

Transparenz haptischer Telepräsenzsysteme mit konstanter Zeitverzögerung

Transparency of Haptic Telepresence Systems with Constant Time Delay

Sandra Hirche und Martin Buss

In diesem Artikel wird untersucht, wie sich Kommunikationslatenzen zusammen mit einer passivitätsbasierten Regelungsstrategie auf die Performanz, gemessen als Transparenz, eines haptischen Telepräsenzsystems auswirken. Die gefühlte mechanische Impedanz, im Speziellen deren physikalische Parameter Masse, Steifigkeit und Dämpfung, werden als Funktion der Kommunikationslatenz und der Regelungsparameter hergeleitet und mit der Umgebungs-Impedanz verglichen. Die Ergebnisse werden unter Aspekten der menschlichen Wahrnehmung diskutiert. Darauf basierend wird eine transparente Auslegung der Regelungsstrategie vorgeschlagen, wobei die Eigenschaften von realen Telepräsenzsystemen berücksichtigt werden. Abschließend erfolgt die Validierung der Resultate in einem Telepräsenz-Experiment mit einem Freiheitsgrad.

This article investigates how communication network induced time delay together with a passivity based control strategy affect the performance of haptic telepresence systems in terms of transparency (human operators should feel as if they are directly acting in the remote environment). Therefore, the mechanical impedance (force over velocity) perceived by the human operator is compared with the real environment impedance in terms of their physical parameters stiffness, mass, and damping depending on the time delay. The results are discussed from a human haptic perception point of view. Based on that, a tuning rule considering the limitations of real systems is proposed. Finally, the obtained results are validated in a one-degree-of-freedom telepresence experiment.

Schlagwörter: Haptische Telepräsenz, Zeitverzögerung, Transparenz, menschliche Wahrnehmung

Keywords: Haptic telepresence, time delay, transparency, human perception

1 Einleitung

Telepräsenzsysteme ermöglichen dem Menschen die Anwesenheit und das Ausführen von komplexen Manipulationsaufgaben in unzugänglichen (möglicherweise entfernten) Umgebungen ohne physikalisch vor Ort zu sein. Das äußerst vielfältige Anwendungspotenzial dieser Technologie erstreckt sich von den ursprünglich in den 60er-Jahren entwickelten Wartungsaufgaben in radioaktiven/toxischen Umgebungen über die Tele-Diagnose und Produktion, Tele-Medizin und Chirurgie bis hin zu Tele-Trainings-, Ausbildungs- und Entertainment-Applikationen. Einen Überblick dazu gibt das **at**-Schwerpunktheft [1].

Der Bediener¹ kommandiert mittels eines Eingabegerätes (Mensch-Maschine-Schnittstelle, MMS) den entfernten Roboter (Teleoperator, TO), wie in Bild 1 dargestellt. Der Teleoperator interagiert mit der meist unbekanntesten Umgebung; die multimodale Umgebungs-Information (auditiv, visuell, haptisch) wird dem Bediener über die MMS dargestellt. Zur Signalübertragung zwischen MMS und TO werden Kommunikationsnetze, wie beispielsweise das Internet, genutzt.

Die haptische (Kraft und Bewegung) Rückkopplung ist aus regelungstechnischer Sicht besonders interessant, da hier-

¹ In diesem Artikel wird stellvertretend für *Bediener/in* nur die männliche Form *Bediener* verwendet.

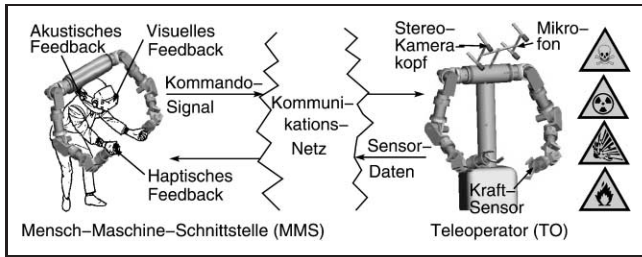


Bild 1: Multimodales Telepräsenzsystem.

bei ein globaler Regelkreis über die Kommunikationsstrecke geschlossen wird. Ohne weitere regelungstechnische Maßnahmen destabilisieren die auftretenden Kommunikationslatenzen – im Internet zwischen einigen Hundertstel bis zu mehreren Zehntel Sekunden – den Regelkreis. Stabilität für beliebig große konstante Zeitverzögerung (auch Totzeit genannt) wird durch den häufig verwendeten passivitätsbasierten Ansatz – die so genannte Leistungswellen-Transformation – erreicht [2;3]. Auf diesem Ansatz basierende Erweiterungen stabilisieren das haptische Telepräsenzsystem auch für zeitvariable Zeitverzögerungen [4;5] und Paketverluste [6;7], wie sie im Internet auftreten. Eine Übersicht über weitere Regelungsansätze – meist auf konstante Zeitverzögerungen beschränkt – ist in [8] zu finden.

Die Performanz eines haptischen Telepräsenzsystems wird durch die Wirklichkeitsnähe oder *Transparenz* beurteilt. Transparenz ist dann erreicht, wenn der Mensch nicht mehr zwischen direkter und Tele-Interaktion mit einer Umgebung unterscheiden kann. Für Transparenz fordert [9] die Gleichheit der dem Bediener dargestellten Impedanz und der Umgebungsimpedanz. Einerseits ist diese Forderung im realen System [10;11], insbesondere wenn Kommunikationslatenzen [12] auftreten, kaum zu erfüllen. Andererseits ist der Mensch nicht in der Lage, beliebig kleine physikalische Größen wahrzunehmen, wie psychophysische Erkenntnisse zeigen. Diese Wahrnehmungsschwellen werden im Begriff *just noticeable difference* (JND) ausgedrückt. Berücksichtigt man diese Tatsache, so kann die Transparenz-Forderung [9] als hinreichend, aber nicht unbedingt notwendig eingestuft werden. Im Hinblick auf die aus der Literatur bekannten psychophysischen Resultate eignen sich viele Transparenzmaße, wie z.B. die Impedanz-Fehlernorm im Frequenzbereich [13], nicht für eine Aussage über das erreichte Transparenz-Niveau unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung. Der Vergleich der dem Bediener dargestellten Impedanz mit der Umgebungsimpedanz über die mechanischen Parame-

ter Steifigkeit, Masse und Dämpfung erlaubt eine wahrnehmungsbezogene Interpretation; hierfür existieren JND-Resultate [14–16]. Diese Parameter werden in [17] für Spezialfälle hergeleitet und in [8] zum Vergleich verschiedener Telepräsenz-Regelungsarchitekturen herangezogen, jedoch ohne Berücksichtigung des Wahrnehmungsaspektes.

