



universitätsverlag
ilmenau

Kölling, Thomas; Paris, Jascha; Hüsing, Mathias; Corves, Burkhard:

**Optimierung des Entwicklungsprozesses von handbetätigten
Bewegungseinheiten durch Simulation digitaler Prototypen in
einem universellen haptischen Feedbacksystem**

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-285-1

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-285-1>

Erschienen in:

10. Kolloquium Getriebetechnik : Technische Universität Ilmenau, 11. - 13.
September 2013. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - S. 285-302.
(Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 2)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-065-5 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033>

OPTIMIERUNG DES ENTWICKLUNGSPROZESSES VON HANDBETÄTIGTEN BEWEGUNGSEINHEITEN DURCH SIMULATION DIGITALER PROTOTYPEN IN EINEM UNIVERSELLEN HAPTISCHEN FEEDBACKSYSTEM

Kölling, Thomas; Paris, Jascha*;
Hüsing, Mathias*; Corves, Burkhard**

* Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen
Kackertstraße 16-18, 52072 Aachen; E-Mail: koelling@igm.rwth-aachen.de

Kurzfassung/Abstract

Der Konstruktions- und Entwicklungsprozess von Bewegungseinheiten ist klassisch in eine Folge von verschiedenen Phasen gegliedert, die stark iterativ durchlaufen wird. Eine wiederkehrende Aufgabe ist die Bewertung und Beurteilung, um alle Anforderungen angemessen umzusetzen. Handbetätigte Mechanismen stellen definitionsgemäß eine Schnittstelle zum Menschen dar und bedürfen daher einer ergonomiegerechten Gestaltung. Die Bewertung dieser Aspekte ist häufig schwierig. Auch gängige Normen und Richtlinien geben nur Aufschluss über statische max. Größen, ohne Aussagen über Bedienbarkeit und Komfort zu treffen.

Der Einsatz eines haptischen Feedbacksystems (HFS) kann sowohl die Bewertung einer Lösung als auch den direkten Variantenvergleich maßgeblich unterstützen und vereinfachen. Dabei wird ein Modell des zu entwickelnden Mechanismus simuliert und mittels eines Feedbackgeräts für den Entwickler haptisch dargestellt. Die Verwendung derartiger digitaler Prototypen ermöglicht eine umfassende Einschätzung bereits in frühen Entwicklungsphasen und spart den Fertigungsaufwand von physischen Prototypen. Somit kann der Entwicklungsprozess entscheidend verbessert und die Qualität des Produkts gesteigert werden.

Anhand von kommerziellen Desktopgeräten können grundlegende Ansätze erprobt werden. Aus Sicht der Getriebetechnik stellt dabei sowohl die für das haptische Feedback verwendete Struktur als auch die in der Simulation nachgebildete Getriebeanwendung einen Mechanismus dar. Die Anwendung bestimmt Aufbau und Parametrierung des Simulationsmodells. Aus den verschiedenen Laufgraden, der Nutzerimpedanz und den Vorteilen einer Störgrößenkompensation ergeben sich Anforderungen an die Regelung.

Bisher erfüllt kein System alle Anforderungen, sodass die Neuentwicklung eines universellen HFS sinnvoll scheint. Die Entwicklung erfolgt anhand einer hinsichtlich Arbeitsraum, Kraft und Steifigkeit optimierenden Struktur- und Maßsynthese. Die ausgestaltete HFS-Zelle bietet alle genannten Vorteile.

The design process of motion devices follows a iterative sequence of different stages. Recurring tasks during and after every stage are especially the evaluation and assessment to fulfill all requirements adequately. Furthermore manually actuated mechanisms must be designed in accordance with ergonomics. However the evaluation of ergonomics is particularly difficult and even standards and guidelines only provide information about maximum values without concerning comfort and usability.

Haptic feedback systems (HFS) may be used to evaluate a solution or to compare different variants directly and easily. The feedback device offers the opportunity to feel the simulated model of future mechanism. With such kind of digital prototypes engineers are able to gain comprehensive ratings in very early development stages. Not only can the quality of the future product be improved decisively but also the process itself.

Some basic approaches can be tested with commercial desktop devices. The HFS includes two mechanisms: The robotic mechanism used to provide feedback and the one to design determining the simulation model. Parameters for the simulation are specified by the application. Requirements for the control result from different degrees of freedom, user impedances and advantages of interference compensation.

Up to now no system fulfills all requirements hence the new development of a universal HFS seems reasonable. Principal aims of the synthesis are the optimization of working area, force, stiffness and mass. The designed HFS-Cubicle provides all advantages mentioned.

1 Haptik und haptische Feedback-Systeme

Die Haptik, die Lehre vom Tastsinn, befasst sich mit den sensorischen Fähigkeiten der Haut, Gelenke, Muskeln und Sehnen des Menschen. Sie gilt neben dem Sehen, Hören, Riechen und Schmecken als einer der fünf Sinne. Zur haptischen Wahrnehmung gehören die taktilen und kinästhetischen Sensoren ebenso wie das Schmerz- und Temperaturempfinden. Die Haut verfügt neben den Rezeptoren für Temperatur und Schmerz über verschiedene taktile Sinnesorgane. Diese ermöglichen das Erfühlen kleinster Bewegungen oder Vibrationen, des Drucks auf der Haut sowie der Form und Textur von Objekten. Für die kinästhetische Wahrnehmung hingegen sind die Muskelspindeln, Sehnenspindeln und Gelenkrezeptoren verantwortlich. Die Sinnesorgane im Muskel ermitteln die Länge des selbigen und können so die Spannung regulieren. Zusammen mit den Gelenkkapselorganen bilden sie unseren Stellungssinn. Diese Tiefensensibilität ermöglicht die Wahrnehmung der Lage der einzelnen Körperteile zueinander. Die Rezeptoren für Kraft und Bewegung bilden die Sehnenspindeln, welche auch Tendorezeptoren genannt werden und auf die Dehnung und Kontraktion der Muskeln reagieren. [1]

1.1 Grenzen der menschlichen Wahrnehmung: „Just Noticeable Difference“ und das Webersche Gesetz

Wichtige Kenngrößen der haptischen Wahrnehmung sind die gerade noch unterscheidbaren Differenzen, *Just Noticeable Difference (JND)*. Dabei handelt es sich um die Amplitude eines Reizes sowie die absoluten Schwellen verschiedener Rezeptoren. Diese sind abhängig von der Art des Stimulus und der Frequenz. Darüber hinaus muss die subjektive Empfindung verschiedener Steifigkeiten berücksichtigt werden.

