



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Alexander Keller, Hansgeorg Binz

**Definition und Abgrenzung hybrider,
intelligenter Konstruktionselemente**

Bericht Nr. 597

Definition und Abgrenzung hybrider, intelligenter Konstruktionselemente

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Keller, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Dieser Bericht wurde im Forschungsvorhaben
„Systematische Entwicklung hybrider,
intelligenter Konstruktionselemente und Systeme“
in der Forschergruppe „Hybride intelligente Konstruktionselemente (HIKE)“
(DFG FOR 981 TP A1, Bi 746/5-1) erarbeitet.

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2011

IKTD Bericht Nr. 597

ISBN-13: 978-3-922823-79-7

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	V
1 Definition und Abgrenzung hybrider, intelligenter Konstruktionselemente	1
1.1 Adaptronische Systeme	9
1.2 Intelligenz.....	17
1.3 Hybridität.....	19
1.4 Energy harvesting.....	20
1.5 Ergebnis der Abgrenzung von HIKE	21
1.6 Definition hybrider, intelligenter Konstruktionselemente	22
2 Literatur	24

1 Definition und Abgrenzung hybrider, intelligenter Konstruktionselemente

Die Ingenieurwissenschaften verstehen und beschreiben Objekte, Zusammenhänge oder Sachverhalte als technische Systeme unterschiedlicher Komplexität (vgl. EDER 2008, S. 40 ff., ROPOHL 1999, S. 70 ff.). Je nach Disziplin, Objekt und/oder Zielsetzung eignen sich verschiedene systemtechnische Betrachtungsweisen. Hierzu gehört der *Regelkreis*, mit dessen Hilfe auch mechatronische und adaptronische Systemen regelmäßig beschrieben werden. Im Folgenden sollen ausgehend vom Regelkreis mechatronische und adaptronische Systeme sowie hybride, intelligente Konstruktionselemente (HIKE) abgegrenzt werden.

Ein Regelkreis steht über seine Systemgrenzen hinweg mit der Umwelt und deren Einflüssen in wechselseitigem Kontakt. Er besteht aus dem Grundsystem (z. B. mechanische Struktur, Regelstrecke), Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung (Regelung). Die in Bild 1.1 dargestellte Grundstruktur eines mechatronischen Systems (VDI 2206, S. 14, Bild 2-2) ist somit allgemeingültig für ingenieurtechnische Regelkreise. Ein Regelkreis besteht innerhalb einer gegebenen Systemgrenze aus dem Grundsystem, Aktoren, Sensoren sowie einer Informationsverarbeitung. Diese notwendigen Elemente sind durch Informations-, Energie- und Stoffflüsse miteinander verbunden. Darüberhinaus ist eine Energie- oder Leistungsversorgung erforderlich. Dieses System kann optional um eine außerhalb der Systemgrenze liegende Informationsverarbeitung, die über ein Kommunikationssystem mit der internen Informationsverarbeitung verbunden wird, den Menschen, der mit ihr über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle interagiert, und eine Systemumgebung ergänzt werden, die auf die Sensoren einwirkt.

Abweichend von diesem Verständnis des ingenieurtechnischen Systems als geschlossener Regelkreis können im Speziellen Elemente wegfallen (Vereinfachung des Regelkreises zum Beispiel durch Wegfall der Rückführung) oder hinzukommen (beispielsweise durch verschachtelte (kaskadierte) Regelkreise oder weitere Signalarückführungen).

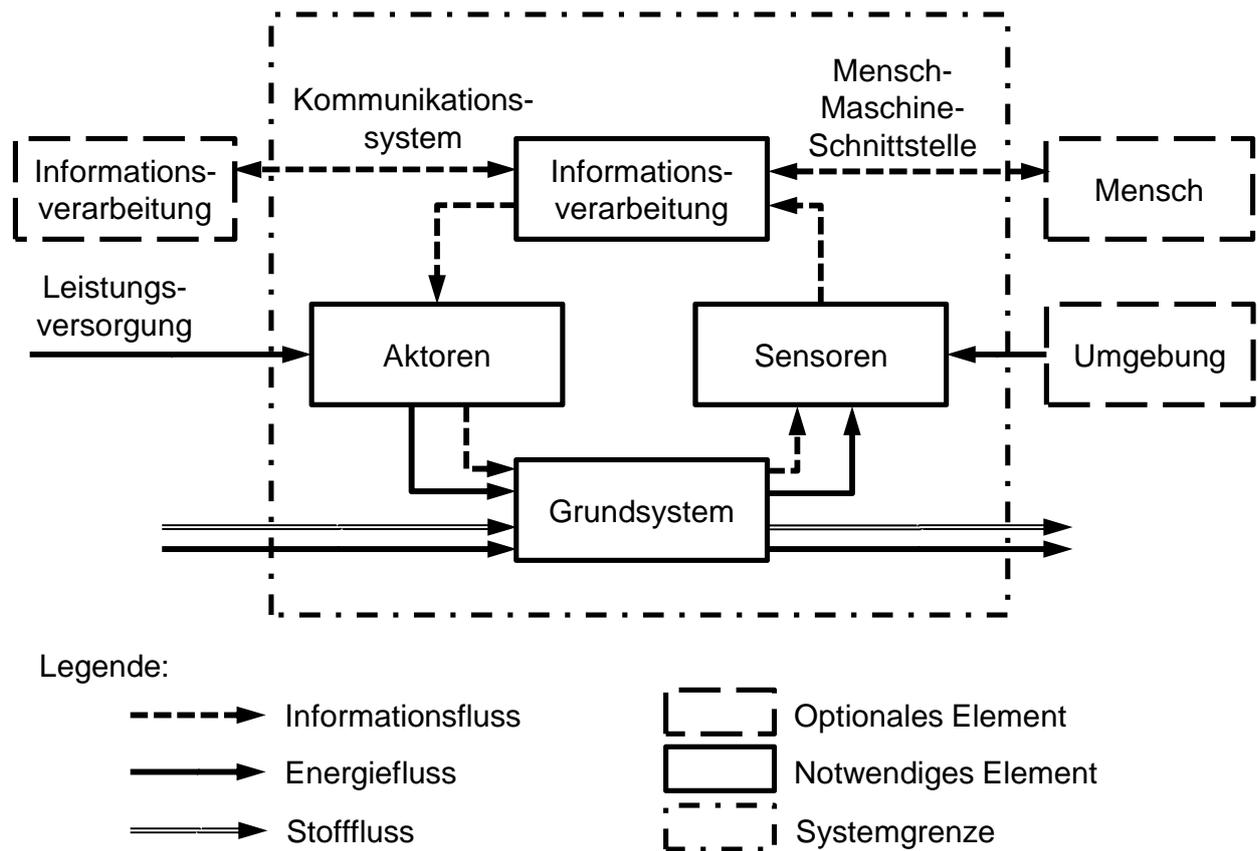
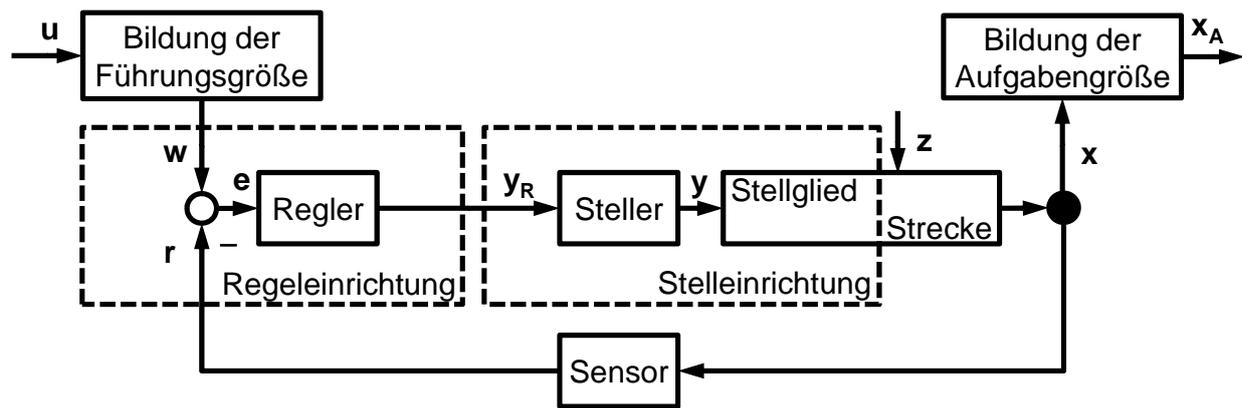


Bild 1.1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems (nach VDI 2206, S. 14, Bild 2-2)

Das mechatronische System wird in dieser Form durch die abstrakten Klassen von Konstruktionselementen charakterisiert, nämlich Informationsverarbeitung, Aktoren, Sensoren, Grundsystem und Leistungsversorgung (sowie gegebenenfalls Kommunikationssysteme und Mensch-Maschine-Schnittstellen). Diese Sichtweise ist insofern konstruktionstechnisch geprägt. Der Vergleich zur klassischen Darstellung eines elementaren Regelkreises als Blockschaltbild (Bild 1.2) ermöglicht es, die Elemente des mechatronischen Systems den Elementen und Größen des Regelkreises zuzuordnen: Dem Regelkreis wird eine unabhängige Eingangsgröße u vorgegeben, um eine gewünschte Aufgabengröße x_A als Wirkung zu erzielen. Das Grundsystem ist Teil der Strecke, auf die äußere Störgrößen z einwirken. Die Regelgröße x wird durch einen Sensor erfasst, der die Rückführgröße r weitergibt. Die Regeleinrichtung verknüpft die Regelgröße mit der Führungsgröße w zur Regeldifferenz e . Der Steller bildet aus der Reglerausgangsgröße y_R die zur Aussteuerung der Stellglieder (Aktoren) notwendige Stellgröße y . Steller und Stellglied bilden die Stelleinrichtung.



Legende: u: unabhängige Einganggröße
 w: Führungsgröße
 e: Regeldifferenz
 y_R : Reglerausgangsgröße
 y: Stellgröße
 z: Störgröße
 x: Regelgröße
 x_A : Aufgabengröße
 r: Rückführgröße

Bild 1.2: Elementarer Regelkreis dargestellt als Blockschaltbild (nach DIN 19226-4, S. 4, Bild 3)

Wie in Tabelle 1.1 dargestellt, entsprechen sich der elementare Regelkreis und die Grundstruktur eines mechatronischen Systems auf Ebene der einzelnen Elemente.