In diesem Artikel wird ein Verfahren zur Transparenz-Analyse eines haptischen Telepräsenzsystems mit konstanter Zeitverzögerung vorgestellt, welches auf einer Approximation der dargestellten Impedanz für tiefe Frequenzen beruht. Die daraus hergeleiteten mechanischen Eigenschaften der dargestellten Impedanz werden als Funktion der Zeitverzögerung dargestellt und mit denen der Umgebungsimpedanz verglichen. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung bekannter menschlicher Wahrnehmungsschwellen diskutiert; darauf basierend wird die Auslegung im realen Telepräsenzsystem vorgeschlagen. Abschließend erfolgt die Validierung in einem Experiment mit einem Freiheitsgrad.

In Abschnitt 2 werden die Grundlagen der Leistungswellen-Transformation und der Transparenz behandelt; in Abschnitt 3 wird die Methode zur Transparenz-Analyse vorgestellt und für prototypische Kontakt-Situationen angewendet. Die Interpretation und Auslegung unter Berücksichtigung menschlicher Wahrnehmungsschwellen sowie die experimentelle Validierung erfolgt in den Abschnitten 4 und 5.

2 Grundlagen

Das haptische Telepräsenzsystem besteht aus der kraftrückkopplungsfähigen Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) und dem Teleoperator (TO), der mit der im Allgemeinen unbekannt, entfernten Umgebung in Kontakt ist. Die prinzipielle Architektur ist in Bild 2 dargestellt; auf das Kommunikations-Teilsystem mit der Leistungswellen-Transformation wird im nächsten Unterabschnitt näher eingegangen.

Der Mensch bedient die MMS, wobei er eine Kraft f_h bzw. Geschwindigkeit \dot{x}_h einprägt. Die Geschwindigkeit der MMS \dot{x}_h wird über die Kommunikationsstrecke zum Teleoperator übertragen, wo sie als Sollsignal \dot{x}_t^d für den lokalen Geschwindigkeitsregelkreis dient. Der Teleoperator interagiert mit der entfernten Umgebung mit der Geschwindigkeit \dot{x}_t . Die zurückübertragene Umgebungs-Interaktionskraft f_e dient als Referenzsignal f_h^d für den lokalen Kraftregelkreis an der MMS. Die MMS und der

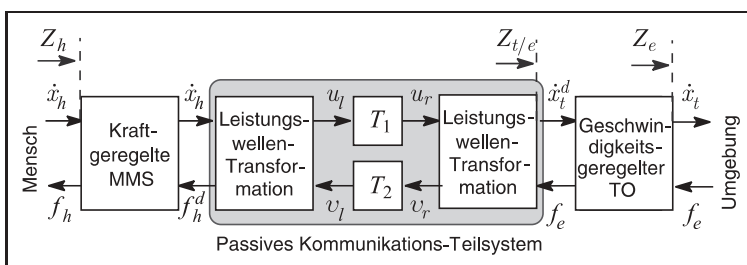


Bild 2: Regelungsarchitektur basierend auf der Leistungswellen-Transformation.

Teleoperator sind über die bilaterale Kommunikationsstrecke mit den konstanten Zeitverzögerungen T_1 und T_2 im Vorwärts- bzw. Rückwärtszweig verbunden. Dabei wird über den Bediener und die entfernte Umgebung ein globaler Regelkreis geschlossen. Ohne weitere regelungstechnische Maßnahmen ist das haptische Telepräsenzsystem wegen der Zeitverzögerungen instabil.

2.1 Stabilität für konstante Zeitverzögerungen

Besonderes Merkmal des globalen haptischen Telepräsenzregelkreises sind die weitestgehend unbekannt Modelle seiner Teilsysteme *Mensch* und *Umgebung*. Aus diesem Grund eignet sich das Passivitätskonzept für seine Analyse und Synthese. Die Passivität des haptischen Telepräsenzsystems ist hinreichend für Stabilität [2]. Ein System von zusammengeschalteten Netzwerk-Elementen (n -Toren), wie in Bild 2 dargestellt, ist passiv, wenn jedes einzelne Element passiv ist [18]. Ein Element ist dann passiv, wenn es keine Energie generiert, d. h. wenn es maximal soviel Energie abgibt, wie anfänglich im Element gespeichert war

$$E_{\text{in}}(t) = \int_0^t \mathbf{u}^T(\tau) \mathbf{y}(\tau) d\tau \geq -E(0) \quad \forall t > 0. \quad (1)$$

Hierbei stellt $E_{\text{in}}(t)$ die von außen zugeführte Energie dar, $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ den m -dimensionalen Ein- bzw. Ausgang und $E(0)$ die zur Zeit $t = 0$ im System gespeicherte Energie, welche im Folgenden ohne Beschränkung der Allgemeinheit zu $E(0) = 0$ angenommen wird. In der Standard-Architektur werden zwischen der MMS und dem Teleoperator Kraft- und Geschwindigkeitssignale übertragen, da die Abbildung zwischen Kraft und Geschwindigkeit im Allgemeinen passiv ist, bzw. durch entsprechend ausgelegte lokale Regler passiviert werden kann. Unter der realistischen Annahme, dass sowohl der Mensch [19] als auch die Umgebung passives Verhalten aufweisen, sind demnach die Teilsysteme (Eintore) *Mensch/MMS* und *Teleoperator/Umgebung* passiv.

Das Kommunikations-Zweitor mit den konstanten Zeitverzögerungen T_1 und T_2 ist nicht passiv wie in [2] nachgewiesen. Die Leistungswellen-Transformation – erstmals angewendet für haptische Telepräsenzsysteme in [2], später erweitert in [3] – bildet das zeitverzögernde Kommunikations-Zweitor auf eine lange, verlustlose Leitung ab und passiviert somit das Kommunikations-Teilsystem, siehe Bild 2. Zur vereinfachten Betrachtung wird im weiteren Verlauf ein Telepräsenzsystem mit einem Freiheitsgrad angenommen. Die Transformationsvorschrift für die Leistungswellengrößen u und v (Index l für links-, r für rechtsseitig) lautet wie folgt

$$\begin{aligned} u_l &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_h^d + b\dot{x}_h), & u_r &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_e + b\dot{x}_r^d), \\ v_l &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_h^d - b\dot{x}_h), & v_r &= \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_e - b\dot{x}_r^d), \end{aligned} \quad (2)$$

mit $u_r(t) = u_l(t - T_1)$ und $v_l(t) = v_r(t - T_2)$. Der frei wählbare Entwurfsparameter $b \in \mathbb{R}_+$ repräsentiert die Wellen-Impedanz der Kommunikationsstrecke. Die Energiebilanz (1) mit dem Eingang $\mathbf{u}^T = [\dot{x}_h - f_e]$ und dem Ausgang $\mathbf{y}^T = [f_h^d \ \dot{x}_r^d]$ unter Verwendung der umgeformten Transformationsgleichungen (2) ergibt

$$E_{\text{in}}(t) = \int_{t-T_1}^t u_l^2(\tau) d\tau + \int_{t-T_2}^t v_r^2(\tau) d\tau \geq 0 \quad \forall t > 0, \quad (3)$$

ist also positiv und erfüllt damit die Passivitätsbedingung (1). Damit sind alle Teilsysteme passiv. Das Telepräsenzsystem ist für beliebig große, konstante Zeitverzögerungen passiv und damit stabil.

