

Rechnergestützter Entwurf geregelter fluidischer Antriebe

Elmar Vier

Forschungsbericht Nr. 3/96

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Übersicht: Die Nutzung von EDV-Werkzeugen verspricht bei der anspruchsvollen und zeitaufwendigen Projektierung geregelter fluidischer Antriebe eine deutliche Erleichterung der Ingenieurarbeit sowie die Beschleunigung des komplexen Entwurfsprozesses. In diesem Forschungsbericht wird ein Konzept zur rechnergestützten Entwicklung hydraulischer Regelungssysteme mit wissensbasierten Techniken, die auf ähnlichen Anwendungsgebieten bereits mit Erfolg eingesetzt werden, vorgestellt. Weitere Schwerpunkte des Berichtes liegen im Vergleich des Konzeptes mit verwandten Ansätzen sowie in der Erarbeitung eines grundlegenden Hilfsmittels zur Beschreibung und Analyse von Anlagenstrukturen, den Strukturebenen hydraulischer Anlagen.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg
Meß-, Steuer- und Regelungstechnik
Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Bezeichnungen	II
1 Einleitende Übersicht	1
2 Wissensbasierte Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulik- antriebe	2
3 Das Programmsystem <i>art deco</i>	6
4 Vergleich und Abgrenzung verwandter Ansätze	8
5 Strukturebenen hydraulischer Anlagen	13
5.1 Funktionale Struktur	13
5.2 Komponentenstruktur	17
5.3 Systemtheoretische Struktur	18
5.4 Folgerungen aus der Einteilung in Strukturebenen	19
5.5 Strukturebenen einer Beispielanlage	20
6 Zusammenfassung und Ausblick	25
7 Literaturverzeichnis	27

Formelzeichen und Bezeichnungen

Skalare Größen

F	[N]	Kraft
F	[-]	(Antriebs-)Funktion
HA	[-]	hydraulische Achse
H	[mm]	Hub des Zylinders
i	[mA]	Ventil-Ansteuerstrom
p	[MPa]	Druck
x	[m]	Position des Zylinderkolbens
\dot{x}	[m/s]	Geschwindigkeit des Zylinderkolbens
\ddot{x}	[m/s ²]	Beschleunigung des Zylinderkolbens

Griechische Buchstaben

φ	[-]	Flächenverhältnis
-----------	-------	-------------------

Indizierung

ist	Istwert
r	Rücklauf
soll	Sollwert
v	Vorlauf

Funktionen und Operatoren

$f(\cdot)$	[-]	Funktion auf \cdot
------------	-------	----------------------

1 Einleitende Übersicht

Durch den ständigen Wettbewerb mit konkurrierenden Antriebskonzepten wachsen die Ansprüche an die Hydraulik stetig. Um im Vergleich mit z. B. elektrischen oder hydrodynamischen Antrieben bestehen zu können, ist es erforderlich, die Leistungsfähigkeit von Hydraulikantrieben voll auszuschöpfen und zugleich laufend zu verbessern (Feldmann 1994). In diesem Zusammenhang stellt die Regelung hydraulischer Antriebe ein wichtiges Mittel zur Beeinflussung insbesondere des dynamischen Verhaltens dar, das oft von entscheidender Bedeutung ist.

Im Rahmen dieses Forschungsberichtes wird das Konzept für ein Softwaresystem entworfen, das einen Beitrag zur Unterstützung des Entwicklers bei Entwurf und Auslegung einer solchen Anlage leistet (Abschnitt 2). Damit soll der Projektingenieur von denjenigen im Entwicklungsprozeß anfallenden Aufgaben entlastet werden, deren Bearbeitung besonders arbeitszeitintensiv ist. Innovative Aspekte der Gesamtkonzeption bestehen in der Zielsetzung, einerseits auch komplexe Regelungsstrategien als Lösungsmöglichkeiten einzubeziehen und andererseits den Entwurf des geregelten Antriebs entsprechend vorzugewandelter Kriterien zu optimieren.

Für die Umsetzung des Konzeptes innerhalb eines Computerprogrammes ist der Einsatz wissenschaftlicher Techniken vorgesehen, die sich bei der Lösung von Entwurfsaufgaben bereits bewähren konnten (Kleine Büning u. a. 1995). Als Basis für eine Realisierung des Konzeptes dient das in Abschnitt 3 vorgestellte Programmsystem *art^{nt}deco*, dessen Leistungsumfang entsprechend erweitert werden soll. Eine Gegenüberstellung mit Entwicklungen, die ebenfalls Ziele der rechnerbasierten Entwicklung und Projektierung hydraulischer Anlagen verfolgen, führt zu einer Einordnung des Konzeptes der *wissenschaftsbasierten Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulikantriebe* in den Kreis der Software-Werkzeuge für die Hydraulik (Abschnitt 4).

Einen grundlegenden Schritt bei der Problemlösung bildet die Analyse der betrachteten Anlage. In Abschnitt 5 werden unterschiedliche Strukturebenen hydraulischer Anlagen eingeführt, deren Erkennung und Auswertung in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag leisten kann. Aus den so erzielten Analyseergebnissen können dann Hinweise abgeleitet werden, wo und in welcher Form ein Eingriff in die Systemdynamik erfolgen sollte. Auf diese Weise wird also zugleich der Syntheseprozess unterstützt.

Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten (Abschnitt 6).

2 Wissensbasierte Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulikantriebe

Der Entwurfsprozeß hydraulischer Systeme ist durch ein iteratives Vorgehen gekennzeichnet. Bild 2.1 verdeutlicht diesen Ablauf ausgehend von den Anforderungen des Kunden, die das Sollverhalten der Anlage definieren (vgl. Kleine Büning u. a. 1995).

Beim ersten Durchlauf ist ein Vergleich von Soll- und Ist-Verhalten noch nicht möglich. Der Projektbearbeiter legt in einem Syntheseschritt zunächst die Anlagenstruktur grob fest. Durch die sich anschließende Parametrierung wird der Hydraulikantrieb vollständig bestimmt. Die Ausarbeitung des Grobentwurfs beginnt mit der Analyse der Anlage hinsichtlich ihres Systemverhaltens. Aus einem Vergleich von gefordertem und tatsächlichem Verhalten entwickelt der Ingenieur Ansätze zur Modifizierung des Antriebs, die i. allg. zur Auswahl einer Regelungsstrategie sowie einer erneuten Parametrierung führen. Dieser iterative Prozeß wird solange wiederholt, bis eine hinreichende Übereinstimmung von Soll- und Ist-Verhalten erreicht ist, d. h. die Anforderungen durch die Anlage erfüllt werden.

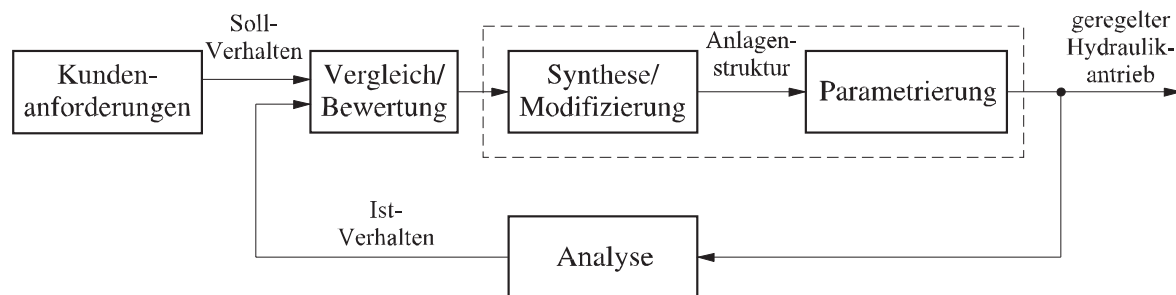


Bild 2.1: Entwurf geregelter hydraulischer Antriebe – konventionell

Der Entwurf geregelter hydraulischer Antriebe stellt den Projektingenieur vor eine anspruchsvolle Aufgabe: Für die Bearbeitung sind vertiefte Kenntnisse der Theorie dynamischer Systeme, die Verfahren zur Behandlung der auftretenden meß- und regelungstechnischen Probleme bereitstellt, ebenso Voraussetzung wie das Verständnis von Aufbau und Arbeitsweise hydraulischer Anlagen sowie der Signal-Elektronik. Bedingt durch die Vielschichtigkeit sowohl der Problemstellung als auch ihrer Lösungsmöglichkeiten gestaltet sich der Entwicklungsprozeß gleichermaßen komplex und zeitaufwendig. Hier liegt der Ansatzpunkt, den Ingenieur durch eine leistungsfähige Software zu entlasten.

Bei der Projektierung und Funktionsprüfung hydraulischer Anlagen konnten durch die Anwendung wissensbasierter Techniken bereits gute Ergebnisse erzielt werden. Ein Beispiel gibt das von Lemmen (1995) und Stein (1995) entwickelte Expertensystem *„deco“*, das als Ausgangspunkt für den Entwurf *geregelter* Hydraulikantriebe genutzt werden soll (s. Abschnitt 3). Ein solches wissensbasiertes System gestattet neben der Verarbeitung von symbolischen und numerischen Größen u. a. auch die Formulierung von Anweisungen, die an Bedingungen geknüpft sind. Wissen unterschiedlicher Qualität kann so innerhalb eines Programmes einheitlich verarbeitet werden.

Das Konzept zur wissensbasierten Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulikantriebe wird wie folgt formuliert:

Anhand der durch die Kundenanforderungen definierten Funktion entwickelt der Anwender in einem ersten Entwurf die Grobstruktur der Anlage. Darauf aufbauend unterstützt das wissensbasierte System den Prozeß der Detailplanung und Ausarbeitung. Mit dem Ziel der Einhaltung insbesondere dynamischer Anforderungen werden die Anlagenstrukturen überarbeitet und ergänzt – u. a. durch die Auswahl einer geeigneten Regelungsstrategie. Dabei zählt die Parametrierung von Anlage und Regelung gleichermaßen zu den Aufgaben des Programmsystems. Der gesamte Entwicklungsprozeß soll darüber hinaus durch ein vorzuziehendes *globales* Optimierungskriterium, wie z. B. Regelgüte, Wirtschaftlichkeit etc., gesteuert werden können.

Zum Vergleich mit der konventionellen Vorgehensweise illustriert Bild 2.2 den Ablauf und die Aufgabenverteilung bei dem vorgestellten rechnerunterstützten Ansatz. Den Ausgangspunkt für die Entwicklung bilden unverändert die Wünsche des Kunden, die in Zusammenarbeit von Auftraggeber und -nehmer spezifiziert und üblicherweise in Form eines Pflichtenheftes als Anforderungsprofil der Anlage festgehalten werden (vgl. Vier 1995).

