

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

K. Paetzold/ J.Stuppy

## **Multidisziplinäre Ansätze zur Entwicklung kognitiver technischer Systeme**

### **ABSTRACT**

Die logische Fortsetzung mechatronischer Systeme ist die Integration kognitiver Fähigkeiten in ein technisches System. Der vorliegende Beitrag will zunächst klären, was Kognition im Kontext technischer Systeme bedeutet. Daraus lassen sich erste Ansätze zur Beantwortung von Fragestellungen zur Systemarchitektur ableiten, die kurz vorgestellt werden.

### **1. EINLEITUNG**

Mechatronische Produkte sind heute aus dem Leben nicht mehr wegzudenken. Hinsichtlich der Entwicklung mechatronischer Systeme konnten in der Vergangenheit einige Fortschritte erzielt werden. Es wurde eine solide Basis für methodische Entwicklungsansätze in der interdisziplinären Zusammenarbeit geschaffen. Auf Basis dieser Ansätze ist nun eine Weiterentwicklung mechatronischer Systeme hin zu adaptiven Systemen zu beobachten, die wiederum als eine Vorstufe für kognitive technische Systeme betrachtet werden können.

Diese Weiterentwicklung resultiert hauptsächlich aus den Fortschritten in den Bereichen Sensorik und Mustererkennung sowie in der Künstlichen Intelligenz. Die Informationsverarbeitung im mechatronischen System erhält damit einerseits einen deutlich höheren Stellenwert für die Produktfunktionalität. Andererseits sind Funktionalitäten, die aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz in das System getragen werden, auch mit Fragestellungen aus der Neurobiologie, der Psychologie und der Kognitionswissenschaft verbunden. Natürlich wirken sich die Erkenntnisse aus diesen Bereichen auch auf das technische System aus und müssen bei der Umsetzung und Realisierung der mechanischen Tragstruktur und der Aktorik entsprechend berücksichtigt werden. Kognitive technische Systeme sollen vorrangig in der Lage sein, sich an variierende Aufgabenstellungen anzupassen. Dazu ist es nicht nur erforderlich veränderte und unbekannte Randbedingungen und Umweltweinflüsse zu erkennen und situationsgerecht zu reagieren. Lernfähigkeit bedeutet hier auch, dass das technische System mit Verhaltensmustern reagiert, die während der Entwicklung nicht zwangsläufig vorgegeben wurden, sondern die sich aufgrund der

„Erfahrungen“ des Systems herausgebildet haben.

Technische Systeme werden auch in Zukunft verstärkt in den Handlungsraum des Menschen integriert. Gerade medizintechnische Systeme, die z.B. zum Ziel haben menschliche Schwächen zu kompensieren, werden sehr stark an Bedeutung gewinnen. Diese Nähe zwischen Mensch und Technik erfordert kognitive Fähigkeiten, um den Menschen in seiner Handlungs- und Bewegungsfreiheit nicht einzuschränken und ihn effektiv zu unterstützen.

Im Rahmen der Produktentwicklung ist es erforderlich, aus systemtheoretischer Sicht eine Basis für die Integration kognitiver Fähigkeiten in ein Produkt zu schaffen. Es ist eine ausgesprochen interdisziplinäre Aufgabenstellung zu bearbeiten, die nicht nur technische Aspekte (wie bei mechatronischen Systemen) zu berücksichtigen hat sondern auch psychologische und verhaltenswissenschaftliche Ideen. Dies bedarf eines ganzheitlichen Ansatzes zur Produktentwicklung kognitiver technischer Systeme.

## 2. KOGNITIVE FÄHIGKEITEN TECHNISCHER SYSTEME

Mit dem Begriff der Kognition werden innerhalb der Psychologie zunächst die ganz allgemeinen Eigenschaften Erkennen, Wahrnehmen und Wissen verknüpft (Bild 1).

