

# Mobile haptische Schnittstellen für weiträumige Telepräsenz: Idee und Methodik

## Mobile Haptic Interfaces for Extended Area Telepresence: Idea and Methodology

Norbert Nitzsche, Uwe D. Hanebeck und Günther Schmidt

---

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit Telepräsenzsystemen zur Interaktion mit weiträumigen realen oder virtuellen Zielumgebungen. Die dafür notwendige Fortbewegung wird durch freie, gehende Fortbewegung des Anwenders erreicht. Um gleichzeitig haptische Interaktion mit einer Zielumgebung zu ermöglichen, wird die haptische Schnittstelle mit dem Anwender mitgeführt. Neuartig ist dabei der Einsatz einer mobilen haptischen Schnittstelle, die der Fortbewegung des Anwenders aktiv folgt. Basierend auf den dargestellten Methoden wurde ein prototypisches Telepräsenzsystem zur haptischen Exploration von ausgedehnten virtuellen Umgebungen entwickelt und getestet.

This article is concerned with telepresence systems for interaction with extended real or virtual target environments. Locomotion required for this type of interaction is governed by free, walking locomotion of the operator. In order to allow haptic interaction with the target environment simultaneously, a haptic interface following the operator is employed. As a novel approach, we present a mobile haptic interface, which actively follows the operator's locomotion. Based on the presented methodology, a prototypic telepresence system for haptic exploration of extended virtual environments has been implemented and tested.

**Schlagwörter:** Weiträumige Telepräsenz, virtuelle Umgebungen, mobile haptische Schnittstellen, telepräsenzte Fortbewegung, Teleoperation

**Keywords:** Large-scale telepresence, virtual environments, mobile haptic interfaces, telepresent locomotion, teleoperation

---

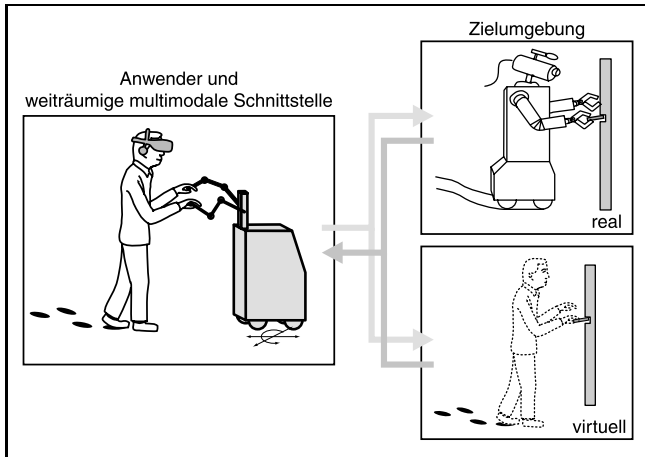
## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Mit Hilfe eines weiträumigen Telepräsenzsystems wird einem menschlichen Anwender das Gefühl vermittelt, in einer nicht direkt zugänglichen, ausgedehnten Zielumgebung präsent zu sein. Dabei repräsentiert ein Telemanipulator den Anwender in der Zielumgebung, wo er dessen Bewegungen repliziert. Die dabei vom Telemanipulator sensorisch erfassten Umgebungseindrücke (optisch, akustisch, mechanisch) werden dem Anwender durch geeignete Displays dargestellt. Die Displays repräsentieren also die Zielumgebung für den Anwender, Bild 1.

Im hier betrachteten Fall ausgedehnter Zielumgebungen ist neben der visuellen Wahrnehmung und der haptischen Interaktion die Fortbewegung in der Zielumgebung von besonderem Interesse. Dabei soll beim Anwender der Eindruck freier gehender Fortbewegung in der Zielumgebung entstehen. Hierzu wird die Fortbewegung des Telemanipulators direkt durch die Fortbewegung des Anwenders in seiner lokalen Umgebung gesteuert. Auf diese Weise stehen dem Anwender sämtliche Sinnesmodalitäten zur Wahrnehmung der Fortbewegung und damit zur Navigation zur Verfügung.

Da der Anwender gleichzeitig die Zielumgebung haptisch explorieren und manipulieren können soll, muss eine da-



**Bild 1:** Einsatz einer mobilen haptischen Schnittstelle (MHS) zur Interaktion mit ausgedehnten Zielumgebungen.

für geeignete haptische Schnittstelle den Arbeitsraum des frei umhergehenden Anwenders abdecken. Hierzu wird der neuartige Ansatz einer mobilen haptischen Schnittstelle vorgestellt.

Die hier untersuchten weiträumigen Telepräsenzsysteme sind überall dort sinnvoll, wo der Mensch zur Erfüllung einer Teleexplorations- oder Telemanipulationsaufgabe ganz wesentlich auf seine Fähigkeiten zur Orientierung und Navigation in ausgedehnten Umgebungen angewiesen ist. Dies ist zum Beispiel bei einem telepräsenten Museumsbesuch oder bei der interaktiven Gestaltung virtueller Innenräume der Fall.

Die bisher und im folgenden für reale Zielumgebungen gemachten Aussagen lassen sich sinngemäß auch auf virtuelle Zielumgebungen übertragen.

### 1.2 Stand der Forschung

Heutige haptische Schnittstellen sind meist stationär und auf den Arbeitsraum des menschlichen Arms beschränkt [1; 2]. Daraus ergeben sich bezüglich ihrer Anwendbarkeit folgende Restriktionen:

- der Anwender ist ortsfest,
- der Arbeitsraum in der Zielumgebung ist beschränkt.

