

## ENTWICKLUNG MECHATRONISCHER SYSTEMKOMPONENTEN DARGESTELLT AN DEN REFERENZBEISPIELEN KOSMAK UND LIROS

Joachim Breidert, Sebastian Jansen, E.G. Welp

### Kurzfassung

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch die effizient aufeinander abgestimmte Nutzung von Lösungsprinzipien aus unterschiedlichen Technikdomänen aus. In diesem Beitrag werden Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Entwicklung mechatronischer Produkte vorgestellt und anhand zweier Beispiele verdeutlicht. Ausgehend von der allgemeinen Beschreibung des Aufbaus von Sensor- und Aktorsystemen werden anschließend für die Aktorkomponente „Kosmak“ (konfigurierbarer SmartMaterial-Aktor) und die Sensorkomponente „Liros“ (Linear-/ Rotations-Sensor) zentrale Aspekte des Entwicklungsprozesses und der prototypischen Umsetzung dargestellt.

### 1 Einleitung

Zur Erfüllung der Gesamtfunktion eines mechatronischen Systems werden die Teilfunktionen durch nicht-elektrische, elektrische und informationstechnische Wirkprinzipien realisiert. Die Kopplung zwischen elektrischen und nicht-elektrischen Wirkbereichen erfolgt dabei durch Aktoren bzw. Sensoren.

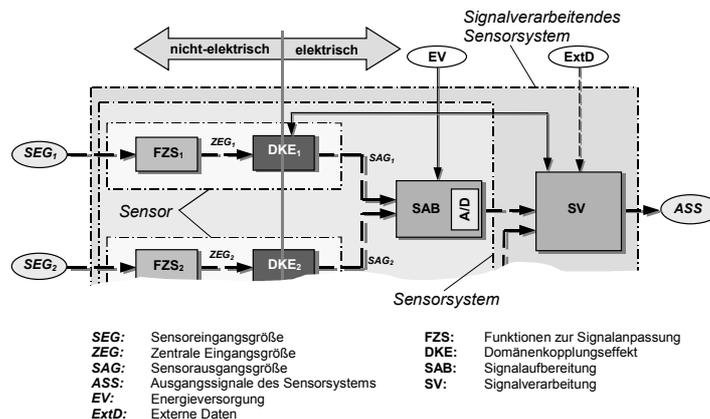


Bild 1: Allgemeiner Aufbau eines signalverarbeitenden Sensorsystems (angelehnt an [1])

In Bild 1 ist der allgemeine Aufbau eines signalverarbeitenden Sensorsystems dargestellt. Die zu erfassende Größe in Form der nicht-elektrischen Sensoreingangsgroße wird durch die Funktionen zur Signalanpassung in die zentrale Eingangsgroße gewandelt. Diese nicht-elektrische Größe wird mit Hilfe des von uns sogenannten Domänenkopplungseffektes in die elektrische Sensorausgangsgroße gewandelt. Zur anschließenden Signalaufbereitung gehören Funktionen wie das Verstärken oder Filtern sowie ggf. eine Analog/ Digital-Wandlung

der Signale. Innerhalb eines signalverarbeitenden Sensorsystems erfolgt außerdem eine informationstechnische Weiterverarbeitung der aufbereiteten Signale.

In Analogie zu dieser Betrachtungsweise ist der Aufbau eines signalverarbeitenden Aktorsystems (Bild 2) zu sehen.

