

Kapitel 2

Begriffsklärungen

THORSTEN A. KERN

Im Rahmen der Einführung wurde bereits eine Vielzahl von Begriffen benutzt, die aus dem Kontext haptischer Forschung und Entwicklung stammen. Mit diesem Kapitel "Begriffsklärungen" wird nun ein systematischer Einstieg in das Feld haptischer Geräteentwicklung begonnen. Die folgenden Abschnitte erläutern die an Forschung und Entwicklung beteiligten Disziplinen, führen in die Begriffe und Bezeichnungen beim Umgang mit haptischen Systemen ein und illustrieren dies mit einigen technischen Beispielen.

2.1 Wissenschaftliche Disziplinen in der haptischen Forschung

In der haptischen Forschung sind im Wesentlichen drei Interessengruppen (Abb. 2.1) auszumachen, deren Grenzen fließend sind. Die Beschäftigung mit der haptischen Wahrnehmung (haptic perception) arbeitet nach strengen deduktiven wissenschaftlichen Prinzipien: Aus einer Beobachtung wird eine Hypothese abgeleitet. Zu der Hypothese wird ein Experiment entworfen, das unter Ausschluss weiterer veränderlicher Parameter ausschließlich den Gegenstand der Hypothese testet. Die Hypothese wird durch die Resultate des Experiments veri- oder falsifiziert, was zu einer neuen verbesserten Hypothese führen kann.

Die haptische Wahrnehmung wird dabei von zwei Disziplinen adressiert. Die Psychophysik beschäftigt sich mit der Analyse der Wirkung von physikalischen Stimuli - im Falle der Haptik vor allem mit Schwingungen und Kräften unterschiedlicher Raumrichtung und Orientierung - auf den Menschen und deren subjektive Wahrnehmung. Ziel der Psychophysik ist ein erklärendes Modell der Wahr-

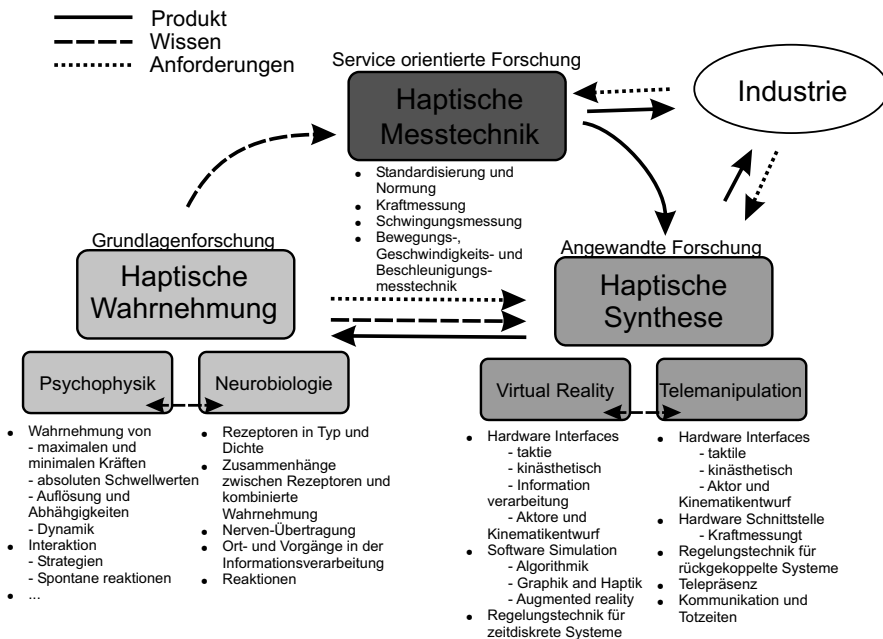


Abb. 2.1 Übersicht über die an der haptischen Forschung beteiligten Disziplinen.

nehmung. Die Neurobiologie betrachtet die biologisch messbaren Zusammenhänge und analysiert damit die direkte Wandlung physikalischer Stimuli in neuronale Signale und deren Weiterverarbeitung im Gehirn. Beide Disziplinen ergänzen sich, so dass die neurobiologische Modellvorstellung Teile des psychophysikalischen Modells erklären können sollte. Diese wissenschaftlichen Disziplinen formulieren zur Durchführung der Experimente technologische Aufgaben, die in der Interessensgruppe der "Haptischen Synthese" und der "Haptischen Messtechnik" bearbeitet werden.

Alternativ erhalten diese Gruppen Aufträge aus der Industrie, und bedienen sich dabei dem Wissen aus der Forschung zur haptischen Wahrnehmung. Diese Gruppen arbeiten im Gegensatz zur ersten Gruppe nach ingenieurstechnischen Lösungsstrategien: Aus einer technischen Fragestellung wird eine Annahme technischer Anforderungen auf Basis des aktuellen Wissensstand abgeleitet. In einem Entwicklungsprozess unter mehrfacher Überprüfung der Einhaltung sowie der Sinnhaftigkeit der ursprünglichen Annahmen wird ein Funktionsmuster und später ein Produkt entwickelt, das die technischen Anforderungen erfüllt. Dieses Produkt kann dann unter anderem zur Analyse haptischer Wahrnehmung eingesetzt werden, es kann aber auch als kommerzielles Produkt in der Spiele-, Automobil- oder Luftfahrtindustrie genutzt werden.

Im Falle der Erzeugung haptischer Eindrücke für Virtual-Reality (VR) Anwendungen betreffen technische Fragestellung in der Regel den Entwurf haptischer Displays für entweder taktile oder kinästhetische oder für kombinierte Anwendungen. Hierbei liegt ein Schwerpunkt auf der Auswahl der richtigen Aktoren, der Steuerungselektroniken und Treiberstufen sowie auf der Signalverarbeitung. Durch die in diesen Anwendungen häufig vorliegende Kopplung an Simulationen, also technische Systeme mit zeitdiskreter Signalverarbeitung, ist eine Berücksichtigung der Diskretisierung und ihr Einfluss auf die Güte der haptischen Darstellung notwendig. Im Falle von Telemanipulationssystemen sind die technischen Fragestellungen vergleichbar, sie unterscheiden sich aber vor allem in der jetzt notwendigen Messtechnik zur Erfassung eines haptischen Eindrucks. Weiterhin ist die regelungstechnische Aufgabenstellung komplexer, da es sich um ein rückgekoppeltes, geschlossenes System handelt mit unbekannten Lastgrößen auf beiden Seiten.