Die taktile Wahrnehmung ist besonders fein und kann sehr hohe Frequenzen auflösen. Bei großer Amplitude sind dies bis zu 1000 Hz und bei deutlich kleinerer Frequenz kann eine Amplitude bis 0,5 mm aufgelöst werden. Die obere Grenzfrequenz des kinästhetischen Empfindens liegt zwischen 20 Hz und 30 Hz und die absolute Schwelle der Winkellage der einzelnen Körpergelenke liegt zwischen $0,8^\circ$ und $2,5^\circ$. Dadurch kann die Position der Hände durch den Stellungssinn lediglich Zentimetergenau bestimmt werden. Bereits im Jahr 1834 zeigte Weber, dass der Quotient aus Differenzschwelle

und Referenzstimulus konstant ist. Für eine Einschätzung ist das *Weber'sche Gesetz* geeignet. Die JND der Kraftwahrnehmung liegt bei Gewichtskräften zwischen 3% und 7%. Bei Massenkäften ist dieser Wert noch geringer. Mit verbundenen Augen werden Steifigkeiten ab 25 N/mm als Festkörper wahrgenommen. [2] [3] [4]

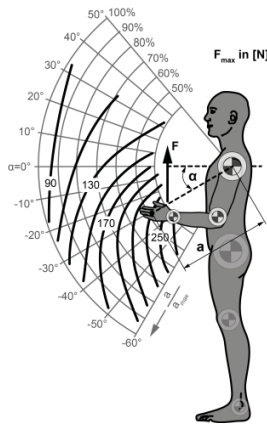


Abb. 1: Maximalkräfte bei einfacher Hubbewegung [5]

Auch die Fähigkeiten des Menschen Kräfte aufzubringen oder Bewegungen auszuführen sind bei der Betrachtung haptischer Geräte von großer Bedeutung. Das Aufbringen von Kräften respektive Bewegungen ist maximal mit 20 Hz bis 30 Hz möglich. Dabei ist das schnelle, koordinierte Bewegungen der Hände zwischen zwei Punkten in der Regel maximal mit Geschwindigkeiten von 1 m/s anzunehmen. Das Aufbringen von Kräften durch die menschliche Hand unterscheidet sich stark abhängig von der aktuellen Pose der Arme und reicht von 62 N bis 231 N, wie Abb. 1 darstellt. [3] [6]

1.2 Haptische Feedback-Systeme

Bildschirme und Lautsprecher stimulieren unseren Seh- beziehungsweise Gehörsinn. Ein haptisches Feedback-System (HFS) erweitert die Ausgabe digitaler Informationen auf die Haptik. Allgemein können HFS in rein taktile Displays und hauptsächlich kinästhetische Geräte unterteilt werden, wobei letztere immer auch eine taktile Komponente enthalten. Neben der haptischen Informationsausgabe ermöglichen Geräte mit entsprechendem Eingang eine interaktive haptische Mensch-Maschine-Interaktion. Eine reine

haptische Informationsausgabe bieten beispielsweise Mobiltelefone oder Blindenschriftausgabegeräte. Im Folgenden werden jedoch nur HFS mit Sensoren und primär kinästhetischer Ausgabe betrachtet.

Ein HFS besteht, wie Abb. 2 allgemein darlegt, aus einem Griff als Nutzerschnittstelle, Aktoren, Sensoren, einer mechanischen Struktur sowie der Informationsverarbeitung, bestehend aus der Motorsteuerung, Regelung und Simulationseinheit. Eine visuelle Ausgabe ist zwingend, damit die gefühlten Bewegungen richtig eingeordnet und wahrgenommen werden können.

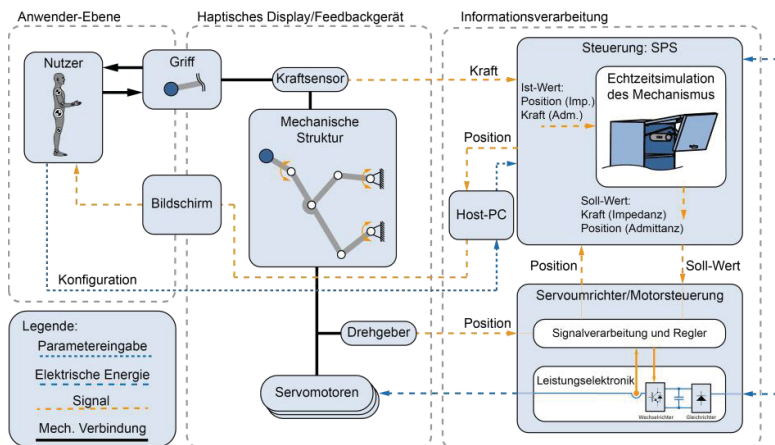


Abb. 2: Aufbau eines HFS zur Mechanismsimulation und -ausgabe

Die Aus- und Eingabemöglichkeiten der Geräte können weiter differenziert werden, sodass sich vier grundlegende Strukturen ergeben. Sie unterscheiden sich durch eine vorhandene oder nichtvorhandene Rückführung in geregelte und gesteuerte Systeme sowie der Art der Ausgabe in impedanz- bzw. admittanzbasierend. Die Impedanz ist der Widerstand gegen eine Bewegung und entspricht bei Feedbackgeräten einer Kraftausgabe. Hingegen ist die Admittanz der Kehrwert der Impedanz und entspricht einer Positionsrückgabe. Impedanzsysteme bestehen in der Regel aus einer leichten Struktur, die wenig Reibung besitzt, und weisen eine hohe Dynamik auf. Hingegen sind Admittanzsysteme häufig in der Lage, große Kräfte auszugeben und benötigen keine leichte Struktur, da Reibung und Trägheitskräfte die Kraftausgabe nicht beeinflussen [2]. Kinematische und dynamische Kenngrößen, die auf verschiedene Weise korrelieren, bilden Unterscheidungs-