Es gibt unterschiedliche Sichtweisen auf solche Systeme. Hierzu gehören die Mechatronik und die Adaptronik. Beiden liegt eine systemtheoretische Sichtweise zu Grunde. Anhand beispielhafter Definitionen von Mechatronik und Adaptronik werden im Folgenden HIKE eingeordnet.

Gausemeier et al. (2009, S. 59) unterscheiden zwei Klassen mechatronischer Systeme: „Klasse 1 umfasst mechatronische Systeme, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen. Ziel ist eine hohe Funktionsdichte auf kleinem Bauraum. Das wesentliche Potential liegt in der Miniaturisierung, den geringen Herstellkosten sowie der hohen Zuverlässigkeit. Die Aufbau- und Verbindungstechnik steht hier im Vordergrund. Besonderes Merkmal sind die starken Abhängigkeiten zwischen dem Produkt und dem zugehörigen Produktionssystem. Dies führt zur Notwendigkeit, das Produkt und das Produktionssystem von Beginn an integrativ zu entwickeln.“

HIKE ergänzen Bauteile, die bisher nur ein Element eines Regelkreises darstellten oder beinhalteten, um weitere Elemente. Das Ziel dabei ist die funktionale Integration. Ein herkömmlicher Hebel ist eine mechanische Struktur. Im HIKE-Hebel werden Gefügeumwandlungen als unmittelbares aktorisches Element genutzt. Eigenständige Sensoren werden mittelbar, räumlich untrennbar integriert. Aufbau-, Verbindungs- und Produktionstechnik sind auch für HIKE relevant.

Elemente und Größen des elementaren Regelkreises	Zugeordnete Elemente des mechatronischen Systems
Unabhängige Eingangsgröße u	<ul style="list-style-type: none"> • Signalfluss zur internen Informationsverarbeitung von der externen Informationsverarbeitung und vom Menschen
Bildung der Führungsgröße w	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung
Führungsgröße w	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsfluss zwischen der internen Informationsverarbeitung und den Aktoren
(Bestimmung der) Regeldifferenz e	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung
Regeleinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung
Regler	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung
Reglerausgangsgröße y_R	<ul style="list-style-type: none"> • Signalverarbeitung innerhalb der systeminternen Informationsverarbeitung ODER • Informationsfluss zwischen systeminterner Informationsverarbeitung und Aktoren
Stelleinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung • Aktoren
Steller	<ul style="list-style-type: none"> • Systeminterne Informationsverarbeitung ODER • Aktoren
Stellgröße y	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsfluss zwischen systeminterner Informationsverarbeitung ODER • Informations- und Energiefluss zwischen Aktoren und Grundsystem
Stellglied	<ul style="list-style-type: none"> • Aktoren
Störgröße z	<ul style="list-style-type: none"> • Energie-, Stoff- und Signalflüsse in das Grundsystem
Strecke	<ul style="list-style-type: none"> • Aktoren • Grundsystem • Informations- und Energiefluss zwischen Aktoren und Grundsystem
Regelgröße x	<ul style="list-style-type: none"> • Informations- und Energiefluss aus dem Grundsystem in die Sensoren
Bildung der Aufgabengröße x_A	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsystem
Aufgabengröße x_A	<ul style="list-style-type: none"> • Energie- und Stofffluss aus dem Grundsystem in die Umwelt
Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren
Rückführgröße r	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsfluss von den Sensoren zur systeminternen Informationsverarbeitung

Tabelle 1.1: Zuordnung der Elemente und Größen des elementaren Regelkreises zu den Elementen des mechatronischen Systems

Die räumliche Integration ist Folge des Ziels der funktionalen Integration. Die räumliche Integration der funktionalen Systembestandteile im Sinne einer Miniaturisierung oder

Verringerung der Herstellkosten wird konzeptionell zunächst nicht ausgeschlossen, steht jedoch bei HIKE (in der ersten Phase der Forschergruppe DFG FOR 981) nicht primär im Vordergrund. Diese Aspekte werden, nachdem die funktionale Integration verwirklicht ist, als eigenständige Ziele in den Vordergrund treten, um HIKE zu verbessern und weitere Potentiale zu erschliessen.

Die zweite Klasse mechatronischer Systeme nach Gausemeier (2009, S. 59) besteht aus „Mehrkörpersystemen mit kontrolliertem Bewegungsverhalten. Hier steht die Regelungstechnik im Vordergrund. Sensoren erfassen Informationen über das System und seine Umgebung. Die Informationen werden mittels Mikroprozessoren verarbeitet und anschließend an Aktoren weiter geleitet. Die Aktoren lösen geeignete Reaktionen zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens aus“.

HIKE integrieren mehrere Bestandteile des Regelkreises, um grundsätzlich Eigenschaften entweder des HIKE oder des übergeordneten Systems anpassen zu können. Die Anpassungsfähigkeit schließt das Bewegungsverhalten nicht aus, ist aber nicht darauf beschränkt.

Die Richtlinie VDI 2206 fasst mechatronische Systeme als technische Systeme auf und definiert (VDI 2206, S. 10-13) sie, vergleichbar mit der Definition von Gausemeier et al., über die einerseits funktionale und andererseits räumliche Integration der Bestandteile eines Regelkreises, das heißt Sensoren, Aktoren, Informationsverarbeitung und Grundsystem. Das Verhalten solcher Systeme soll verbessert werden, indem mittels Sensoren Informationen sowohl über die Umgebung als auch das System erfasst, verarbeitet und durch Aktoren in eine „optimale“ Anpassung des Systems umgesetzt werden. Entsprechend dieses Konzepts der Anpassung weist die VDI 2206 auf die Überschneidungen zwischen Mechatronik, Adaptronik und weiterer Fachgebiete hin. Dies gilt auch für die Zuordnung eines technischen Systems zu einer Klasse der einer Disziplin zugeordneten Systeme.

Wie bereits oben dargestellt, definieren sich HIKE auch über die Integration konstituierender Elemente, wobei die räumliche Integration aus der funktionalen Integration folgt. Die räumliche Integration ist insofern kein eigenständiges Ziel. Als räumliche Integration wird in der Literatur überwiegend Miniaturisierung verstanden, nicht die Zusammenführung von Funktionen in ein einziges (nicht zerlegbares) Element (vgl. die gegensätzlichen Konzepte funktionsbezogener Integral- oder Differentialbauweisen).

Die Definition des mechatronischen Systems von Gausemeier et al. und die der VDI 2206 sind ähnlich: Grundlage ist der übergeordnete Regelkreis (System), dessen funk-

tionale Elemente (Systemelemente) Sensor, Aktor, Regelung/Steuerung und Strecke sowie die Anpassung oder Reaktion des Systems auf äußere Einflüsse. Das mechatronische System wird insofern gegenüber dem technischen System im Allgemeinen nicht abgegrenzt. Das Konzept der Mechatronik oder Entwicklung mechatronischer Systeme im Sinne einer Vorgehensweise kann jedoch durch die eigenständigen Ansätze für das koordinierte, interdisziplinäre Entwickeln solcher Systeme gegenüber anderen, allgemeineren Entwicklungsansätzen abgegrenzt werden.

HIKE qualifizieren sich nicht zwingend als mechatronische Systeme, da die Integration eines vollständigen Regelkreises kein Definitionsmerkmal von HIKE ist. Das heißt, ein HIKE kann ein mechatronisches System darstellen, muss es aber nicht. Aus Prozesssicht ist daher der Ansatz der Mechatronik zur Entwicklungskoordination für HIKE grundlegend, aber alleine nicht ausreichend.

Der Entwicklungsansatz der Mechatronik beruht darauf, klassische Entwicklungsprozesse verschiedener Disziplinen, insbesondere der Elektrotechnik, des Maschinenbaus, der Regelungstechnik sowie der Informationsverarbeitung zusammenzuführen. Die ursprünglichen Prozesse werden dabei eher aufeinander abgestimmt und zusammengefasst als grundlegend geändert. Dies ist auch dadurch bedingt, dass die Mechatronik aus Bauteilsicht davon ausgeht, klassische Sensoren, Aktoren und Strukturen zusammenzuführen, die mit den disziplinen-eigenen, herkömmlichen Vorgehensweisen ausreichend beherrscht werden. Erst mit dem Einsatz neuartiger Elemente (vgl. die Überschneidungen der Mechatronik mit Bereichen wie zum Beispiel der Mikrosystemtechnik oder der Adaptronik) wird auch eine Anpassung der individuellen sowie koordinierten Vorgehensweisen erforderlich.

HIKE setzen neuartige Elemente ein. Sie basieren auf neuen Technologien, die mit klassischen Vorgehensweisen noch nicht beherrscht werden. Beispiele sind Materialien für Thixoschmiedeprozesse, elektroluminisente Beschichtungen oder Falzwabenkerne. Aus konstruktionstheoretischer Sicht ist das Verhalten eines Produkts von seinen Eigenschaften abhängig. Beispiele sind das mechanische Verhalten unter äußeren Belastungen, thermisches sowie aus regelungstechnischer Sicht das statische oder dynamische Verhalten. Diese Eigenschaften technischer Systeme und ihrer Elemente werden in Prozessen festgelegt. Hierzu gehören insbesondere die Prozesse der frühen Phasen des Produktlebenszyklus, wie zum Beispiel die Produktplanung und -entstehung, aber auch die Phasen der Produktnutzung. Im Konstruktionsprozess, auf dem der Schwerpunkt der Betrachtungen in diesem Abschnitt liegt, werden Merkmale und Merkmals-

werte so kombiniert, dass die gewünschten Systemeigenschaften möglichst gut erreicht werden und unerwünschte Systemeigenschaften weitgehend minimiert werden. Das heißt, die unmittelbaren Ergebnisse im Konstruktionsprozess sind einzelne Merkmal-Wert-Kombinationen und mittelbares Ergebnis hieraus ist das aus diesen Kombinationen aggregierte Verhalten des Systems (vgl. WEBER 2007, S. 87-91).

Weber zeigt in Analogie zu einem Regelkreis auf (WEBER 2007, S. 92-93; siehe Bild 1.3), wie durch synthetisierendes Vorgehen, dargestellt durch die synthetische Relation R_j^{-1} , geforderte Eigenschaften PR_j mit Merkmalen C_i verknüpft werden. In der rückführenden, analytischen Schleife des „Regelkreises“ werden die Merkmale C_i durch die analytischen Relationen R_j mit den tatsächlichen Eigenschaften P_j verbunden. Die tatsächlichen Eigenschaften P_j werden mit den geforderten Eigenschaften PR_j verglichen, und die Differenz ΔP_j wird beurteilt (Evaluation). Sowohl die synthetischen als auch die analytischen Relationen R_j^{-1} und R_j werden durch äußere Randbedingungen EC_j beeinflusst. EC_j geben zum Beispiel vor, dass nur bestimmte Relationen zwischen PR_j und C_i zulässig oder sinnvoll sind.