2.2 Transparenz und menschliche Wahrnehmung

Zielsetzung beim Entwurf von haptischen Telepräsenzsystemen ist die *Transparenz*; der Bediener soll zwischen der direkten und der Tele-Interaktion mit einer Umgebung nicht unterscheiden können. In [9] wird für Transparenz die Gleichheit der Umgebungs- und der dem Bediener dargestellten Impedanz gefordert

$$Z_h = Z_e. \quad (4)$$

Die mechanische Impedanz Z ist definiert als die Abbildung von der Geschwindigkeit auf die Kraft $Z: \dot{x} \rightarrow f$. Im Folgenden wird angenommen, dass die mechanische Impedanz hinreichend genau durch ein LTI-System approximiert und entsprechend durch die Übertragungsfunktion $Z(s) = f(s)/\dot{x}(s)$ dargestellt werden kann. In realen Systemen ist die Transparenz-Forderung (4) kaum einzuhalten [10; 11], insbesondere, wenn das System mit Zeitverzögerungen behaftet ist [12]. Unter Berücksichtigung der im Folgenden diskutierten menschlichen Wahrnehmungsschwellen sind diese Transparenz-Forderungen als hinreichend, aber nicht notwendig zu interpretieren. Wünschenswert wäre ein Transparenzmaß, in welchem derartige Wahrnehmungsschwellen berücksichtigt werden können. Viele der entwickelten Transparenzmaße, beispielsweise in Form einer Impedanz-Fehlernorm im Frequenzbereich [13], lassen dies jedoch nicht zu.

Zahlreichen psychophysischen Studien entsprechend ist der Mensch nicht in der Lage, beliebig kleine Änderungen von physikalischen Reizen wahrzunehmen. Die absolute Wahrnehmungsschwelle wächst bei kraftbezogenen Größen ungefähr proportional [20] mit dem absoluten Wert des Reizes. Der Proportionalitätsfaktor, in der Literatur *just noticeable difference* (JND) genannt, liegt für Steifigkeit zwischen 8% (Finger) [15] und $(23 \pm 3)\%$ (Hand/Arm) [14]. Der Massen-JND ist in [16] mit $(21 \pm 3,5)\%$ (Finger) angegeben.

Eine Möglichkeit, diese Erkenntnisse für eine wahrnehmungsorientierte Transparenz-Evaluierung zu nutzen, wird hier vorgestellt. Basis dafür ist ein Vergleich der mechanischen Parameter Steifigkeit, Masse und Dämpfung von dargestellter Impedanz und Umgebungsimpedanz.

3 Transparenz-Analyse

Ziel der Transparenz-Analyse ist es, einen analytischen Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften der an der MMS dargestellten Impedanz und den Parametern des Kommunikations-Teilsystems inklusive der Leistungswellen-Transformation sowie der Umgebungsimpedanz zu finden.

Um ausschließlich den Einfluss der Zeitverzögerung auf die Transparenz zu beurteilen, wird die Dynamik der MMS und des Teleoperators zunächst als vernachlässigbar angenommen. Entsprechend sind die Soll- und Istgrößen der lokalen Regelkreise gleich: die Kräfte an der MMS $f_h = f_h^d$, und die Geschwindigkeit am Teleoperator $\dot{x}_t = \dot{x}_t^d$. Mit den entsprechend umgeformten Gleichungen (2) wird zunächst die dargestellte Impedanz Z_h im Laplace-Bereich berechnet

$$Z_h(s) = \frac{f_h(s)}{\dot{x}_h(s)} = b \frac{1 + R e^{-sT}}{1 - R e^{-sT}} \quad \text{mit } T = T_1 + T_2, \quad (5)$$

wobei

$$R = \frac{v_r}{u_r} = \frac{Z_e - b}{Z_e + b}, \quad (6)$$

den in Analogie zur Netzwerk-Theorie so genannten Reflexionsfaktor darstellt. Für verschwindende Zeitverzögerung $T = 0$ ist die dargestellte Impedanz Z_h gleich der Umgebungsimpedanz Z_e , das Telepräsenzsystem ist demnach transparent im Sinne von (4). Wegen des Zeitverzögerungsglieds hat die Übertragungsfunktion (5) unendlich viele Pol- und Nullstellen. Um eine anschaulich physikalische Darstellung der dargestellten Impedanz zu erhalten, wird diese durch ein System niedriger Ordnung approximiert.

3.1 Approximation der dargestellten Impedanz

Die Zeitverzögerung wird durch eine Padé-Approximation substituiert. Die Ordnung der Übertragungsfunktion der dargestellten Impedanz (5) ist abhängig von der Ordnung N der Padé-Approximation, wobei diese für Frequenzen $\omega < N/(3T)$ gilt. Zur vereinfachten Betrachtung wird die Zeitverzögerung hier durch die Padé-Approximation erster Ordnung ($N = 1$) ersetzt

$$e^{-sT} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}s}{1 + \frac{T}{2}s} \quad \text{für } \omega < \frac{1}{3T}. \quad (7)$$

Durch Einsetzen von (7) in (5) erhält man die Approximation der dargestellten Impedanz

$$Z_h(s) \approx Z_h^{\text{app}}(s) = b \frac{1 + R + \frac{T}{2}s(1 - R)}{1 - R + \frac{T}{2}s(1 + R)}. \quad (8)$$

Entsprechend dem Geltungsbereich der Padé-Approximation wird (8) zur weiteren Analyse als ein niederfrequenter Anteil $Z_{h,nf}^{\text{app}}$ und ein hochfrequenter Anteil $Z_{h,hf}^{\text{app}}$ dargestellt, die sich wie folgt überlagern

$$Z_h^{\text{app}}(s) = Z_{h,nf}^{\text{app}}(s) Z_{h,hf}^{\text{app}}(s), \quad (9)$$

mit $|Z_{h,hf}^{\text{app}}(s)| \approx 1$ für tiefe Frequenzen (Geltungsbereich der Padé-Approximation). Die Komponente $Z_{h,nf}^{\text{app}}$ stellt die

Approximation für die dargestellte Impedanz bei tiefen Frequenzen dar. Eine gültige Approximation für höhere Frequenzen erhält man durch Einsetzen der entsprechenden Padé-Approximation höherer Ordnung. Generell ist jedoch nur der untere Frequenzbereich für die Transparenz-Analyse interessant, da die Bandbreite haptischer (propriozeptiver und kinästhetischer) Wahrnehmung auf ca. 60 Hz beschränkt ist.

Die Parameter der approximierten dargestellten Impedanz $Z_{h,nf}^{\text{app}}$ können als Funktion der Zeitverzögerung T und der Wellen-Impedanz b sowie den Parametern der Umgebungsimpedanz hergeleitet werden. Eine Analyse dieser Parameterabhängigkeit wird exemplarisch für die prototypischen Fälle Bewegung im *Freiraum* und *Wandkontakt* durchgeführt.

