsschema für multimodale Telepräsenzsysteme	33
Abbildung 22: Uneinheitliche Struktur und Schnittstellen von Teleoperationssystemen	41
Abbildung 23: Eigenschaften ausgewählter Telepräsenzsysteme	42
Abbildung 24: Lösungsansatz für die kommunikationstechnische Integration von Telemontagesystemen	45
Abbildung 25: Handlungsfelder der vorliegenden Arbeit	46
	147

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 26: Überblick über das Handlungsfeld Strukturmodell	49
Abbildung 27: Durchschnittliche Netzwerk Roundtripzeit	51
Abbildung 28: Details der Common Object Broker Request Architecture	52
Abbildung 29: Konzepte des objektorientierten Paradigmas	54
Abbildung 30: Erweitertes Planungsvorgehen im Vergleich zur Mittel-Zweck-Hierarchie nach Rasmussen 1986	56
Abbildung 31: Softwaretechnisch relevante Ebenen der erweiterten Mittel-Zweck-Hierarchie	57
Abbildung 32: Schichtspezifische Use-Cases für die Analyse	58
Abbildung 33: Aspekte und Konzepte der Wiederverwendung	59
Abbildung 34: Kontrollfluss und Struktur von Klassenbibliotheken und Frameworks	60
Abbildung 35: Wesentliche Bestandteile eines Frameworks	61
Abbildung 36: Unterschiedliche Kategorien von Frameworks	62
Abbildung 37: Problembereiche beim Management von Telepräsenznetzwerken	65
Abbildung 38: Zustandsautomat eines Netzwerkteilnehmers	67
Abbildung 39: Überwachung eines Telepräsenznetzwerkes	68
Abbildung 40: Kommunikationsmodell und Datenfluss	69
Abbildung 41: Adressierungs- und Modalitätsvarianten im Telepräsenznetzwerk	70
Abbildung 42: Szenariovarianten im Telepräsenznetzwerk	71
Abbildung 43: Verbindungstypen in einem Telepräsenznetzwerk	72
Abbildung 44: Methoden und Datentypen für den Informationsaustausch	73
Abbildung 45: Datentypen und Operationen für die Datenübertragung	74
Abbildung 46: Architekturkonzept eines telepräsenten Montagesystems	76
Abbildung 47: Metamodell "Abstraktionsschicht"	78
Abbildung 48: Grafische Darstellungsform zur Schichtenbeschreibung	79
Abbildung 49: Wesentliche "Schnittstellen" der Präsentationsschicht	79
Abbildung 50: Wesentliche Schnittstellen der Applikationsschicht	80
Abbildung 51: Wesentliche Schnittstellen der Domänenschicht	81
Abbildung 52: Wesentliche Schnittstellen der Telepräsenzschicht	82
Abbildung 53: Wesentliche Schnittstellen der Telekommunikationsschicht	83