merkmale für haptische Feedbackgeräte. Dazu gehören die Größe, die Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade, der Arbeitsraum, die Kraftausgabefähigkeit, die Steifigkeit, die Dynamik und die Auflösung.

2 Motivation für HFS in der Mechanismenkonstruktion

Die Entwicklung und Konstruktion steht vor der Herausforderung in kürzester Zeit qualitativ hochwertige Produkte unter Berücksichtigung der wechselnden Kundenwünsche bei gleichzeitig immer kleineren Budgets zu konzipieren. Die frühzeitige Markteinführung von Produkten mit hoher Akzeptanz ist ein entscheidender Faktor für den Unternehmenserfolg. Einen Ansatz bietet das *Rapid Product Development (RPD)*, welches vor allem auf virtuelle und hybride Prototypen zurückgreift um schnellere Iterationszyklen zu erreichen und den Entwicklungsprozess bei erhöhter Produktqualität zu verkürzen. Allerdings herrscht hier die Auffassung von Prototypen als reines Softwareabbild und dessen Visualisierung vor. Zudem verbessert der Einsatz digitaler Prototypen oder *Virtual-Reality*-Umgebungen die Zusammenarbeit internationaler Teams, da diese nicht ortsgebunden sind. Während klassische Berechnungen und diverse Simulationen, wie MKS, FEM, CFD oder Simulationen von Montage- und Fertigungsabläufen, bereits verlässliche Aussagen ermöglichen, gestaltet sich die Vorhersage ergonomischer Aspekte schwierig. [7]

Die Ergonomie befasst sich mit der Interaktion zwischen technischem Erzeugnis und dem Menschen. Dabei spielen die Fertigkeiten, Fähigkeiten und Eigenschaften des Menschen eine zentrale Rolle. In der VDI Richtlinie 2242 wird zudem festgelegt, dass Tätigkeiten, die der Mensch ausüben soll, ausführbar, zumutbar, zufriedenstellend und langfristig erträglich sein sollen. Daher ist es notwendig, ergonomiegerecht zu gestalten und biomechanische, physiologische, psychologische und weitere Aspekte zu berücksichtigen. [8]

Durch die konstruktive Gestaltung eines technischen Erzeugnisses werden bestimmte Körperhaltungen, -bewegungen und -kräfte bedingt. Beeinflusst von Körpermaßen, Dauer und Häufigkeit der Ausübung, Ermüdung und Erfahrung des Bedieners ergibt sich eine Belastungssituation. Für die Auslegung unter Berücksichtigung dieser Einflüsse stehen dem Konstrukteur verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. Es existieren anthropometrische Normenwerke zu Körpermaßen, Bewegungsräumen und Körperumriss-

schablonen. Damit lässt sich eine Aussage über die Ergonomie eines Arbeitsraumes treffen, wenn zuvor die Bahnkurve der Bewegung, die Kraftverläufe im Hodographenverfahren oder die maximale Kraft bestimmt wurden. Auch können die ertragbaren statischen Kräfte abgeschätzt werden.

2.1 Vorzüge der Ausgabe digitaler Prototypen mittels HFS

Mittels der genannten Techniken ist eine hinreichende Bewertung, der dynamischen Kraftverläufe im Arbeitsraum unter Berücksichtigung der entsprechenden Körperhaltung praktisch unmöglich [8]. Darüber hinaus ist es äußerst schwer das subjektive menschliche Empfinden oder Ermüdungerscheinungen einzubeziehen. Daher finden üblicherweise physische Prototypen Anwendung. Diese können durch *Rapid Prototyping Verfahren*, ggf. unter Verlust von untergeordneten Eigenschaften, beschleunigt generiert werden. Ein virtueller Prototyp ist hinsichtlich Zeit und Kosten jedoch deutlich effizienter.

Diesem Bedürfnis kann durch haptische Feedbacksysteme zur Simulation handgeführter Mechanismen begegnet werden. Liegen Produkte in einem frühen Entwicklungsstadium rein virtuell vor, können diese dem Entwickler oder der Testpersonen somit haptisch erfahrbar und direkt zugänglich gemacht werden. Auch in frühen Entwicklungsphasen ist es so möglich, Entscheidungen begründet und dokumentiert unter Berücksichtigung vieler biomechanischer und physiologischer Aspekte zu treffen. Die Verwendung eines Griiffs entsprechend der Originalanwendung vermittelt dabei ein realistisches, taktiles Gefühl. Um hochrealistische Simulationen durchzuführen, ist es ebenso denkbar physiologische Einflüsse wie Stress oder Umwelteinflüsse wie die Temperatur während der Nutzung einzustellen. [9]