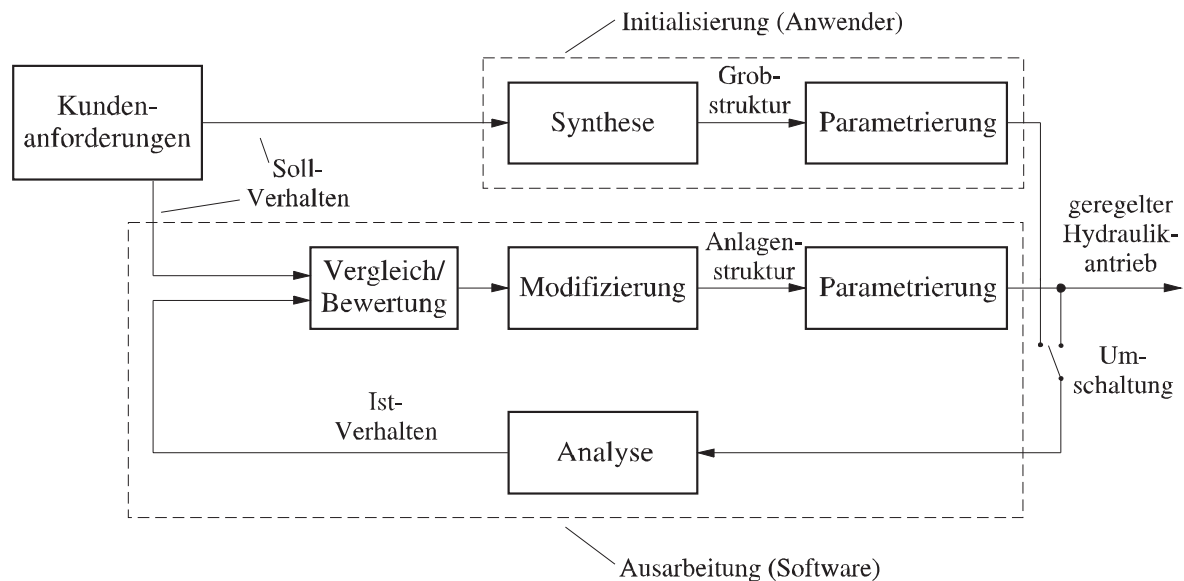


Bild 2.2: Entwurf geregelter hydraulischer Antriebe – rechnerunterstützt

Die Aufgabe des Entwicklers besteht zunächst in einer ersten Interpretation der Kundenwünsche und der Synthese einer Anlagen-Grobstruktur als Ausgangspunkt für die Projektierung. Gemeinsam mit der Parametrierung des Antriebes kann dieser Schritt als *Initialisierung* bezeichnet werden. Er liefert den Vorentwurf einer unregelmäßigen Hydraulikanlage, dessen *Ausarbeitung* anschließend – in Bild 2.2 als Umschalten gekennzeichnet – durch das wissensbasierte Software-Werkzeug unterstützt wird. Dieses führt eine umfangreiche Analyse des Antriebsverhaltens sowie einen Vergleich mit dem Soll-Verhalten

durch. Aus der Bewertung der Ergebnisse dieses Vergleiches leitet sich die Modifizierung der Anlage ab, die u. a. in der Auswahl einer Regelungsstrategie bestehen kann. Vor dem Hintergrund der Ausnutzung aller verfügbaren Möglichkeiten einer Einflußnahme auf das dynamische Verhalten ist aber auch die konstruktive Änderung des Anlagenaufbaus – etwa durch das Hinzufügen oder Entfernen von Komponenten – einzubeziehen. Der konstruktive Aufbau bestimmt das Verhalten der Regelstrecke und besitzt somit einen bedeutenden Einfluß auf die Systemdynamik. Eine wiederholte Parametrierung schließt den Überarbeitungsprozeß ab. Sind die gestellten Anforderungen erfüllt, so muß das Analysemodul aus Bild 2.2 den Iterationsprozeß selbständig abbrechen können.

Ein besonderer Aspekt der Konzeption ist die angestrebte Optimierung des Auslegungsvorgangs hinsichtlich übergeordneter Kriterien. Das Programmsystem soll es ermöglichen, einen hydraulischen Antrieb – jeweils unter Einhaltung der Kundenforderungen – z. B. im Hinblick auf eine Kostenminimierung auszulegen oder auch die Lösung zu favorisieren, die – vor dem Hintergrund der Verfügbarkeit von Bauelementen – am besten zur Einhaltung einer Terminbindung geeignet ist.

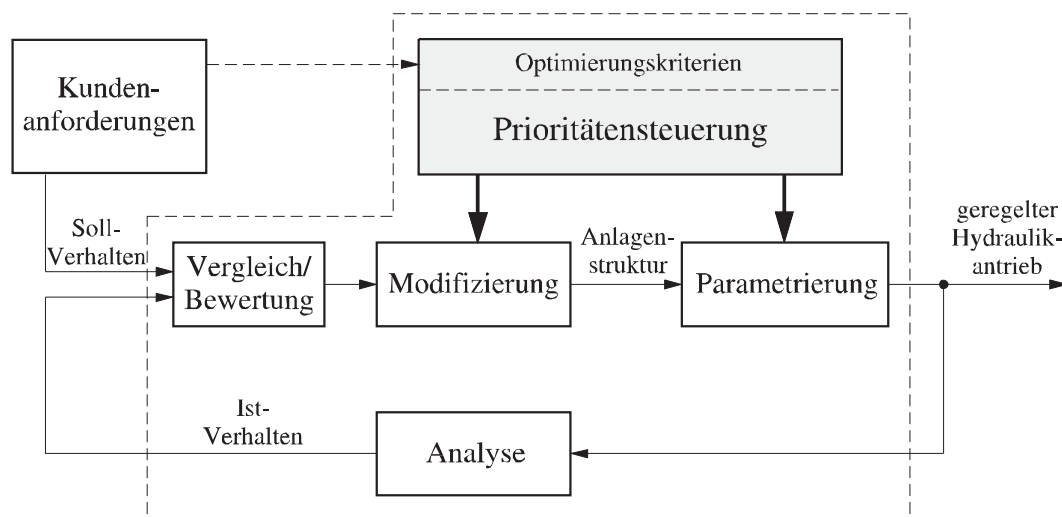


Bild 2.3: Erweiterte software-unterstützte Ausarbeitung

In Ergänzung zu Bild 2.2 wird damit eine *Prioritätensteuerung* erforderlich, die aus unterschiedlichen, vom Programm generierten Handlungsmöglichkeiten die Alternative auswählt, die neben der Erfüllung der Kundenanforderungen (allgemein) auch das jeweils vorgegebene Optimierungskriterium berücksichtigt. Bild 2.3 zeigt die entsprechende Erweiterung des Ablaufplans.

Die gewählte Aufgabenverteilung zwischen Anwender und Computerprogramm ergibt sich aus der verfolgten Zielsetzung, den Entwurfsprozeß als Ganzes zu optimieren. Dies setzt eine den spezifischen Fähigkeiten angepaßte Beteiligung des menschlichen Experten und eines informationsverarbeitenden Systems an der Problemlösung voraus.

Vorteile des manuellen Entwurfs geregelter Antriebe durch einen Hydraulikexperten gegenüber einer automatisierten Bearbeitung mit informationstechnischen Methoden bestehen vor allem in den Tätigkeitsbereichen, die *Interpretationsvermögen*, *Kommunikationsfähigkeit*, *Kreativität* sowie *Erfahrung* und *Intuition* erfordern. Dies ist insbesondere bei der Festlegung der Anforderungen im Kontakt mit dem Kunden sowie bei der raschen Erstellung eines ersten Anlagenentwurfs der Fall. Aufgrund der vorhandenen Übersicht über den Einfluß verschiedener Faktoren versteht es der menschliche Experte, unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen die Grobstruktur des Hydraulikantriebes in kurzer Zeit zu entwerfen.

Im Hinblick auf die Unterstützung der Ingenieur Tätigkeit bei der Entwicklung geregelter hydraulischer Antriebe wird das Ziel verfolgt, die Leistungsfähigkeit informationsverarbeitender Systeme so weit wie möglich zu nutzen bzw. auszubauen. Als Anwendungsbereiche wissensbasierter Systeme erscheint im Hinblick auf den Entwurf geregelter hydraulischer Antriebe die effiziente Bearbeitung folgender Teilaufgaben als aussichtsreich:

- Bereitstellung leistungsfähiger Algorithmen für die Berechnung und Simulation hydraulischer Antriebe,
- Analyse des Ist-Zustandes der Anlage,
- Bewertung der Analyseergebnisse anhand des Vergleichs mit den gestellten Anforderungen,
- Generierung alternativer Handlungsmöglichkeiten sowie die
- Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung während der Problemlösung.

Ein weitergehendes Ziel bei der Entwicklung dieses Software-Werkzeugs bildet die Einbeziehung komplexer Regelungsstrategien. Aufgrund der Verarbeitung innerhalb eines Computerprogrammes gilt eine strukturierte Vorgehensweise als obligatorisch, so daß in diesem Zusammenhang alle Verfahren in Frage kommen, deren Verläßlichkeit abgesichert ist und die eine prozedurale Vorgehensweise zulassen.

Für den Einsatz in der Praxis ist die Effizienz des konzipierten Software-Werkzeugs von entscheidender Bedeutung. Das heißt, ein Programmsystem ist für den Anwender nur dann von Nutzen, wenn die Erarbeitung aussagekräftiger Ergebnisse in hinreichend kurzer Zeit möglich ist. In dieser Hinsicht wird an das Konzept von *„deco“* angeknüpft, das als leistungsfähiges Simulations-Werkzeug genutzt werden soll. Darüber hinaus ist in allen Teilbereichen stets ein Vergleich von Aufwand und Nutzen durchzuführen, um eine „gesunde“ Relation sicherzustellen. Aus diesem Grunde wird z. B. das Anwendungsgebiet für die Auslegung geregelter fluidischer Antriebe auf den Bereich der hydraulischen Standardprobleme eingegrenzt, die etwa 95 % der Anwendungen ausmachen. Die Erfassung der darüber hinausgehenden Spezialfälle ist programmtechnisch nicht sinnvoll. Die Ausgestaltung der Software muß außerdem berücksichtigen, daß die Wissensbasis jederzeit durch neue Erkenntnisse zu ergänzen sein sollte, d. h. die Offenheit und Erweiterbarkeit des Programmes ist unbedingt zu gewährleisten.

3 Das Programmsystem *art deco*

Die Umsetzung des Konzeptes eines wissensbasierten Entwurfs geregelter Hydraulik- antriebe baut auf dem Programmsystem *art deco*¹ auf, das einen Teil der benötigten Basis- dienste bereits zur Verfügung stellt. Im folgenden wird das wissensbasierte System *art deco* umfassend beschrieben und der gegenwärtige Entwicklungsstand dargestellt.

Bei der Analyse der Inbetriebnahmesituation in der Hydraulik erweist es sich als günstig, auftretende Fehler so früh wie möglich zu erkennen. Daher wird die Prüfung der Funktions- fähigkeit einer Anlage mit Hilfe des Programmes in die Projektierungs- und Konstruk- tionsphase vorverlegt, wodurch sich der Zeit- und Kostenaufwand für eine Fehlerkorrektur erheblich verringert.

In Anlehnung an die dem Hydraulik- experten geläufige Art der Pro- blemformulierung arbeitet *art deco* auf der Grundlage eines Hydraulik- schaltplans, der wie bei einem reinen CAD-System am Bildschirm erstellt wird (Bild 3.1). Die ver- wendeten Bauteile werden dazu aus einer Bauteilbibliothek aus- gewählt. In Bild 3.1 ist zusätz- lich die Dialogbox für einen Diffe- rentialzylinder abgebildet, mit deren Hilfe die Parameter der Kom- ponente festgelegt werden. Hinter dem graphischen Abbild der An- lage verbergen sich funktionale Mo- delle des technisch-physikalischen Verhaltens der einzel- nen Eleme- te. Diese sind in einer eigens ent- wickelten Beschreibungssprache formuliert, die u. a. der dem Ingenieur geläufigen Form der mathematischen Darstellung durch Gleichungen Rechnung trägt. Dadurch wird zugleich eine einfache Möglichkeit zur Veränderung und Ergänzung der Komponentenbibliothek sowie der Definition neuer Elemente eingeräumt.

Die Beschreibungssprache unterstützt die Verarbeitung von symbolischen und numeri- schen Werten sowie die Formulierung von konditionalen Ausdrücken. Sie dient außerdem als Werkzeug zum Wissenserwerb, da sie einen Zugang zur Wissensbasis schafft. So

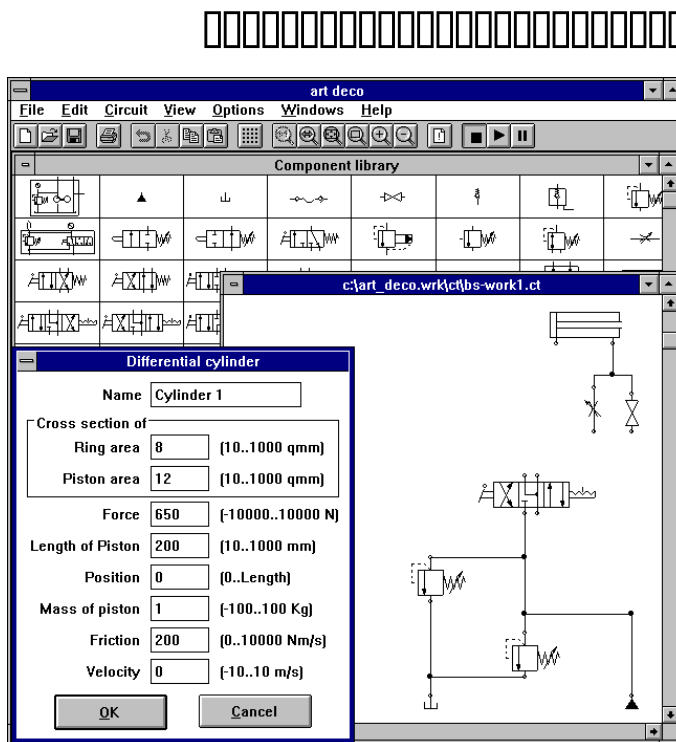


Bild 3.1: Schaltplanerstellung mit *art deco*

¹ Das Programmsystem *art deco* wurde innerhalb eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Gemeinschaftsprojektes der Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg und der Universität -GH- Paderborn von Lemmen (1995) und Stein (1995) entwickelt.

können Komponenten entworfen, Verhalten definiert und Eigenschaften zugeordnet werden. Dadurch bietet sich stets die Möglichkeit, aktuelle Neuentwicklungen hydraulischer Komponenten einzubeziehen.