3.2 Transparenz mit Zeitverzögerung

3.2.1 Freiraum

Bei der Bewegung im Freiraum wirkt auf den Teleoperator keine Umgebungskraft, die Umgebungsimpedanz ist $Z_e = 0$. Wird der sich daraus ergebende Reflexionsfaktor $R(s) = -1$ in (8) eingesetzt, ergibt sich die approximierte dargestellte Impedanz in der Darstellung (9) zu

$$Z_h^{\text{app}}(s) = m_h s \frac{1}{\frac{T}{2}s + 1}, \quad (10)$$

mit

$$m_h = \frac{bT}{2}. \quad (11)$$

Der linke Faktor in (10) repräsentiert die Approximation $Z_{h,nf}^{\text{app}}$ für tiefe Frequenzen. Somit ist die dargestellte Impedanz für tiefe Frequenzen eine Masse m_h , die linear von der Gesamt-Zeitverzögerung und der Wellen-Impedanz abhängt.

3.2.2 Wandkontakt

Im Kontakt mit einer Wand wirkt eine Kraft auf den Teleoperator, die mit der Steifigkeit k_e proportional zur Eindringtiefe ist. Die Übertragungsfunktion der Umgebungsimpedanz ist dementsprechend $Z_e = k_e/s$. Durch Einsetzen des entsprechenden Reflexionsfaktors (6)

$$R = \frac{k_e - bs}{k_e + bs}$$

in (8) berechnet sich die approximierte dargestellte Impedanz in der Darstellung (9) zu

$$Z_h^{\text{app}}(s) = \frac{k_h}{s} \left(1 + \frac{bT}{2k_e} s^2 \right), \quad (12)$$

mit

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{k_e} + \frac{T}{2b}. \quad (13)$$

Der linke Faktor in (12) stellt die Approximation $Z_{h,nf}^{\text{app}}$ für tiefe Frequenzen dar. Die dargestellte Impedanz verhält sich für tiefe Frequenzen wie eine Feder, die dargestellte Steifigkeit k_h ist jedoch kleiner als die Umgebungsteifigkeit k_e .

Letztendlich verhält sich das Kommunikations-Teilsystem wie eine Feder der Steifigkeit $2b/T$ in Reihe geschaltet mit der Umgebungssteifigkeit k_e .

3.3 Transparenz für erweiterte Architekturen

Mit der vorgeschlagenen Methodik zur Transparenz-Analyse durch Approximation und Berechnung der mechanischen Eigenschaften der dargestellten Impedanz lassen sich neben der Zeitverzögerung auch andere Effekte evaluieren, wie beispielsweise der Einfluss nichtvernachlässigbarer Dynamik von MMS/Teleoperator und Architektur-Erweiterungen. Voraussetzung dafür ist, dass die dargestellte Impedanz (5) analytisch darstellbar ist.

Exemplarisch wird hierfür die in [21] eingeführte und in Bild 3 dargestellte Architektur-Erweiterung durch Tiefpass-Filterung der Leistungswellengrößen zur Abschwächung von Wellenreflexionen untersucht. Wellenreflexionen entstehen an diskontinuierlichen Impedanz-Übergängen zwischen dem Kommunikations-Teilsystem mit der Wellen-Impedanz b und der davon im Allgemeinen abweichenden Umgebungsimpedanz Z_e ; sie führen zu unerwünschtem oszillierendem Verhalten von MMS und Teleoperator. Für den Erhalt der Passivität des Kommunikations-Teilsystems darf die Verstärkung des Filters eins nicht überschreiten $|G_{lp}(j\omega)| \leq 1 \forall \omega$ [21].

Der Reflexionsfaktor (6) wird durch das Tiefpass-Filter modifiziert

$$R^* = G_{lp} R.$$

Um den Einfluss der erweiterten Architektur auf die Transparenz zu evaluieren, wird nun der modifizierte Reflexionsfaktor R^* in (8) eingesetzt und analog zu den vorhergehenden Fällen die Komponente $Z_{h,nf}^{app}$ (9) ausgewertet. Wird beispielsweise ein Filter der Form

$$G_{lp}(s) = \frac{\lambda}{s + \lambda},$$

$\lambda > 0$, angesetzt, so ergibt sich für die Bewegung im Freiraum die approximierte dargestellte Impedanz

$$Z_{h,nf}^{app} = m_h s \quad \text{mit} \quad m_h = \frac{bT}{2} + \frac{b}{2\lambda}.$$

Im Vergleich mit (10) und (11) wird die durch die Zeitverzögerung induzierte virtuelle Masse durch das Filter um die Masse $b/2\lambda$ erhöht; dabei führt eine geringere Filterbandbreite λ zu einer größeren zusätzlichen virtuellen Masse. Ähnlich verhält es sich mit nicht kompensierter Dynamik

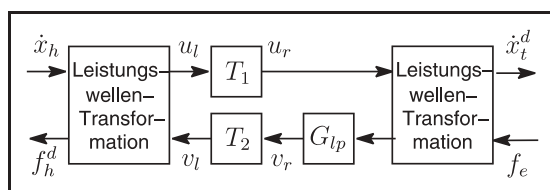


Bild 3: Kommunikations-Teilsystem bei erweiterter Architektur mit Tiefpass-Filter.

der MMS. Deren Trägheit addiert sich, wie leicht nachzuweisen, zur virtuellen Masse hinzu.

Für den vorher schon analysierten Wandkontakt erhält man für die Niederfrequenz-Komponente der approximierten dargestellten Impedanz

$$Z_{h,nf}^{app} = \frac{k_h}{s} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{k_h} = \frac{1}{k_e} + \frac{T}{2b} + \frac{1}{2b\lambda}.$$

Das Tiefpass-Filter wirkt sich wie eine zusätzlich in Reihe geschaltete Feder mit der Steifigkeit $2b\lambda$ aus wie durch Vergleich mit (12) und (13) ersichtlich. Je niedriger die Filterbandbreite ist, desto stärker wird die dargestellte Steifigkeit reduziert.

4 Wahrnehmungsorientierter Entwurf im realen Telepräsenzsystem

Im Folgenden wird der Einfluss der Kommunikationslatenz und der Wellen-Impedanz b , als Einstellparameter der Leistungswellen-Transformation, auf die dargestellte Impedanz unter dem Aspekt der menschlichen Wahrnehmung diskutiert. Für eine gegebene Gesamt-Zeitverzögerung T ist Transparenz im Sinne von (4) nur erreicht, wenn im Freiraum $b \rightarrow 0$ und im Wandkontakt $b \rightarrow \infty$ gilt, wie einfach aus (11) bzw. (13) herzuleiten ist. Diese gegensätzlichen Entwurfsforderungen lassen sich abschwächen, wenn menschliche Wahrnehmungsschwellen und Eigenschaften des realen Telepräsenzsystems berücksichtigt werden. Aufgrund robust auszulagernder Regelung und beschränkter Stellgröße lässt sich die Dynamik von MMS und Teleoperator im realen System nicht vollständig kompensieren. Auch ohne Zeitverzögerung wird Transparenz im Sinne von (4) nicht erreicht. Die Wellen-Impedanz b lässt sich nun so einstellen, dass durch Kommunikationslatenzen keine für den Bediener wahrnehmbare zusätzliche Transparenz-Verschlechterung erfolgt, wie im Folgenden für die prototypischen Fälle *Freiraum* und *Wandkontakt* diskutiert.