2.2 Begriffe und Bezeichnungen beim Umgang mit haptischen Systemen

Die Definition der Begriffe in Zusammenhang mit haptischen Systemen ist aktueller Gegenstand der ISO 9241-910 Norm. Viele der hier vorgestellten Definitionen sind teilweise oder ganz an die dort vereinbarte Terminologie angelehnt. Die hier vorgestellte Terminologie ist eine Empfehlung, die nach Meinung und Erfahrung der Autoren von der Mehrheit der im haptischen Umfeld tätigen Wissenschaftler geteilt wird. Es wird aber darauf hingewiesen, dass es keinen verbindlichen Konsens über die Anwendungen der Begriffe gibt, so dass viele vergangene wie aktuelle Veröffentlichungen von den hier vorgestellten Definitionen abweichen. Die hier vorgestellte Nomenklatur resultiert aus den Veröffentlichungen von HAYWARD [88], COLGATE [171], HANNAFORD [83], BURDEA [34], ADAMS [2] sowie einer Vielzahl weiterer Autoren.

2.2.1 *Grundbegriffe der Haptik*

Entsprechend Abbildung 2.2 ist Haptik als die Wahrnehmung von mechanischen, thermischen und nozizeptorischen¹ Sinneseindrücken zu verstehen. Sie definiert sich also eher aus dem Ausschluss von optischer, akustischer, olfaktorischer², gustatorischer³ Wahrnehmung von der Summe der Sinneswahrnehmungen. Demzufolge untergliedert sich die Haptik in nozizeptive, thermosensitive, kinästhetische und taktile Wahrnehmung. Der Gleichgewichtssinn nimmt eine Sonderstellung ein,

¹ schmerzhaften

² geruchlicher

³ geschmacklicher

da er nicht zu den klassischen fünf Sinnen des Menschen mit eigenen Rezeptoren zählt, aber in seiner Funktion eindeutig vorhanden ist und Gebrauch macht von den Rezeptoren der anderen Sinne, insbesondere den haptischen, macht.

Haptik beschreibt die sensorischen wie motorischen Fähigkeiten in der Haut, Gelenken, Muskeln und Sehnen bzw. Bändern.

Menschliche Sinne:

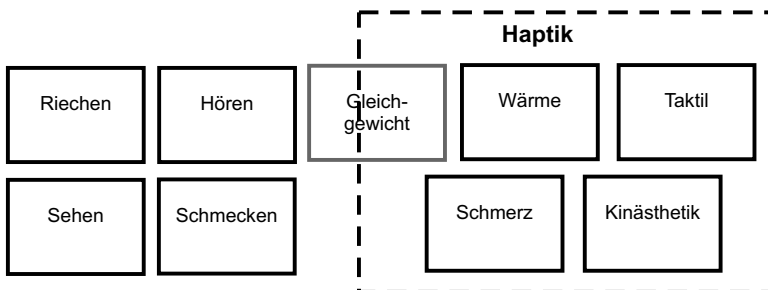


Abb. 2.2 Aufteilung der Sinne.

Taktile bezeichnet die mechanische Interaktion mit der Haut. Taktile Wahrnehmung ist also die Wahrnehmung von ausschließlich mechanischer Interaktion. Man beachte, dass Taktilität nicht exklusiv an Kräfte oder Bewegungen gebunden ist.

Kinästhetisch bezeichnet sowohl aktorische wie sensorische Eigenschaften der Muskeln und Gelenke, und bezieht sich daher auf deren Kräfte, Momente, Bewegungen, Positionen und Winkel. Dies hat zur Folge, dass per Definition bereits jede externe kinästhetische Interaktion eine taktile Komponente hat!

2.2.2 Definition haptischer Systeme

Die technischen Begriffe sind vom Speziellen ins Allgemeine gegliedert und durch Blockdiagramme illustriert. Die Pfeile zwischen den Komponenten der Blockdiagramme können je nach Ausführungsform des technischen Gerätes unterschiedliche Informationen repräsentieren und bleiben daher unbeschriftet. Mit haptischen Geräten können sowohl Auslenkungen, Kräfte als auch Temperaturunterschiede, und in wenigen Realisationen auch Stimulationen der Schmerzrezeptoren übertragen werden.

Die Begrifflichkeiten *System* und *Gerät* und *Teil* lassen sich nicht zufriedenstellend übergreifend definieren. In Abhängigkeit der Sichtweise kann dasselbe Objekt für den Hardwareentwickler ein Gerät, für den Softwareentwickler ein System und für einen weiteren Hardwareentwickler nur ein Teil sein. Die Begriffe sind dennoch Gegenstand des ingenieurstechnischen Sprachgebrauchs und werden demzufolge hier entsprechend verwendet.

Ein **haptisches Gerät** ist ein System, das Ausgangsgrößen erzeugt, die haptisch wahrgenommen werden können. Es hat also entsprechend Abbildung 2.3 wenigstens einen Ausgang, aber nicht zwangsläufig einen Eingang. Die Markierungen auf den Buchstaben F und J einer Tastatur sind taktile Markierungen, die eine Information, nämlich die korrekte Lage des Zeigefingers, vermittelt. Diese Tasten sind durch ihre Oberfläche bereits taktile Geräte. Betrachtet man die Taste weiter, so hat diese bei Betätigung einen spürbaren Schalterpunkt, der die Information enthält, dass die Taste gedrückt wurde. Diese Information wird unter anderem kinästhetisch durch Wechselwirkung der Muskel und Gelenke mit der Mechanik der Taste vermittelt. Die Taste ist also ein haptisches Gerät.