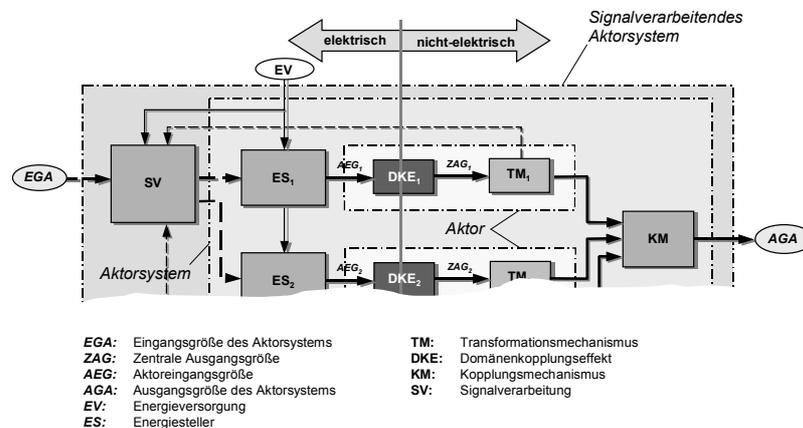


Bild 2: Allgemeiner Aufbau eines signalverarbeitenden Aktorsystems

Die Eingangsgröße des Aktorsystems in Form elektrischer Signale wird innerhalb der Signalverarbeitung mit Hilfe einer informationstechnischen Komponente in das Eingangssignal des Energiestellers gewandelt. Dieser hat in der Regel die Funktion eines elektrischen Verstärkers. Die Ausgangsgröße der Signalverarbeitung wird hier mit elektrischer Energie verknüpft, so dass die energiedominierte Aktoreingangsgröße beeinflusst wird. Diese elektrische Größe dient als Eingangsgröße für den Domänenkopplungseffekt, wo eine Wandlung in die nicht-elektrische zentrale Ausgangsgröße erfolgt. Um die gewünschte Aktorausgangsgröße zu erhalten, ist häufig noch ein geeigneter Transformationsmechanismus notwendig, der die zentrale Ausgangsgröße in die Aktorausgangsgröße wandelt. Innerhalb eines dem Aktorsystem zugeordneten Kopplungsmechanismus kann zusätzlich eine Verknüpfung mehrerer Aktorausgangsgrößen zur Ausgangsgröße des Aktorsystems erfolgen.

Aus den Kopplungsbedingungen nicht-elektrischer und elektrischer Wirkelemente lassen sich wichtigen Hinweise für Vorgehensweisen und Arbeitsinhalte ableiten.

## 2 Entwicklung der Aktorkomponente Kosmak

Seit mehreren Jahrzehnten sind Formgedächtnislegierungen (FGL) als Funktionswerkstoffe bekannt, kommen bislang allerdings nur in den Bereichen der Medizintechnik sowie der Luft- und Raumfahrttechnik in nennenswertem Umfang zum Einsatz. Die Entwicklung bisheriger Anwendungen von FGL in technischen Produkten ist häufig durch eine selektive werkstoffwissenschaftliche, regelungstechnische oder mechanische Sichtweise geprägt und hat zu isolierten Betrachtungen der FGL-Komponenten geführt. Obgleich viele patentierte Anwendungen existieren, sind die meisten von suboptimalen Lösungen geprägt, bei denen die Systemzusammenhänge oft nur unzureichend Berücksichtigung gefunden haben. Trotz der vielen Schwierigkeiten, die mit der Realisierung von FGL-Anwendungen verknüpft sind, weisen sie jedoch einige wichtige Vorteile auf. Charakteristisch für FGL-Aktoren sind ihre hohe Leistungsdichte sowie ihre Geräuschlosigkeit. Mit der Entwicklung des FGL-basierten Stellantriebs „Kosmak“ wird das Ziel verfolgt, durch ein frühzeitiges domänenübergreifendes Ge-

samt Konzept die Synergie der Domänen vorteilhaft zu nutzen und in ein hochintegriertes Produkt einfließen zu lassen. Bei der Konzipierung stand unter anderem der Aspekt einer Black-Box-Bauweise im Vordergrund, die insbesondere für Hersteller komplexer Systeme von großer Bedeutung ist.

## 2.1 Konzept

Der Entwicklung lag die Aufgabenstellung zu Grunde, einen allgemein nutzbaren Stellantrieb unter Verwendung des Formgedächtniseffekts zu konstruieren, der zwischen zwei Winkelpositionen schalten kann und folgende Anforderungen erfüllt:

- Für das Halten der Winkelpositionen soll keine Energie aufgewendet werden.
- Zum Antrieb steht elektrische Energie zur Verfügung.
- Ferner soll der zu entwickelnde Stellantrieb an unterschiedliche Bauräume flexibel anpassbar sein.

