

Dr. Stefan Künzell & Heiko Maurer

Grundprinzipien der Informationsverarbeitung, Steuerung und Regelung

Wie Sie bereits im Kapitel "Zentralnervöse Grundlagen" gelernt haben, ist für die Kontrolle von Bewegungen in hohem Maße das zentrale Nervensystem (ZNS) verantwortlich. Das neuronale Geschehen im ZNS bei der Bewegungskontrolle ist aber sehr komplex, so dass es sich für das Verständnis der beteiligten Prozesse nur bedingt eignet.

Will man verstehen, was ein Computer tut, so ist es einfacher, sich nicht um den Prozessorstatus und die Belegung der einzelnen Register und Speicheradressen zu kümmern, sondern den in einer höheren Programmiersprache geschriebenen Programmcode zu lesen.

Der Informationsverarbeitungsansatz benutzt den Computer als Metapher für das kognitive System des Menschen. Danach ist es auch beim Menschen nicht Gewinn bringend, sich ausschließlich um die neuronalen Aktivitäten zu bemühen. Die kognitiven Prozesse müssen auf einer höheren Ebene betrachtet werden. Die Annahme dabei ist, dass Informationsverarbeitungsprozesse weitgehend unabhängig von der Hardware, auf der sie implementiert sind, beschrieben werden können. Der Mensch wird also als ein informationsverarbeitendes System angesehen.

Im den nächsten Abschnitten erfahren Sie, was sich hinter Information und Informationsverarbeitung genau verbirgt und welche Prozesse bei der Verarbeitung von Information allgemein angenommen werden können. Dies wird dann auf Kontrollprozesse für die Bewegung übertragen.

Sie sollen in diesem Kapitel lernen

- was man unter einer Information versteht;
- welche Prozesse für die Verarbeitung von Information erforderlich sind;
- dass man verschiedene Stufen der Informationsverarbeitung unterscheiden kann;
- was man unter Steuerung und Regelung versteht;
- dass Steuerungs- und Regelungsprozesse auf verschiedenen motorischen Kontrollebenen zu finden sind.

Der Informationsverarbeitungsansatz

Information und ihre Verarbeitung

Information umfasst eine Nachricht zusammen mit ihrer Bedeutung für den Empfänger. Information hat (mindestens) einen formalen und einen inhaltlichen Teil. Der formale Teil besteht aus den Regeln (der Syntax), nach denen die Information zusammengesetzt ist, z. B. die Grammatik der deutschen Sprache, der richtigen Abstände der Töne beim Morsen etc. Die Nachricht besteht also aus nach formalen Regeln kodiertem Informationsinhalt. Um den inhaltlichen (semantischen) Teil der Information – die Bedeutung – zu erhalten, muss die Nachricht durch den Empfänger dekodiert werden. Und um eine Information zu übermitteln, muss ihr Inhalt enkodiert werden.

Information, die von längerfristiger Bedeutung ist, muss gespeichert werden. Hierzu muss sie wieder in eine stoffliche Form gebracht, also enkodiert werden. Dies kann die Niederschrift in einem Notizbuch, das Eingeben in einen Computer oder aber auch das Merken in der „Sprache des Geistes“ sein. Das Speichern einer Information im Kopf nennt man konsequenter Weise ebenfalls

enkodieren. Wird diese Information wieder gebraucht, spricht man aber gewöhnlich nicht vom Dekodieren, sondern vom Abruf der Information.

Die beiden Prozesse zur Informationsaufnahme – also die Wahrnehmung der Nachricht und ihre Dekodierung – können unterschiedliche Gewichtung bei der Informationsverarbeitung haben. In einer Hierarchie kognitiver Prozesse sind die für die Wahrnehmung verantwortlichen sensorischen Systeme ganz unten, die für die Dekodierung und Bedeutungszuweisung verantwortlichen Systeme ganz oben angesiedelt. Wenn der Schwerpunkt der Informationsaufnahme auf der Wahrnehmung liegt, spricht man folglich von einem „bottom-up“ Prozess, bei einem Schwerpunkt auf der Dekodierung von einem „top-down“ Prozess. Ein Beispiel für einen bottom-up Prozess ist das Empfinden von Schmerz beim berühren einer heißen Herdplatte. Ein Beispiel für einen top-down Prozess erhalten sie durch die folgende Animation.