Ein **Nutzer** ist in dem Kontext haptischer Systeme ein Empfänger haptischer Informationen.

Ein **haptischer Regler** bezeichnet eine Komponente eines haptischen Systems, welche spezifisch zu Aufbereitung der haptischen Informationen und zur Verbesserung ihrer Übertragung dient. Pragmatisch ist dies im Falle eines Telemanipulators häufig ein Feder-Dämpfer Kopplungselement zwischen Endeffektor und Bedienelement, oder ein lokales Modell des Interaktionsbereiches zur Kompensation von Verzögerungen auf der Übertragungsstrecke. Im Falle eines haptischen Simulators ist es häufig ein einfaches LTI-Modell mit hoher Mess- und Ausgabefrequenz, welches durch die Simulation in relativ zu dieser Ausgabefrequenz langsamen Zeitabschnitten durch Parameterübergabe aktualisiert wird.

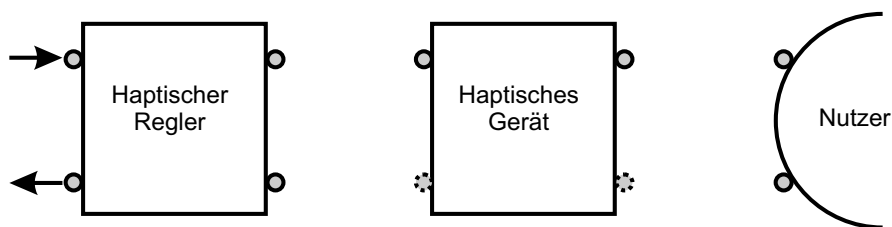


Abb. 2.3 Haptische Geräte, Nutzer und Regler.

Haptische Interaktion bezeichnet die haptische Übermittlung von Informationen. Die Übermittlung kann sowohl bi- als auch unidirektional sein (Abb. 2.4).

Weiterhin kann spezifischer taktile (unidirektional) oder kinästhetische (uni- oder bidirektional) Interaktion stattfinden. Eine Markierung in Blindenschrift auf einem Geldschein resultiert z.B. in einer taktilen Kommunikation von Informationen durch haptische Interaktion.

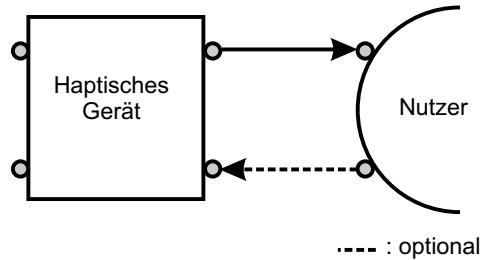


Abb. 2.4 Haptische Interaktion.

Adressierbarkeit haptischer Systeme beschreibt die Unterteilung (z.B. räumlich oder zeitlich) des Ausgangssignals eines Gerätes (häufig Kraft) oder des Nutzers (häufig Positionen).

Auflösung haptischer Systeme beschreibt die Fähigkeit, eine Unterteilung (z.B. räumlich oder zeitlich) des Eingangssignals zu erfassen. In Bezug auf ein Gerät entspricht dies der Messgenauigkeit. Mit Bezug auf den Nutzer entspricht dies der Wahrnehmungsgrenze.

Haptischer Marker bezeichnet eine Markierung, die eine Information über das die Markierung tragende Objekt über eine bekannte Codierung haptisch kommuniziert. Praktische Beispiele sind Markierungen in Blindenschrift auf Geldscheinen oder Stadtplänen. Häufig sind die Markierungen ausschließlich taktil, es gibt aber auch kinästhetisch wirksame z.B. in Form von Gehwegbegrenzungen und Ampelmarkierungen für Sehbehinderte.

Ein **Haptisches Display** ist ein haptisches Gerät, das eine haptische Interaktion ermöglicht und bei dem die haptisch übermittelten Informationen einer Änderung unterliegen (Abb. 2.5). Es gibt sowohl ausschließlich taktile wie haptische Displays.

Eine **Haptische Schnittstelle** ist ein haptisches Gerät, das eine haptische Interaktion ermöglicht und bei dem die haptisch übermittelten Informationen einer Änderung unterliegen sowie eine Messgröße der haptischen Interaktion vom haptischen Gerät übermittelt wird (Abb. 2.6). Ein haptisches Interface betrachtet also immer

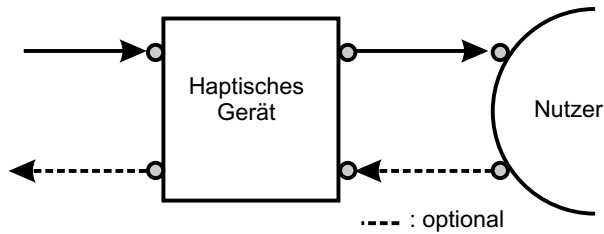


Abb. 2.5 Haptisches Display.

die Kombination aus Daten und Gerät.

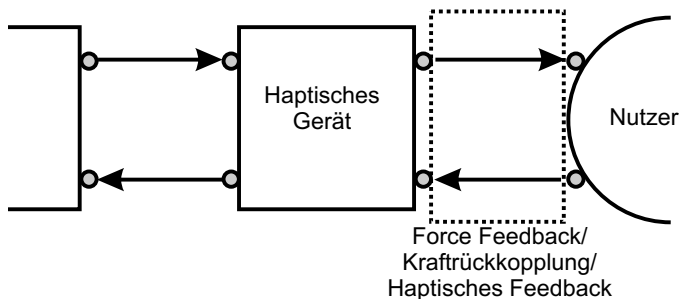


Abb. 2.6 Haptische Schnittstelle.