4.1 Virtuelle Masse im Freiraum

Bei Bewegung des Teleoperators im Freiraum spürt der Bediener eine Trägheit, die durch die Kommunikationslatenz und die Leistungswellen-Transformation induziert ist. Die dargestellte virtuelle Masse m_h steigt proportional (11) mit der Gesamt-Zeitverzögerung T und der Wellen-Impedanz b , wie in Bild 4 dargestellt. Damit der Bediener keine Masse spürt, muss b so gewählt werden, dass die dargestellte Masse kleiner als die absolute Wahrnehmungsschwelle für Masse ist: $m_h < \Delta m$. Damit ergibt sich für die Wellen-Impedanz die Entwurfsforderung $b < 2\Delta m/T$.

Im realen Telepräsenzsystem kann die MMS-Trägheit nicht vollständig kompensiert werden; dem Bediener wird auch ohne Zeitverzögerung eine Masse m_{MMS} dargestellt. Bei gegebener Zeitverzögerung kann die Wellen-Impedanz nun so gewählt werden, dass die zusätzlich induzierte Masse im Bereich des JNDs, also unterhalb der Wahrnehmungs-

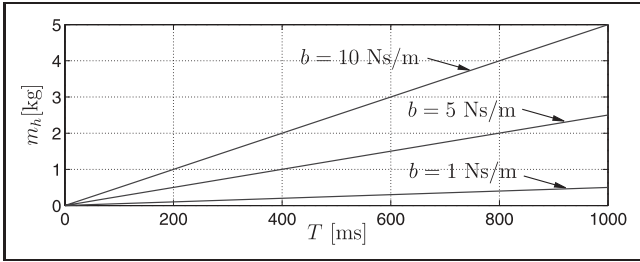


Bild 4: Dargestellte virtuelle Masse im Freiraum abhängig von der Gesamt-Zeitverzögerung T und der Wellen-Impedanz b .

schwelle, liegt. Wie mit (11) leicht nachzuweisen, lautet die Entwurfsforderung dann

$$b < \frac{2}{T} \text{JND}_m m_{\text{MMS}}, \quad (14)$$

wobei JND_m den Massen-JND darstellt. Die Transparenz wird dann durch die Kommunikationslatenz nicht zusätzlich verschlechtert.

Beispiel Bei dem haptischen Eingabegerät ViSHaRD10 [22] ist im besten Fall immer noch eine Trägheit von $m_{\text{MMS}} = 8 \text{ kg}$ spürbar. Ausgehend von einem Massen-JND von $\text{JND}_m = 21\%$ [16] und einer im Internet realistischen Gesamt-Zeitverzögerung von $T = 160 \text{ ms}$ muss die Wellen-Impedanz entsprechend (14) $b < 21 \text{ Ns/m}$ erfüllen.

4.2 Reduzierte Steifigkeit im Wandkontakt

Weist die Umgebung eine Feder-Charakteristik auf, so wird dem Bediener eine reduzierte Steifigkeit dargestellt, die Umgebung fühlt sich weicher an, als sie tatsächlich ist. Die dargestellte Steifigkeit hängt dabei nichtlinear von den Kommunikationsstrecken-Parametern und der Umgebungssteifigkeit ab (13). Bei großer Umgebungssteifigkeit ist die dargestellte Steifigkeit schon bei sehr geringer Zeitverzögerung stark reduziert, prozentual stärker als bei niedriger Umgebungssteifigkeit, wie aus Bild 5 ersichtlich. Generell sind weiche Umgebungen transparenter darstellbar als harte Kontakte. Im Bereich großer Zeitverzögerungen resultiert eine zusätzliche Zeitverzögerung in einer prozentual geringeren Steifigkeits-Reduktion als bei kleinen Zeitverzögerungen. Damit der Bediener den Einfluss der Kommunikationsstrecke nicht merkt, muss die dadurch reduzierte Steifigkeit im Bereich des JNDs liegen, also

$$k_h > (1 - \text{JND}_k) k_e \quad (15)$$

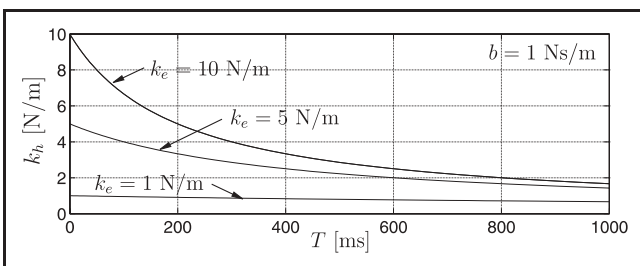


Bild 5: Dargestellte Steifigkeit k_h abhängig von der Gesamt-Zeitverzögerung T und der Umgebungssteifigkeit k_e .

wobei JND_k den Steifigkeits-JND repräsentiert. Die Wellen-Impedanz b muss dazu

$$b > \frac{T}{2} (\text{JND}_k^{-1} - 1) k_e, \quad (16)$$

erfüllen, wie sich unter Verwendung von (13) leicht herleiten lässt.

Beispiel Soll eine Wand mit einer Steifigkeit von $k_e = 20000 \text{ N/m}$ bei einer Gesamt-Zeitverzögerung von $T = 160 \text{ ms}$ transparent für den Menschen dargestellt werden, so muss bei einer JND-Annahme von $\text{JND}_k = 23\%$ [14] die Wellen-Impedanz $b \geq 5357 \text{ Ns/m}$ sein. Mit diesem Wert beträgt die im Freiraum dargestellte virtuelle Masse jedoch $m_h = 427 \text{ kg}$ (11).

Letztendlich ist die darstellbare Steifigkeit besonders bei harten Kontakten in einem realen System auch ohne Zeitverzögerung schon reduziert. Üblicherweise wird am Teleoperator eine Compliance-Regelung zur Verhinderung von Kontakt-Instabilitäten eingesetzt. Die resultierende Steifigkeit $k_{t/e}$ des compliance-geregelten Teleoperators zusammen mit der Umgebung wird dann anstatt k_e in (16) eingesetzt, wobei sich $k_{t/e}$ aufgrund serieller Anordnung der Steifigkeiten entsprechend $k_{t/e}^{-1} = k_e^{-1} + k_t^{-1}$ aus der Steifigkeit k_t des compliance-geregelten Teleoperators und der Steifigkeit k_e der Umgebung zusammensetzt.