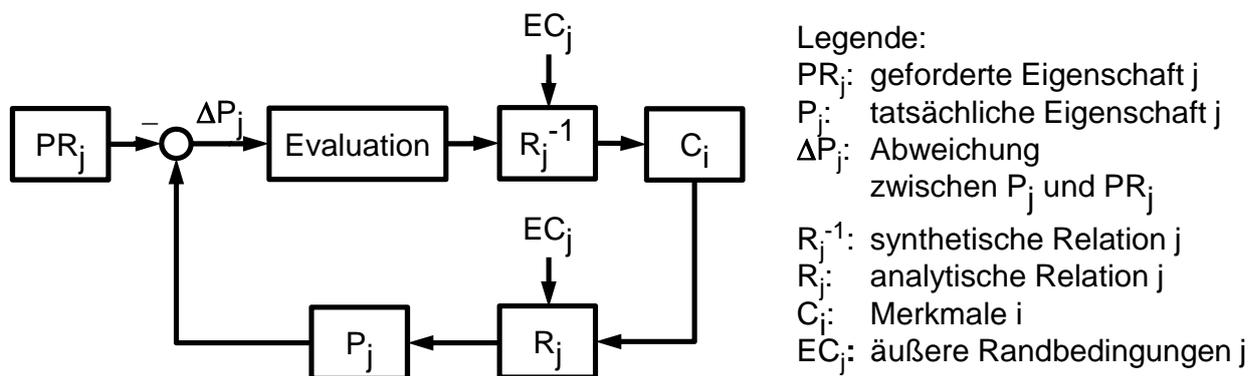


Bild 1.3: Abstrahierte Darstellung der Eigenschaftsfestlegung als Produktentstehungsprozess in Form eines geschlossenen Regelkreises (nach WEBER 2007, S. 85)

In der bildlichen Darstellung nach Weber (Bild 1.3) steht ein auf bestimmte Teileigenschaften eines System hin ausgerichtetes Konstruktionsvorgehen (Design-for-X oder DfX; z. B. festigkeitsgerechtes, kostengerechtes, montagegerechtes Konstruieren) orthogonal zum Festlegen der Merkmal-Wert-Kombinationen und wird durch die EC_j dargestellt. Anstelle des eigentlichen Gesamtsystems wird zunächst auf ein X-gerechtes Ersatz- oder Teilsystem hin konstruiert. Das Gesamtsystem integriert schließlich die teilgerechten Ersatzsysteme. Dies kann auch so interpretiert werden, dass DfX-orientiertes Konstruieren als Filter zum Sortieren geeigneter und ungeeigneter Merkmal-

Wert-Kombinationen dient. In diesem Verständnis stellen die äußeren Randbedingungen EC_j das tatsächliche Verhalten P_x eines X-gerechten Ersatz- oder Teilsystems dar, das über die Relationen R_j oder R_j^{-1} das eigentliche Gesamtsystem beeinflusst (nach WEBER 2007, S. 97 ff.). Die Kombinationen, die sich einerseits aus einem analytischen oder synthetischen Vorgehen ergeben und andererseits aus der Betrachtung des Gesamtsystems („Produkt“) oder dem Teilsystem („X-System“) folgen, sind als Portfolio in Bild 1.4 dargestellt (nach WEBER 2007, S. 97).

Eine Konstruktionsstrategie beinhaltet ein zielgerichtetes Vorgehen, solche Kombinationen zu verwirklichen. In der Mechatronikentwicklung nach VDI 2206 werden die Systemmerkmale implizit vorab zwischen den beteiligten Disziplinen aufgeteilt, in getrennten Konstruktionsprozessen werden Merkmal-Wert-Kombinationen gebildet und das resultierende Teilverhalten im Gesamtsystem zum Systemverhalten zusammengeführt und schrittweise in Schleifen mit dem geforderten Verhalten abgeglichen. Aus Sicht des von Weber formulierten Modells bedeutet dies, dass zunächst disziplinergerechte Teilkonstruktionen vorgenommen werden und dann die Gesamtsystemgerechtigkeit überprüft wird. Dabei ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Merkmale, Werte und Eigenschaften nicht immer unabhängig voneinander ausgewählt werden können. Die gegenseitige Beeinflussung kann wechselseitig unterstützend, neutral oder zielkonfliktbehaftet sein.

Eine überwiegend nach Disziplinen getrennte Vorgehensweise ist für das Konstruieren von HIKE nicht praktikabel. In HIKE wird eine räumlich nicht trennbare Funktionsintegration vorgenommen. Das bedeutet, dass sowohl Überprüfungen auf Teilaspekt- als auch auf Gesamtsystemgerechtigkeit kontinuierlich während des Konstruierens von HIKE erfolgen müssen. Sie dürfen nicht erst nachgelagert bei der Zusammenführung von disziplingeleiteten Teilkonzepten erfolgen (vgl. zum Konstruieren in der Adaptronik: JENDRITZA 1998, S. 8). Mit anderen Worten ist ein HIKE-gerechtes („Design-for-HIKE“) Konstruieren erforderlich. Es ist grundsätzlich auch für das Konstruieren mit HIKE relevant. Da dies jedoch auch auf räumlich trennbare Funktionen oder Funktionsträger bezogen sein kann, ist dabei eine nach Disziplin getrennte Vorgehensweise zwischen diskreten Koordinationszeitpunkten grundsätzlich vorstellbar.

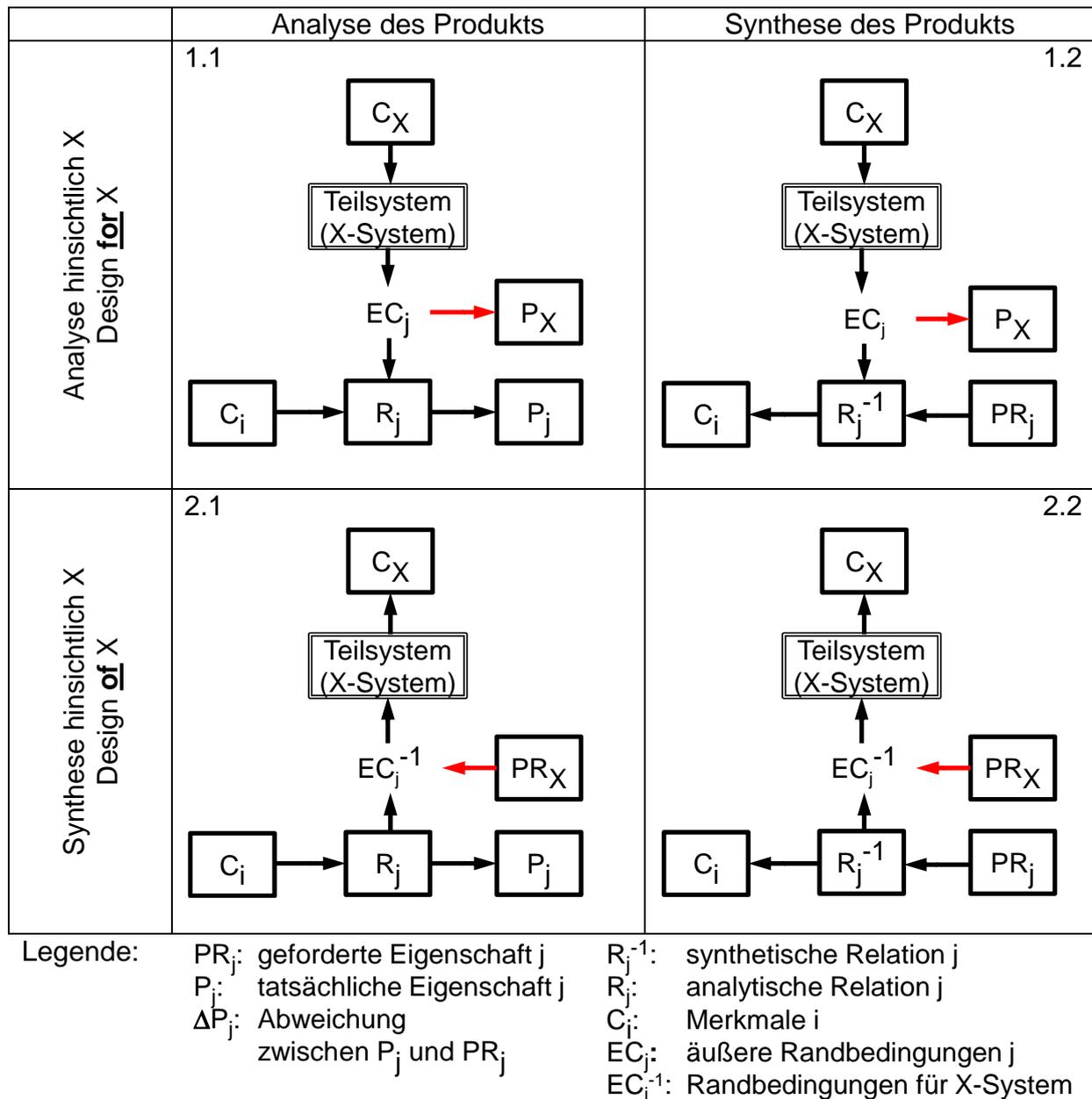


Bild 1.4: Zusammenhang zwischen Merkmalen, Eigenschaften und Relationen im Rahmen der Analyse und Synthese eines Produkts und seiner Teilsysteme (nach WEBER 2007, S. 97 ff.)

1.1 Adaptronische Systeme

Nach Neumann (2007, S. 1) ist ein adaptronisches System ein Regelkreis, der sein Systemverhalten bezogen auf äußere Einwirkungen selbstständig anpasst. Darüberhinaus enthält er multifunktionale Bauteile, die mehr als eine Elementarfunktion eines Regelkreises erfüllen. Ergänzend hierzu definiert Neumann (NEUMANN 1995, S. 9-12 und NEUMANN 2007, S. 3) ein adaptronisches System hierarchisch absteigend über dessen Bestandteile intelligente Struktur, multifunktionale Elemente und Werkstoffe mit interes-

santen Eigenschaften. Eine Struktur ist gemäß dieser Definition intelligent, wenn sie, wie beim mechatronischen System, alle funktionalen Elemente eines Regelkreises enthält und zugleich wenigstens ein bauliches Element multifunktional ist. Ein bauliches Element ist multifunktional, wenn es mehr als ein funktionales Element enthält. Funktionale Elemente werden in zwei Gruppen eingeteilt: Die Gruppe der Regelkreiselemente, bestehend aus Sensor, Aktor und Regelung, sowie die Gruppe der „sonstigen interessanten Material- oder Werkstoffeigenschaften“ (zum Beispiel tragende, formgebende oder stützende Eigenschaften). Aus konstruktionstheoretischer Sicht ist der Übergang von Eigenschaften über Elemente und Strukturen zum System schlüssig.