Kraft-Rückkopplung/Force-feedback bezeichnet die Information, die bei kinästhetischer Interaktion ausgetauscht wird (Abb. 2.6). Force-Feedback (FFB) ist ein durch kommerzielle Produkte wie FFB-Joysticks, FFB-Lenkräder oder sogar FFB-Mäuse geprägter Begriff und wird daher nicht immer konsistent mit der sonstigen Terminologie verwendet.

Ein **Haptischer Manipulator** ist ein System, das mit Objekten mechanisch interagiert, und dabei Informationen über die Raumlage sowie die wirkenden Kräfte und/oder Momente misst.

Ein **Telemanipulationssystem** bezeichnet ein System, das eine räumlich getrennte haptische Interaktion mit einem realen physischen Objekt ermöglicht. Es gibt rein mechanische Telemanipulationssysteme (Abb. 2.7), die Kräfte und Wege über ein Hebel-Seilzugsystem skalieren. Im Umfeld haptischer Schnittstellen sind vor allem elektronische Telemanipulationssysteme entsprechend Abbildung 2.8 relevant, die eine unabhängige Skalierung von Kräften und Wegen, sowie eine Rege-

lung von haptischer Schnittstelle und Manipulator ermöglichen.



Abb. 2.7 Mechanischer Telemanipulator zur Gefahrguthandhabung (CRL Model L) .

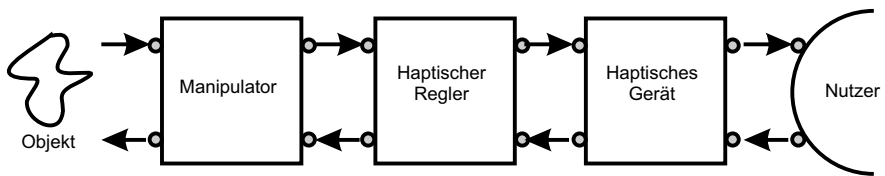


Abb. 2.8 Schema eines elektronischen Telemanipulators.

Haptischer Simulator ist ein System, das haptische Interaktion mit einem virtuellen Objekt ermöglicht (Abb. 2.9). Es bedarf immer eines Computers zur Abbildung der physikalischen Eigenschaften. Haptische Simulatoren und Simulationen sind die eigentlichen Triebfedern, sei es für ernsthafte Trainingsanwendungen von z.B. Chirurgen, oder Spieleanwendungen für den Freizeitbereich, für die Entwicklung haptischer Geräte (siehe Kapitel 13).

2.2.3 Eigenschaften haptischer Systeme

In [151] definiert LAWRENCE die **Transparency** (Transparenz) $\underline{T}$ als Faktor zwischen Impedanz als Eingangsgröße des haptischen Interfaces $\underline{Z}_{in}$ und der tatsächlich

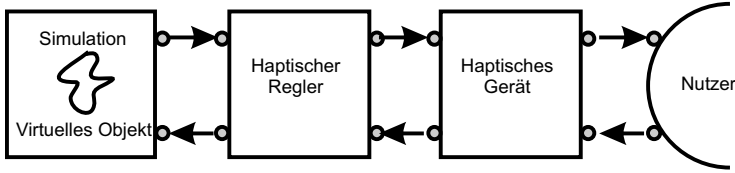


Abb. 2.9 Haptischer Simulator.

gefühlten Impedanz Z_{out} als Ausgangsgröße des Gerätes

$$\underline{T} = \frac{Z_{\text{in}}}{Z_{\text{out}}}. \quad (2.1)$$

Das Prinzip der Transparency findet vor allem im Bereich regelungstechnischer Stabilitätsbetrachtungen Anwendung und sollte um ± 3 dB liegen. $\underline{T}$ kann als einziger etablierter, frequenzabhängiger, charakteristischer Kennwert haptischer Interfaces bezeichnet werden. Häufig wird lediglich der Betrag der Transparenz betrachtet. Eine Transparenz nahe eins zeigt, dass die eingangsseitig vorherrschende Impedanz, also der Widerstand einer Struktur oder die Masse eines bewegten Objektes, durch das technische System nicht beeinflusst wird. Der Nutzer am haptischen Geräte als Ende der Übertragungstrecke erfährt die am Eingang anliegenden mechanischen Eigenschaften unverfälscht. Die Transparenz kann dabei sowohl auf Telemanipulationssysteme wie auch auf haptische Simulatoren angewendet werden.

COLGATE beschreibt in [39] die Impedanzweite (Z-width) eines haptischen Systems

$$\underline{Z} - \text{width} = Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}} \quad (2.2)$$

als Differenz der maximalen Hemmung/Vollast Z_{max} ohne die spürbare Reibung, Massenträgheit in der Freiraumbewegung Z_{min} . Die Z-width beschreibt die Leistungsfähigkeit einzelner Geräte und erlaubt eine Vergleichbarkeit zwischen Geräten nach technischen Änderungen, z.B. der Integration einer Regelung über eine Kraftmessung.

Aktive haptische Geräte sind Systeme, die eine externe Energiequelle zur Darstellung der haptischen Information benötigen. Es handelt sich in der Regel wenigstens um haptische Displays. Im Gegenzug sind **passive haptische Geräte** Systeme, die alleine durch ihre mechanische Formgebung haptische Informationen übermitteln. Hier besteht die Gefahr eines gefährlichen Trugschlusses: Ein **passives System** ist im regelungstechnischen Verständnis ein System, dessen Energiefluss bezogen auf den Eingang immer negativ ist, d.h. ein System, das keine Energie abgibt. Dies ist ein wichtiges regelungstechnisches Stabilitätsmerkmal und wird im Detail in Kapitel 7.3.3 beschrieben. Hier sei darauf hingewiesen, dass *passiv* in einem All-

gemeinverständnis von *haptischen Systemen* nicht gleichbedeutend mit *Passivität* ist⁴.