Wie Abb. 3 zeigt, kann der klassische Entwicklungsprozess als eine Abfolge von Phasen beschrieben werden [10] [11]. Das Bestreben, Fehler bereits während der Zieldefinition und der Funktionssynthese zu verhindern, kann dabei jedoch häufig nicht umgesetzt werden. Als Folge steigen die Gesamtkosten durch deren spätere Beseitigung. Der Einsatz eines HFS zur Simulation und haptischen Ausgabe digitaler Prototypen bietet das Potential, ähnlich anderer virtueller Prototypen, den Entwicklungsprozess für handbetätigte Bewegungseinheiten zu verkürzen, zu erleichtern, Fehler früher zu beseitigen und letztendlich die Qualität des Produktes zu steigern. Beim Marke-

ting und während der Zieldefinition können Produktideen oder Bewegungsaufgaben unkompliziert anfassbar dargestellt und so schneller und fundierter bewertet werden. Die Erprobung und der Vergleich von Varianten mit unterschiedlichen Übertragungsfunktionen, Getriebestrukturen, Gelenkarten, Getriebeängen und Abmessungen mittels eines HFS optimiert die Funktions- und Prinzipsynthese. Ungünstige Varianten werden schneller identifiziert und vermieden. Änderungen, die während der Gestaltsynthese erforderlich sind, können direkt evaluiert werden. Letztlich verkürzt oder erübrigt sich sogar die Erprobung durch physische Prototypen, da viele Erkenntnisse bereits vorliegen. Abb. 3 zeigt vereinfachend einen sequentiellen Entwicklungsablauf, der in Realität stärker iterativ verläuft. Insgesamt kann die Sprungweite der Iterationen deutlich verringert und durch viele kleinere Zyklen ersetzt werden. Der Prozess nähert sich so dem stetigen Idealprozess weiter an und der Produktionseintritt kann früher stattfinden.

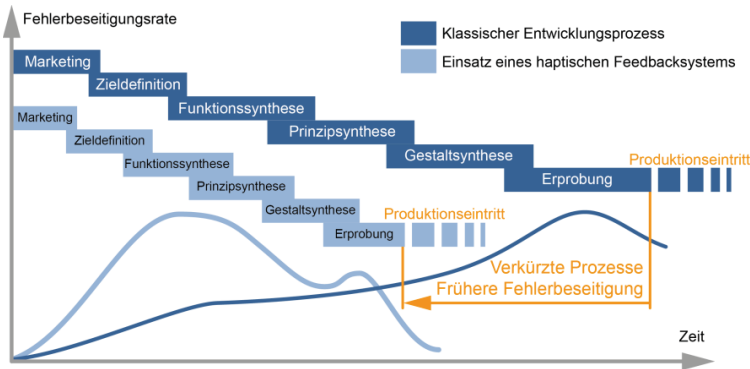


Abb. 3: Vorteilhafte Folgen des HFS-Einsatzes im Entwicklungsprozess

Insbesondere im Handbetrieb von Führungsgetriebenen durch den Menschen entstehen komplexe biomechanische Belastungssituationen. Die Kräfte sind dynamisch, variieren während der Bewegung und die Kinematik ist häufig nichttrivial. Aus diesen Gründen stellt die Anwendung der haptischen Simulation von Mechanismen eine wertvolle Ergänzung des Entwicklungsprozesses dar.

Die Bedeutung für die Getriebetechnik zeigt sich bei diesem Vorgehen gleich in zweifacher Hinsicht. Zum einen wird die klassische Mechanismenkonstruktion sinnvoll unterstützt und zum anderen gilt es, wie in der Robotik, die Kinematik der Ausgabereinheit zu beherrschen.

2.2 Anwendungsszenarien

Im Alltag wird zumeist unbewusst eine Vielzahl handbetätigter Mechanismen genutzt. Türen, Klappen, Fenster oder funktionale Möbel bergen in der Regel Mechanismen, die mitunter komplex gestaltet sind, wie beispielsweise einzelne Küchenbeschläge. Personen- und Lastkraftwagen sowie landwirtschaftliche Maschinen besitzen ebenfalls viele unterschiedliche manuell betätigte Mechanismen. Beispiele sind Autotüren, Heckklappen, Gepäckfächer, Abdeckungen, Flügel- oder Schiebetüren. Häufig ist eine Zusatzbewegung oder Lage erforderlich, so dass ein mehrgliedriges Getriebe erforderlich ist. Andere Anwendungen finden sich im Freizeitbereich bei Fitnessgeräten oder Solarien.

Den genannten Beispielen ist gemein, dass es sich stets um Führungsgetriebe mit ebenem Bewegungsbereich bzgl. des vom Anwender betätigten Griffs handelt. Auch die meisten anderen handbetätigten Systeme sind aus konstruktiven, ergonomischen oder preislichen Gründen planar. Somit ist es für ein HFS, welches diese abbilden soll, hinreichend Position und Orientierung in der Ebene vorgeben zu können, also einen Laufgrad von drei aufzuweisen. Darüber hinaus ist eine Verstellbarkeit der Arbeitsebene zweckmäßig, da die Anwendungen sowohl vertikal, als auch horizontal sowie in unterschiedlichen Höhen betrieben werden.

3 Voruntersuchungen an Desktopgeräten

Das beschriebene Verfahren der haptischen Simulation und Ausgabe wird in einer Studie an kommerziellen Geräten der Desktopklasse getestet. Die Studie zeigt die Machbarkeit und liefert Erfahrungen bei der Umsetzung.

3.1 Komponenten und Aufbau der Studie

Für die Studie wird primär der verbreitete Phantom Omni als haptisches Feedbackgerät verwendet. Dabei handelt es sich, wie Abb. 4 zeigt, um eine mechanische Struktur mit serieller Kinematik, drei aktiven und drei passiven Freiheitsgraden der Bewegung. Der Arbeitsraum misst $160\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 70\text{ mm}$. In horizontaler Position kann eine maximale Kraft von $3,3\text{ N}$ aufgebracht werden. Im vorliegenden Anwendungsfall ist es zweckmäßig die drei passiven Freiheitsgrade der Orientierung zu sperren.



