

# Modellbasierte Prüfung hydraulischer Anlagen

R. Lemmen

Forschungsbericht Nr. 7/92

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

**Übersicht:** Dieser Bericht beschreibt den Stand der Entwicklung und das Gesamtkonzept eines modellbasierten Systems, das die Prüfung eines hydraulischen Kreislaufes vornimmt. Dabei werden als Schwerpunkte die statische Funktionsprüfung (Propagierung) und die dynamische Funktionsprüfung (Simulation) beschrieben. Ferner wird sowohl das modellbasierte System als auch dessen Anwendungsgebiet, sowie die an dieses Problemfeld angepaßte Modellbildung dokumentiert.

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

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	I
<b>1 Einleitende Übersicht</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung des modellbasierten Systems</b>	<b>2</b>
2.1 Anwendungsbereich Bühnentechnik . . . . .	3
2.2 Hydraulische Komponenten der Bühnentechnik . . . . .	9
2.3 Aufgaben des modellbasierten Systems . . . . .	12
2.4 Aufbau und Struktur des modellbasierten Systems . . . . .	14
<b>3 Vorgehensweise bei der Prüfung</b>	<b>16</b>
3.1 Schnittstellenprüfung . . . . .	16
3.2 Statische Funktionsprüfung . . . . .	18
3.3 Dynamische Funktionsprüfung . . . . .	27
<b>4 Problemangepaßte Modellbildung</b>	<b>30</b>
4.1 Beschreibung der Mechanik in der Bühnentechnik . . . . .	30
4.2 Elektrohydraulische Analogie . . . . .	31
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>34</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>

## Nomenklatur

$\alpha[-]$	Flächenverhältnis ( $\frac{A_R}{A_K}$ am Differentialzylinder ( $\alpha = \frac{1}{\varphi}$ ))
$A[-]$	Anschluß der Zylinderkammer $A$
$A_K[mm^2]$	Kolbenfläche des Differentialzylinders
$A_R[mm^2]$	Ringfläche des Differentialzylinders
$B[-]$	Anschluß der Zylinderkammer $B$
$c[\frac{N}{mm}]$	Federsteifigkeit
$C[F]$	Kapazität
$C_h[\frac{l}{bar}]$	hydraulische Kapazität
$d[\frac{Ns}{mm}]$	Dämpfung
$\eta[-]$	Verlustbeiwert
$E'_{\ddot{o}l}[bar]$	Ersatzkompressionsmodul
$F[N]$	äußere an den Zylinder angreifende Kraft (einschließlich Beschleunigungskräfte).
$\varphi[-]$	Flächenverhältnis ( $\frac{A_K}{A_R}$ ) am Differentialzylinder ( $\varphi = \frac{1}{\alpha}$ )
$i[A]$	Strom
$i_a[mA]$	Ventilansteuerstrom
$L[H]$	Induktivität
$L_h[\frac{bar \cdot min^2}{l}]$	hydraulische Induktivität
$\lambda[-]$	Rohrreibungszahl
$m[kg]$	Masse
$M[Nm]$	Drehmoment
$n[min^{-1}]$	Drehzahl
$n[-]$	Volumenstromexponent

---

$p_A[bar]$	Druck am Arbeitsanschluß <i>A</i>
$p_B[bar]$	Druck am Arbeitsanschluß <i>B</i>
$p_T[bar]$	Tankdruck
$p_0[bar]$	Versorgungsdruck
$\Delta p[bar]$	Druckdifferenz
$\Delta p_v[bar]$	Ventildruckabfall
$Q_{A_{ein}}[l/min]$	Volumenstrom am Anschluß <i>A</i> beim Einfahren des Zylinders
$Q_{A_{aus}}[l/min]$	Volumenstrom am Anschluß <i>A</i> beim Ausfahren des Zylinders
$Q_{B_{ein}}[l/min]$	Volumenstrom am Anschluß <i>B</i> beim Einfahren des Zylinders
$Q_{B_{aus}}[l/min]$	Volumenstrom am Anschluß <i>B</i> beim Ausfahren des Zylinders
$Q[l/min]$	Volumenstrom
$R_h[\frac{bar \cdot min^2}{l^2}]$	hydraulischer Widerstand
$R[\Omega]$	Widerstand
$Re[-]$	Reynoldszahl
$\rho[\frac{kg}{m^3}]$	Dichte
$S_i[-]$	Schnittstelle <i>i</i>
$\vartheta[\frac{mm^2}{\rho}]$	kinetische Viskosität
$U[V]$	Spannung
$v_{ein}[m/s]$	Geschwindigkeit des einfahrenden Kolbens am Zylinder
$v_{aus}[m/s]$	Geschwindigkeit des ausfahrenden Kolbens am Zylinder
$X_{\ddot{u}}[\%]$	Ventilüberdeckung
$\zeta[-]$	Verlustziffer

# 1 Einleitende Übersicht

Hydraulische Anlagen werden immer komplexer und sind somit auch immer schwieriger in Betrieb zu setzen. Die Gründe hierfür bestehen zum einen in speziellen Kundenwünschen und zum anderen in der immer stärker werdenden Integration von Regelungstechnik, Hydraulik und Elektronik. Ein modellbasiertes System, das im Rahmen eines von der DFG<sup>1</sup> geförderten Kooperationsprojektes von dem Fachbereich Maschinenbau der Universität Duisburg und dem Fachbereich Praktische Informatik der Universität Paderborn prototypisch entwickelt wird, soll die Inbetriebnahme unterstützen.

Modellbasierte Systeme gehören zur Klasse der wissensbasierten Systeme, deren bekannteste Unterklasse die Expertensysteme sind. Schon während der Einarbeitungsphase in das Projekt hat sich herausgestellt, daß die Arbeit der Abteilungen Projektierung und Konstruktion von entscheidender Bedeutung für die Inbetriebnahme hydraulischer Anlagen ist. Ein System zur Inbetriebnahmeunterstützung muß deshalb im wesentlichen für eine anforderungsgerechte Projektierung und Konstruktion einer Anlage sorgen. Dieses geschieht durch die Unterstützung der Neu- bzw. Änderungskonfigurierung und die Konfigurationsprüfung einer Anlage.

Der vorliegende Bericht beschreibt das in der Entwicklung befindliche modellbasierte System. In Abschnitt 2 wird ein Anwendungsgebiet der Hydraulik, in diesem Fall, die Bühnentechnik näher betrachtet. Neben den verwendeten Hydraulikkomponenten, werden die Aufgaben, der Aufbau und die Struktur des modellbasierten Systems untersucht. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit der Vorgehensweise bei der Gesamtprüfung der Hydraulikanlage, die sich im wesentlichen in die drei Kernbereiche Schnittstellenprüfung, statische und dynamische Funktionsprüfung untergliedert. Zur statischen Funktionsprüfung wird der Prüfungsalgorithmus, die sogenannte Propagierung, an einem Beispiel erläutert. Die statische Beschreibung der Problemdomäne liefert Abschnitt 4 mit der problemangepaßten Modellbildung. Die Zusammenfassung und ein Ausblick in Abschnitt 5 schließen den Bericht ab.

---

<sup>1</sup>Deutsche Forschungsgemeinschaft

## 2 Beschreibung des modellbasierten Systems

Man kann die sogenannten Wissensbasierten Systeme und die bekannteren Expertensysteme dahingehend unterscheiden, daß ein Expertensystem im engeren Sinne nur Expertenwissen verarbeitet, ein Wissensbasiertes System dagegen beliebiges Wissen verarbeitet. Beide Systeme können durch heuristische, modellbasierte oder fallvergleichende Methoden ( Lemmen 1992) beschrieben werden. Das in diesem Bericht beschriebene System ist ein modellbasiertes System.

Die meisten der bislang realisierten Expertensysteme sind regelbasierte Systeme. Diese Systeme zeigen gute Ergebnisse in der Beschreibung insbesondere von nichtnumerischen Zusammenhängen der jeweiligen beschriebenen Anlage. Durch die zyklischen Wartungsvorgänge werden die Ergebnisse weiter verbessert. Obschon die Änderbarkeit eines solchen Systems besser ist als die eines rein numerisch-mathematischen Programmes, können unter Umständen schon geringfügige Änderungen die Beschreibung und somit auch die Regelbasis zu einem erheblichen Teil hinfällig werden lassen.

Das modellbasierte System soll demgegenüber eine wesentlich höhere Flexibilität gestatten. Vom Prinzip her ist der Entwurf auf beliebige hydraulische Strukturen mit mechanischen und elektrischen Anknüpfungspunkten ausgelegt.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Projektes ist es natürlich unmöglich, alle Möglichkeiten des Ansatzes voll auszuschöpfen. Vielmehr bietet es sich an, die prinzipielle Realisierbarkeit des modellbasierten Ansatzes zu zeigen. Um die Machbarkeit nachweisen zu können, werden die umfangreichen Möglichkeiten in folgenden Bereichen sinnvoll eingeschränkt:

- **Anwendung:** Hier wird gezeigt auf welchen interessanten maschinenbaulichen Anwendungsbereich eine Eingrenzung stattfindet, und warum dieses geschieht.
- **Komponenten:** Aus der großen Fülle der hydraulischen, mechanischen und elektrischen Komponenten wird eine sinnvolle, möglichst repräsentative und am Arbeitsumfang orientierte Auswahl getroffen.
- **Aufgaben:** Ausgehend von der ursprünglichen Aufgabenstellung des Projektes wird gezeigt, welche die wesentlichen Aufgaben sind, die ein solches wissensbasiertes System bewältigen muß, um in der Praxis einen nützlichen Beitrag zur Problemlösung beizusteuern.
- **Aufbau:** Hier ist die Frage zu beantworten, wie der Aufbau und die Architektur eines Systems aussehen muß, um die gestellten Aufgaben lösen zu können.

## 2.1 Anwendungsbereich Bühnentechnik

Im Rahmen dieses Gemeinschaftsprojektes (Informatik / Maschinenbau) soll ein modellbasiertes System für die Inbetriebnahmeunterstützung am Beispiel translatorischer hydraulischer Antriebe untersucht werden.

Die Bühnentechnik, also die Technik, die z. B. im Theater Anwendung findet, stellt unter anderem an die Regelungstechnik hohe Ansprüche, wobei im folgenden nur die hydraulischen Zylinderantriebe betrachtet werden sollen. Dabei sind folgende Punkte besonders hervorzuheben:

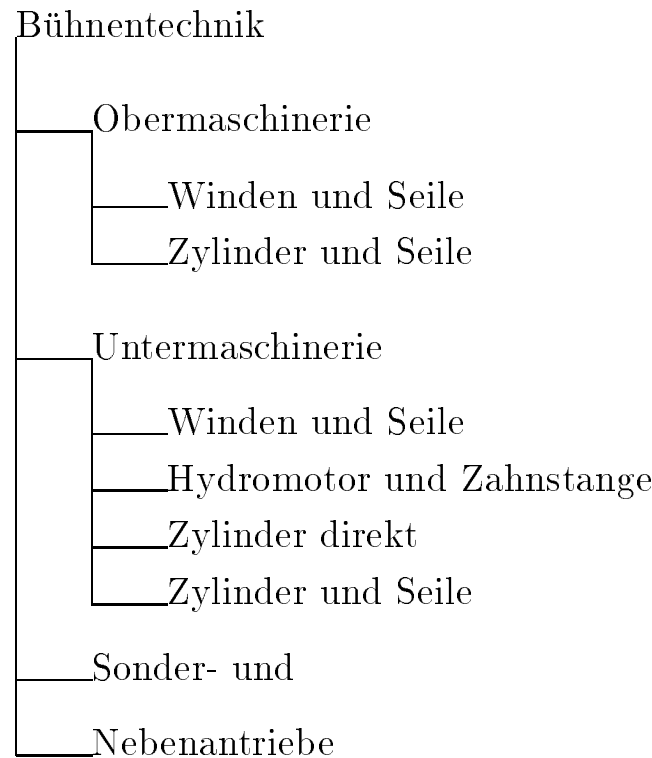
- Große schlanke Zylinder mit teilweise hohen Flächenverhältnissen, wobei die Eigenfrequenzen von der Kolbenposition abhängen.
- Große reduzierte Massen, die niedrige Eigenfrequenzen zur Folge haben.
- Häufig findet man schwingungsfähige angekoppelte Systeme.
- Überschaubare Problemdomäne, wobei in der Praxis viel Expertenwissen eingesetzt wird.
- Komplizierte nichtlineare Regel- und Steuerstrecken.

