

# 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>

Dr. A. Huba – L. Valenta - D. Paveljeva

## **Dynamische Modellierung im mechatronischen Entwurfsprozess**

### **ABSTRACT**

The paper presents the network based methodology of dynamical modelling of mixed type mechatronic systems. We show the steps of dynamic modelling on the example of the head of CD players and the lay out of the feed-back system for control of focus distance.

### **EINLEITUNG**

In „klassischen“ mechatronischen Systemen geht es bekanntlich meistens um die Regelung zeitlich veränderlicher physikalisch-technischen Größen: Kraft, Drehmoment, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Winkel, Winkelgeschwindigkeit, Winkelbeschleunigung, oder in speziellen Aufgaben Druck, Volumenfluss, Temperatur.

Diese Größen werden an entsprechenden Punkten der zusammengesetzten Systeme kontinuierlich gemessen, und mit den vorgeschriebenen Werten verglichen. Die herkömmlichen oder die modernen adaptiven Regelungen haben dann die Aufgabe durch Befehle für die Aktuatoren in die Regelstrecke einzugreifen. Die zeitgemäßen robusten Regelungen sind imstande auch die Störungen der Umwelt aber auch die Wirkung der Veränderungen in der Struktur des Regelkreises zu kompensieren (Parameter-Adaptivität, Sliding-Mode Control, usw.).

In der klassischen Technischen Mechanik lautet die Aufgabenstellung meistens folgendermaßen: Kräfte und Drehmomente auf ein zusammengesetztes mechanisches (Schwing)System sind vorgegeben. Wie wird die Bahn der Bewegung aussehen, wie groß werden die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Winkelgeschwindigkeiten oder Winkelbeschleunigungen?

In der Mechatronik handelt es natürlich auch um zusammengesetzten mechanischen Gebilden, die Frage lautet allerdings anders: Bahnkurve, Genauigkeit, Beschleunigung und Geschwindigkeit (auch für Drehbewegungen natürlich) sind vorgegeben. Wie groß sollen die eingreifenden Kräfte und Momente sein, um diese Anforderungen erfüllen zu können? Diese Größen können nur dann bereitgestellt werden, wenn die Ausgangsgrößen kontinuierlich

messtechnisch erfasst werden, und der Regelkreis die entsprechende Rückkopplung gewährleistet.

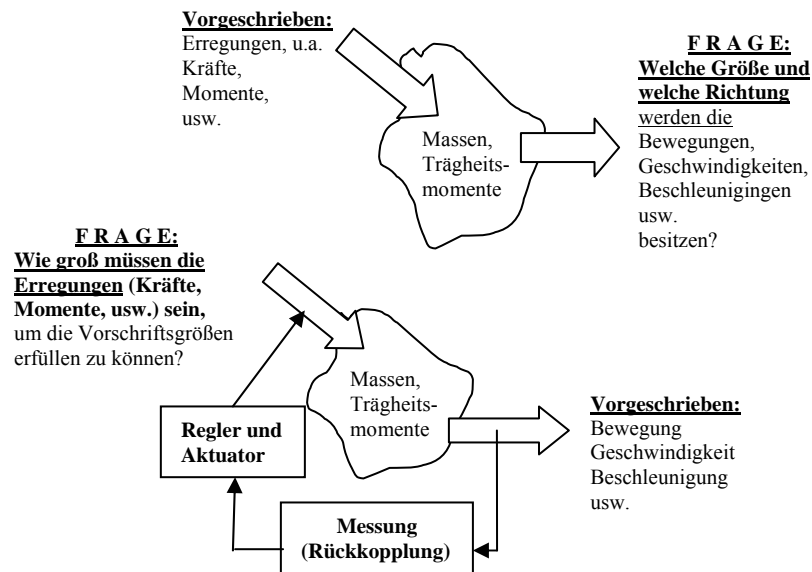


Bild 1. Zielsetzungen der klassischen Mechanik und der Mechatronik

Für den Entwurf derartiger mechatronischer Systeme benötigt man in allen Fällen die Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke, die im Allgemeinen nichtlinear ist, sich aber in einigen Fällen linearisieren lässt.

In zusammengesetzten physikalischen Systemen, bei denen die Zusammenwirkung mechanischer, elektrischer, pneumatisch/hydraulischer und thermischer Systemteile mathematisch erfasst werden müssen, kommt eine „gemeinsame technische Sprache“ besonders zu gute. Dieses Herangehen vereinfacht die Zusammenarbeit nicht nur im technischen System, sondern ermöglicht die Team-Arbeit unterschiedlicher Disziplinen. Diese gemeinsame Sprache der Modellierung ist die Netzwerktheorie.

Wir zeigen demnächst an einem typisch mechatronischen System, am CD-Abtastkopf diese einheitliche Methode zur Ermittlung des dynamischen Modells, das als Ausgangspunkt für den Entwurf der unterschiedlichen Regelkreise, wie z.B. zur Fokusregelung, Track-Abtastung, usw. dient.