Die **mechanische Impedanz** $\underline{Z}$ beschreibt den komplexen Koeffizienten aus Kraft $\underline{F}$ und Geschwindigkeit $\underline{v}$ bzw. Drehmoment $\underline{M}$ und Winkelgeschwindigkeit $\underline{\Omega}$. Sie und ihr Kehrwert, die **mechanische Admittanz** $\underline{Y}$ dienen zur Beschreibung dynamischer technischer Systeme. Eine hohe Impedanz ist ein Maß dafür, dass ein System "steif" oder "träge" ist oder "reibt". Eine niedrige Impedanz spricht für ein "leichtes" und/oder "weiches" sowie "gleitendes" System. Das Konzept der Impedanz wird unter dem Begriff **Display-Impedanz** oder **Interface-Impedanz** $\underline{Z}_D$ auf das haptische System angewendet, und bezeichnet damit die Impedanz, die ein System an dessen mechanischem Ausgang (z.B. dem Griff) aufweist, wenn es bewegt wird. Wie bei technischen Systemen eignet sich die Impedanz darüber hinaus auch zur vereinfachten Beschreibung des Nutzers und seines mechanischen Einflusses auf das technische System. Hierzu wird der Begriff der **Nutzer-Impedanz** $\underline{Z}_H$ verwendet. Die Nutzer-Impedanz - wie steif sich ein Nutzer verhält - kann teilweise willentlich beeinflusst werden. Ein Händeschütteln kann entweder fest oder weich sein. Der Grad dieser Beeinflussung ist frequenzabhängig, so ist auch ohne willentliche Veränderung durch den Hände-Schüttler bei niedrigen Frequenzen dieselbe Hand weicher als bei hohen Frequenzen, was sich alleine durch die zu bewegend Masse ergibt. Eine detaillierte Darstellung der Modellbildung sowie der Anwendung des Konzepts der Nutzer-Impedanz erfolgt in Abschnitt 4.2.

Eine Einführung in die komplexe Rechnung mit mechanischen Größen wird in Anhang 16 gegeben. Da das Verständnis der komplexen Rechnung sowie der mechanischen Impedanzen aber grundlegend für den Entwurf haptischer Systeme im Sinne dieses Buches ist, wird zur Auffrischung bzw. Selbst-Studium auf bekannte Literatur der Elektromechanik [153] wie Regelungstechnik [162] verwiesen.

2.2.4 Charakterisierung haptischer Objekteigenschaften

Neben den Begrifflichkeiten für die haptischen Systeme und deren Eigenschaften werden auch die haptischen Eigenschaften von Objekten mit festgelegten Begriffen bezeichnet.

Eine **haptische Textur** bezeichnet die Objekteigenschaften, die ausschließlich taktil wahrgenommen werden kann. Die Rauigkeit der Oberfläche, die Struktur eines Leders, sogar die haptischen Markierungen sind haptische Texturen der Objekte, auf denen sie zu finden sind. In einigen Fällen wird zwischen *tangentialer* und *normaler* Textur unterschieden, wobei sich die Richtungsbezeichnungen auf die Hautoberfläche bezieht. Diese Unterscheidung ist eher ein Resultat von technischen Beschränkungen denn von Besonderheiten taktiler Wahrnehmung, da taktile

⁴ wobei sich aber ein passives haptisches Gerät im Sinne dieser Definition tatsächlich auch im regelungstechnischen Sinne durch Passivität auszeichnet

Displays häufig nicht in der Lage sind definiert einen drei Freiheitsgrade umfassenden taktilen Eindruck hervorzurufen.

Eine **haptische Gestalt** bezeichnet die Objekteigenschaften, die vor allem kinästhetisch wahrgenommen werden können. Dies kann die Form eines Glases sein, was in der Hand gehalten wird. Es kann aber auch die Geometrie eines Tisches sein, der z.B. in einer virtuellen Umgebung haptisch erfahrbar gemacht wird.

Tatsächlich sind die Begriffe *Textur* und *Gestalt* in ihrer Verwendung analog zu ihren Bedeutungen in der graphischen Programmierung und Softwaretechnik von Drahtgittermodellen (meshes) als Gestaltgeber und Oberflächentexturen (surface-textures) als Farb- und Strukturgebung zu verstehen. Die haptische Textur beschreibt aber im Gegensatz der graphischen Textur vor allem dreidimensionale Oberflächeneigenschaften, die neben der reinen Struktur der Oberfläche auch auf molekularer Ebene die Anheftung oder die Reibung abbilden. Eine realistische haptische Textur ist also deutlich komplexer in ihren Parametern als eine graphische Textur, selbst unter der Berücksichtigung von Konzepten von Bump- und Normalmaps. Daher gibt es eine Vielzahl von **Oberflächeneigenschaften**, die spezifische haptische Oberflächeneffekte aus Sicht des Programmierers beschreiben. Diese Oberflächeneffekte besitzen teilweise physikalische Entsprechungen realer Objektflächen, sind aber streng genommen softwaretechnisch motivierte Konzepte, um den Realitätsgrad haptischer Texturen zu verbessern:

- Die **Oberflächenreibung** bezeichnet die viskose (geschwindigkeitsproportionale) Reibung eines Kontaktpunktes auf einer Oberfläche.
- Die **Oberflächenhaftung** bezeichnet eine Kraft, die die Bewegung eines Kontaktpunktes an eine Oberfläche bindet. Durch dieses Konzept können z.B. Klebe- und Magnetkräfte abgebildet werden.
- Die **Rauhigkeit** bezeichnet eine gleichmäßige, sinusförmige Struktur definierter geringer Amplitude, welche die Bewegung eines Kontaktpunktes auf einer Oberfläche rau erscheinen lässt.

2.2.5 Technische Beispiele

Im Folgenden wird anhand einiger technischer Beispiel die Verwendung der zuvor eingeführten Begriffe gezeigt. Gleichzeitig dient dieses Kapitel einer weiteren Klärung der Zusammenhänge einzelner Begriffsgruppen. Die Beispiele beschreiben reale technische Systeme. Die Systeme sind als illustrierende Beispiele zu verstehen und sind nicht zwingend technologische Meilensteine oder haben außergewöhnliche Eigenschaften.