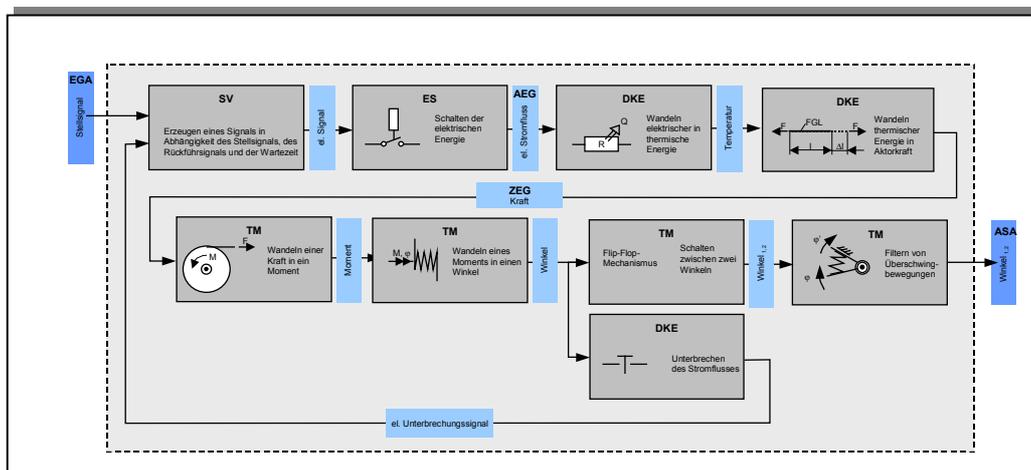


Bild 3: Konzept des Formgedächtnisaktors

Das Konzept der Stelleinheit ist in Bild 3 dargestellt. Kernelement des Systems ist ein Aktor aus FGL. Auf Grundlage einer systematischen Betrachtung von Halbzuggeometrien wurde hierfür ein Drahtaktor gewählt, da dieser sich durch die beste Materialausnutzung und einen verhältnismäßig hohen Wirkungsgrad auszeichnet. Darüber hinaus ermöglicht das große Verhältnis von Oberfläche zu Volumen gute Abkühlgeschwindigkeiten und somit kurze Zykluszeiten. Zur thermischen Aktivierung des FGL-Aktors wird sein elektrischer Eigenwiderstand genutzt. Die durch den Draht-Aktor erzeugte Kraft wird mit Hilfe einer Seilscheibe in ein Drehmoment gewandelt und mittels einer Feder als Winkel ausgegeben. Um die Endposition ohne Energieverbrauch halten zu können, kommt ein Flip-Flop-Element zum Einsatz. Die durch das Flip-Flop-Element prinzipbedingt verursachten Überschwingbewegungen werden durch ein elastisches Filter-Element eliminiert. Zur Begrenzung der mechanischen Spannung und der Längenänderung des FGL-Aktors ist ein Abschalten der Aktivierung bei Erreichen der Endposition erforderlich. Eine Signalverarbeitung verknüpft äußere Stellsignale mit inneren Signalen zur Erkennung der Aktorposition und erforderlichen Wartezeiten zum Abkühlen des FGL-Aktors. Von der Signalverarbeitung wird ein elektrisches Signal an einen elektronischen Schalter ausgegeben, der den Aktorstromkreis entsprechend schließt bzw. öffnet.

Die Partitionierung des Wirkzusammenhangs in der Konzeptionsphase erfolgt bei dem hier vorliegenden Beispiel an den Domänenkopplungseffekten (DKE) „elektrischer Widerstand“ und „Leiter/Nichtleiter“. Als wesentliche Erkenntnis aus dem durchlaufenen Konzeptionsprozess, ist die Bedeutung der Aktorumgebung zu nennen, z. B. der Wegbegrenzung oder der Kraftskalierung, die den Erfolg des Konzeptes entscheidend beeinflusst.

## 2.2 Realisierung

Bei der Gestaltung der Stelleinheit wurde in besonderem Maße der Integration von Funktionen Rechnung getragen. Dadurch ist es gelungen, einen Stellantrieb zu realisieren, der aus nur wenigen Bauteilen besteht.

