

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>

R. Watty / H. Binz

Die Wirkstruktur als Hilfsmittel zur methodischen Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte

ABSTRACT

Mikrosysteme unterscheiden sich von Systemen im Makrobereich durch die Integration unterschiedlicher Disziplinen auf kleinstem Raum. Schon bei der Produktentwicklung spielen diese Besonderheiten eine große Rolle für die Vermeidung unerwünschter Wechselwirkungen und Störeffekte und die Gewährleistung der störungsfreien Funktion eines Systems.

Ein strukturierter Überblick über das Gesamtsystem und seine inneren Zusammenhänge ist für die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Entwicklung nicht nur wünschenswert, sondern zwingend notwendig. Für diese mikrosystemspezifische Problemstellung gibt es bisher keine hinreichende methodische Unterstützung, weil bekannte Methoden anderer Disziplinen nicht anwendbar sind.

Dieser Beitrag beschreibt eine neue Methode zur Erfassung und Berücksichtigung des Systemzusammenhangs bei der Entwicklung von Mikrosystemen. Im Mittelpunkt steht dabei eine erweiterte Wirkstruktur und eine darauf aufbauende Wirkstrukturmatrix für mikrosystemtechnische Produkte, die es ermöglichen, unerwünschte Wechselwirkungen und Störeinflüsse bereits in der Entwicklung zu erfassen und zu vermeiden.

EINLEITUNG

Die Mikrosystemtechnik hat in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erlebt und wird vielfach als eine Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert angesehen. Mikrosystemtechnische Produkte finden zunehmend Verwendung in den unterschiedlichsten Bereichen von der Kraftfahrzeugtechnik bis hin zur Medizintechnik. In vielen Anwendungen verbessern sie konventionelle Systeme und erweitern deren Einsatzmöglichkeiten oder eröffnen komplett neue Technikfelder.

Die Entwicklungsabläufe für mikrosystemtechnische Produkte sind bisher nicht standardisiert und nur in geringem Maße strukturiert. Einige Ansätze zu einer systematischen Vorgehensweise sind bekannt, haben sich aber nicht durchgesetzt [1], [2].

MIKROSYSTEMTECHNIK

Der Begriff Mikrosystem fand ursprünglich in der Mikroelektronik für die Kombination mehrerer integrierter Schaltungen zu einem komplexen System Verwendung. Die Mikroelektronik befasst sich mit rein elektronischen Bauteilen, deren zweidimensionale Struktur in der Regel voll automatisiert entworfen wird. Die neuere Definition eines Mikrosystems schließt nun außer der Mikroelektronik auch Komponenten aus anderen Bereichen mit ein, die in der Regel dreidimensional strukturiert sind [3], [4].

Danach ist ein Mikrosystem eine miniaturisierte Gesamtheit integrierter Sensor-, Signalverarbeitungs- (oder Informationsverarbeitungs-) und Aktorkomponenten mit charakteristischen Abmessungen im Mikrometerbereich [1], die eigenständig arbeiten kann. Die Komponenten bestehen wiederum aus Funktions- bzw. Formelementen wie z. B. Biegebalken, Membranen oder Lagern. In der internationalen Literatur werden Mikrosysteme als integrierte mikromechanische und mikroelektronische Komponenten mit dem Ausdruck „Micro Electro Mechanical Systems“ oder kurz MEMS beschrieben [1].

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems. Auf ein Substrat aus Silizium mit integrierten Strukturen sind z. B. elektronische Komponenten montiert, kontaktiert und mit einem Gehäuse umgeben.

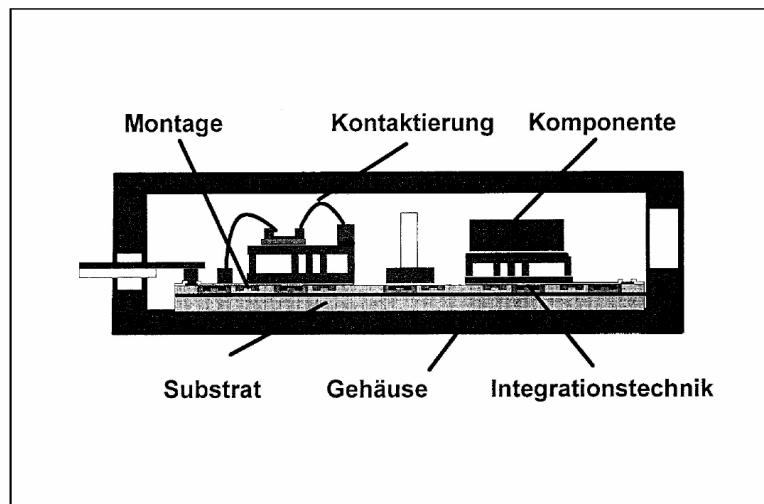


Bild 1: Aufbau eines Mikrosystems [5]

Die Mikrosystemtechnik befasst sich mit dem Entwurf, der Herstellung und der Applikation solcher Systeme [1], [4].

