

## INTEGRATION DER KOGNITION IN TECHNISCHE SYSTEME

*Julia Stuppy, Kristin Paetzold*

### Zusammenfassung

Technische Systeme erhielten in der Vergangenheit eine immer größer werdende Intelligenz. Dies wurde durch die Entwicklung mechatronischer Produkte initiiert. Sowohl die Art der Informationsverarbeitung aber auch die Fortschritte bei der Lösung technischer Probleme z.B. in der Sensorik oder bei der Echtzeitproblematik führten letztlich dazu, dass nicht nur reaktive sondern auch adaptive Systeme, also Systeme, die bereits von der Ausprägung von Randbedingungen abhängen, inzwischen Stand der Technik sind. Eine logische Schlussfolgerung ist die Weiterentwicklung hin zu kognitiven technischen Systemen. Kognitive Fähigkeiten erfordern aber weitergehende Ansätze zunächst zur Beschreibung einer allgemeinen Architektur und später dann auch eine Modifikation der für die Produkte notwendigen Entwicklungsprozesse. In diesem Beitrag soll zunächst versucht werden, kognitive Fähigkeiten für die Realisierung in technischen Systemen zu beschreiben um daraus Rückschlüsse auf die Systemarchitektur abzuleiten.

### 1 Einleitung

Mechatronische Systeme sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken, seien es die Waschmaschine im Haushalt, Einparkhilfe, ABS und ESP im Auto, der vollautomatisierte Industrieroboter oder die Digitalkamera. Parallel zu der Entwicklung immer neuer Produkte wurden auch Fortschritte in der Entwicklungsarbeit selbst gemacht. So existieren jetzt z.B. eine anerkannte Referenzarchitektur für mechatronische Systeme und Ansätze für die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik (inklusive Regelungstechnik, Sensorik und Aktorik) und Informatik im Entwicklungsprozess. Im Zuge der Weiterentwicklung und Funktionserweiterung dieser Produkte vollzieht sich momentan der Schritt in Richtung kognitiver technischer Systeme. Oft mit solchen Systemen verbundene Fähigkeiten sind die Interaktion mit der Umwelt, die Anpassbarkeit an sich ändernde Umweltbedingungen, die Unterstützung des Benutzers, denkendes, planendes und problemlösendes Verhalten etc.; kurz gesagt alle Fähigkeiten, die einem intelligenten System (biologisch oder technisch) zuzuschreiben wären. Wegbereiter für kognitive technische Systeme sind die Miniaturisierung und der Preisverfall von Sensoren und Mikrochips sowie der Fortschritt in der Daten- und Informationsverarbeitung.

Im Vergleich zu mechatronischen Systemen sind bei der Entwicklung von kognitiven technischen Systemen dann nicht mehr nur technische Disziplinen (wie oben genannt), sondern auch nicht-technische wie z.B. Kognitionswissenschaften, Psychologie oder Neurowissenschaften beteiligt. Dies führt dazu, dass ein unterschiedliches Verständnis von ein und derselben Sache und verschiedenste Begriffswelten zur Beschreibung ebendieser aufeinander stoßen. Daher ist es Ziel dieses Beitrags zu beschreiben, was die Integration der Kognition für technische Systeme bedeutet und welche Auswirkungen dies für die Eigenschaften, die Systemarchitektur und die Entwicklung solcher Systeme hat.

## 2 Kognitive Grundlagen

### 2.1 Definition von Kognition

Das Wort Kognition ist von dem lateinischen Begriff „cognoscere“ (=erkennen) abgeleitet. Charakteristisch für die Kognition ist, dass sie zwischen Reizaufnahme und Verhalten interveniert [1]. Die Grenze zwischen nicht-kognitiven und kognitiven Systemen wird wie folgt gezogen: Bei einem nicht-kognitiven System (z.B. einer Amöbe) besteht eine starre, nicht durch Lernen veränderbare Kopplung zwischen Sensoren (also Sinneswahrnehmungen) und Aktoren. Das bedeutet, dass ein ganz bestimmter Reiz immer die gleiche Reaktion hervorruft. In einem kognitiven System hingegen ist die Kopplung zwischen Sensoren und Aktoren nicht mehr starr sondern modifizierbar (siehe Bild 1). Die Modifikation der Kopplung erfolgt dabei durch Lernen des Systems. Folglich sind Kognition und Lernen untrennbar miteinander verbunden.

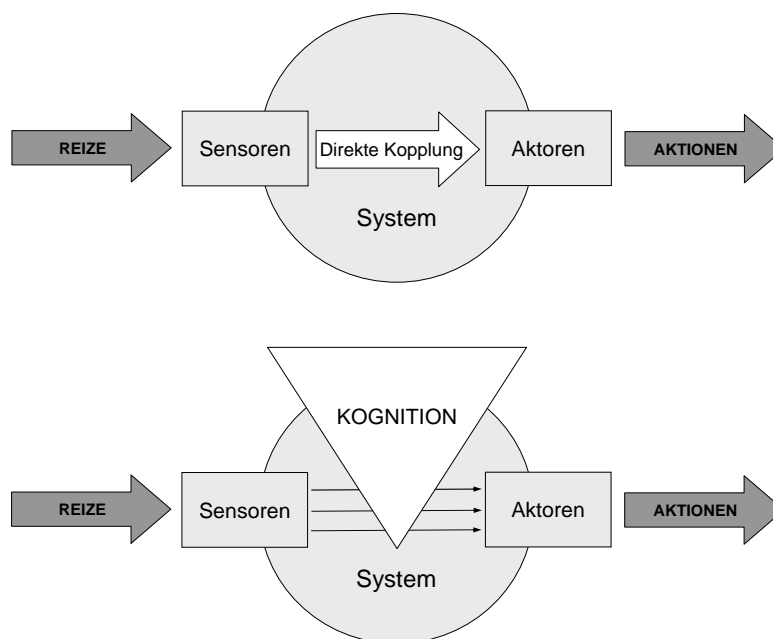


Bild 1: Nicht-kognitive (oben) und kognitive Regulationsmechanismen [2]