Die letztgenannte Einschränkung lässt sich durch Verschiebung des Arbeitsraumes in der Zielumgebung leicht aufheben. Diese Verschiebung kann durch Änderung der Abbildung des Anwenderarbeitsraumes in den Arbeitsraum des Teleoperators oder durch Fortbewegung des Teleoperators erreicht werden. Zur Kommandierung der Arbeitsraumverschiebung werden bei kraftreflektierenden Telepräsenzsystemen bisher Hilfsschnittstellen eingesetzt. Beispiele dafür sind Maus und Joystick zur Geschwindigkeits- oder Positionsvorgabe sowie verschiedene Formen des Reindexings [2]. Diese Hilfsschnittstellen übersetzen stationäre Bewegungen des Anwenders in Fortbewegungen bezüglich der Zielumgebung. Damit ermöglichen sie keine propriozeptive, das heißt kinästhetische und vestibuläre Wahrnehmung der Fortbewegung. Deshalb entsteht beim Anwender

nicht der gewünschte Eindruck einer Fortbewegung in der ortsfesten Umwelt, sondern umgekehrt wird eine Bewegung der Umwelt relativ zum ortsfesten Anwender wahrgenommen. Untersuchungen belegen, dass dadurch die natürlichen Navigationsfähigkeiten des Menschen nicht im vollen Umfang genutzt werden können [3].

Für Anwendungen aus dem Bereich der virtuellen Realität existieren bereits Schnittstellen für wirklichkeitsnahe, freie telepräsente Fortbewegung. Diese Schnittstellen ermöglichen interaktive visuelle Exploration, jedoch keine kraftreflektierende Interaktion in ausgedehnten Umgebungen. Wirklichkeitsnahe Lokomotionsschnittstellen ermöglichen es dem Anwender, seine Fortbewegung in der Zielumgebung nicht nur visuell, sondern zum Teil auch propriozeptiv wahrzunehmen. Zu dieser Gruppe der Lokomotionsschnittstellen zählen omnidirektionale Laufbänder [4; 5], bewegliche Fußplattformen [6] sowie Anordnungen zur Erfassung der freien Fortbewegung des Anwenders in der lokalen Umgebung [7–9].

Bisherige Systeme erlauben demnach nur *entweder* realistische haptische Interaktion *oder* realistische telepräsente Fortbewegung.

### 1.3 Idee

Durch den Einsatz einer mobilen haptischen Schnittstelle werden erstmals realistische telepräsente Fortbewegung *und* haptische Interaktion gleichzeitig erreicht. Vollständige und realistische Wahrnehmung der telepräsenten Fortbewegung lässt sich mit vergleichsweise geringem Aufwand durch Erfassung und Replikation der freien Fortbewegung des Anwenders erfüllen. Freie Fortbewegung in der lokalen Umgebung stand jedoch bisher im Widerspruch zur Ortsunveränderlichkeit des Anwenders, wie sie durch stationäre haptische Schnittstellen entsteht. Dieser Widerspruch wird nun dadurch gelöst, dass die haptische Schnittstelle mit dem Anwender mitgeführt wird. Damit wird intuitive kraftreflektierende Telepräsenz in weit größeren Arbeitsräumen als bisher möglich, Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Einordnung des neuen, weiträumigen Telepräsenzsystems, Vergleich mit bestehenden Systemen.

		Telepräsente Fortbewegung	
		keine oder abstrakt	wirklichkeitsnah
Manipulation/ Interaktion	nicht kraftreflektierend	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computerspiele</li> <li>• Fernsteuerung</li> <li>• CAD-Systeme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• interaktive visuelle Exploration in VR</li> </ul>
	kraftreflektierend	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computerspiele</li> <li>• Master/ Slave-Teleoperation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weiträumige haptische Interaktion</li> </ul>

Im folgenden Abschnitt werden einige prinzipielle Realisierungen von haptischen Schnittstellen diskutiert, welche Ortsveränderlichkeit des Anwenders erlauben. Im Abschnitt 3 folgt dann eine detaillierte Beschreibung des von uns verfolgten Ansatzes, der auf der Verwendung einer mobilen haptischen Schnittstelle beruht. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen werden im Abschnitt 4 dargestellt. Im Abschnitt 5 schließt sich die Vorstellung eines ersten Versuchsaufbaus sowie experimenteller Ergebnisse an.

## 2 Ansätze für großräumige haptische Schnittstellen

Aus den im Abschnitt 1 dargestellten Überlegungen ergibt sich die Notwendigkeit, eine haptische Schnittstelle zu realisieren, die an jedem Punkt des Arbeitsraums eines sich frei bewegenden Anwenders präsent ist und dem Anwender für kraftreflektierende Interaktion mit einer Zielumgebung zur Verfügung steht.