Die kleinsten Abmessungen eines mit dieser Technik hergestellten Objektes liegen in mindestens einer Dimension im Mikrometerbereich. Einerseits erlaubt die Verkleinerung die Unterbringung

vieler Elemente auf kleinstem Raum (Integration), andererseits erzeugt sie vollkommen neue technische Möglichkeiten und Eigenschaften der miniaturisierten Produkte (z. B. Frequenzverhalten, Trägheit, Energieverbrauch) [6]. Diese Verkleinerung erreicht aber zunehmend Grenzen, an denen neue Verfahren und Technologien zur Herstellung entwickelt werden müssen, andere physikalische Effekte zur Anwendung kommen und darüber hinaus Wechselwirkungen und Störeffekte zwischen den Komponenten beachtet werden müssen [7].

ENTWICKLUNG VON MIKROSYSTEMEN

In der Mikrosystemtechnik sind Komponenten aus den verschiedensten Disziplinen der Physik, wie z. B. Mikromechanik, Mikroelektronik, Mikroakustik, Mikrooptik und Mikrofluidik, aber auch aus der Mikrobiologie und Mikrochemie auf engstem Raum integriert, Bild 2.

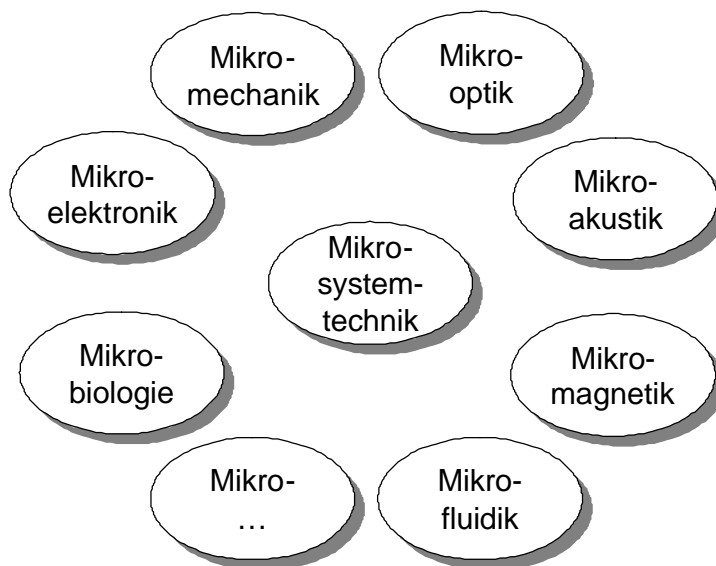


Bild 2: Disziplinen in der Mikrosystemtechnik [3], [4]

Diese Vielfalt von Technologien, aber auch von Herstellungstechnologien, Materialien und Anwendungen erfordert die enge Zusammenarbeit von Spezialisten unterschiedlicher Wissensgebiete. Hinzu kommt eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologie, die einem ständigen Wandel unterliegt.

Nur durch die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und ihr korrektes Zusammenwirken wird die Gesamtfunktion des Systems erfüllt. Dadurch sind Mikrosysteme insbesondere durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet, die im Entwicklungsablauf berücksichtigt werden muss.

Komplexität ist durch eine Vielzahl und Vielfalt an Elementen und Beziehungen gekennzeichnet [8], die dazu führt, dass komplexe Sachverhalte „sich durch Intransparenz, Vernetzung sowie Dynamik auszeichnen“ [9]. In der Regel verfügen nur mehrere Personen über den erforderlichen Umfang an Erfahrungen, Interessen und Spezialkenntnissen [1], um solch komplexe Entwicklungsaufgaben erfolgreich zu lösen.

Die Beherrschung dieser Komplexität fordert vom Entwickler nicht nur breites Fachwissen und ständige Weiterbildung auch außerhalb des eigenen Fachbereiches, sondern insbesondere den Umgang mit unerwünschten Effekten der Miniaturisierung sowie internen und externen Störgrößen. Eine Betrachtung des Gesamtsystems über die Grenzen der beteiligten Fachdisziplinen hinweg ist unumgänglich. Der Entwurf von Mikrosystemen ist daher ein Systementwurf, der sich durch die hohe Komplexität der miteinander wechselwirkenden Komponenten auszeichnet [1].

Unterstützung speziell für die interdisziplinäre Zusammenarbeit und den Umgang mit Schnittstellen wird in Fachpublikationen immer wieder gefordert [10], aber bisher nur unzureichend bereitgestellt. Auch in angrenzenden Fachbereichen wie z. B. der Mechatronik wird diese Problematik beschrieben [11], aber bisher keine ausreichende methodische Unterstützung für den Umgang mit Schnittstellen und Störeinflüssen in Systemen bereitgestellt.

MIKROSYSTEME ALS SYSTEME

Verbreitete Definitionen beschreiben Systeme als eine Vielzahl von Komponenten, die zueinander in Beziehung stehen.