Bild 2.1 zeigt die wesentlichen, auf einer Bühne zu bewegenden Objekte. Prinzipiell unterscheidet man dabei die Ober- und die Untermaschinerie. Zur Untermaschinerie gehört alles, was zur Bewegung von Teilen in oder unter der Bühnenebene dient. Das sind beispielsweise Bühnenpodien oder Personenaufzüge mit den zugehörigen hydraulischen und mechanischen Komponenten. Der Obermaschinerie ist dagegen alles, was zur Bewegung von Teilen über der Bühnenebene dient zuzuordnen. Typische Beispiele hierfür sind die sogenannten Punktzüge, an denen punktförmig eine Last aufgehängt wird, bzw. die Prospektzüge, an denen die Last über eine Laststange verteilt angreift.



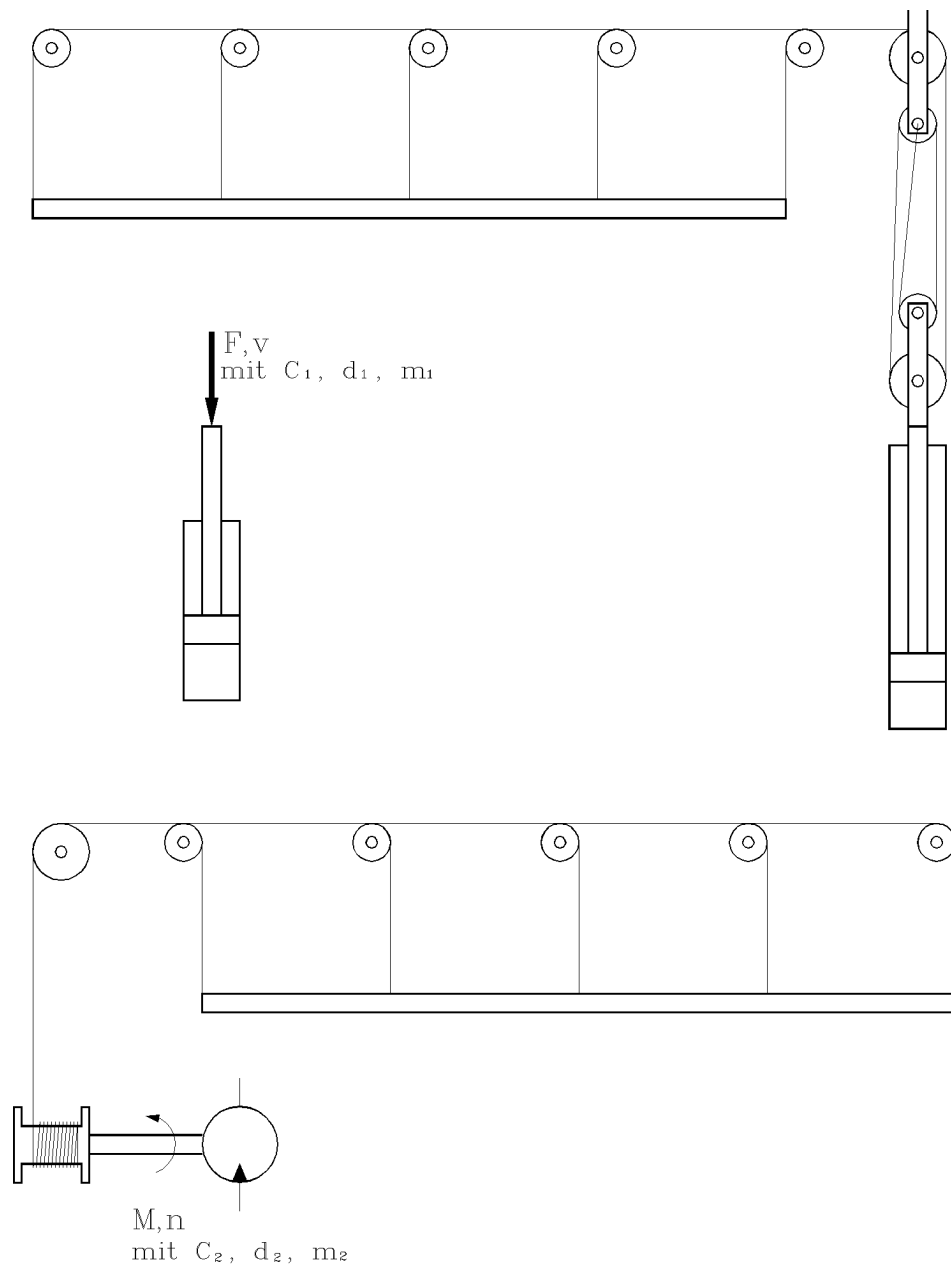


Zusätzlich zu den beiden Hauptbereichen, der Ober- und der Untermaschinerie, kommen in einem Theater noch zusätzliche Sonder- und Nebenbereiche vor, die sehr stark theaterspezifisch sind. Bild 2.2 gibt eine Übersicht der verschiedenen Antriebsmöglichkeiten in den einzelnen Bereichen.



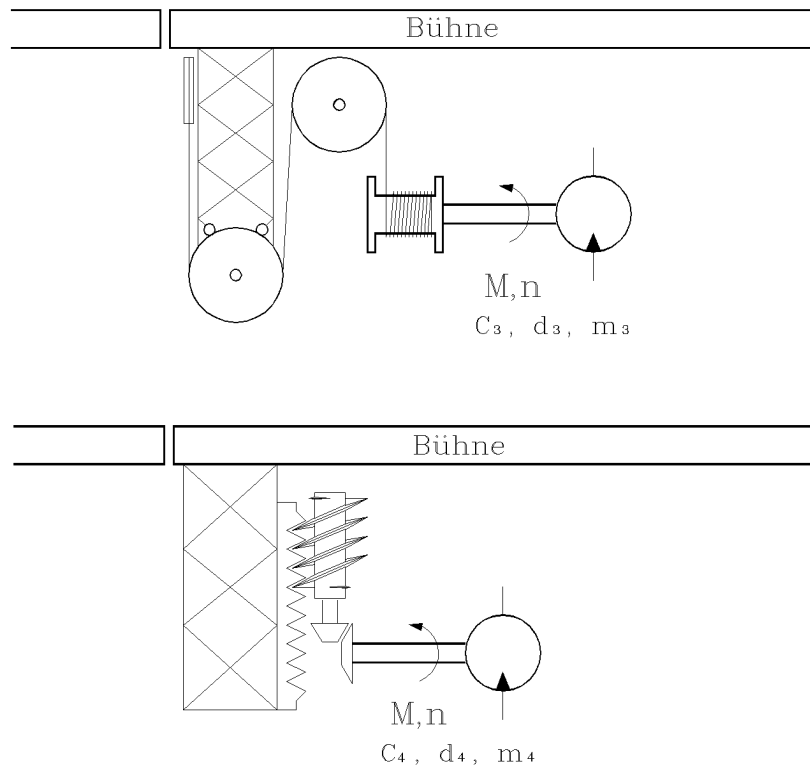
**Bild 2.2:** Antriebsmöglichkeiten in der Bühnentechnik

Im Bereich der Obermaschinerie besteht die Möglichkeit, entweder einen Winden- oder aber einen Zylinderantrieb einzusetzen. Diese Möglichkeiten werden in Bild 2.3 am Beispiel eines Prospektzuges dargestellt. Aus Kostengründen wird man immer versuchen, einen Windenantrieb vorzuziehen. Die niedrigeren Kosten resultieren u.a. daraus, daß ein deutlich geringerer Materialaufwand betrieben werden muß. Es brauchen z. B. kein kompliziertes Meßsystem und kein Flaschenzug eingesetzt werden. Der große Vorteil des Zylinderantriebes dagegen besteht darin, daß deutlich weniger Platz benötigt wird, als das beim Windenantrieb der Fall ist. Dieser Vorteil kommt vor allem dann zum Tragen, wenn ältere Theater umgebaut und dabei in den vorhandenen Räumen Handzüge durch Maschinenzüge ersetzt werden müssen.



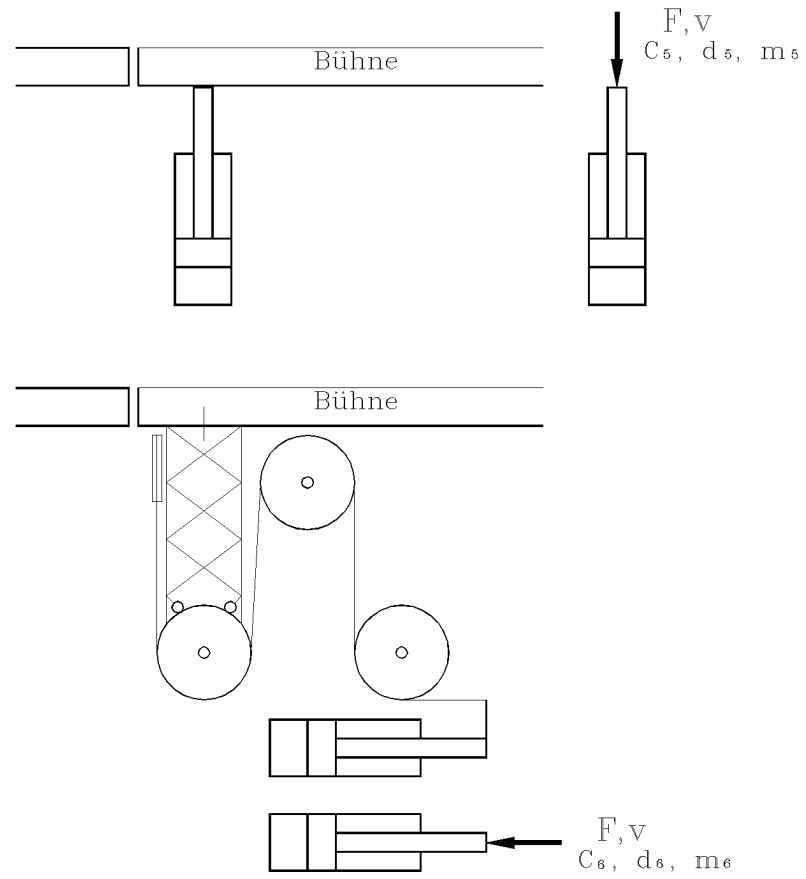
**Bild 2.3:** Antriebe in der Obermaschinerie (mit Zylinder und Winde)

Auch im Bereich der Untermaschinerie bestehen die Möglichkeiten, entweder Windenantriebe oder aber Zylinderantriebe zu verwenden. Hierbei sind jedoch, auf Grund der vielfach hohen aufzubringenden Kräfte, Zylinderantriebe häufig günstiger als Windenantriebe. Windenantriebe trifft man häufig in den in Bild 2.4 gezeigten Formen an. Entweder wird die Kraft von der Winde über einen Seilzug oder aber direkt über eine Zahnstange und ein an dem Hydraulikmotor befestigtes Ritzel auf die Bühne übertragen.



**Bild 2.4:** Windenantriebe in der Untermaschinerie

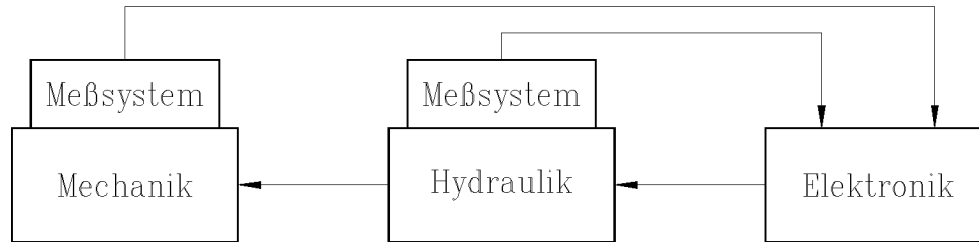
Ähnlich wie bei dem Windenantrieb, besteht auch beim Zylinderantrieb die Möglichkeit, diesen entweder direkt auf die Bühne wirken zu lassen, oder aber einen Seilzug als Kraftübertragungselement zu benutzen. Die mechanisch, regelungstechnisch und kostenmäßig günstigste Alternative ist dabei der direkt auf die Bühne wirkende Zylinder. Wenn für einen vorgegebenen Hub die Bauhöhe unterhalb der Bühne aber nicht ausreicht, wird entweder auf Teleskopzylinder oder auf eine andere der in Bild 2.5 gezeigten Varianten zurückgegriffen. Dabei wird die von dem liegenden Zylinder ausgehende Kraft über den Seilzug auf die Bühne übertragen.