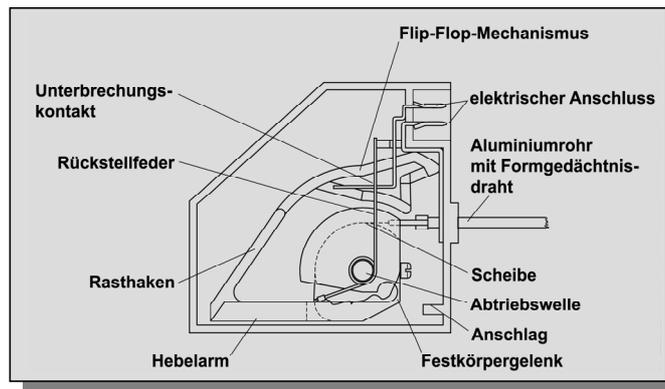


Bild 4: Entwurf des Stellantriebs

Bild 4 zeigt den mechanischen Teil des Stellantriebs. Der Drahtaktor ist dabei in einem plastisch verformbaren und elektrisch leitenden Rohr geführt, isoliert durch einen elektrisch nichtleitenden Schlauch. Die zentrale Komponente bildet ein Hebel, der viele Funktionen in sich vereint. Zunächst erfolgt ein Wandeln der translatorischen Aktorbewegung in eine Rotationsbewegung durch eine integrierte Scheibe. Ebenfalls Bestandteil des Hebels ist ein Rasthaken, der in einer Nut geführt ist und somit ein Flip-Flop-Element bildet. Zum Ausgleich der Überschwingbewegungen aus dem Flip-Flop-Element, ist ein stoffschlüssiges Festkörpergelenk mit Anschlag für den Hebel vorgesehen worden. Die Rückstellfeder, die zum Zurücksetzen des Hebels erforderlich ist, dient gleichzeitig als elektrischer Leiter für die Versorgung des Aktors mit elektrischer Energie sowie in Zusammenspiel mit einem der Anschlussleiterbleche als Unterbrechungskontakt zur Detektierung der Endposition des Hebels. Durch diese Gestaltungsmaßnahme ist es gelungen, die Schnittstelle zwischen den mechanischen und elektronischen Bauteilen auf ein zweiadriges Verbindungskabel zu reduzieren, was eine parallele Entwicklung der Steuerung unabhängig von der Weiterentwicklungen des Aktors erleichterte. Das zweite Anschlussblech wird zum formschlüssigen Fügen des Aluminiumrohrs mit dem Gehäuse genutzt.

Zur Realisierung der Steuerung wurde ein Mikrocontroller gewählt, da hierdurch die Möglichkeit eröffnet wird, auf notwendige Änderungen flexibel reagieren zu können. Ein Beispiel hierfür ist die schwer abzuschätzende Abkühlzeit des FGL-Drahtaktors, die gegebenenfalls korrigiert werden muss. Darüber hinaus konnten zusätzliche Funktionen, wie die eines automatischen Dauerbetriebs nahezu ohne Hardwareänderungen während der Steuerungsentwicklung ergänzt werden.

Die realisierte Stelleinheit ist im Gegensatz zu vielen anderen FGL-basierten Lösungen durch eine konsequente Black-Box-Bauweise charakterisiert. Der Antrieb ermöglicht durch

Variieren der Drahtlänge und des Drahtdurchmessers eine problemlose Skalierbarkeit hinsichtlich des Winkelbereichs und des Abtriebsmoments. Die Einsatzfelder des Stellantriebs liegen im Maschinenbau, der Luft- und Raumfahrt sowie in der Medizintechnik. Ferner ist der Sektor des Fahrzeugbaus von großem Interesse. Jedoch verhindern hier bislang die unzureichenden Temperaturbereiche kommerziell verfügbarer FGL-Werkstoffe einen zuverlässigen Serieneinsatz.

Die durch die Realisierung des Stellantriebs gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse fließen in eine im Rahmen des SFB 459 („Formgedächtnistechnik“) im Aufbau befindliche Wissensbasis für die Konstruktion mit Formgedächtnislegierungen [2,3] ein. Die Entwicklung von Stellantrieben auf der Basis von FGL soll auch zukünftig weiterverfolgt und in der Entwicklung eines Baukastensystems vertieft werden. Dabei gilt das Interesse unter anderem der Untersuchung von vorteilhaften Kombinationen von Aktoreffekten.