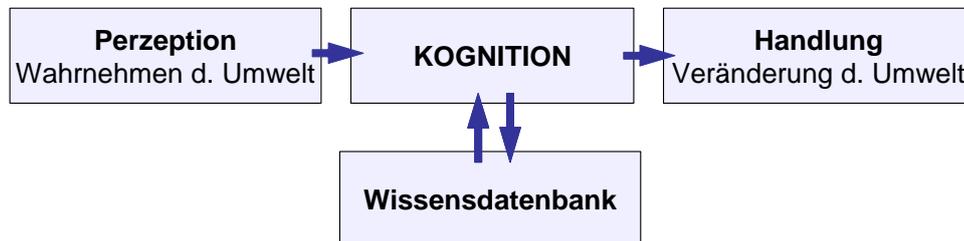


Bild 1: Veranschaulichung kognitiver Prozesse

### 2.1 Definition von Kognition für technische Systeme

In Anlehnung an die Definition von Strube definiert sich innerhalb der Kognitionswissenschaften die Kognition durch die Funktionen wahrnehmen und erkennen, encodieren, speichern und erinnern, denken und Probleme lösen, die motorische Steuerung und den Gebrauch der Sprache. Diese Funktionen weist der Mensch als klassisches kognitives System auf, niedere Lebewesen wie z.B. Plattwürmer erbringen zwar auch kognitive Leistungen, aber nicht auf dem Niveau, zu dem der Mensch fähig ist. Die genannten Forderungen können daher als eine Maximalforderung verstanden werden [1]. Betrachtet man die genannten Eigenschaften näher, wird zudem deutlich, dass es sich bei Kognition um einen Prozess zur Informationsverarbeitung handelt, innerhalb dessen Daten aufgenommen, zu Informationen verarbeitet und problemorientiert angewendet werden [2]. Dies

führt zu der Grundthese, dass kognitive Prozesse identisch sind mit Berechnungen und damit auf technische Systeme übertragbar bzw. von technischen Systemen anwendbar sind.

Bezogen auf die Umsetzung in technischen Systemen bedeuten kognitive Fähigkeiten, dass dieses in der Lage ist:

- seine Umgebung wahrzunehmen, relevante Daten zu erkennen, die aufgenommenen Daten im System zu repräsentieren und mit bereits vorhandenem Wissen in Verbindung bringen;
- Handlungen bezüglich der Ziele und Aufgaben des Systems abzuleiten werden, die auf die spezifische Situation angepasst sind;
- die Ergebnisse von Handlungen und Reaktionen zusammen mit den auslösenden Daten und gegebenenfalls einer Bewertung so zu speichern, dass bei vergleichbaren Situationen auf ein bekanntes und bewährtes Handlungsmuster zurückgegriffen werden kann;
- vordefinierte, gelernte oder aus Erfahrungen erarbeitete Verhaltensregeln so einzusetzen, dass sie zur Problemlösung im Rahmen der in das System entwickelten Aufgabenkompetenz herangezogen werden können;
- die aktorische Komponente in der Lage ist, aktiv die Umgebung zu beeinflussen, ohne dabei die eigene Existenz zu gefährden;
- hierzu geeignete Kommunikationsformen mit dem Benutzer/der Umgebung nutzen (Sprache, optische, haptische Signale etc.).

Für eine Beantwortung der Frage, welcher Grad der Funktionsausprägung bereits als kognitive Fähigkeit betrachtet werden kann, liefern nähere Betrachtungen zum mechatronischen System bzw. zu den dahinterliegenden Regelkreisen einen ersten Anhaltspunkt.

## **2.2 Die Bedeutung des Regelkreises für kognitive technische Systeme**

Die Beschreibung technischer Systeme durch Regelkreisstrukturen hat sich als allgemein anerkanntes Prinzip durchgesetzt, vor allem wegen der Möglichkeit, das Systemverhalten anzupassen. Der Regelkreis bildet auch die Grundlage für die mechatronische Referenzarchitektur.