**Bild 2.5:** Zylinderantriebe in der Untermaschinerie

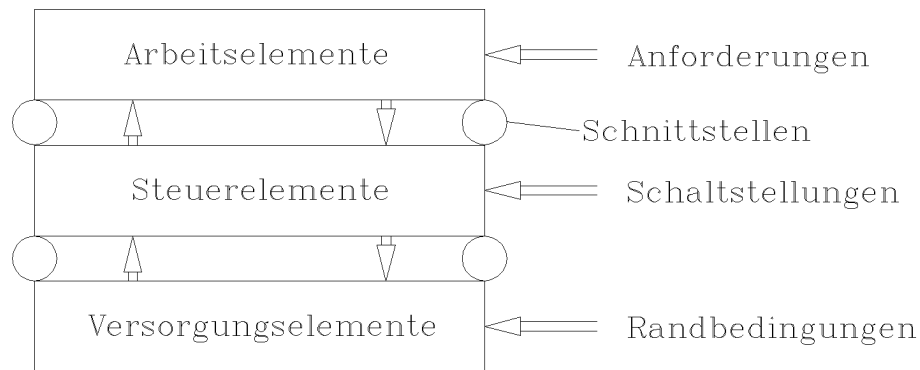
## 2.2 Hydraulische Komponenten der Bühnentechnik

Eine bühnentechnische Gesamtanlage besteht aus den drei wesentlichen Bereichen Mechanik, Hydraulik und im immer weiter zunehmenden Maße Elektronik. Die Zusammenhänge werden in Bild 2.6 dargestellt.



**Bild 2.6:** Grundstruktur einer elektrohydraulisch- mechanischen Anlage

Zunächst werden Bereiche der Mechanik und Elektronik durch „black-boxes“ (Reuter 1992, Schwarz 1991) approximiert. Der Bereich der Hydraulik, welcher erst einmal im Zentrum der Betrachtungen steht, läßt sich wiederum in drei Blöcke untergliedern. Diese werden durch die in ihnen vorkommenden, mit Leitungen verbundenen Komponenten definiert. Bild 2.7 zeigt diese Blöcke, die sich auch relativ gut aus einem Hydraulikschaltplan extrahieren lassen.



**Bild 2.7:** Untergliederung der Hydraulik

Im folgenden werden die Komponenten dieser drei Bereiche, nämlich die Arbeits-, Steuer- und Versorgungselemente, bezüglich ihrer Arten und ihrer Bedeutung für das System diskutiert.

## Arbeitselemente

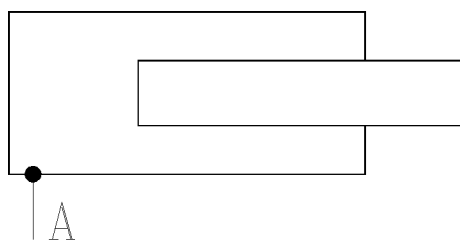
Die beiden wesentlichen in der Hydraulik vorkommenden Arbeitselemente sind:

- Hydromotoren und
- Hydrozylinder.

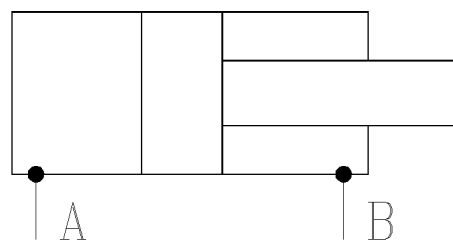
Wie bereits erwähnt, beschäftigt sich dieses Projekt mit den Zylindern. Allgemein unterscheidet man bei Zylindern folgende Bauformen:

- Gleichgangzylinder,
- Differentialzylinder,
- Teleskopzylinder,
- Plungerzylinder und
- Sonderbauformen.

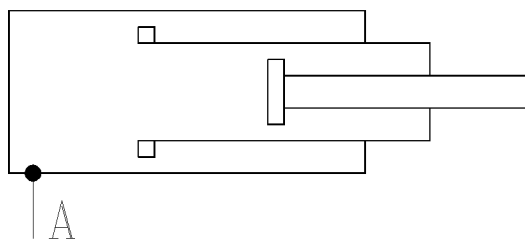
In der Bühnentechnik findet man fast ausschließlich Differential-, Plunger- und Teleskopzylinder, wobei hier die Differentialzylinderbauform ganz klar dominiert. Funktionsbeschreibungen von Zylindern liefern u. a. Matthies (1984), Schmitt (1986) und Ebertshäuser (1973). Die Funktionsprinzipien dieser drei Zylindertypen werden in Bild 2.8 erläutert.



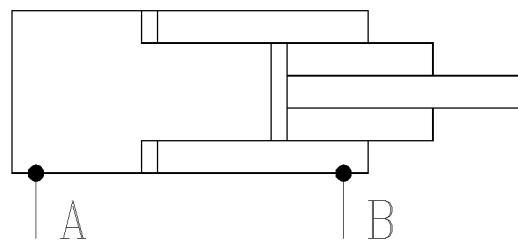
Plungerzylinder



Differentialzylinder



einfachwirkender  
Teleskopzylinder

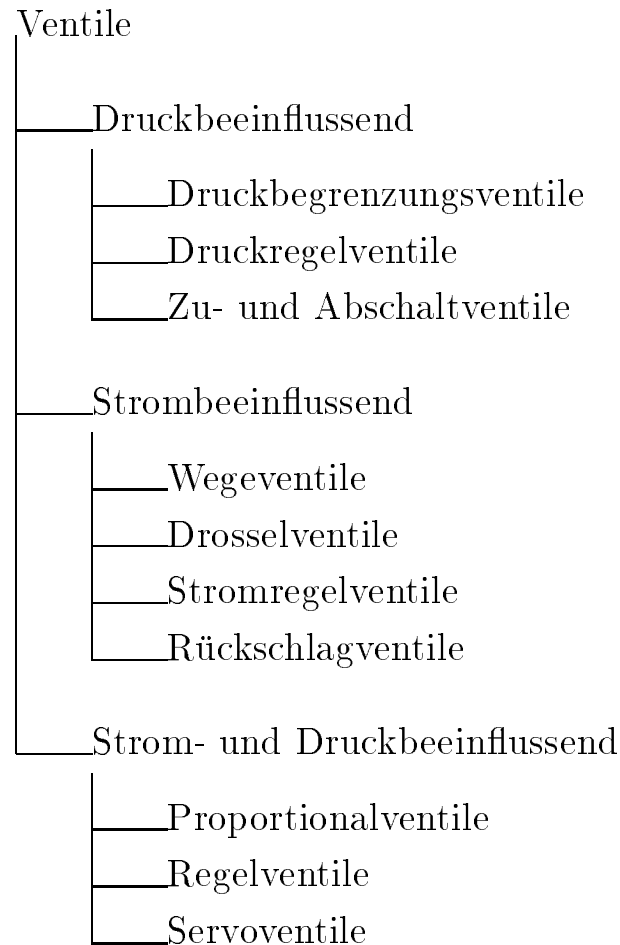


doppeltwirkender  
Teleskopzylinder

**Bild 2.8:** Zylinderbauformen in der Bühnentechnik

## Steuerelemente

Die Komponenten aus der Klasse der Steuerelemente sind, bis auf einige Ausnahmen wie z. B. Speicher und Druckübersetzer, fast ausschließlich Ventile. Dabei empfiehlt es sich, diese auf Grund ihrer Einflußnahme auf die Größen Druck und Volumenstrom einzuteilen (Bild 2.9).



**Bild 2.9:** Ventileinteilung bezüglich Druck und Volumenstrom (nach Schulte 1988a)

Ventile werden entweder durch Steuerblöcke bzw. durch die sogenannte Verkettung oder aber durch Rohre miteinander verbunden. Prinzipiell lassen sich Steuerblöcke, wenn auch durch äußerst komplizierte Rohrleitungen ersetzen. Deshalb wird eine Beschränkung auf Verbindungen durch Rohrleitungen vorgenommen.

## Versorgungselemente

Die Versorgungselemente haben die Aufgabe, dem Hydrauliksystem die Druckflüssigkeit in geforderter Güte<sup>2</sup> und Menge auf dem geforderten Druckniveau zur Verfügung zu stellen.

<sup>2</sup>chemischer und physikalischer Zustand des Druckmediums

Zu dieser Klasse gehören insbesondere der Tank, Pumpen, Druckbehälter, Speicher, Filter und Komponenten zur Temperaturregelung. In der Modellbildung wird für den Tank ein beliebiges Tankdruckniveau zugelassen. Es kann eine Beschränkung der in diesem Bereich verwendeten Komponenten auf Tank, Pumpen, Temperaturregelkomponenten, Filter sowie auf Druckbegrenzungs- bzw. Druckregelventile und eventuelle Speicher vorgenommen werden.

Die Pumpen untergliedern sich noch einmal in die beiden Gruppen der

- Verstellpumpen und
- Konstantpumpen,

wobei in der Bühnentechnik überwiegend Konstantpumpen zum Einsatz kommen. Die einzelnen Pumpenbauarten werden unter anderem in Matthies (1984), Schmitt (1986) und Ebertshäuser (1973) beschrieben.

### **2.3 Aufgaben des modellbasierten Systems**

Die Inbetriebnahme hydraulischer Antriebe ist ein komplexes Problemfeld, das maßgeblich von den Arbeiten der im betrieblichen Ablauf vorgelagerten Abteilungen Projektierung und Konstruktion beeinflusst wird. Darum empfiehlt es sich, schon in diesen Bereichen beratend und prüfend Einfluß zu nehmen. Dazu sollte das System Informations-, Prüf- und Diagnosemöglichkeiten zur Verfügung stellen. Das System bearbeitet dabei Informationen bezüglich der Komponentenschnittstellen sowie der statischen und dynamischen Funktion der jeweiligen Konfiguration des Hydrauliksystems (Lemmen 1991c).

Das Ziel beim Einsatz des wissensbasierten Systems besteht darin, eine hydraulische Anlage ausliefern zu können, deren Konstruktion fehlerfrei ist und die an die Anlage gestellten Anforderungen erfüllt. Fertigungs-, Liefer- und Montagefehler kann dieses System natürlich nicht abfangen. Die wesentliche Voraussetzung für eine schnelle und qualitativ hochwertige Inbetriebnahme ist aber die anforderungsgerechte Konstruktion und Projektierung (Lemmen 1991b).

Es gibt ein breites Feld sinnvoller, durch ein wissensbasiertes System zu unterstützende Aufgaben. Diese Aufgaben sind beispielsweise:



- Standardangebotserstellung
- Projektierungs- und Konstruktionsunterstützung
- Kalkulationsunterstützung
- Konfigurationsprüfung
- Simulation
- Inbetriebnahmeinformation
- Diagnose.

Der Aufwand für das System erhöht sich weiterhin durch die Berücksichtigung von innerbetrieblichen Einflußfaktoren, die in Kleine Büning (1991) erläutert werden. Dabei ist die technische und organisatorische Integration besonders hervorzuheben.

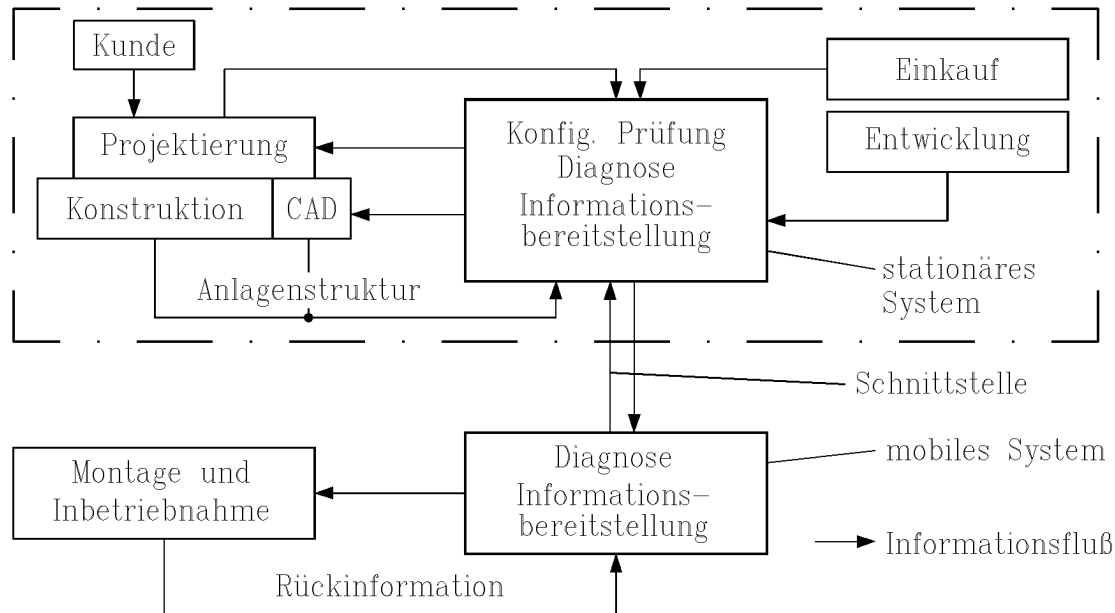
Die zentrale Aufgabe wird durch eine, um eine Diagnose ergänzte, Konfigurationsprüfung gelöst. Dieser wird zunächst eine Eingangsgrößenbearbeitungs- und Pretestprozedur<sup>3</sup> vorgestellt. Diese Schritte bauen aufeinander auf. Wenn diese Aufgabe erfüllt wird, lassen sich noch die Anforderungen der Projektierungs- und Konstruktionsunterstützung in Form einer wissensbasierten Neu- bzw. Änderungskonfiguration hinzufügen.