## AUTOMATISCHE FOKUSSIERUNG IM CD-ABTASTKOPF

Es ist bekannt, dass die Information auf der CD-Platte in Form von „Pit's“ and „Land's“ vorliegen, wobei die Streifen von der Breite von  $0,5 \mu\text{m}$  in einer Entfernung von  $1,6 \mu\text{m}$  liegen. Die spiralförmige „Track's“ bestehend aus Heraushebungen und Aussparungen

werden mit Hilfe des kohärenten Leserstrahles auf Grund der Interferenzerscheinung abgetastet um dann die Intensitätsschwankungen des Lichtes dekodieren zu können.

Wenn es aber um derartig kleine Abmessungen und um die Lichtinterferenz geht, müssen wir entweder robuste, hochstabile mechanische Einrichtungen bauen, oder, wie es bei der CD-Technik üblich ist, auf Grund eines technischen Paradigmenwechsels *intelligente Maschinen* bauen, die mit Hilfe der Informationsverarbeitung und der Regelungstechnik die notwendige Dynamik gewährleisten.

Die Regelstrecke dieses Systems kann sogar das Symbol der Mechatronik sein, weil hier Mechanik, Elektronik und Optik auf synergetischer Weise (gegenseitig unterstützend und jedoch gleichzeitig untrennbar) vereint ist. Die aspherische Linse mit ihrer Fassung, die das Licht auf die Oberfläche der CD-Platte fokussiert, wird durch eine Federführung gerade geführt, wobei die Spule des linearen Aktuators (Tauchspule) auch gleich mit auf den beweglichen Teil montiert ist. Der Stator des Linearmotors besteht aus einem Dauermagnetkreis. Wir haben in diesem Vortrag ein Beispiel aus der Fachliteratur herangezogen um zu zeigen, dass die Fachingenieure bei mechatronischen Systemen oft nur die Bestandteile „sehen“, die zu ihrem Fachgebiet passen. Der Maschineningenieur sieht die Konstruktion, der Elektroingenieur hingegen die elektrischen Bauteile und Schaltungen. Der Verfasser der Beschreibung der CD-Technik – offensichtlich Elektroingenieur ohne Neigung zur Mechatronik - [1] gibt in einem Schaltbild den oben beschriebenen komplexen Teil als Spule an, und bleibt damit bei einem System erster Ordnung.

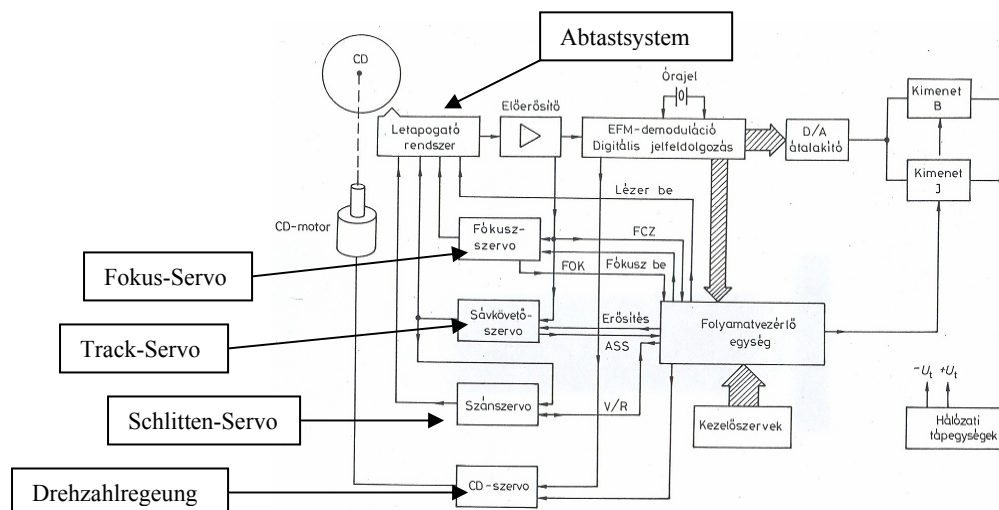


Bild 2. Die wichtigsten Regelkreise eines CD-Spielers nach [1]

Klar, er hat zum Teil Recht, aber zum Entwurf eines stabilen Regelkreises für die Lageregelung müssen die zwei weiteren Energiespeicher, wie die Masse und die Federsteifigkeit der Führung auch herangezogen werden. Bei einem derartigen Herangehen werden dann komplexe Systeme durch voneinander in gewisser Masse unabhängig arbeitende Fachleute entwickelt und die Stabilität des Regelkreises durch Nachstimmung eingestellt.