Phasen der Informationsverarbeitung

Informationsverarbeitende Systeme werden durch das EVA-Modell charakterisiert: Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe. Die Eingabe erfolgt beim Menschen über die verschiedenen Sinnesorgane, die Ausgabe zumeist über Bewegungen des Körpers. Die Art und Weise der Verarbeitung von Information ist für alle kognitiven Prozesse – und damit auch für die willkürliche motorische Kontrolle – besonders interessant. Leider ist sie aber der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Deswegen muss über das Untersuchen von äußerlich beobachtbarem Verhalten (overt behavior) auf interne Verarbeitungsprozesse rückgeschlossen werden. Ein einfach zu messendes Kriterium ist die Zeit, die für die Verarbeitung gebraucht wird, die Reaktionszeit (reaction time, RT). Eine Anzahl von Reaktionszeitexperimenten und daraus resultierende Phasen in der Informationsverarbeitung lernen Sie noch im Abschnitt Motorische Programme I dieses Kurses kennen. Grundlage und Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass es verschiedene, nacheinander zu absolvierende Verarbeitungsphasen gibt. Das einfachste Phasenmodell besteht aus drei Schritten:

Steuerung und Regelung

Wenn wir unsere Bewegungen koordinieren, müssen die Bewegungen der einzelnen Gliedmaßen kontrolliert werden. Dazu sind sehr viele Informationen nötig: Information über den Zustand der Umwelt, Information über den Zustand des eigenen Körpers sowie Information über den gewünschten Zielzustand. Um einen gewünschten Zielzustand zu erreichen, muss auf der Grundlage der vorhandenen Informationen der Bewegungsapparat kontrolliert werden. Dafür gibt es zwei unterschiedliche Kontrollmechanismen: die Steuerung und die Regelung. Im Folgenden werden Steuerungs- und Regelungsprozesse genauer betrachtet. Sie spielen in Natur und Technik eine wichtige Rolle und sind grundlegende Mechanismen für die motorische Kontrolle. Ausführlich nachlesen können Sie dies bei Nitsch und Munzert (1997, S. 133-142), Jordan (1994) und Zimmermann (1987).

Bei beiden Mechanismen geht es darum, einen bestimmten Prozess oder eine Größe zu kontrollieren. Dabei stellt die **Regelung** einen geschlossenen Wirkungskreis dar, bei dem die zu regelnde Größe gemessen, Abweichungen an das Kontrollzentrum zurück gemeldet und dort eine Korrektur eingeleitet wird. Dieser Mechanismus wird auch fehlerkorrigierende Kontrolle genannt. Die **Steuerung** ist hingegen eine Wirkungskette, bei der keine Rückkoppelung des Istwertes der Kontrollgröße erfolgt, sondern dieser durch explizites Wissen über das Verhalten der Strecke vorhergesehen wird. Hierbei spricht man von prädiktiver Kontrolle. Regelkreise sind insbesondere

für das Ausgleichen wechselnder, unvorhersehbarer Störungen geeignet, Steuerungen hingegen für planbare Prozesse. Das Grundprinzip ist in folgender Abbildung dargestellt.

Regelungsaspekte

Regelung der Muskellänge

Den **Dehnungsreflex** haben Sie bereits an zwei Stellen kennen gelernt (im Kapitel „Zentralnervöse Grundlagen“ und im Kapitel „Reflexe & Stützmotorik“). Er wird nun noch einmal als Regelkreis betrachten. Auf den ersten Blick mag ein Reflex einen Steuerungsprozess darstellen: Ein Reiz führt zu einer stereotypen Muskelkontraktion. Dabei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass zu jeder Zeit Informationen in einem geschlossenen Wirkungskreis fließen und nicht erst bei plötzlicher Reizung. Zudem bestimmt die Stärke des Reizes die Reaktion und der Reizerfolg wirkt auf den Reiz zurück. In der folgenden Abbildung wird der Regelkreis schematisch dargestellt.