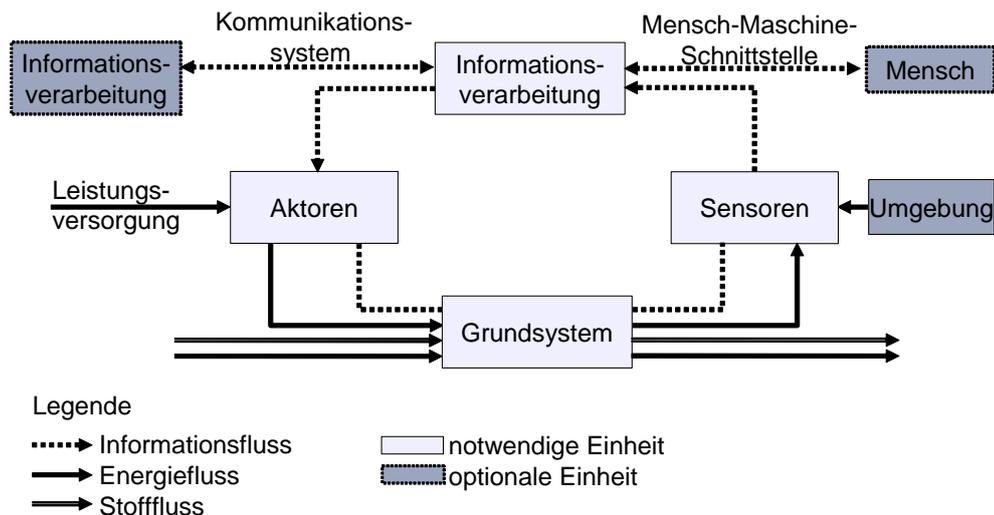


Bild 2: Mechatronisches System als Regelkreis nach VDI 2206 [4]

Im einfachsten Fall beschreibt ein Regelkreis ein rein reaktives System, für welches im Extremfall nicht zwingend eine mechatronische Umsetzung erforderlich ist. Dazu wird ein Ausgangsparameter des Systems sensorisch überwacht. Weicht der Istwert von einem definierten Sollwert ab, sorgt eine über einen Regler aktivierte aktorische Komponente dafür, dass dieser wieder eingestellt wird. Man hat eine starre Kopplung zwischen Aktorik und Sensorik.

Wenn der Regelkreis in der Lage ist, nicht nur den Sollzustand eines Ausgangsparameters zu überwachen, sondern gleichzeitig den Sollwert auf Veränderungen im Grundsystem oder in der Umgebung anzupassen, spricht man von einem adaptiven System. Diesen Regelkreisen wird bereits ein bestimmter Grad an Intelligenz<sup>1</sup> zugesprochen. Sie können zunehmend für komplexere Aufgaben herangezogen werden, da sie eine automatische problemangepasste Reaktion erlauben. Allerdings wird auch hier von einer starren Kopplung von Sensorik und Aktorik ausgegangen, das heißt, bestimmte Aktorreaktionen sind an definierte Sensordaten gebunden.

In einem kognitiven Regelkreis wird die starre Kopplung zwischen der Sensorik und der Aktorik aufgelöst [1]. Der Regelkreis nimmt jetzt zunächst eine Vielzahl von Sensordaten auf, die aber nicht mehr direkt mit entsprechenden Aktorreaktionen gekoppelt sind, sondern es ist nach zu definierenden Regeln eine Reihe von Daten auszuwerten, gegebenenfalls nach Mustern zu suchen und mit einer systeminternen Wissensdatenbank zu vergleichen, um danach eine Reihe von aktorischen Elementen parallel oder auch seriell anzusteuern. Daraus resultiert die Fragestellung, wie nun diese Verhaltensregeln aufzustellen sind, was letztlich zu Fragen der Lernfähigkeit eines technischen Systems führt.

<sup>1</sup> Der Begriff Intelligenz wird oft als ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung genutzt. Allerdings ist der Begriff in der Literatur vor allem in den unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen z. T. entweder unterschiedlich oder gar nicht definiert. Umgangssprachlich werden damit differierende Probleme beschrieben. Daher wird mit dem Begriff hier max. mit qualitativer Aussage verwendet, auf eine Definition wird verzichtet.

### **2.3 Lernfähigkeit technischer Systeme**

Die Integration von Lernfähigkeit in ein technisches System ist ein sehr komplexes und umfangreiches Themengebiet, welches hier nur kurz angerissen werden soll.

Im klassischen mechatronischen System resultiert die Lernfähigkeit (Intelligenz) des Systems aus einer Reihe vorprogrammierter Sensor-Aktor-Ketten. Die so geschaffenen unbedingten Reaktionen sind charakteristisch für reaktive Systeme. Im Kontext der Kognition stellen sie die Grundvoraussetzung für die „Unverletzbarkeit“ des Systems und damit des Systemerhalts dar. Die adaptive Verhalten resultiert aus der Tatsache, dass in vorprogrammierte Ketten variable Auslegungsmechanismen, wie z.B. einfache Lock-up-tables integriert werden [3, 5].

