Funktionsorientiertes Interaktionsmodell zur Simulation menschlicher Bewegungen während der Nutzer-Produkt Interaktion

Daniel Krüger; Sandro Wartzack
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract

The perceived value of many products is determined essentially by how well their properties harmonize with the individual abilities and needs of the people who use them. Digital human models offer the possibility to analyze human-product interactions on the basis of virtual prototypes which facilitates ergonomic testing already in early stages of the design process. This however requires an algorithmic prediction of human behavior which is still an open issue in the field of digital human modelling. In this contribution a functional interaction model is proposed that describes user product-interactions on the basis of required manipulations of the products physical state. On this basis optimal control procedures can be employed to predict human motion and posture.

Keywords: digital human models, ergonomics, optimal control, CAD

1 Motivation

Der amerikanische Industriedesigner Henry Dreyfuss [1] erkannte schon in den 1940er Jahren, dass der vom Nutzer wahrgenommene Wert von Konsumprodukten oft stärker durch ergonomische als durch funktionelle oder

wirtschaftliche Faktoren bestimmt wird. Vor dem Hintergrund einer alternden Gesellschaft gewinnt das Thema Ergonomie aber auch im Bereich der Arbeitsplatz- und Arbeitsmittelgestaltung an Bedeutung. Als wissenschaftliche Disziplin beschäftigt sich die Ergonomie mit dem Verständnis der Interaktionen zwischen Menschen und technischen Systemen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Form von Gestaltungsrichtlinien, Daten und Methoden in die Produktentwicklung ein, wobei stets die Zielsetzung besteht, das menschliche Wohlbefinden zu verbessern und die Leistungsfähigkeit des Mensch-Technik Systems zu optimieren. [2] Aus dieser Motivation heraus können übergeordnete ergonomische Anforderungen wie Sicherheit, Schädigungslosigkeit, Komfort, Effizienz oder Gebrauchstauglichkeit formuliert werden. Im Gegensatz zu rein technischen Anforderungen weist die Produktergonomie einen starken Bezug zum Menschen und seiner Umwelt auf. Die Frage nach der Erfüllung von ergonomischen Anforderungen kann daher nicht allein anhand des Produktverhaltens beantwortet werden. Nach Seeger [3] bestehen bei Nutzer-Produkt Interaktionen Rückkopplungen zwischen dem Verhalten des Nutzers und dem Produktverhalten. Die ergonomische Validierung von Produkten muss daher den Nutzer mit seinen spezifischen Eigenschaften sowie den Nutzungskontext zwingend berücksichtigen. Mit Methoden der Nutzerintegration [4] wie z.B. Usability Tests kann dies prinzipiell erreicht werden. Allerdings ist der zeitliche und monetäre Aufwand mitunter sehr groß, müssen doch bedienbare Prototypen des Produktes hergestellt werden. Es ist daher das Ziel, ergonomische Fragestellungen mittels prädiktiver, rechnerunterstützter Simulationsverfahren zu behandeln. Ein Ansatz hierzu sind Simulationen mit digitalen Menschmodellen. Ziel ist es, ein Abbild des menschlichen Körpers mit einem virtuellen Produktmodell, meist innerhalb einer CAD oder VR Umgebung interagieren zu lassen. Die Bewertung der Interaktionsvorgänge hinsichtlich der ergonomischen Anforderungen erfolgt durch anwendungsspezifische Analysefunktionen wobei das Spektrum von der Untersuchung einfacher geometrischer Zusammenhänge, wie der Erreichbarkeit von Objekten, bis hin zur Bestimmung komplexer biomechanischer Beanspruchungszustände reicht. Ein zentrale Forschungsfrage hierbei ist, wie das für die Interaktion mit Produkten relevante menschliche Verhalten beschrieben und die daraus resultierenden Bewegungen und Körperhaltungen mit Hilfe von Computersimulationen vorhergesagt werden können. [5] Ausgehend von einem grundlegenden Modell menschlicher Informationsverarbeitung, wird in diesem Beitrag ein funktionsorientierter Ansatz zur Beschreibung von Nutzer-Produkt Interaktionen vorgeschlagen der sich gut in CAD Arbeitsumgebungen integrieren lässt. Das Interaktionsmodell liefert die nötigen Voraussetzungen, um die Vorhersage menschlicher Bewegungen als Optimierungsproblem zu verstehen. Daher wird anschließend das Verfahren der Optimalsteuerung biomechanischer Systeme beschrieben. Eine mögliche Anwendung ist die Ermittlung biomechani-