Die zu regelnde Größe beim Dehnungsreflex ist die Länge der Muskulatur. Wir werden nun den kompletten Regelkreis durchlaufen, um dessen Funktion zu verdeutlichen und beginnen dabei mit einer von außen einwirkenden **Störgröße**, einer passiven Dehnung der Muskulatur. Die Längenänderung wie auch die Geschwindigkeit der Längenänderung werden durch die Muskelspindeln, dem **Messfühler**, registriert. Diese Informationen werden, kodiert als Frequenz der Aktionspotentiale in den Ia-Fasern (F_{Ia}), zu den Motoneuronen geleitet. Diese Frequenz stellt die **Regelgröße** dar, welche die Motoneurone über die momentane Muskellänge (**Istwert**) informiert.

Der **Sollwert** wird durch die **Führungsgröße** vorgegeben. Beim Dehnungsreflex liegt er als Frequenz der Aktionspotentiale der von höheren Zentren absteigenden Fasern (F_D) vor (auf die Führungsgröße wird im Abschnitt ‚Dynamisches Verhalten von Regelkreisen‘). Die α -Motoneurone stellen den **Regler** dar, der Ist- und Sollwert vergleicht und ggf. die Korrekturbefehle erzeugt. Im hier beschriebenen Fall wird das α -Motoneuron die Stellgröße, die als Frequenz der Aktionspotentiale in den α -Motoaxonen (F_α) kodiert ist, erhöhen. Die kontraktile, extrafusale Fasern (**Stellglied**) verstärken hierdurch ihre Kontraktion, verkürzen und wirken so der Dehnung entgegen. Die daraus resultierende geringere Muskellänge wird nun wieder von den Muskelspindeln registriert und führt zu einer Abnahme von F_{Ia} . Hier findet also die für den Regelkreis charakteristische **Wirkungsumkehr** statt – die Erhöhung von F_α führt zur Abnahme der Muskellänge und damit von F_{Ia} . Dabei ist auch zu bemerken, dass die Wirkungskette an dieser Stelle nur deshalb geschlossen ist, weil im Muskel die kontraktile extrafusale Fasern mit den Muskelspindeln parallel geschaltet sind. Die grau hinterlegten Quadrate symbolisieren die jeweils erforderliche Signalumwandlung. Auch beim Dehnungsreflex werden Informationen weiter geleitet und verarbeitet. Dabei sind die Informationen über Soll- und Istwert der Muskellänge und das Kontraktionsverhalten der Muskulatur als Frequenzen der jeweiligen Aktionspotentiale kodiert, die dann in den Synapsen und motorischen Endplatten dekodiert und chemisch weiter verarbeitet werden.

Gütekriterien von Regelkreisen

Wichtige Kriterien für die Güte eines Regelkreises sind **Schnelligkeit**, **Genauigkeit** und **Stabilität**, wobei diese nicht unabhängig voneinander sind. Die Schnelligkeit wird durch die **Totzeit** (t_0) bestimmt. Man versteht darunter die Zeit zwischen dem Auftreten eines Störeinflusses und dem Beginn der Korrekturmaßnahme. Diese ist abhängig von der Leitungsgeschwindigkeit, der Trägheit der Regelstrecke (z. B. die Dauer bis zur Bereitstellung der vom Stellglied benötigten Energie) und der Verarbeitungsgeschwindigkeit des Reglers. Beim Dehnungsreflex ist die Totzeit (im Vergleich zu anderen physiologischen Regelkreisen) mit etwa 30-40 ms gering. Sie beträgt bei der Regelung willkürlicher Bewegungen etwa 200 ms und länger, was auf verschiedene Faktoren zurückzuführen ist. Zum einen ist die Reizleitung länger, da der Regler (u. a. Kleinhirn nicht im Rückenmark, sondern auf supraspinaler Ebene lokalisiert ist. u. a. Auch die unterschiedlichen Fortleitungsgeschwindigkeiten der Fasertypen haben hier einen Einfluss; die Ia-Fasern gehören mit etwa 80 m/s zu den schnellsten. Zudem wird die zu verarbeitende Informationsmenge deutlich größer, da neben den Informationen aus den Muskelspindeln weitere propriozeptive und exterozeptive Rückmeldungen geliefert werden. Bei begrenzter Verarbeitungskapazität verlängert sich so die Verarbeitungsdauer des Reglers. Die Genauigkeit der Regelung kommt im **Regelfaktor** (R) zum Ausdruck. Dieser ergibt sich beim Auftreten einer Störgröße aus dem Verhältnis der Regelgrößenänderung mit Regelung und ohne Regelung. Dies ist in der folgenden Abbildung für den Dehnungsreflex dargestellt.