Beispiel Für das vorherige Anwendungsbeispiel mit der Steifigkeit des compliance-geregelten Teleoperators von $k_t = 900 \text{ N/m}$ [23], ergibt sich zunächst eine gegenüber der Umgebungssteifigkeit deutlich reduzierte Steifigkeit $k_{t/e} = 861 \text{ N/m}$. Dies resultiert entsprechend (16) in der Entwurfsforderung $b > 231 \text{ Ns/m}$. Diese liegt schon bedeutend näher an der Entwurfsforderung für Freiraum im realen System.

4.3 Obere Schranke der dargestellten Steifigkeit

Ein weiteres interessantes Ergebnis für den Fall *Wandkontakt* ist, dass die dargestellte Steifigkeit eine obere Grenze nicht überschreiten kann, d. h. $k_h \leq k_{h,\text{max}}$. Wie in Bild 6 gezeigt, nähert sich die dargestellte Steifigkeit mit steigender Umgebungssteifigkeit asymptotisch dieser Grenze an. Die obere Grenze für die dargestellte Steifigkeit (13) ist

$$k_{h,\text{max}} = \lim_{k_e \rightarrow \infty} k_h = \frac{2b}{T}. \quad (17)$$

Die Steifigkeitsgrenze ist unabhängig von der Umgebungssteifigkeit, sie hängt lediglich von der Gesamt-Zeitverzögerung T und der Wellen-Impedanz b ab. Der Mensch empfindet eine Wand als hart, wenn die Steifigkeit größer als 24200 N/m ist [24]. Selbst unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung können harte Wände nur für sehr kleine Zeitverzögerung und sehr große Wellen-Impedanz transparent im Sinne von (15) dargestellt werden.

Wird das reale System mit dem compliance-geregelten Teleoperator betrachtet, so ergibt sich für die Steifigkeit von Teleoperator und Umgebung $\lim_{k_e \rightarrow \infty} k_{t/e} = k_t$. Damit ein

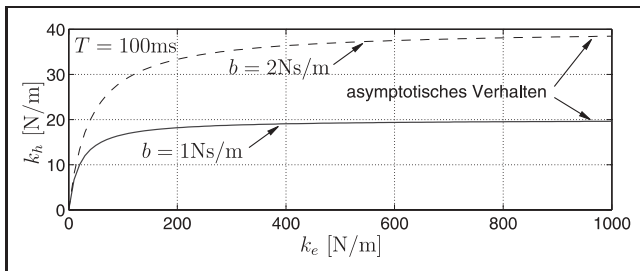


Bild 6: Dargestellte Steifigkeit k_h abhängig von der Umgebungssteifigkeit k_e und der Wellen-Impedanz b .

Transparenz-Unterschied gegenüber dem nicht zeitverzögerten System für den Menschen nicht wahrnehmbar ist, muss (15) und damit für die Wellen-Impedanz (16) gelten, wobei in dieser Betrachtung die Teleoperator-Steifigkeit k_t anstelle von k_e eingesetzt wird.

Beispiel Mit den Werten aus dem vorherigen Beispiel muss $b > 241$ Ns/m gewählt werden.

4.4 Wahrnehmbarkeit der Steifigkeitsänderung

In einigen Telepräsenz-Anwendungen, beispielsweise in der Tele-Chirurgie, ist nicht nur der absolute Wert der dargestellten Steifigkeit von Bedeutung, sondern auch die Möglichkeit, Materialien/Gewebe unterschiedlicher Steifigkeit haptisch unterscheiden zu können. Wie schon durch das asymptotische Verhalten der dargestellten Steifigkeit in Bild 6 angezeigt, resultiert eine bestimmte Änderung der Umgebungssteifigkeit in einer geringeren Änderung der dargestellten Steifigkeit. Bei hoher Zeitverzögerung und hoher Umgebungssteifigkeit ist eine Änderung möglicherweise für den Menschen nicht mehr wahrnehmbar. Damit der Mensch eine Änderung der Umgebungssteifigkeit von k_e^0 auf k_e wahrnimmt, muss die entsprechende prozentuale Änderung $\delta k_h = |k_h - k_h^0|/k_h^0$ der dargestellten Steifigkeit größer als der JND sein

$$\delta k_h = \frac{2b\delta k_e}{2b + Tk_e} \geq \text{JND}_k,$$

wobei $k_h^0 = k_h(k_e^0)$ entsprechend (13), und δk_e analog zu δk_h definiert sind. Entsprechend muss die Wellen-Impedanz so eingestellt werden, dass

$$b \geq \frac{\text{JND}_k Tk_e}{2(\delta k_e - \text{JND}_k)}, \quad (18)$$

gilt, wobei davon ausgegangen wird, dass die prozentuale Änderung der Umgebungssteifigkeit bei direkter Interaktion mit der Umgebung wahrnehmbar wäre $\delta k_e \geq \text{JND}_k$. Die wahrnehmungsbezogene Betrachtung bringt in diesem Fall nur dann eine deutliche Abschwächung der Entwurfsforderung $b \rightarrow \infty$, wenn ein deutlicher Steifigkeits-Unterschied $\delta k_e \gg \text{JND}_k$ zwischen den zu unterscheidenden Umgebungen besteht.

Im realen System mit compliance-geregeltem Teleoperator wird die Umgebungssteifigkeit k_e durch die Steifigkeit $k_{t/e}$ von Teleoperator und Umgebung in (18) ersetzt. Entsprechend muss gesichert sein, dass die Änderung der

Umgebungssteifigkeit sich in einer wahrnehmbaren Steifigkeitsänderung am Teleoperator darstellt $\delta k_{t/e} \geq \text{JND}_k$. Dies ist bei Umgebungssteifigkeiten, die viel größer als die Teleoperator-Compliance sind, nicht mehr gegeben.

Beispiel Mit den gleichen Werten wie in den vorherigen Beispielen ist eine Änderung der Umgebungssteifigkeit von $k_e^0 = 100$ N/m auf $k_e = 200$ N/m dann wahrnehmbar, wenn $b \geq 17$ Ns/m, von $k_e^0 = 1000$ N/m auf $k_e = 2000$ N/m, wenn $b \geq 230$ Ns/m ist. Eine Steifigkeitsänderung von $k_e^0 = 10\,000$ N/m auf $k_e = 20\,000$ N/m resultiert in $\delta k_{t/e} = 4\%$ und ist damit selbst für $b \rightarrow \infty$ an der MMS nicht wahrnehmbar.

5 Experimentelle Validierung

Die gefundenen theoretischen Ergebnisse werden im Folgenden in Experimenten validiert. Dabei wird zunächst die Richtigkeit der Approximation der dargestellten Impedanzen bestätigt. Im zweiten Schritt werden Benutzerstudien durchgeführt, um die JND-Betrachtungen zu verifizieren.