Im Zentrum des Interesses steht, wie bereits angedeutet, die *Funktionsprüfung* einer Hydraulikanlage im Hinblick auf die Einhaltung der vom Kunden gestellten Anforderungen. Die Prüfungsmechanismen bzw. -algorithmen von ^{art}deco werden unterteilt in

- Schnittstellenprüfung,
- statische Funktionsprüfung und
- dynamische Funktionsprüfung.

Unter der **Schnittstellenprüfung** ist eine formale Prüfung der Komponenten- und Leitungsanschlüsse auf Richtigkeit und Kompatibilität zu verstehen. Hier werden

- syntaktische Fehler (z. B. offene Leitungen),
- geometrische Fehler (z. B. falsche Anschlüsse),
- logische Fehler (z. B. Kolbenbewegungen, die im Widerspruch zu Ventilschaltstellungen stehen) sowie
- Dimensionierungsfehler (z. B. Pumpen, deren Leistungsbereich überschritten wird)

unterschieden. Die Schnittstellenprüfung ist vollständig in ^{art}deco implementiert und operiert z. T. online: Geometrisch falsche Verbindungen werden z. B. vom Programm nicht akzeptiert, so daß entsprechende Fehler a priori ausgeschlossen werden.

Zur Durchführung der **statischen Funktionsprüfung** wird aus der Schaltplanstruktur, den technologischen Anforderungen und den lokalen Modellen der Einzelkomponenten automatisch ein – zumeist nichtlineares – Gesamtmodell der Anlage generiert. Mit Hilfe spezieller Verfahren werden dann alle Systemzustände zu jeder gewünschten Zeit berechnet und angezeigt, wodurch ein Vergleich mit den Anforderungen ermöglicht wird. Die statische Funktionsprüfung ist bereits voll funktionsfähig und in ^{art}deco implementiert.

Die Untersuchung der Systemdynamik soll im Rahmen einer **dynamischen Funktionsprüfung** erfolgen. Von zentraler Bedeutung ist hierbei zunächst die automatisierte Modellbildung: Aus einer Menge unterschiedlich genauer Beschreibungen der Dynamik der einzelnen Komponenten werden entsprechend dem Simulationszweck passende Modelle der Komponenten ausgesucht (Modelltiefenbestimmung) und zu einem Gesamtmodell verwoben. Zur Modellauswertung wird daran anschließend automatisch ein geeignetes numerisches Verfahren einschließlich geeigneter Simulationsparameter ausgewählt. Dieser Teilbereich von ^{art}deco ist in (Lemmen 1995) bereits beschrieben, wurde jedoch noch nicht im Software-System selbst implementiert. Für ein Programm-Modul zur Analyse der Simulationsergebnisse, das zugleich auch eine Überprüfung hinsichtlich der Einhaltung dynamischer Anforderungen umfaßt, ist z. Z. noch kein detailliertes Konzept vorhanden.

4 Vergleich und Abgrenzung verwandter Ansätze

Die Ansätze zur rechnerunterstützten Projektierung fluidtechnischer Systeme reichen von der Schaltplan- und Stücklistenenerstellung über die statische Berechnung einfacher Schaltkreise bis hin zur Simulation der nichtlinearen Dynamik komplexer Hydraulikantriebe. Im folgenden Abschnitt werden einige Software-Werkzeuge für die Hydraulik anhand ihrer charakteristischen Eigenschaften und Zielsetzungen vorgestellt und zu dem hier verfolgten Ansatz (vgl. Abschnitt 2) in Bezug gesetzt. Aus dieser kritischen Betrachtung heraus ergibt sich – in Ergänzung zu den vorangegangenen Abschnitten – eine klare Abgrenzung des dargelegten Konzeptes zu den bestehenden bzw. in der Entwicklung befindlichen verwandten Ansätzen.

Bestrebungen, die Projektierung hydraulischer Antriebssysteme durch Datenverarbeitungssysteme zu unterstützen, führten zu Entwicklungen auf den folgenden Anwendungsebenen:

- Anpassung allgemeiner CAD-Systeme für die Schaltplanerstellung und Durchführung von Berechnungen auf Teilgebieten der Hydraulik,
- rechnergestützte „Projektierungsassistenten“, d. h. Programme, die in erster Linie die Organisation und den Ablauf des Entwurfsprozesses steuern,
- Programme zur Berechnung und Simulation der Dynamik hydraulischer Antriebe,
- Expertensysteme für die Projektierung und Reglersynthese sowie
- Systeme zur automatischen Reglerauslegung.

Anpassungen allgemeiner CAD-Systeme

Einer der ersten Ansätze zum Einsatz der EDV als Projektierungshilfe in der Fluidtechnik bestand in der Einrichtung von Symbolbibliotheken für hydraulische Bauelemente, die als Zusatzwerkzeug innerhalb eines CAD-Programmes zur normgerechten Erstellung von Hydraulikschaltplänen dienten. Erweitert wurden diese Systeme häufig durch Module zur Stücklistenenerstellung auf Grundlage der Zeichnung sowie zur Kalkulation und Angebotserstellung unter Einbindung von Preislisten (Foitzik 1991a, Foitzik 1991b). Darüber hinaus gibt es eine große Anzahl von Programmen, mit deren Hilfe ein mehr oder minder begrenzter Umfang von Hydraulikberechnungen durchgeführt werden kann; Will u. a. (1995) stellen z. B. eine Software zur Berechnung von Verlusten hydraulischer Widerstandselemente und Komponenten vor. Es handelt sich hier – wie bei der Mehrzahl der Softwareentwicklungen in diesem Bereich – um Einzellösungen, d. h. um Dienstleistungen für stark eingeschränkte Anwendungszwecke.

Organisation des Projektierungsablaufes

Feldmann und Nissen (1992) beschreiben einen Weg zur Integration und datentechnischen Verknüpfung der einzelnen, während der Projektierung anfallenden Aufgaben. Das von ihnen entwickelte Programmsystem stellt somit einen rechnergestützten „Assistenten“ dar. Dieser übernimmt die Ablauforganisation des Projektierungsprozesses von der Aufgabenerfassung beim Kunden bis zur Übergabe der vollständigen Anforderungsliste an die Konstruktionsabteilung. Dabei werden gewisse Basisdienste wie Berechnung, Kommunikation mit externen EDV-Systemen und Dokumentation der Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Die Auslegung des Hydrauliksystems wird hier allein anhand des statischen Verhaltens vorgenommen.

Simulation der Dynamik hydraulischer Antriebe

Mit steigenden Ansprüchen an die Leistungsfähigkeit hydraulischer Antriebe wird die Betrachtung der Systemdynamik erforderlich. Damit verbunden ist die Implementierung von Modellen für das dynamische Verhalten der Hydraulik-Komponenten sowie numerischer Integrationsverfahren zur Lösung der Differentialgleichungen. Für diesen Teilbereich gibt es eine Reihe z. T. sehr unterschiedlicher Lösungen.

Die ersten Computerprogramme dieser Kategorie konzentrierten sich auf die prinzipielle Umsetzung der Simulation, ohne sich an einen weiten Kreis von Adressaten zu wenden. Programmsysteme wie DSHS (Hoffmann und Hesse 1980) und DIGSIM (Mock und Metzner 1984) erfordern u. a. gute Kenntnisse der Theorie dynamischer Systeme, einer Programmiersprache und des internen Programmaufbaus. Zum Teil müssen die komplexen Blockschaltbilder der Hydraulikkomponenten und -schaltungen vom Anwender selbst aufgestellt und bearbeitet werden. Dadurch ist ein Zugang nur für Spezialisten gegeben. DSHS arbeitet bereits mit unterschiedlich komplexen Modellen für die Beschreibung des Komponentenverhaltens – vergleichbar mit dem Konzept der Modelltiefen in *art^ydeco* (s. Abschnitt 3).

Das Programmsystem *art^ydeco* zählt zu der Gruppe neuerer Entwicklungen, die durch eine hohe Bedienerfreundlichkeit beabsichtigen, einen großen Anwenderkreis anzusprechen. Einerseits wird durch Benutzeroberflächen, Online-Hilfen und einen übersichtlichen Programmaufbau eine einfache Bedienbarkeit erreicht. Andererseits bildet der Hydraulikschaltplan die dem Anwender vertraute graphische Grundlage für die Auslegung. Ihm werden für Berechnung und Simulation benötigte Informationen entnommen (Lemmen und Stein 1994). Zur Dokumentation verwendet *art^ydeco* für den Hydraulikplan die nach DIN ISO 1219 (1978) genormten Schaltzeichen sowie Darstellungen in Funktionsdiagrammen für die Zeitverläufe.

Das Simulationswerkzeug HYSYS (Feuser und Piechnick 1990) stellt ein modellorientiertes System dar, bei dem die Gleichungen für bestimmte Hydrauliksysteme vordefiniert sind.

Es besteht aus vier eigenständigen Modulen für die Bearbeitung entsprechender Grundschaltungen (z. B. ventilgesteuerte Zylinderantriebe, hydrostatische Getriebe etc.). Aufgrund dieser fixierten Struktur der Simulationsmodelle ergibt sich in bezug auf mögliche Untersuchungsobjekte eine starke Einschränkung der Flexibilität und Variationsbreite. Das Anwendungsgebiet von HYSYS liegt in der Projektierung geregelter Standardachsen mit vorgegebenen Reglerstrukturen.

Ein Ansatz, der den Möglichkeiten des Expertensystems ^{art}*deco* näherkommt, stellt das Programm MOSIHS (Piechnick und Feuser 1994) dar. Es basiert auf einer Modellbibliothek, aus der Komponenten entnommen und zu beliebig komplexen elektro-hydraulischen Systemen zusammengesetzt werden können. Damit ist es auf den Bereich der Neuentwicklung von Anlagen mit ggf. mehreren, geregelten hydraulischen Achsen ausgerichtet. Ein interessanter Aspekt dieses Werkzeugs ist die Entwicklung einer Schnittstelle zu dem Programm ADAMS, das zur Simulation, Analyse und Animation komplexer Mehrkörperstrukturen dient (Piechnick und Hoffmann 1996). Somit kann das Verhalten hydraulisch angetriebener Gesamtsysteme untersucht werden.

Das Simulationsprogramm *DSHplus* (Kett 1993) geht als Weiterentwicklung aus dem Vorläufer *DSHS* hervor. Es verfügt nunmehr auch über eine Benutzeroberfläche sowie die graphische, bauteilorientierte Eingabe mit Hilfe einer Bauteilbibliothek. *DSHplus* umfaßt darüber hinaus die Modellerstellung, Simulation und Dokumentation. In (Kett 1995) wird jedoch darauf hingewiesen, daß zur Bestimmung von Systemordnungen für die Simulation und die Beurteilung der Ergebnisse weiterhin ein gewisses Verständnis des simulierten Modells erforderlich ist, d. h. vom Anwender durchzuführen ist. Die Automatisierung dieser Schritte ist in ^{art}*deco* bereits enthalten bzw. fester Bestandteil der Konzeption.

Expertensysteme für die Hydraulik

Einen besonderen Ansatz zum rechnerunterstützten Entwurf bilden, wie in Abschnitt 2 bereits erläutert, die Expertensysteme. Die erste für die Hydraulik richtungweisende Arbeit liefern Nakashima und Baba (1989) mit dem System OHCS (Oil Hydraulic Circuit Simulator). Das komponenten- und graphikorientierte Programm übernimmt die regelbasierte logische Überprüfung des Schaltplans (qualitativ), erzeugt statische sowie dynamische Modelle, die simuliert werden können, und stellt die Ergebnisse in graphischer Form dar.