So sehen zum Beispiel Pahl und Beitz Systeme als „Gesamtheit geordneter Elemente, z. B. Funktionen oder technische Gebilde, die aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen verknüpft und durch eine Systemgrenze umgeben sind.“ [12]

Allen Definitionen gemeinsam ist die strukturelle Konzeption, die ein System als Ganzheit über Beziehungen verknüpfter Elemente beschreibt und eine hierarchische Konzeption, die eine Systembetrachtung auf verschiedenen Ebenen vorsieht, die in einer hierarchischen Struktur von Systemen und Teilsystemen verbunden sind.

Mikrosysteme entsprechen dieser Systemsicht mit der Besonderheit, dass die einzelnen Elemente verschiedenen Bereichen der Technik entstammen und darüber hinaus durch die geringen Abmessungen auch Störgrößen berücksichtigt werden müssen, die über die Systemgrenze in das System hinein wirken.

ENTWICKLUNGSPROZESS FÜR MIKROSYSTEME

Für die Entwicklung von Mikrosystemen ist ein klar strukturierter und stetiger Prozess, wie er z. B. im klassischen Maschinenbau verwendet wird, meist nicht erreichbar. Einflussfaktoren wie das schnelllebige Umfeld, die parallele Entwicklung der Technologie und daraus resultierende Besonderheiten bei der Fertigung von Prototypen verhindern eine geradlinige Entwicklung.

Der Entwicklungsprozess ist stark von Iterationen geprägt, die aufgrund von Auswirkungen von technologischen Weiterentwicklungen oder Problemen auftreten. Durch Simulation des Systems oder Vorüberlegungen zu Wechselwirkungen zwischen Elementen können Systemeigenschaften vorhergesagt und Iterationen verhindert werden.

Wichtig dafür ist eine Betrachtung des Gesamtsystems, denn die Funktion der einzelnen Komponenten ist sozusagen nur die notwendige, aber nicht die hinreichende Bedingung für die Leistungsfähigkeit des Systems. Dafür fehlen bisher leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge und -methoden, die den Zusammenhang der Komponenten im Gesamtsystem betrachten [13]. Wird ein System, wie in der Praxis üblich, um eine zentrale Komponente herum entworfen, so geht bei diesem Bottom-Up-Vorgehen der Systemgedanke völlig verloren. Dagegen fördert der Top-Down-Entwurf das Systemdenken, beinhaltet aber dann die Schwierigkeit, dass zu Beginn des Entwurfs nicht genügend Informationen über Komponenten und ihre Realisierung vorliegen. Es ist daher ratsam, eine meet-in-the middle-Strategie zu verfolgen und zwischen Top-down und Bottom-up wiederholt mit zunehmender Konkretisierung zu wechseln [1], [14].

Dazu werden geeignete Werkzeuge benötigt, die den Systemzusammenhang darstellen und den Entwickler darin unterstützen, Zusammenhänge, insbesondere Kopplungen und Wechselwirkungen, zu erkennen und anschließend zu beseitigen.

ENTWICKLUNG DER STRUKTUR VON MIKROSYSTEMEN

Ausgehend von funktionellen Anforderungen, aber auch Randbedingungen für das System, die sich z. B. aus der Sicht der Fertigung ergeben, erfolgt die Entwicklung eines Mikrosystems in der Regel mit zunehmendem Konkretisierungsgrad, Bild 3. Dieser Prozess wird durch verschiedene Modelle unterstützt, die eine Strukturierung in den einzelnen Phasen der Produktentwicklung ermöglichen.

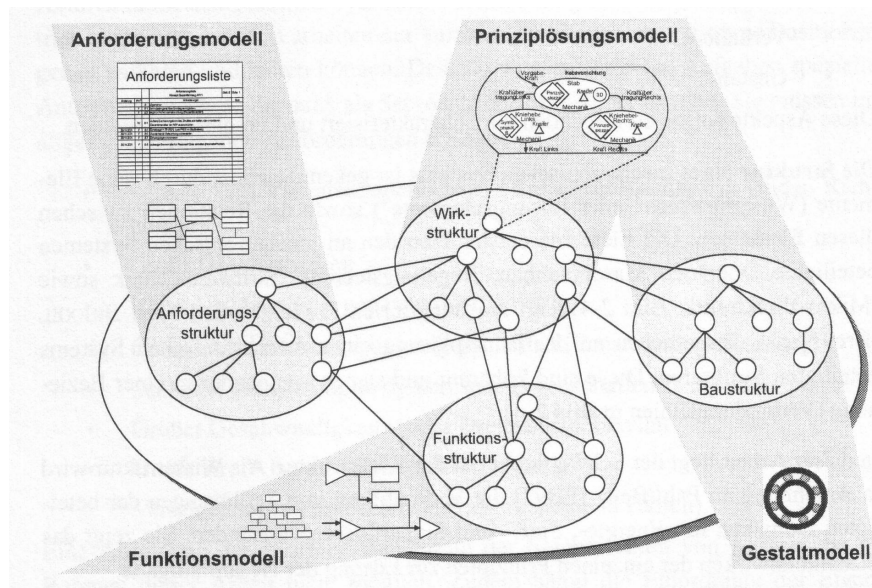


Bild 3: Unterstützung der Produktentwicklung durch Modelle [15]

Das Verhalten eines Systems beruht auf den von ihm erfüllten Funktionen [15]. Technische Funktionen beschreiben die Einwirkung des Systems auf den Zustand von Stoff-, Energie- und Informationsflüssen [Müller90], insbesondere den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen sowohl eines Gesamtsystems als auch seiner Teilsysteme. Die abstrakte und lösungsneutrale Formulierung von Teilfunktionen und ihrem funktionellen Zusammenhang liefert einen wichtigen Beitrag zum Definieren und Überprüfen der gewünschten Gesamtfunktion in der Funktionsstruktur.