Bei einer guten Regelung sollte also R klein oder im Idealfall sogar gleich Null sein. Der Regelfaktor kann durch eine Erhöhung des **Verstärkungsfaktors** verbessert werden. Dieser beschreibt das Verhältnis der Korrekturmaßnahme zur vorliegenden Ist-Sollwert-Abweichung. Beim Dehnungsreflex würde also ein hoher Verstärkungsfaktor schon bei kleinen Dehnungen eine deutlich Kontraktion der kontraktile Fasern bewirken. Ein zu hoher Verstärkungsfaktor birgt jedoch auch die Gefahr der Instabilität des Regelkreises in sich. Es kann zu überschießenden Regelungsverläufen und länger dauernden Einschwingungsvorgängen kommen (vgl. Abb. 5, blaue Kurve). In Extremfällen kommt es auch zur **ungedämpften Regelschwingung**, wenn der Messfühler eine überschießende Gegenreaktion meldet und dies wiederum zu einer übermäßigen Reaktion führt und das System dann zwischen Extremwerten hin und her pendelt (vgl. Abb. 81, rote Kurve). Dies kann beispielsweise Ursache eines Tremors (Zittern) sein. Solche unerwünschten Regelungsverläufe werden durch einen hohen Verstärkungsfaktor und eine lange Totzeit begünstigt.

Dynamisches Verhalten von Regelkreisen

Bisher wurde das Konstanthalten der Muskellänge beschrieben, wie dies in Ruhe erforderlich ist. Die Führungsgröße bleibt dabei konstant und Störgrößen werden ausgeglichen, was als **Halteregelung** bezeichnet wird. Um eine Bewegung auszuführen, muss die Muskellänge jedoch gezielt verändert werden. Hierzu ist eine veränderliche Führungsgröße erforderlich, der die Regelgröße dann angepasst werden muss – man spricht auch von **Folgeregelung**. Die vom Gehirn absteigenden Nervenbahnen aktivieren jedoch nicht nur die α -Motoneurone, sondern auch kleinere γ -Motoneurone, die für die Aktivierung der kontraktile, intrafusale Fasern der Muskelspindeln verantwortlich sind. Diese befinden sich am Anfang und Ende der Muskelspindeln und können so den mittleren, nicht-kontraktile aber dehnungssensiblen Abschnitt spannen (siehe auch Abb. 82). So wird einerseits der optimale Wirkungsbereich des Regelkreises vergrößert, indem die

Muskelspindeln auch dann sensibel für Längenänderungen sind, wenn der Muskel kontrahiert. Andererseits kann – bei ‚vorgespannten‘ Spindeln und einem weiteren γ -Impuls – auch die Kontraktion der extrafusalen Fasern auslöst werden. Die Frequenzen der Aktionspotentiale in den absteigenden Bahnen (F_D) zu den α - und γ -Motoneuronen stellen also gemeinsam die Führungsgröße dar (vgl. Abb. 82).