Die Leistungsfähigkeit von Expertensystemen im Hinblick auf die Projektierung hydraulischer Anlagen demonstriert ein von Richter und Iberle (1992) entwickeltes Programm, das neben der Standardisierung des Projektierungsvorganges (vgl. Feldmann und Nissen 1992) auch Module zur Simulation der Dynamik sowie zur Prüfung und Bewertung von Ergebnissen anbietet. Es wird jedoch auch hier mit Grundschaltungen gearbeitet, die keine beliebigen Anlagenstrukturen zulassen. Zur Regelung hydraulischer Systeme werden allein lineare Regler zur Verfügung gestellt.

Ein weiteres Expertensystem, das sich der Problemstellung der automatischen Reglersynthese allgemeiner dynamischer Systeme widmet, wird von Mindel (1988) vorgestellt. Es dient zur Online-Optimierung der Parameter einfacher linearer Regler (P-, PI-, PID-Regler). Dabei wird nur ein geregeltes System mit stabilem Arbeitspunkt vorausgesetzt, während auf ein detailliertes Streckenmodell bzw. eine Systemidentifikation verzichtet wird. Hier bestehen markante Unterschiede zu dem in Abschnitt 2 aufgezeigten Konzept zur Reglerauslegung, bei dem die vorgegebene Regelstrecke eine zentrale Rolle spielt, da sie maßgeblichen Anteil an der charakteristischen Systemdynamik besitzt (vgl. Abschnitt 5). Zudem ist eine Auswahl der Regelungsstrategie von Seiten des Programmes vorgesehen, die auch komplexere – z. B. nichtlineare – Regelungskonzepte beinhalten soll. Eine Online-Fähigkeit ist während der Projektierungsphase nicht erforderlich.

Systeme zur automatischen Reglerauslegung

Backé und Anders (1990) stellen eine automatische Reglerauslegung und -inbetriebnahme in den Vordergrund ihrer Betrachtungen. Dabei erarbeitet ein modular aufgebautes System einen optimierten, dreischleifigen Regler für die Lageregelung bis hin zur technischen Realisierung des Reglers ohne Eingriff des Anwenders. Es handelt sich also um eine an ein bestimmtes Anwendungsgebiet angepaßte Lösung. Der Automatisierungseffekt wird auf Kosten der Flexibilität von Anlage und Regelungskonzept erkaufte, die hier fest vorgegeben sind und keine alternativen Lösungen zulassen.

Vergleich und Abgrenzung

Die Vielfalt der aufgezeigten Software-Werkzeuge, die zur Erleichterung und Unterstützung der Tätigkeit eines Hydraulikers dienen, ist offenbar groß. Es ist deutlich zu er-

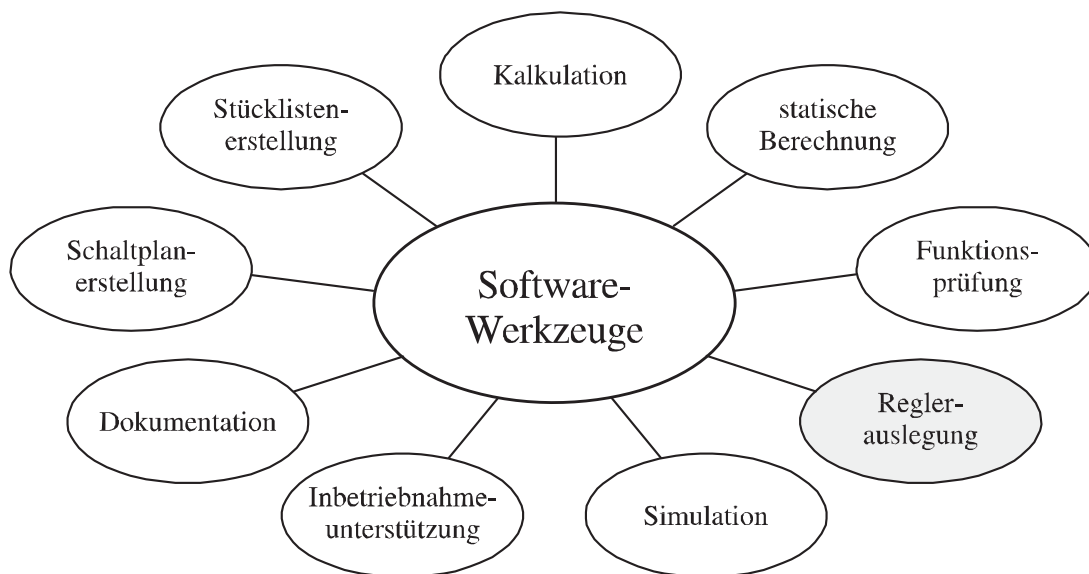


Bild 4.1: Software-Werkzeuge für die Hydraulik

kennen, daß sich jede einzelne Lösung gewissen Schwerpunkten widmet, die einen oder mehrere der in Bild 4.1 dargestellten Aufgabenbereiche abdecken. Ansätze mit einem

„umfassenden“ Anspruch, wie z. B. der von Feldmann und Nissen (1992) vorgestellte Projektierungsassistent, neigen zu einer starren Benutzerführung und geringer Flexibilität. Andere stellen nur Insellösungen mit eng begrenztem Einsatzgebiet dar.

Lenkt man die Aufmerksamkeit in Richtung der hier verfolgten Zielsetzung „**Reglerauslegung für hydraulische Antriebe**“, so zeigt sich, daß die meisten Programmsysteme allenfalls die Simulation geregelter Anlagen zulassen. Alle Aufgaben bezüglich der Reglerauswahl und seiner Parametrierung sowie der Beurteilung von Ergebnissen verbleiben beim Entwicklungsingenieur, so daß hier, wenn überhaupt, nur von einer *passiven* Unterstützung der Reglersynthese gesprochen werden kann. Eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens ist nur durch Parametervariation von Hand und anschließende Simulation (Ausprobieren!) zu erreichen.

Das erklärte Ziel der in Abschnitt 2 vorgestellten Konzeption ist die *aktive* Entwurfsunterstützung beim Reglerentwurf: Der Anwender soll von Seiten des Expertensystems Alternativen zur gezielten Beeinflussung der Systemdynamik angeboten bekommen, die sowohl in der Veränderung der Schaltung als auch in der Anwendung einer bestimmten Regelungsstrategie bestehen können. Daran schließt sich die Parameterbestimmung und -optimierung des Reglers sowie die Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die gestellten Anforderungen an (Bild 4.2).



Bild 4.2: Aktive versus passive Entwurfsunterstützung bei der Reglerauslegung

In allen bekannten Veröffentlichungen wird der Begriff der *Optimierung*, wenn er auftritt, im Sinne einer Parameteroptimierung des gewählten Reglers verwendet (vgl. Schwarz 1976). Das vorgestellte Inbetriebnahmesystem von Backé und Anders (1990) enthält z. B. einen entsprechenden Algorithmus für den fest umrissenen Einzelfall des betrachteten dreischleifigen Reglers. Das vorgestellte Konzept zur wissensbasierten Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulikantriebe (Abschnitt 2) geht darüber jedoch hinaus: Unter optimierter Auslegung soll die Orientierung des Entwurfsprozesses an einem globalen Optimierungskriterium verstanden werden. Hier kommen z. B. Regelgüte, Wirtschaftlichkeit, Terminbindung (Verfügbarkeit von Bauteilen), Einhaltung spezieller Kundenvorgaben u. ä. in Betracht.

5 Strukturebenen hydraulischer Anlagen

Entsprechend dem in Abschnitt 2 dargestellten Ablauf des rechnergestützten Entwurfs geregelter Hydraulikantriebe besteht eine grundlegende Aufgabe des Programmsystems in der Analyse des Anlagenverhaltens zum jeweils aktuellen Entwicklungszeitpunkt. Diese bildet stets die Basis für den Vergleich mit dem Soll-Verhalten und gewinnt somit zugleich direkten Einfluß auf die Modifizierung der Anlage. Die im folgenden erläuterte Einführung von *Strukturebenen hydraulischer Anlagen* stellt ein systematisierendes Hilfsmittel sowohl für die Analyse als auch für die Synthese eines (geregelt) Hydraulikantriebes dar.

Mit Blick auf die *Analyse* sollen Strukturen, die einer Hydraulikschaltung zugrunde liegen, erkannt und den verschiedenen Strukturebenen zugeordnet werden. Dadurch wird der Aufbau auch eines komplexen Gesamtsystems transparent und übersichtlich. Zum einen ist es möglich, Wechselwirkungen zwischen Anlagenteilen zu detektieren und die Art dieser Zusammenhänge zu beschreiben. Zum anderen können Bereiche, die keine Rückwirkungen auf andere Schaltungsteile besitzen, ggf. *auch* regelungstechnisch als entkoppelt angesehen werden, woraus eine Vereinfachung der Reglerauslegung resultiert.

Auf dem Gebiet der *Synthese* – darunter ist hier die Anlagenmodifizierung und -parametrierung zu verstehen (Abschnitt 2) – ergibt sich die Gelegenheit zu unterscheiden, wo und in welcher Weise ein Einfluß auf die Systemdynamik ausgeübt werden kann bzw. soll. Einerseits kann durch den Einsatz von Reglern – z. B. mittels Ausgangs- oder Zustandsrückführung – ein gewünschtes Anlagenverhalten erzeugt werden. Andererseits bewirkt die Auswahl der verwendeten Komponenten sowie die gezielte Modifizierung des Anlagenaufbaus eine Änderung des charakteristischen dynamischen Verhaltens der Regelstrecke. Es ergeben sich z. B. unterschiedliche Eigenschaften durch den Einsatz von

- Proportional- oder Servoventilen,
- Schalt- oder Stetigventilen sowie
- Gleichgang- oder Differentialzylindern.

Offenbar besteht eine enge Verflechtung der Regelung eines hydraulischen Antriebs mit der konstruktiven Gestaltung der Anlage, da diese auf die Dynamik des Gesamtsystems zurückwirkt. Ein System zum Entwurf geregelter hydraulischer Systeme, das die Modifizierung des Anlagenaufbaus unberücksichtigt läßt, schöpft demnach die Möglichkeiten der Einflußnahme auf die Systemdynamik nicht vollständig aus.

5.1 Funktionale Struktur

Den übergeordneten Zusammenhängen einer Hydraulikanlage läßt sich eine allgemeine Struktur zugrunde legen, die als *funktionale Strukturebene* bezeichnet wird. Ohne die Art der Realisierung vorwegzunehmen, werden vornehmlich qualitative Aussagen bezüglich

der einzelnen zu erfüllenden Funktionen² getroffen. Andererseits umfaßt die funktionale Struktur bereits alle einzuhaltenden Randbedingungen, wie z. B. spezielle Kundenwünsche, Terminbindungen, Kostenziele sowie Ansprüche an Sicherheit, Zuverlässigkeit oder Platzbedarf.

Zur Veranschaulichung zeigt Bild 5.1 ein Beispiel der funktionalen Struktur einer einfach aufgebauten Hydraulikanlage. Die durch den Kunden vorgegebenen Anforderungen liegen hier in Form gerichteter Kraft- und Bewegungsgrößen vor. Werden diese unterschiedlichen Antriebsaufgaben geordnet, so ergeben sich zwei Einzelfunktionen, die jeweils ein spezifisches Anforderungsprofil besitzen:

- Funktion 1: $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1, F_1$
- Funktion 2: $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2, F_2$

An dieser Stelle wird noch *keine* Aussage über die Art der praktischen Ausgestaltung dieser Funktionen – etwa durch Bauelemente, Steuer- und Regelungseinrichtungen etc. – gemacht. Im Prinzip wäre eine Umsetzung der Anforderungen auch durch andere Antriebskonzepte als die Hydraulik noch denkbar.