scher Beanspruchungen des Muskelskelettsystems, die Rückschlüsse auf die ergonomischen Anforderungen Komfort, Effizienz und Schädigungslosigkeit ermöglichen.

2 Simulation menschlicher Informationsverarbeitung

In Bild 1 ist ein Schema der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Ausführung von Bewegungen nach [6] abgebildet, das um den zusätzlichen Aspekt des Produktverhaltens erweitert wurde. Zielgerichtete Bewegungen werden durch externe Reize initiiert und geleitet, die der Mensch mit seinen Sinnen erfasst. Die Sinneseindrücke werden anschließend mit bereits bekannten, im Gedächtnis abgelegten Mustern abgeglichen so dass ein Modell der Situation entsteht welches als Grundlage der Entscheidung über ein Antwortverhalten dient. Für den Fall, dass dieses Antwortverhalten auf eine physische Manipulation der Umgebung gerichtet ist, ergeben sich geometrisch interprätierbare **Bewegungsziele**. Ein Beispiel wäre die Vorstellung einer Sollposition für die Hand, damit ein zuvor wahrgenommenes Bedienelement am Produkt betätigt werden kann. Es folgt die Ausführung der Bewegung durch die koordinierte Aktivierung der Muskulatur. Zu beachten ist, dass der Mensch hierdurch den Zustand des Gesamtsystems verändert und dies auch sofort wieder erfassen kann. Es entsteht eine Rückkopplung.

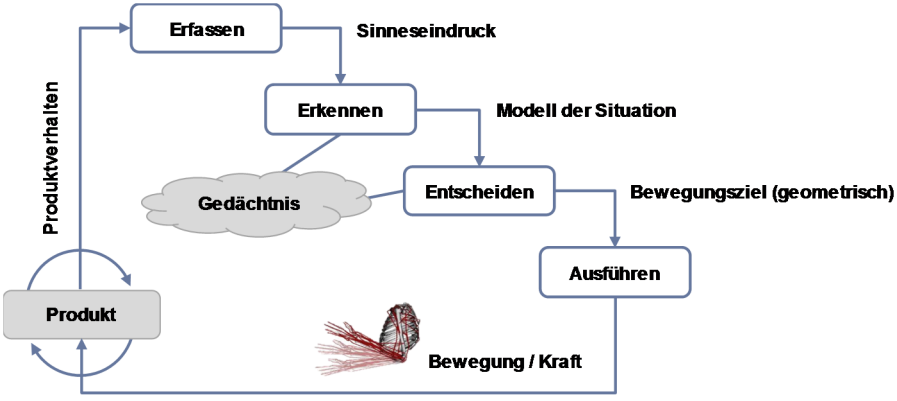

Bild 1: Schema menschlicher Informationsverarbeitung nach [6]

Obwohl diese Modellvorstellung sehr einfach ist, lassen sich hieran die Herausforderungen bei der Simulation von Nutzer-Produkt Interaktionen erkennen. Die Simulation des Produktverhaltens stellt im Allgemeinen keine besondere Herausforderung dar, da technische Systeme nach den Stand der Technik im Vergleich zu biologischen Systemen relativ gut verstanden sind.

Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung ist es aber grundsätzlich nötig, Produktverhalten und menschliches Verhalten gekoppelt zu simulieren. Die erste Phase der menschlichen Informationsverarbeitung, das Erfassen des Zustandes von Körper und Umgebung spielt ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da die Zustandsvariablen einer vollständig virtuell simulierten Welt per se bekannt und damit einer algorithmischen Weiterverarbeitung zugänglich sind. Die Phasen Erkennen und Entscheiden sind durch diskrete Prozesse geprägt, deren Erforschung Gegenstand der Kognitionspsychologie ist. Mit kognitiven Architekturen wie ACT-R [7] existieren Versuche, Erkenntnisse der Kognitionspsychologie soweit zu formalisieren, dass eine Verarbeitung durch Computerprogramme möglich wird. So wurde von Carruth et al. [8] eine ACT-R Architektur zur Steuerung eines digitalen Menschmodells entwickelt, wobei einfache geometrische Objekte in einer virtuellen Szene durch maschinelles Sehen erkannt und darauf basierend Objektmanipulation (z.B. Drehen eines Blocks) angestoßen wurden. Die letzte Phase, nämlich die Ausführung der Bewegung ist ein zeitkontinuierlicher Prozess, dessen Simulation ein biomechanisches Modell des Bewegungsapparates bestehend aus Knochen, Gelenken und der Muskulatur erfordert. Die Herausforderung besteht hier in der Simulation der koordinierten Aktivierung von Muskeln, so dass die in den vorherigen Phasen der Informationsverarbeitung generierten Bewegungsziele erreicht werden.

3 Ein funktionsorientiertes Interaktionsmodell

Grundlage für die Anwendung digitaler Menschmodelle in der Produktentwicklung ist eine Beschreibung der Nutzer-Produkt Interaktion. Im Fall von kommerziell verfügbaren, in CAD Systeme integrierten Menschmodellen erfolgt dies fast ausschließlich über die direkte Manipulation der Körperhaltung durch den Anwender. Die für die ergonomische Bewertung entscheidenden Einflüsse Körperhaltung und Bewegung werden demzufolge nicht durch die Simulation vorhergesagt sondern als bekannt vorausgesetzt. Die Information, wie sich ein bestimmter Nutzer bei der Interaktion mit dem Produkt bewegt, dürfte dem Produktentwickler in den seltensten Fällen zur Verfügung stehen. Indes kann als bekannt angenommen werden, welche Funktionen eines Produktes ausgelöst werden müssen, um dessen Bestimmung zu erfüllen. Die Beschreibung von Nutzer-Produkt Interaktionen sollte daher **funktionsorientiert** erfolgen. Idealerweise sind dem Produktmodell bereits während der Modellierung in CAD Informationen über die Produktnutzung hinzuzufügen. Ein solches funktionsorientiertes Interaktionsmodell soll im Folgenden zur Diskussion gestellt werden. Der Illustration (vgl. Bild 2) dient die Bedienung eines mechanischen PKW Schaltgetriebes. Die vom Nutzer auszulösende Funktion ist das Schalten vom Leerlauf in den ersten Gang durch Betätigung

des Schalthebels. Damit dies überhaupt möglich ist, müssen einige **Interaktionsbedingungen** erfüllt sein. Der Nutzer muss sich auf dem Fahrersitz befinden, der linke Fuß muss mit dem Kupplungspedal in Kontakt stehen und die rechte Hand muss den Schalthebel berühren.