### **3 Entwicklung der Sensorkomponente Liros**

Die Fahrdynamikregelung moderner Automobile erfordert das Zusammenspiel verschiedener Sensor- und Aktorsysteme. Über die Sensoren werden die Soll- und Istgrößen des Fahrverhaltens gemessen und zur Ansteuerung der Aktoren ausgewertet. Eine Sollgröße ist die vom Fahrer über die Winkelstellung des Lenkrades vorgegebene Fahrtrichtung, deren sensortechnische Erfassung auch im Rahmen zukünftiger steer-by-wire-Anwendungen von Bedeutung ist. Die Ermittlung dieser Größe erfolgt über den Lenkwinkelsensor. Neben einer hohen Zuverlässigkeit stellt die kostengünstige Realisierbarkeit bei guter Messauflösung und geringem Bauraum eine wesentliche Anforderung an den Lenkwinkelsensor dar. Der Sensor muss den Lenkwinkel über den gesamten Drehbereich des Lenkrades erfassen und daher einen Messbereich von etwa fünf vollständigen Umdrehungen abdecken. Bei der Entwicklung des hier vorgestellten Sensorsystems lag eine zentrale Zielsetzung aus Gründen der Ausfallsicherheit in der absoluten Erfassung des Lenkwinkels über den gesamten Messbereich.

#### **3.1 Konzept**

Eine eindeutige Bestimmung des Absolutwinkels ohne Rückgriff auf elektronisch gespeicherte Winkel- oder Umdrehungsinformationen erfordert eine geeignete mechanische Kopplung zwischen Winkelstellung und zentralen Eingangsgrößen. Im Rahmen der Konzeptionsphase wurden verschiedene Domänenkopplungseffekte (z.B. potentiometrischer Effekt, photoelektrischer Effekt etc.) betrachtet und ihre nicht-elektrischen Eingangsgrößen (Länge, Lichtleistung etc.) mit der Sensoreingangsgröße „Winkel“ verknüpft. Für die hierzu notwendigen Funktionen zur Signalanpassung wurden Lösungsprinzipien generiert und darauf aufbauend Konzepte für die Realisierung des Sensors erzeugt.

Bei der Bewertung der Konzepte spielte die erwartete Qualität der Sensorausgangsgröße eine wesentliche Rolle. Hierzu mussten Abschätzungen über die Eignung des Domänenkopplungseffektes in Kombination mit der vorgeschalteten mechanischen Signalanpassung durchgeführt werden und mögliche Einflüsse konzept- und umgebungsbedingter Störgrößen berücksichtigt werden. Des Weiteren konnten bereits in dieser Phase tendenzielle Aussagen über den Aufwand für die notwendige Signalanpassung sowie über die Komplexität der konzeptbedingten Signalverarbeitung gemacht werden. In Bild 5 ist das Ergebnis der Konzeptionsphase dargestellt.

Das Konzept sieht vor, die Winkelstellung innerhalb der jeweiligen Umdrehung über ein mitrotierendes optisch codiertes Element in Lichtsignale und diese über den photoelektrischen Effekt in die elektrische Sensorausgangsgröße zu wandeln. Gleichzeitig wird ein axial verschiebliches Element über eine an der Sensorachse angebrachte Spindel in eine winkelabhängige Position bewegt. Diese axiale Position soll ebenfalls über die Beeinflussung optischer Signale codiert und durch ein photoelektrisches Element in elektrische Signale gewandelt werden. Die Winkelstellung innerhalb der Umdrehung kann in der nachgeschalteten Signalverarbeitung mit der als Maß für die Anzahl vollständiger Umdrehungen dienenden Position des axial verschieblichen Elementes verrechnet werden, um so den Gesamtwinkel zu erhalten. Die Position des axial verschiebbaren Elementes stellt bei entsprechender Auflösung bereits ein grobes Maß für den Gesamtwinkel dar. Ebenso kann die Anzahl vollständiger Umdrehungen zusätzlich elektronisch mitgezählt werden. Diese konzeptbedingte Redundanz trägt dazu bei, die Sicherheit beim Ausfall eines Teilsystems zu erhöhen.