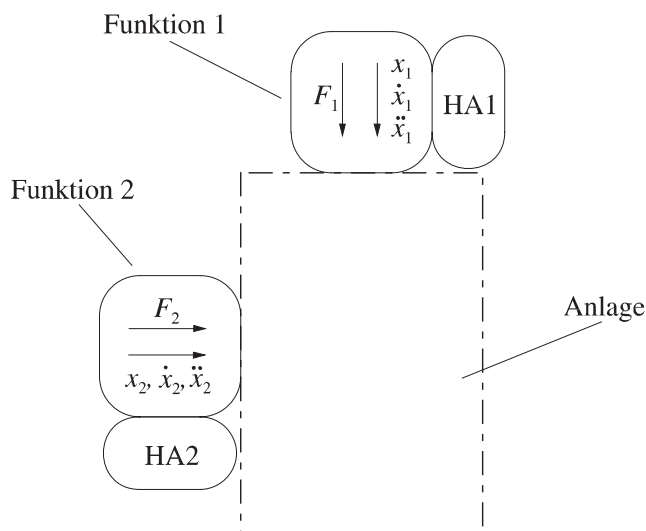


Bild 5.1: Zur funktionalen Strukturebene

Das wichtigste Strukturelement der funktionalen Ebene stellt die hydraulische Achse dar:

Definition 5.1 *Hydraulische Achse*

Eine hydraulische Achse (HA) enthält und erfüllt eine der von der Gesamtanlage ausgeübten Einzelfunktionen. Sie kennzeichnet den Zusammenhang und das Zusammenwirken von Versorgungs-, Steuer- und Arbeitselementen im Hinblick auf die Funktionserfüllung. \square

² Der Begriff der *Funktion* ist in diesem Zusammenhang nicht als mathematische Funktion (z. B. $f(x)$), sondern als zu erfüllende Aufgabe im elektro-hydraulischen Gesamtsystem zu verstehen.

Der Definition 5.1 entsprechend sind für die Realisierung der Funktionen 1 und 2 (Bild 5.1) durch einen Hydraulikantrieb die hydraulischen Achsen HA1 und HA2 erforderlich. Innerhalb der hydraulischen Achsen wird eine Verbindung von der abstrakten Funktion zur Art der Realisierung in Form eines Hydraulikantriebes hergestellt.

Im Hinblick auf die Analyse einer Hydraulikschaltung stellt die Erkennung der Elemente der funktionalen Struktur einen grundlegenden Schritt dar. Einerseits erlaubt die Kenntnis der einzelnen ausgeübten Funktionen eine Aussage über die Bedeutsamkeit der teilweise unübersichtlich zahlreichen Schaltungselemente. Andererseits können bestehende Wirkzusammenhänge zwischen bestimmten Arbeits-, Steuer- und Versorgungselementen für eine Zuordnung von Komponenten zu einer „Gruppe“ von Elementen, die zu einem gemeinsamen Zweck zusammenwirken, verwendet werden. Die so gefundenen untereinander leistungs- und signaltechnisch verbundenen Wirkungsstränge werden als hydraulische Achsen bezeichnet.

Den prinzipiellen Aufbau der funktionalen Struktur einer Hydraulikschaltung verdeutlicht Bild 5.2 anhand einer Anlage, die aus mehreren hydraulischen Achsen besteht.

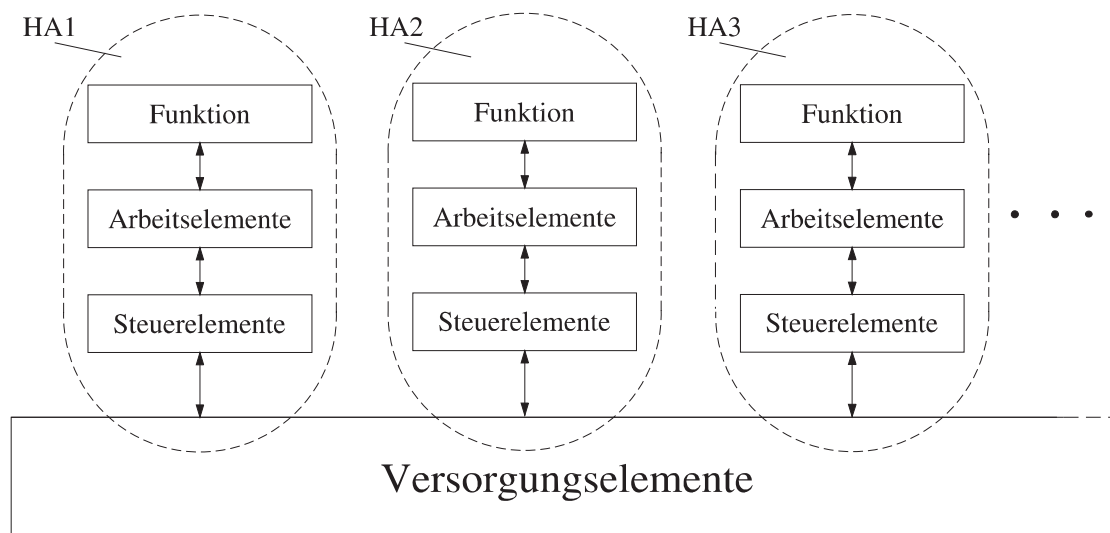


Bild 5.2: Die hydraulische Achse als Element der funktionalen Struktur

Unterschiedliche hydraulische Achsen werden bezüglich des Leistungsflusses häufig als entkoppelt angesehen. Ein Zusammenhang untereinander besteht dann allein von Seiten der Steuerungs- und Signaltechnik, z. B. im Rahmen einer Ablaufsteuerung. Diesem Ansatz entsprechend erfolgt auch die Regelung jeder hydraulischen Achse separat.

Bild 5.2 zeigt den in der Praxis hydraulischer Anlagen üblichen Fall, daß mehrere hydraulische Achsen zugleich von einer zentralen Versorgungseinheit gespeist werden. Dadurch wird zumindest auf der Ebene der Druckversorgung die Unabhängigkeit zwischen unterschiedlichen hydraulischen Achsen aufgehoben, d. h. die einzelnen Äste der funktionalen Struktur beeinflussen sich gegenseitig. Für die Regelung ergeben sich daraus

prinzipiell Mehrgrößensysteme, deren Handhabung ungleich komplizierter ist als die von Eingrößensystemen unverkoppelter hydraulischer Achsen. Ein Ziel der Regelung kann es in diesem Fall sein, Maßnahmen zur Entkopplung hydraulischer Achsen zu ergreifen.

Beispiel zur funktionalen Strukturebene

Anhand eines konkreten Beispiels soll die funktionale Struktur erläutert werden. In Bild 5.3 ist eine hydraulisch angetriebene Kunststoff-Spritzgießmaschine (Matthies 1991) schematisch dargestellt. In Anlehnung an die Abbildung 5.2 ist die hydraulische Achse HA1 schraffiert dargestellt. Die übrigen Achsen sind durch den Verweis auf das entsprechende Arbeitselement gekennzeichnet. Die Anlage führt eine Reihe unterschiedlicher Funktionen aus, durch die zugleich die hydraulischen Achsen festgelegt sind:

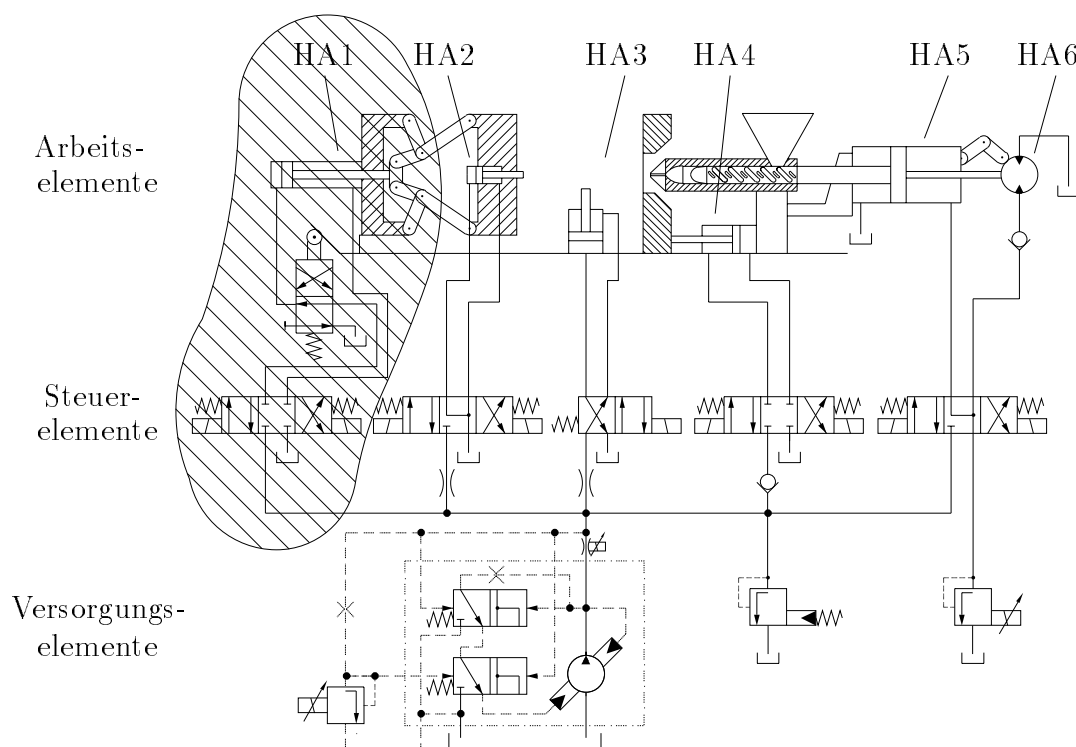


Bild 5.3: Hydraulisch angetriebene Kunststoff-Spritzgießmaschine

HA1: Schließen/Öffnen des Werkzeugs

HA2: Auswerfen des Formteils

HA3: Rückzug der Kernzüge

HA4: Verfahren der Spritzeinheit

HA5: Einspritzen des Kunststoffes

HA6: Rotation der Plastifizierschnecke

Zur Ausführung eines Arbeitsganges sind die hydraulischen Achsen in Form einer Ablaufsteuerung in ihrem zeitlichen Zusammenwirken signaltechnisch miteinander gekoppelt: Durch die Rotation der Plastifizierschnecke (HA6), die das erwärmte Kunststoffgranulat vermengt und verdichtet, wird der Spritzgießprozeß vorbereitet. Nachdem der Arbeitszylinder das Werkzeug geschlossen hat (HA1), wird die Spritzeinheit (HA4) verfahren und mit Hilfe der HA5 durch Verschieben der Schnecke flüssiger Kunststoff in die Form gespritzt. Nach Ablauf der Abkühlzeit werden Spritzeinheit und Schnecke wieder zurückgefahren (HA4 und HA5). Das Werkzeug wird geöffnet (HA1), die Kernzüge werden zurückgezogen (HA3) und das fertige Formteil wird durch den Zylinder (HA2) ausgeworfen.

Das Beispiel zeigt die übliche gemeinsame Druckversorgung aller hydraulischen Achsen; der hier auftretende Fall, daß die Ansteuerung zweier hydraulischer Achsen – HA5 und HA6 – durch dasselbe Steuerelement erfolgt, stellt eine weniger häufig anzutreffende Ausnahme dar.

5.2 Komponentenstruktur

Die Möglichkeiten der Umsetzung einer bestimmten Funktion, die innerhalb der hydraulischen Achsen verankert ist, sind vielfältig. Verschiedenste Kombinationen von Hydraulikbauteilen sind imstande, dieselbe Antriebsaufgabe zu erfüllen. Die Komponentenstruktur beschreibt die gewählte *Form der Realisierung* der hydraulischen Achsen.

Innerhalb der Komponentenstruktur können weiterhin die Ebenen der *Anordnungsstruktur* und der *Schaltstruktur* unterschieden werden. Bild 5.4 illustriert dazu jeweils ein einfaches Beispiel.