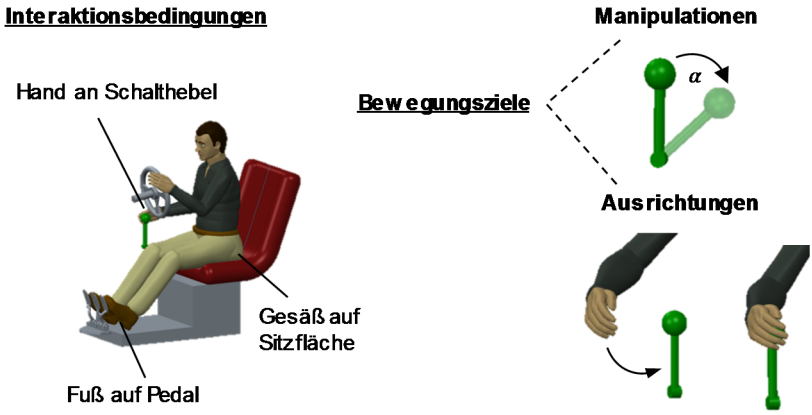

Bild 2: Funktionsorientiertes Interaktionsmodell

Sind die Interaktionsbedingungen nicht erfüllt, wird der Nutzer eine Bewegung ausführen, um seine Körperhaltung entsprechend zu korrigieren. Die Ziele dieser Bewegung werden als **Ausrichtungen** bezeichnet. Sind alle Interaktionsbedingungen erfüllt, beginnt der Nutzer, den Zustand des Produktes zu manipulieren. Das Kupplungspedal wird bis zum Anschlag gedrückt und gehalten, der Schalthebel nach vorne bewegt. Schließlich wird das Pedal wieder zurückgenommen. Die Ziele dieser Bewegungen werden als **Manipulationen** bezeichnet. Ausrichtungen und Manipulationen sind **Bewegungsziele**, also geometrische Vorgaben wie sie in Folge kognitiver Prozesse (vgl. Bild 1) entstehen. Zur CAD basierten Beschreibung der Nutzer-Produkt Interaktion könnten die Bedienelemente des Produktes durch entsprechende **Interaktionsfeatures** gekennzeichnet werden. Dabei handelt es sich um eine Semantik, die Geometrieelemente aus dem CAD-Datensatz mit menschlichen Manipulatoren (Hände, Füße etc.) in Verbindung setzt. Die Auslösung einer bestimmten Produktfunktion wird dann durch einen Satz an Interaktionsbedingungen, die auf Grundlage der Interaktionsfeatures formuliert werden sowie durch die Vorgabe erforderlicher Manipulationen (z.B. Verdrehwinkel des Schalthebels) beschrieben. Ausrichtungen müssen im CAD Datensatz nicht explizit vorgegeben werden, da sich diese aus der aktuellen Körperhaltung des Menschmodells und den Interaktionsbedingungen ergeben. Das beschrie-

bene funktionsorientierte Interaktionsmodell lässt sich gut in die von [9] vorgeschlagene Szenariotechnik einbetten. Die Motivation zur Nutzung eines Produktes wird hierbei mit der Lösung eines Problems gleichgesetzt. Die Nutzer-Produkt Interaktion kann dann, wie in Bild 3 dargestellt, als eine Reihe von Zustandsübergängen modelliert werden.