Diese Definition wird in Bild 1.5 am Beispiel einer photochromen Brille (adaptronisches System, Ebene 4) erläutert. Diese enthält als Intelligente Struktur (Ebene 3) ein photochromes Glas, in dem als alleinigem baulichem, funktionalem Element (Ebene 2) Sensor, Aktor, Regelung und Trägermaterial vereint sind. Die Eigenschaften werden durch den photochromen Werkstoff verwirklicht (Ebene 1).

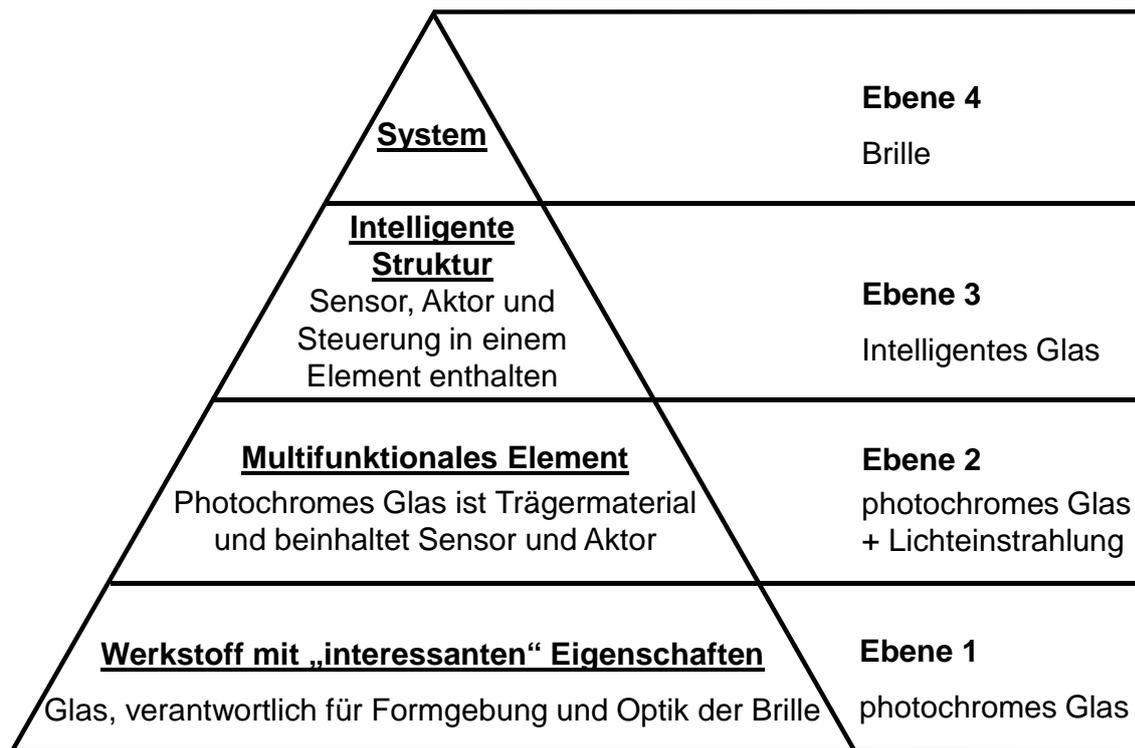


Bild 1.5: Ebenen eines adaptronischen Systems, erläutert am Beispiel einer photochromen Brille (nach NEUMANN 1995, S. 18 Abb. 3)

Eine mechanische Struktur oder, aus regelungstechnischer Sicht, eine Strecke treten erst auf der Ebene der intelligenten Struktur, nicht auf Ebene der Elemente, auf. Das ist nicht schlüssig, da ein Regelkreis respektive einer intelligenten Struktur ohne Strecke wenig Sinn ergibt. Es erscheint deswegen sinnvoll, ein Element auch dann als multi-

funktional zu betrachten, wenn es eine Strecke (mechanische Struktur) mit einem der anderen Regelkreiselemente oder intelligenten Werkstoffeigenschaften kombiniert (JENDRITZA 1998, S. 9; vgl. GAUL 2010, S. 21 O1).

Aus ingenieurwissenschaftlich, systemtechnischer Sicht legt dies zugleich nahe, die in Bild 1.5 abgebildete Pyramide von oben herab zu lesen (entgegen der von Neumann vorgeschlagenen Ebenennummerierung).

Mechatronische und adaptronische Systeme sind Untermengen der Obermenge allgemeiner technischer Systeme (ausgehend vom Regelkreis). Die Abgrenzung kann wie folgt hergeleitet werden: Ein technisches System entsprechend der Ebene 4 umfasst nur eine (potentielle) Regelstrecke oder eine mechanische Struktur. Um eine intelligente Struktur, also Sensor, Regler und Aktor, ergänzt, handelt es sich um ein mechatronisches System. Durch die Funktionsintegration (Ebene 2), zum Beispiel durch ein multifunktionales Element, und den Einsatz intelligenter Werkstoffe (Ebene 1) erfolgt der schrittweise Übergang vom mechatronischen zum adaptronischen System. Der Aspekt des selbstanpassenden Verhaltens des adaptronischen Systems wird hierbei nicht mehr explizit berücksichtigt. Diese stufenweise Erweiterung von passiven, mechanischen Strukturen zu anpassungsfähigen Systemen, indem einerseits Sensoren, Aktoren und Regler als Systemelemente hinzugefügt werden und andererseits eine funktionale und/oder räumliche Integration stattfindet, wird in Bild 1.6 zusammengefasst (eigene Darstellung nach Hanselka 1997, S. 3 und Schirmer 2006, S. 427 Bild 14-2). In der rechten Spalte werden die Eigenschaften und Zustände gemäß der Systemantwort dieser Systeme verallgemeinert für den jeweils ungünstigsten Fall angegeben.

Im Vergleich werden sowohl das adaptronische als auch das mechatronische System über die Existenz eines Regelkreises definiert. Sowohl adaptronische als auch mechatronische Systeme sind anpassungsfähig hinsichtlich äußerer oder innerer Einwirkungen. Dieser Aspekt eignet sich somit nicht zur Unterscheidung zwischen mechatronischen und adaptronischen Systemen. Im adaptronischen System werden, im Gegensatz zum mechatronischen System, wenigstens zwei funktionale Elemente des Regelkreises auf Material- oder Bauteilebene integriert. Das heißt aus systemtheoretischer Sicht, dass auf Ebene der Teilsysteme (Regler, Sensor, Aktor, Struktur) Systemgrenzen geändert und Teilsysteme dadurch vereint werden. Diesen Sachverhalt stellt Schirmer (SCHIRMER 2006, S. 427 Bild 14-21), wie in Bild 1.7 abgebildet, dar. Die passive mechanische Struktur des mechatronischen Systems wird im adaptronischen System durch

die bauliche Zusammenfassung von Struktur, Sensor und Aktor aktiviert. Der Regler bleibt in beiden Systemen eigenständig.

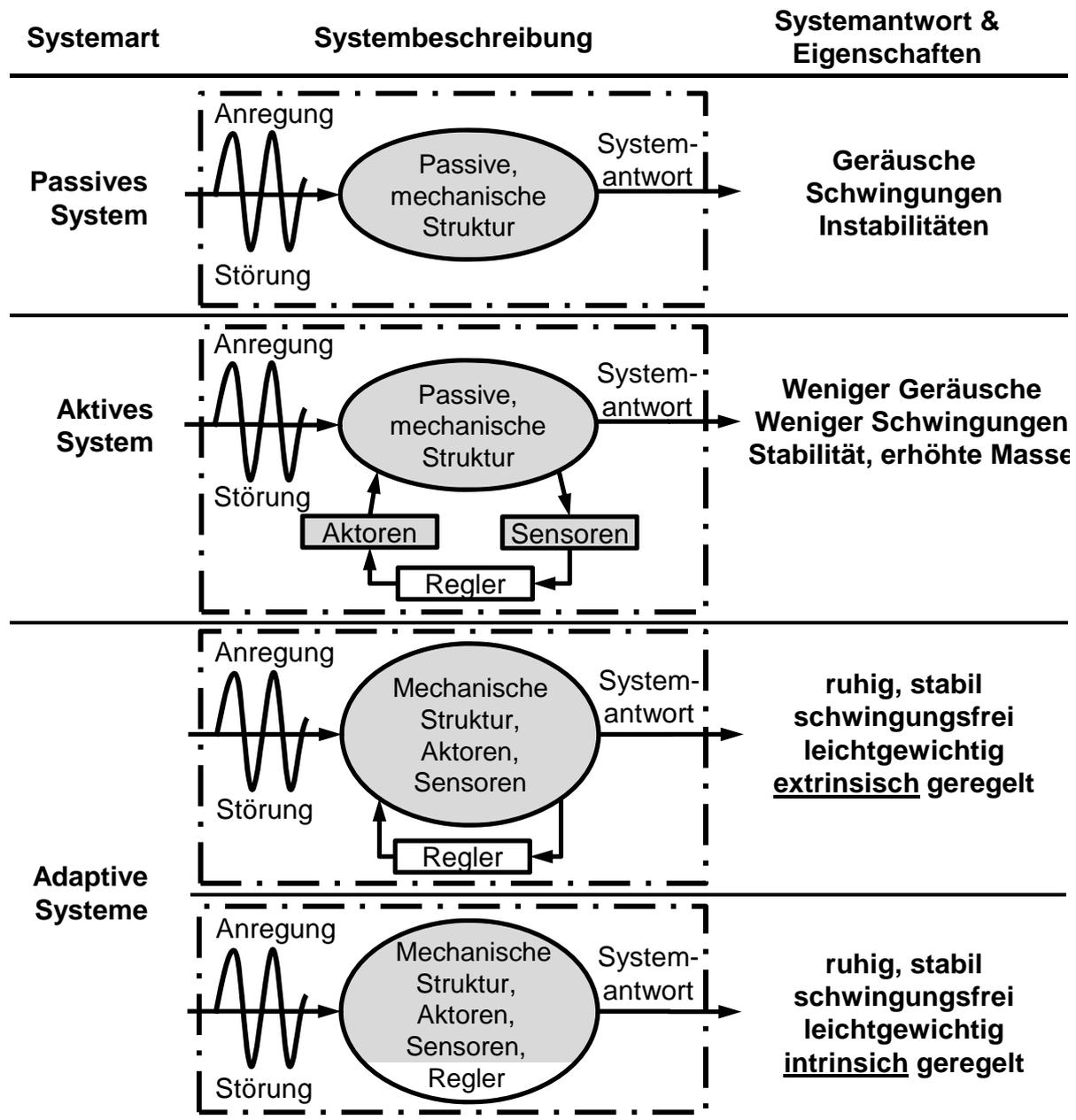


Bild 1.6: Unterscheidung verschiedener Arten mechanischer Tragstrukturen und zugehöriger Systeme (eigene Darstellung nach HANSELKA 1997, S. 3 und SCHIRMER 2006, S. 427 Bild 14-2)

Den unterschiedlichen Definitionen von Schirmer und Neumann folgend, können zwei wesentliche Unterschiede zwischen mechatronischen und adaptronischen Systemen angegeben werden: Erstens die räumliche und funktionelle Integration des Gesamtsystems im adaptronischen System, das heißt, dass Sensoren und/oder Aktoren in die mechanische Struktur (im Wesentlichen zerstörungsfrei nicht trennbar) eingebunden wer-

den, und zweitens der Einsatz von Werkstoffen mit interessanten Eigenschaften („smart materials“) in adaptronischen Systemen.