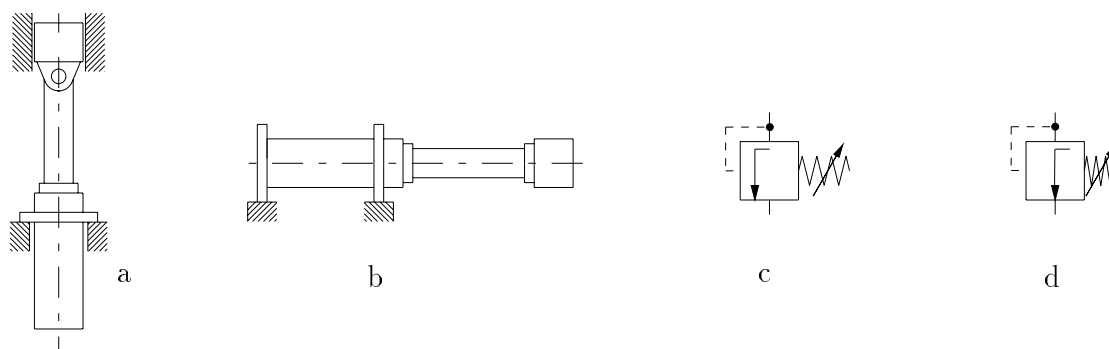


Bild 5.4: Beispiele zur Anordnungsstruktur (a, b) und Schaltstruktur (c, d)

Die **Anordnungsstruktur** beinhaltet die verwendeten Komponenten und Geräte, ihre geometrische und räumliche Anordnung sowie die leitungstechnische Verbindung untereinander. Dadurch wird beispielsweise erfaßt, in welcher Einbaulage ein Zylinder betrieben wird und ob gegebenenfalls Schwerkraftkomponenten zu berücksichtigen sind (Bild 5.4 a, b). Zudem spielt z. B. die Entfernung zwischen Steuer- und Arbeitselementen eine Rolle bei der Betrachtung der Schwingungsneigung, die aus der Kompressibilität der

eingeschlossenen Ölvolumina resultiert. Daraus ergeben sich Auswirkungen auf das dynamische Verhalten.

Durch die **Schaltstruktur** werden die Kombinationsmöglichkeiten bezüglich der Schaltungen der verwendeten Bauteile charakterisiert: Der Steuerkolben eines Wegeventils kann unterschiedliche Stellungen einnehmen; ein Druckbegrenzungsventil kann unter den äußeren Bedingungen ansprechen oder nicht (Bild 5.4 c, d). In Abhängigkeit der Kombination von Schaltzuständen, die zu einem festgelegten Zeitpunkt Gültigkeit besitzt, werden unterschiedliche Komponenten durchströmt. Damit verändern sich die Berechnungsgrundlagen für die Anlage, und durch das Auftreten verschiedener Arbeitspunkte werden gleichzeitig jeweils unterschiedliche Ansprüche an die Regelung gestellt.

5.3 Systemtheoretische Struktur

Die gesamte Information bezüglich des dynamischen Verhaltens der Hydraulikanlage sowie ihrer einzelnen Komponenten wird durch die systemtheoretische Struktur repräsentiert. Sie zeichnet sich – im Gegensatz zur funktionalen Struktur, innerhalb der übergeordnete Ziele und Funktionen erfaßt werden – durch eine vorwiegend quantitative Systembeschreibung aus.

Übliche Beschreibungsformen des Übertragungsverhaltens zwischen den Ein- und Ausgangssignalen sind Differentialgleichungen bzw. -gleichungssysteme, Blockschaltbilder, die Zustandsraumdarstellung etc. (vgl. Schwarz 1969, Föllinger 1992). Die in der Praxis häufig durchgeführte Linearisierung der Systembeschreibung um einen Arbeitspunkt hat zwar den Vorteil der Existenz einer geschlossenen Lösung; in der Realität ist die Gültigkeit innerhalb eines engen Bereiches um diesen Arbeitspunkt jedoch nicht immer ausreichend. Außerdem besitzen hydraulische Antriebe eine Reihe charakteristischer Nichtlinearitäten, die das Verhalten im allgemeinen maßgeblich beeinflussen und aus diesem Grunde nicht ohne Überprüfung vernachlässigt werden dürfen.

Am Ventil treten die Begrenzung des Steuerkolbenhubes sowie Hysterese und Ansprechempfindlichkeit als bestimmende Nichtlinearitäten auf. Hydraulikzylinder weisen neben der Hubbegrenzung unetige geschwindigkeitsabhängige Reibkrafteffekte auf. Das Flächenverhältnis φ bei den häufig verwendeten Differentialzylindern wirkt sich ebenfalls auf das dynamische Verhalten aus.

Das System *art deco* verfügt über die Möglichkeit, die Güte der verwendeten Systembeschreibung an die geforderte Genauigkeit von Berechnung und Simulation anzupassen. Lemmen (1995) führt zu diesem Zweck verschiedene *Modelltiefen* für die Systembeschreibung ein. Diese erlauben die Festlegung diskreter Modellierungsgenauigkeiten für jede einzelne Komponente, die die gesamte Bandbreite von der einfachsten bis hin zur komplexen, nichtlinearen Beschreibungsform abdecken.

5.4 Folgerungen aus der Einteilung in Strukturebenen

In Bild 5.5 ist der Zusammenhang der verschiedenen Strukturebenen einschließlich der zunehmenden Mehrdeutigkeit ausgeführter Anlagen in Richtung tieferliegender Ebenen dargestellt. Die Realisierungsmöglichkeiten für eine bestimmte Einzelfunktion nehmen aufgrund zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten alternativer Lösungen auf der Komponenten- und der systemtheoretischen Ebene immer weiter zu.

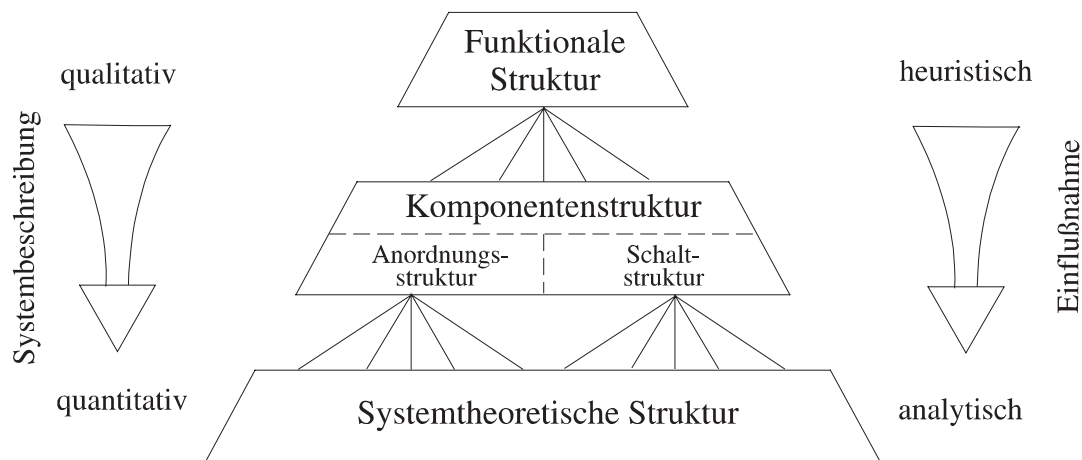


Bild 5.5: Strukturebenen hydraulischer Anlagen

Wie bereits angedeutet, erwachsen aus der Einführung von Strukturebenen hydraulischer Anlagen positive Effekte sowohl in bezug auf die Analyse des Systemverhaltens zum aktuellen Entwicklungszeitpunkt als auch auf die Synthese des geregelten Antriebes.

Die Erkennung der Strukturebenen eines hydraulischen Antriebes stellt bereits einen grundlegenden Analyseschritt dar, der eine Übersicht des Anlagenaufbaus liefert und damit zugleich ein geordnetes Vorgehen bei der weiteren Untersuchung ermöglicht. Es bietet sich – entsprechend der Art der Systembeschreibung – an, bei der rein qualitativ beschriebenen funktionalen Strukturebene anzusetzen und zunächst die wichtigsten Wirkzusammenhänge zu erschließen. Davon ausgehend führt eine detaillierte Betrachtung – hin zur weitgehend quantitativen systemtheoretischen Ebene – zu einer vollständigen Erfassung des Systemverhaltens (vgl. Bild 5.5).

Im Hinblick auf die Synthese geregelter hydraulischer Antriebe läßt sich aus der Einteilung der Strukturebenen gleichermaßen eine Methodik zur gezielten Beeinflussung des dynamischen Verhaltens ableiten. Die verschiedenen Strukturebenen bieten hier unterschiedliche Möglichkeiten des Eingriffs in die Systemdynamik, die sich wie folgt darstellen:

- Die funktionale Strukturebene ist durch die Formulierung der vom Kunden gestellten Anforderungen bereits in engen Grenzen festgelegt, so daß auf dieser Ebene im Hinblick auf die Regelung kaum Änderungen vorgenommen werden können.

- Dagegen läßt die Komponentenstruktur Eingriffe bezüglich Auswahl und Austausch von Bauelementen zu, ohne daß dadurch die Funktionalität in Frage gestellt wird; es gibt im allgemeinen mehrere Alternativen zur Realisierung derselben Funktion. Ziel der Einflußnahme in die Komponentenstruktur ist die Veränderung des Verhaltens der Regelstrecke, die einen wesentlichen Anteil an der Dynamik des Gesamtsystems besitzt. Darüber hinaus bestimmt die Auswahl der Komponenten die Anlagenkosten maßgeblich mit.
- Die systemtheoretische Ebene ermöglicht einen unmittelbaren Zugriff auf das dynamische Übertragungsverhalten des Gesamtsystems. Hier finden die bekannten Methoden der Regelungstheorie, die jede Form von Reglern und Filtern umfaßt, ebenso Anwendung wie spezielle Konzepte aus der hydraulischen Praxis, z. B. Soll- bzw. Störgrößenaufschaltung oder mehrschleifige Regelungen.

Während die quantitativ beschreibende systemtheoretische Strukturebene den Einsatz mathematisch-analytischer Verfahren nahelegt, muß bei zunehmend qualitativer Systembeschreibung in Richtung der Komponentenstruktur und der funktionalen Struktur vermehrt zu heuristischen Methoden³ der Beeinflussung dynamischen Verhaltens übergegangen werden, da die Zusammenhänge nicht mehr quantitativ auswertbar sind. Hier findet u. a. konstruktives Wissen des Ingenieurs, das z. T. auf Erfahrung im Umgang mit ähnlichen Fällen beruht, Eingang in die Verarbeitung durch das Expertensystem *art deco*. Der Einbau einer Drosselung im Bypass (parallel zum Arbeitselement *Zylinder*) stellt beispielsweise eine Modifizierung der Anordnungsstruktur dar. Sie erhöht zwar die Dämpfung des Zylinders (vgl. Schulte 1994) und verändert damit seine Dynamik; ob ein solcher Eingriff vorgenommen werden soll, kann jedoch nicht auf streng analytischer Grundlage entschieden werden.

Die Entscheidung darüber, auf welcher Ebene in welcher Form einzugreifen ist, muß von übergeordneter Stelle getroffen werden. Eine geeignetes Mittel stellt die in Abschnitt 2 vorgestellte *Prioritätensteuerung* dar. Nachdem das wissensbasierte System auf Grundlage der Analyse der Schaltung alternative Handlungsmöglichkeiten generiert hat, besteht ihre Aufgabe in der Bewertung und schließlich in der Auswahl der Vorgehensweise. Dazu muß u. a. das Verbesserungspotential, das bei den verschiedenen Alternativen zu erwarten ist, a priori abgeschätzt werden. Darüber hinaus besteht durch die Prioritätensteuerung zugleich eine Bindung an ein globales Optimierungskriterium.

5.5 Strukturebenen einer Beispielanlage

Die in den vorherigen Abschnitten eingeführten Strukturebenen hydraulischer Anlagen sollen im folgenden anhand einer konkreten Beispielanlage erläutert werden. Für diesen Antrieb werden exemplarisch folgende Anforderungen formuliert:

³ Heuristik: Methode, um bei unvollständiger Information neue Erkenntnisse zu gewinnen oder Probleme zu lösen (\leftrightarrow Analytik, Herden 1990)

- Unter einer Betriebslast von $F_1 = 5000$ N im Vorlauf soll ein Zylinder ($H = 500$ mm) mit einer Positioniergenauigkeit von $\pm 0,2$ mm positioniert werden.
- Unter einer Betriebslast von $F_{2v} = 1000$ N im Vorlauf bzw. $F_{2r} = 600$ N im Rücklauf soll ein Zylinder ($H = 1500$ mm) mit konstanter Geschwindigkeit verfahren werden (Genauigkeit: $\pm 0,02 \cdot \dot{x}_{\text{soll}}$).
- Unter einer symmetrischen Betriebslast von $F_3 = 2750$ N soll ein Zylinder ($H = 250$ mm) mit einer Positioniergenauigkeit von $\pm 0,1$ mm positioniert werden. Aus Sicherheitsgründen ist die Ansteuerung des Arbeitselementes redundant auszulegen.
- Es ist eine gemeinsame Leistungsversorgung der Einzelantriebe vorzusehen.

Auf der Grundlage dieser Voraussetzungen wird im weiteren *eine* mögliche Ausgestaltung eines entsprechenden hydraulischen Antriebes näher verfolgt.