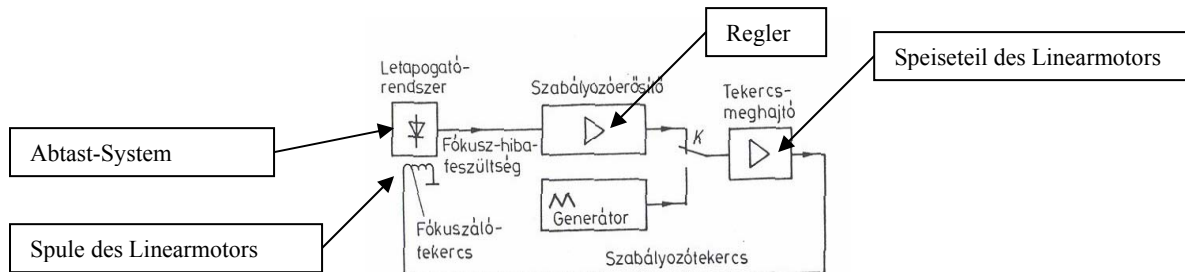
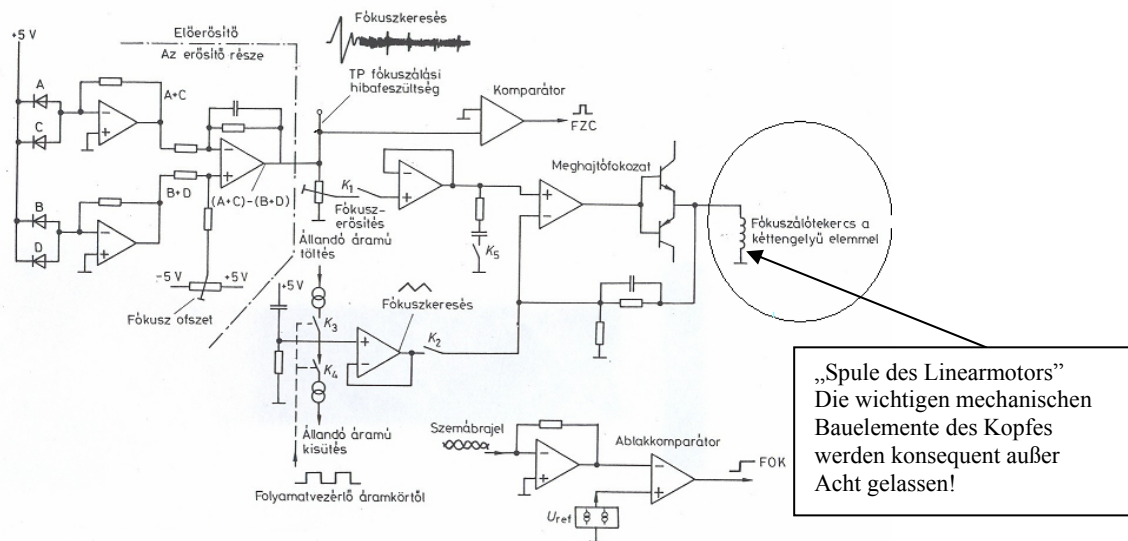


Bild 3. Vereinfachtes Blockschaltbild des Fokus-Regelkreises nach [1]



„Spule des Linearmotors“  
Die wichtigen mechanischen Bauelemente des Kopfes werden konsequent außer Acht gelassen!

Bild 4. Der Schaltkreis der Fokus-Regelung nach [1]

Im Bild 5. zeigen wir den schematischen Aufbau eines CD-Kopfes. Das Gerät besitzt unterschiedliche Regelkreise, von denen haben wir die Fokus-Regelung ausgewählt um die Modellierung komplexer Systeme demonstrieren zu können.

Die Abtastlinse ist aspherisch, wie bereits erwähnt, um den fokussierten Lichtstrahl nicht nur zur Informationsgewinnung aber auch zur Lagemessung verwenden zu können. Der Lichtfleck besitzt nämlich nur dann eine Kreisform, wenn sich der Schirm (in diesem Fall die CD-Oberfläche genau im Fokusabstand befindet. Ändert sich nun der Abstand zwischen Linse und Platte, es entstehen Lichtflecke mit Elypsen-Form, die in ihrer Achsenlage erfreulicherweise die Informationen „näher“ oder „ferner“ mit sich tragen.