---

<sup>3</sup>formaler erster Test

## 2.4 Aufbau und Struktur des modellbasierten Systems

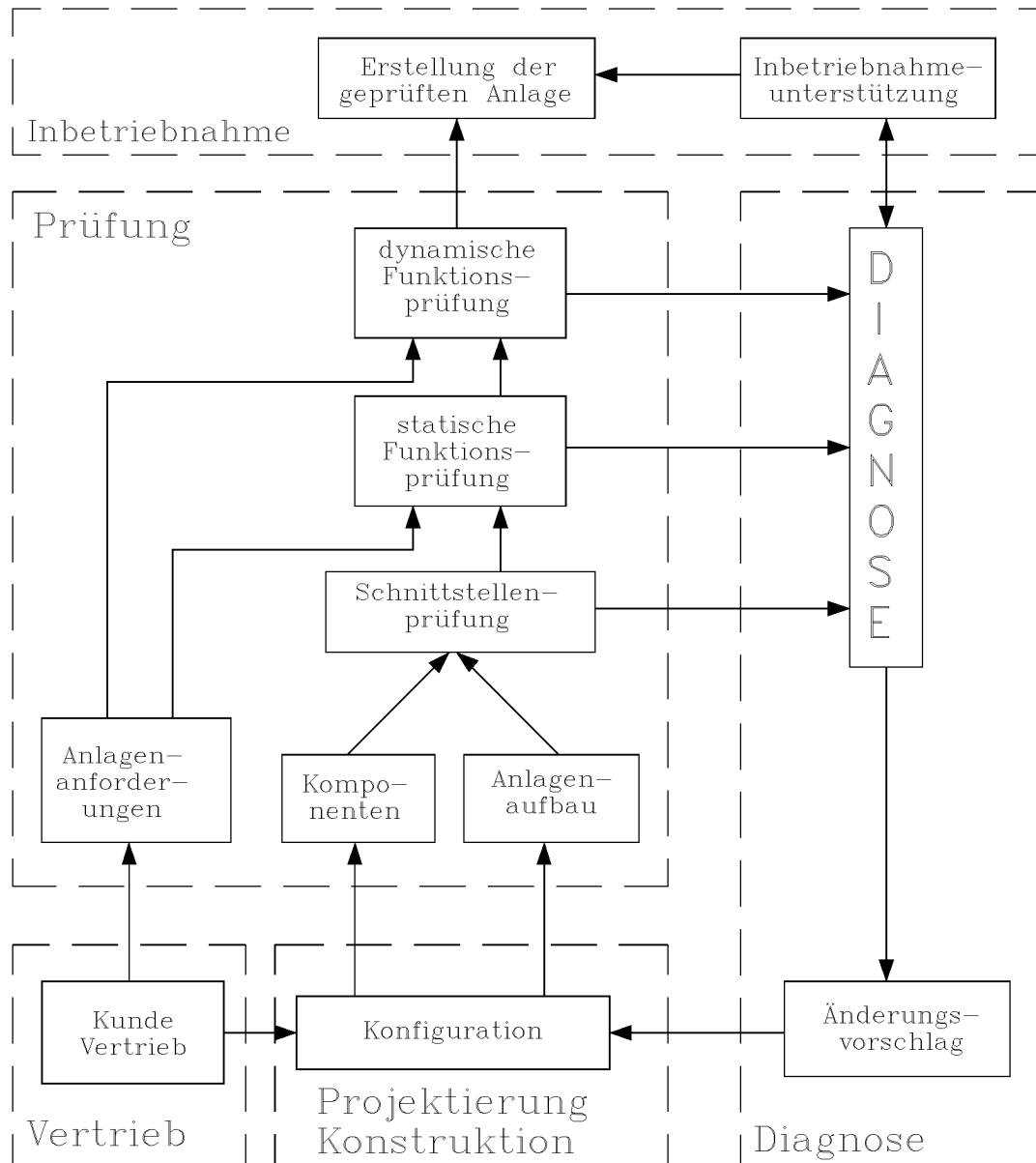
Der Aufbau und die Architektur eines solchen modellbasierten Systems ist in nicht unerheblichem Maße auch von der betrieblich organisatorischen Anbindung abhängig. Bild 2.10 erläutert diese Zusammenhänge.



**Bild 2.10:** Betriebliche Anbindung des wissensbasierten Systems

Bei dem im wesentlichen an die Projektierung und Konstruktion angebotenen Systemanteil, handelt es sich um ein ortsfestes System. Dieser im Bild 2.10 strichpunktiert eingerahmte Anteil entspricht dem innerbetrieblichen Interaktionsbereich des modellbasierten Systems. Bei dem an die Montage und Inbetriebnahme angegliederten System handelt es sich dagegen notwendigerweise um ein mobiles System. Eine detailliertere Beschreibung gibt Lemmen (1991c).

Wie Dreyfus und Dreyfus (1988) zeigten, ist es nicht möglich, mit wissensbasierten Systemen der heutigen Struktur Intuition und Kreativität eines Menschen nachzuahmen. Das Ziel dieses Systems ist vielmehr, den Menschen von Prüfungsvorgängen zu entlasten und bei kreativer Tätigkeit durch Diagnose- und Informationsmaßnahmen zu unterstützen. Der Kern des wissensbasierten Systems bildet die Konfigurationsprüfung mit anschließender Diagnose, auf die alle anderen Funktionen des Systems aufsetzen. Bild 2.11 zeigt den Aufbau und Zusammenhang dieses Kerns im betrieblichen Ablauf, wobei der Bereich Prüfung zunächst im Vordergrund steht.



**Bild 2.11:** Architektur und betrieblicher Zusammenhang des Kernsystems

Der erste Arbeitsschritt ist die sogenannte Schnittstellenprüfung, bei der untersucht wird, ob die Komponenten überhaupt so zusammenpassen. Bei der statischen Funktionsprüfung wird getestet, ob die Anlage die an sie gestellten statischen Anforderungen erfüllt. Die dynamische Funktionsprüfung untergliedert sich in zwei Bereiche. Zunächst wird untersucht, ob und welche Anlagenteile dynamische Probleme aufwerfen, um diese dann einer genaueren Untersuchung mit numerischer Simulation zuzuführen. Die Funktion dieser drei Prüfungsschritte im einzelnen werden im folgenden Abschnitt 3 genauer erläutert.

## 3 Vorgehensweise bei der Prüfung

Die Konfigurationsprüfungsaufgaben des wissensbasierten Systems untergliedern sich, neben einer hier zu vernachlässigenden Vorprüfung, auf die drei wesentlichen Bereiche

1. Schnittstellenprüfung,
2. statische Funktionsprüfung und
3. dynamische Funktionsprüfung.

### 3.1 Schnittstellenprüfung

Bei der Schnittstellenprüfung wird untersucht, ob die Anforderungen, die eine Komponente an ihre Umgebung stellt, erfüllt wird. Hierbei werden die Anforderungen bilanziert, wobei sowohl auf Minimal- als auch auf Maximalerfüllung geprüft werden muß. Die Wissensverarbeitung und die Prüfung nach dem Bilanzprinzip erläutern Stein und Weiner (1990).

Ausgehend von der Struktur der Wissensbasis des Systems unterscheidet man dabei drei Schnittstellenarten

- mechanische Schnittstellen,
- hydraulische Schnittstellen und
- elektrische bzw. elektronische Schnittstellen.

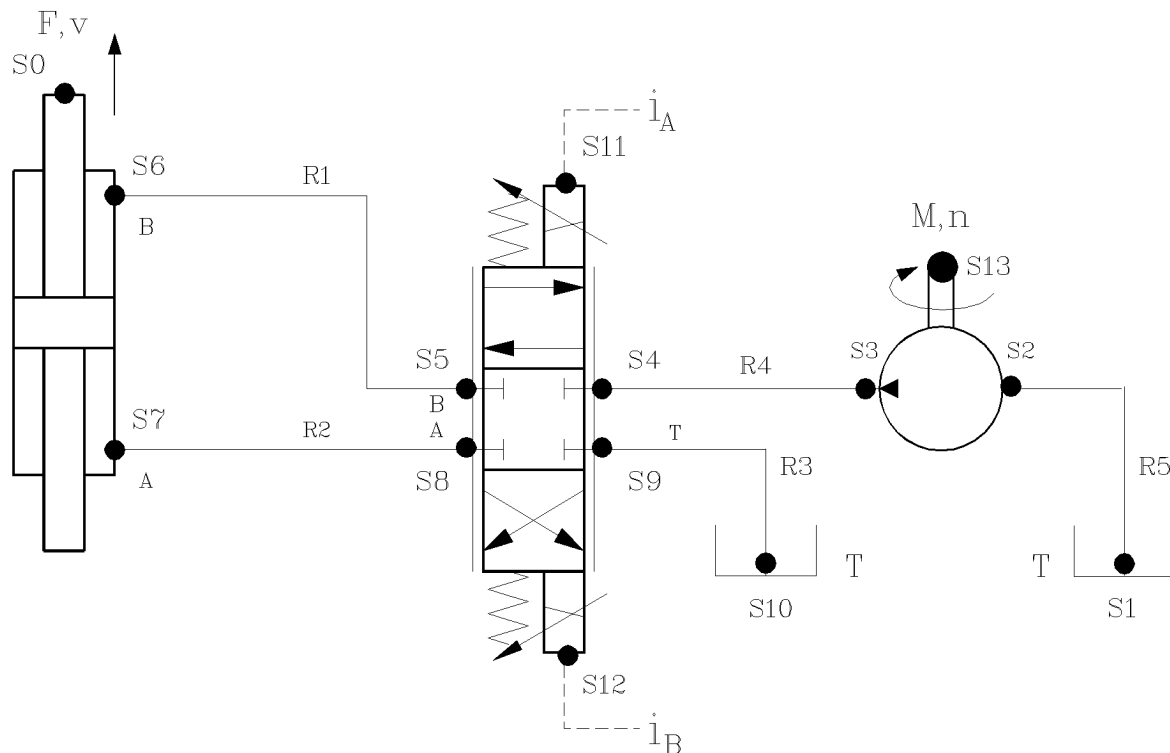
Wichtige zu untersuchende Größen sind z. B. Anschlußmaße, Nenngrößen sowie mechanische, elektrische, thermische und chemische Belastbarkeit. Zur Vielfalt der zu berücksichtigenden Größen siehe Lemmen (1991b) und Faatz (1988). Bild 3.1 zeigt ein einfaches Beispiel für einen hydraulischen Kreislauf, in dem die Komponenten und Schnittstellen dargestellt sind.

Zur vereinfachten Beschreibung des Beispiels sei die Pumpe als druckbegrenzt angenommen. Das zugehörige Druckbegrenzungsventil ist nicht extra aufgeführt. Die Schnittstellen im Beispielskreislauf unterteilen sich in:

- mechanische Schnittstellen (S0, S13),
- hydraulische Schnittstellen (S1 bis S10) und
- elektrische Schnittstellen (S11, S12).

So werden beispielsweise bei der Pumpe folgende Punkte untersucht:

- Ist die Pumpe für das vorgesehene Arbeitsmedium zugelassen?



**Bild 3.1:** Einfacher Beispielkreislauf

- Stimmen die geometrischen Anschlüsse der Rohre und des Motors (Kupplung) überein?
- Halten die Rohrleitungen den maximal möglichen Drücken stand?
- Werden die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten?
- Kann die maximal mögliche mechanische Leistung übertragen werden?
- Sind geforderte Überwachungen, Leckölleitungen, Schallschutzmaßnahmen usw. vorhanden?

Analog werden alle anderen Komponenten untersucht. So kommen bei der Untersuchung des Ventils unter anderem folgende Punkte hinzu:

- Haben die elektrischen Signale die richtige Größe?
- Werden die Anforderungen an eventuelle Meßaufnehmer erfüllt?