Bei kognitiven Systemen können folgende kognitiven Funktionen identifiziert werden [1]:

- Wahrnehmen und Erkennen
- Enkodieren
- Speichern und Erinnern
- Denken und Problemlösen
- Motorische Steuerung und Sprachgebrauch

In einem kognitiven System müssen diese fünf Funktionen alle enthalten sein. Allerdings kann es Variationen hinsichtlich der Ausprägung der einzelnen Funktionen geben. So ist es z.B. ein Unterschied, ob das System nur „ja“ und „nein“ oder ob es ganze Sätze verstehen soll.

Es gilt die Grundthese, dass Kognition als Informationsverarbeitung und elementare kognitive Prozesse (in die die kognitiven Funktionen aufgespalten werden können) als Berechnung

zu betrachten sind. Dies führt zu dem Schluss, dass kognitive Leistungen in technische Systeme generell integrierbar sind.

## 2.2 Schichtenmodell zur Verhaltenssteuerung

Es ist zu beachten, dass Kognition in natürlichen Organismen die direkte Kopplung zwischen Sensoren und Aktoren nicht ersetzt sondern mit ihr koexistiert. Das heißt bei einem kognitiven System wie z.B. dem Menschen kommen nicht-kognitive und kognitive Regulationsmechanismen vor. Daraus ergibt sich das Dreischichtenmodell, das von Strube für die Verhaltenssteuerung kognitiver Systeme vorgeschlagen wurde (siehe Bild 2).

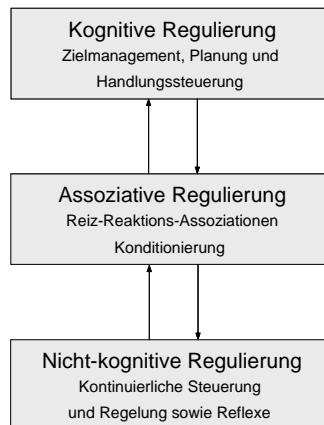


Bild 2: Dreischichtenmodell der Verhaltenssteuerung nach Strube [2]

Die unterste Schicht wird als nicht-kognitive oder reaktive Schicht bezeichnet. Sie umfasst die kontinuierlich arbeitenden Steuerungen, die rückgekoppelten Regelkreise und Reflexe. Der Aktionsraum der einzelnen, zugehörigen Steuer- und Regeleinheiten ist begrenzt. Außerdem kann, wie schon erwähnt, die Kopplung zwischen Reiz und Reaktion nicht verändert werden, sodass hier kein Lernen stattfindet. Die oberste Ebene des Schichtenmodells ist die kognitive Schicht. Charakteristisch hierfür ist, dass erfasste Reize nicht gleich zu einer Reaktion führen, sondern eine Handlung hinsichtlich der Ziele des Systems geplant wird. Dabei sind Entscheidungen zu treffen vor dem Hintergrund von Zielkonflikten, Ressourcenknappheit sowie System- und Umweltzuständen und mit der Voraussicht, welchen Nutzen bzw. welche Gefahren eine bestimmte Handlung nach sich ziehen könnte. Die Zwischenschicht wird als assoziative Schicht bezeichnet und repräsentiert die Möglichkeit, durch Konditionierung bestimmte Handlungs- mit bestimmten Reizmustern zu koppeln. Anders gesagt, wenn sich eine Handlung als Reaktion auf ein Reizmuster mehrmals als erfolgreich herausstellt, entsteht zwischen diesen beiden eine Kopplung, die in ihrer Stärke je nach Erfolg bzw. Misserfolg variieren oder auch wieder gelöscht werden kann. Zwischen den Schichten bestehen durchaus Interaktionen. Um bestimmte Musterkopplungen bei der Konditionierung zu etablieren, müssen diese zuerst trainiert werden. Dieses Training unterliegt der Steuerung der kognitiven Schicht. Außerdem kann die kognitive Schicht Regelungen aus der nicht-kognitiven Schicht beeinflussen oder sogar aussetzen.

## 2.3 Lernen im kognitiven System

Mit Lernen wird allgemein der Erwerb neuen Wissens (deklarativ und prozedural) und die Modifikation oder Umstrukturierung schon vorhandenen Wissens bezeichnet. Das neu erworbene Wissen muss mit dem schon vorhandenen Wissen in Einklang gebracht werden und ggf. das gesamte Wissen hinsichtlich neu gewonnener Aspekte umstrukturiert werden. Dies hat den Zweck, dass das kognitive System seine Performanz verbessert, d.h. Aufgaben und Probleme schneller löst als vorher. Außerdem soll es durch den Lernprozess möglich

sein, eine Anpassung an neue Randbedingungen zu vollziehen und neu gestellte Aufgaben und Probleme zu lösen. Lernen schließt also die Wahrnehmung der Umwelt, das Verknüpfen mit schon vorhandenem Wissen (Erfahrung), das Verstehen und das Erkennen von Regelmäßigkeiten sowie die Fähigkeit zum Speichern und Erinnern (Gedächtnis) ein.