Abb. 4: Phantom Omni von Sensable bzw. Geomagic

Das Feedbackgerät wird Impedanz-gesteuert betrieben, da dies der Funktionalität Kräfte ausgeben und die Position auslesen zu können entspricht. Die Regelung wird, wie in Abb. 5 dargestellt, in Matlab-Simulink und die Simulation mittels der Toolbox SimMechanics, kompiliert in echtzeitfähigen Code umgesetzt. Der modulare Aufbau ermöglicht einen einfachen Zugang und eine intuitive Anpassung des Simulationsmodells.

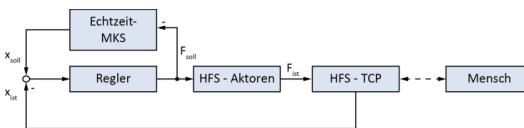


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Regelung

3.2 Nutzung und Parametrisierung mittels GUI

Jeweils ein vollständig parametrisiertes SimMechanics-Modell eines allgemeinen viergliedrigen Drehgelenk-Getriebes und einer Schubkurbel werden in der Simulationsumgebung erstellt. Über eine Benutzeroberfläche können Längen und Massen der Getriebeglieder, Reibwerte für die Gelenke, Antriebsmomente in den gestellfesten Gelenken und weitere Parameter eingestellt werden. Ebenfalls bietet die Benutzeroberfläche eine Visualisierung. Eine typische Darstellung zeigt Abb. 6 a).

Nachdem der Benutzer die Parameter des Getriebes ausgewählt hat, wird die Koppelkurve berechnet und in den Arbeitsraum des Feedbackgerätes gelegt. Auch wird ermittelt und vorgeschlagen in welchen Grenzen die Koppelkurve skaliert werden kann, sodass diese gut darstellbar ist.

Die Summe der vom Benutzer eingebrachten Kräfte, der Sollkräfte sowie der Gewichts-, Reibungs- und verallgemeinerten Trägheitskräften ergibt Null.

Demnach führen letztere zu einer Differenz zwischen Soll- und Ist-Kraft. Um das Ergebnis zu verbessern kann ein genaues Modell des Phantom Omni simuliert werden, welches die auftretenden dynamischen Kräfte am Ausgabegerät kontinuierlich berechnet und kompensiert. Da die Gewichtskräfte im Vergleich zu den Reibungs- und Trägheitskräften deutlich größer sind, erzielt bereits eine Gewichtskraftkompensation gute Ergebnisse.

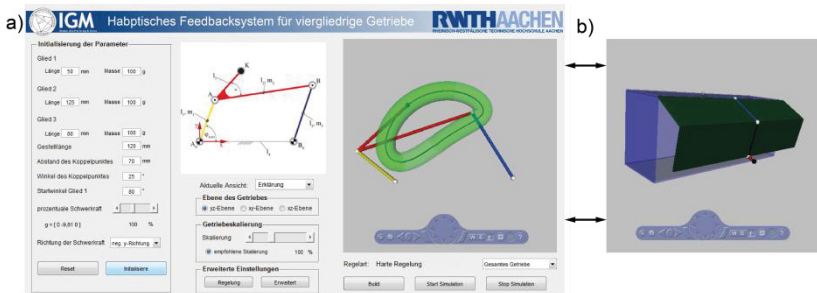


Abb. 6: a) Grafische Benutzeroberfläche zur Mechanismensimulation;
b) Visualisierung des Anwendungsfalls eines Küchenoberschrankes

Weiter ist zu beachten, dass die Impedanz als Widerstand gegen eine Bewegung des Nutzers stark schwankt. Es ist ein deutlicher Unterschied ob der Benutzer den Griff fest umschlossen hält und den Arm anspannt, ihn locker zwischen zwei Fingern führt oder sogar loslässt. Die optimalen Parameter der Regelung hängen jedoch von dieser Nutzerimpedanz ab. Die Geräteimpedanz hat meist geringeren Einfluss. Um dieses Problem zu verhindern ist es eine Möglichkeit mit einem Kraftsensor die Kraft- und Bewegungsdaten auszuwerten und die Nutzerimpedanz kontinuierlich zu errechnen. Da das Gerät jedoch keinen Kraftsensor bietet, erfolgt abhängig von der Simulationsphase und der Bahnabweichung eine Einteilung in drei diskrete Modi. Diese bedeuten unterschiedliche Parameter für den PID-Regler. Somit wird ein angemessenes Verhalten erzeugt und Instabilitäten, die beispielsweise beim Loslassen des Griffstücks auftreten können erfolgreich verhindert.

3.3 Simulation der Bewegungseinheit eines Oberschranks

Die Simulation eines Möbelbeschlages samt zugehörigem Oberschrank stellt ein konkretes Anwendungsbeispiel dar, wie Abb. 6 b) zeigt. Die Visualisierung zeigt ein 3D-Modell eines Küchenschrankes mit einer grünen Tür und einem blauen Griff. Die Simulation wird durch eine grafische Benutzeroberfläche gesteuert, die in Teil a) dargestellt ist.

lisierung der GUI ist um die physische Ausprägung der Schrankkomponenten ergänzt. Die Elemente der zweigeteilten Front stellen jeweils einen Teil eines Getriebegliedes dar. Es wird, wie es in der Regel der Fall ist auch hier nur ein Abschnitt der Bahnkurve effektiv durchlaufen. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit Anschläge abzubilden. Darüber hinaus werden ebenfalls Endlagendämpfungen und eine Kraftunterstützung durch eine eingesetzte Feder im Simulationsmodell integriert, um es realitätsnah zu gestalten. Durch den modularen Aufbau im MKS sind die angeführten Erweiterungen einfach umzusetzen.