Zunächst soll eine Sensor-Aktor-Kette als Verhaltensregel definiert werden. Sind für vorprogrammierte starre Sensor-Aktor-Ketten zusätzlich Sensordaten strukturiert, gezielt nach Mustern abgesucht und im Kontext ausgewertet, kann eine erste Stufe von Lernfähigkeit umgesetzt werden. Sie entspricht der klassischen Konditionierung, wie sie aus der Psychologie bekannt ist (Pawlovscher Reflex).

Ein wichtiger Lernmechanismus beruht auf dem Wiedererkennen von Situationen. Sensordatenmuster müssen hierzu mit einer internen Wissensdatenbank abgeglichen werden, in welcher auch vorher erfolgreich durchgeführte Handlungen abgespeichert sind. Dazu bedarf es zusätzlich Bewertungskriterien, für welche die Leitwerte nach Bossel (Kap. 3.2) als Grundlage nutzbar sind. Nach dem Erkennen von Identität (als Vergleichsprozess) kann die mit dem gespeicherten Muster verbundene Handlung ausgeführt werden. Interessant wird es sein, ob sich Nuancen abbilden lassen, und ob diese Nuancen z.B. auch für die Erarbeitung neuer Verhaltensregeln genutzt werden können. In diesem Zusammenhang stellt sich zudem sofort die Frage nach dem Speichern eines mit einer Sensor-Aktor-Kette verbundenen neu generierten Verhaltensmusters. Jedes technische System hat nur eine begrenzte Speicherkapazität zur Verfügung. Daher bedarf es Mechanismen, um Verhaltensmuster als obsolet zu erkennen und zu löschen.

Die instrumentelle Konditionierung ist bereits deutlich schwieriger in das technische System zu integrieren. Instrumentelle Konditionierung bedeutet Lernen durch „Trial and Error“. Dies entspricht einer Veränderung von Algorithmen, die einem Verhalten zugrunde liegen und nicht mehr nur einer Veränderung des zugrunde liegenden Datensatzes. Damit müsste in die Regelstrecke des Systems eingegriffen werden: im einfachsten Fall, kann die Stärke der resultierenden Handlung variiert werden (Vorgehen in kleinen Schritten oder als ein großer Schritt innerhalb der Regelstrecke). In der Natur aber resultiert die Effektivität des Lernmechanismus u.a. daraus, dass

nicht in Richtung des Sollwertes sondern entgegengesetzt reagiert wird. Für eine technische Umsetzbarkeit wären für eine solche Reaktion zum einen die Auswertung weiterer relevanter Systemparameter erforderlich, zum anderen aber benötigt man dann Mechanismen, die die Existenz und resultierende Bedrohungen für das System abschätzen können. Als Basis dafür ist eine wirkungsvolle Form der Selbstrepräsentation vorauszusetzen.

### **3. INTEGRATION IN DAS TECHNISCHE SYSTEM**

Im Fokus der Produktentwicklung steht die Systemarchitektur. Zwar scheint die Integration kognitiver Fähigkeiten zunächst ein reines Problem der Datenaufnahme und Informationsverarbeitung zu sein, allerdings konnte bereits gezeigt werden, dass das Grundsystem und vor allem auch die Auslegung der Aktorik und die Sensorik des Systems für die Gesamtfunktionalität entscheidend sind. Letztlich muss die Informationsverarbeitung mit den physikalischen und geometrischen Gegebenheiten und der Leistungsfähigkeit des Systems umgehen. Die Kompetenz zur Aufgabenlösung ergibt sich vor allem auch aus der Konfiguration des technischen Systems. Fragestellungen der technischen Effizienz können in der Entwicklung nicht außer acht gelassen werden. Als technische Effizienz wird hierbei das Maß an kognitiven Fähigkeiten verstanden, welches benötigt wird, damit das System seine Rolle einnehmen kann [10]. Typische Ausprägungen sind z.B. das Maß an Autonomie oder Kommunikationsfähigkeit, zu welchem das System fähig ist.