In Anlehnung an das Schichtenmodell von Strube kann man unterschiedliche Stufen des Lernens unterscheiden, welche in veranschaulicht werden. Die Lernstufen klassische und instrumentelle Konditionierung sowie Lernen durch Einsicht (also kognitives Lernen) werden von di Primio im Zusammenhang mit Roboter cognition erwähnt [3].

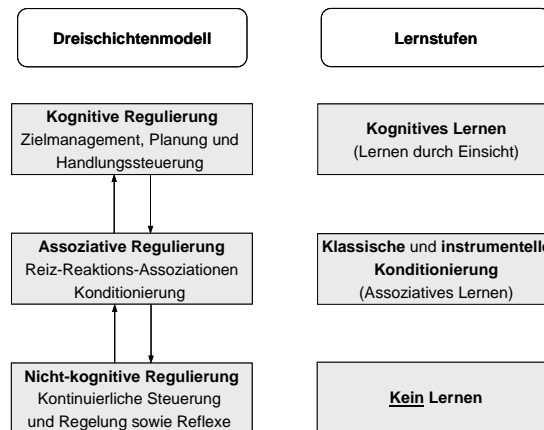


Bild 3: Lernstufen in Anlehnung an das Dreischichtenmodell

Ganz grundlegend besitzt das kognitive System angeborene Fähigkeiten, die Reflexe und Regulationsmechanismen zur Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen, die nicht durch Lernen verändert werden können. Das elementare Lernen repräsentiert die Konditionierung (auch assoziatives Lernen genannt), also das Erlernen von Reiz-Reaktions-Mustern (Stimulus-Response), die auf einer Ebene geringer Komplexität abläuft. Es ist zu unterscheiden zwischen der klassischen und der instrumentellen (oder auch operanten) Konditionierung. Bei der klassischen Konditionierung wird ein neuer Reiz (der bedingte Reiz) für eine schon vorhandene Reaktion gelernt. Die instrumentelle Konditionierung zielt darauf ab, eine neue Reaktion (eine Verhaltensweise oder ein motorisches Muster) an einen vorhandenen Reiz durch Versuch und Irrtum zu koppeln. Dabei führen Wiederholung und Belohnung im Lernprozess zu einer Verstärkung der Reiz-Reaktions-Kopplung. Konditionierte Kopplungen können auch wieder gelöscht werden. Auf der kognitiven Ebene findet das kognitive Lernen (oder auch Lernen durch Einsicht) statt, das auf der Nutzung von kognitiven Fähigkeiten beruht. Neues Wissen kommt dabei aus zwei Quellen: Es wird aus schon im Gedächtnis vorhandenem Wissen durch Schlussfolgern (Inferenz) generiert oder es entsteht dadurch, dass neue Informationen enkodiert werden, die über die Sensorik und mittels verschiedener Lernmechanismen gewonnen werden. Ein Überblick über die verschiedenen Lernmechanismen liefert [4].

### 3 Kognitive technische Systeme

Kognitive Fähigkeiten können nur in solchen Organismen existieren, welche auch ohne diese lebensfähig sind [2]. Als Grundlage für die Integration der kognitiven Fähigkeiten in ein technisches System dient daher die reaktive Struktur, welche durch den prinzipiellen Aufbau eines mechatronischen Systems gegeben ist (siehe Bild 4) [5]. Die Vorgehensweise, Messwerte mittels Sensoren aufzunehmen, über die informationsverarbeitenden Prozesse mit den gewünschten Werten zu vergleichen, um bei Abweichungen vom Sollwert eine Reaktion des Aktors hervorzurufen, welcher dann die Regelgröße entsprechend beeinflusst, entspricht

dem einfachen Reiz-Reaktions-Mechanismus, der für kognitive Systeme bereits beschrieben wurde.

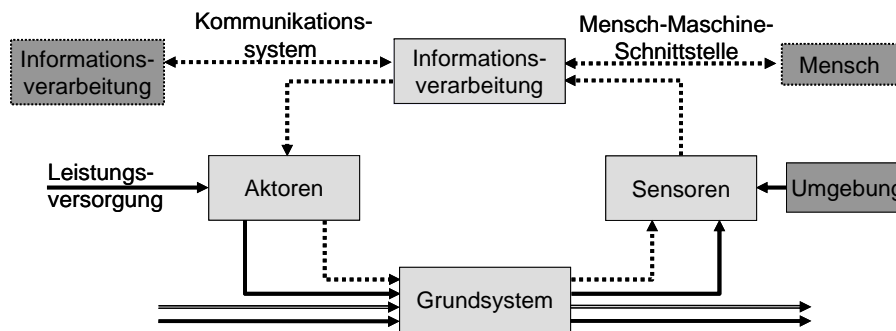


Bild 4: Mechatronische Referenzarchitektur nach VDI 2206 [5]

In einem kognitiven technischen System sind aber nun die Sensordaten nicht mehr starr an die Aktor-Reaktionen gekoppelt (Bild 1). Das bedeutet für das System, aus den Messwerten der Sensoren sind Informationen abzuleiten und in sinnvollen Clustern zu verbinden, die dann mit einem internen Wissensspeicher verglichen werden müssen. Zusammen mit der Kenntnis über die Fähigkeiten und die Ziele des Systems kann nun eine Handlung abgeleitet werden, welche die erforderliche Aktorik anspricht und damit zu einer Reaktion des Systems führt (Bild 5).