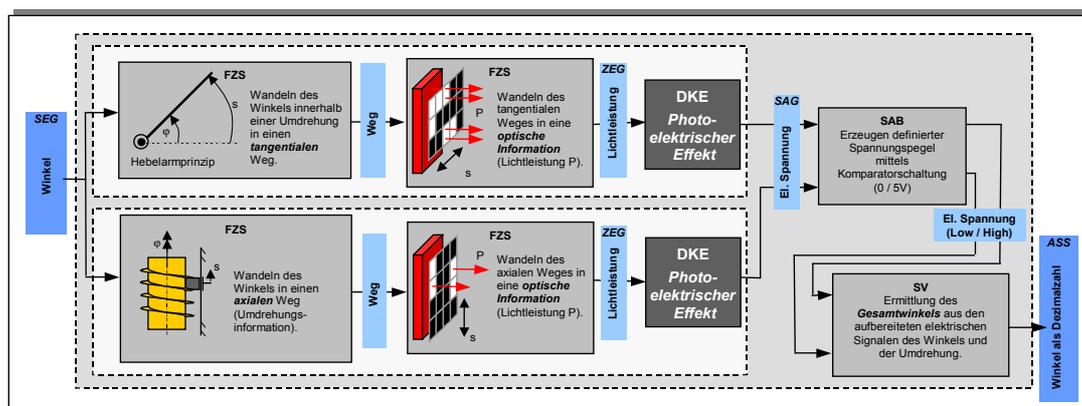


Bild 5: Konzept des Absolutwinkelsensors

Die Entscheidung für eine Nutzung des photoelektrischen Effektes ist in der geringen Störanfälligkeit und der Berührungslosigkeit begründet. Des weiteren ist in diesem Fall der Aufwand für die Signalaufbereitung gering, da die Analog-/ Digitalwandlung durch eine einfache Komparatorschaltung erfolgen kann. Für die Signalverarbeitung ist der Einsatz eines Mikrocontrollers sinnvoll, da diverse Rechenoperationen ausgeführt werden müssen.

Für den hier betrachteten Konzeptionsprozess kann festgestellt werden, dass zunächst vorrangig Lösungsprinzipien für die mechanischen Konzeptanteile generiert wurden, gleichzeitig jedoch ein Übertritt in die elektrotechnische Domäne durch Berücksichtigung der Eigenschaften verschiedener Domänenkopplungseffekte erfolgte. Insgesamt werden jene Konzepte als vorteilhaft angesehen, die bei geringem Realisierungsaufwand innerhalb der mechanischen Domäne zu elektrischen Sensorausgangsgrößen mit guter Signalqualität führen. Dies führt tendenziell zu geringem Aufwand an Signalaufbereitung und geringer Störanfälligkeit. Die hohe Flexibilität innerhalb der informationstechnischen Domäne hinsichtlich der hier realisierbaren Funktionen erlaubt einen relativ groben Detaillierungsgrad der zugehörigen Konzeptanteile.

### 3.2 Realisierung

Die Umsetzung erfolgte ausgehend von einer Betrachtung des mechanischen Konzeptanteils, wobei zunächst wichtige Parameter wie Auflösung und Codierungsart festgelegt wurden. Zur Vermeidung kritischer Übergänge wurde zur optischen Codierung der Gray-Code ausgewählt, wobei die geforderte Winkelauflösung eine Codebreite von 9 bit erforderlich macht. Zur Ermittlung der Umdrehungsinformation dient eine axial verschiebbare Mutter, die