#### **3.1 Vom Reflex zur planenden Handlung**

Diese Problemstellungen gilt es, bereits in der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Nur aus der Beantwortung der Frage, welches Maß an kognitiven Fähigkeiten überhaupt für ein System benötigt wird, lässt sich ableiten, welche Parameter des Grundsystems und der Umwelt zu detektieren und welche Parameter zu beeinflussen sind. Hinzu kommen solche Aspekte, dass durch die Integration kognitiver Fähigkeiten vom System erwartet wird, dass es sich auf Basis eines Pools von Sensor- und Aktordaten seine eigenen Verhaltensregeln aufbaut, was wiederum erforderlich macht, dass das System z.B. seine eigenen Fähigkeiten und seinen Handlungsspielraum kennt (Selbstreflexion) [5].

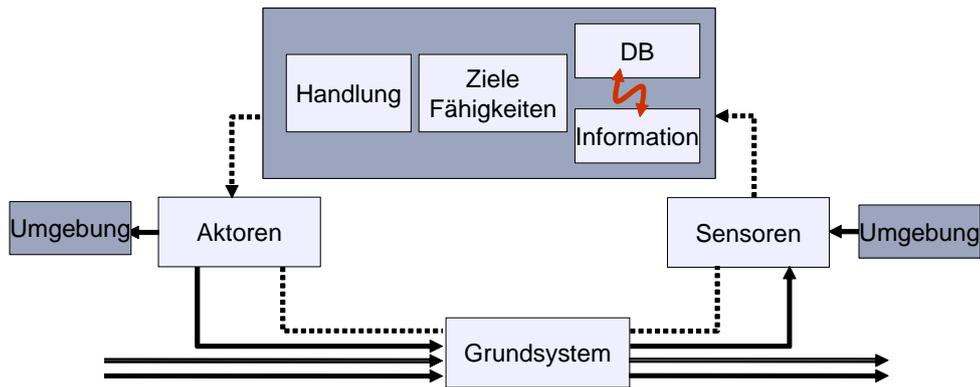


Bild 3: Regelkreisarchitektur bei kognitiven Systemen

Als Basis für die Produktentwicklung werden die bekannten Ansätze aus der Systemtheorie zur Beschreibung und Entwicklung technischer Systeme betrachtet [8]. Hierzu geht man zunächst von einer Black-Box-Darstellung des technischen Systems mit den bekannten Eingangs- und Ausgangsflüssen Stoff, Energie und Signale aus. Dabei wird bewusst auf eine Trennung von Signal- und Informationsfluss zurückgegriffen [6]. Ähnlich wie bei der Wissensgenerierung beim Menschen und unter Berücksichtigung der Lernfähigkeit eines technischen Systems, nimmt dieses zunächst Daten aus der Umwelt und über den Zustand des Grundsystems auf. Die z.T. vom System selbst erarbeiteten Verhaltensregeln formulieren aus einer Reihe von Sensordaten über eine geeignete informationsverarbeitende Methode eine Information, die letztlich zugrunde gelegt wird, um eine aktorische Handlung auszulösen. Bei der herkömmlichen rigiden Kopplung von Sensorik und Aktorik wird die Information generiert durch die Programmierung, das Resultat ist klar definiert, so dass eine Unterscheidung zwischen Verhaltensregeln nicht zwingend erforderlich und im Allgemeinen auch nicht möglich ist. Welche Information für ein kognitives technisches System aus den Daten generiert wird, hängt nun zum einen von der Programmierung und zum anderen von den verwendeten Lernregeln ab.

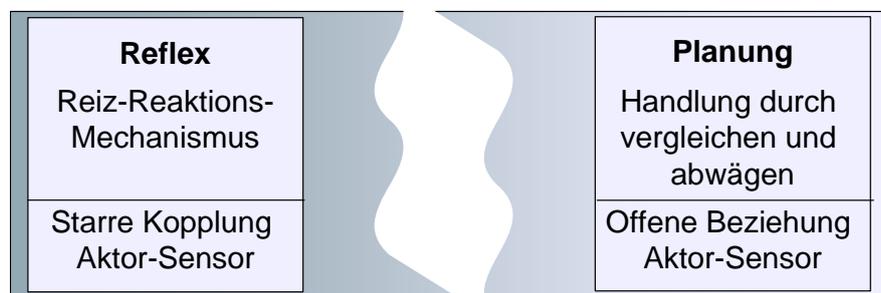


Bild 4: Zusammenhang zwischen Reflex und Planung

Ausgehend von der Annahme, dass kognitive Prozesse identisch sind mit Berechnungen, kann unter Zuhilfenahme eines Automaten in Analogie zum psychologischen Kognitionsbegriff der Eingabewert als Reiz, der Ausgabewert entsprechend als Reaktion definiert werden. Ein Regelkreis