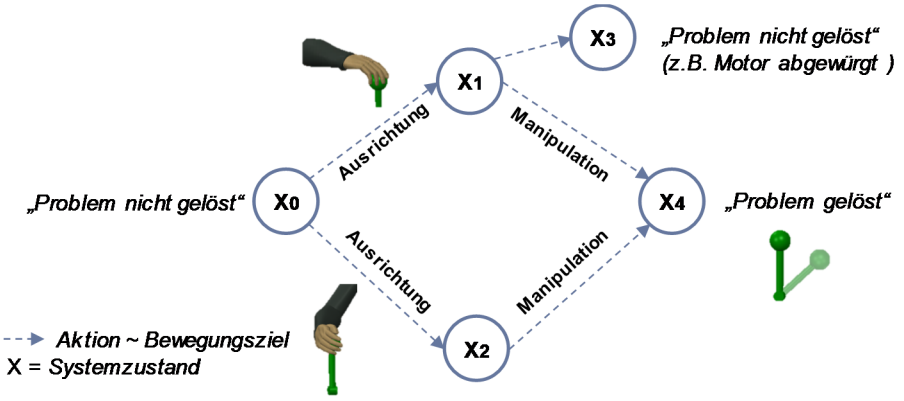

Bild 3: Szenarien der Produktnutzung

Ausgehend von einem Zustand „*Problem nicht gelöst*" (das Getriebe befindet sich im Leerlauf, die Hände sind noch am Lenkrad) durchläuft der Nutzer ein Entscheidungsnetzwerk. An jedem Kontenpunkt kann zwischen alternativen Aktionen gewählt werden, um das System Mensch-Maschine in einen neuen physikalischen Zustand zu überführen. Die Zustandsübergänge entsprechen Ausrichtungen und Manipulationen. Alle Pfade durch das Netzwerk, die in einem Zustand „*Problem gelöst*" (Gang eingelegt) münden, werden als positive Szenarien bezeichnet. Werden auch Pfade, die nicht zum Erfolg führen (negative Szenarien) zugelassen, können Fälle menschlichen Fehlverhaltens bzw. technischen Versagens berücksichtigt werden. Die kognitiven Prozesse auf der Nutzerseite, die zu einem bestimmten Szenario geführt haben, werden hierbei bewusst ausgeklammert, da sie simulationstechnisch bislang kaum abzubilden sind. Es können mit diesem Ansatz daher nur Szenarien der Produktnutzung analysiert werden, die beim Aufstellen des Netzwerkes berücksichtigt wurden. Die Szenariotechnik ist insofern eine wichtige Ergänzung zum funktionsorientierten Interaktionsmodell als dass vor allem die Interaktionsbedingungen nicht in jedem Fall eindeutig sind. Dies wird klar wenn man bedenkt, dass es beispielsweise verschiedene Möglichkeiten gibt, die Hand gegenüber dem Schalthebel zu positionieren. Infolgedessen ergeben sich auch verschiedenartige Ausrichtungs- und Manipulationsbewegungen, die jeweils in alternativen Szenarien analysiert werden müssen.

Ein einzelnes Szenario entspricht einer Folge von Nutzeraktionen, die sich letztendlich aus mit der Produktfunktion verbundenen Interaktionsbedingungen und Manipulationen ergeben. Diese Informationen dienen als Grundlage zur Vorhersage menschlicher Bewegungen durch Optimalsteuerung biomechanischer Systeme.

4 Optimalsteuerung biomechanischer Systeme

Der menschliche Bewegungsapparat ist ein hochredundantes mechanisches System. Die kinematischen Ketten des Skeletts haben für gewöhnlich mehr Freiheitsgrade als für das Erreichen eines bestimmten Bewegungsziels nötig wären. Selbst einfachste Aufgaben wie das Greifen nach einem Gegenstand können mit einer großen Anzahl an möglichen Gelenkwinkelkonstellationen erledigt werden. Die gleiche Redundanz findet sich auch auf der Ebene der Dynamik. Da Muskeln nur Zugkräfte erzeugen können, wird ein einzelnes Gelenk stets von mindestens zwei Muskeln (Agonist und Antagonist) aktuiert. Ferner überspannen manche Muskelstränge mehrere Gelenke. Dennoch sind Menschen in der Lage, sehr akkurate und in ihrem Verlauf sanfte Bewegungen auszuführen, den Einfluss externer Störungen zu kompensieren und Ihr Bewegungsverhalten innerhalb kurzer Zeit an geänderte Umgebungsbedingungen wie z.B. den Aufenthalt in Schwerelosigkeit anzupassen. Zudem sind biologische Bewegungssysteme äußerst energieeffizient. Diese Eigenschaften der menschlichen Bewegungskontrolle werden nach dem Stand der Wissenschaft (z.B. [10]) häufig unter Bezugnahme auf das natürliche Optimalitätsprinzip erklärt. Optimalität ist die Eigenschaft eines Systems eine bestimmte Größe unter gegebenen Randbedingungen zu maximieren oder zu minimieren. Es scheint natürlich, dass Menschen sich so bewegen, dass sie dabei nicht unnötig viel Energie oder aber Zeit verbrauchen. Aber auch die Elimination der oben erwähnten kinematischen und dynamischen Redundanz kann erreicht werden wenn diejenigen Gelenkwinkelkonstellationen bzw. muskulären Aktivierungsmuster bevorzugt werden, die verglichen mit alternativen Lösungen, einen geringeren energetischen Aufwand zur Folge haben. Vielversprechende Ansätze zur Vorhersage menschlicher Bewegungen und Körperhaltungen sind daher Computersimulationen die auf der Optimierung mathematischer Funktionen basieren.