aufgrund einer Winkeländerung eine lineare Bewegung ausführt. Die Position der Mutter wird ebenfalls über einen Gray-Code in optische Signale gewandelt. Dies erfolgt mit der Auflösung der halben Gewindesteigung, um aus der so gewonnenen Information und der Winkelstellung eine eindeutige Ermittlung der Umdrehungszahl vornehmen zu können. Eine geringere Auflösung der Mutterposition kann dazu führen, dass aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen auf eine fehlerhafte Umdrehungszahl geschlossen wird. Bei einem Messbereich von fünf vollständigen Umdrehungen ist der von der Mutter zurückgelegte Weg somit in zehn Schritte zu unterteilen, der zugehörige Gray-Code besitzt eine Breite von 4 bit. Auf Basis dieser Informationen konnte die Auswahl optoelektronischer Standardkomponenten in Form zweier Phototransistor-Arrays erfolgen, die den photoelektrischen Domänenkopplungseffekt enthalten. Der Gray-Code zur Winkelbestimmung ist auf einem mitrotierenden Acrylglasring aufgebracht, während der zur Bestimmung der Mutterposition dienende Gray-Code sich auf einem an der Mutter befestigten Acrylglasplättchen befindet.

Zur Durchleuchtung der Gray-Codes wurden LEDs mit großer Helligkeit und klarem Gehäuse ausgewählt, um einen scharfen Schattenwurf und eindeutige elektrische Ausgangssignale zu erhalten. Die Auslegung der optischen Zwischenstufe erforderte zum Teil experimentelle Untersuchungen, um die geometrische Anordnung von Lichtquelle, Codeelement und Phototransistor-Array zu optimieren. Das Konzept erfordert eine genaue Ausrichtung der optischen Komponenten relativ zum Gray-Code. Zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen wurde bei der prototypischen Umsetzung zu diesem Zweck eine Justiereinrichtung vorgesehen, was sich während der nachfolgenden Erprobungsphase als äußerst vorteilhaft erwies. Der Grobentwurf des Sensorsystems ist in Bild 6 dargestellt.