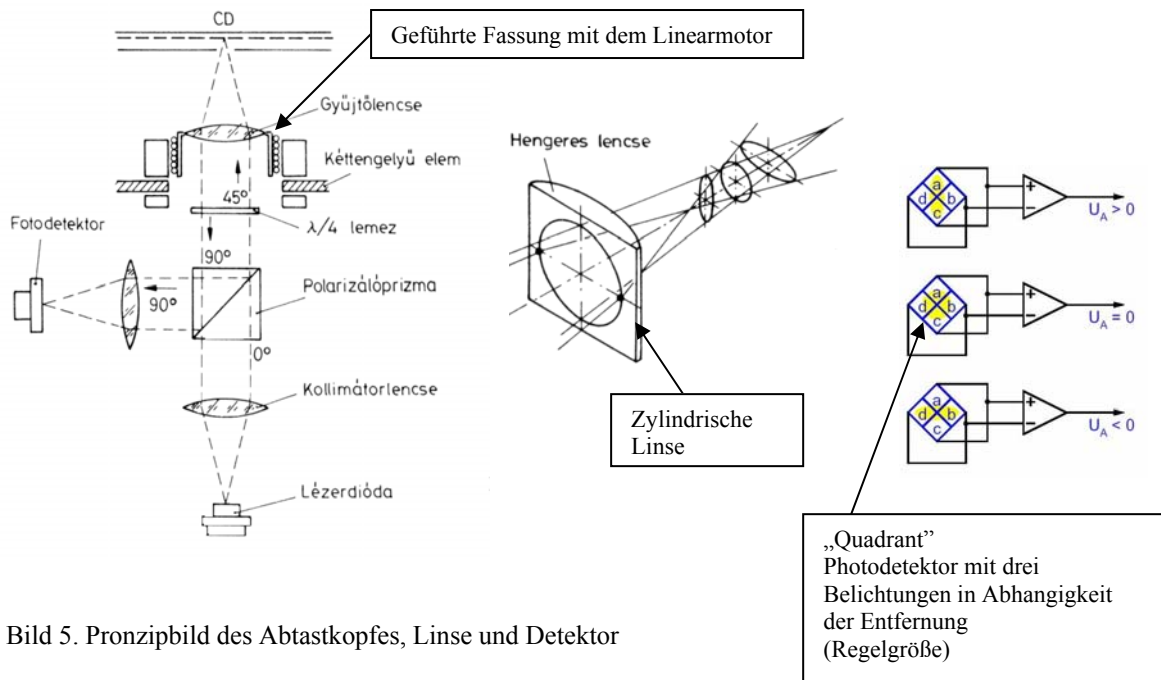


Bild 5. Prinzipsbild des Abtastkopfes, Linse und Detektor

Der von der CD-Platte reflektierte Lichtfleck wird mit Hilfe eines vierteiligen Photodetektors erfasst und durch entsprechende analoge Schaltkreise weiterverarbeitet. Die Signale der diagonal liegenden Detektoren werden summiert, um den Effekt noch deutlicher ausnutzen zu können. Auf der rechten Seite des Bildes 5. sieht man die Form der reflektierten Lichtflecke und den Strahlengang der zylindrischen Linse. Die Regelung bezeichnet man als Festwertregelung, da es hier darum geht, einen kreisförmigen Lichtfleck für die Abtastung zu sichern. Das Messsystem ist dementsprechend einfach, man braucht die Kenntnis des absoluten Abstandes nicht, hier geht es nur um die Einstellung und Erhaltung des künstlichen „Nullpunktes“ d.h. des Fokusabstandes. Nebenbei sei noch erwähnt, dass die Photodetektoren der Lagekontrolle gleichzeitig zur Abtastung der Informationen dienen. In dieser Anlage braucht man keine stabilen Gestelle oder Führungen. Die Genauigkeit wird nicht mehr durch die Mechanik, sondern mit Hilfe der Mess- und Regelungstechnik erreicht, wobei man unbedingt betonen soll, dass im Mittelpunkt weiterhin die Mechanische Konstruktion und nicht die Elektronik steht. *Die Elektronik ergänzt und nicht ersetzt die Mechanik, wie viele es oft glauben wollten.*

### DAS KORRIGIERTE MODELL DES ABTASTKOPFES

Für den Entwurf der stabilen und dynamisch optimierten Festwertregelung gilt die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke als Voraussetzung. Aus verschiedenen

physikalischen Systemen zusammengesetzte mechatronische Systeme – insbesondere, wenn einige Energiewandler auch noch vorhanden sind - werden weltweit mit Hilfe der Netzwerkanalyse mathematisch erfasst.

Zu Beginn der Arbeit wird das linearisierte dynamische Modell mit konzentrierten Parametern aufgestellt. Da die Mehrheit der mechanischen Systeme auf Grund der unterschiedlichen Reibungsarten stark nichtlinear ist, sinnvoller Weise nimmt man eine Linearisierung im Bereich des Arbeitspunktes vor. Neben anderen Vorteilen soll man an dieser Stelle die Anwendbarkeit der Impedanz-Methode erwähnen. Nachdem das lineare mathematische Modell aufgestellt ist, und die Stabilität des Regelkreises eingestellt werden konnte, ist der Zeitpunkt gekommen die Nichtlinearitäten im Modell zu berücksichtigen. Heutzutage steht eine Reihe von Simulationsprogrammen für den Entwickler zur Verfügung, die technische Realität durch Verfeinerungen und mit der notwendigen Genauigkeit anzunähern.

Die Netzwerktheorie eignet sich für die einheitliche und übersehbare Modellierung technischer Systeme, die mechanische, elektrische, pneumatische, hydraulische und thermische Funktionsteile in ihrer Wirkungsweise aufeinander wirkend vereinen. Die Netzwerktheorie verwendet zur Beschreibung der Vorgänge im Grunde genommen zwei Typen von Variablen: Die ortsgebundene, „lokale“ Größen heißen Differenzkoordinaten oder Klemmvariablen (Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit, elektrische Spannung, Druck, Temperatur) deren Unterschied die Strömung der verbleibenden Größen (Impuls, elektrische Ladung, Masse, Volumen) durch ein passives Element auslösen kann. Diese Strömungsrate wird Durchflußkoordinate oder Flußgröße genannt, und hierzu gehören Kraft, Drehmoment, elektrischer Strom, Volumenstrom und Energiestrom. Die passiven Elemente sind in zwei Gruppen unterteilt: Energiespeicher, die wiederum zwei Untergruppen besitzen (Energiespeicher mittels Differenzkoordinate, und Energiespeicher mittels Flußkoordinate) und die dissipativen Elemente an denen die Energie irreversibel dem System entzogen wird (Reibung, Dämpfung, elektrischer oder thermischer Widerstand, Strömungswiderstand).