2.2.5.1 Force-Feedback Bedienelement

Es existieren einige kommerzielle haptische Bedienelemente am Markt, die gerne für Aufgaben im Bereich Design, CAD und Modellierung eingesetzt werden. Marktführer ist SensAble mit ihrer PHANTOM®-Reihe mit dem aktuell kostengünstigsten Vertreter des PHANTOM Omnis (Abb. 2.10a). Die PHANTOM-Reihe zeichnet sich durch die freie Positionierung eines Stift-ähnlichen Griffes im Raum aus. Dessen Position und Orientierung wird gemessen (drei Translationen, drei Rotationen). Je nach Modell der Serie kann auf die Spitze in wenigstens drei translatorischen Freiheitsgraden eine Kraft ausgeübt werden. Die Krafterzeugung erfolgt über elektronisch kommutierte elektrodynamische Aktoren, die im Fuß des Gerätes angeordnet sind, und über Hebel- und Seilzüge, die Kräfte auf die relevanten Gelenke übertragen. Das Übertragungsverhalten des PHANTOMs ist durch die Hebelübersetzungen nichtlinear, diese Nichtlinearitäten werden aber für den statischen Fall im Software-Treiber kompensiert. Die PHANTOMe werden an handelsübliche PCs über je nach Produktgeneration unterschiedliche Schnittstellen angeschlossen, z.B. dem Parallelport, eine eigene IDE Karte, oder dem IEEE Firewire®Port.

Die PHANTOM®-Geräte von SensAble sind *haptische Geräte* (Abb. 2.10c) die in mehreren Freiheitsgraden vor allem die *kinästhetische Wahrnehmung* der ganzen Hand sowie des Armes adressieren. Da die Krafterleitung über einen handgehaltenen Stift erfolgt, gelten automatisch *taktile* Anforderungen an den technischen Entwurf. Der *Nutzer* hat mit dem Gerät eine *haptische Schnittstelle*, mit der bidirektional in Form eines *haptischen Displays* haptische Informationen aus einer Anwendung auf dem PC dargestellt, umgekehrt aber auch Positionen und Bewegungen des *Nutzers* an die Anwendung übertragen werden.

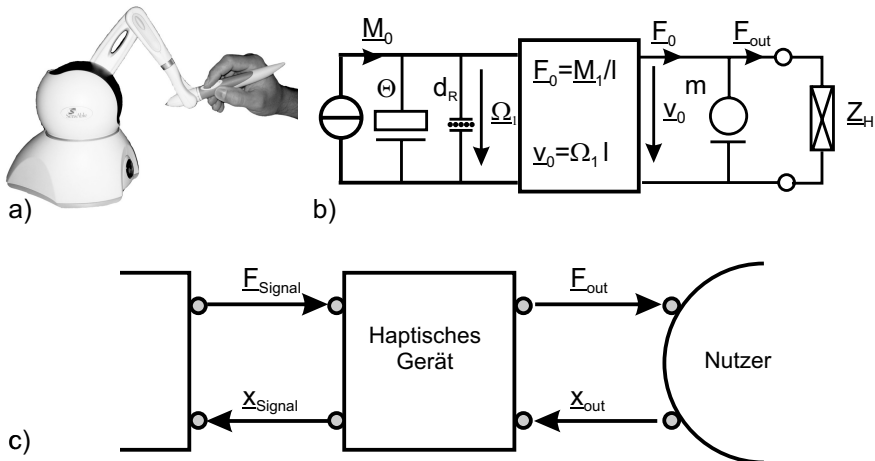


Abb. 2.10 Haptisches Werkzeug am Beispiel eines SensAble PHANTOM Omnis®(a) und zugehöriges mechanisches Netzwerk eines Freiheitsgrads (b) sowie Blockstruktur (c).

Die Netzwerkdarstellung eines Freiheitsgrades (Abb. 2.10b) zeigt den elektronisch kommutierten elektrodynamischen Motor als Momentenquelle $\underline{M}_0$ mit Massenträgheit Θ des Rotors und rotatorischer Dämpfung d_R durch Lager und Gelenke. Über einen Wandler wird durch die Hebelgesetze die rotatorische Bewegung in eine lineare Bewegung mit der Kraft $\underline{F}_0$ und der Geschwindigkeit $\underline{v}_0$ gewandelt. Eine Masse m beschreibt die Masse des gehaltenen Stifts. Der Anteil der gegenüber dem Nutzer dargestellten Kraft $\underline{F}_{out}$ ist Abhängig von der Display-Impedanz als Summe aller Einzelimpedanzen und der Nutzerimpedanz $\underline{Z}_H$.

2.2.5.2 Rekonfigurierbares Tastenfeld

Das rekonfigurierbare Tastenfeld (Abb. 2.11a) besteht aus einer Vielzahl einzelner Aktoren, die in einer Matrix angeordnet sind. Die Aktoren sind elektrodynamische Antriebe mit bewegtem Magneten. Jeder Aktor kann individuell zum einen als Kraftquelle, über eine Positionsregelung aber im Verbund auch als Positionsaktor gesteuert werden. Als Kraftquelle kann über die bekannte Position eine Schaltkennlinie einer Taste abgefahren werden, so dass die Aktoren unterschiedliches Schaltverhalten nachbilden können. Ziel des rekonfigurierbaren Tastenfelds [46] ist es, ein Pendant zu einem klassischen Touchscreen zu schaffen. Das heißt, eine Oberfläche zur Verfügung zu stellen, die in Abhängigkeit der Bediensituation z.B. in einem Menue unterschiedliche Funktionen bereitstellen kann. Einzelne Aktoren kombinieren sich hierzu zu größeren Tasten oder verändern sich in Größe und Schaltcharakteristik.