Ein naheliegender Ansatz sind tragbare haptische Schnittstellen, die am Körper des Anwenders angebracht werden und so allen Fortbewegungen des Anwenders folgen. Derartige Systeme wurden bisher nur für fingerkinästhetische Displays in Form von Hand-Exoskeletten realisiert [10; 11]. Vollständig tragbare Arm-Exoskelette [12] sind hingegen mit derzeitiger Aktortechnologie und heutigen Konstruktionswerkstoffen nur bedingt realisierbar. Sie unterliegen gewichtsbedingten Einschränkungen bezüglich der Größe der darstellbaren Kräfte. Außerdem sind tragbare haptische Schnittstellen prinzipbedingt nicht zur wirklichkeitsnahen Darstellung größerer externer Kräfte geeignet, da in die Hand eingeleitete externe Kräfte am Körper des Anwenders abgestützt werden. Untersuchungen [13] ergaben, dass haptische Schnittstellen mit externer Basis bei der überzeugenden Darstellung von Wänden und bei der Schätzung von Abständen tragbaren Geräten überlegen sind.

Ein weiterer denkbarer Ansatz für weiträumige haptische Schnittstellen sind stationäre, z. B. an der Raumdecke installierte Manipulatoren mit sehr großem Arbeitsraum. Dabei wachsen jedoch materieller Aufwand und Probleme etwa der Steifigkeit mit der Größe des Arbeitsraums sehr schnell an. Ein zusammenhängender, von internen Kollisionen freier Arbeitsraum lässt sich darüber hinaus bei einer zweiarmligen Anordnung nur mit hoch redundanten Manipulatoren realisieren.

Die in diesem Artikel vorgestellte Kernidee besteht nun darin, eine mobile haptische Schnittstelle zu verwenden, die *aktiv* den Bewegungen des Anwenders folgt, Bild 1. Der Arbeitsraum einer solchen Schnittstelle ist nur durch den zur Verfügung stehenden Freiraum begrenzt. Die Einschränkungen bezüglich der Größe der darstellbaren Kräfte und der Darstellung externer Kräfte sind weit geringer als bei tragbaren Geräten.

## 3 Mobile haptische Schnittstelle – Aufbau und Anforderungen

Prinzipiell soll eine mobile haptische Schnittstelle (MHS) in der Lage sein, Kräfte und Momente an den Händen des Anwenders wirklichkeitsnah darzustellen und den weiträumigen Bewegungen des Anwenders aktiv nachzufolgen. Eine MHS besteht daher aus einer mobilen, z. B. radbasierten Plattform und Manipulatoren mit geeigneten Endeffektoren. Das Gesamtsystem ist kinematisch redundant, wobei sich die Freiheitsgrade von Plattform und Manipulatoren in ihren dynamischen Eigenschaften unterscheiden werden.

Die Plattform muss zwei, zum Teil gegensätzliche Anforderungen erfüllen. Einerseits soll sie über die notwendige Schnelligkeit und Wendigkeit verfügen, die es der MHS ermöglicht, den Bewegungen des Anwenders zu folgen. Andererseits müssen die vom Anwender auf die Schnittstelle ausgeübten Kräfte und Momente aufgenommen und in den Boden geleitet werden.

Die Manipulatoren der MHS sind über ihre Endeffektoren mit den Händen des Anwenders verbunden. Ihre Aufgabe ist die Erfassung der Bewegung der Hände des Anwenders sowie die Darstellung von Kräften und Momenten entsprechend den mechanischen Eigenschaften der Zielumgebung. Der Arbeitsraum der Manipulatoren sollte den Arbeitsraum der menschlichen Arme abdecken, sodass die Plattform mit ihrer größeren Trägheit nicht den schnellen Bewegungen der Hand des Anwenders folgen muss. Plattformbewegungen sollten sich darauf beschränken, den Fortbewegungen des Anwenders zu folgen.

Um dem Anwender jederzeit seine natürliche Bewegungsfreiheit zu gewährleisten, muss die Plattform bezüglich Manipulierbarkeit fortlaufend optimal positioniert werden. Dazu ist die relative räumliche Anordnung von Plattform und Anwender zu erfassen. Für die Übertragung der Bewegungen des Anwenders in die Zielumgebung ist außerdem die Kenntnis der absoluten räumlichen Anordnung entweder des Anwenders oder der mobilen Plattform erforderlich.

## 4 Herausforderungen

Aus den im vorangegangenen Abschnitt gestellten Anforderungen an mobile haptische Schnittstellen ergeben sich eine Reihe interessanter Fragestellungen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

### 4.1 Regelung der MHS

Aufgabe eines haptischen Displays ist die möglichst transparente Darstellung einer virtuellen oder realen Umgebungsimpedanz. Dies lässt sich nur durch eine geeignete Regelung realisieren.

Unter der Voraussetzung von Linearität wird mechanische Impedanz hier durch die Übertragungsfunktion

$$Z(s) = \frac{f(s)}{x(s)}$$

definiert [14; 15]. Dabei ist  $f$  die aus einer Verschiebung  $x$  resultierende Kraft. Im Allgemeinen gilt

$$Z(s) = \frac{ms^2 + bs + k}{1},$$

wobei  $m$  die Masse,  $b$  die Dämpfungskonstante und  $k$  die Federkonstante ist.

Transparenz beschreibt in diesem Kontext den Idealfall, in dem die vom Anwender wahrgenommene Impedanz  $Z^*$  gleich der darzustellenden Umgebungsimpedanz  $Z_E$  ist. Wie nah man diesem Idealfall kommen kann, hängt vor allem von drei Faktoren ab [14]:

- der Umgebungsimpedanz  $Z_E$  selbst,
- der Impedanz des haptischen Displays und
- der gewählten Regelungsarchitektur.