Realisiert werden Teilfunktionen durch im mechanischen Bereich in der Regel physikalische Effekte, die auch als physikalische Wirkprinzipien bezeichnet werden, wenn sie konkret einer Teilfunktion zuzuordnen sind [17].

Das Wirkprinzip wird in die Einflussgrößen Geometrie (Wirkort, Wirkflächen, Wirkbewegungen), Stoff (Werkstoff) und Betriebsparameter (interne und externe Einflüsse) gegliedert [18], Bild 4.

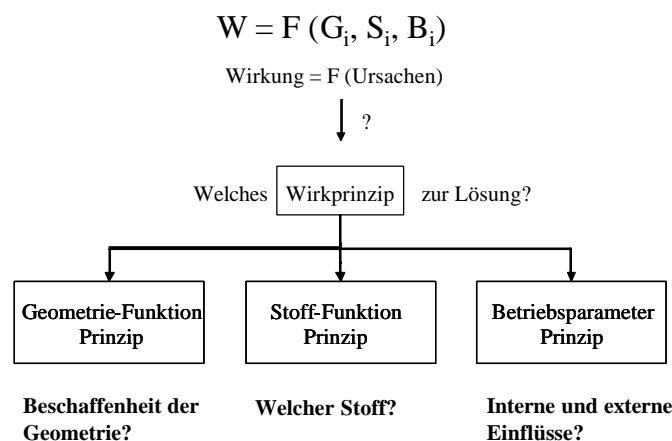


Bild 4: Einflussfaktoren auf die Wirkstruktur (nach [18])

Das verwendete Wirkprinzip und der Zusammenhang zwischen Bauelementen sind entscheidend für die Funktion aller technischen Produkte, so dass Verhalten und Struktur eines Systems eng miteinander verknüpft sind [15].

Für mechanische Systeme wird dieser Wirkzusammenhang der Bauteile durch die Wirkstruktur beschrieben [12]. Die Wirkstruktur wird dabei verstanden als „Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion“ [12]. Sie nimmt eine zentrale Stellung für ein integriertes Produktmodell ein, weil sie Anforderungsmodell, Funktionsmodell, Prinziplösungsmodell und Gestaltmodell verbindet, Bild 3. Auch in der Mechatronik erfolgt die Produktentwicklung von der Funktionsstruktur über die Wirkstruktur zur Baustruktur [19], [15]. Damit bietet die Wirkstruktur eine Möglichkeit, funktionsentscheidende Zusammenhänge darzustellen und den Übergang von der abstrakten Funktion zur konkreten Umsetzung in der Konzeptphase zu unterstützen.

In den bisherigen Anwendungsbereichen wird der Begriff der Wirkstruktur allerdings vorwiegend für den geometrischen und mechanisch-funktionalen Zusammenhang in technischen Systemen benutzt und ausschließlich in der Konzeptphase verwendet. Für die Mikrosystemtechnik sind aber Zusammenhänge zwischen den Wirkelementen von Bedeutung, die in der Art und Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren darüber hinaus gehen. So spielen zusätzlich z. B. optische oder elektrische Effekte eine wichtige Rolle, bei denen auch ein Wirkraum berücksichtigt werden muss, der die eigentliche Bauteilgeometrie überlagert. Da insbesondere unerwünschte Wirkungen physikalischer Effekte und externe Einflussgrößen auch über die Konzeptphase hinaus von Bedeutung sind, ist eine Verwendung der Wirkstruktur auch in der Gestaltungsphase wünschenswert. Zusätzlich wäre die Erleichterung der Einbindung von Simulationsprogrammen und anderen CAx-Anwendungen sinnvoll.

Für eine Verwendung zur Unterstützung der Systementwicklung in der Mikrosystemtechnik muss die Wirkstruktur im klassischen Sinne also ergänzt und angepasst werden.

Die nachfolgend dargestellte Erweiterung beruht auf zwei Elementen: einer erweiterten Wirkstruktur und einer Wirkstrukturmatrix, die externe und wechselseitige interne Einflussfaktoren berücksichtigt und rechnergestützt ausgewertet werden könnte.

WIRKSTRUKTUR VON MIKROSYSTEMEN

Eine Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik sollte die in Bild 5 dargestellten Elemente enthalten.