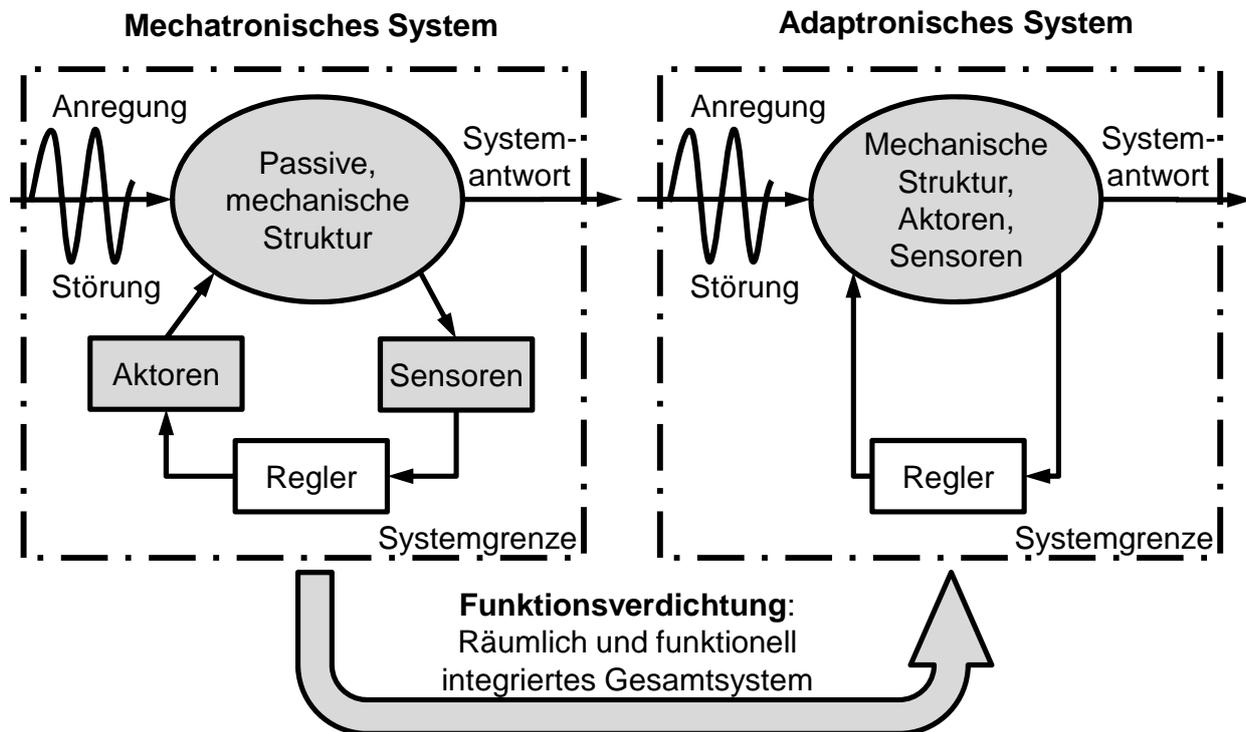


Bild 1.7: Unterschied zwischen mechatronischem und adaptronischem System (nach SCHIRMER 2006, S. 427 Bild 14-2)

Mechatronische und adaptronische Systeme setzen mit Sensoren, Regler, Aktoren und der mechanischen Grundstruktur unterschiedliche Elemente ein. Sie werden schwerpunktmäßig von verschiedenen fachlichen Disziplinen entwickelt, konstruiert und erforscht. Das zeigt sich auch in den Definitionen von Mechatronik (vgl. VDI 2206, S. 10 f.). Die Adatronik wird nicht über die beteiligten Disziplinen definiert. Es erscheint nicht sinnvoll, die mechatronischen und adaptronischen Systeme dadurch zu unterscheiden, welche Disziplinen zum Beispiel an ihrer Entwicklung beteiligt sind. Disziplinen entstehen einerseits aus aufbau- und ablauforganisatorischen Strukturen in industrieller und wissenschaftlicher Ausbildung, Forschung und Entwicklung. Andererseits zeigen gerade die Ansätze der Mechatronik und Adaptronik die Notwendigkeit auf, disziplinbezogene Grenzen zu überwinden, zu verschieben oder aufzulösen. Ob solche Grenzen bestehen oder nicht, hat jedoch keine unmittelbare Auswirkung auf die Eigenschaften der betrachteten technischen Systeme.

Bild 1.8 gibt einen Überblick, welche Werkstoffe mit interessanten Eigenschaften die funktionalen Dimensionen Sensor, Aktor oder Regler sowie deren mögliche Kombinati-

onen (Aktor + Regler; Sensor + Aktor; Sensor + Aktor + Regler) abdecken. Für eine eigenständige Reglerfunktion sowie die Kombinationen Sensor + Regler und Aktor + Regler wurden bisher in der Literatur keine Werkstoffe beschrieben. Diese Darstellung ist allgemeingültig, da sie die mechanische Struktur eines Systems, wie zum Beispiel in Bild 1.7 abgebildet, nicht berücksichtigt.

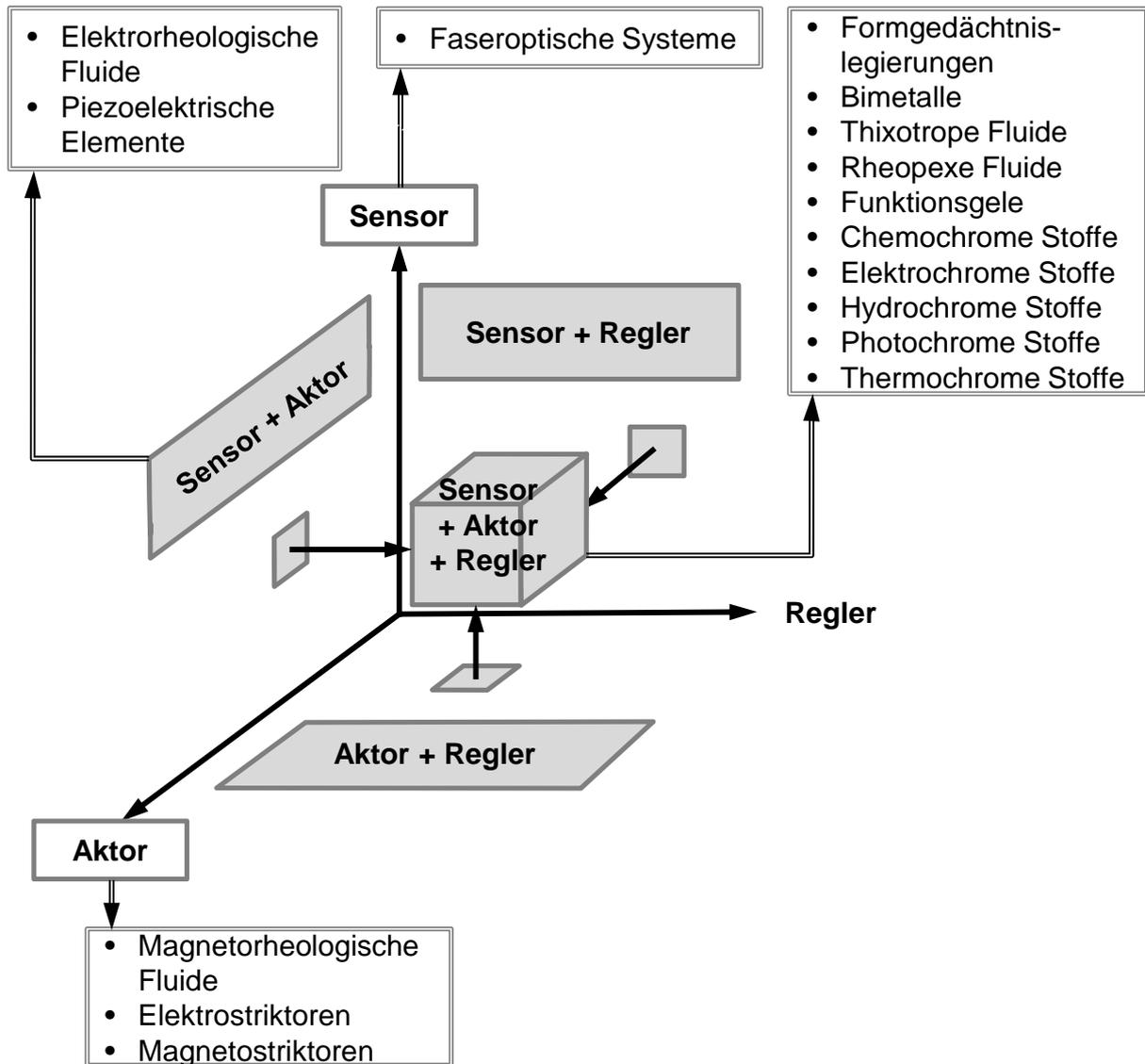


Bild 1.8: Überblick über Werkstoffe mit interessanten Eigenschaften, die Funktionen als Sensor, Aktor oder Regler sowie Kombinationen dieser Funktionen übernehmen können (Eigene Darstellung nach NEUMANN 1995, S. 21-28)

In Tabelle 1.2 werden die HIKE der Forschergruppe anhand der Definitionsbestandteile adaptronischer und mechatronischer Systeme in Anlehnung an Schirmer und Neumann klassifiziert und gegebenenfalls als mechatronisches oder adaptronisches System identifiziert. Vier Gruppen unterscheiden sich:

- 1.) Die Regelung, die in der FOR 981 durch ein eigenständiges, integrierendes Projekt vertreten ist, stellt naturgemäß ausschließlich einen Regler dar.
- 2.) Sandwich, Stab und Seil sind jeweils sowohl mechanische Struktur als auch Sensor und stellen somit zugleich ein multifunktionales Element dar.
- 3.) Der Hebel integriert mechanische Struktur, Sensor, Aktor und intelligenten Werkstoff. Er ist somit als multifunktionales Element einzuordnen. Gruppe 2 und 3 beinhalten jeweils Konstruktionselemente, deren Multifunktionalität oder funktionale Integration nicht zerstörungsfrei aufgelöst werden kann. Das Textil umfasst als mechanische Struktur das Garn, um das Drahtelemente umwickelt sind. Diese Drahtelemente übernehmen Sensor- und Anzeigefunktionen. Eine Anzeigefunktion wird in der Regel nicht als Aktorfunktion interpretiert (vgl. das nachfolgende Bild 1.10).
- 4.) Die Schale stellt ein Übersystem dar, das mehrere, zerstörungsfrei voneinander trennbare Untersysteme enthält, nämlich die der Gruppen 1 bis 3. Die Schale erfüllt alle definitorischen Merkmale eines adaptronischen Systems.