Prinzipiell unterscheidet man bei der Regelung von haptischen Displays zwei Ansätze: Impedanz-Architektur und Admittanz-Architektur [14; 16; 17]. Im Folgenden wird hier nur die Impedanz-Architektur betrachtet, bei der Kräfte als Reaktion auf gemessene Verschiebungen vom haptischen Display ausgegeben werden. Das Display arbeitet dann meist kraftgeregelt.

Zur Veranschaulichung der kinematischen Redundanz des Gesamtsystems aus mobiler Plattform und Manipulator dient hier ein vereinfachtes eindimensionales System mit zwei Achsfreiheitsgraden, Bild 2. Die Kinematik dieser Anordnung lässt sich als

$$x_H = q_1 + q_2$$

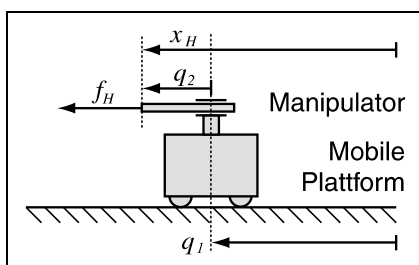
schreiben. Dabei ist  $x_H$  die Hand- bzw. Endeffektorposition und  $q_1, q_2$  sind die Gelenkkoordinaten. Die Bewegungsgleichungen in Gelenkkoordinaten lauten

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ m_2 & m_2 \end{pmatrix} \ddot{\underline{q}} + \begin{pmatrix} b_1 & -b_2 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} \dot{\underline{q}} = \begin{pmatrix} \tau_1 - \tau_2 \\ \tau_2 + f_H \end{pmatrix}.$$

Darin sind  $m_1$  und  $m_2$  die Gelenkmassen,  $b_1$  und  $b_2$  die Gelenkdämpfungen,  $\tau_1$  und  $\tau_2$  die Gelenkkräfte und  $f_H$  die vom Anwender ausgeübte Kraft.

Ein einfaches explizites Kraftregelgesetz mit Vorsteuerung unter Verwendung der Jacobi-Matrix

$$\mathcal{F} = [\mathcal{F}_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{H,i}}{\partial q_j} \end{bmatrix}$$



**Bild 2:** Mobile haptische Schnittstelle mit zwei redundanten Achsfreiheitsgraden  $q_1$  und  $q_2$ .

lautet

$$\underline{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \mathcal{F}^T \{f_{soll} + K_F(f_{soll} - f_{ist})\}.$$

Ein solches Gesetz wird bei nicht redundanten Anordnungen erfolgreich eingesetzt, führt jedoch bei redundanten Systemen zu nicht kontrollierbaren Nullraumbewegungen [18].

Dieses Problem kann durch eine hybride Regelungsstruktur gelöst werden, bei der ein Teil der Achsfreiheitsgrade positionsgeregelt wird, um die Redundanz zu eliminieren. Im Fall des hier betrachteten Systems aus Plattform und Manipulator wird die Plattform positionsgeregelt.

Das Regelungsziel besteht dann in der Optimierung der Plattformposition bezüglich einer im Abschnitt 4.4 näher beschriebenen Kostenfunktion. Für das vereinfachte Modell mit zwei Freiheitsgraden wird als Kostenfunktion

$$L = q_2^2$$

angenommen. Diese Kostenfunktion leitet sich aus der Annahme her, dass die optimale Konfiguration des vereinfachten Modells bei  $q_2 = 0$  liegt.

Aus dem oben beschriebenen Modell eines mobilen haptischen Displays mit zwei Freiheitsgraden, einer hybriden Regelung und der darzustellenden Impedanz  $Z_E$  ergibt sich das Systemmodell in Bild 3.

Für die weiteren Betrachtungen sollen – zumindest im interessierenden Frequenzbereich – folgende Annahmen gelten:

- $F_{M1} \approx 1$   
Übertragungsfunktion Messung  $q_1$ , Lokalisierung der Plattform,
- $F_{M2} \approx 1$   
Übertragungsfunktion Messung  $q_2$ , z. B. Encoder,
- $b_2 \approx 0$   
Dämpfung des zweiten Gelenkes.