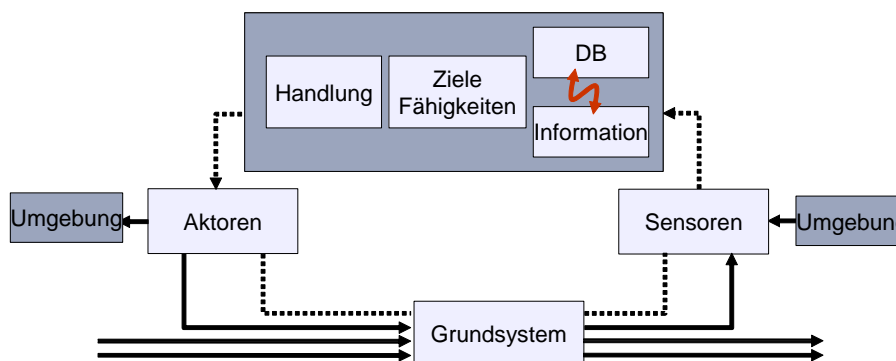


Bild 5: Regelkreisarchitektur bei kognitiven technischen Systemen

Hierbei sind die Fähigkeiten eines Systems zunächst grob durch dessen prinzipielle technische Ausstattung festgelegt, also:

- **Sensorik:** welche Daten aus der Umwelt oder vom System können mit dem Sensor-konzept mit welcher Qualität und Dynamik überhaupt erfasst werden
- **Aktorik:** zu welchen Reaktionen ist das System bei der gegebenen Aktorik fähig (dies betrifft sowohl Einzelhandlungen als auch Handlungssequenzen)
- **Grundsystem:** beeinflusst die Dynamik und die Reaktionsfähigkeit der Aktorik

Es gilt unbedingt zu berücksichtigen, dass die Aktorik vom technischen Grundsystem im Allgemeinen nur schwer zu trennen ist, aktorische Elemente also auch Funktionen der Tragstruktur übernehmen und umgedreht. Für die Architektur der Informationsverarbeitung stehen die Ansätze der Agententheorie zur Verfügung [6], [7].

Die Ziele des Systems sind definiert durch den Systemzweck. Unter anderem aufgrund der geforderten Autonomie handelt es sich hierbei nicht mehr ausschließlich um die Ziele, die in

einer hierarchischen Form organisiert werden können. Vielmehr gilt es nun, multiple Ziele zu berücksichtigen, die nebeneinander stehen, sich dabei aber durchaus beeinflussen können.

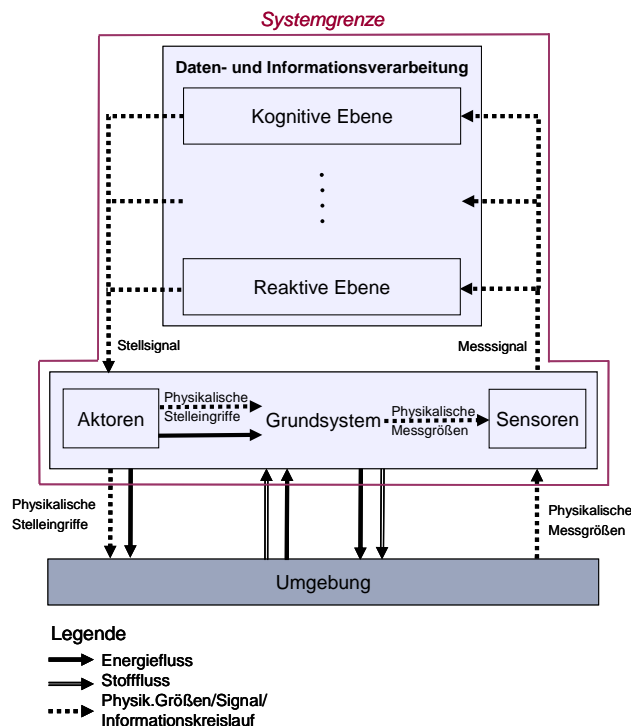


Bild 6: Regelkreisarchitektur bei kognitiven Systemen

Die kognitiven Fähigkeiten werden in das technische System durch die Berücksichtigung des Dreischichtmodells in die Referenzarchitektur integriert. Die meisten mechatronischen Systeme betreiben eine Signal- und Prozessdatenverarbeitung im unteren, prozessnahen Bereich der Automatisierungshierarchie. Sie übernehmen also steuernde, regelnde und einfache überwachende Aufgaben. Diese reaktive Ebene ist entscheidend, um die Existenz und die Sicherheit des technischen Systems zu gewährleisten. Diese grundlegenden Reiz-Reaktions-Mechanismen dürfen daher auch durch die zu integrierenden Lernmechanismen nicht aufgehoben werden. Hier sind eine schnelle Reaktionsfähigkeit und eine unbedingte Verfügbarkeit des Systems erforderlich. Zur Informationsverarbeitung auf dieser Ebene werden dagegen im Allgemeinen vergleichsweise wenige Daten benötigt.