5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem aktuierten Hebelarm mit einem Freiheitsgrad als MMS [25], und einem PC, dargestellt in Bild 7. Um in den Benutzerstudien getrennt die Fälle *Freiraum* und *Wandkontakt* evaluieren zu können, wird anstelle des realen Teleoperators eine virtuelle Umgebung eingesetzt. Die Wand ist durch eine bilaterale Steifigkeit $k_e = 12\,500$ N/m realisiert. Die MMS-Position wird durch einen Inkremental-Encoder gemessen, die Kraft durch Dehnmessstreifen am Hebelarm. Die Messdaten werden im PC (RT Linux) ausgewertet, wo die Kraftregelung der MMS, die Leistungswellen-Transformation mit der Wellen-Impedanz $b = 125$ Ns/m, die Zeitverzögerung und die virtuelle Umgebung als Echtzeitcode realisiert sind. Die Abtastfrequenz beträgt 1 kHz.

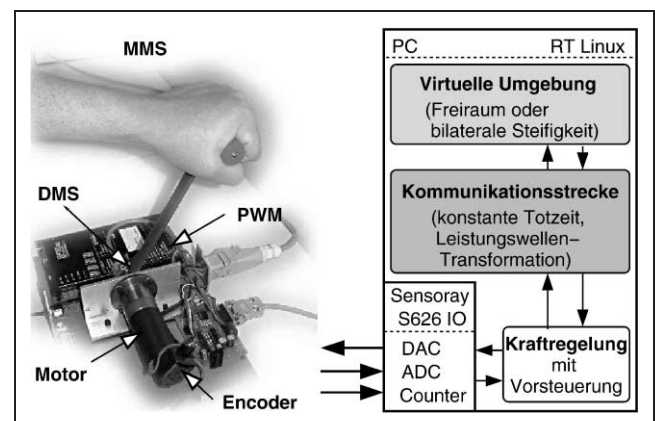


Bild 7: Experimentalsystem mit einem Freiheitsgrad.

5.2 Ermittlung der dargestellten Impedanz

Die dargestellte Masse m_h im Freiraum und die dargestellte Steifigkeit k_h im Wandkontakt werden für Zeitverzöge-

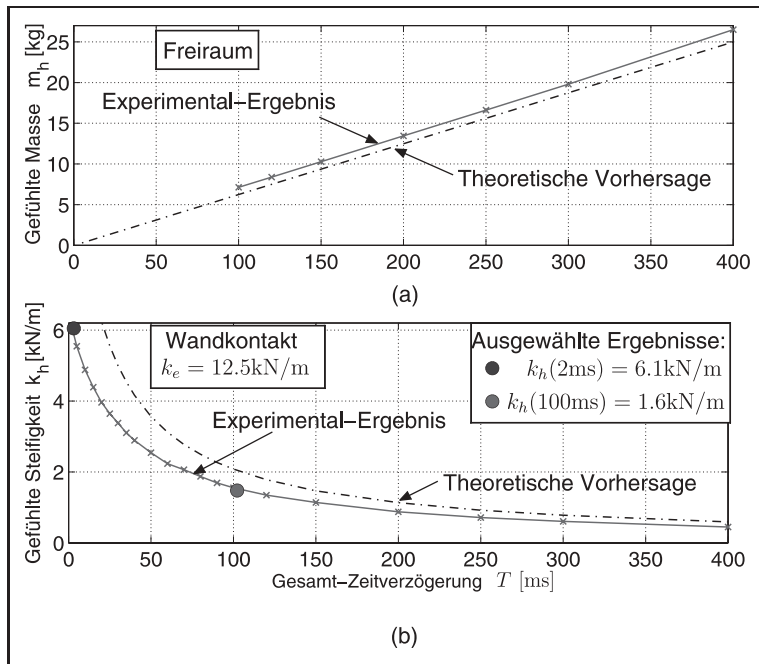


Bild 8: Experimentell bestimmte dargestellte Masse m_h (a) und Steifigkeit k_h (b) abhängig von der Gesamt-Zeitverzögerung T im Vergleich mit theoretischen Resultaten.

rungen im Intervall $T \in [5, 400]$ ms mittels des Verfahrens kleinster Quadrate aus den an der MMS gemessenen Positions- und Kraftsignalen ermittelt.

Die experimentellen Ergebnisse, siehe Bild 8(a) für die dargestellte Masse, Bild 8(b) für die dargestellte Steifigkeit, zeigen eine überzeugende Übereinstimmung mit der theoretischen Vorhersage. Die leichte Abweichung (höhere dargestellte Masse und geringere Steifigkeit) sind auf die robust ausgelegte MMS-Regelung zurückzuführen.

5.3 Benutzerstudie zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle von Zeitverzögerung

In einer Benutzerstudie soll geklärt werden, ob eine zusätzliche Zeitverzögerung bei niedriger Zeitverzögerung die Transparenz schwerwiegender verschlechtert als bei hoher Zeitverzögerung, wie in Abschnitt 4.2 angedeutet. Dieses Ergebnis ist höchst anwendungsrelevant, da derartige zusätzliche Zeitverzögerungen insbesondere in paketvermittelnden Netzen durch das gemeinsame Verschicken mehrerer Abtastwerte in einem Paket oder durch empfängerseitige Puffer-Strategien, beispielsweise zur Vermeidung zeitvariabler Zeitverzögerungen, entstehen können. In einer Benutzerstudie wird bei 7 Testpersonen die Wahrnehmungsschwelle für die Zeitverzögerungsdifferenz bei den Referenz-Zeitverzögerungen $T^0 = \{2, 100\}$ ms ermittelt. Aufgrund der Platzbeschränkung wird hier nur das Ergebnis diskutiert, für eine genaue Beschreibung und weitere Auswertung des Versuches sei auf [26] verwiesen.

Die gerade noch detektierte Zeitverzögerungsdifferenz ist für die niedrige Referenz-Zeitverzögerung statistisch signifikant kleiner, d. h. eine zusätzliche Zeitverzögerung führt bei niedriger Zeitverzögerung eher zu einer wahrnehmbaren Transparenz-Verschlechterung. Zur Kontrolle werden mit Hilfe der Ergebnisse des vorherigen Experiments die

entsprechenden prozentualen Massen- bzw. Steifigkeitsänderungen $\delta m_h, \delta k_h$ ermittelt. Die prozentualen Änderungen ($\delta m_{h,2\text{ms}} = 17\%$, $\delta k_{h,2\text{ms}} = 10\%$, $\delta k_{h,100\text{ms}} = 20\%$) liegen alle wie erwartet im Bereich der in der Literatur angegebenen JNDs, zum Vergleich siehe Abschnitt 3. Um eine verlässliche Aussage über die hier angedeutete Korrespondenz der Wahrnehmungsschwellen für Zeitverzögerung und mechanische Parameter treffen zu können, sind jedoch weitere systematische Untersuchungen mit mehr Testpersonen notwendig.