Die wahrgenommene Impedanz  $Z^*$ , d. h. die Übertragungsfunktion

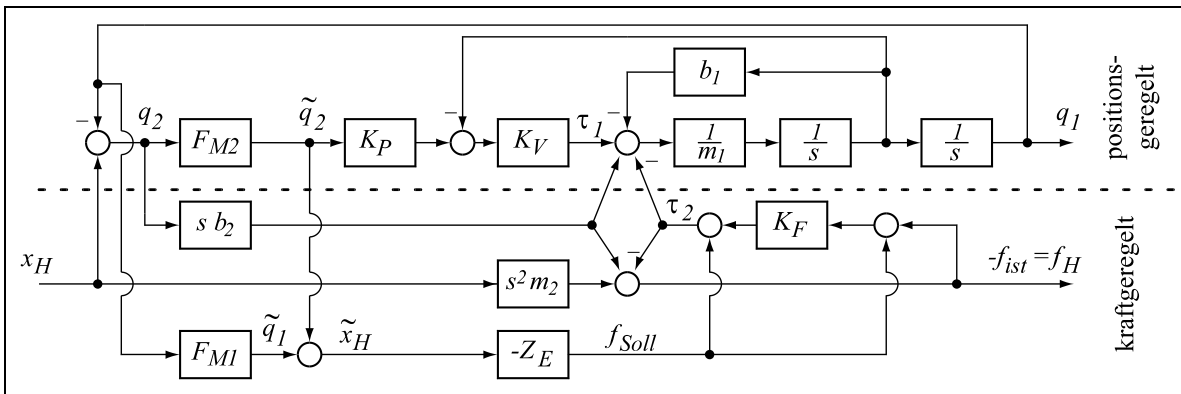
$$Z^*(s) = \frac{f_H(s)}{x_H(s)}$$

reduziert sich dann auf den Ausdruck

$$Z^*(s) = Z_E(s) + \frac{m_2 s^2}{1 + K_F},$$

in dem die Dynamik der geregelten Plattform nicht mehr erscheint. Damit werden die Transparenzeigenschaften allein von dem kraftgeregelt Teilssystem, dem Manipulator, bestimmt. Der Anwender nimmt also die Plattform haptisch nicht wahr.

Die Annahme 2 lässt sich in der Regel problemlos erfüllen, während die Annahmen 1 und 3 Schwerpunkte bei der Entwicklung mobiler haptischer Schnittstellen darstellen und Gegenstand der Diskussion in den nächsten Abschnitten sind.



**Bild 3:** Signalflussplan eines mobilen haptischen Displays mit zwei Freiheitsgraden (Impedanzarchitektur).

$F_{M1}$ ... Übertragungsfunktion Messung $q_1$	$\tilde{q}_1$ ... $q_1$ gemessen
$F_{M2}$ ... Übertragungsfunktion Messung $q_2$	$\tilde{q}_2$ ... $q_2$ gemessen
$K_V, K_P$ ... Verstärkungsfaktoren des Geschwindigkeits- bzw. Positionsreglers der Plattform	$K_F$ ... Verstärkungsfaktor des Kraftreglers des Manipulators

## 4.2 Lokalisierung

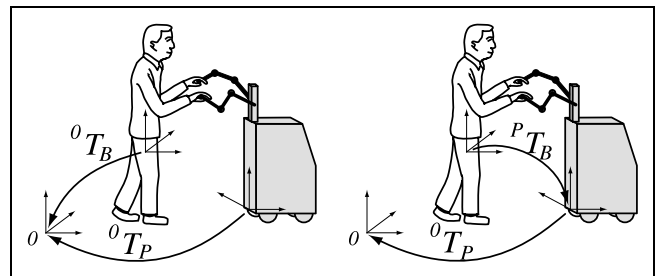
Aus Abschnitt 4.1 folgt die Notwendigkeit, die Lokalisierung der Plattform einer mobilen haptischen Schnittstelle so zu gestalten, dass die Forderung  $F_{M1} \approx 1$  erfüllt wird. Wie diese Bedingung in konkreten Grenzwerten für absolute und relative Genauigkeit sowie die dynamischen Eigenschaften aussieht, ist noch Gegenstand aktueller Untersuchungen. Folgende Forderungen werden derzeit zugrunde gelegt:

- absolute Genauigkeit: 100 mm
- relative Genauigkeit: 1 mm
- Bandbreite: 1 kHz

Diese Vorgaben lassen sich nicht durch ein einzelnes Messverfahren erfüllen, so dass mehrere Messsysteme sowie Verfahren zur Sensordatenfusion eingesetzt werden. Zur Bereitstellung hinreichender relativer Genauigkeit bietet es sich an, auf Odometrie-Verfahren und dynamische Systemmodelle zurückzugreifen. Die absolute Genauigkeit kann durch optische, magnetische oder akustische Lokalisationsverfahren erreicht werden.

Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, ist neben der räumlichen Anordnung der Plattform der MHS auch die Position und Orientierung des Anwenders zu bestimmen. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, den Anwender bezüglich eines raumfesten ( ${}^0T_B$ ) bzw. bezüglich eines plattformfesten Koordinatensystems ( ${}^PT_B$ ) zu lokalisieren, Bild 4. Der erstgenannte Weg erfordert zusätzliche Sensorik, die den gesamten Arbeitsraum erfasst. Die alternative Möglichkeit kann unter Ausnutzung der Plattform- und Manipulator-Sensorik realisiert werden.

Ein besonders eleganter Ansatz ist die ausschließliche Verwendung der Sensorik der Manipulatoren zur Bestimmung von Position und Orientierung des Oberkörpers des Anwenders. Durch Auswertung der Gelenkwinkel können Position und Orientierung beider Hände bestimmt werden. Aus dieser Information kann jedoch nicht direkt auf die räumliche Anordnung des Oberkörpers geschlossen werden, da der



**Bild 4:** Lokalisierung des Anwenders: Raumfeste Koordinaten (links), plattformfeste Koordinaten (rechts).

menschliche Arm kinematisch redundant ist. Unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen wie Manipulierbarkeit, Kraft- und Energieaufwand kann diese Redundanz jedoch aufgelöst werden.

## 4.3 Entkopplung

Die Betrachtung eines vereinfachten mobilen haptischen Displays in Abschnitt 4.1 ergab, dass bei Verschwinden der Dämpfungsterme die Plattform und der Manipulator entkoppelt und damit die dynamischen Eigenschaften der Plattform nicht mehr wahrnehmbar sind. Prinzipiell gibt es zwei Ansätze, die zur Reduktion dieser Dämpfung führen. Zum einen kann durch eine geeignete mechanische Konstruktion die Dämpfung in den Manipulatorgelenken reduziert werden. Zum anderen ist eine Entkopplung durch regelungstechnische Maßnahmen denkbar. Diese setzen jedoch gute Kenntnis der entsprechenden Systemparameter voraus.