Die digitale Informationsverarbeitung und die Methoden der Künstlichen Intelligenz in Verbindung mit neuen Technologien z.B. auf dem Gebiet der Sensorik bergen aber noch ein großes Potenzial in den Bereichen Optimierung, Anpassung an geänderte Randbedingungen, Koordination und Planung von Aktionen. Mit Ausnutzung dieser Potenziale vollzieht sich der Sprung vom mechatronischen zum kognitiven technischen System. Planende Handlungen dagegen bedürfen Zeit, was die Reaktionsfähigkeit und damit auch die Verfügbarkeit des Systems deutlich reduziert. Die zu verarbeitende Datenmenge bzw. Informationen steigen erheblich, was eine entsprechende Verarbeitungsleistung erfordert.

Naturgemäß erfordert die Integration kognitiver Fähigkeiten entsprechende leistungsfähige Ansätze aus der Informatik und der Künstlichen Intelligenz. Ausgereifte Methoden aus diesen Fachrichtungen sind erforderlich, um ein Planen und Lernen technischer Systeme sicher zu stellen. Nichtsdestotrotz darf die Auslegung des technischen Systems nicht vernachlässigt bzw. unterschätzt werden. Die Qualität des Sensorkonzeptes und die aus der Gestaltung der Aktoren resultierenden Fähigkeiten des Systems zählen ebenso dazu, um kognitive Fähigkeiten zu implementieren. Entwickelt werden muss also ein Gesamtkonzept. Die Leis-

tungsfähigkeit der Informationsverarbeitung ist an die Körperlichkeit des technischen Systems gebunden. Kognitive Fähigkeiten resultieren nicht aus Einzelkomponenten eines technischen Systems sondern existieren nur durch dessen Gesamtheit.

## 4 Entwicklungsmethodische Betrachtungen

Aus der Beschreibung des kognitiven technischen Systems resultieren zunächst zwei wesentliche Fragestellungen, die vor Beginn der Entwicklung zu klären sind. Einerseits muss sich der Entwickler über die Kompetenzen im Klaren sein, die das technische System benötigt, um die geforderten Aufgaben zu lösen. Das heißt hier im Besonderen, dass technische Systeme entstehen, die zunehmend autonom arbeiten müssen, sich also relativ frei in ihrer Umgebung bewegen können sollten. Da diese Umwelt im Allgemeinen nicht exakt vorhersehbar ist, muss das technische System also auf eine mehr oder weniger unstrukturierte Umgebung vorbereitet sein. Hinzu kommen Fragestellungen der technischen Effizienz, die bereits im Vorfeld zu klären sind. Gemeint ist damit die Beantwortung der Frage, welchen Grad an Intelligenz man tatsächlich benötigt, um das geforderte Aufgabenspektrum abzudecken.

Zunächst erscheint es in der Entwicklung sinnvoll, einen Bottom-Up-Ansatz zu verfolgen. Gesucht ist hierbei eine kleinste Einheit eines kognitiven technischen Systems, mit dessen Hilfe zunächst zum einen der prinzipielle Architekturansatz überprüft werden kann. Bei komplexen Systemen ist aufgrund der Gegebenheiten in der Informationsverarbeitung zu befürchten, dass die planenden Handlungen nach dem erfolgten Lernen nicht mehr nachvollziehbar sind. Die Bedingung, dass die reaktive Ebene auch bei loser Sensor-Aktor-Kopplung in jedem Falle arbeitet, bedarf eines Nachweises. Ist für eine Grundeinheit ein Verständnis der Funktionsweise ermittelt, ist das Verständnis für komplexere Systeme weitaus einfacher. Zur Erfüllung des Systemzwecks wiederum ist die in der Produktentwicklung übliche Top-Down-Vorgehensweise auch weiterhin von Bedeutung.

Eine große Herausforderung für die Produktentwicklung stellt der Umgang mit der hohen Komplexität derartiger Produkte dar. Diese Komplexität resultiert natürlich zum einen aus dem Produkt selbst, zum anderen führt vor allem auch die erforderliche interdisziplinäre Herangehensweise zu entsprechend aufwändigen Prozessen in der Entwicklung. Kognitive technische Systeme benötigen für ihre Funktion einen hohen Grad an Autonomie, sowohl die Bedienung als auch die Umgebung, in der das System eingesetzt wird sind vergleichsweise unsicher, was eine Strukturierung der Umgebungsparameter sehr schwierig macht. Hierzu fehlen effektive Ansätze, um die Systemkomplexität zu meistern und das Verhalten des Systems transparent zu machen.

Betrachtet man als mögliches Anwendungsgebiet die Medizintechnik (s. Kapitel 5) kommt hinzu, dass die Geräte von Ingenieuren und Ärzten entwickelt werden. Als potentielle Kunden aber sind die Patienten zu sehen, welche im Allgemeinen einen ganz anderen Wissenshorizont haben. Denen kommen diese Produkte zwar zugute, sie müssen aber auch mit diesen hochkomplexen Geräten zu Recht kommen. Das stellt hohe Anforderungen zum einen an die Ergonomie und Bedienbarkeit der Systeme und zum anderen an ihre Robustheit hinsichtlich einer fehlerhaften Bedienung. Die beiden genannten Aspekte gilt es dabei im Sinne von DfX-Kriterien näher zu beleuchten.