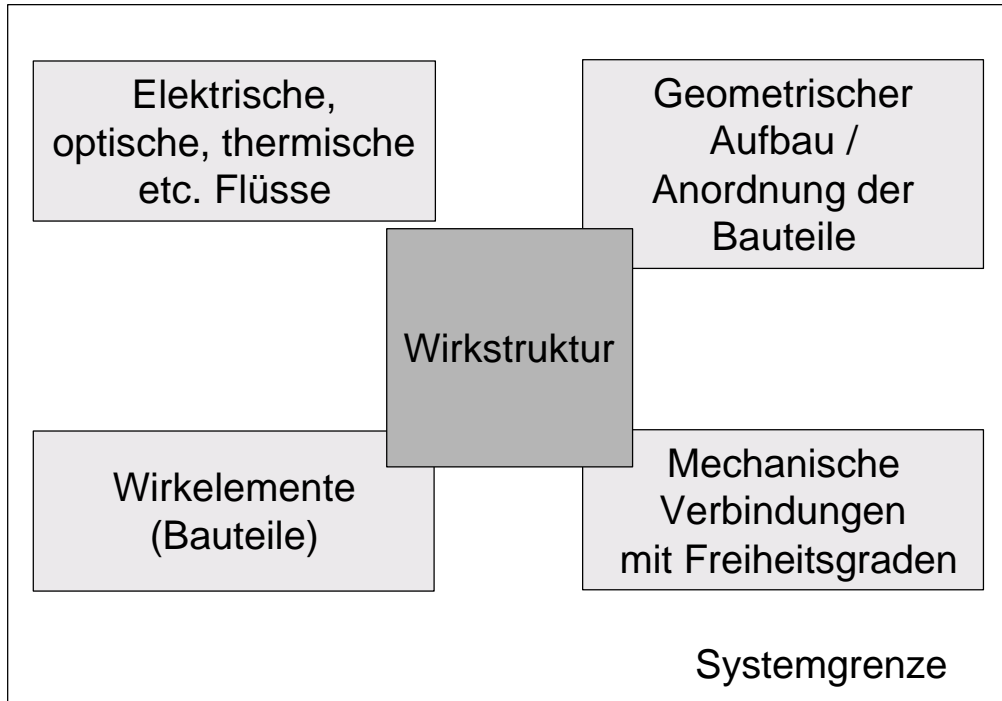


Bild 5: Elemente einer Wirkstruktur für Mikrosysteme

Bauteile des Mikrosystems, die als Wirkelemente eingesetzt werden, müssen in der Wirkstruktur dargestellt werden, im Idealfall mit ihren geometrischen Abmessungen, um den Bauraum überprüfen zu können.

Der geometrische Aufbau des Gesamtsystems und die Lage der Bauteile zueinander liefern weitere wichtige Informationen zu wechselseitigen Einflüssen der Bauteile aufeinander, die aufgrund der hohen Integration in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle spielen. Die Freiheitsgrade für mechanische Verknüpfung der Bauteile oder z. B. ihre Befestigung auf einem Gehäuse oder einer Bodenplatte sind entscheidend für die Wahl einer geeigneten Verbindungsart und sollten deshalb ebenfalls dargestellt werden.

Weit über die Bedeutung in der mechanischen Technik hinaus spielen verschiedenste Flüsse, z. B. elektrischer, optischer, thermischer oder nuklearer Natur in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle. Zu unterscheiden sind Operanden, auf die zielorientiert einzuwirken ist, und Operatoren, die Träger der erforderlichen Einwirkung sind [16]. Operanden können von Natur gegeben und / oder technisch erzeugt sein und sind stofflicher, energetischer oder informatorischer Natur, z. B. als Eingangssignal für einen Sensor. Operatoren werden technisch bereitgestellt und sind stofflicher oder energetischer Natur, z. B. elektrische Energie für eine Stoffumwandlung, wäh-

rend informatorische Operanden eines (energetischen oder stofflichen) Trägers bedürfen. Die technische Funktion des Wirkelementes besteht in der Veränderung, Verarbeitung oder Speicherung des Operanden. Erwünschte Operanden und Operatoren müssen im vorgesehenen Einflussbereich geleitet werden, unerwünschte ebenso wie interne und externe Störfaktoren durch eine funktionsfähige Abschirmung an einer Störung der Systemfunktion gehindert werden. Aufbauend auf diesen Anforderungen wurde eine erweiterte Wirkstruktur erarbeitet, die speziell für Mikrosysteme das Verständnis des Systemzusammenhangs fördern soll, aber auch auf andere Bereiche übertragen werden kann. Die Darstellung der erforderlichen Elemente baut auf den in Bild 6 dargestellten Symbolen auf.