Digitale biomechanische Menschmodelle wie *OpenSim* [11] bilden den menschlichen Bewegungsapparat als Mehrkörpersystem ab. Das Skelett ist aus gelenkig miteinander verbundenen Starrkörpern aufgebaut während die Muskulatur durch spezielle Pfadaktuatoren simuliert wird. Das dynamische Verhalten eines biomechanischen Mehrkörpersystems wird durch die Differentialgleichung (1) wiedergegeben.

$$\dot{\vec{x}}(t) = f(\vec{x}(t), \vec{u}(t)) \tag{1}$$

Hierin ist $\vec{x}(t)$ der physikalische Zustandsvektor des Systems, der als Zustandsvariablen die Winkel der einzelnen Körpergelenke sowie deren Winkelgeschwindigkeiten enthält. Je nach Typ des eingesetzten Muskelmodells können noch weitere Variablen wie das Aktivierungsniveau jedes Muskels sowie dessen aktuelle Faserlänge hinzukommen. (vgl. Bild 4)

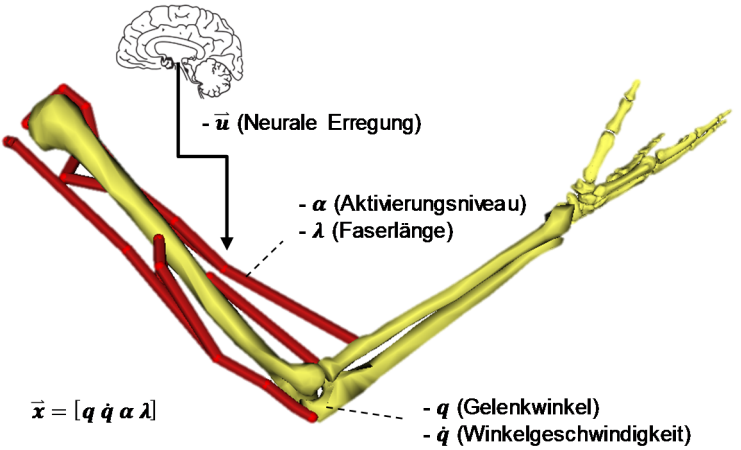

Bild 4: Biomechanische Zustandsvariablen und Steuerungen

Der Vektor $\vec{u}(t)$ wird als Steuerung bezeichnet. In der biomechanischen Modellbildung entspricht dies den vom zentralen Nervensystem ausgehenden neuralen Erregungssignalen die das Aktivierungsniveau der Muskeln und damit deren Kraftentfaltung beeinflussen. Die Bewegung des Systems (Zustandstrajektorie) wird durch Zeitintegration von (1) berechnet. Die im vorherigen Abschnitt erarbeitete Zielsetzung, den Bewegungsapparat von einem definierten Ausgangszustand in einen von Bewegungszielen (Ausrichtungen und Manipulationen) abhängigen Endzustand zu bringen bedeutet also, einen passenden Satz von Steuerungen $\vec{u}$ zu bestimmen. Aufgrund der kinematischen und dynamischen Redundanz des Bewegungsapparates existiert hierzu im Allgemeinen keine eindeutige Lösung, so dass im Sinne des Optimalitätsprinzips nach einer möglichst guten Lösung $\vec{u}_{opt}$ gesucht wird, welche Gleichung (2) minimiert.