Systeme gleichen oder verschiedenen Typs werden durch Energiewandler miteinander verbunden, die nach dem Reziprozitätsgesetz (Verluste mehr oder weniger vorhanden) arbeiten. Systeme und Variablen gleichen Typs werden durch verallgemeinerte **Transformatoren** (Hebel, Zahnradübersetzung, elektrischer Transformator, Differenz-Kolben oder Wärmetauscher). Wenn Systeme unterschiedlichen, aber die Variablen gleichen Typs sind, spricht man über **Wandler** (Zugmittelgetriebe, Zahnrad-Zahnstange, elektrodynamische Wandler, Spindel-Mutter Verbindung). Bei der dritten Form sind sowohl die Systeme als auch



## ABLEITUNG DER VERÄNDERLICHEN – PASSIVE ENERGIESPEICHER

Multiplikation ergibt Leistung (außer *)			Energiespeicherung	
Multiplikation ergibt Energie (außer *)				
Extensive Größen (Erhaltung!) „Strömung“ möglich	Intensive Größen (Ortsgebunden) „Differenzkoordinaten“	Rate der Extensiven „Flußkoordinaten“	Mit der intensiven Größe	Mit der Rate der extensiven Größe
$m \cdot \vec{v} = \vec{I}$	$\Delta \vec{v}$	$\frac{d\vec{I}}{dt} = \vec{f}$	$m \frac{v^2}{2}$	$k \frac{x^2}{2} = \frac{1}{k} \frac{f^2}{2}$
$J \cdot \vec{\Omega} = \vec{\pi}$	$\Delta \vec{\Omega}$	$\frac{d\vec{\pi}}{dt} = \vec{M}$	$J \frac{\Omega^2}{2}$	$\frac{1}{K} \frac{M^2}{2}$
Q	$\Delta u$	$\frac{dQ}{dt} = i$	$C \frac{U^2}{2}$	$L \frac{i^2}{2}$
V, m	$\Delta p$	$\frac{dV}{dt} = q_v$	$C_f \frac{p^2}{2}$	$l_f \frac{q_v^2}{2}$
Irreversibilität! Entropiegesetz! (S kann mit der Masse strömen)	* $\Delta \delta$	* $\frac{dQ_T}{dt} = q_E$ Energiefluß	$Q_T = C_t \cdot \Delta \delta$ $C_t = c_p m$	<del>nicht möglich!</del>

*Der Unterschied der „lokalen“ Größen (=Differenzkoordinaten, intensive Gr.) löst die „Strömung der verbleibenden Größen“ (=Flußkoordinaten, Rate der extensiven Gr.) aus.*

## PASSIVE BAUELEMENTE UND DEREN IMPEDANZEN

Energiespeicher				Dissipative Elemente (Energie nicht zurückgewinnbar)	
Mittels intensiven Größen		Mittels extensiven Größen			
Phys. Gleichung	Impedanzen	Phys. Gleichung	Impedanzen	Phys. Gleichung	Impedanzen
$f = m \frac{dv}{dt}$	$\frac{1}{sm}$	$f = k \int v dt$	$\frac{s}{k}$	$f = b \cdot v$	$\frac{1}{b}$
$M = J \frac{d\Omega}{dt}$	$\frac{1}{sJ}$	$M = K \int \Omega dt$	$\frac{s}{K}$	$M = B\Omega$	$\frac{1}{B}$
$i = C \frac{du}{dt}$	$\frac{1}{sC}$	$i = \frac{1}{L} \int u dt$	sL	$i = \frac{1}{R} u$	R
$q_v = C_f \frac{dp}{dt}$	$\frac{1}{sC_f}$	$q_v = \frac{1}{J_f} \int p dt$	sJ <sub>f</sub>	$q_v = \frac{1}{R_f} p$	R <sub>f</sub> R <sub>pneu</sub> R <sub>lam</sub> R <sub>turb</sub> R <sub>akust</sub>
$q_E = C_t \frac{d\delta}{dt}$	$\frac{1}{sC_\delta}$	<del> </del>	<del> </del>	$q_E = \frac{1}{R_t} \delta$	R <sub>t</sub> R <sub>rad</sub> R <sub>λ</sub> R <sub>α</sub>

die Variablen unterschiedlichen Typs, und man nennt diese Strukturelemente **Giratoren** (pneumatisch/hydraulische Kolben, piezoelektrische Wandler, akustische Wandler).

Die Energiewandler arbeiten ideal Verlustlos. Sie besitzen natürlich verschiedene Strukturelemente, wie Energiespeicher oder dissipative Elemente (Z. B.: Induktivität, Ohm'scher Widerstand, Masse, Feder und innere Dämpfung bei einem elektrodynamischen Wandler), die zweckmäßigerweise zusammen mit den übrigen passiven Elementen des Netzwerkes berücksichtigt werden.