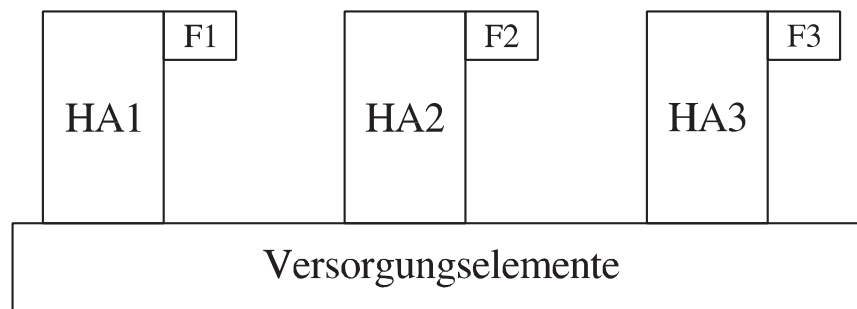


Bild 5.6: Funktionale Struktur der Beispielanlage

Zur ersten Annäherung ist in Bild 5.6 die funktionale Struktur des Hydraulikantriebes dargestellt. Dieser besteht aus drei hydraulischen Achsen HA1, HA2 und HA3, denen jeweils die Funktionen F1, F2 und F3 zugeordnet sind. Die einzelnen Funktionen lassen sich wie folgt zusammenzufassen:

F1 – Lageregelung, Kraftaufnahme im Vorlauf

F2 – Geschwindigkeitsregelung, unsymmetrische Kraftaufnahme in Vor- und Rücklauf

F3 – Lageregelung, symmetrische Kraftaufnahme in Vor- und Rücklauf

Abbildung 5.6 zeigt darüber hinaus, daß die Versorgungselemente, wie gefordert, allen hydraulischen Achsen gleichzeitig zur Verfügung stehen.

Die Umsetzung der einzelnen Funktionen in die reale Anlage bildet den nächsten Schritt und führt auf die Komponentenebene. Zur Veranschaulichung der Komponentenstruktur bietet sich die Darstellung im Hydraulikschaltplan gemäß Bild 5.7 an. Hier steht zunächst die Anordnungsstruktur⁴ im Vordergrund, d. h. aus der Abbildung sind die gewählten

⁴ Zur exakten Darstellung der Anordnungsstruktur wäre ein Lageplan zur Kennzeichnung der geometrischen und räumlichen Anordnung aller Elemente erforderlich, auf den hier verzichtet wird.

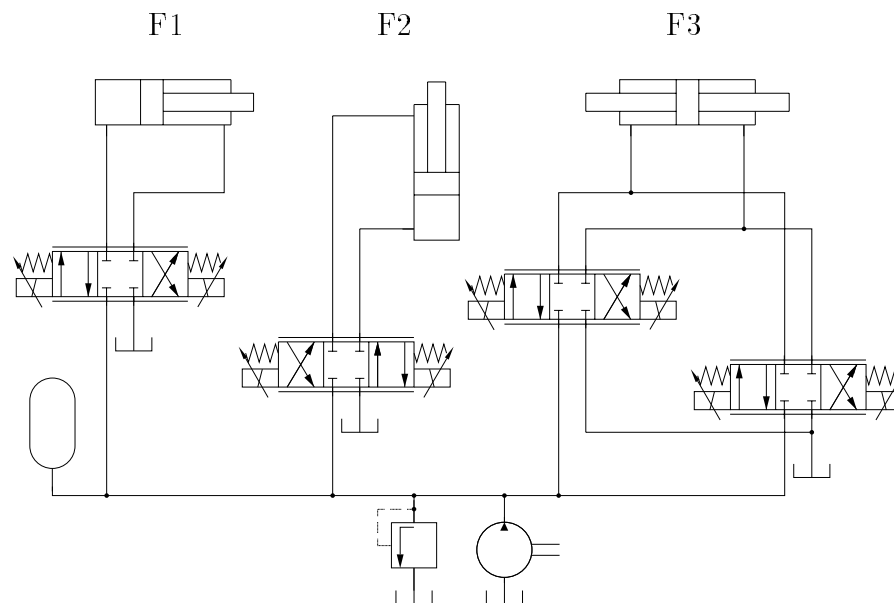


Bild 5.7: Komponenten- (Anordnungs-) Struktur der Beispielanlage

Hydraulikkomponenten, wie Pumpe, Ventile, Zylinder etc., sowie ihre leitungstechnische Verbindung zu entnehmen.

Zur Realisierung der Funktionen F1 und F2 wird jeweils eine Kombination von Ventil und Differentialzylinder gewählt, wobei Bild 5.7 die Einbaulage und Arbeitsrichtung anzeigt. Aufgrund der symmetrischen Kraftaufnahme bei Vor- und Rücklauf in Verbindung mit einer Lageregelung wird zur Ausübung von F3 ein Gleichgangzylinder ausgesucht. Die Ansteuerung erfolgt über zwei parallel geschaltete Ventile, die den geforderten Sicher-

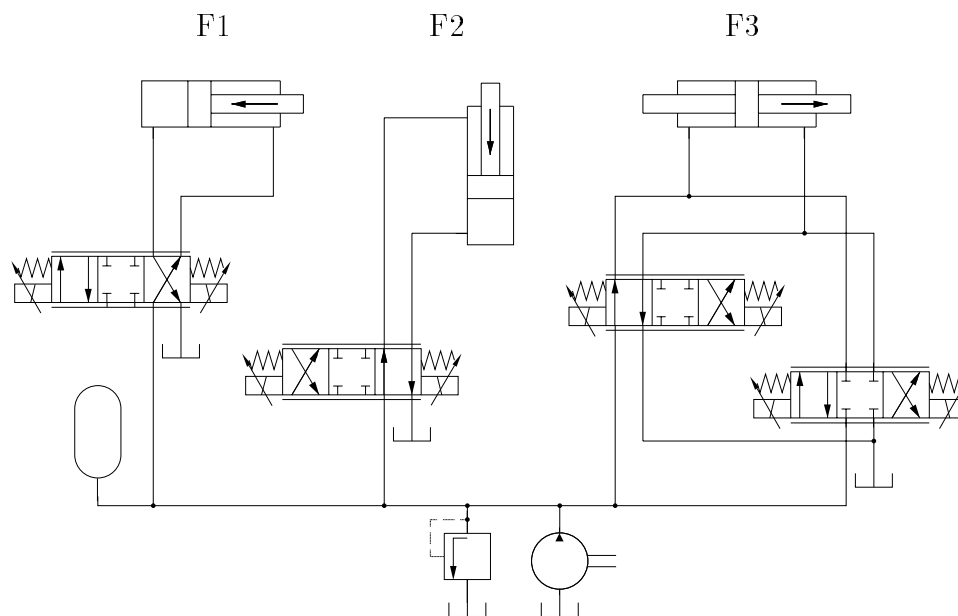


Bild 5.8: Schaltstruktur der Beispielanlage

heitsanforderungen (Redundanz) Rechnung tragen. Die zentrale Versorgungseinheit setzt sich aus einer Hydropumpe, einem Druckbegrenzungsventil, einem Hydrospeicher sowie dem Tank zusammen. Ergänzt wird die Erläuterung der Komponentenstruktur durch eine Darstellung der Schaltstruktur in Form der Schaltzustände der einzelnen Ventile sowie der Verfahrrichtungen der Zylinder in Bild 5.8.

Zur Veranschaulichung der dynamischen Eigenschaften des Antriebs innerhalb der systemtheoretischen Strukturebene werden Blockschaltbilder der einzelnen hydraulischen Achsen herangezogen (Bild 5.9). Sie charakterisieren jeweils das Ein-/Ausgangsverhalten – hier in linearisierter Form – bezüglich der Ansteuersignale i und der entsprechenden Ausgangssignale, die durch die Regelungsaufgabe (Lage-/Geschwindigkeitsregelung) festgelegt sind.

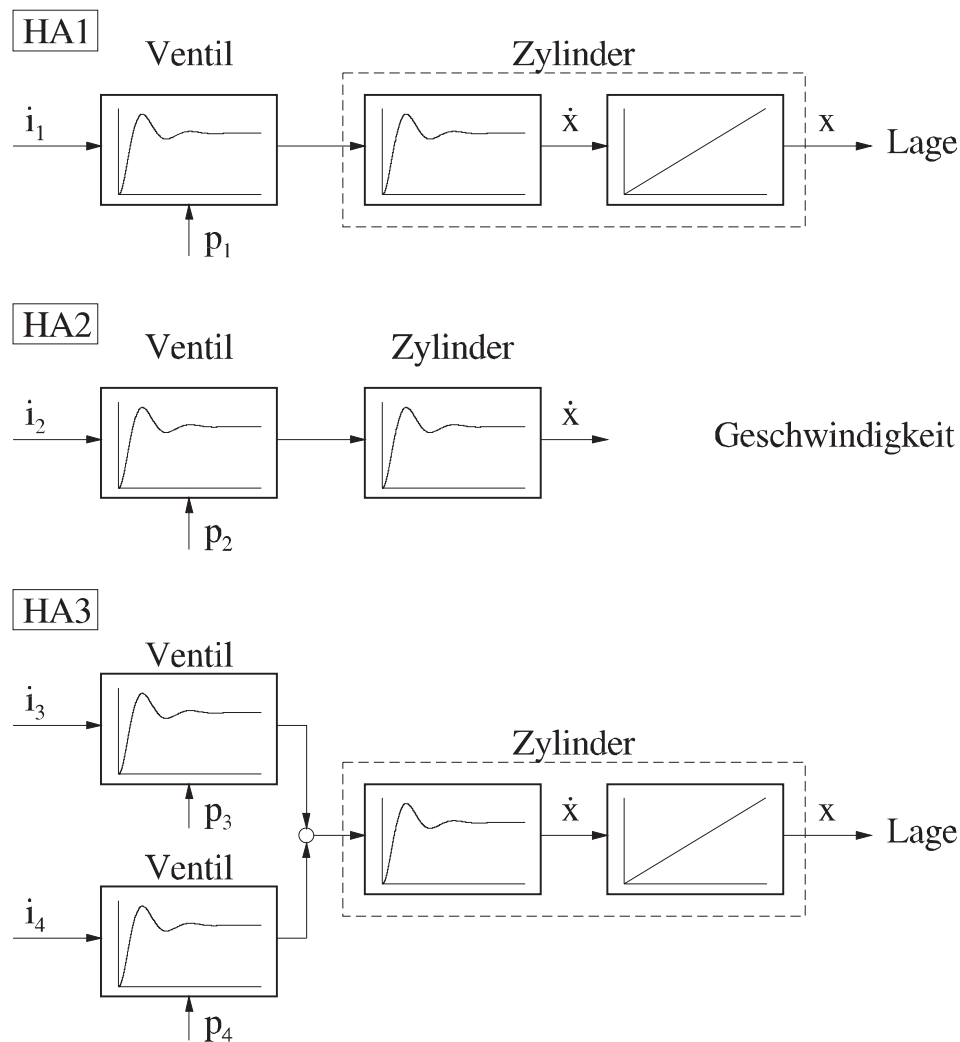


Bild 5.9: Systemtheoretische Struktur der Beispielanlage

Es wird nochmals hervorgehoben, daß sowohl die lineare Betrachtung des Systems als auch die Bestimmung der Komponentenmodelle (z. B. PT_2 -Verhalten beim Ventil) als rein exemplarisch anzusehen ist. Bei entsprechenden Genauigkeitsanforderungen kann

ein Ventil alternativ auch als reines P-Glied oder als PT_2 -System mit Begrenzung des Steuerkolbenhubes und Hysterese modelliert werden. Diese Entscheidung ist Bestandteil der automatisierten Modellerstellung von *art^{deco}* (vgl. Lemmen 1995).

Um über die Erläuterung der Strukturebenen in ihrer Analysefunktion hinauszugehen, wird am Beispiel der hydraulischen Achse HA1 eine mögliche Synthesevariante aufgezeigt, die in den Aufgabenbereich der wissensbasierten Reglerauslegung (vgl. Abschnitt 2) fällt.