Handbetätigte Bewegungseinheiten sind häufig deutlich größer als der Arbeitsraum eines Desktopgerätes. Die Koppelkurven der verschiedenen Getriebekonfigurationen können in meist verkleinertem Maßstab zutreffend haptisch dargestellt werden. Allerdings ist auch die verfügbare Maximalkraft des Gerätes zu gering, um die menschliche Hand zu führen oder einen solide empfundenen Anschlag darzustellen. Dadurch kann lediglich eine entsprechend skalierte Version derartiger Getriebe ausgegeben werden. Zwar ist es dem Konstrukteur somit möglich die Koppelkurve zu spüren, allerdings ist die Belastungssituation nicht mehr vergleichbar und eine ergonomische Bewertung stark eingeschränkt. Das Potential haptischer Feedbackgeräte besteht insbesondere darin die tatsächlich auftretenden Belastungen bei realistischer erforderlicher Körperhaltung erfahrbar zu machen.

4 Entwurf einer universellen HFS-Zelle

Um den Problemen bei der Bewertung ergonomischer Aspekte und Komfort bzw. Diskomfort während der Konstruktion von handbetätigten Bewegungseinheiten entgegenzuwirken ist es das Ziel ein neuartiges haptisches Feedbackgerät zu entwerfen. Dieses ermöglicht die universelle Ausgabe geplanter virtueller Mechanismen und reduziert so den kosten- und zeitintensiven Bau von physischen Prototypen. Ziel ist es mit dem HFS, auf Basis digitaler Bewegungsdaten einen realistischen Eindruck des zugrundeliegenden Mechanismus insbesondere auch haptisch zu vermitteln. Diese Aufgabe kann zunächst durch das Aufstellen der Anforderungsliste weiter präzisiert werden, indem die Anwendungsfälle, die Fähigkeiten des Menschen bezüglich der haptischen Wahrnehmung und Ausgabe und Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden.

4.1 Anforderungen an ein universelles HFS

Der Mehrzahl manuell betätigter Bewegungseinheiten liegt ein ebenes Getriebe zugrunde (vgl. 2.2), sodass ein HFS mit drei Freiheitsgraden bzgl. Position und Orientierung in der Ebene ausreichend ist. Es muss jedoch eine Verstellung der Betriebsebene erfolgen können. Da die betrachteten Mechanismen üblicherweise in der Horizontalen oder auch in der Vertikalen betrieben werden, nicht jedoch in der Diagonalen, sind diese beiden Lagen von Interesse. Auch eine Höhenverstellung ist nötig, um die Randbedingungen realistisch zu gestalten. Die Beschränkung auf drei Freiheitsgrade hat zudem den Vorteil einer deutlich erhöhten Steifigkeit quer zur Bewegungsebene. Messungen der Kräfte, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten während der Betätigung unterschiedlicher existierender Mechanismen wie beispielsweise Autotüren, Hackklappen oder Schranksystemen zeigen, dass die aufzubringenden Kräfte 50 N nicht überschreiten. Bei allen Mechanismen wird ebenfalls eine Beschleunigung von 30 m/s^2 nicht überschritten. Weiterhin lässt sich die Größe der einzelnen Mechanismen zur Auslegung des Arbeitsraumes verwenden.

Aus Anwendungen gewonnene Anforderungen bleiben naturgemäß unter den menschlichen Fähigkeiten, die als Obergrenze für die biomechanische Belastung angesehen werden können. Die Grenzen der haptischen Fähigkeiten des Menschen wurden bereits in Abschnitt 1.1 vorgestellt. Während die Ausgabefähigkeiten bereits durch die Betrachtung der Anwendungen berücksichtigt wurden, muss insbesondere die Ausgabeprecision des HFS der Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen entsprechen oder diese sogar übertreffen.

Eine sicherheitstechnische Auslegung ist in der Norm für taktile und haptische Geräte nicht zu finden. Einen ähnlichen Anwendungsfall behandeln jedoch die Normen für Industrieroboter beziehungsweise für Haushalts- und Assistenzroboter unter dem Stichpunkt Kooperationsbetrieb. Bei der Auslegung kann weiterhin auf Daten von umfangreichen Versuchen des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums zurückgegriffen werden [12]. Auch vergleichbare Geräte und deren Sicherheitseinrichtungen bieten Anhaltspunkte. Allgemein ist es vorteilhaft, dass die Bewegungen ausschließlich in einer Ebene stattfinden können und das Gerät im Normalbetrieb einer Trajektorie folgt. Ungünstige Posen oder zu geringe Scherwinkel einzelner Bauteile können mechanisch gesperrt werden. Eine Begrenzung der maxi-

malen Kraft und Geschwindigkeit ist jedoch erforderlich. Ein freier Arbeitsbereich und der Ausschluss von äußeren Einwirkungen im Betrieb lassen sich durch eine zellenartige Einfassung mit Schutzwänden sicherstellen.

4.2 Konstruktion: Synthese und Auslegung

Das Lösungsfeld für die mechanische Struktur des haptischen Feedbacksystems ist unter Berücksichtigung von Schub- und Drehgelenken sowie rein seriellen, rein parallelen und teilparallelen ebenen Strukturen mit Laufgrad drei sehr umfangreich [13]. Daher ist es sinnvoll sich auf Strukturen mit weniger als z.B. zwölf Gliedern zu beschränken. Nach dem Ausscheiden offensichtlich ungeeigneter Strukturbilder und dem Erstellen ausgewählter kinematischer Ketten, kann eine qualitative Bewertung mittels des paarweisen Vergleichs durchgeführt werden. Eine Abwägung zwischen den vielversprechendsten parallelen, seriellen und teilparallelen Strukturen ist nicht auf qualitativer Basis möglich, sodass die Getriebe in Abb. 7 nicht weiter eingegrenzt werden können.