Um bei dem vorigen Beispiel zu bleiben: Der CD-Kopf besteht aus einem mechanischen und aus einem elektrischen Teilsystem, die mit dem elektrodynamischen Wandler (Linearmotor) miteinander verbunden sind. Die an die Spule angelegte Spannung treibt einen Strom durch die Spule, die im Luftspalt des permanenten Magnetkreises auf einer Federführung aufgehängt ist. Der Strom ruft die Lorenz'sche Kraft auf die Spule hervor und bringt sie zur Bewegung (Wirkung). Bewegt sich aber die Spule im Luftspalt mit einer Geschwindigkeit senkrecht auf die Feldstärkelinien der Induktion, entsteht eine induzierte Spannung (Gegenwirkung) in der Spule, die den Spulenstrom begrenzt.

**3D Modell der  
Linsenfassung,  
Führung und der  
Spulen**



Bild 6. 3D-Modell des Abtastkopfes

Im Zeitbereich werden die Systemgleichungen auf Grund des Graphen als DGL's aufgestellt und im Operatorbereich mit Hilfe der Impedanzschaltungen meistens als Übertragungsfunktionen angegeben.

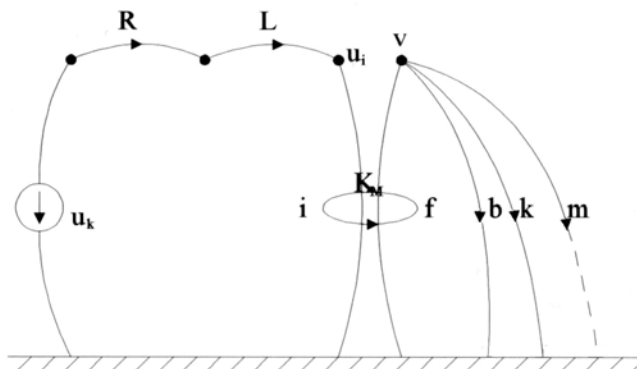


Bild 7/a. Strukturgraph des Abtastkopfes mit dem elektrodynamischen Wandler und mit den 5 passiven Bauelementen

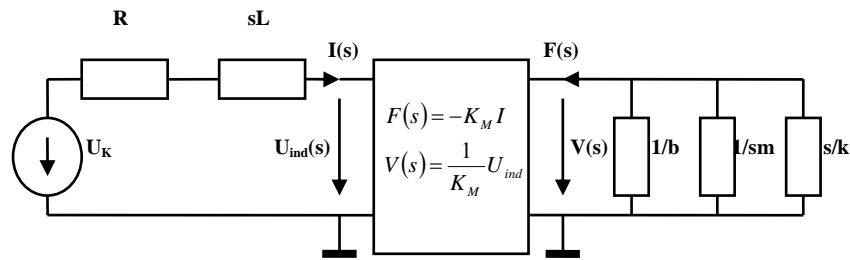


Bild 7/b. Impedanz-Netzwerk des Abtastkopfes mit dem elektrodynamischen Wandler und mit den Impedanzen der 5 passiven Bauteile

Ausgehend aus dem Graph kann man eine Maschengleichung auf der elektrischen Seite und eine Knotengleichung auf der mechanischen Seite aufschreiben. Diese Art Mischung der Methoden ist aber nur in Systemen erlaubt, wo Energiewandler vorhanden sind und lineare Beziehungen zwischen den beiden Teilen bestehen.

$$\begin{aligned}
 -u_k + u_R + u_L + u_i &= 0 & F_v + F_m + F_b + F_k &= 0 \\
 u_k = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + K_M \cdot v & & -K_M \cdot i + b \cdot v + m \cdot \frac{dv}{dt} + k \int v \cdot dt &= 0
 \end{aligned}$$

Das Gleichungssystem lautet in Matrizen-Schreibweise:

$$\begin{bmatrix} R + L \cdot s & K_M \\ -K_M & b + m \cdot s + \frac{k}{s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_k \\ 0 \end{bmatrix},$$

Voraus der gesuchte Ausgang „v“ mit dem Cramer’schen Regel leicht zu ermitteln ist:

$$v = \frac{K_M}{K_M^2 + (R + L \cdot s) \cdot (b + m \cdot s + \frac{k}{s})} u_k = s \cdot \frac{K_M}{k \cdot R} \cdot \frac{1}{s^3 \frac{L m}{R k} + s^2 \left( \frac{L b}{R k} + \frac{m}{k} \right) + s \left( \frac{b}{k} + \frac{L}{R} + \frac{K_M^2}{k \cdot R} \right) + 1} u_k$$

Man sieht, dass die Induktivität des Netzwerkes vom Bild 4. nur einen den drei Energiespeichern repräsentiert, sogar denjenigen, der zum Gesamt-Dynamik am wenigstens beiträgt. Unter den Systemparametern spielen die Zeitkonstanten wichtige Rolle. Das Verhältnis (Größenordnung) zwischen diesen entscheidet bei gegebenen Werten in der Praxis, ob die Ordnungszahl reduziert werden kann.