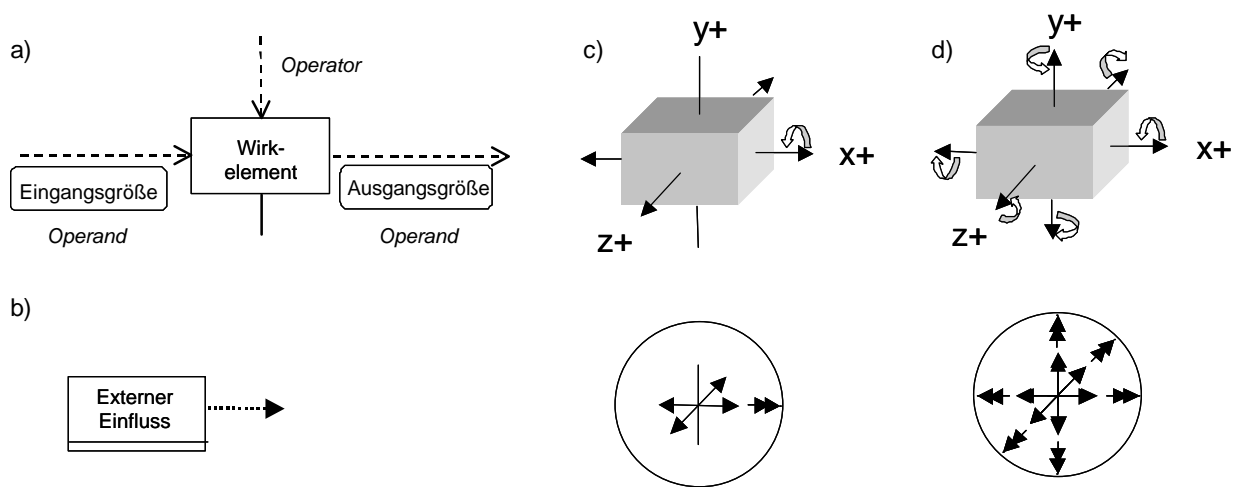


Bild 6: Symbole der Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik

a) Wirkelement b) Externer Einfluss c,d) Mechanische Verbindung

Das Wirkelement (a) kann als Symbol oder aber mit seiner tatsächlichen Form dargestellt werden. Operanden und Operatoren und damit die Flüsse im System können durch gestrichelte Pfeile gerichtet dargestellt werden, mechanische Verbindungen durch Linien. Externe, nicht für die Funktion vorgesehene Einflüsse (b), werden mit gepunkteten Pfeilen grundsätzlich bis an die Systemgrenze herangeführt. Mechanische Verbindungen der Wirkelemente (c und d) können mit einfachen Pfeilen für die vorgesehenen translatorischen und doppelten Pfeilen für die (mathematisch positiven) rotatorischen Freiheitsgrade dargestellt werden.

Aufbauend auf diesen Vorgaben wurde eine erweiterte Wirkstruktur eines Drehgebers erstellt, die zusätzlich Einflussgrößen berücksichtigt, die z. B. nicht-mechanisch sind oder als externe Störgrößen auftreten, Bild 7.