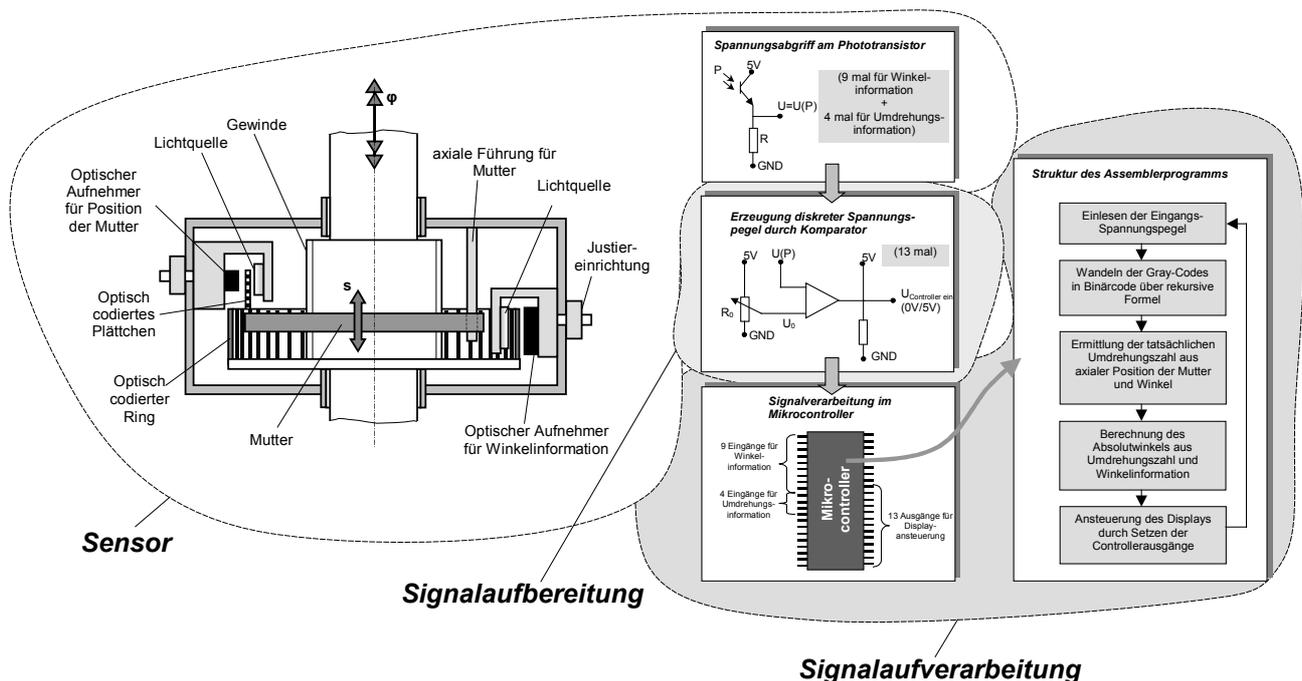


Bild 6: Grobentwurf des Sensorsystems

Zur Signalaufbereitung werden Komparatorschaltungen mit einstellbarem Schwellwert genutzt, in der die stetigen Sensorausgangsgrößen in diskrete Spannungssignale gewandelt werden. Der verwendete Mikrocontroller konnte über die Anzahl der parallel zu verarbeitenden Eingänge, der zur Ansteuerung des Displays benötigten Ausgänge sowie einer Abschätzung des Signalverarbeitungsaufwandes bereits in der frühen Entwurfsphase spezifiziert werden. Zur Erstellung des Assemblerprogrammes waren Informationen bezüglich der

von der Signalaufbereitung bereitgestellten Eingangsgrößen sowie eine genaue Festlegung der zu realisierenden Funktionen und Ausgangsbelegungen erforderlich. Auf dieser Basis konnte die Software programmiert und ihre Funktion am PC simuliert werden, bevor die mechanischen und signalaufbereitenden Komponenten komplett fertiggestellt waren.

Die Formgebung der mechanischen Bauteile musste an die Dimensionen der integrierten elektronischen Standardkomponenten angepasst werden. Beim prototypisch realisierten System wurde zur Verringerung des Entwicklungsaufwandes auf eine vollständige räumliche Integration von elektronischen und mechanischen Teilsystemen verzichtet. Es ist jedoch abzusehen, dass sich die Komplexität des Gestaltungsvorganges mit zunehmender Integrationstiefe erhöht.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Konzeption und Realisierung mechatronischer Komponenten anhand zweier Beispiele dargestellt. In beiden Fällen konnte festgestellt werden, dass die Konzeptentwicklung ausgehend von der nicht-elektrischen Seite erfolgte. Übertritte in die vor- bzw. nachgelagerte elektrotechnische Domäne waren jedoch bei der Konzipierung teilweise erforderlich.

Im Rahmen der hier beschriebenen Realisierungsprozesse konnten die notwendigen Teilaufgaben weitgehend isoliert innerhalb der im Konzept festgelegten Domänen bearbeitet werden, da durch die räumliche Trennung eine Anpassung des mechanischen Bauzusammenhanges an die Erfordernisse der Elektronik weitgehend umgangen wurde. Die Notwendigkeit einer Verzahnung der unterschiedlichen Disziplinen, insbesondere zwischen Mechanik und Elektrotechnik, gewinnt innerhalb der gestaltenden Phase mit zunehmender räumlicher Integration an Bedeutung.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Jansen, S., "Methodische Analyse von Sensorsystemen in der Automobilindustrie und Perspektiven für zukünftige Entwicklungen"  
Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2000
- [2] Welp, E.G., Breidert, J., "Knowledgebase for Designing with Shape Memory Alloys,"  
Proc. ICED 01, Glasgow, 2001.
- [3] Welp, E.G., Breidert, J., "A Supporting Tool for Designing Products Based on Shape Memory Alloys,"  
Proc. SMST-SMM, Kunming, 2001.

Dipl.-Ing. J. Breidert, Dipl.-Ing. S. Jansen, Prof. Dr.-Ing. E.G.Welp  
Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre  
Institut für Konstruktionstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150  
Tel: 0234 / 32-22636  
Fax: 0234 / 32-14159

Internet: [breidert@imk.ruhr-uni-bochum.de](mailto:breidert@imk.ruhr-uni-bochum.de)  
[jansen@imk.ruhr-uni-bochum.de](mailto:jansen@imk.ruhr-uni-bochum.de)  
[welp@imk.ruhr-uni-bochum.de](mailto:welp@imk.ruhr-uni-bochum.de)  
<http://www.ruhr-uni-bochum.de/imk/>