Das Bode-Diagramm des CD-Kopfes weist eindeutig auf diese Feststellung. Im Falle eines konkreten Kopfes des Typs KSS-152A von Sony haben wir durch Messungen bewiesen, dass die dominanten Zeitkonstanten im Bereich der niedrigen Frequenzen liegen. Die Kreisfrequenz herrührend aus der Zeitkonstante L/R fällt in den Bereich der hohen Kreisfrequenzen, weil die Induktivität im Vergleich zu den anderen Bauelementen sehr klein ist. Wenn man also beim Entwurf des Regelkreises diese Zeitkonstante außer Acht lässt, begeht man keinen großen Fehler. In der nachstehenden Übertragungsfunktion sind zunächst

noch sämtliche Parameter enthalten. Schreibt man die Übertragungsfunktion für die Position des Kopfes bei der Spulenspannung als Eingang auf, erhält man zuerst ein System dritter Ordnung.

$$Y_S = \frac{s \cdot v_S(s)}{u_k(s)} = s \cdot \frac{K_M}{k \cdot R} \cdot \frac{1}{s^3 \frac{L m}{R k} + s^2 \left( \frac{L b}{R k} + \frac{m}{k} \right) + s \left( \frac{b}{k} + \frac{L}{R} + \frac{K_M^2}{k \cdot R} \right) + 1} = \frac{A}{s^3 a_3 + s^2 a_2 + s a_1 + 1}$$

Da aber für die Dynamik im überwiegenden Maße der mechanische Teil maßgebend ist, können wir aus der Funktion die Faktoren, die mit L/R im Zusammenhang stehen, streichen. Umso mehr kommt die Unhaltbarkeit der Auffassung des Netzwerkes vom Bild 4. zum Vorschein. Gerade das dort als einzig angegebene Bauelement des Kopfes fällt weg.

Die berechnete und die gemessene Resonanzfrequenz stimmt überein:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 8,3689 \cdot 10^{-3} s} = 19,0 Hz$$

Und die Übertragungsfunktion nach der Vereinfachung:

$$Y_S = \frac{A}{s^2 T^2 + 2 \xi T s + 1}$$

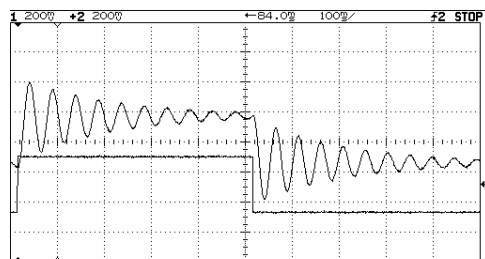
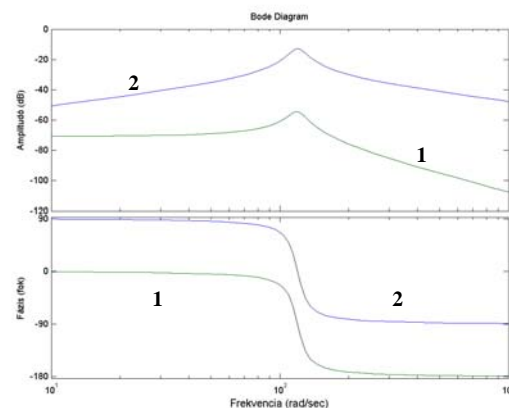


Bild 8. Übergangsfunktion des CD-Kopfes (für die Bewegung) links. Berechneter Frequenzgang für die Bewegung, „1“, und für die Geschwindigkeit, „2“



Zu Beginn des Abschnittes wurde bereits angedeutet, dass wir für den Kopf einen Regelkreis mit festen Reglerwerten verwendeten, weil sich die Parameter der Regelstrecke während des Betriebes nicht ändern. Die Phasenreserve kann mit einem reellen, technischen PID-Regler eingestellt werden. Da die Schleife wegen der Positionssteuerung bereits einen Integrator besitzt, es ist zweckmäßig den Integrator mit einem T1 Glied zu ersetzen, und den Regler mit einem Operationsverstärker aufzubauen. Wenn man das Verhältnis der Zeitkonstanten zueinander so abstimmen kann, dass einerseits die Kompensation der Resonanzüberhöhung der Regelstrecke möglich wird, zum Anderen der Reziprokwert einer Zeitkonstante ( $T_4$ ) im

Nenner in einen weit über den Arbeitsbereich des Systems liegenden Kreisfrequenzbereich verlegt werden kann, dann arbeitet der Regler optimal. Man soll also die Zeitkonstanten des Reglers folgendermaßen abstimmen:  $T_4 \ll T_2 < T_1 < T_3$ .

Damit erhält man für die Übertragungsfunktion der PID-Schaltung nach Bild 9.:

$$Y_{PID}(s) = -\frac{R_4}{R_2} \cdot \frac{[C_1 \cdot (R_1 + R_2) \cdot s + 1](C_3 \cdot R_3 \cdot s + 1)}{[C_3 \cdot (R_3 + R_4) \cdot s + 1](C_1 \cdot R_1 \cdot s + 1)} = A_{C1} \frac{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)}{(T_3 \cdot s + 1)(T_4 \cdot s + 1)}$$

Die Reziprokwerte der Zeitkonstanten T1 und T2 sind so eingestellt, dass diese die Resonanzkurve von beiden Seiten begrenzen. Die Phasenreserve wurde für  $\varphi_r = +30^\circ$  gewählt. Der Regelkreis zeigt nach zweckmäßiger Abstimmung des Reglers mit guter Näherung die Eigenschaften eines Systems zweiter Ordnung.