Werden bei dieser Schnittstellenuntersuchung Unstimmigkeiten festgestellt, muß über das Diagnosesystem der Fehler definiert und, falls möglich, ein Änderungsvorschlag gemacht werden.

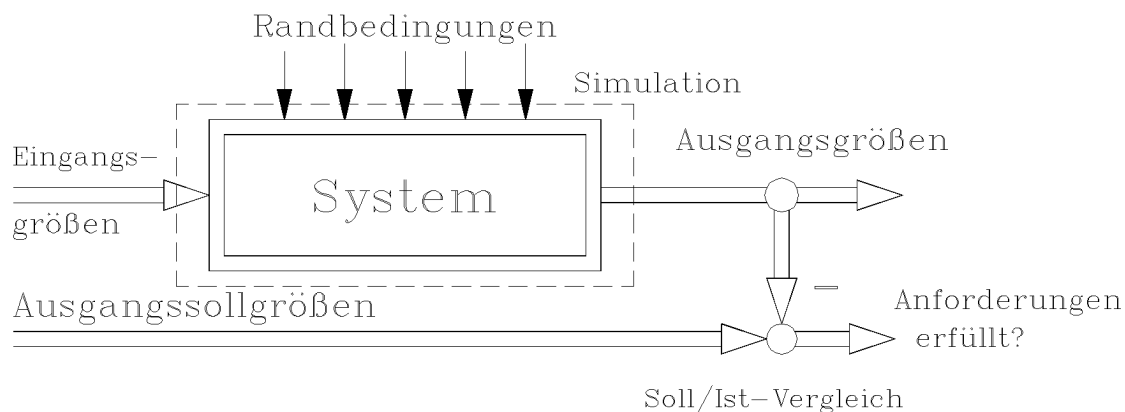
## 3.2 Statische Funktionsprüfung

Die statische Funktionsprüfung baut auf der Schnittstellenprüfung auf. Das heißt, daß alle Anschlüsse der Komponenten belegt und bezüglich ihrer direkten Nachbarn richtig sind. Bei der statischen Funktionsprüfung muß nun untersucht werden, ob das Zusammenspiel der Komponenten der Anlage dazu führt, daß die an die Anlage gestellten statischen Anforderungen erfüllt werden (Lemmen 1991c).

Prinzipiell lassen sich zwei wichtige Möglichkeiten der Prüfung unterscheiden:

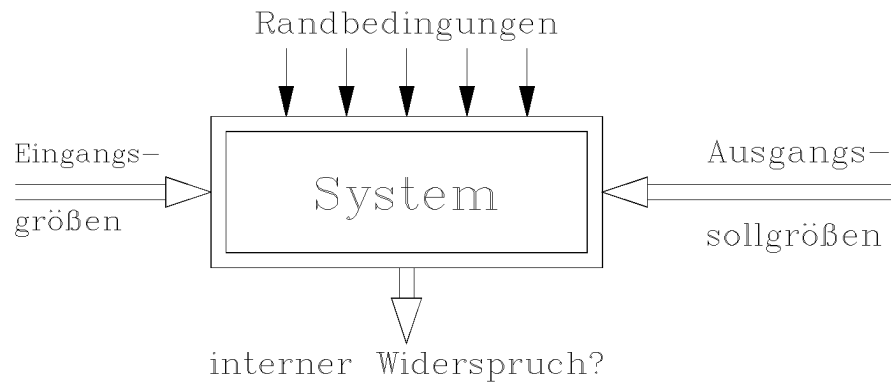
- Konstruktive Prüfung
- Destruktive Prüfung

Die konstruktive Prüfung läßt sich aus der Simulation herleiten. Ein System wird mit Eingangsgrößen beaufschlagt und seine Ausgangsgrößen werden in Abhängigkeit der Randbedingungen ermittelt. Anschließend findet ein Soll-Ist-Vergleich statt, bei dem überprüft wird, ob die simulierten Ausgangsgrößen die Sollvorgaben erfüllen. Bild 3.2 zeigt diesen Zusammenhang.



**Bild 3.2:** konstruktive Funktionsprüfung

Die destruktive Prüfung dagegen geht von den geforderten Ausgangsgrößen aus und untersucht, ob es bei den gegebenen Eingangsgrößen und in Abhängigkeit der Randbedingungen zu Widersprüchen kommt. Diese Vorgehensweise wird durch Bild 3.3 erläutert.



**Bild 3.3:** destruktive Funktionsprüfung

Bei der statischen Funktionsprüfung dieses wissensbasierten Systems können beide Prinzipien angewendet werden. Die Unterscheidung ergibt sich dadurch, daß der Anwender das System parametrisiert. Wird das System parametrisch überbestimmt, findet eine destruktive Prüfung statt. Wird das System vollständig parametrisch bestimmt, erhält man eine konstruktive Prüfung. Ein parametrisch unterbestimmtes System führt ebenfalls zu einer konstruktiven Prüfung, wobei das System allerdings nicht vollständig bearbeitet werden kann. Im Gegensatz zur klassischen Eingangs-/Ausgangssimulation kann man der Systemuntersuchung mehr Information zur Verfügung stellen, nämlich die, über die Ausgangsgrößen. Dieses Mehr an Information sorgt, außer bei einigen besonderen Strukturen, für eine Vereinfachung der Verarbeitung. Die prinzipiell einfache Untersuchung, die auf dem sogenannten Lokalisierungsprinzip (Bobrow (1984) und Fruechtenicht (1988)) aufbaut, heißt Propagierung. Dabei werden die ein hydraulisches System beschreibenden Größen Druck und Fluß (Volumenstrom) entweder als Variablen oder aber als numerische Größen weitergegeben. Eine ähnliche Beschreibung, allerdings für das dynamische Verhalten von Leitungen liefert Pawlik (1991 a+b) mit der Vierpolschaltung. Es existieren aber auch Strukturen, die direkt mit der Propagierung nicht untersucht werden können. Als maßgebliche Gruppe seien hier die Parallelstrukturen genannt. Diese Strukturen müssen geeignet wissensbasiert umgesetzt und bearbeitet werden, um sie dann mittels der Propagierung weiterverarbeiten zu können. Es muß eine Ersatzbeschreibung gefunden werden. Der physikalische Hintergrund der Ersatzbeschreibung von Parallelstrukturen, wie auch der Verarbeitung innerhalb der Komponentenbeziehungen läßt sich vergleichsweise anschaulich durch die sogenannte elektrohydraulische Analogie beschreiben. Die elektrohydraulische Analogie wird im Abschnitt 4 näher erläutert.

Die Erkennung dieser Strukturen, ist eine der wesentlichen Aufgaben einer graphentheoretischen Voruntersuchung. In den sich anschließenden Unterabschnitten soll zum tieferen Verständnis der statischen Funktionsprüfung folgendes erklärt werden:

1. nichtlineare Netzwerke
2. die graphentheoretische Voruntersuchung

3. die Constraintpropagierung
4. ein erläuterndes Propagierungsbeispiel

### Nichtlineare Netzwerke

Die Ursprünge dieser sogenannten elektrohydraulischen Analogie liegen in dem Versuch, ein hydraulisches System bezüglich seines stationären und dynamischen Verhaltens mittels einer Analogrechnerschaltung nachzubilden. In der Praxis taucht dabei das Problem auf, daß elektrische Bauelemente ein nahezu lineares Verhalten besitzen, was für hydraulische Komponenten meistens nicht zutrifft. Technische Regelstrecken haben nahezu immer ein nichtlineares dynamisches Systemverhalten (Schwarz 1991). Trotzdem existiert bei Berücksichtigung der Nichtlinearitäten mit der elektrohydraulischen Analogie eine wichtige theoretische Beschreibung (Schulte 1988a, Ebertshäuser 1973). Die Gleichungen zur elektrohydraulischen Analogie für das statische Verhalten von linearen Komponenten lauten:

$$U = RI \quad \text{und} \quad \Delta p = R_h Q^n \quad .$$

Dabei korrespondieren die Druckdifferenz mit der Spannung, der hydraulische mit dem ohmschen Widerstand und der Volumenstrom mit dem elektrischen Strom. Die elektrohydraulische Analogie und speziell der Volumenstromexponent  $n$ , der laminare und turbulente Strömung unterscheidet, wird im Abschnitt 4.3 genauer erläutert. Die Betrachtung der Hydraulik durch die elektrohydraulische Analogie führt zu nichtlinearen Netzwerken. Phillipow (1987: 537) schreibt zur Behandlung nichtlinearer Netzwerke:

Graphische Verfahren sind im allgemeinen sehr übersichtlich; ihre Genauigkeit genügt häufig. Nachteilig ist, daß sie normalerweise keine allgemeinen Aussagen über die Auswirkung von Parameteränderungen ermöglicht.

Iterative Verfahren bestehen in der sinnvollen Annahme einer vermutlichen Lösung und der folgenden schrittweisen Verbesserung des Ergebnisses. Sie sind im allgemeinen langwierig und meist unübersichtlich, zeichnen sich aber durch große Genauigkeit aus.

Analytische Verfahren approximieren die nichtlineare Beziehung durch einen analytischen Ausdruck. Die Schwierigkeiten bei der Lösung sind im allgemeinen größer, die Genauigkeit kleiner als bei graphischen Verfahren. Der Vorteil besteht in der Möglichkeit, allgemeine Aussagen über Auswirkung von Parametern abzuleiten. Die Lösung der auftretenden nichtlinearen Gleichungen bzw. Gleichungssysteme verlangt jedoch ihrerseits die Anwendung numerischer Verfahren (Newton'sche Näherungsverfahren, Iterationsverfahren), wodurch die Möglichkeit der allgemeinen Aussagen wieder verloren geht.

Bei nichtlinearen Netzen gelten das Verstärkungs- und das Superpositionsprinzip und damit die daraus abgeleiteten Operationen der Blockschaltbildalgebra nicht. Deshalb be-



trachten die von Phillipow (1987) beschriebenen graphischen Verfahren die Komponenten einzeln. Diese Vorgehensweise entspricht in etwa der lokalen Propagierung.

### Graphentheoretische Voruntersuchung

Die wesentliche Aufgabe der graphentheoretischen Voruntersuchung ist das Auffinden eventuell vorhandener Strukturen, die direkt durch die Propagierung nicht zu verarbeiten sind. Als wichtigste Gruppe von Strukturen, die bei der Propagierung Probleme aufwerfen, sind Parallelstrukturen zu nennen, die keine zusätzlichen Informationen, über Randbedingungen oder Anforderungen beinhalten. Dazu wird der hydraulische Kreislauf durch einen ungerichteten Graphen abgebildet, dessen gewichtete Kanten die Komponenten und die Knoten die Verbindungen repräsentieren. Der Ansatz, parallele Strukturen zu entdecken, beruht auf dem Dijkstra-Algorithmus des kürzesten Pfades (Jungnickel, 1990).

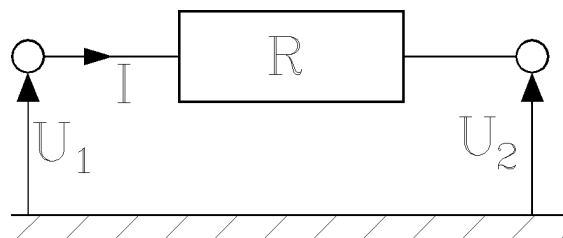
### Constraintpropagierung

Eine kurze Erklärung von Constraints liefert Ebner (1992).

Die Beschreibung der Komponenten und ihrer Beziehungen untereinander erfolgt in den sogenannten *Constraint-Netzen*. Sie bilden im Sinne der Graphentheorie eine duale Form zu den semantischen Netzen. Hier sind die Knoten mit den *Constraints* und die Kanten mit den Argumenten der Constraints beschriftet. Dabei repräsentieren die einzelnen Constraints die Relationen zwischen Variablen (Randbedingungen) in Form von mathematischen Gleichungen und Ungleichungen oder andere numerische Zusammenhänge. Sie werden als Tabellen, Regeln oder beliebige Programme implementiert und dienen nach Karras (1987) zur:

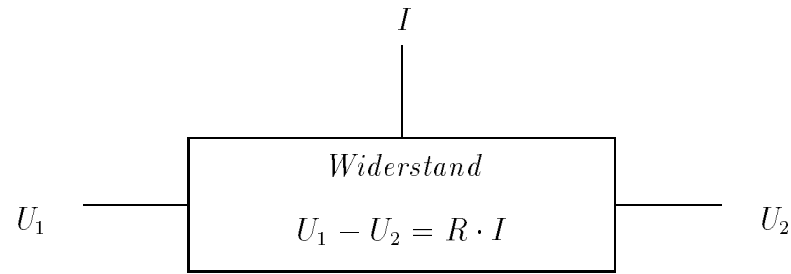
- Teilbeschreibung von Einzelheiten,
- Beschreibung in einem hierarchischen Design und
- Beschreibung von Interaktionen zwischen Teilproblemen nach Art einer Schnittstellendefinition.