mit einer starren Kopplung von Sensordaten und Aktordaten entspricht dann einem klassischen Reflex (Reiz-Reaktions-Mechanismus). Besitzt ein technisches System kognitive Fähigkeiten, heißt dies, die starre Kopplung zwischen Aktorik und Sensorik ist aufgelöst (Bild 3). Innerhalb der Informationsverarbeitenden Komponente werden die Daten in Informationen umgewandelt und mit einer Datenbank abgeglichen, die das Wissen des Systems beinhaltet. Im Falle eines Konfliktes ist nun die Informationsverarbeitung dafür verantwortlich, auf Grundlage von „Zielen“ und den „Fähigkeiten“ des Systems eine Auswahl zur Handlung zu treffen, die dann durch die Aktorik umgesetzt wird. Im Gegensatz zu der rein reflexhaften Handlung ist diese Vorgehensweise als eine planende Handlung zu betrachten (Bild 4). Zwischen den einfachen Reflexen und der planenden Handlung sind hierbei in Abhängigkeit von möglichen Lernmechanismen und der Systemarchitektur weitere Zwischenformen zu erwarten.

### **3.2 Leitwerte zur Beschreibung von Fähigkeiten und Zielen**

In diesem Kontext gilt es zu klären, was als Ziele und Fähigkeiten zu betrachten ist [7]. Die Fähigkeiten eines Systems resultieren aus dessen Grundstruktur in Verbindung mit der Aktorik und Sensorik. Hierzu ein Beispiel: wenn ein System mit angetriebenen Rädern ausgestattet ist, hat es die Fähigkeit sich zu bewegen. Die technische Ausführung des Bewegungsapparates lässt Rückschlüsse auf mögliche Geschwindigkeiten und das Beschleunigungsverhalten zu, aber auch qualitative Aussagen, nämlich dass eine definierte Bodenhaftung sowohl zum Bewegen als auch zur Existenzhaltung (kein Fliegen oder Schwimmen) nötig ist. Diese Informationen müssen dem technischen System bekannt sein, es benötigt eine Art der Selbstreflexion, um sein Handlungen planen zu können. Hier stellt sich die Frage, ob es dazu eines Satzes Differentialgleichungen bedarf, Grenzwerte (z.B. für Beschleunigung und Geschwindigkeit) benötigt oder ob eine symbolische Modellierung für die Selbstrepräsentation erforderlich wird.

Weiterhin kann man davon ausgehen, dass das Ziel eines Systems primär durch den Systemzweck, also durch die in der Konzeptphase aus der Anforderungsliste gefundene Gesamtfunktion definiert ist. Diese Interpretation reicht jedoch nicht aus, wenn man berücksichtigt, dass neben dem Systemzweck bei einem vergleichsweise freien Operieren des Systems in der Systemumgebung weitere Funktionen erforderlich sind, die die Existenzsicherung, das heißt, das Überleben gewährleisten. Zur Beschreibung des Gesamtsystemverhaltens (Systemzweck und existenzhaltende Funktionen) soll auf die Leitwerte nach Bossel zurückgegriffen werden [9]. Diese Leitwerte gelten als Entwurfskriterien, die die Selbsterhaltung und Entfaltung des Systems sichern helfen. Die Leitwerte beschreiben zunächst nur grobe Anhaltspunkte und bedürfen in der Entwicklung einer weiteren Detaillierung.

Die sechs Leitwerte sollen im Folgenden kurz umrissen und daraus resultierende Anforderungen für die Produktentwicklung abgeleitet werden.