Das Ziel der Regelung ist die Einstellung bzw. Aufrechterhaltung des Abstandes zwischen dem Leserkopf und der CD-Platte. Mit Symbolen ausgedrückt:  $U_E |_{X_{KI} = X_F} = 0$ , siehe Bild 11.

Vergleicht man nun den Regelkreis der Bilder 3. und 11, man sieht eindeutig, dass im System nach Bild 3. gerade die wichtigen Bauelemente und Zusammenhänge blieben „versteckt“.

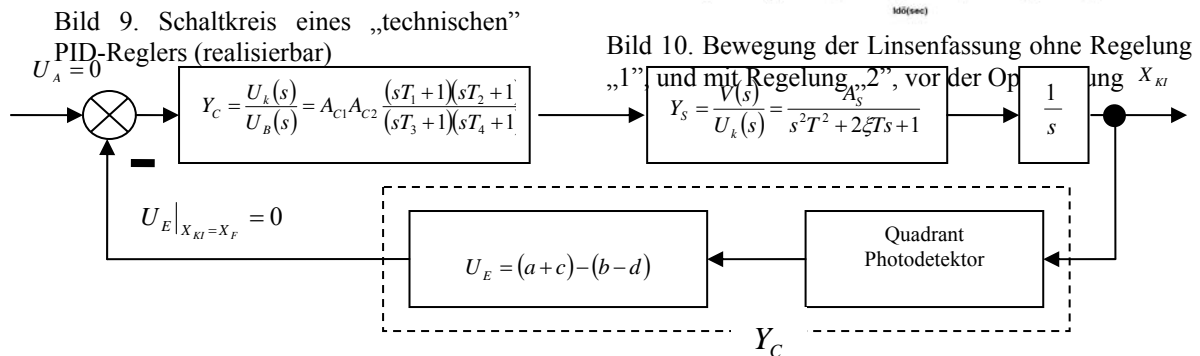
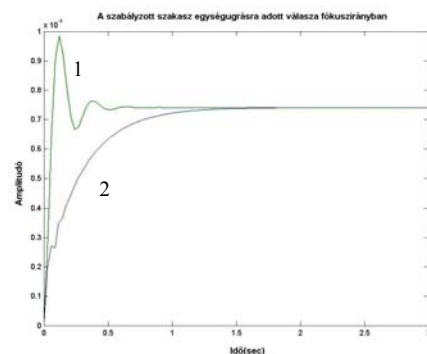
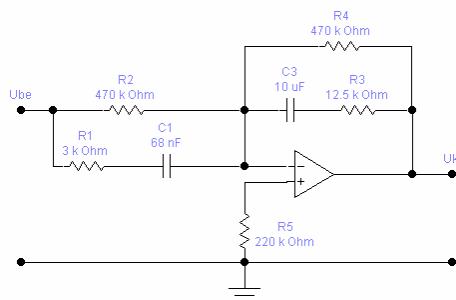


Bild 11. Blockschaltbild der Fokus-Regelung

Die hier vorgeführte Analyse dient dazu, die Methodik der dynamischen Modellierung und des Entwurfes mechatronischer Systeme an einem komplexen Beispiel zu demonstrieren.

Im Fall des CD-Kopfes kann die Konstanthaltung des Abstandes mit einem relativ einfachen Regelkreis gesichert werden, wenn man das richtige Modell und die Dynamik Regelstrecke kennt.

## ZUSAMMENFASSUNG

Mechatronische Systeme sind prinzipiell geregelte Systeme, bei denen vorgeschriebene Qualitätsanforderungen erfüllt werden sollen. Die Stabilität ist eine Grundlegende Voraussetzung, die Genauigkeit der Führungsübertragung, oder die Dynamik stehen im Mittelpunkt der Anforderungen. Der Entwurf eines mechatronischen Systems beginnt mit der Modellierung der Regelstrecke, da das Übertragungsverhalten der anderen Glieder an die Regelstrecke angepasst werden muss. Das mathematische Modell gemischter physikalischer Systeme kann am zweckmäßigsten mit der Netzwerktheorie bestimmt werden.

### Literaturhinweise:

- [1] Claus Biaesch-Wiebke: CD-Player und R-DAT-Recorder  
Vogel Verlag, Würzburg 1988. (Ungarische Ausgabe)
- [2] Petrik-Huba-Szász: Rendszertechnika, TK. Bp. 1986.
- [3] Isermann: Mechatronische Systeme, Teubner Verl. Stuttgart 2001.
- [4] Csáki: Szabályozások dinamikája, MK. Bp. 1988.

### Autorenangaben:

Dr. A. Huba, L. Valenta, D. Paveljeva  
Budapest University of Polytechnics and Economics (BME)  
Dept. of Mechatronics, Optics and Instrumentation Technology  
H-1111 Budapest, Egrý J. u. 1.  
Phone: +36 1 463 2602, Fax: +36 1 463 3787,  
E-mail: [valenta@mom.bme.hu](mailto:valenta@mom.bme.hu), [huba@mom.bme.hu](mailto:huba@mom.bme.hu)