## 4.4 Optimale Plattform-Nachführung

Aufgrund der kinematischen Redundanz von mobilen haptischen Schnittstellen besteht die Notwendigkeit, die redundanten Freiheitsgrade durch zusätzliche Bedingungen zu binden. Solche Bedingungen können beispielsweise

durch Optimierung von Gütefunktionen gewonnen werden. Ein Ziel bei der Verwendung haptischer Schnittstellen ist die Bereitstellung optimaler Bewegungsfreiheit für den Anwender. Folglich liegt es nahe, die Manipulierbarkeit der MHS in der Gütefunktion zu berücksichtigen. Die Optimierung eines Manipulierbarkeitsmaßes hat zur Folge, dass die Plattform den Bewegungen des Anwenders folgt und die Schnittstelle dabei einen optimalen Kraft- und Bewegungsraum zur Verfügung stellt.

Wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, sollen für die Positions- und Lagebestimmung der Plattform unter anderem Odometrie-Verfahren eingesetzt werden. Diese arbeiten nur unter der Voraussetzung glatter Bahnverläufe mit der geforderten Genauigkeit. Eine optimale Nachführung der Plattform muss daher auch die entstehenden Bahnradien berücksichtigen.

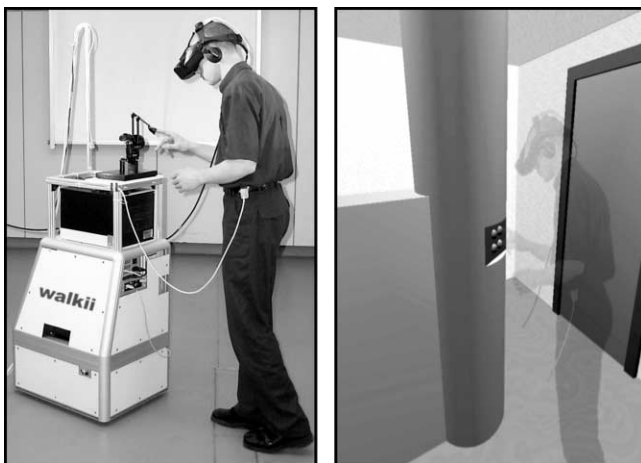
Um die vorgestellten Gütekriterien unter Berücksichtigung der kinematischen und kinetischen Eigenschaften der Plattform erfüllen zu können, ist ein vorausschauendes Verhalten der Plattform notwendig. Die Gütekriterien sind deshalb nicht nur momentan, sondern über einen in die Zukunft reichenden Zeithorizont hinweg zu optimieren. Dazu muss die Bewegung des Anwenders durch geeignete Modelle präzisiert werden.

Für die kurzfristige Bewegungsprädiktion sind dynamische Modelle der menschlichen Fortbewegung einzusetzen. Für längerfristige Vorhersagen werden Verfahren der Intentionserkennung herangezogen.

## 5 Erster Prototyp einer mobilen haptischen Schnittstelle

### 5.1 Technische Realisierung

Für die Erprobung der Methoden, die zur Erfüllung der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Forderungen notwendig sind, wurde ein erster Versuchsaufbau realisiert, der in Bild 5 dargestellt ist. Mit dieser weiträumigen Mensch-System-Schnittstelle ist die einfingerige Exploration



**Bild 5:** Erster Prototyp einer mobilen haptischen Schnittstelle (links) zur einfingerigen Exploration eines virtuellen Raums (rechts).

einer virtuellen Umgebung mit einer Grundfläche von ca.  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  möglich.

Der Anwender kann sich in dem genannten Arbeitsraum frei gehend bewegen und erfährt eine äquivalente Änderung seiner räumlichen Anordnung in der virtuellen Umgebung. Die visuelle, stereoskopische Darstellung der virtuellen Umgebung erfolgt über ein HMD (Head Mounted Display). Die beim Berühren von Objekten in der virtuellen Welt auftretenden Kräfte werden dem Anwender an der Spitze des Zeigefingers dargestellt.

Die mobile haptische Schnittstelle besteht aus einer mobilen, omnidirektionalen Roboterplattform [19] und dem kommerziellen haptischen Eingabegerät PHANTOM Premium 1.0.

Zur Erfassung der räumlichen Anordnung des Anwenders dient ein magnetisches Tracking-System [20] mit je einem Sensor an Kopf und Hüfte des Anwenders. Position und Orientierung des Kopfes in sechs Freiheitsgraden sind Eingangsgrößen für die Berechnung des Stereobildes. Der Sensor an der Hüfte liefert Informationen über Position und Orientierung des Arbeitsraums des Anwenders.

Das Folgeverhalten der MHS wird durch einen Algorithmus sichergestellt, der aus der momentanen Konfiguration des PHANTOM und aus der momentanen Position des Anwenders relativ zur Schnittstelle eine optimale Position und Orientierung der MHS berechnet. Ziel des Algorithmus ist es, die MHS so zu positionieren, dass die Manipulierbarkeit der kinematischen Kette Phantom – Hand und Arm des Anwenders maximal wird. Das Ergebnis dieser Konfigurationsoptimierung dient als Führungsgröße für die Positionsregelung der Plattform.