Tabelle 1.2 zeigt, dass die funktionale und räumliche Integration der HIKE mit Ausnahme der Regelung in jedem Fall mechanische Struktur und Sensor kombiniert. Die Regelung stellt ein eigenständiges HIKE dar. Sie wird im System Schale funktional, aber nicht räumlich integriert. Um die HIKE einzuordnen, kann Bild 1.8 abgewandelt werden, indem die Dimension „Regler“ durch die Dimension „Mechanische Struktur“ ersetzt wird (Bild 1.9).

Die diskutierten Definitionen und Erläuterungen mechatronischer und adaptronischer Systeme beziehen sich auf den Regelkreis und seine Elemente sowie deren funktionale und/oder räumliche Integration. Im Folgenden soll auf den Aspekt der Intelligenz solcher Systeme eingegangen werden.

Element	Definitionsbestandteile							Anzeige	Mechatronisches System	Adaptronisches System
	Mechanische Struktur	Sensor	Aktor	Regler	Werkstoff mit interessanten Eigenschaften	Multifunktionales Element (Funktionale Integration)	Intelligente Struktur			
Regelung				✓						
Sandwich	✓	✓				✓				
Stab	✓	✓				✓				
Seil	✓	✓				✓				
Textil	✓	✓			✓	✓		✓		
Hebel	✓	✓	✓		✓	✓				
Schale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓

Legende: ✓: Element enthält Definitionsbestandteil oder ist ein(e) {mechanische Struktur, Sensor, Aktor, Regler, Werkstoff mit interessanten Eigenschaften, multifunktionales Element, intelligente Struktur, Anzeige, mechatronisches System, adaptronisches System}.

Tabelle 1.2: Klassifizierung der HIKE anhand der Definitionsbestandteile adaptronischer und mechatronischer Systeme in Anlehnung an SCHIRMER und NEUMANN

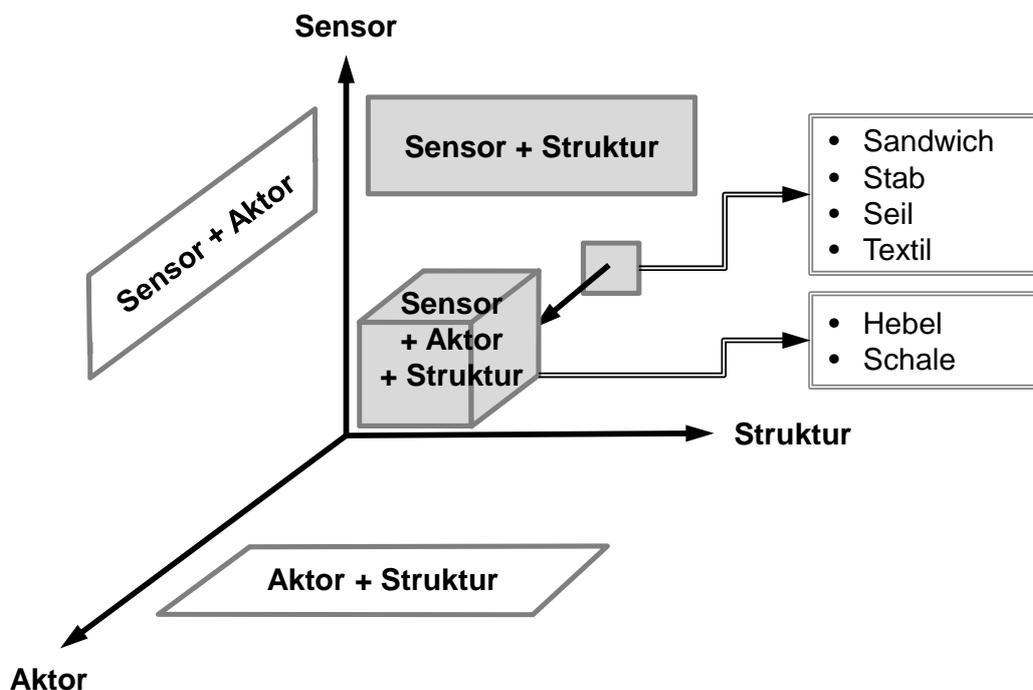


Bild 1.9: Überblick über die HIKE durch Zuordnung zu den funktionalen Dimensionen

1.2 Intelligenz

Das Attribut „intelligent“ wird benutzt, um bestimmte technische Systeme im Allgemeinen sowie mechatronische und adaptronischen Systeme und deren Elemente im Speziellen zu beschreiben. Es bezieht sich dabei auf deren Merkmale und Eigenschaften. Diesem System- und Elementverständnis liegt zu Grunde, dass sich biologische und technische Systeme entsprechen (vgl. Bild 1.10). Zustände und ihre Veränderung werden durch Sinnesorgane oder Sensoren wahrgenommen. Die resultierenden Signale werden übertragen und verarbeitet (Gehirn, Signalverarbeitung). Die Signalverarbeitung umfasst auch eine Handlungsstrategie im Sinne einer zielgerichteten Wenn-Dann-Aussage (Rückführung, um Ist-Soll-Abweichung und die Stellgrößen zu ermitteln), die ein eingehendes Signal mit einem ausgehenden Signal verknüpft. Das Handeln erfolgt im Sinne eines Anpassens, im Falle des technischen Systems durch Aktoren. Sofern die Handlungsstrategie anpassbar ist, ist Lernen möglich. Wenn Eigenschaften verändert werden können, liegt Adaptivität vor. Technische Systeme besitzen zudem eine optionale Anzeige.

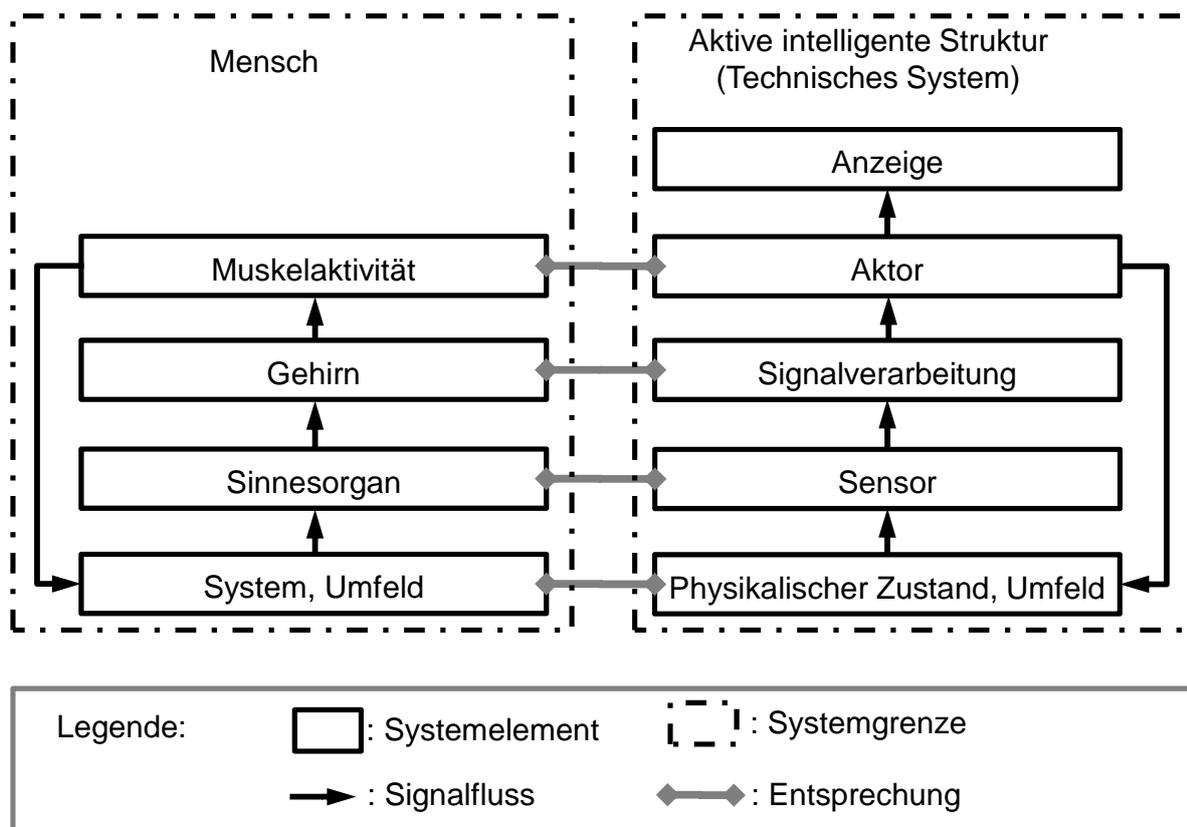


Bild 1.10: Entsprechung zwischen dem menschlichen Körper (links) und aktiven intelligenten Strukturen in Form technischer Systeme (rechts) mit den relevanten Signalflüssen (nach ELSPASS 1998, S. 3 Bild 1.2)

Die Analogie zwischen Mensch und technischem System ist aus systemtheoretischer und regelungstechnischer Sicht auf Ebene der Systemelemente schlüssig. Beide Systeme können als Regelkreis dargestellt werden. Der Mensch besitzt jedoch auf mehreren Ebenen eine Lern- oder Anpassungsfähigkeit (zum Beispiel durch Training des Muskelapparats oder des Gehirns), wohingegen das technische System im Allgemeinen nicht anpassungsfähig ist. Insbesondere ist nicht jeder Regelkreis aus sich selbst heraus bereits intelligent respektive lern- oder anpassungsfähig.