Abbildung 54: Kommunikationsszenarien für Teleoperationen	84
Abbildung 55: Sequenz für die Registrierung einer Telepräsenzkomponente	85
Abbildung 56: Integration der Frameworkbibliotheken in ein Telepräsenzsystem	87
Abbildung 57: Überblick Handlungsfeld Vorgehensmodell	89
Abbildung 58: Vorgehensmodell beim Entwurf der Sensomotorik	90
Abbildung 59 : Reihenfolge bei der Eindbindung der Frameworksbibliotheken in ein Anwendungsprogramm	91
Abbildung 60: Instanzierung des Telepräsenzzenarios	92
Abbildung 61: Instanzierung relevanter Modalitätskanäle	93
Abbildung 62: Instanzierung von Kommunikationsverbindungen anhand der Empfindungsformate	94
Abbildung 63: Auswahl von Hardwarekomponenten	96
Abbildung 64: Erweiterung des Frameworks um einen Algorithmus	97
Abbildung 65 : Überblick über das Handlungsfeld Hilfsmittel	99
Abbildung 66 : Klassendiagramme und Stereotypes	100
Abbildung 67 : Stereotypes der Applikationsschicht	101
Abbildung 68: Verknüpfung zwischen Entwicklungsschritt und Frameworkausschnitt	102
Abbildung 69: Funktionsweise eines CASE-Tools	103
Abbildung 70: Verbindung zwischen Vorgehensdokumentation und Framework	104
Abbildung 71: Browserfähige Dokumentation des Vorgehensmodells	105
Abbildung 72: Hilfsmittel für den Einsatz des Telepräsenzframeworks	106
Abbildung 73: Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage	109
Abbildung 74: Anwendungsbeispiel für die telepräsente Mikromontage (Bild nach Reinhart & Höhn 1999)	110
Abbildung 75: Sensomotorische Analyse der Uhrwerksmontage	112
Abbildung 76: Festlegung von Empfindungsformaten	113
Abbildung 77: Festlegung haptischer Ein-/Ausgabegeräte	114
Abbildung 78: Kommunikationsstruktur der Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage	114
Abbildung 79: Versuchsplattform für die telepräsente Mikromontage	115
	149

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 80: Maximalkräfte und Montagezeit in Experiment I	117
Abbildung 81: Szenarien für die Evaluierung der telepräsenten Mikromontage	118
Abbildung 82: Aufgabenbereiche des Entwicklers und des Telepräsenzframeworks	122
Abbildung 83 : Einordnung des Rahmenkonzeptes in das Bewertungsschema	124
Abbildung 84: Beispiel für die Errechnung des Kapitalwertes	125
Abbildung 85: Sensibilität des Kapitalwertes	127

### **13 Abkürzungsverzeichnis**

CASE	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>S</b> oftware <b>E</b> ngineering
COMET	<b>C</b> oncurrent <b>O</b> bject <b>M</b> odeling and <b>A</b> rchitectural <b>D</b> esign <b>M</b> ethod
CORBA	<b>C</b> ommon <b>O</b> bject <b>R</b> equest <b>B</b> roker <b>A</b> rchitecture (vgl. Kap.5.1.1)
HMD	<b>H</b> ead <b>m</b> ounted <b>D</b> isplay (Am Bedienerkopf befestigtes, tragbares Visualisierungssystem)
ICa	<b>I</b> ntegrated <b>C</b> ontrol <b>a</b> rchitecture
IDL	<b>I</b> nterface <b>D</b> efinition <b>L</b> anguage (vgl. Kapitel 5.1.1)
iwb	<b>I</b> nstitut für <b>W</b> erkzeugmaschinen und <b>B</b> etriebswissenschaften der TU München
Java	Eine von der Firma sun herausgebrachte Programmiersprache vgl. <a href="http://java.sun.com/">http://java.sun.com/</a>
Nmm	<b>N</b> ewton <b>m</b> illimeter
OMG	<b>O</b> bject <b>M</b> anagement <b>G</b> roup. Die OMG ist ein Zusammenschluss mehrerer internationaler Großunternehmen, die sich die Standardisierung von objektorientierter Software zum Ziel gesetzt hat (vgl. auch <i>OMG 2002</i> )
OMT	<b>O</b> bject <b>M</b> odelling <b>T</b> echnique (OMT, vgl. <i>Rumbaugh et al. 1993</i> )
OOD	<b>O</b> bject <b>O</b> riented <b>D</b> esign (OOD, vgl. <i>Booch 1996</i> )
OOSE	<b>O</b> bject <b>O</b> riented <b>S</b> oftware <b>E</b> ngineering (OOSE, vgl. <i>Jacobsen et al. 1992</i> )
OSACA	<b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>A</b> rchitecture for <b>C</b> ontrol <b>S</b> ystems in <b>A</b> utomation
SMART	<b>S</b> andia <b>M</b> odular <b>A</b> rchitecture for <b>R</b> obotics and <b>Teleoperation</b>
TCP/IP	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol/ <b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
VR	<b>V</b> irtuelle <b>R</b> ealität = "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." ( <i>Manetta &amp; Blade 1995</i> )