$$J\big(\vec{u}(t), \vec{x}(t)\big) = \int_0^T l\big(\vec{u}(t), \vec{x}(t)\big)dt \text{ mit } \dot{\vec{x}}(t) = f(\vec{u}(t), \vec{x}(t)) \tag{2}$$

Die Zielfunktion J bewertet die Bewegung anhand von Kriterien, die durch den zeitschrittbezogenen Kostenwert $l\left(\vec{u}(t),\vec{x}(t)\right)$ beschrieben werden. Die im Bezug hierauf optimale Steuerung erhält man durch Lösen des dynamischen Optimierungsproblems (3).

$$\vec{u}_{opt}(\mathrm{t}) = argmin\ J\left(\vec{u}(t),\vec{x}(t)\right) \tag{3}$$

Es existieren verschiedene numerische Lösungsverfahren für derartige Optimalsteuerungsprobleme. Im Rahmen ihrer Forschungsarbeit haben die Autoren das biomechanische Simulationssystem *OpenSim* um ein iteratives Lösungsverfahren [12] erweitert, das auf einer linearen Approximation der Systemdynamik (1) basiert.

Um die Bewegungsziele des produktorientierten Interaktionsmodells in das Konzept der Optimalsteuerung integrieren zu können, ist es sinnvoll, die Zielfunktion J , wie in Gleichung (4) dargestellt in zwei Terme aufzuspalten.

$$J(\vec{u}(t),\vec{y}(t),t) = \int_0^T w\left(\vec{u}(t),\vec{x}(t)\right)dt + z(\vec{x}(T)) \tag{4}$$

Der Term $z(\vec{x}(T))$ hängt nur vom Systemzustand am Ende der Bewegung ab und wird als Zielkostenfunktion bezeichnet. Er dient der Beschreibung von geometrischen Bewegungszielen. Der Term $w\left(\vec{u}(t),\vec{x}(t)\right)$ heißt Wegkostenfunktion und bewertet die Art und Weise wie der endgültige Systemzustand erreicht wurde. Beide Terme können als gewichtete Summen von elementaren Kostenfunktionen aufgefasst werden. Eine Auswahl ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die Minimierung von Weg, Erregung und Ruck sind typische Wegkostenfunktionen. Sie sollen allgemeingültige in empirischen Studien [13] gefundene Charakteristika menschlicher Bewegungsausführung berücksichtigen und dürften wenig mit dem Anwendungsfall variieren. In der untenstehenden Auflistung fehlen allerdings noch Funktionen zur Kontrolle der aufrechten Körperhaltung und der Umgehung von Hindernissen.

Tabelle 1: Elementare Kostenfunktionen

Bezeichnung	**Effekt**
Orientierungsziel	Eine bestimmte Orientierung eines Körperteils gegenüber einem anderen Objekt wird angestrebt.
Positionsziel	Eine bestimmte Position eines Körperteils gegenüber einem anderen Objekt wird angestrebt.
Koordinatenziel	Ein Freiheitsgrad des Mehrkörpersystems wird auf einen bestimmten Koordinatenwert gebracht.
Minimale Erregung	Die Bewegung wird mit möglichst wenig Muskeleinsatz ausgeführt.
Minimaler Ruck	Die Bewegung wird möglichst sanft ausgeführt.
Kürzester Weg	Das Bewegungsziel wird auf kürzestem Weg erreicht.