Das rekonfigurierbare Tastenfeld ist ein *haptisches Gerät* (Abb. 2.11c) das vor allem die *kinästhetische* Wahrnehmung adressiert, somit aber automatisch *taktile* Wahrnehmung beachten muss. Der Nutzer ist der Bediener des Tastenfelds, der durch *haptische Interaktion* durch die Veränderung des Tastenfeldes in der *Gestalt* und der Tastenkennlinien Informationen über z.B. die gerade aktivierte Menüebene erhält. Das Tastenfeld ist also wenigstens ein *haptische Display*, da es darüber hinaus aber auch Informationen über die Betätigung der Tasten an eine weitere Einheit kommuniziert ist es eine *haptische Schnittstelle/haptic interface*.

Die Netzwerkstruktur (Abb. 2.11b) einer einzelnen Taste zeigt die gesteuerte Kraftquelle $\underline{F}_0$ des elektrodynamischen Aktors, die Masse des bewegten Magneten m sowie die Reibung in den Führungen d . Eine Nachgiebigkeit existiert nicht, da im Gegensatz zu klassischen elektrodynamischen Aktoren z.B. aus Lautsprechern keine federnde Aufhängung vorgesehen ist. Der Aktor ist in der Lage eine Kraft $\underline{F}_{out}$ zu erzeugen, die im Wesentlichen abhängig ist von dem Verhältnis der komplexen Impedanz des haptischen Displays $\underline{Z}_D = sm + d$ zu der Nutzerimpedanz $\underline{Z}_H$ ist.

2.2.5.3 Taktiles Pin-Array

Taktile Pin-Array sind die Urform von Systemen, die dem haptischen Sinn ortskoordiniert dynamische Informationen zur Verfügung stellen. Sie sind motiviert als Wei-

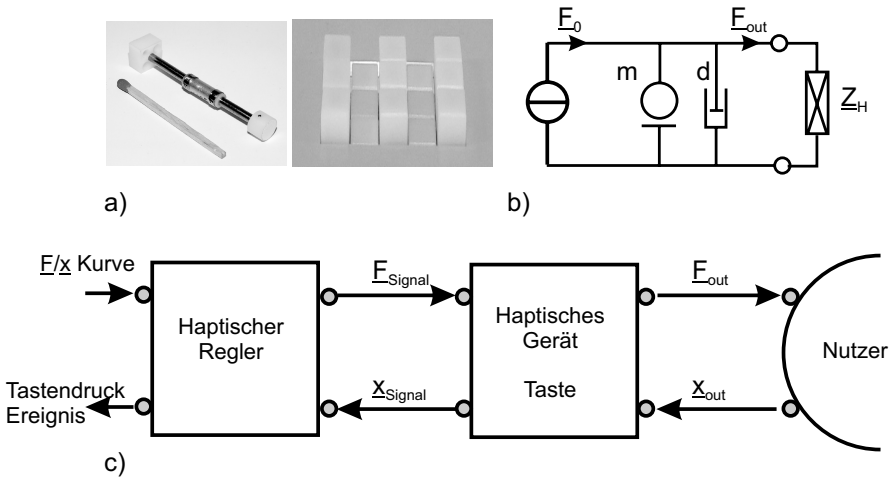


Abb. 2.11 Haptische Taste als rekonfigurierbare Aktoren mit einem Freiheitsgrad (a) und zugehöriges mechanisches Netzwerk (b) [46] sowie Blockstruktur (c).

terentwicklung der Braille-Displays, zu deren psychophysikalischen Wirkprinzipien seit Mitte des 20. Jahrhunderts, z.B. durch BÉKÉSY [23], umfangreiche Studien gemacht wurden. Taktile Pin-Arrays bedienen sich unterschiedlicher Aktorprinzipien. Von elektromagnetischen Aktoren aus Nadeldruckköpfen [225] über Piezobieger [144] bis hin zu pneumatischen [284], hydraulischen [224], elektrostatischen [282] und thermischen [5] Aktoren wurde vieles versucht. Die taktilen Pin-Arrays waren vor allem Arrays mit haptischer Stimulation in normaler Hautrichtung. Erst in jüngster Vergangenheit wurden auch ortsverteilte Arrays zur Lateralkrafterzeugung erprobt [137].

Ein taktiler Pin-Array mit Anregung in Normalenrichtung ist ein *haptisches Gerät* (Abb. 2.12c) das schwerpunktmäßig die taktile Wahrnehmung adressiert. Der *Nutzer* befindet sich in *haptischer Interaktion* mit dem Gerät und erhält *haptische Informationen* in Form von ortskodierten Höhenveränderungen. Ein taktiler Pin-Array ist also ein *haptisches Display*. Im Gegensatz zu den vorherigen Systemen wird aber bei einem üblichen taktilen Pin-Array keine Information durch die Interaktion des Displays mit dem Nutzer an das System zurück gemeldet. Es handelt sich daher nicht zwangsläufig um ein *haptisches Interface*⁵.

Im mechanischen Netzwerk (Abb. 2.12) entspricht ein taktiler Pin-Array einer Positions- oder Geschwindigkeitsquelle y mit nachgeschalteter mechanischer Steifigkeit k eines technischen Systems (einer Kombination aus Aktorik und Kinematik). Wird dieses ausreichend steif ausgelegt, so ist die mechanische Admittanz des

⁵ Es sind durchaus taktile Systeme denkbar, bei denen z.B. die Lage des Fingers auf einer größeren Matrix eine Information an die steuernde Einheit übergibt, so dass die Begrifflichkeit *haptisches Interface* gerechtfertigt ist.