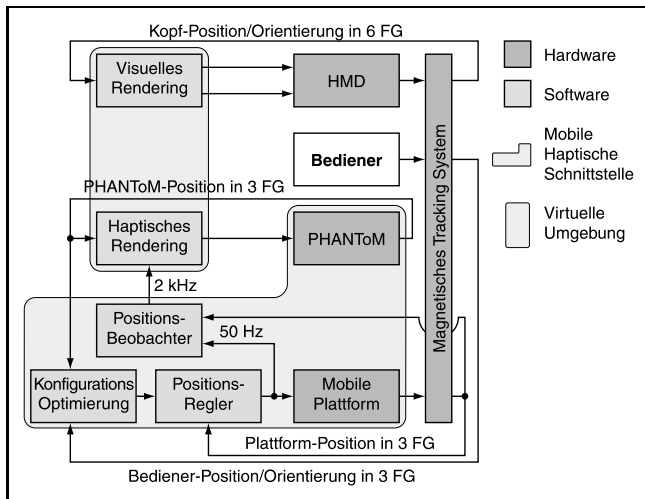
Für die Berechnung der aus der Exploration der virtuellen Umgebung resultierenden Kräfte wurde eine Bibliothek zum haptischen Rendering einfacher, aus geometrischen Primitiven bestehender virtueller Welten angelegt und eingesetzt. Damit werden auf einem Intel Pentium II (450 MHz) Prozessor Abtastfrequenzen von 2 kHz für Umgebungen mit etwa 50 Flächen erreicht.

Da die Abtastfrequenz der Plattformlokalisierung auf 50 Hz begrenzt ist, wurde zur Schätzung der räumlichen Anordnung der MHS ein Beobachter eingesetzt, der Positionsdaten synchron zum haptischen Rendering liefert.

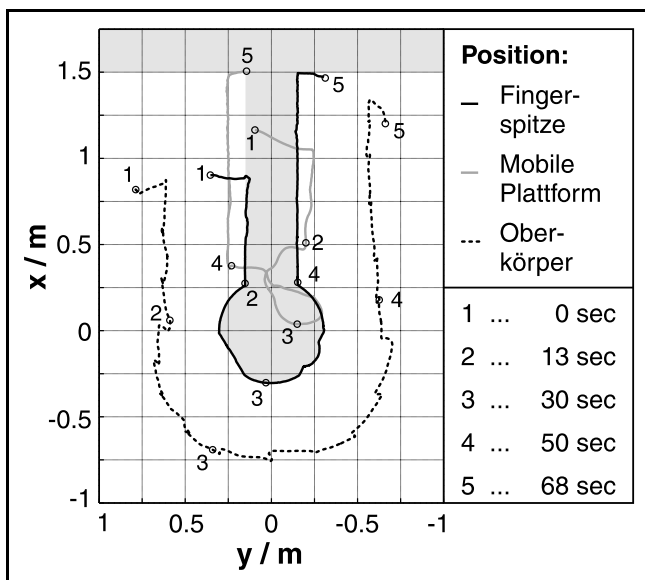
Ein Überblick über die Hard- und Softwarekomponenten der multimodalen weiträumigen Schnittstelle zeigt Bild 6.

### 5.2 Experimentelle Ergebnisse

Zur Demonstration der Funktionalität der mobilen haptischen Schnittstelle wurde ein einfacher virtueller Raum, Bild 5, von einigen Probanden haptisch und visuell exploriert. Dabei bestand die Aufgabe darin, der Kontur des Raumteilers und der Säule mit der Fingerspitze zu folgen. In Bild 7 sind die Bewegungsabläufe eines Probanden und der mobilen haptischen Schnittstelle dargestellt. Der



**Bild 6:** Hard- und Softwarekomponenten des weiträumigen Telepräsenzsystems.



**Bild 7:** Bewegungsablauf: Ein Proband exploriert einfingerig einen Raumteiler und eine Säule (grau schraffiert) in einem virtuellen Raum. Die nummerierten Kreise markieren synchrone Punkte der Trajektorien.

Verlauf der Oberkörperposition zeigt, dass sich die Testperson frei im Raum bewegen kann, was nur bei Verwendung von weiträumigen haptischen Schnittstellen möglich ist. Außerdem zeigt der Verlauf der Fingerposition praktisch kein Eindringen in die virtuellen Objekte. Dieses Verhalten kann nur durch eine haptische Schnittstelle mit externer Basis erreicht werden. Die Bewegung der Plattform resultiert aus der Optimierung der Manipulierbarkeit des PHANToM.

## 6 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag wurde eine neue multimodale Schnittstelle vorgestellt, die einem Benutzer *gleichzeitig* Fortbewegung *und* haptische Interaktion in ausgedehnten realen oder virtuellen Zielumgebungen erlaubt. Dies stellt

einen wesentlichen Schritt in Richtung höherer Immersionsgrade dar.

Mit der Aufgabe der Forderung nach Ortsunveränderlichkeit des Anwenders in seiner lokalen Umgebung wird eine im Vergleich zu Laufbändern und Fußplattformen besonders einfache und wirklichkeitsnahe Realisierung der Lokomotionsschnittstelle ermöglicht. Der dadurch verursachte Implementierungsaufwand für eine mobile haptische Schnittstelle kann durch den Einsatz bereits verfügbarer mobiler Manipulatoren vergleichsweise gering gehalten werden.