## Anhang A: Überblick über die verwendeten Symbole

### A.1 Wesentliche Elemente der UML

Die folgenden Abschnitte beschreiben die im Rahmen dieser Arbeit wesentlichen Diagramme der UML-Gesamtspezifikation. Für weitere Details zur UML, , die ursprünglich durch eine Verschmelzung von Beschreibungsmitteln der Methoden OOD<sup>41</sup>, OMT<sup>42</sup> und OOSE<sup>43</sup> entstanden ist, sei beispielsweise auf *OMG 2002c*, *Oesterreich 1997* oder *Fowler & Scott 2000* verwiesen. Dort werden detailliert die Bedeutung aller Diagrammtypen der UML beschrieben und deren Einsatz anhand unterschiedlicher Anwendungsbeispiele gezeigt.

#### A.1.1 Use-Case-Diagramme

Use-Case Diagramme beschreiben auf hohem Abstraktionsniveau, wie einzelne Anwender (Aktoren) in möglichen Anwendungsfällen (Use-Cases) mit dem zu entwerfenden Software-System interagieren. Im Vordergrund steht dabei die Erfassung von allen Handlungen, in denen unterschiedliche Akteure möglicherweise auf das betrachtete System zugreifen, softwartechnische Details werden hier nicht berücksichtigt.

Abbildung A-1 zeigt, dass am Use-Case "Reise buchen" die Akteure *Bearbeiter* und *Kunde* beteiligt sind und dass während des Anwendungsfalles "Reise buchen" immer auch die Reservierung eines Transportmittels als weiterer Anwendungsfall anfällt.

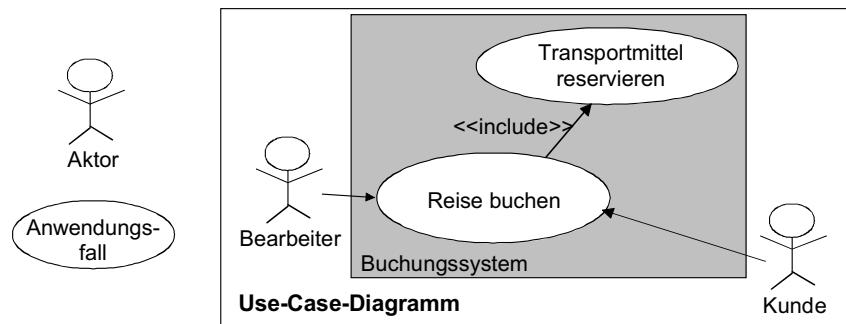


Abbildung A-1: Use Case Diagramm

---

<sup>41</sup> OOD: Object Oriented Design (OOD, vgl. *Booch 1996*)

<sup>42</sup> OMT: Object Modelling Technique (OMT, vgl. *Rumbaugh et al. 1993*)

<sup>43</sup> OOSE: Object Oriented Software Engineering (OOSE, vgl. *Jacobsen et al. 1992*)

### A.1.2 Sequenz-Diagramme

Sequenzdiagramme beschreiben den zeitlichen Ablauf einer Interaktion zwischen unterschiedlichen Objekten. Im Beispiel der Abbildung wird der Bearbeiter zuerst vom Kunden angerufen, reserviert dann unter Angabe eines Namens einen Platz im Transportmittel und meldet es schließlich bei der Werkstatt an.