Die erwähnten Punkte, die bei der Entwicklung kognitiver technischer Systeme zu berücksichtigen sind, sind sehr allgemein gehalten und unscharf, sie stellen damit keinen wirklichen Ansatzpunkt für den Entwickler dar. Für die Produktentwicklung ist es notwendig, aus den genannten Punkten konkrete in der Entwicklung zu berücksichtigende Parameter abzuleiten. Ein Ansatz, um konkrete Parameter abzuleiten und für den Entwicklungsprozess zu kategorisieren bilden die Leitwerte für selbstorganisierende Systeme nach Bossel [8]:

**Existenz:** Solange das technische System seinen Systemzweck erfüllt bzw. entsprechend dem Systemzweck funktioniert, existiert das System. Der Produktentwickler muss die Umwelt, in der das System agiert ausreichend genau beschreiben. Außerdem ist die Systemstruktur so anzulegen, dass hieraus keine existenzbedrohenden Zustände resultieren (z.B. Festigkeitsauslegung bzw. hier Fragen der technischen Effizienz). Die große Herausforderung hier ist es, die möglichen Einsatzbedingungen und mögliche Anwendungsszenarien bereits im Vorfeld zu erkennen und zu beschreiben.

**Wirksamkeit:** Die Wirksamkeit gibt Auskunft über den Wirkungsgrad des Systems bzw. dessen Effizienz. Ein System ist nur dann stabil, wenn der Wirkungsgrad über einen längeren Zeitraum positiv bleibt (integrales Mittel), wobei nicht nur energetische Problemstellungen im Fokus stehen. Zwei Aspekte gilt es zu berücksichtigen: einerseits ist durch die interne Systemstruktur die Nutzung der Systemressourcen sicher zu stellen, andererseits sind gegebenenfalls auch Eingriffe in die Systemumwelt erforderlich, um die Wirksamkeit zu erhalten. Die Beachtung der Ressourcennutzung führt zur Anwendung von Methoden z.B. des Leichtbaus. Gerade im Sensorkonzept ergeben sich hier im Vorfeld Fragen dazu, welche Daten detektiert werden sollen und wie diese in die Systemstruktur zu integrieren sind, um die technische Effizienz zu sichern. Effizienz bezieht sich aber auch darauf, ob gegebenenfalls die Umwelt zu gestalten ist (z.B. Hindernisse wegräumen oder umfahren), was sich entsprechend auf die Auslegung der Aktorik niederschlägt.

**Handlungsfreiheit:** Prinzipiell ist zu erwarten, dass die Umweltvielfalt die Systemvielfalt deutlich übersteigt. Zur Bewältigung stehen zwei Strategien zur Verfügung: Entweder gelingt es, das System mit einem angemessenen Verhaltensrepertoire auszustatten, wodurch eine Verschiebung der Umwelteinflüsse so erfolgt, dass sie durch das System bewältigt werden können. Oder die Systemstruktur ist von vornherein robust gegen Umwelteinflüsse konzipiert. Während der erste Aspekt idealerweise durch die kognitiven Fähigkeiten des Systems bewältigt werden kann, stellt der zweite Aspekt entsprechend hohe Anforderungen an die Systemstruktur und deren Gestaltung.

**Sicherheit:** Auch bei einer genauen Analyse der Umgebung ist zu erwarten, dass diese zeitvariant und damit unsicher ist. Die Systeme gilt es daher so zu gestalten, dass sie von unvorhersehbaren Änderungen der Umwelt unabhängig sind. Dies ist unter Umständen nicht allein durch die Anpassung der Verhaltensregeln sicher zu stellen. Bedrohungen für den Systemerhalt bzw. die Systemfunktionalität resultieren dabei zum einen aus dem System als solches (z.B. durch Verschleiß). Geeignete Diagnoseverfahren in Verbindung mit einer Reaktion des Systems bieten einen ersten Ansatzpunkt, derartige Probleme zu lösen. Konstruktive Maßnahmen, die die Isolierung kritischer Einflussfaktoren oder das Abfangen von Überlast, die Überbrückung von Versorgungslücken oder die Aufrechterhaltung von Teilfunktionen durch Redundanzen sicher stellen, können vom Entwickler in Abhängigkeit von der Bedeutung der jeweiligen Teilfunktion berücksichtigt werden.

**Wandlungsfähigkeit:** Die Wandlungsfähigkeit zielt darauf ab, das technische System nicht aus der bedrohlichen Situation herauszunehmen sondern dieses entsprechend anzupassen. Sie resultiert entweder aus der Veränderung der Verhaltensfunktion oder aber aus der Veränderung der Zustandsfunktion im System. Die Zustandsfunktion beschreibt die Struktur und bestimmt damit die Identität des Systems. Die kognitiven Fähigkeiten unterstützen unter diesem Aspekt vor allem das Anpassen der Verhaltensfunktion, indem z.B. eine ursprünglich geplante Handlung aufgrund einer Vielzahl von Wiederholungen als eine reflexartige Handlung übernommen wird. Die Wandlungsfähigkeit kann durch die konstruktive Gestaltung durchaus unterstützt werden und ist damit nicht allein durch die Informationsverarbeitung zu realisieren. Konstruktive Ansätze sind z.B. der Einsatz von vielseitig verwendbaren Strukturelementen, von redundanten aber physisch andersartigen Komponenten und Prozessen oder von Ansätzen zur Dezentralität und Teilautonomie.