Zu bemerken ist aber auch, dass der Grad der α - γ -Coaktivierung in Abhängigkeit der Aufgabe variieren kann. Sie ist insbesondere bei langsamen Bewegungen mit hohen Präzisionsanforderungen (z. B. Zielbewegungen) besonders ausgeprägt. Die Vielzahl der untereinander gekoppelten Regelkreise für die Muskellänge stellen somit ein funktionales Element von Körperhaltung und Bewegung dar. Durch die auf- und absteigenden Bahnen zwischen Rückenmark und motorischen Gehirnzentren können diese als Bestandteile übergeordneter Regelkreise betrachtet werden.

Steuerungsaspekte

Steuerung eines dynamischen Systems

Viele Bewegungen des Alltags und des Sports können nicht durch Regelkreise allein kontrolliert werden. Beispielsweise ist dieser Kontrollmechanismus für Wurf- und Stoßbewegungen (sogenannte „ballistische Bewegungen“) völlig ungeeignet. Überlegen Sie einmal, warum das so ist!

Ballistische Bewegungen müssen also gesteuert werden. Die Prinzipien der prädiktiven Kontrolle werden zunächst verallgemeinert für dynamischer Systeme dargestellt und dann am Beispiel des Basketballwurfs verdeutlicht.

Ein dynamisches System erhält fortlaufend Eingangsgrößen und produziert fortlaufend Ausgangsgrößen. Die Aufgabe bei der Steuerung eines dynamischen Systems ist es, für den jeweiligen Zustand des dynamischen Systems die Eingangsgrößen zu finden, bei denen es die gewünschten Ausgangsgrößen produziert. Dabei ist die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen in der Regel eindeutig, es liegt eine kausale Beziehung vor: Bestimmte Eingangsgrößen produzieren bei einem bestimmten Zustand des dynamischen Systems immer die gleichen, bestimmten Ausgangsgrößen. Diese kausale Richtung wird mit „vorwärts“ bezeichnet, die Transformation von Eingangsgrößen zu Ausgangsgrößen als die Vorwärts-Transformation. Es kann viele verschiedene Eingangsgrößenkombinationen geben, die die gleichen Ausgangsgrößen produzieren. Es handelt sich in der Regel um eine viele-zu-eins Transformation.

Bei der Steuerung eines dynamischen Systems müssen die Eingangsgrößen berechnet werden, die bewirken, dass das dynamische System die erwünschten Ausgangsgrößen produziert. Es muss also genau die umgekehrte Transformation der Transformation, die das dynamische System ausführt, berechnet werden. Dabei handelt es sich in der Regel um eine eins-zu-viele Transformation, die Lösung ist uneindeutig. Es können viele Eingangsgrößenkombinationen gefunden werden, die die Produktion der gewünschten Ausgangsgröße bewirken. Diese umgekehrte, antikausale Transformation wird auch inverse Transformation genannt. Das Problem bei der Steuerung eines dynamischen Systems ist es also, es zu invertieren. Wenn die verschiedenen gewünschten Ausgangsgrößen die passenden Eingangsgrößen gefunden werden sollen, benötigt man ein inverses Modell des dynamischen Systems.

Steuerung des Bewegungsapparats

Übertragen wir diesen abstrakten Gedankengang einmal auf die Bewegungskontrolle bei einem Basketballwurf. Das zu kontrollierende dynamische System ist der Bewegungsapparat des Menschen sowie seine Umwelt, also die Muskeln, Sehnen, Knochen und Gelenke, aber auch der Basketball und der Korb (man kann auch den Bewegungsapparat und die Umwelt als zwei verschiedene, jedoch nicht voneinander unabhängige dynamische Systeme begreifen). Das System befindet sich in einem festgelegten Zustand – die Gelenke in einem bestimmten Winkel, die Muskeln in einer bestimmten Spannung, der Basketball in beiden Händen und der Korb in einer bestimmten Entfernung. Die Eingangsgrößen in dieses dynamische System sind die vom ZNS produzierten Efferenzen, die Ausgangsgrößen die Bewegung und ihre Effekte in der Umwelt. Wann immer Efferenzen in das System eingehen, wird sich der Zustand des Bewegungsapparats verändern und damit auch der Zustand der Umwelt. Die gewünschte Ausgangsgröße ist, dass der Basketball durch den Korb fliegt, wenn möglich ohne Ringberührung. Es müssen also genau die Efferenzen berechnet werden, die eine Bewegung verursachen, bei der der Ball auf die richtigen Flugbahn gebracht wird. Allein aus der Tatsache, dass es viele verschiedene zielerreichende Flugbahnen gibt wird deutlich, dass auch verschiedene efferente Signale das Kontrollproblem lösen. Zusätzlich kommen noch weitere Möglichkeiten dazu, weil es verschiedene Kombinationen efferenter Signale gibt, die die gleiche Flugbahn des Balls bewirken.