In der VDI-Richtlinie 2206 (VDI 2206, S. 15) wird Intelligenz aus Sicht der Mechatronik darin gesehen, dass ein Sensor Messwertaufnehmer, Analog/Digital-Wandlung und Mikroprozessor integriert oder ein Aktor Analog/Digital-Wandlung, Anpassungs-/Verstärkungsschaltung und erforderlichenfalls auch einen Mikroprozessor integriert. Intelligenz wird diesem Verständnis folgend durch räumliche und funktionale Integration erreicht. Diese Form der Intelligenz bleibt hinter der oben diskutierten Lernfähigkeit sowie der zielgerichteten Veränderung von Eigenschaften zurück.

Der Begriff der Intelligenz wird im Bereich der Adaptronik nicht definiert, sondern über den Begriff der intelligenten Werkstoffe eingeführt, die in technisch sinnvoll nutzbarer Weise veränderbare oder anpassbare Eigenschaften besitzen. Die Intelligenz wird über das multifunktionale Element in der Folge der Bindung an einen Werkstoff nur auf die mechanische Struktur, den Sensor und den Aktor übertragen. Der Regler ist immateriell und somit von den Eigenschaften eines smart materials unabhängig, das heißt er wird allein durch deren Einsatz nicht intelligent. Dieses Verständnis der Unabhängigkeit steht der Einteilung von Neumann prinzipiell entgegen, in der Werkstoffe mit kombinierten Sensor-Aktor-Reglereigenschaften aufgeführt werden (vgl. Bild 1.8). Im Detail sind die durch Werkstoffverhalten verwirklichten Regler jedoch nicht als intelligent im hier erörterten Sinne zu bezeichnen.

Jendritza (JENDRITZA 1998, S. 8) fasst in Abgrenzung zu herkömmlichen Reglern deshalb selbstanpassende, also adaptive Regler als wesentlichen Bestandteil intelligenter Strukturen neben den multifunktionalen Elementen auf. Adaptive Regler zeichnen sich durch Lernfähigkeit aus und werden meist als digitale Echtzeitsysteme verwirklicht. Jendritza macht diesen Gesichtspunkt jedoch nicht zu einem Definitionsbestandteil adaptronischer Systeme, sondern bezeichnet eine Struktur dann als intelligent, „wenn alle Funktionsbausteine eines Regelungskreises [...] enthalten sind“ (JENDRITZA 1998, S. 9), entsprechend den bereits oben angeführten Definitionen. Somit kann ein adaptronisches System lernfähig sein und ein lernfähiges System ein adaptronisches Sys-

tem sein. Ein lernfähiges adaptronisches System ist ein Spezialfall des adaptronischen Systems im Allgemeinen (vgl. auch ELSPASS 1998, S. 4 Bild 1.3).

Elspass (ELSPASS 1998, S. 3) fasst Systeme am Beispiel der Strukturmechanik dann als intelligent auf, wenn sie sowohl ihren Zustand (z. B. Lage oder Geschwindigkeit) als auch ihr Verhalten (z. B. Steifigkeit oder Dämpfung) verändern können. Elspass stellt im Hinblick auf die Intelligenz eine Analogie auf zwischen dem menschlichen Körper und aktiven intelligenten Strukturen (vgl. Bild 1.10 nach ELSPASS 1998, S. 3 Bild 1.2 und S. 7 f.; vgl. GIURGIUTIU 2007, S. 9).

In anderen ingenieurwissenschaftlichen Bereichen wird Intelligenz abweichend interpretiert, insbesondere in der Künstlichen Intelligenz. Sie befasst sich mit der Konstruktion informationsverarbeitender Systeme, die kognitive Leistungen des Menschen modellieren und in technischen Systemen verwirklichen. Ein Beispiel hierfür ist die Robotik.

Die Adaptivität oder Lernfähigkeit eines Reglers stellt aus konstruktionstheoretischer Sicht eine Eigenschafts- oder Verhaltensanpassung des Reglers (gegenüber dem restlichen Regelkreis und der Umwelt) dar, indem Merkmal-Wert-Kombinationen anpassbar ausgeführt und verändert werden. Das entspricht den Eigenschaftsanpassungen der mechanischen Struktur, der Sensoren und/oder der Aktoren im Sinne der smart materials. Die Entsprechung ist unabhängig von einer materiellen (mechanische Struktur, Sensor, Aktor) oder immateriellen (Regler) Beschaffenheit des Regelkreiselements. Sie ist ein Hinweis darauf, die Definition und das Verständnis eines Konstruktionselements im Sinne eines angepassten, HIKE-gerechten Vorgehens nicht an die materielle Verkörperung zu binden, sondern vielmehr die Regelung oder den Regler ebenfalls als Konstruktionselement zu verstehen.

1.3 Hybridität

Hybridität ist ein Merkmal eines Systems, das in der Folge auch als ein Hybrid bezeichnet wird. Ein Hybrid im Sinne eines technischen Systems erfüllt eine bestimmte Menge von Funktionen. Es gibt weitere, nicht hybride technische Systeme mit anderen Eigenschaften, die diese Funktionen mit anderen Mitteln in vergleichbarer Weise erfüllen.

Die wesentlichen Eigenschaften des Hybrids, die ihn von anderen Systemen unterscheiden, werden durch Kombinationen von Merkmalen erzielt, die sonst nicht in einem System vereint auftreten. Der Begriff der Hybridität beinhaltet unausgesprochen den Gesichtspunkt, hinsichtlich einer Systematik verschiedene Ausprägungen zusammenzufassen. Ob ein System ein Hybrid ist, hängt somit von der Systematik ab, mit welcher

der Hybrid und die mit ihm vergleichbaren Systeme eingeteilt werden, und welche Kriterien die wesentlichen Merkmale und Eigenschaften definieren.

Aus systemtheoretischer Sicht werden somit entweder Systemgrenzen verschoben, indem (Teil-)Systeme vereint werden, oder Elemente werden einem bestehenden System hinzugefügt.

Im Bereich der mobilen Telekommunikation werden zum Beispiel hybride Leistungsbündel in Form eines Mobiltelefons mit Providervertrag als Kombination einer Sachleistung und einer Dienstleistung angeboten (zu dieser Art der Hybridität vgl. SFB/TR29). Die Hybridisierung kann zu funktionaler Redundanz führen. Im Automobilbau werden zum Beispiel sogenannte Hybridfahrzeuge angeboten, die einen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor und Elektromotor besitzen.

Die Hybridität kann sich beispielhaft auf unterschiedliche Merkmalgruppen eines technischen Systems erstrecken:

- Werkstoffe: Faserverbundwerkstoffe kombinieren einen Matrixwerkstoff mit einem Faserwerkstoff
- Fertigungstechnologien: Thixoschmieden als Kombination einer Guss- und einer Gesenkschmiedefertigung
- Funktionalität: insbesondere das Kombinieren von Sensor, Aktor, Struktur, Regler und/oder Anzeige (vgl. Bild 1.8 und Bild 1.9)
- Strukturelle (Werkstoff-)Merkmale: insbesondere technisch nutzbare, veränderliche mechanische Eigenschaften wie die Viskosität elektro- oder magnetorheologischer Fluide

1.4 Energy harvesting

Ein weiterer technologischer Aspekt insbesondere der adaptronischen Systeme ist das sogenannte *energy harvesting* (GIURGIUTIU 2007, S. 9; LELETTY 2007, S. 124 f.; MICHEL 2007, S. 31): Ein System nutzt die Energie, die seine Umgebung auf es überträgt, und wandelt diese bei Bedarf in eine andere Energieform, vorzugsweise elektrische Energie, und/oder speichert die Energie. Dadurch ist es möglich, Systeme langfristig, unter Umständen über die gesamte Lebensdauer, mit Energie zu versorgen, ohne eine sonstige systeminterne Energiequelle bereitzuhalten. Als Ausgangsenergieformen kommen dabei beispielsweise mechanische Schwingungen und Kräfte für die piezoelektrische oder elektromechanische Wandlung, Temperaturdifferenzen oder allgemein thermische Energie für thermoelektrische Wandlung oder auch elektromagnetische

Strahlung für elektroinduktive Wandlung in Frage. Beispielhafte, bereitstellbare Leistungen liegen im niedrigen zweistelligen Milliwattbereich (REUTERS 2008). Dies reicht zum Beispiel für einfache Funktechnologien auf Basis von RFID-Anwendungen. Größere Leistungen können durch photovoltaische Energiewandlung erzielt werden.

Wie die oben diskutierten Definitionen zeigen, ist das energy harvesting kein elementarer Bestandteil mechatronischer oder adaptronischer Systeme. Die Leistungsfähigkeit der energy harvesting Technologien ist im Vergleich zum Energiebedarf noch nicht allgemein ausreichend. Solche Systeme bilden eine spezielle Klasse von Systemen innerhalb der Gruppen mechatronischer oder adaptronischer Systeme.

1.5 Ergebnis der Abgrenzung von HIKE

Ein Konstruktionselement verhält sich seinen konstituierenden Merkmal-Wert-Kombinationen entsprechend. Sie begründen seine Eigenschaften. Als Voraussetzung für Intelligenz wird in der Literatur gesehen, dass ein System Aktoren, Sensoren und Regler umfasst (ELSPASS 1998, S. 7), teilweise auch noch ergänzt um eine selbständige Energieversorgung (GIURGIUTIU 2007, S. 9; ELSPASS 1998, S. 7). Im Ergebnis führt Intelligenz zu einer situationsbezogenen und/oder zielgerichteten Eigenschaftsveränderung, das heißt Anpassung.

Angelehnt an die Adaptronik werden der Vorgang *Anpassung* und der Zustand *Angepasstheit* unterschieden. Für das Verständnis von HIKE sind beide losgelöst vom biologisch geprägten, am Menschen orientierten Verständnis von Intelligenz zu verstehen.

Ein Konstruktionselement ist angepasst, wenn eine oder mehrere Eigenschaften in Abhängigkeit von seinem Umfeld und dessen Veränderungen zielorientiert auf ein günstigeres Verhalten bereits während der Konstruktion hin angepasst wurden („intelligent zugeschnittene Konstruktionen“) oder während der späteren Lebenszyklusphasen angepasst werden können. Dies führt beim Konstruieren zu zwei wesentlichen Fragen: Hinsichtlich welcher Gesichtspunkte ist eine Anpassung erforderlich? Und wie kann das im Vergleich günstigere Verhalten bestimmt werden?