**Rücksichtnahme:** Umwelteinflüsse auf ein technisches System resultieren nicht allein aus der Umgebung selbst, sondern auch aus möglichen Partnersystemen. Gleichzeitig werden Partnersysteme (technische Systeme oder der Anwender) beeinflusst, was eine Beachtung des Verhaltens anderer Systeme erforderlich macht. Dies muss über die normale Auswertung von Umgebungsvariablen hinausgehen, wobei es gilt, das Systeminteresse zu beachten. Als Strategien stehen Möglichkeiten von Altruismus bis Egoismus zur Verfügung. Die Problemstellung der Rücksichtnahme kann aber auch auf interne Strukturen angewendet werden. Innerhalb eines komplexen technischen Systems wird im Allgemeinen ein modularer Aufbau verwendet, sodass auch systemintern vergleichsweise unabhängige und parallele Prozesse ablaufen, für die das Prinzip der Rücksichtnahme zu beachten ist. Eine Mißachtung führt auch hier zur Existenzbedrohung.

Natürlich sind diese Leitwerte in dieser Granularität noch zu plakativ, eine feinere Strukturierung und eine detailliertere Einteilung von Parametern ist erforderlich, um dem Entwickler tatsächlich als Methode bei der Auslegung kognitiver technischer Systeme zu dienen. Hier ist noch einiges an Forschungsarbeit erforderlich, um auf Basis der beschriebenen Systemarchitektur Ansätze abzuleiten und in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren, die die Entwicklung kognitiver technischer Systeme aus einer rein akademischen Betrachtung herausführen. Gleichzeitig erfordert aber die Entwicklung kognitiver technischer Systeme ein sehr hohes Maß an Interdisziplinarität. Nur wenn es gelingt, das gleichberechtigte Nebeneinander zu etablieren bestehen echte Chancen, Produkte einer neuen Dimension als Ergebnis zu erhalten.

## 5 Anwendungsszenario aus der Medizintechnik

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels die Integration kognitiver Fähigkeiten in mechatronische Systeme veranschaulicht werden. Als Demonstrator dient hierbei das Trainingsgerät Lokomat der Firma Hocoma AG, das zum automatisierten Gangtraining für halbseitig und inkomplett gelähmten Personen genutzt wird [9], [10]. Der Patient steht dabei mit einem Seilzug gehalten auf einem Laufband. Seine Beine werden mittels einer Orthese bewegt. Dadurch wird gewährleistet, dass der Patient über längere Zeit ein exaktes und symmetrisches Gangmuster trainieren kann. Das Gangmuster und die Führungskraft kann vom Therapeuten individuell für den einzelnen Patienten eingestellt werden. Das Gangmuster hängt von Größe, Gewicht, Alter, Tagesform, Trainings- und Ermüdungszustand etc. ab. Die Führungskraft ist ein Maß dafür, wie viel Eigenleistung der Patient bei der Bewegung der Beine erbringen muss. Das Trainingsgerät Lokomat stellt ein klassisches mechatronisches System dar. Das Gestell, die Orthese, das Laufband und der Seilzug sind dem Grundsystem zuzuordnen. Der Patient und der Therapeut sind Teil der Umgebung. Es werden die Position der Beine (Positionssensoren), die von der Orthese aufgewendete Führungskraft für die Beinbewegung und somit die Patienteneigenleistung (Kraftsensoren in den Gelenken der Orthese) und ggf. Stolperbewegungen (Lichtschranke) erfasst. Die aufgenommenen Daten werden verarbeitet und können in Verbindung mit den Trainingseinstellungen im Gerät gespeichert und bei den nachfolgenden Trainingseinheiten wieder aufgerufen werden. Die Trainingsparameter und die Ergebnisse aus den Sensordaten werden über Bildschirme unter Echtzeitverarbeitung dargestellt. So können sowohl Patient als auch Therapeut den Trainingsfortgang überblicken (Motivation und Kontrolle). Je nach Einstellung der Trainingsparameter oder je nach Sensorwerten werden die Antriebe der Orthese angesteuert, welche dann die Bewegung generieren. Das Einstellen der Trainingsparameter erfolgt hierbei durch den Therapeuten.

Die Möglichkeiten zur Integration kognitiver Fähigkeiten in dieses existierende System sollen nun anhand der vier Charakteristika Interaktivität, Kooperativität, Autonomie und Lernfähigkeit beschrieben werden. Bei kognitiven technischen Systemen ist die Interaktion mit der Umwelt viel stärker als bei mechatronischen Systemen. Die Interaktion beim Lokomat kann z.B. dadurch verstärkt werden, dass eine Kommunikation via Sprache zwischen System und

Patient bzw. Therapeut ermöglicht wird. Kooperativität in Zusammenhang mit solchen Systemen heißt, dass das System den Menschen bei dessen Absichten unterstützt, aber nicht bevormundet. Die Möglichkeit zur Kooperation erhöht sich durch die Integration der Kommunikationsfähigkeit mittels Sprache. Autonomes Verhalten bedeutet, dass das System seinen Systemzweck über einen bestimmten Zeitraum hinweg ohne Eingriffe des Benutzers erfüllen kann. Beim Lokomat hieße das, dass das System selbstständig, ohne den permanenten Eingriff des Therapeuten das Training des Patienten durchführen, also selbstständig Trainingspläne erstellen und die Trainingsparameter anpassen kann. Die Möglichkeit zum Lernen kann im System dazu genutzt werden, dass sich das System an die Tagesform und den Trainingsfortschritt des einzelnen Patienten oder generell an verschiedene Patienten anpasst. Des Weiteren ist es denkbar, dass neue Trainingsmuster dem System angelernt werden. Neben diesen vier Aspekten ist eine Kopplung des Trainingsgeräts mit anderen Geräten über geeignete Schnittstellen denkbar, um ein möglichst umfassendes Gesamtbild des Patientenzustandes zu erhalten. So könnte das System mit Geräten zur Erfassung der Vitalfunktionen verbunden werden und kooperieren.