Die Ursache dafür ist, dass das dynamische System „Bewegungsapparat“ sehr viele Freiheitsgrade besitzt. Nur einige davon werden durch das gewünschte Bewegungsergebnis festgelegt. Die restlichen, nicht genutzten Freiheitsgrade können durch zusätzliche Randbedingungen eingeschränkt werden. Beispielsweise kann eine Bewegung möglichst elegant ausgeführt werden (Korberfolg durch „slam dunk“), möglichst fehlertolerant sein (optimaler Abflugwinkel des Balls), möglichst ökonomisch ausgeführt werden (ohne „Luxusbewegungen“) oder möglichst wenig störanfällig gegenüber äußeren Einflüssen sein (hoher Abwurfpunkt, um einen „block“ zu verhindern). So kann sich eine beträchtliche Ausführungsvariabilität ergeben.

Internes Vorwärtsmodell

Unmittelbar einleuchtend ist es, dass zur Berechnung der Efferenzen ein Wissen über das dynamische System, also über den Bewegungsapparat und seine Umwelt vorhanden sein muss. Dieses Wissen wird interne Repräsentation (mehr zu internen Repräsentationen im Kapitel "Motorische Programme II" oder auch internes Vorwärtsmodell genannt. Die Vorwärts-Transformation des Bewegungsapparats und der Umwelt werden in einem internen Modell simuliert. Dadurch können die Ausgangsgrößen der tatsächlichen Vorwärtstransformation vorhergesehen werden. Die Abb. 83 verändert sich dann folgendermaßen:

Der „Regelkreis“ befindet sich sozusagen innerhalb des Steuerglieds.

Vergleich von prädiktiver und fehlerkorrigierender Kontrolle

Die Steuerung hat gegenüber der Regelung die folgenden Vorzüge:

- Prädiktive Kontrolle ist nicht auf das Vorliegen einer Rückmeldung angewiesen. Demgegenüber benötigt fehlerkorrigierende Kontrolle ständige Rückmeldung der Regelgröße.
- Prädiktive Kontrolle kann schneller erfolgen als fehlerkorrigierende Kontrolle, da es bei der prädiktiven Kontrolle keine Totzeit gibt.
- Bei der Kontrolle durch Steuerung kann es nicht zu einer ungedämpften Regelschwingung kommen.

Dem stehen aber folgende Nachteile gegenüber:

- Für die Steuerung wird über das dynamische System benötigt. Für fehlerkorrigierende Kontrolle reicht ein grobes Wissen über das System, um den Verstärkungsfaktor und die Richtung der Fehlerkorrektur festzulegen.
- Prädiktive Kontrolle ist empfindlich für unerwartete Störungen, die die fehlerkorrigierende Kontrolle leicht ausgleichen kann.

Diese unterschiedlichen Vor- und Nachteile machen es sinnvoll, Steuerung und Regelung miteinander zu verbinden. Bei der motorischen Kontrolle ist dies auch der Fall. Beschrieben wird dies z. B. im Kapitel „Zielbewegungen“. Häufig unterliegt dabei die erste, grobe Bewegung in Richtung Ziel der prädiktiven Kontrolle, während die letzten, genauen Bewegungen durch Fehlerkorrektur geregelt werden.