Ein Constraint wird durch einen *Name-Variable-Definition*-Tripel dargestellt. Für das Beispiel des Spannungsabfalls an einem ohmschen Widerstand in Potentialdarstellung 3.4 mit dem Widerstandsbeiwert  $R$  erhält man das Constraint in Bild 3.5 (Puppe 1988).



**Bild 3.4:** Elektrischer Widerstand in Potentialdarstellung

Das Tripel dieses Constraints lautet:



**Bild 3.5:** Elektrischer Widerstand als Beispiel eines ungerichteten Constraints

Widerstand	$U_1, U_2, I$	$U_1 - U_2 = R \cdot I$
Name	Variable	Definition

Ein Constraint-Problem besteht aus einer Menge von Constraints mit gemeinsamen Variablen und deren Anfangsbedingungen. Die Lösung erfolgt durch die maximale Einschränkung der Wertebereiche (Wertemengen) der Variablen. D. h., die Variablen werden von den einzelnen Constraints eingeschränkt und solange untereinander weitergegeben, bis keine weiteren Einschränkungen für Variablen mehr möglich sind. Als Lösung erhält man eine Wertemenge (d. h. mehrere Lösungen), einen einzelnen Wert (d. h. eine eindeutige Lösung) oder keinen Wert (d. h. keine Lösung).

Die Lösung eines Constraint-Problems erfolgt durch die sogenannte *Constraint-Propagierung*. Dabei werden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen unterschieden:

- **Konstruktive Constraint-Propagierung**

Hierbei werden für gewisse mit Werten vorgelegte Variablen weitere Variablen derart bestimmt, daß die an den Knoten stehenden Relationen (Constraints) erfüllt sind. Auf diese Weise versucht man, die Berechnung über das ganze Netz auszubreiten und insbesondere die Werte für die benötigten Variablen zu bestimmen. Diese Art der Propagierung kann z. B. bei der Lösung von Gleichungssystemen angewandt werden.

- **Destruktive Constraint-Propagierung**

Sie steht im Gegensatz zur Technik der konstruktiven Constraint-Propagierung und geht von der Menge aller Möglichkeiten aus. Sie ermittelt, welche Wertemengen definitiv ausgeschlossen sind, so daß anschließend nur die erlaubten Werte übrigbleiben. Dieses ermöglicht insbesondere eine Konsistenzprüfung für die vorgelegten Variablen.

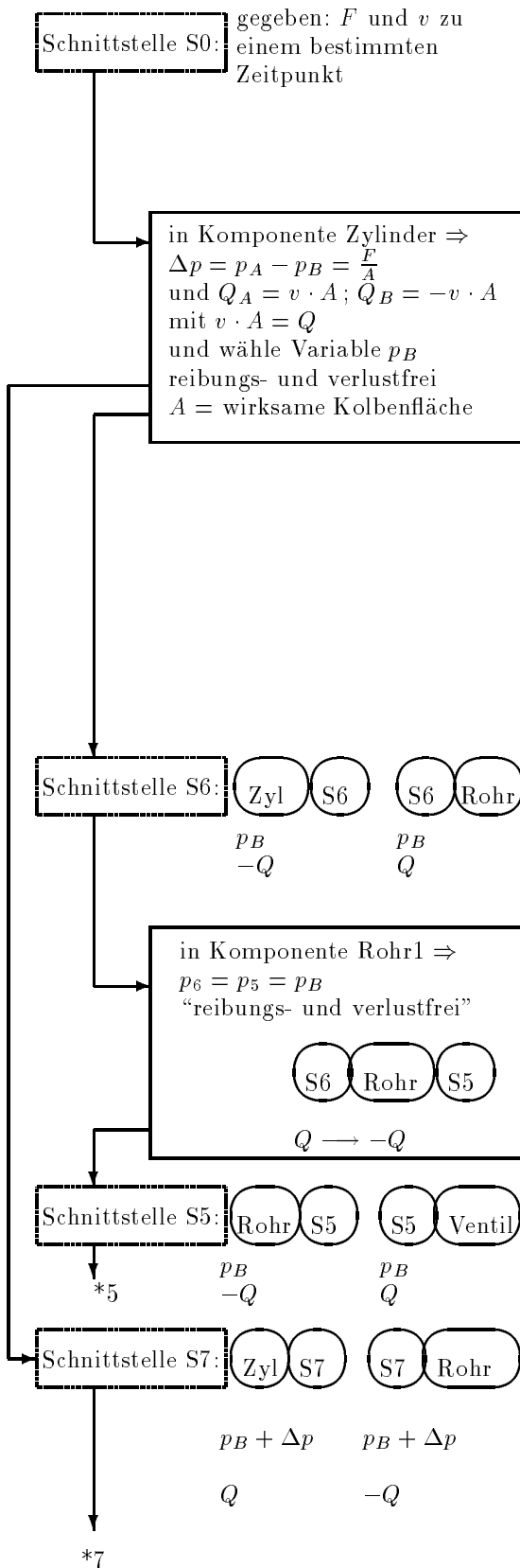
Bei der durch das modellbasierte System durchzuführenden statischen Funktionsprüfung wird sowohl die destruktive als auch die konstruktive Constraint-Propagierung benutzt.

### Propagierungsbeispiel

Ziel der statischen Funktionsprüfung mittels der Propagierung ist es, nachzuprüfen, ob die Hydraulikanlage die an sie gestellten Anforderungen in Abhängigkeit der jeweiligen Rand-



Propagieren von den Anforderungen aus:

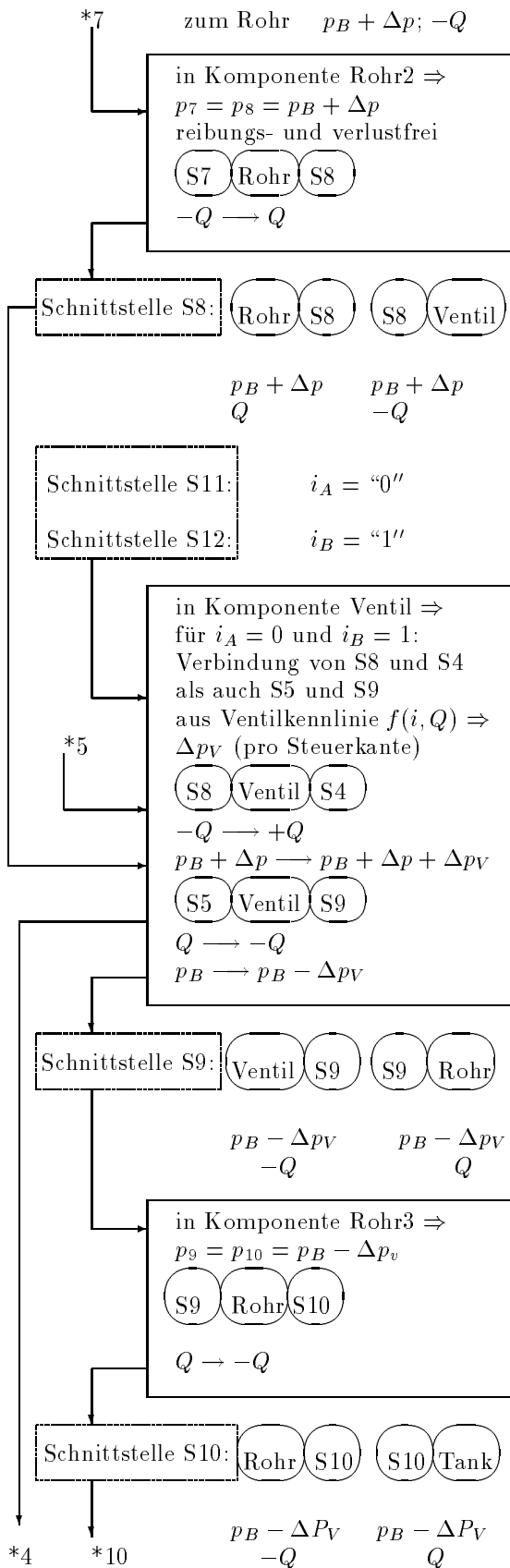


Die Sollkräfte  $F$  und Sollgeschwindigkeiten  $v$  werden aus den an die Anlage gestellten Anforderungen auch unter Berücksichtigung der Beschleunigungskräfte bestimmt. Ausgehend von diesen Werten startet der Propagierungsalgorithmus.

Aus der geforderten Kraft läßt sich mit Hilfe der Kolbenfläche  $A$  die benötigte Druckdifferenz in den Zylinderkammern  $A$  und  $B$  errechnen. Die benötigten Ölvolumenströme lassen sich wiederum über die Kolbenfläche und die Größe und Richtung der geforderten Geschwindigkeit  $v$  ermitteln. Die Vorzeichen ergeben sich aus der in der Thermodynamik üblichen Betrachtungsweise. Danach erhalten Stoffströme, die einem System zugeführt werden ein positives Vorzeichen.

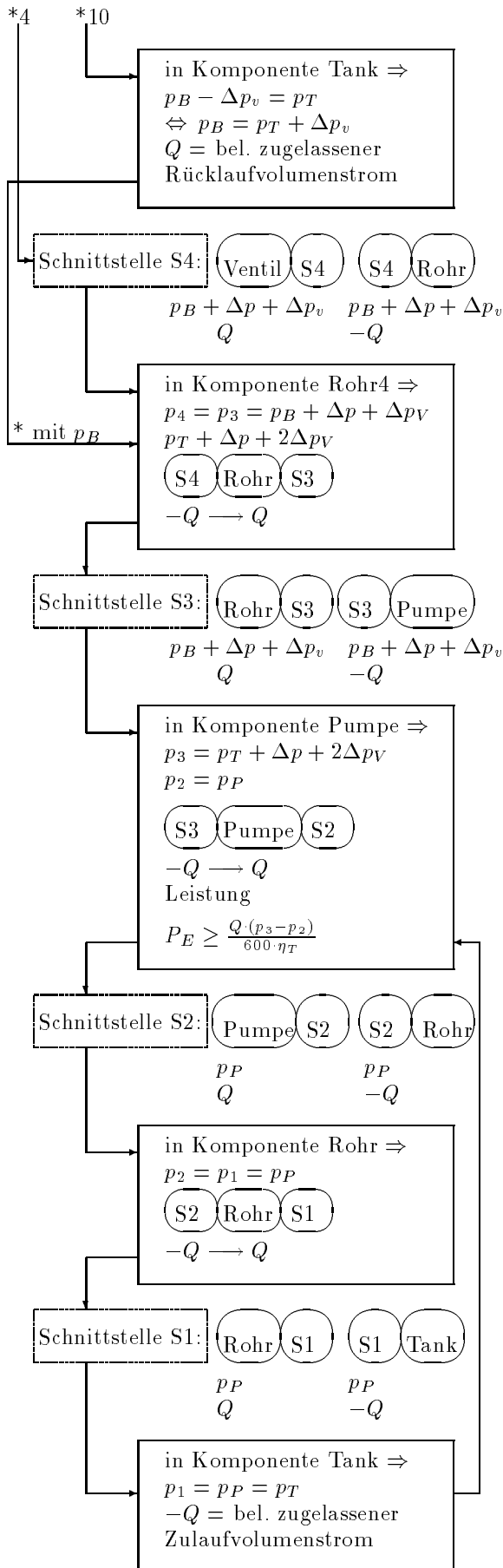
Stoffströme, die aus einem System entnommen werden, erhalten ein negatives Vorzeichen. Da in diesem Beispiel die beiden Zustandsgrößen  $p_A$  und  $p_B$  linear miteinander verknüpft sind, ist es ausreichend, eine der beiden Größen als Variable weiter zu propagieren, um auch die andere zu beschreiben. In den Schnittstellen kehren sich die Vorzeichen der Volumenströme um. Dieses liegt daran, daß das Bezugssystem, also die betrachtete Komponente, gewechselt wird. Auf das Druckpotential hat dieses jedoch keinen Einfluß.

Die Rohrleitung überträgt hier in diesem Beispiel den Ölvolumenstrom ohne Druckverluste, wobei das modellbasierte System allerdings auch Druckverluste verarbeiten soll.