Im Einzelnen wären die Funktionen des Lokomats folgenden kognitiven Funktionen zuzuordnen:

- Wahrnehmen: Erfassen von Beinbewegungen, Führungskräften etc. über Sensoren; sprachliche Wahrnehmung
- Erkennen: Erkennen von Patienten mit ihren individuellen Gangmustern, Ermüdungserscheinungen, kritischen Situationen; Spracherkennung
- Enkodieren: Verstehen, Klassifizieren und Verknüpfung von Trainingsdaten
- Speichern und Erinnern: Speichern der enkodierten Daten z.B. in einer Datenbank mit der Möglichkeit, später wieder darauf zugreifen zu können
- Denken und Probleme lösen: Autonomes Erstellen eines Trainingsprogramms auf Basis der früheren Trainingsdaten; Lösung von kritischen Situationen oder Abhilfe bei Beschwerden des Patienten; Erfüllen von Aufträgen des Therapeuten; Lernen von neuen Trainingsmustern; Anpassung an verschiedene Patienten
- Motorische Steuerung: Erzeugen von Bewegungsmustern und Ansteuern der Antriebe der Orthese
- Gebrauch der Sprache zur Kommunikation mit Patient und Therapeut

In Kap. 3 wurde eine Architektur für ein kognitives technisches System mit einer schichtweise unterteilten Daten- und Informationsverarbeitung vorgeschlagen. In der reaktiven Schicht werden zeitkritische Daten verarbeitet. Dies ist z.B. beim Lokomat der Fall, wenn die Lichtschranke ein Stolpern meldet. Hierauf muss in kürzester Zeit mit einer Notaus-Funktion reagiert werden. Das Erstellen von Trainingsprogrammen oder die Kommunikation, wo eine Reihe von Fakten und Regeln („Hintergrundwissen“) miteinbezogen werden muss, ist der kognitiven Schicht zuzuordnen, wogegen das Regeln einfacher Bewegungsmuster der reaktiven Schicht zuzuordnen ist.

## 6 Fazit

Die Integration kognitiver Fähigkeiten in technische Systeme erschließt den Menschen eine völlig neue Qualität von Produkten. Bevor es jedoch soweit ist, muss zunächst die Systemarchitektur modifiziert und an die neuen Eigenschaften angepasst werden. Erst wenn dies zufrieden stellend gelöst ist, können entsprechende Methoden entwickelt werden, wie mit konkreten Problemstellungen umzugehen ist. Dies wiederum muss die Grundlage dafür bilden, um sinnvoll Modifikationen im Produktentwicklungsprozess zu erarbeiten. Hier vorgestellt

wurde ein erster Ansatz, um kognitive Fähigkeiten in einem technischen System überhaupt zu integrieren. Bis tatsächlich wirkungsvolle Methoden für das Alltagsgeschäft der Produktentwicklung zur Verfügung stehen ist noch ein erheblicher Forschungsaufwand erforderlich.

## 7 Literatur

- [1] Strube, G.: Kognition. In: Strube, G. et al.: Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Klett-Cotta, Stuttgart 1996.
- [2] Strube, G.: Modelling Motivation and Action Control. In: Schmid, U.; Krems, J.F.; Wysocki, F.: Mind Modelling. Pabst, Berlin 1998.
- [3] Di Primio, F.: Roboter cognition. GMD Report 16. GMD-Forschungszentrum Informationstechnik GmbH, Sankt Augustin 1998.
- [4] Keller, H. B.: Maschinelle Intelligenz. Vieweg. Braunschweig/Wiesbaden. 2000.
- [5] VDI-Richtlinie 2206. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 2003.
- [6] Görz, G.; Rollinger, C.-R.; Schneeberger, J. (Hrsg.): Handbuch der Künstlichen Intelligenz. Oldenbourg. München (u.a.). 2000. 3. Auflage.
- [7] Russell, S.; Norvig, P.: Artificial Intelligence – A Modern Approach. Pearson Education. Upper Saddle River, New Jersey. 2003. 2. Auflage.
- [8] Bossel, H.: Modellbildung und Simulation – Konzepte, Verfahren, und Modelle. Verlag Vieweg, 1994.
- [9] Werner, J.: Kooperative und autonome Systeme der Medizintechnik. Oldenbourg, München (u.a.) 2005.
- [10] <http://www.hocoma.ch>

Dipl.-Ing. Julia Stuppy  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-27984  
Fax: +49-9131-85-27988  
Email: [stuppy@mfk.uni-erlangen.de](mailto:stuppy@mfk.uni-erlangen.de)  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>

Dr.-Ing. Kristin Paetzold  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Paul-Gordan-Straße 5, D-91052 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-23222  
Fax: +49-9131-85-23223  
Email: [paetzold@mfk.uni-erlangen.de](mailto:paetzold@mfk.uni-erlangen.de)  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>