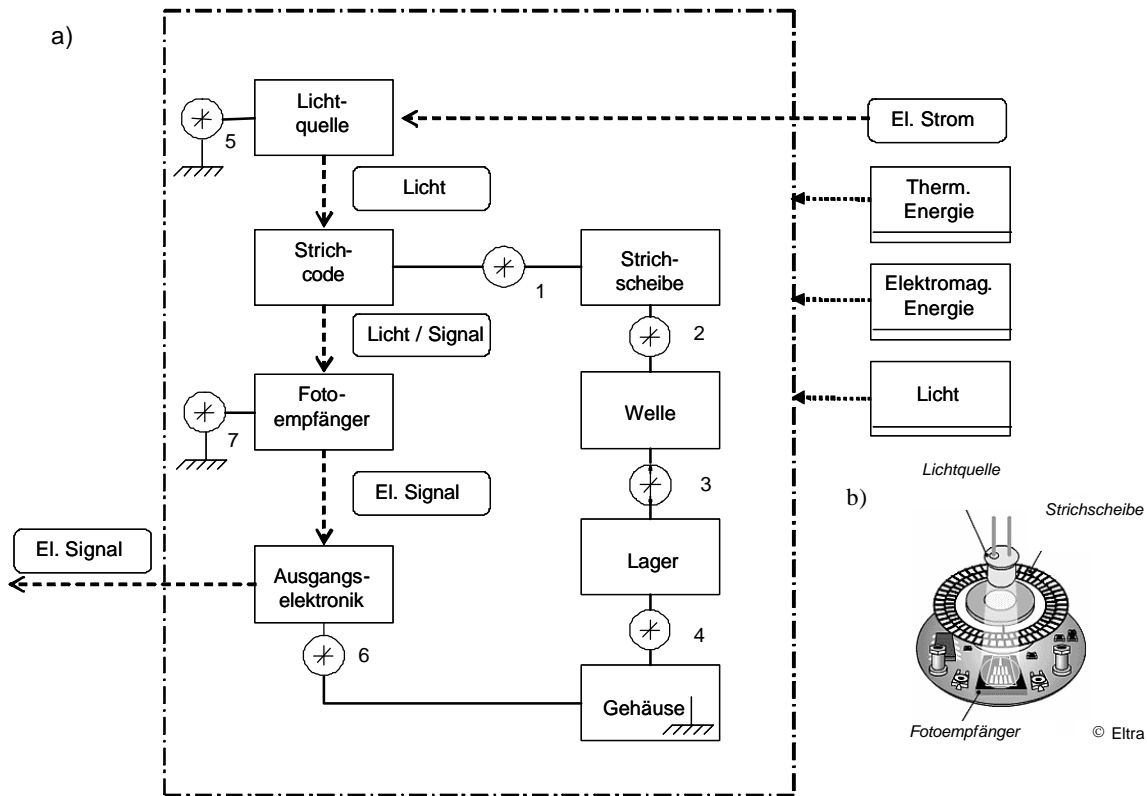


Bild 7: Wirkstruktur eines Drehgebers

Die erweiterte Wirkstruktur gibt einen Überblick über den Drehgeber, seine Wirkelemente und die Freiheitsgrade ihrer Verbindungen. Darüber hinaus sind die elektrischen und optischen Flüsse, aber auch äußere Störgrößen wie z. B. elektromagnetische Energieflüsse dargestellt, so dass das System in seiner Gesamtheit abgebildet wird. Durch das Erstellen der Wirkstruktur wird zunächst die Betrachtung des gesamten Systems gefördert und sein Aufbau, aber auch einwirkende Einflussfaktoren betrachtet. Allein diese Betrachtung hat in den Projekten, in denen das Verfahren eingesetzt wurde, schon zu mehr Klarheit über den Aufbau des Systems geführt. Ein weitergehender Effekt ließ sich durch das Aufstellen der Wirkstrukturmatrix erreichen.

WIRKSTRUKTURMATRIX ALS HILFSMITTEL ZUR SYSTEMINTEGRATION

Die Analyse der z. B. geometrischen, physikalischen oder funktionalen wechselseitigen Einflüsse der einzelnen Elemente des Systems oder seiner Umgebung können aufbauend auf der Wirkstruktur in einer Matrix dargestellt werden, Bild 8.

Die auf der Design Structure Matrix (DSM) [20] aufbauende Wirkstrukturmatrix enthält alle Systemelemente und Einflussgrößen sowohl in den Spalten als auch den Reihen der Matrix.

Wirkstrukturmatrix	Nature / material	Fotoempfänger	Codierstriche	Lichtquelle	Codierscheibe	Analyse IC	Welle	Lager	Gehäuse	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4	Verbindung 5	Verbindung 6	Verbindung 7	El. Strom	Licht	Licht / Signal	El. Signal	Therm. Energie	Elektromagn. Energie	Externes Licht
		Fotoempfänger				←												←		←	←		
Codierstriche		←		←	←	←					←											←	
Lichtquelle		←												←			←						
Codierscheibe			←							←	←												
Analyse IC		←	←												←						←	←	←
Welle					←				←		←	←											
Lager	radial							←	←			←	←									←	
Gehäuse	Kunststoff	←		←	←	←		←					←	←	←	←		←	←		←	←	←
Verbindung 1	Laser		←		←																		
Verbindung 2	kleben				←		←															←	
Verbindung 3							←	←															
Verbindung 4								←	←														
Verbindung 5				←					←														
Verbindung 6	kleben					←			←														
Verbindung 7		←							←														
El. Strom																							
Lichtstrahl				←					←														
Licht / Signal		←	←	←	←				←														
El. Signal		←				←																	←
Therm. Energie								←	←														
Elektromagn. Energie		←		←	←																		
Externes Licht																							

Bild 8: Wirkstrukturmatrix eines Drehgebers

In den Schnittpunkten können Abhängigkeiten bzw. Einflüsse qualitativ erfasst und für die Systemerstellung und -optimierung genutzt werden.

So wird z. B. der Fotoempfänger durch die Lichtquelle beeinflusst (Wellenlänge etc.), es muss eine geeignete Verbindung zum Gehäuse gewählt und es muss Licht/Signal aufgenommen werden. Weitere Einflüsse gehen aber auch vom Licht aus, das innerhalb des Gehäuses unerwünscht vorhanden ist (z. B. durch Reflexion), und es können Einflüsse durch externes Licht oder je nach Bauart des Empfängers auch durch externe elektromagnetische Felder auftreten. Durch die Erfassung der Einflüsse wird erreicht, dass sie im Laufe der Entwicklung berücksichtigt werden können, so dass bei der Konstruktion oder Auswahl eines Fotoempfängers seine Funktion gewährleistet wird und mögliche Fehlerquellen vermieden werden.

In einem weiteren Schritt ist eine rechnerunterstützte Optimierung denkbar, indem in den Schnittpunkten Abhängigkeiten nicht mehr qualitativ erfasst, sondern durch hinterlegte Formeln oder Simulation berechnet werden. Dies müsste für die möglichen Einflussarten getrennt geschehen, so dass eine dreidimensionale Matrix entstünde, Bild 9.