Die Zielkostenfunktionen für Orientierung, Position und Koordinatenwerte bilden hingegen die Grundlage zur Beschreibung von geometrischen Bewegungszielen im Zusammenhang mit Nutzer-Produkt Interaktionen. Bereits mit diesen wenigen elementaren Funktionen lassen sich viele einfache menschliche Aktionen beschreiben. Die Manipulation von Kupplungspedal und Schalthebel aus dem weiter oben verwendeten Beispiel kann durch Angabe von jeweils einem Koordinatenziel beschrieben werden, das den erforderlichen Drehwinkel der Lager von Pedal und Schalthebel vorgibt. Zusätzlich ist es erforderlich, dass diese Koordinatenziele auf kürzestem Weg angefahren werden. Die zugehörigen Ausrichtungsziele geben die Orientierung und Position der rechten Hand gegenüber dem Schalthebel sowie des linken Fußes gegenüber dem Kupplungspedal vor.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bewertung der Produktergonomie anhand von Simulationen mit digitalen Menschmodellen erfordert die Vorhersage menschlicher Bewegungen und Körperhaltungen in Abhängigkeit des Produktverhaltens. In diesem Beitrag wurde als Grundlage hierzu ein funktionsorientiertes Interaktionsmodell vorgestellt, das es ermöglicht, die zielgerichteten Interaktionen zwischen Nutzern und Produkten lösungsneutral anhand von Interaktionsbedingungen und Bewegungszielen zu beschreiben. Zur Überführung der Bewegungsziele in konkrete menschliche Bewegungen wurde das Verfahren der Optimalsteue-

rung biomechanischer Systeme vorgeschlagen. Zukünftige Forschungsaktivitäten werden sich vor allem mit der Formulierung von Interaktionsbedingungen für gebräuchliche Bedienelemente und der Implementierung von entsprechenden CAD-Interaktionsfeatures beschäftigen. Ein bisher ungelöstes Problem besteht darin, dass viele technische Bedienelemente auf unterschiedliche Arten durch den Menschen kontaktiert werden können. Ein Lenkrad kann beispielsweise am gesamten Umfang gehalten werden. Das Konzept der Interaktionsbedingungen muss daher um solche unscharfen geometrischen Beziehungen zwischen Mensch und Maschine erweitert werden. Ferner steht die Validierung der durch Optimalsteuerung vorhergesagten menschlichen Bewegungen aus. Da der Stil der errechneten Bewegungen stark von den zu Grunde gelegten Wegkostenfunktionen abhängt, ist ein Vergleich mit experimentell im Bewegungsanalyselabor aufgezeichneten Bewegungen anzustreben.

Literatur

[1] Dreyfuss H.: Designing for people: [the classic of industrial design], Allworth, New York, 2003.

[2] Bullinger, H.; Ilg, R.: Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung, Teubner, 1994.

[3] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme: Industrial Design Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.

[4] Reinicke, T.: Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung: eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration, Verl. Dr. Hut, München, 2004.

[5] Badler, N.: Simulating humans: computer graphics animation and control, Oxford University Press, New York, 1993.

[6] Stelmach, G.: Information-Processing Framework for Understanding Human Motor Control. In: Kelso J.: Human motor behavior: an introduction, L. Erlbaum, Hillsdale, 1982.

[7] http://act-r.psy.cmu.edu/

[8] Carruth, D.; Thomas, M.; Robbins, B,; Morais, A.: Integrating Perception, Cognition and Action for Digital Human Modeling. In: Duffy, V.: Digital Human Modeling, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.

[9] Van der Vegte, W.: Testing virtual use with scenarios, Delft University of Technology, 2009.

[10] Scott, S.: Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. Nature Reviews Neuroscience 5 (2004), Nr. 7, S. 532–46.

[11] Delp, S.; Anderson, F.; Arnold, A.; Loan, P.; Habib, A.; John, C. et al.: OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. IEE Transactions on Biomedical Engineering 54 (2007), Nr. 11, S. 1940-1950.

[12] Todorov, E.; Weiwei, L.: A generalized iterative LQG method for locally-optimal feedback control of constrained nonlinear systems, Proceedings of the American Control Conference, 2005.

[13] Hogan, N.: An organizing principle for a class of voluntary movements, Journal of Neuroscience 4 (1984), Nr. 11, S. 2745–54.