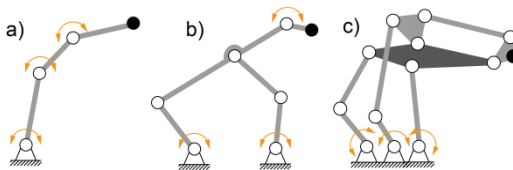


Abb. 7: Auswahl der mechanischen Struktur eines Feedbackgerätes
a) serielle Kinematik, b) hybride Kinematik, c) parallele Kinematik

Im vorliegenden Fall wird die Variante aus Abb. 7 b) weiterverfolgt, da sie einen großen Arbeitsraum bei gleichzeitig geringer bewegter Masse und folglich guter Dynamik verspricht.

Die Funktionsweise des Geräts im Hinblick auf die zugrundeliegenden Mechanismen illustriert Abb. 8. Es soll der Eindruck eines realen, zu entwickelnden Mechanismus erzeugt werden. Zu diesem Zweck wird ein Mehrkörpersimulationsmodell erstellt. Basierend auf einer Messgröße wird der Zustand des Simulationsmodells ermittelt und auf das Ausgabegerät umgerechnet, anschließend werden entsprechende Signale an die Motoren weitergegeben. Wird die Kraft am Griff, als Nutzerschnittstelle gemessen und auf eine Positionsregelung, wie abgebildet betrieben, handelt es sich um eine Admittanzregelung. Wird die Position gemessen und das Moment ge-

regelt, so handelt es sich um eine Impedanzregelung. Erstere Regelung verspricht bessere Ergebnisse, da keine Regelabweichung nötig ist, um eine Kraft auszugeben, der Trajektorie sehr genau gefolgt werden kann und kein weiteres regelndes Element zwischen Positionsmessgröße und Griffposition für die Inverskinematik benötigt wird [2].

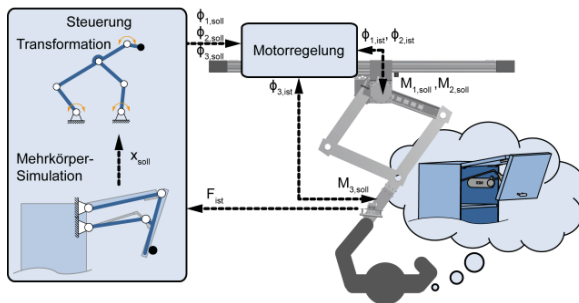


Abb. 8: Grundlegender Aufbau und Anwendung des HFS

Die benötigten Komponenten sind in Abb. 2 dargestellt. Neben drei Servomotoren für den Antrieb, muss das haptische Feedbacksystem über Positions- und Kraftsensoren verfügen. Servoumrichter übernehmen die Regelung der Motoren und stellen die Leistung bereit, wobei die Berechnungen von einer SPS übernommen werden. Eine Überprüfung des Einsatzes von Servobremsen ergibt, dass ihr Nutzen zu gering ist, da die Motoren deutlich schneller reagieren.

Die dynamische Rückwärtsrechnung mit den Randbedingungen der Anwendungen ermöglicht eine Auslegung der Motoren und die Ermittlung der maximal auftretenden Kräfte. Mittels einer Matrix-Struktur-Analyse, bei der die Glieder, Gelenke und Lager durch entsprechend parametrisierte virtuelle Federn ersetzt werden, kann eine Steifigkeitsbetrachtung erfolgen. Anhand der Antriebsmomente, der Steifigkeit und des Arbeitsraumes ist es möglich die Gliedlängen für den allgemeinen Anwendungsfall zu optimieren. Im Betrieb können die Kurbellängen und der Abstand der Gestellpunkte verändert werden. So ist eine spezielle Einstellung für die jeweilige Anwendungen möglich (vgl. 4.3).

Bei der Auslegung der einzelnen Bauteile sind neben einer ausreichenden Festigkeit sowohl das Gesamtgewicht als auch die Steifigkeit iterativ zu optimierende Zielgrößen.

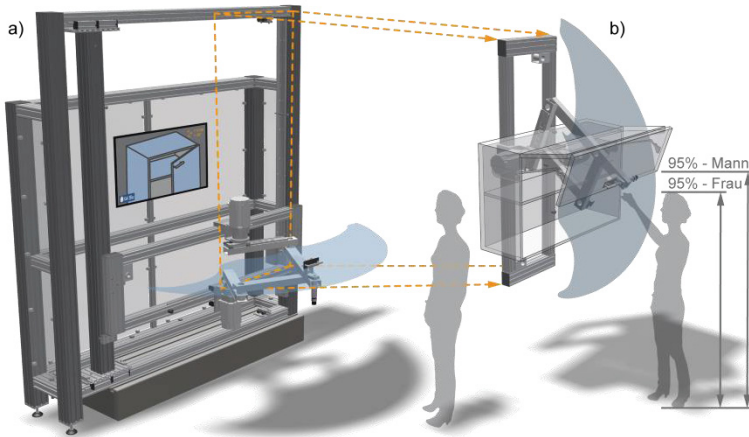


Abb. 9: Universelles, rekonfigurierbares haptisches Feedbacksystem
 a) höhenverstellbarer Horizontalbetrieb mit Visualisierung;
 b) Vertikalbetrieb mit Überlagerung des Simulationsmodells

Das ausgestaltete haptische Feedbackgerät zeigt Abb. 9. Die hintere Säule ist in Abbildungsteil a) dargestellt. Mittig davor ist das sechsgliedrige teilparallele Getriebe zu erkennen, welches direkt mit den beiden Servogetriebemotoren verbunden ist. Diese sind auf einem drehbaren Rahmen montiert, der manuell in der Höhe verstellbar und der Ausrichtung gedreht werden kann. Außerdem ist der Arbeitsraum der abgebildeten Getriebekonstruktion eingegrenzt. Ein Monitor zeigt die Visualisierung der simulierten Anwendung. Nicht dargestellt ist die sicherheitstechnische Einfassung des Systems. Abbildungsteil b) stellt den Vertikalbetrieb überlagert mit einem fiktiven Oberschrank als exemplarischen Anwendungsfall dar.