Wirkstruktur- matrix	Nature / material	Fotoempfänger	Codierstriche	Lichtquelle	Codierscheibe	Analyse IC	Welle	Lager	Gehäuse	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4	Verbindung 5	Verbindung 6	Verbindung 7	El. Strom	Lichtstrahl	Licht / Signal	El. Signal	Therm. Energie	Elektromagn. Energie	Externes Licht		
		Fotoempfänger																							
Codierstriche		←		←	←	←																			
Lichtquelle		←																							
Codierscheibe			←							←	←														
Analyse IC		←	←																		←	←	←		
Welle					←					←	←														
Lager	radial						←		←				←	←											
Gehäuse	Kunststoff	←		←	←	←		←					←	←	←	←		←	←		←	←	←	←	←
Verbindung 1	Laser		←		←																				
Verbindung 2	kleben				←			←																	
Verbindung 3							←	←																	
Verbindung 4								←	←																
Verbindung 5				←																					
Verbindung 6	kleben					←																			
Verbindung 7		←																							
El. Strom																									
Lichtstrahl				←					←																
Licht / Signal		←	←	←	←					←															
El. Signal		←				←																			
Therm. Energie								←	←																
Elektromagn. Energie		←		←	←																				
Externes Licht																									

Externes Licht

Struktur

Thermische Belastung

Elektromagn. Belastung

Bild 9: Wirkstruktur eines Drehgebers mit Simulation der Einflüsse

Dann kann z. B. eine thermische Energie, die von einem Bauelement ausgeht, für einen gegebenen Bauraum mit Wirkelementen unter verschiedenen Einsatzbedingungen simuliert und auf die Wirkungen auf das Gesamtsystem hin untersucht werden.

EVALUATION

Wirkstruktur und Wirkstrukturmatrix wurden bereits in mehreren Entwicklungsprojekten für mikrosystemtechnische Produkte erfolgreich angewendet. Entwickelt wurden je ein Sensor für Neigungs- und Drehwinkelerfassung sowie ein Luftmassensensor für den Automobilbereich. Dabei hat sich gezeigt, dass allein durch die Erfassung der Einflüsse in der Konzeptphase schon viele Zusammenhänge erfasst wurden, die dann im weiteren Verlauf eine erhebliche Effizienzsteigerung durch die Verminderung des Abgleichaufwands bei der Systemintegration ermöglichen. Die Erfassung von Störgrößen, die in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle spielen, die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Systemstruktur konnten signifikant verbessert werden. Der hohe Aufwand insbesondere für die Erstellung der kompletten Wirkstrukturmatrix lohnt sich insbesondere dann, wenn Systeme relativ komplex werden und bei mehreren beteiligten Domänen die Gefahr besteht, dass wechselseitige Störeinflüsse nicht hinreichend erfasst werden können. Die weitere Entwicklung der Wirkstrukturmatrix hin zu einer kompletten Simulation der

Einflüsse erfordert disziplinübergreifende CAX-Systeme und Simulationsprogramme, die heute noch nicht in ausreichendem Maße bereitstehen und viele weitergehende Ansatzpunkte für künftige Forschungsaufgaben bieten.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Kasper, M.: Mikrosystementwurf. Springer Verlag, Berlin, 2000
- [2] Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik. University press Dresden, 2000
- [3] Lang, M.: Entwurfsmethoden und Rapid Prototyping integrierter Mikrosysteme, Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [4] Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik, Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [5] Reichl, H.: Skript zur Vorlesung "Entwurf und Simulation von Mikrosystemen I", TU Berlin, 2004
- [6] Mescheder, U.: Mikrosystemtechnik. Teubner Verlag, Stuttgart, 2000
- [7] Detter, H.: Mikrosystemtechnik – Forschung, Entwicklung und Ausbildung in Österreich, e&i, Heft 9, Seite 522-527, 116. Jahrgang, 1999
- [8] Daenzer, W. F.; Huber, F. (Hrsg.): Systems Engineering, Methodik und Praxis, 9. Auflage, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1997
- [9] Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens, Strategisches Denken in komplexen Situationen, Rowolth, Hamburg, 1998
- [10] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3D-MID: Technologie 3D-MID. Hanser Verlag, München, 2004
- [11] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [12] Pahl, W.; Beitz, G. et al.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer Verlag Berlin, 2003
- [13] <http://www.mstonline.de/mst/mikrosystemtechnik/glossar/default.html#A1> (30.05.2005)
- [14] Tanurhan, Y., Schmerler, S., Pihulak, B., Bortolazzi, J., Müller-Glaser, K.-D.: System Level Specification and Simulation for Microsystem Design in the METEOR project. In: Reichl, Herbert, Heuberger, Anton (Hrsg.): Micro System Technologies 94, 4th int. Conference, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1994
- [15] Köckerling, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte, Dissertation, Universität Paderborn, 2004
- [16] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Springer Verlag Berlin, 1990
- [17] Beitz, W., Grothe, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [18] Jung, A.: Geometrie, Stoff und elektrische Funktion, Zur Didaktik des geometrisch-funktionalen Denkens. Proceedings ICED 91, Zürich 1991
- [19] Gausemeier, J.: Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung. 20th CAD-FEM Users' Meeting 2002, Friedrichshafen, 2002
- [20] Warfield, John N.: Binary Matrices in System Modeling. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 3, pp. 441-449, 1973

Autorenangabe:

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Robert Watty
Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: +49 711 685 6040
Fax: +49 711 685 6219
E-mail: watty@imk.uni-stuttgart.de