Bei der Komponente Ventil können die Steuerströme  $i_A$  und  $i_B$  für das Stetigventil als Randbedingungen betrachtet werden, die von außen (einer elektrischen Ansteuerung) vorgegeben werden. Das Ventilkennlinienfeld kennzeichnet die Beziehungen von Ansteuerstrom  $i$ , Volumenstrom  $Q$  und Ventildruckabfall  $\Delta p_V$  untereinander. Bei gegebenem Ansteuerstrom  $i$  und Volumenstrom  $Q$  erhält man so den Ventildruckabfall  $\Delta p_V$  und kann diesen in Abhängigkeit der Strömungsrichtung zu dem propagierten Druck addieren oder von diesem subtrahieren. Die Ansteuerströme geben ferner Information darüber, wie die Tank- und Versorgungsdruckanschlüsse mit den Arbeitsanschlüssen, also die hydraulischen Schnittstellen der Komponente Ventil, miteinander in Verbindung stehen.

Vom Ventil ausgehend gelangt man schließlich über die Rohrleitung zum Tank. Diese Komponente liefert eine weitere, wichtige Randbedingung, nämlich den Tankdruck, der das Potential der Drücke definiert. Die Komponente Tank schließt quasi den hydraulischen Kreislauf.



Die Rohrleitung 4 verbindet das Ventil mit der druckbegrenzten Pumpe. Bei der Komponente Pumpe wird geprüft, ob der notwendige Volumenstrom und Druck erbracht werden kann. Um die Eingangsleistung kontrollieren zu können, wird noch der Ausgangsdruck der Pumpe  $p_p$  benötigt. An dieser Stelle wird wiederum die Variable  $p_p$  eingeführt und bis zum Tank propagiert, womit der Kreislauf geschlossen ist und die Pumpenleistung überprüft werden kann.

Für den Fall der druckverlustfreien Leitungen, wie in diesem Beispiel, ist es allerdings sinnvoller direkt den Tankdruck bei noch unbekanntem Volumenstrom zu propagieren.

Bei der konstruktiven Constraint-Propagierung (Ebner 1992) geschieht diese Vorgehensweise automatisch, wenn Druck und Volumenstrom unabhängig voneinander sind.

Prinzipiell kann man noch unterscheiden, ob man sich bei der Propagierung in die Tiefe oder in die Breite vorarbeitet, also ob man einen Weg so weit wie möglich löst, oder aber alle Wege immer nur um einen Schritt abarbeitet. Auf die Breiten- und Tiefensuche wird in Puppe (1988) sowie Harmon und King (1989) ausführlicher eingegangen. Bei dem ausgeführten System wird eine Propagierung in die Tiefe vorgenommen. Das heißt, von den bekannten Werten ausgehend wird so weit wie möglich propagiert. Erst wenn keine vorgegebenen Werte mehr zur Verfügung stehen, müssen Variablen eingeführt werden. Wenn alle Zustände, die für den Benutzer an den Schnittstellen zugänglich sind, mit Werten belegt sind, ist die Propagierung abgeschlossen.

### 3.3 Dynamische Funktionsprüfung

Die dynamische Funktionsprüfung schließt sich an eine erfolgreiche statische Funktionsprüfung an. Theoretisch ist es möglich, wenn auch u. U. mit großem Aufwand, alle Systemzustände einer kompletten Hydraulikanlage bezüglich ihres zeitlichen Verhaltens zu überprüfen. Dieses Vorgehen ist aber aus der Sicht der praktischen Anwendung weniger sinnvoll. Die beiden wesentlichen Gründe dafür sind:

- Normalerweise werden nur an wenige Anlagenteile so hohe dynamische Anforderungen gestellt, daß eine Prüfung notwendig ist. Es ist sinnvoller, nur die jeweiligen Anlagenteile zu untersuchen, an die die Anforderungen gestellt werden.
- Die Gesamtanlage auf einmal zu überprüfen bedeutet einen rechentechnischen und zeitlichen Aufwand. Hier bietet es sich an, die Anlage wissensbasiert in Anlagenteile zu unterteilen, die einer Prüfung bedürfen.

Die Vorgehensweise bei der dynamischen Funktionsprüfung läßt sich im einzelnen durch folgende Punkte beschreiben:

1. Auswertung der Anlagenanforderungen, um die Anlagenteile zu bestimmen, die einer Überprüfung bedürfen.
2. Sinnvolle Separation des zu untersuchenden Anlagenteils aus der Gesamtanlage.
3. Auswertung der Anlagenanforderungen und Randbedingungen, um das Umgebungsverhalten bezüglich des separierten Anlagenteils zu bestimmen.
4. Automatische Modellbildung des Anlagenteils
5. Definition der Sollwerte sowie Durchführung der Simulation.
6. Vergleich des Simulationsergebnisses mit den Anforderungen und Bewertung.

Hier kann sich, falls die Überprüfung eine Diskrepanz aufzeigt, ein Diagnosemechanismus anschließen.

In den folgenden Unterabschnitten werden die oben genannten Punkte der dynamischen Funktionsprüfung eingehender erläutert.

#### Bestimmung der zu überprüfenden Anlagenteile

In diesem Bearbeitungsabschnitt werden zunächst einmal die Anlagenteile markiert, die direkt auf Grund der Anforderungen einer Untersuchung bezüglich ihres dynamischen Verhaltens bedürfen. So wird beispielsweise ein Zylinder markiert, wenn eine bestimmte Position innerhalb einer angegebenen Zeit und bei entsprechender Genauigkeit erreicht werden soll. Dynamische Ansprüche sind meist explizit in der Anforderungsliste genannt ansonsten müssen sie aus den Anforderungen generiert werden.

## Separation des Anlagenteils

Die hydraulische Komponente, wie z. B. ein Zylinder, an die dynamische Anforderungen gestellt werden, ist im vorherigen Arbeitsschritt markiert worden. Jetzt muß der mit der Komponente verbundene Anlagenteil aus der Gesamtanlage geeignet herausgelöst werden. Dabei ist es wichtig, alle für die dynamische Beschreibung des Anlagenteils wesentlichen Komponenten zu berücksichtigen, aber gleichzeitig die Struktur des Anlagenteils möglichst einfach zu halten.

## Auswertung der Anforderungen und Randbedingungen

Bei der Auswertung der Anlagenanforderungen wird das dynamische Sollverhalten der zu prüfenden hydraulischen Komponente generiert. Das können z.B. geforderte Sprung- oder Rampenantworten sowie Frequenzgänge oder aber auch nur einzelne Kenngrößen dieser Funktionen sein. Aus der Auswertung der Randbedingungen ergeben sich Wertebereichsgrenzen für die Simulation. Das können beispielsweise maximal zulässige Drücke oder Beschleunigungen sein.

Die Separierung des Anlagenteils aus der Gesamtanlage entspricht im Grunde einem Freischnitt aus der Mechanik. Und genauso wie in der Mechanik müssen hier an dieser Stelle beschreibende Größen (Drücke und Volumenströme) den Schnittkanten zugeordnet werden. Da das dynamische Verhalten des Anlagenteils untersucht werden soll, muß bei den Schnittgrößen auch deren zeitliches Verhalten berücksichtigt werden. Inwieweit diese Größen als konstant angesehen werden können, muß mit wissensbasierten Verfahren im Rahmen der automatischen Modellbildung untersucht werden.

## Automatische Modellbildung

Die automatische Generierung des dynamischen Modells, das die Anlage beschreibt, ist die zentrale Dienstleistung des modellbasierten Systems bei der dynamischen Funktionsprüfung. Das Verhalten des Anlagenteils wird durch die Beschreibung der einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der Topologie dargestellt. Aus der statischen Funktionsprüfung kennt man die Richtung und die stationäre Größe der Signal- und Energieflüsse. Kennt man auch die Einzelmodelle der Komponenten, so läßt sich aus diesem Wissen, unter Berücksichtigung der Topologie, das Gesamtmodell der Anlage erstellen. Die Tiefe der Einzelmodelle muß untereinander, aber auch bezüglich des Simulationszieles in einem sinnvollen Verhältnis stehen. So ist es z.B. nicht sinnvoll alle Systemteile sehr genau zu modellieren, wenn man einen dominanten Systemteil nur grob bestimmt.

Eine Möglichkeit des Modelaufbaus wäre das Gesamtmodell aus möglichst tiefen Einzelmodellen aufzubauen und dann jenach Anwendung zu reduzieren und zu linearisieren. Diese Vorgehensweise birgt die Gefahr, daß zum einen viele der Parameter nicht bekannt sind und zum anderen, daß das System, wenn es zusätzliche Informationen nachfragt nur noch von regelungstechnischen Spezialisten bedienbar ist.



Eine andere Möglichkeit des Modelaufbaus besteht darin, einer Komponente mehrere verschieden tiefe Modelle zuzuordnen. Die Auswahl eines dieser Modelle für eine Komponente ist dann davon abhängig, ob dessen Parameter bekannt sind oder einfach erfragt werden können, und ob das Modell der Komponente in einem sinnvollen Verhältnis zu den Modellen der Restanlage steht. Weiter kann hier abhängig vom Simulationsziel und vom Benutzerwunsch eine Anpassung der Modelltiefe erfolgen.

Als weiterer wichtiger Punkt müssen die in Punkt 3.3.3 angesprochenen Randbedingungen modelliert werden. Als Beispiel für das genannte wissensbasierte Vorgehen seien Anlagenstränge mit Hydraulikspeichern genannt, bei denen in Abhängigkeit von den Anforderungen der Druck konstant über die Zeit angenommen werden kann.

### **Sollwertedefinition und Simulation**

Aus den Anlagenanforderungen wird der Verlauf der Sollwerte des zu simulierenden Anlagenteils bestimmt. Alle weiteren Eingangsgrößen des automatisch generierten Modells sind durch die oben genannten Randbedingungen gegeben.

Die Wahl des Integrationsverfahrens zur Simulationsdurchführung ist dabei insbesondere von der Steifheit des zu simulierenden Systems abhängig (Clemens 1992).

### **Anforderungsvergleich und Bewertung**

Dieser Bearbeitungspunkt ist die eigentliche Prüfung des dynamischen Verhaltens des Anlagenteils. Die Ausgangsgrößen der Simulation werden mit den Ausgangssollgrößen verglichen, die aus den Anlagenanforderungen generiert wurden. Dieser Vergleich und eine entsprechende Bewertung stellt eine komplexe wissensbasierte Untersuchung dar. Zwar könnte man einfach mathematische Gleichheit (bzw. Größer-Gleich oder Kleiner-Gleich, je nach Bedingung) kontrollieren, was aber wenig sinnvoll ist. Die Gründe hierfür sind, daß weder die Simulation noch die Modellbildung fehlerfrei sind und das reale Verhalten des Anlagenteils wiedergeben. Eine stärker qualitative Bewertung ist an dieser Stelle sinnvoller. Dabei bieten sich zwei Möglichkeiten an, nämlich zum einen die Verwendung von Zuordnungsfunktionen, wie sie im Bereich der Fuzzy-Logik Verwendung finden und zum anderen die Verwendung von Wertebereichen. Bei der Verwendung von Wertebereichen tritt wieder das Problem auf, daß an den Rändern des Wertebereiches eine scharfe Grenzziehung auftritt. Diese Probleme können durch die unscharfe Beschreibung mit Hilfe der Zuordnungsfunktion vermieden werden. Von größerer Bedeutung ist auch, daß das System an dieser Stelle seine Kompetenzgrenze nicht überschreitet.

## 4 Problemangepaßte Modellbildung

Eine hydraulische Anlage wird in die drei Bereiche:

- Mechanik
- Hydraulik
- Elektrik/Elektronik

untergliedert. Das derzeitige Anwendungsgebiet des modellbasierten Systems ist die Hydraulik. Die Mechanik wird wie eine “black-box” behandelt, die lediglich die äußeren mechanischen Anforderungen, wie z. B. Kraft- und Geschwindigkeitsverläufe liefert. Die Elektrik/Elektronik wird ebenfalls wie eine “black-box” behandelt, die über die Meßkomponenten Signale erhält und die Steuersignale für die Hydraulik liefert. Prinzipiell läßt sich der hier in der Hydraulik verwirklichte Ansatz auch auf die beiden anderen Gebiete übertragen.

### 4.1 Beschreibung der Mechanik in der Bühnentechnik

Es wird nur die kritischste Anwendung, nämlich die Obermaschinerie untersucht. Eine Untersuchung des nichtlinearen Verhaltens der an einem Differentialzylinder zugekoppelten Obermaschinerie wird in A. Buschmann ( 1992) durchgeführt.