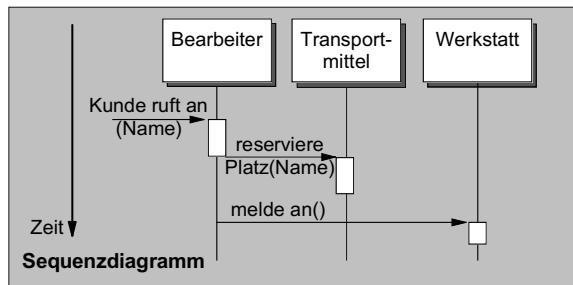


Abbildung A-2: Sequenz-Diagramm

### A.1.3 Klassen-Diagramme

Klassendiagramme beschreiben die Attribute und Methoden von Klassen sowie die Relationen zwischen unterschiedlichen Klassen. Zur Modellierung unterschiedlicher Arten von Relationen werden verschiedene Symbole eingesetzt, um beispielsweise eine Aggregation (...kann Bestandteil sein von...), Komposition (...ist **immer** Bestandteil von...) oder auch nur eine einfache Assoziation (...unterhält eine Beziehung zu...) abzubilden. Das Beispiel in Abbildung versinnbildlicht, dass ein Automobil neben einigen Eigenschaften wie *Alter* und *Leistung* über die Methode *tanken(Menge)* verfügt. Darüber hinaus besteht es immer aus 4 Reifen, wie anhand der Komposition zwischen den Klassen Automobil und Reifen dargestellt ist.

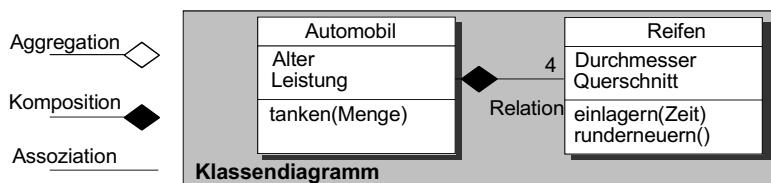


Abbildung A-3: Klassen-Diagramm und unterschiedliche Relationen

## Anhang A: Überblick über die verwendeten Symbole

Klassendiagramme werden auch dazu herangezogen, um Vererbungshierarchien auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen zu modellieren. Wie in Abbildung A-4 dargestellt, wird eine Vererbungsbeziehung (...ist ein...) mittels eines Pfeils versinnbildlicht. Der Pfeil zeigt dabei von der "Kindklasse" auf die "Vaterklasse", so dass das Diagramm in Abbildung A-4 aussagt, dass sowohl ein Automobil als auch ein Segelschiff ein Transportmittel sind.

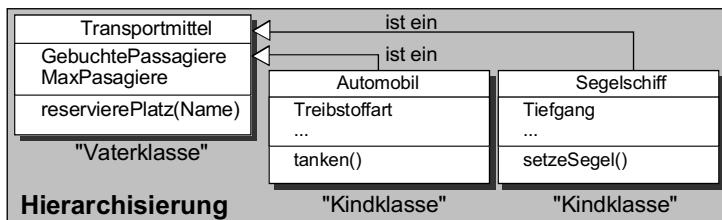


Abbildung A-4: Vererbungshierarchie

### A.1.4 Zustands-Diagramme

Zustandsdiagramme werden zur Modellierung der möglichen Zustände des betrachteten Softwaresystems sowie der Ereignisse, die zu einem Zustandswechsel führen, eingesetzt. Zustände werden wie in Abbildung A-5 veranschaulicht durch Rechtecke dargestellt, Zustandsübergänge durch beschriftete Pfeile.

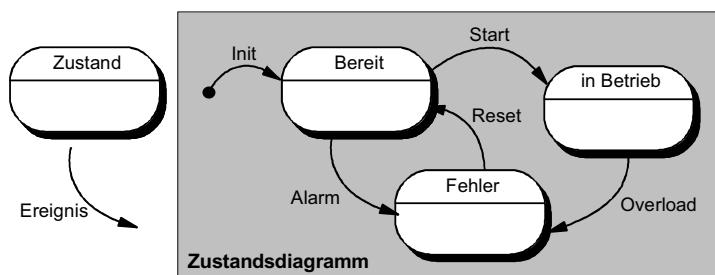


Abbildung A-5: Zustandsdiagramm

Die Beschriftung der Pfeile spezifiziert, welches Ereignis eintreten muss, damit der Zustandsübergang ausgelöst wird. Im Beispiel von Abbildung A-5 geht das System vom Zustand "Bereit" in den Zustand "Fehler" über, sobald ein Alarm eintritt.



# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- |    |   |    |   |
|----|---|----|---|
| 1  | <i>Streifinger, E.</i><br>Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel<br>1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3       | 14 | <i>Groha, A.</i><br>Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme<br>1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8                      |
| 2  | <i>Fuchsberger, A.</i><br>Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen<br>1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1  | 15 | <i>Riese, K.</i><br>Klippsmontage mit Industrierobotern<br>1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6   |
| 3  | <i>Maier, C.</i><br>Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern<br>1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X                           | 16 | <i>Lutz, P.</i><br>Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung<br>1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3                                  |
| 4  | <i>Summer, H.</i><br>Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen<br>1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8   | 17 | <i>Klippl, C.</i><br>Mobilier Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems<br>1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0                   |
| 5  | <i>Simon, W.</i><br>Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen<br>1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9  | 18 | <i>Rascher, R.</i><br>Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung<br>1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9                 |
| 6  | <i>Büchs, S.</i><br>Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung<br>1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7                                   | 19 | <i>Heuser, H.-J.</i><br>Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme<br>1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5                              |
| 7  | <i>Hünzinger, J.</i><br>Schneiderodierte Oberflächen<br>1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5  | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i><br>Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen<br>1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3                      |
| 8  | <i>Pilland, U.</i><br>Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen<br>1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2   | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i><br>Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen<br>1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1                                |
| 9  | <i>Barthelmeß, P.</i><br>Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung<br>1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i><br>Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigung automatisierung<br>1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7     |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i><br>Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen<br>1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6                             | 23 | <i>Peiker, St.</i><br>Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems<br>1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0                                   |
| 11 | <i>Dress, H.</i><br>Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse<br>1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5                          | 24 | <i>Schugmann, R.</i><br>Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage<br>1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0                     |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i><br>Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssäte<br>1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1             | 25 | <i>Wolbe, P.</i><br>Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik<br>1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X                                    |
| 13 | <i>Bürstner, H.</i><br>Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion<br>1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6                                 | 26 | <i>Fibelhäuser, P.</i><br>Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung<br>1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
|    |   | 27 | <i>Prasch, J.</i><br>Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie<br>1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2         |

- 28 Teich, K.  
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfrang, W.  
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.  
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.  
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.  
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.  
Inspektion von Karosserierechteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.  
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Neber, H.  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.  
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.  
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.  
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hößmann, J.  
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.  
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebefolgesprozesse  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.  
Integrierte Diagnose in Produktionszellen  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.  
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schräfer, N.  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Gernich, F.  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.  
Digitale Zustandessregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Gläss, W.  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.  
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetzsteiner, G.*  
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionsystemen  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zettlmayer, H.*  
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*  
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwaner, N.*  
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung in Montageanlagen  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
Konzept einer integrierten Produktentwicklung  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionsysteme  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*  
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieteler, A.*  
Recyclingintegrierte Produktentwicklung  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
Personorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche Produkte  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren  
1995 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
Autonome Fertigungszeilen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Mocetzauma de la Barrera, J.L.*  
Ein dringendes System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischetsrieder, K.*  
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen Kleinprodukten  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem  
1997 · 98 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*  
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kröner, U.*  
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermair, R.*  
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64886-8
- 116 *Koehler, J.*  
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plob, E.*  
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim

Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.com](mailto:utz@utzverlag.com)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionsysteme  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

- 49** Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50** Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51** Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung,  
Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52** Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein-  
und Prototypenserien  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53** Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl,  
Umsetzung  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54** Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55** e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen,  
Praxisbeispiele  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56** Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes  
Werkzeug  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57** Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58** Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger  
Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59** Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für  
die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60** Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt  
entwickeln  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61** Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62** Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63** Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.de](mailto:utz@utzverlag.de)

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X  
lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weissenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinger  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4