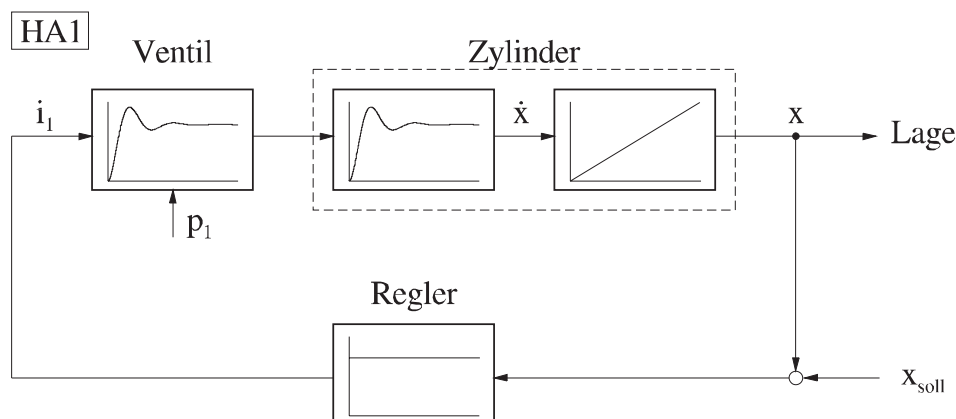


Bild 5.10: Erweiterung der hydraulischen Achse HA1 (Regelstrecke) zum linearen Lageregelkreis

Als Folge des Vergleichs von Soll- und Ist-Verhalten sowie der sich anschließenden Bewertung kann das Programmsystem beispielsweise eine Modifizierung der Anlage vorschlagen, die eine Erweiterung der Regelstrecke um einen linearen Regler vorsieht. Bild 5.10 zeigt, wie die hydraulische Achse HA1 zu einem Lageregelkreis mit linearem P-Regler ausgebaut werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das im vorliegenden Forschungsbericht entworfene Konzept zur wissensbasierten Entwurfsunterstützung für geregelte Hydraulikantriebe zeigt einen Weg zur wirkungsvollen Unterstützung einer gleichermaßen anspruchsvollen und zeitaufwendigen Ingenieurertätigkeit auf. Im Zentrum der Betrachtung steht eine Modifizierung des Anlagenentwurfs durch ein Computerprogramm, die sowohl konstruktive Änderungen als auch die Ergänzung kompletter Regelungsstrukturen vorsieht. Als Ausgangspunkt für die Programmentwicklung dient das Softwaresystem *artdeco*, dessen Leistungsfähigkeit ausführlich beschrieben und erläutert wurde.

Wichtige Informationen zur Einordnung des vorgestellten Konzeptes erbringt ein Vergleich mit verwandten Ansätzen der rechnerbasierten Problemlösung in der Hydraulik: Eine Vielzahl von Anbietern verfolgt hier sehr unterschiedliche Ziele, was zu Produkten mit stark abweichendem Leistungsumfang führt.

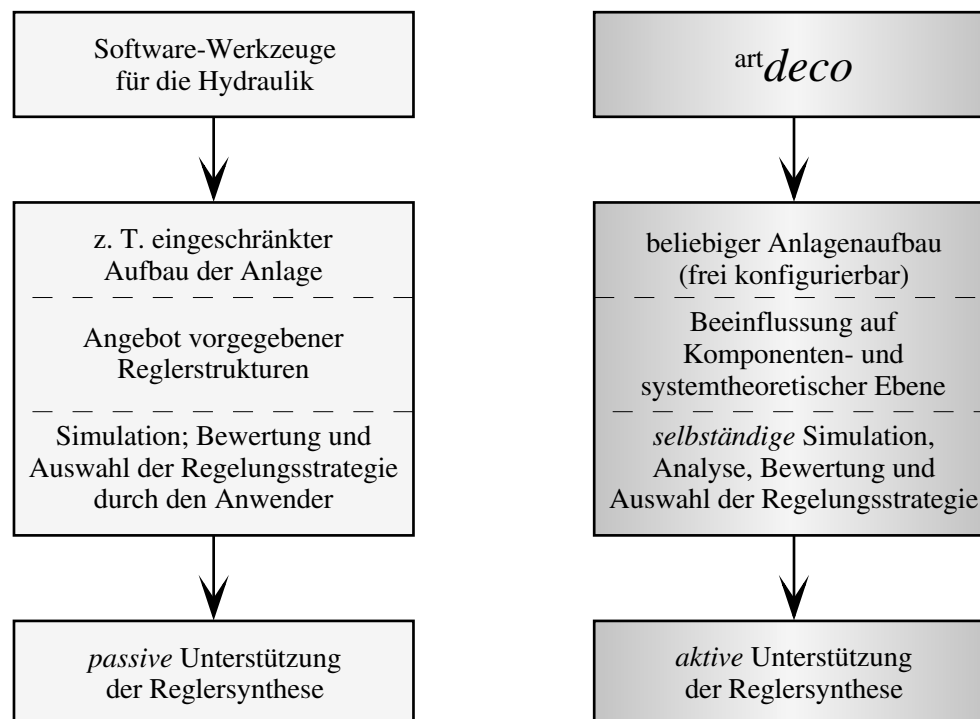


Bild 6.1: Vergleich von *artdeco* mit anderen Software-Werkzeugen

Bild 6.1 faßt die wichtigsten Unterschiede zwischen *artdeco* und anderen Software-Werkzeugen zusammen. Dabei tritt die große Variationsbreite möglicher Schaltungen in *artdeco* ebenso deutlich zutage, wie der abweichende Ansatz eines Eingriffs in die Systemdynamik auch durch Modifizierung des Anlagenaufbaus. Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, daß bisher kein bekanntes Programmsystem den Entwurf – speziell geregelter – Hydraulikantriebe *aktiv* unterstützt, d. h. eigenständig Vorschläge zur Systemmodifizierung generiert. Ebenso wenig sind Konzepte zur Optimierung des Auslegungsvorgangs anhand globaler Kriterien bekannt.

Ein erster Schwerpunkt der Realisierung des Konzeptes besteht in der Erarbeitung von Strukturebenen hydraulischer Anlagen als einem grundlegenden Hilfsmittel zur Systematisierung der Systemanalyse und -synthese. Aus der Einteilung in funktionale, Komponenten- und systemtheoretische Strukturebenen werden Schlußfolgerungen für die gezielte Einflußnahme auf das dynamische Verhalten gezogen. Innerhalb des Computerprogrammes entscheidet eine *Prioritätensteuerung* vor dem Hintergrund des globalen Optimierungskriteriums über die geeignete Vorgehensweise. Die Anwendung auf eine konkrete Beispielanlage rundet die Erläuterung der Strukturebenen ab.

Inhalt zukünftiger Forschungsarbeiten wird die weitere Systematisierung des Vorgehens beim Entwurf geregelter Hydraulikantriebe sein. Als Ausgangspunkt für den Entwicklungsprozeß wird dabei zunächst die Formulierung und Strukturierung der Anforderungen an die Anlage im Mittelpunkt stehen. Darauf baut die Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Bewertung des Systemverhaltens auf, die auf die jeweiligen Vorgaben zugeschnitten werden können. Dies schließt einen Vergleich von Soll- und Ist-Verhalten ein.

In weiterführenden Untersuchungen müssen alle Maßnahmen zur Beeinflussung der Dynamik – sowohl auf Komponenten- als auch auf systemtheoretischer Ebene – auf ihre Eignung zur Automatisierung hin untersucht werden. Darüber hinaus ist festzustellen, an welche Rahmenbedingungen der Einsatz dieser Maßnahmen in der Praxis geknüpft ist, um diese Informationen ebenfalls in die Wissensbasis des Expertensystems einzuarbeiten.

7 Literaturverzeichnis

- Backé, W.** und **P. Anders.** 1990. Automatische Reglerinbetriebnahme an fluidtechnischen Zylinderantrieben. *Ölhydraulik und Pneumatik* 34(1). 26–29.
- DIN ISO 1219** 1978. *Fluidtechnische Systeme und Geräte. Schaltzeichen.* Berlin: Beuth.
- Feldmann, D. G.** 1994. Verbesserung der Wettbewerbssituation der Fluidtechnik. 11. *Aachener Fluidtechnisches Kolloquium.* 19–34.
- Feldmann, D. G.** und **K. P. Nissen.** 1992. Projektierung mit intelligenter Rechnerunterstützung. *Ölhydraulik und Pneumatik* 36(3). 169–175.
- Feuser, A.** und **M. Piechnick.** 1990. HYSYS – Die Simulationstechnik auf dem Vormarsch in die industrielle Praxis. *Ölhydraulik und Pneumatik* 34(8). 527–533.
- Foitzik, B.** 1991a. Planen mit System. Computerunterstützung bei der Schaltplan-Erstellung. *fluid* August/91. 38–39.
- Foitzik, B.** 1991b. Schneller im Bild. CADline Hydraulik – ein System für technische Angebote. *fluid* April/91. 60–62.
- Föllinger, O.** 1992. *Regelungstechnik.* Heidelberg: Hüthig.
- Herden, W.** 1990. Wissensbasierte Systeme. *Automatisierungstechnische Praxis atp* 2. 1–22. Terminologiepapier der GMA.
- Hoffmann, W.** und **K. Hesse.** 1980. Digitale Simulation des Verhaltens hydraulischer Geräte. *Ölhydraulik und Pneumatik* 24(3). 159–166.
- Kett, R.** 1993. Ein Plus für DSH. *Ölhydraulik und Pneumatik* 37(6). 517–523.
- Kett, R.** 1995. Kompliziert und umständlich – der Simulation letzter Schluß. *Ölhydraulik und Pneumatik* 39(4). 304–311.
- Kleine Büning, H., R. Lemmen, M. Suermann, M. Hoffmann, D. Curatolo** und **B. Stein.** 1995. Entwurfsunterstützung in der Hydraulik mit dem System ^{art}*deco*. *Künstliche Intelligenz KI* 5. 49–55.
- Lemmen, R.** 1995. *Zur automatisierten Modellerstellung, Konfigurationsprüfung und Diagnose hydraulischer Anlagen.* Dissertation. MSRT. Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg. VDI-Fortschrittberichte. Reihe 8. Nr. 503. Düsseldorf: VDI.
- Lemmen, R.** und **B. Stein.** 1994. Zeit ist Geld. Rechnerunterstützung bei Entwurf und Konfigurationsprüfung hydraulischer Anlagen. *fluid* April/94. 32–34.
- Matthies, K. J.** 1991. *Einführung in die Ölhydraulik.* Stuttgart: Teubner.

- Mindel, K.** 1988. *Ein Expertensystem zur On-line-Optimierung einfacher Regler*. Forschungsbericht 12/88. MSRT. Universität Duisburg.
- Mock, H.-W.** und **F. Metzner.** 1984. Probleme der Simulation hydrostatischer Systeme. *Ölhydraulik und Pneumatik* 28(3/4). 169–176/248–260.
- Nakashima, Y.** und **T. Baba.** 1989. OHCS: Hydraulic Circuit Design Assistant. *Proceedings of the 1st Annual Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*. Stanford.
- Piechnick, M.** und **A. Feuser.** 1994. Simulation mit Komfort – HYVOS 4.0 und MO-SIHS 1.0. *Ölhydraulik und Pneumatik* 38(5). 270–275.
- Piechnick, M.** und **M. Hoffmann.** 1996. Simulation hydraulisch betriebener Mehrkörperstrukturen. *12. Aachener Fluidtechnisches Kolloquium*. 139–150.
- Richter, M.** und **F. Iberle.** 1992. Expertensystem zur Projektierung hydraulischer Anlagen. *Ölhydraulik und Pneumatik* 36(2). 76–81.
- Schulte, A.** 1994. *Grundlagen der Ölhydraulik*. Vorlesungsumdruck. MSRT. Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg.
- Schwarz, H.** 1969. *Einführung in die moderne Systemtheorie*. Braunschweig: Vieweg.
- Schwarz, H.** 1976. *Optimale Regelung linearer Systeme*. Mannheim: B. I. – Wissenschaftsverlag.
- Stein, B.** 1995. *Functional Models in Configuration Systems*. Dissertation. Department of Mathematics and Computer Science. University of Paderborn.
- Vier, E.** 1995. *Ein Konzept zur Reglerauslegung für elektro-hydraulische Linearantriebe mit wissensbasierten Techniken*. Diplomarbeit. MSRT. Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg.
- Will, D., R. Will** und **T. Will.** 1995. HydCalc – Hydraulikberechnungen unter Windows. *Ölhydraulik und Pneumatik* 39(1). 27–31.