Das beschriebene Experimentalsystem zeigt eindrucksvoll, dass die propriozeptive Bewegungswahrnehmung neben dem haptischen Eindruck die Lösung einer Navigationsaufgabe in der Zielumgebung wesentlich unterstützt. Allerdings wird auch der über den heutigen Wissensstand hinausreichende Forschungsbedarf zur Verbesserung der Bedienbarkeit einer mobilen haptischen Schnittstelle deutlich.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 453 „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ gefördert.

## Literatur

- [1] V. Hayward: Survey of Haptic Interface Research at McGill University. *Proceedings of the Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems*, Seiten 91–98, München, Germany, 2001.
- [2] J. M. Hollerbach: Some Current Issues in Haptics Research. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seiten 757–762, San Francisco, California, 2000.
- [3] R. P. Darken: Spatial Orientation and Wayfinding in Large-Scale Virtual Spaces II. *Presence*, Seiten iii–vi, Dez. 1999.
- [4] H. Iwata: Walking About Virtual Environments on an Infinite floor. *Proceedings of the Virtual Reality Conference*, Seiten 286–293, Houston, Texas, 1999.
- [5] R. P. Darken, W. R. Cockayne und D. Carmein: The omnidirectional treadmill: A locomotion device for virtual worlds. *Proceedings of the ACM UIST*, Seiten 213–222, Alberta, Canada, 1997.
- [6] [http://www.sarcos.com/interpic\\_virtualinter.html](http://www.sarcos.com/interpic_virtualinter.html).
- [7] H. Baier, F. Freyberger und G. Schmidt: Interaktives Stereotelesehen – Ein Baustein wirklichkeitsnaher Telepräsenz. *at Automatisierungstechnik*, Seiten 295–303, Juli 2001.
- [8] C. Cruz-Neira, D. Sandin und T. A. DeFanti: Surroundscreen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH*, Anaheim, California, Seiten 135–142, 1993.
- [9] G. Welch, G. Bishop, L. Vicci, S. Brumback, K. Keller und D. Colucci: High-Performance Wide-Area Optical Tracking – The HiBall Tracking System. *Presence*, Seiten 1–21, Feb. 2001.
- [10] C. S. Tzafestas und P. Coiffet: Dextrous Haptic Interaction with Virtual Environments: Hand-Distributed Kinesthetic Feedback and Haptic Perception. *Proceedings of the IARP First International Workshop on Humanoid and Hu-*

- man Friendly Robotics*, Seiten 286–293, Tsukuba, Japan, 1998.
- [11] G. C. Burdea: *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [12] M. Bergamasco, B. Allota, L. Bosio, L. Feretti, G. Parrini, G. M. Prisco, F. Salsedo und G. Sartini: An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, California, Seiten 1449–1454, 1994.
- [13] C. Richard und M. R. Cutkosky: Contact force perception with an ungrounded haptic interface. *Proceedings of the ASME IMECE 6th Annual Symposium on Haptic Interfaces*, Seiten 15–21, Dallas, Texas, 1997.
- [14] J. Hoogen, M. Buss und G. Schmidt: Experimental Results in Control of an Industrial Robot used as a Haptic Display. *Proceedings of the 1st IFAC Conference on Telematics Applications in Automation and Robotics*, Weingarten, Germany, 2001.
- [15] H. Baier, M. Buss und G. Schmidt: Stability and Mode Switching in Closed-Loop Teleoperation Systems. *at Automatisierungstechnik*, Seiten 51–59, Feb. 2000.
- [16] R. Riener, J. Hoogen, M. Ponikvar, R. Burgkart, M. Frey und G. Schmidt: Multimodaler Trainingssimulator für die Orthopädie. *at Automatisierungstechnik*, 2002.
- [17] R. J. Adams und B. Hannaford: A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Seiten 1254–1259, Victoria, Canada, 1998.
- [18] O. Khatib: A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Seiten 43–53, Feb. 1987.
- [19] U. D. Hanebeck und N. Šaldic: A Modular Wheel System for Mobile Robot Applications. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Seiten 17–23, Kjongju, Korea, 1999.
- [20] <http://www.ascension-tech.com>.

Manuskripteingang: 26. Februar 2002.



**Dipl.-Ing. Norbert Nitzsche** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München. Arbeitsgebiet: Telepräsenz und Teleaktion.

Adresse: Technische Universität München, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Theresienstraße 90, D-80290 München, E-Mail: [Norbert.Nitzsche@ei.tum.de](mailto:Norbert.Nitzsche@ei.tum.de)



**Dr.-Ing. Uwe D. Hanebeck** ist am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München tätig. Hauptarbeitsgebiete: Nichtlineare Zustandsschätzung, Sensorsysteme, Lokalisierungsverfahren, mobile Assistenzroboter, weiträumige Telepräsenz.

Adresse: Technische Universität München, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Theresienstraße 90, D-80290 München E-Mail: [Uwe.Hanebeck@ieee.org](mailto:Uwe.Hanebeck@ieee.org)



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Günther Schmidt** ist Inhaber des Lehrstuhls für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München. Hauptarbeitsgebiete: Methoden der Automatisierungstechnik, Robotik und Neuroprothetik.

Adresse: Technische Universität München, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Theresienstraße 90, D-80290 München E-Mail: [Guenther.Schmidt@ei.tum.de](mailto:Guenther.Schmidt@ei.tum.de)