**Existenz:** Solange das technische System seinen Systemzweck erfüllt bzw. entsprechend dem Systemzweck funktioniert, existiert das System. Der Produktentwickler trägt also zum einen die Verantwortung dafür, dass die Umwelt ausreichend genau beschrieben wurde, zum anderen ist die Systemstruktur so anzulegen, dass hieraus keine existenzbedrohenden Zustände resultieren (z.B. Festigkeitsauslegung). Die große Herausforderung hier ist es, die möglichen Einsatzbedingungen und mögliche Szenarien bereits im Vorfeld zu erkennen und zu beschreiben. Über die Aufnahme externer Parameter muss das System zudem schädliche Umwelteinwirkungen erkennen und entweder filtern oder vom System fern halten.

**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. Der Entwickler muss dabei auf die Ressourcennutzung achten, wo z.B. Methoden des Leichtbaus entsprechend unterstützend wirken. Gerade im Sensorconcept eröffnet sich von vorneherein die Fragestellung, welche Daten sinnvoll detektiert werden und wie diese in die Systemstruktur zu integrieren sind, so dass sie effektiv aufgenommen werden können. Hinsichtlich der externen Effekte bedarf es z.B. der Festlegung von reflexartigen Regelketten, die eine sichere Energiezufuhr gewährleisten. Die Effektivität kann sich hier aber auch darauf beziehen, die Umwelt zu gestalten, indem z.B. Hindernisse weggeräumt werden anstatt sie zu umfahren, was entsprechende Anforderungen an die Auslegung der Aktorik stellt.

**Handlungsfreiheit:** Prinzipiell ist zu erwarten, dass die Umweltvielfalt die Systemvielfalt deutlich übersteigt. Dem Entwickler stehen im Wesentlichen zwei Strategien zur Verfügung, um diesen Aspekt zu bewältigen. Entweder gelingt es ihm, ein angemessenes Verhaltensrepertoire zu implementieren, wodurch eine Verschiebung der Umwelteinflüsse so erfolgt, dass sie durch das System bewältigt werden können. Oder die Systemstruktur ist von vornherein so konzipiert, dass das System gegen Umwelteinflüsse robust ist. 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:** Prinzipiell ist trotz intensiver Analysen der Einsatzbedingungen zu erwarten, dass die

Umwelteinwirkungen vor allem zeitvariant und damit unsicher sind. Die Systeme gilt es nun so zu gestalten, dass sie von unvorhersehbaren Änderungen der Umwelt unabhängig sind. Diese 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), können aber auch durch Veränderungen der Umwelt hervorgerufen werden. Geeignete Diagnoseverfahren bieten einen ersten Ansatzpunkt, derartige Probleme zu erkennen und entsprechend zu reagieren. 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:** Treten Bedrohungen für das System wiederholt auf, wird eine Strategie erforderlich, die auf das System derart einwirkt, dass es mit den Bedrohungen zurecht kommt. Die Wandlungsfähigkeit resultiert entweder aus der Veränderung der Verhaltensfunktion oder aber über aus der Veränderung der Zustandsfunktion im System. Die Zustandsfunktion gibt Auskunft über die Struktur und bestimmt die Identität des Systems. Auch technische Systeme mit kognitiven Fähigkeiten werden ihre Identität beibehalten. 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 geprägt. 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 andere Partnersysteme beeinflusst, was eine Beachtung des Verhaltens anderer Systeme erforderlich macht. Dies muss über die normale Auswertung von Umgebungsvariablen hinaus gehen, wobei es gilt, das Systeminteresse zu beachten. Dafür stehen eine Reihe von Strategien 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.

### 3.3 Ansätze für die Konstruktive Gestaltung kognitiver technischer Systeme

Kognitive Fähigkeiten resultieren innerhalb eines Systems nicht aus den Einzelkomponenten, sie entstehen erst durch ein effektives Zusammenwirken von Teilsystemen und Komponenten. Damit lassen sich kognitive Fähigkeiten nicht allein aus der Auslegung bzw. Integration einer leistungsfähigen Informationsverarbeitung ableiten, auch wenn diese sicherlich eine Schlüsselfunktion für kognitive Fähigkeiten einnimmt. Wird aber die Informationsverarbeitung nicht effizient und ausreichend mit Daten durch das technische System unterstützt oder ist die Aktorik nicht an gewünschte Handlungsalternativen angepasst, kann die Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung nicht genutzt werden. Kognitive Fähigkeiten resultieren also erst aus dem Zusammenspiel der Teilkomponenten bzw. hier auch dem effizienten Zusammenarbeiten zwischen den Domänen.