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wird die Transparenz haptischer Telepräsenzsysteme mit konstanter Zeitverzögerung und dem Regelungsansatz der Leistungswellen-Transformation untersucht. Dazu wird eine Approximation für die dargestellte Impedanz im Frequenzbereich hergeleitet, um deren mechanische Eigenschaften als Funktion der Kommunikationsstrecken-Parameter darzustellen. Wichtigstes Ergebnis ist, dass im Freiraum eine Masse proportional zur Zeitverzögerung ansteigend für den Mensch wahrnehmbar ist, harte Wände fühlen sich deutlich weicher an. Die Ergebnisse werden unter Aspekten der menschlichen Wahrnehmung diskutiert. Aufbauend darauf wird eine transparente Auslegung der Leistungswellen-Transformation vorgeschlagen. Die gewonnenen Resultate werden erfolgreich in einem Telepräsenz-Experiment mit einem Freiheitsgrad und einer Benutzerstudie validiert.

Von zukünftigem Interesse sind die Validierung der hier angestellten Betrachtungen in Telepräsenzsystemen mit mehreren Freiheitsgraden sowie die Analyse des Einflusses der Zeitverzögerung auf das Präsenz-Empfinden im multimodalen Kontext.

Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde zum Teil durch Mittel des Sonderforschungsbereiches 453 ‚Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion‘ der DFG gefördert.

Literatur

- [1] M. Buss and G. Schmidt, „Editorial: Teleautomation im Kraftfeld von Kommunikation und Multimedia,“ *at – Automatisierungstechnik*, vol. 49, no. 7, pp. 293–294, 2001.
- [2] R.J. Anderson and M.W. Spong, „Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,“ *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494–501, 1989.
- [3] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine, „Stable Adaptive Teleoperation,“ *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 152–162, January 1991.
- [4] N. Chopra, M.W. Spong, S. Hirche, and M. Buss, „Bilateral Teleoperation over Internet: the Time Varying Delay Problem,“ in *Proceedings of the American Control Conference*, Denver (CO), US, 2003, pp. 155–160.
- [5] Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, „Bilateral Control with Energy Balance Monitoring under Time-Varying Communication Delay,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco (CA), US, 2000, pp. 2684–2689.
- [6] B. Beresteky, N. Chopra, and M. W. Spong, „Discrete Time Passivity in Bilateral Teleoperation over the Internet,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'04*, New Orleans, US, 2004, pp. 4557–4564.
- [7] S. Hirche and M. Buss, „Packet Loss Effects in Passive Telepresence Systems,“ in *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Nassau, Bahamas, 2004, pp. 4010–4015.
- [8] P. Arcara and C. Melchiorri, „Control Schemes for Teleoperation with Time Delay: A Comparative Study,“ *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 49–64, 2002.
- [9] D.A. Lawrence, „Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation,“ *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624–637, October 1993.
- [10] B. Hannaford, „Stability and Performance Tradeoffs in Bilateral Telemanipulation,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale (AZ), US, 1989, pp. 1764–1767.
- [11] K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean, „Analysis and Evaluation of Stability and Performance Robustness for Teleoperation Control Architectures,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco (CA), US, 2000, pp. 3107–3113.
- [12] J. Vertut, A. Micaelli, P. Marchal, and J. Guittet, „Short Transmission Delay on a Force Reflective Bilateral Manipulator,“ in *Proceedings of the 4th Rom-An-Sy*, Zaborow, Poland, 1981, pp. 269–274.
- [13] X. Wang, P.X. Liu, D. Wang, B. Chebbi, and M. Meng, „Design of Bilateral Teleoperators for Soft Environments with Adaptive Environmental Impedance Estimation,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1139–1144.
- [14] L.A. Jones and I.W. Hunter, „A Perceptual Analysis of Stiffness,“ *Experimental Brain Research*, vol. 79, pp. 150–156, 1990.
- [15] N.I. Durlach, G.L. Beauregard, H.Z. Tan, and M.A. Srinivasan, „Manual Discrimination of Compliance Using Active Pinch Grasp: The Role of Force and Work Cues,“ *Perception and Psychophysics*, vol. 57, pp. 495–510, 1995.
- [16] G.L. Beauregard and M.A. Srinivasan, „The Manual Resolution of Viscosity and Mass,“ *ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 1, pp. 657–662, 1995.
- [17] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine, „Telemanipulation with Time Delays,“ *International Journal of Robotic Research*, vol. 23, no. 9, pp. 873–890, September 2004.
- [18] C.A. Desoer and M. Vidyasagar, *Feedback Systems: Input-Output Properties*, Academic Press, 1975.
- [19] N. Hogan, „Controlling Impedance at the Man/Machine Interface,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale (AZ), US, 1989, pp. 1626–1631.
- [20] G.C. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley, 1996.
- [21] G. Niemeyer and J.E. Slotine, „Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control,“ in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque (NM), US, 1997, pp. 1619–1625.
- [22] M. Ueberle, N. Mock, and M. Buss, „ViSHaRD10, a Novel Hyper-Redundant Haptic Interface,“ in *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, in conjunction with IEEE Virtual Reality 2004 conference*, Chicago (IL), US, 2004.
- [23] B. Stanczyk and M. Buss, „Experimental Comparison of Interaction Control Methods for a Redundant Telemanipulator,“ in *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2005*, Miedzyzdroje, Poland, 2005.
- [24] M.A. Srinivasan, B. Eberman, H.Z. Tan and B. Cheng, „Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces,“ *ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 1, pp. 353–359, 1994.
- [25] H. Baier, M. Buss, and G. Schmidt, „Stabilität und Modumschaltung von Regelkreisen in Teleaktionssystemen,“ *at – Automatisierungstechnik*, vol. 48, no. 2, pp. 51–59, Februar 2000.
- [26] S. Hirche, *Haptic Telepresence in Packet Switched Communication Networks*, Nr. 1082 in Fortschrittsberichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.

Manuskripteingang: 9. Juni 2005.



Dr.-Ing. Sandra Hirche (Korrespondenzautor) war bis September 2005 wissenschaftliche Assistentin am Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik an der Technischen Universität München. Seit Oktober 2005 ist sie als Gastwissenschaftlerin mit einem zweijährigen JSPS-Forschungsstipendium am Tokyo Institute of Technology tätig. Wissenschaftliches Interesse: Mensch-Maschine-Systeme und Netzwerk-Regelungssysteme; weitere Publikationen unter www.shirche.de.

Adresse: Fujita Lab, Department of Mechanical and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 S5-26 Oh-Okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan, E-Mail: S.Hirche@ieee.org



Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss ist Ordinarius des Lehrstuhls für Steuerungs- und Regelungstechnik, Institut für Automatisierungstechnik und Autonome Systeme, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München. Hauptarbeitsgebiete: Automatisierungstechnik, Mechatronik und Robotik, Multimodale Mensch-Maschine-Systeme, Optimierungsverfahren, nichtlineare und hybride diskret-kontinuierliche Regelungssysteme.

Adresse: Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (LSR), Technische Universität München, 80290 München, E-Mail: M.Buss@ieee.org