4.3 Rekonfigurierbarkeit der HFS-Zelle

Das Rekonfigurieren der gestellnahen Glieder und Gestelllänge ermöglicht ein Anpassen der kinematischen Eigenschaften an konkrete Ausgabeanforderungen. Vereinfacht betrachtet wachsen der Arbeitsraum sowie die benötigten Momente mit der Länge der gestellnahen Glieder, gleichzeitig verhalten sie sich umgekehrt proportional zu der Länge des gestellfesten Gliedes. Das heißt es können deutlich höhere Beschleunigungen und Kräfte in einem kleinen Arbeitsraum simuliert werden.

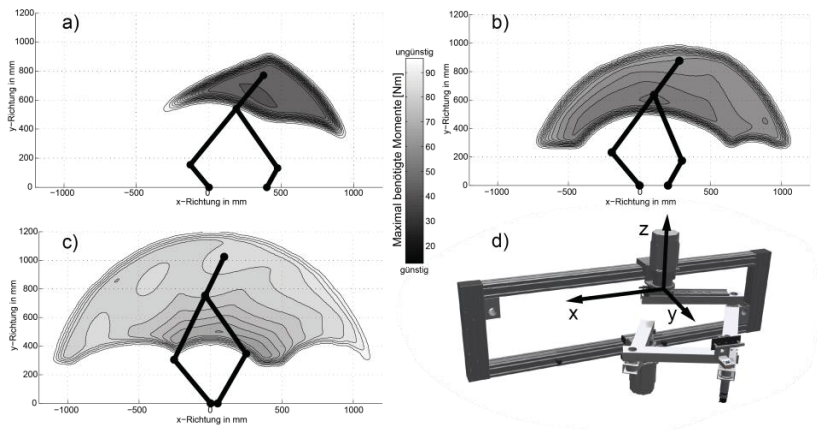


Abb. 10: Vergleich unterschiedlicher Getriebekonfigurationen

Abb. 10 zeigt bei identischer äußerer Belastung, vorgegebener Geschwindigkeit, Beschleunigung und vom Nutzer aufgebrachtener Kraft, die benötigten Momente. Dabei werden verschiedene Richtungen der äußeren Belastung für jeden Punkt des Arbeitsraumes angenommen und die jeweils benötigten maximalen Motormomente berechnet. Dies stellt eine Abschätzung nach oben dar.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag stellt die Vorteile des Einsatzes haptischer Feedbacksysteme zur Simulation manuell betätigter Bewegungseinrichtungen heraus. Die so haptisch erfahrbaren digitalen Prototypen erleichtern sowohl die Bewertung ergonomischer Aspekte und des Komforts, also auch den unmittelbaren Variantenvergleich. Es wird eine Einordnung im allg. Entwicklungsprozess gegeben, die auch den möglichen Einsatz in frühen Phasen aufzeigt. Es wird dargelegt wie dies die Entwicklungsdauer verkürzt, den Aufwand der Iterationen verringert und der kostenintensive Einsatz von Prototypen verringert werden kann.

Eine Machbarkeitsstudie an Desktopgeräten unterstützt den verfolgten Ansatz und liefert erste Erkenntnisse. Anschließend werden die Anforderungen für eine erforderliche Eigenentwicklung beschrieben und die Konstruktion eines universellen haptischen Feedbacksystems präsentiert.

Literatur

- [1] Schmidt, R. F.; Thews, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1997. S. 216-221.
- [2] Kern, T. A. (Hrsg.): *Entwicklung haptischer Geräte*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. S. 97-104.
- [3] Hale, K.; Stanney, M.: Deriving Haptic Design Guidelines from Human Physiological, Psychophysical and Neurological Foundations. In: *IEEE Computer Science (2004)*
- [4] Tan, H; Srinivasan, M.; Ebermann, B.; Cheng, B.: Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces. In: *DSC-Vol. 55-1; ASME Book No. G0909A (1994)*
- [5] Deutsches Institut für Normung: *DIN 33411 Blatt 1 u. 3-5*. Berlin: DIN 1982-99.
- [6] NASA: Human Performance Capabilities. In: *Man-Systems Integration Standards, Volume I, Section 4; msis.jsc.nasa.gov (2013)*
- [7] Bertsche, B.; Bullinger H.-J.: *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2007. ISBN 978-3-540-69879-1
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2242 Blatt 2*. Düsseldorf: VDI 1986.
- [9] Kölling, T.; Hüsing, M.; Corves, B.: Haptische Feedback-Systeme: Stand der Technik und Einsatz als interaktive Unterstützung im Konstruktionsprozess von Mechanismen. In: *Mechatronik 2013, Tagungsband*. ISBN 3-86130-958-0.
- [10] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre – Grundlagen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2007. S. 199, 566-567.
- [11] Niemeyer, J.: *Methodische Entwicklung von Prinziplösungen bei der Auslegung ungleichmäßig übersetzender Getriebe unter Verwendung eines praxisorientierten interaktiven Wissens-speichers*. Dissertation, IGM der RWTH Aachen 2002.
- [12] Haddadin, S.; Albu-Schäffer, A.; Frommberger, M.; et al.: The „DLR Crash Report“: Towards a Standard Crash-Testing Protocol for Robot Safety – Part I and Part II. In: *Conference on Robotics and Automation IEEE (2009)*
- [13] Kerle, M., Pittschellis, R.; Corves, B.: *Einführung in die Getriebelehre – Analyse und Syntheseungleichmäßig übersetzender Getriebe*. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007.