Eine primäre Angepasstheit („passive Adaptivität“) liegt aus makroskopischer Sicht vor, wenn ein Konstruktionselement grundsätzlich für alle relevanten Umweltbedingungen seines Einsatzbereichs in technisch sinnvollem Umfang geeignet ist. Primäre Angepasstheit bedeutet, dass ein Konstruktionselement an seine Umwelt langfristig angepasst ist. Die Angepasstheit ist Ergebnis des Konstruktionsprozesses sowie der nachgelagerten Prozesse der Produktentstehung und -nutzung. Sie stellt eine Verträglichkeit

(vgl. Design-for-X Ansätze) des Eigenschaftskollektivs des Konstruktionselements mit den langfristigen, aggregierten Eigenschaften der Umwelt des Elements dar.

Eine sekundäre Angepasstheit („reaktive Adaptivität“) liegt aus mikroskopischer Sicht vor, wenn ein Konstruktionselement in technisch sinnvollem Umfang an relevante vorübergehende Umweltzustände und deren kurzfristige Änderungen anpassungsfähig ist. Anpassungsfähigkeit ist die Möglichkeit durch Eigenschaftsänderung zu reagieren. Reagieren zu können setzt einen Regelkreis voraus. Mit anderen Worten ist Anpassungsfähigkeit unmittelbar eine aus dem Konstruktionsprozess folgende Eigenschaft, die mittelbar die Anpassung (einen Anpassungsprozess) während der auf die Konstruktion folgenden Phasen des Produktlebenszyklus‘ ermöglicht, insbesondere in der Nutzungsphase des Konstruktionselements. Diese Form der Anpassung setzt voraus, dass das Konstruktionselement, das umgebende System und die Umwelt hinsichtlich der folgenden Aspekte übereinstimmen oder verträglich sind:

- kurzfristige Anpassungsmöglichkeiten des Konstruktionselements
- veränderliche Umwelteigenschaften und -zustände
- veränderliche Systemeigenschaften und -zustände

Die Veränderungen der Umwelt können kurz- oder langfristig sein, in Folge dessen reversibel oder irreversibel. Sie sind im Konstruktionsprozess als Annahmen unter Umständen nur statistisch erfassbar.

Der Angepasstheit liegen ingenieurmäßige Annahmen über System- und Umweltzustände während der Lebensdauer eines Konstruktionselements zu Grunde. Angepasstheit ist relativ in Bezug auf bestimmte äußere Zustände. Sie gibt eine Menge von zulässigen Zuständen vor, die das Konstruktionselement annehmen kann, um seine Funktion zu erfüllen. Anpassung als Folge der Anpassungsfähigkeit führt den Definitionen von primärer und sekundärer Angepasstheit entsprechend zu einem bestimmten, in diesem Sinne zulässigen Zustand.

Ein angepasstes Konstruktionselement kann sowohl passiv als auch aktiv sein. Nur angepasste aktive Konstruktionselemente sind anpassungsfähig im Rahmen der durch die konstruktive Angepasstheit vorgegebenen, möglichen Zustände. Das heißt, die primäre Angepasstheit ist Voraussetzung für die sekundäre Angepasstheit.

1.6 Definition hybrider, intelligenter Konstruktionselemente

Hybride, intelligente Konstruktionselemente (HIKE) sind technische Gebilde mit einer auf Basis der Gestaltelemente niedrigen bis mittleren Komplexität (vgl. EDER 2008,

S. 298; KOLLER 1998, S. 31). Sie besitzen eine hohe Komplexität hinsichtlich der Aspekte, welche die Hybridität verursachen. Sie sind hybrid hinsichtlich eines oder mehrerer Merkmale wie zum Beispiel Werkstoff, Fertigungstechnologie, Rolle im Regelkreis oder strukturellen (Werkstoff-)Eigenschaften. HIKE sind entweder unmittelbar aus sich selbst heraus (intrinsisch) oder von außen (extrinsisch) regel- oder steuerbar oder tragen mittelbar durch sensorische, aktorische oder regelnde Eigenschaften zur Regel-/Steuerbarkeit des sie umgebenden Systems bei. Sie sind somit entweder selbst sekundär angepasst oder unterstützen die sekundäre Anpasstheit des sie umgebenden Systems. Während des Konstruierens mit HIKE werden sie nicht mehr wesentlich verändert. Sie sind einem konstruktionsrelevanten Verhalten, insbesondere den Elementen (und Größen) eines Regelkreises, zugeordnet. Bild 1.11 fasst die Definitionsmerkmale zusammen.

Definition: **H**ybride **I**ntelligente **K**onstruktions**E**lemente (HIKE)

- **(H)** integrieren Fertigungs- und/oder Werkstofftechnologien,
- **(H)** integrieren Funktionen als Sensor, Aktor, Regler, Anzeige und/oder Struktur,
- **(I)** sind intrinsisch oder extrinsisch regel-/steuerbar oder tragen zur Regel-/Steuerbarkeit des Umsystems bei,
- **(KE)** werden beim Konstruieren mit HIKE nicht wesentlich verändert,
- **(KE)** weisen unterschiedliche Komplexitätsstufen auf und
- **(KE)** sind einem konstruktionsrelevanten Verhalten (im Regelkreis) zugeordnet.

Bild 1.11: Definition hybrider, intelligenter Konstruktionselemente (HIKE)

HIKE unterscheiden sich durch die beschriebene Hybridität und Intelligenz von herkömmlichen Konstruktionselementen. Ein HIKE kann, wenn es die entsprechenden Eigenschaften aufweist, ein adaptronisches System sein. Ein HIKE kann grundsätzlich auch in mechatronischen Systemen eingesetzt werden. In der Regel wird es jedoch alleinstehend kein mechatronisches System bilden. Bei den untersuchten HIKE wird die Hybridität in einer Weise erzielt, die eine zerstörungsfreie Trennung der Regelkreiselemente nicht zulässt.

2 Literatur

- DIN 19226-4 Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 19226-4: Leittechnik. Regelungstechnik und Steuerungstechnik - Begriffe für Regelungs- und Steuerungssysteme*. 1994 (Beuth, Berlin).
- EDER 2008 Eder, W.; Hosnedl, S.: *Design Engineering. A Manual for Enhanced Creativity*, 2008 (CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton) ISBN 1420047655
- ELSPASS 1998 Elspass, W.J.: *Aktive Funktionsbauweisen*, 1998 (Springer, Berlin/Heidelberg) ISBN 3-540-63743-5
- GAUL 2010 Gaul, L.: *Active Noise and Vibration Reduction* In: Universität Stuttgart: *Intelligente Fahrzeuge – Themenheft Nr. 7* 2010/2011, 2010/2011, Universität Stuttgart, S. 20-25. ISSN 1861-0269
- GAUSEMEIER 2009 Gausemeier, J.; Kaiser, I.; Peitz, T.: *Integration von Mechatronik und Elektronik - Produktoptimierung mit MID*. In: *Konstruktion*, Jg. 61, Heft 6, S. 59-65. ISSN 0720-5953
- GIURGIUTIU 2007 Giurgiutiu, V.: *Concepts of adaptronic structures* In: Janocha, H. (Hrsg.): *Adaptronics and smart structures*, 2007 (Springer, Berlin/Heidelberg) S. 9-28. ISBN 978-3-540-71965-6
- HANSELKA 1997 Hanselka, H.: *Realization of smart structures by using fiber composite materials* In: Gabbert, U. (Hrsg.): *Smart mechanical systems - Adaptronics*, 1997 (VDI Verlag, Düsseldorf), S. 1-10. ISBN 3-18-324411-X
- JENDRITZA 1998 Jendritza, D.J.: *Einführung und Begriffsdefinitionen* In: Jendritza, D.J. (Hrsg.): *Technischer Einsatz neuer Aktoren*, 1998 (Expert Verlag, Renningen-Malmsheim) ISBN 3-8169-1589-2
- KOLLER 1998 Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*, 1998 (Berlin, Springer) ISBN 3540630376
- LELETTY 2007 Leletty, R.; Claeysen, F.: *Piezoelectric Actuators* In Janocha, H. (Hrsg.): *Adaptronics and smart structures*, 2007 (Springer, Berlin/Heidelberg), S. 107-125. ISBN 978-3-540-71965-6
- MICHEL 2007 Michel, D.; Michels, J.S.; Richter, B.: *Energy Harvesting für autarke Sensoren in industriellen Applikationen* In: Gause-

- meier, J. et al. (Hrsg.): *Entwurf mechatronischer Systeme*, 2007 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn), S. 31-43. ISBN 978-3-939350-29-3
- NEUMANN 1995 Neumann, D.: *Bausteine „intelligenter“ Technik von morgen: Funktionswerkstoffe in der Adaptronik*, 1995 (Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt) ISBN 3-534-12429-4
- NEUMANN 2007 Neumann, D.: *A concept for the Development of Adaptive and Multifunctionals Structures* In: Janocha, H. (Hrsg.): *Adaptronics and Smart Structures*, 2. Auflage, 2007 (Springer, London), S. 1-8. ISBN 978-3-540-71965-6
- REUTERS 2008 Reuters: *Micropelt's TE-Power-Bolt Generates up to 15 mW Power from Excess Heat*
<http://www.reuters.com/article/2008/03/11/idUS129017+11-Mar-2008+BW20080311> (Zugriff: 30.03.2011 19:13)
- ROPOHL 1999 Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie, eine Systemtheorie der Technik*. 2. Auflage, 1999 (Hanser, München) ISBN 9783446196063
- SCHIRMER 2006 Schirmer, W.: *Technischer Lärmschutz*, 2006 (Springer, Berlin/Heidelberg) ISBN 3-540-25507-9
- SFB/TR29 SFB/TR29: Sonderforschungsbereich/Transregio 29 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Engineering hybrider Leistungsbündel“ der Ruhr-Universität Bochum und der Technischen Universität Berlin; (Zugriff: 24.05.2011, 10:00 Uhr); <http://www.lps.ruhr-uni-bochum.de/tr29/index.htm>
- VDI 2206 Verein Deutscher Ingenieure *Richtlinie VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2004 (Beuth, Berlin).
- WEBER 2007 Weber, C.: *Looking at „DFX“ and „Product Maturity“ from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes* In: Krause, F.-L. (Hrsg.): *The Future of Product Development, Proceedings of the 17th CIRP Design Conference in co-operation with Berliner Kreis*, 26.-28.03.2007, Berlin, 2007 (Springer, Berlin/Heidelberg), S. 85-104. ISBN 978-3-540-69819-7

ISBN-13: 978-3-922823-79-7