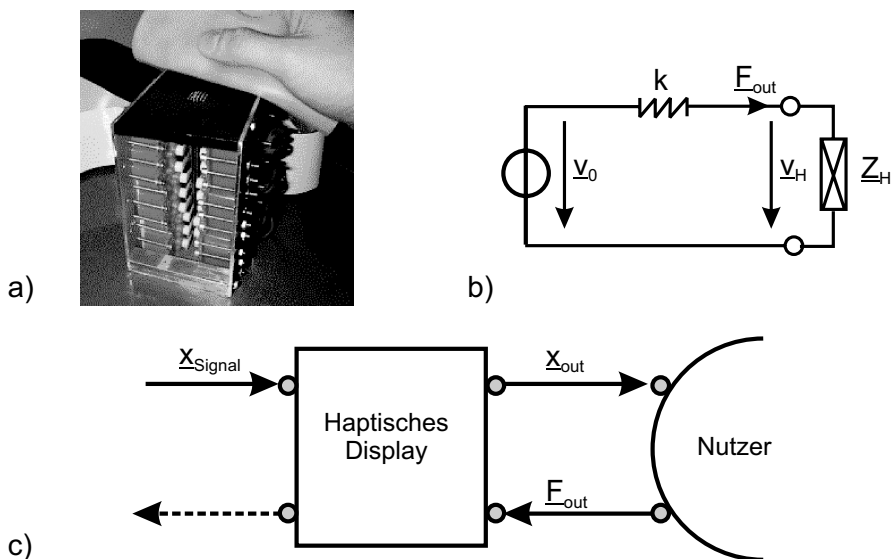


Abb. 2.12 Klassisches taktilen Display in Form normal zur Displayoberfläche stehender Pins [268] (a) und zugehöriges mechanisches Netzwerk (b) sowie Blockstruktur (c).

technischen Systems klein, so dass die Auslenkung der Quelle vollständig am Nutzer anliegt. Das System ist positionsgesteuert.

2.2.5.4 Vibrations-Motor

Vibrations-Antriebe dienen dazu, die Aufmerksamkeit auf Ereignisse zu lenken. In jedem modernen Mobiltelefon befindet sich ein Vibrationsantrieb entsprechend Abbildung 2.13a bestehend aus einem Antrieb und einem exzentrisch angeordnetem Gewicht auf der Achse. Die Rotationsgeschwindigkeit der Vibrationsantriebe wird durch die anliegende Spannung gesteuert und bewegt sich zwischen 7000 und 12000 Umdrehungen pro Minute. Durch diese Spannungssteuerung ist es möglich, amplitudenabhängig Informationen zu kodieren. Dies wird bei Mobiltelefonen gerne dazu verwendet, die Klingelton-Melodie auch haptisch spürbar zu machen.

Ein Vibrations-Antrieb ist ein *haptisches Gerät* (Abb. 2.13c) das die taktile Wahrnehmung adressiert. Der Nutzer befindet sich in *haptischer Interaktion* mit dem Gerät und erhält *haptische Informationen* in Form von in Frequenz und Amplitude kodierten Schwingungen. Ein Vibrations-Antrieb ist also ausschließlich ein *haptisches Display*, genau genommen ein *taktilen Display*.

Bei Vibrations-Antrieben ist der relevante, wirkende Krafteffekt die Zentripetal-kraft. Unter der Annahme einer Rotationsgeschwindigkeit von $\omega = 2\pi \frac{10000 \text{ RPM}}{60}$ Hz und einer bewegten Masse von 0.5 g auf einem Radius von 2 mm ergibt sich eine re-

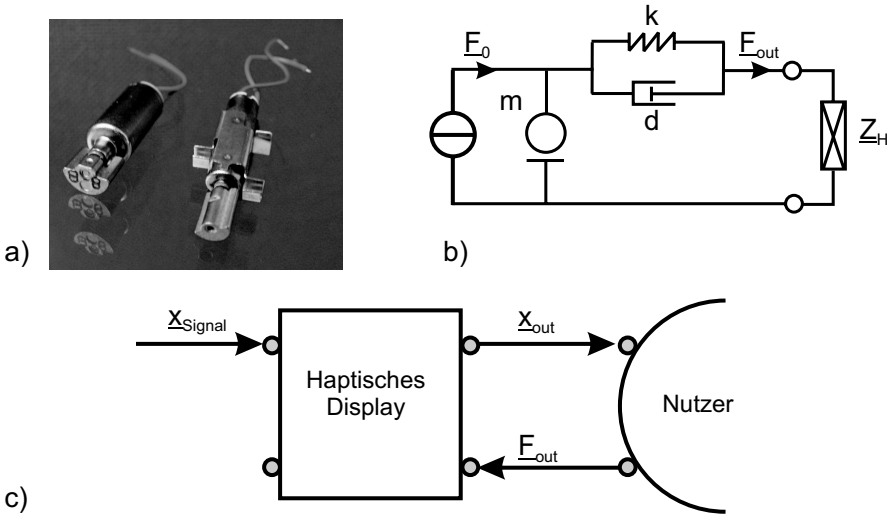


Abb. 2.13 Vibrations-Motor eines Mobiltelefons (a) und zugehöriges mechanisches Netzwerk (b) sowie Blockstruktur (c).

sultierende Kraftamplitude von $F = m \omega^2 r = 1.1 \text{ N}$, also bei der Rotation eine sinusförmige Kraft mit einer Spitze-Spitzen-Amplitude von 2.2 N . Dies ist ein beeindruckender Wert für einen Antrieb von typischerweise 20 mm Länge. Betrachtet man die Netzwerkstruktur (Abb. 2.13b), dann kann der Vibrationsantrieb als Krafquelle mit sinusförmigen Verlauf betrachtet werden. Dieser muss eine Gehäusung mit der Masse m beschleunigen, das über eine Kopplung (z.B. Kleidung) an den Menschen koppelt. Wichtig ist, dass die Impedanz des Zweiges aus Feder/Dämpfer Kopplung und Nutzerimpedanz Z_H groß ist gegenüber der Masse m , damit die Vibrationsenergie zum großen Teil auf den Menschen und somit zur Wahrnehmung geleitet wird.

Entwicklung Haptischer Geräte

Ein Einstieg für Ingenieure

Kern, T.A. (Hrsg.)

2009, XXX, 486 S. 289 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-87643-4