Die Systemarchitektur muss sowohl Fragestellungen der Hierarchisierung (vertikale Gliederung) als auch der Modularisierung (horizontale Gliederung) berücksichtigen. In jedem Fall sind komplexe Kopplungen sehr unterschiedlicher Regelstrukturen und Planungsalgorithmen zu erwarten. Einfache Reiz-Reaktions-Mechanismen sind über einfache Regelkreise bearbeitbar. Bereits einfache Konditionierungen aber führen letztlich dazu, dass eine Kopplung und Filterung mehrerer Sensordaten erforderlich wird. Entsprechend ist auch die aktorische Komponente zu überdenken. Resultierende Handlungen können parallel oder seriell ablaufen, sie erfordern dann u.U. kinematische Kontrollen hinsichtlich möglicher Kontakte oder Überschneidungen. Die Festlegung der Grundstruktur bildet wiederum ein Maß dafür was das technische System kann und darf. Eine Modularisierung bringt zudem Fragestellungen auf, wie die verteilten informationsverarbeitenden Komponenten zu koppeln sind.

In jedem Falle sind die Ziele und die Fähigkeiten, die vom kognitiven technischen System erwartet werden, die Basis für die Systemauslegung. Charakteristische Kriterien können zwar aus den Leitwerten abgeleitet werden, trotzdem gewinnt die Phase der Anforderungserarbeitung einen deutlich höheren Stellenwert als in klassischen Entwicklungsaufgaben.

#### **4. ZUSAMMENFASSUNG**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kognitive Fähigkeiten eines technischen Systems natürlich sehr stark durch die Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung geprägt ist. Letztlich muss aber das technische System in seiner gesamten Komplexität berücksichtigt werden, da eine Mißachtung der Grundstruktur und der Aktorik dazu führt, dass die Funktionalität nicht gewährleistet werden kann.

Um kognitive Fähigkeiten in ein technisches System zu entwickeln müssen zunächst grundlegende

Fragestellungen zu den Begriffen als solches aber auch zur Systemarchitektur geklärt werden. Nur auf Basis solcher Überlegungen lassen sich Ansätze zur effektiven Produktentwicklung ableiten. Die hier vorgestellten Ansatzpunkte erheben dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit sondern sind als ein Anfang zu betrachten, der noch weiterer Detaillierungen bedarf.

#### **Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] Strube, G.: Kognition. In G. Strube et al. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft, Verlag Klett-Cotta, 1996.
- [2] Newell, A.; Simon, H. A.: Computer science as empirical enquiry: Symbols and search. In: Communications of the ACM, Nr. 19, S. 113-126, 1976.
- [3] von Goldammer, E.; Kaehr, R.: Lernen in Maschinen und lebenden Systemen. In: Design und Elektronik, S.146-151, März 1989.
- [4] VDI 2206: Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Verein Deutscher Ingenieur; Beuth-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [5] diPrimio, F.: Robotererkennung, GMD-Report, Nr. 16, ISSN 1435 2702, Bad Augustin, 1998.
- [6] Shannon, C. E.; Warren W.: The Mathematical Theory of Communication, University of Illinois Press, 1963.
- [7] Frank, U.; Giese, H. et al: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus-Definition und Konzepte. Heins-Nixdorf-Institut Paderborn, 2004.
- [8] Haberfellner, F.; Daenzer, W.F.: Systemsengineering – Methoden und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, 1999.
- [9] Bossel, H. : Modellbildung und Simulation – Konzepte, Verfahren, und Modelle. Verlag Vieweg, 1994.
- [10] Knoll, A.; Christaller, T.: Selbstrepräsentation, Selbstwahrnehmung und Verhaltenssteuerung von Robotern. In: Selbstrepräsentation in Natur und Kultur / Sandkühler, Hans Jörg[Hrsg.] (Philosophie und Geschichte der Wissenschaften : Studien und Quellen), S. 109 – 132, 2000.

#### **Autorenangaben:**

Dr.-Ing. Kristin Paetzold

cand. Ing. Julia Stuppy

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstr. 9

91058 Erlangen

Tel.: 09131/85 23222

Fax: 09131/85 23223

E-mail: [paetzold, stuppy@mfk.uni-erlangen.de](mailto:paetzold, stuppy@mfk.uni-erlangen.de)