Die Punkt- und Prospektzüge werden durch Differentialgleichungen beschrieben, die an mehreren Stellen nichtlineare Abhängigkeiten zeigen. Dies sind besonders die nichtlineare Seilsteifigkeit und die trockene Reibung der Rollen. Diese Nichtlinearitäten sind einer analytischen Auswertung nur schwer zugänglich. Soll eine Regelung, die den Schwingungen der Last entgegenwirken soll, entworfen werden, scheint es angebracht, eine numerische Auswertung vorzunehmen oder die Möglichkeiten einer Linearisierung zu prüfen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit von Buschmann sind:

1. Die Schwingungen der Last klingen bei stillstehendem Zylinder sehr schnell ab.
2. Bei bewegtem Zylinder ist die Last in ihrer Bewegung kaum gedämpft.
3. Eine stärkere Dämpfung der Last beim Verfahren wäre wünschenswert. Dazu könnte zum Beispiel eine Einscherung im Schnürboden dienen, die mit einem Feder-Dämpfer-Element befestigt ist.
4. Es sollte für Anwendungsfälle des beschriebenen Rechenganges stets geprüft werden, ob eine Linearisierung der Federkennlinie des Drahtseiles ohne große Fehler durchgeführt werden kann.

5. Durch die hohe Steifigkeit des Zylinders im Vergleich zum Drahtseil ist es kaum möglich, die Lastbewegungen durch einen Wegaufnehmer an der Einscherung zu erfassen. Eine Regelung, die den Lastschwingungen entgegenwirken soll, benötigt einen Wegaufnehmer an der letzten Rolle im Schnürboden.

## 4.2 Elektrohydraulische Analogie

Eine Hydraulikanlage kann als eine Art Netzwerk betrachtet werden. Speziell um elektrische Netzwerke berechnen zu können, existieren umfassende Netzwerktheorien. Um ein hydraulisches System mit Hilfe dieser Theorien verarbeiten zu können, muß dessen Beschreibung durch die elektronische Analogie angepaßt werden. Die Gleichungen zur elektrohydraulischen Analogie lauten:

$$U = R \cdot I \quad \Delta p = R_h Q^n \quad (4.1)$$

$$U = L \frac{dI}{dt} \quad \Delta p = L_h \frac{dQ}{dt} \quad (4.2)$$

$$U = \frac{1}{C} \int I dt \quad \Delta p = \frac{1}{C_h} \int Q dt \quad (4.3)$$

Eine ähnliche Bedeutung, wie das Ohm'sche Gesetz ( $U = R \cdot I$ ) in der Elektrotechnik, besitzt die Durchflußgleichung in der Hydraulik. Hier gilt allgemein die Beziehung

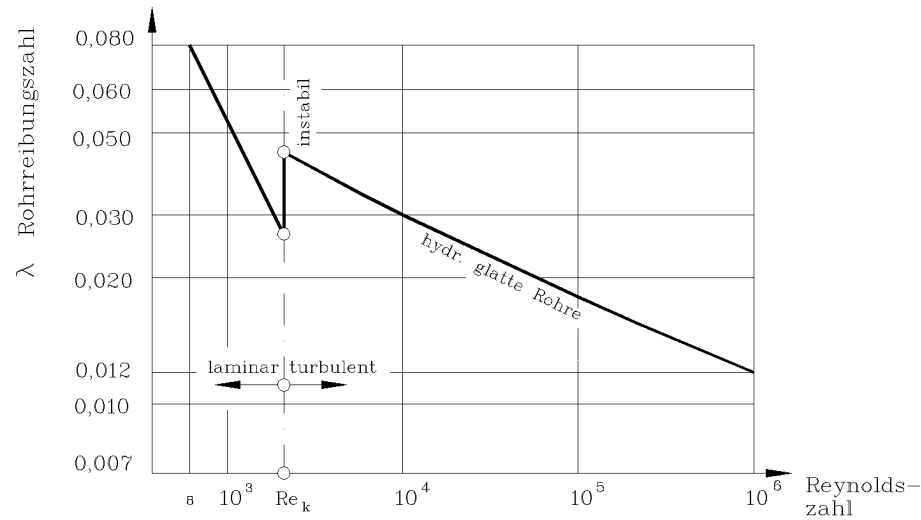
$$\Delta p = R_h Q^n \quad . \quad (4.4)$$

Dabei ist  $R_h$  der sogenannte hydraulische Widerstand (gegen Bewegungen), welcher dem elektrischen Widerstand entspricht. Genauso, wie im Bereich der Elektrotechnik eine Spannung, fällt in der Hydraulik eine Druckdifferenz  $\Delta p$  über diesen hydraulischen Widerstand ab. Der signifikante Unterschied liegt im hydraulischen Analogon zum elektrischen Strom. Dieses ist der Ölvolumenstrom  $Q$ , der mit dem Volumenstromexponenten  $n$  potenziert wird. Dabei ist der Volumenstromexponent  $n$  von der Strömungsform gekennzeichnet. Es müssen dabei die laminare und die turbulente Strömung unterschieden werden. Eine wichtige Größe, um diese beiden Strömungen voneinander abzugrenzen, ist die kritische Reynoldszahl (hier ca. 2300). Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{vd}{\vartheta} \quad (4.5)$$

setzt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , der kinematischen Viskosität  $\vartheta$  sowie einer charakteristischen Länge (hier z. B. dem Rohrdurchmesser  $d$ ) zusammen.

Um den Volumenstromexponenten  $n$  näher zu beschreiben, soll auf ein in der Literatur (z. B. Prandtl 1969) gut untersuchtes Beispiel zurückgegriffen werden. Der hydraulische Widerstand eines Rohres mit gegebener Geometrie ist im wesentlichen, bis auf konstante Faktoren, von der Rohrreibungszahl  $\lambda$  abhängig. Gleichung (4.1) wird unter der Berücksichtigung, daß die Reynoldszahl etwa proportional zum Volumenstrom  $Q$  ist, umgestellt.



**Bild 4.1:** Rohrreibungszahl  $\lambda$  in Abhängigkeit von  $Re$

Bild 4.1 zeigt die reale Abhängigkeit der Rohrreibungszahl von der Reynoldszahl. Ein Vergleich liefert in den für die Hydraulik interessanten Bereichen eine ausreichende Näherung, in dem man im Bereich der laminaren Strömung den Volumenstromexponenten zu  $n = 1$  und im Bereich der turbulenten Strömung bei hydraulisch glatten Komponenten (hier Rohren) (Prandtl 1969) zu  $n = 2$  setzt (Schulte 1988a, Backé 1992a, Ebertshäuser 1973).

Für den praktischen Einsatz in der Hydraulik läßt sich die Bearbeitung noch vereinfachen. Läßt man für den laminaren Bereich einen Fehler gegenüber dem obigen Modell zu, bei dem man allerdings immer einen höheren Widerstand erhält, so ergibt sich, daß eine Betrachtung der Rohrleitungselemente, unabhängig von auftretender Laminarität oder Turbulenz der Strömung nach

$$\Delta_{p_{RV}} = \zeta \cdot \rho \frac{v^2}{2} \quad , \quad (4.6)$$

ausreichend ist. Dabei ist  $\Delta_{p_{RV}}$  der Druckverlust über die betrachtete Rohrleitung,  $\rho$  die Dichte und  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit des Druckmediums.  $\zeta$  ist die sogenannte Verlustziffer, die entweder durch Messungen oder durch Herstellerangaben bekannt ist. Für gerade Rohrleitungen läßt sich diese zu  $\zeta = \lambda \cdot \frac{l}{d}$  bestimmen, wobei  $l$  die Länge und  $d$  der Durchmesser der Rohrleitung sind. Für die Rohrreibungszahl  $\lambda$  wird in Abhängigkeit einer Grenz-Reynoldszahl von  $Re_{grenz} = 1200$  eine Fallunterscheidung durchgeführt:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \text{für } Re \leq 1200 \quad (4.7)$$

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{für } Re > 1200 \quad (4.8)$$

Das Analogon zur elektrischen ist die hydraulische Induktivität  $L_h$ . Diese läßt sich wie ein Widerstand verstehen, der einer Beschleunigung entgegenwirkt. Der allgemeine Zu-

sammenhang lautet

$$\Delta p = L_h \frac{dQ}{dt} \quad . \quad (4.9)$$

Ein besonders anschauliches Beispiel ist der Gleichgangzylinder. Wird dieser bezüglich der durch eine Beschleunigung entstehenden Kraft untersucht, so gelangt man zur Gleichung

$$A \cdot \Delta p = m_{ges} \frac{dv}{dt} = (m_K + m_{\ddot{O}1}) \frac{dv}{dt} = \frac{m_K + m_{\ddot{O}1}}{A} \frac{dQ}{dt} \quad , \quad (4.10)$$

woraus folgt, daß  $L_h = \frac{m_K + m_{\ddot{O}1}}{A^2}$  ist. Dabei ist  $A$  die wirksame Kolbenfläche,  $m_K$  die Masse der beweglichen mechanischen Komponenten und  $m_{\ddot{O}1}$  die zu beschleunigende Ölmasse. Die letzte Analogiegleichung wird durch die hydraulische Kapazität  $C_h$  beschrieben und lautet

$$\Delta p = \frac{1}{C_h} \int Q dt \quad . \quad (4.11)$$

Die hydraulische Kapazität läßt sich durch den Widerstand erklären, der einer Verformung der Hydraulikflüssigkeit (z. B. Öl) entgegengesetzt wird. Für den Ersatzkompressionsmodul  $E'_{\ddot{O}1}$  gilt nach Schulte (1988a) der Zusammenhang

$$\Delta V = \frac{V_0}{E'_{\ddot{O}1} \Delta p} \quad . \quad (4.12)$$

Der Ersatzelastizitätsmodul beschreibt die Elastizität des Hydraulikmediums mit eventuell eingeschlossenem Gas sowie die Elastizität der Komponenten selbst.  $V_0$  ist das Volumen des unbelasteten Hydraulikmediums. Nach dem Übergang auf

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_0}{E'_{\ddot{O}1}} \frac{dP}{dt} \quad (4.13)$$

folgt mit  $Q = \frac{dV}{dt}$ :

$$Q = \frac{V_0}{E'_{\ddot{O}1}} \frac{dP}{dt} \quad (4.14)$$

Nach der Integration ergibt sich

$$\Delta p = E'_{\ddot{O}1} \int \frac{Q}{V_0} dt \quad . \quad (4.15)$$

Die hydraulische Kapazität ergibt sich damit zu  $C_h = \frac{V_0}{E'_{\ddot{O}1}}$ .

Mit Hilfe der elektrohydraulischen Analogie hat man damit eine nützliche Beschreibung, die eine hydraulische Schaltung in ein Ersatznetzwerk transformiert. Solange man sich auf Komponenten mit linearem Verhalten beschränkt bzw. Linearisierungen um den Arbeitspunkt ausreichen, können die aus der Elektrotechnik bekannten Standardvorgehensweisen benutzt werden. Probleme ergeben sich dagegen, wenn man die hydraulikspezifischen

Nichtlinearitäten berücksichtigt, wie z.B. bei dem häufig anzutreffenden Differentialzylinder. Dann müssen nichtlineare Netzwerke (siehe Abschnitt 3.2.1) untersucht werden.

Das modellbasierte System läßt die Verwendung von Signalleitungen zu. Die elektronischen Komponenten können genauso wie die hydraulischen Komponenten bezüglich ihrer Grafik und ihres Verhaltens beschrieben werden. Prinzipiell ist das System um alle denkbaren Komponenten erweiterbar, die sich durch die lokale Beschreibungssprache darstellen lassen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht beschreibt den Aufbau und die Struktur eines modellbasierten Systems zur wissensbasierten Funktionsprüfung hydraulischer Anlagen. Das System hat die Aufgabe, den Projektteur/Konstrukteur bei seiner kreativen Entwurfstätigkeit bei der Anlagenerstellung zu unterstützen. Von Bedeutung ist, daß dieses vom Ansatz her offene System in der Lage ist, auch beliebige statische Nichtlinearitäten praxisgerecht sowie anlagen- bzw. komponentenorientiert zu verarbeiten. Der Stand der Systementwicklung ist so weit fortgeschritten, daß neben der Eingabe und der formalen Prüfung des Schaltplans sowie dem selbsttätigen internen Modellaufbau auch die Propagierung implementiert ist. Die nächsten Arbeitsaufgaben nach Abschluß der statischen Funktionsprüfung liegen in der Entwicklung und Implementierung der dynamischen Funktionsprüfung. Dabei kann für die dynamische Simulation auf schon existierende Ergebnisse der statischen Funktionsprüfung zurückgegriffen werden. Diese Ergebnisse werden insbesondere bei der Erstellung des dynamischen Modells aus der Topologie und der Beschreibung der Einzelkomponenten benötigt. Für diese und zukünftige Aufgaben wird eine Wissensbasis benötigt, die zum einen abhängig von den Anforderungen aus der Praxis ist und zum anderen von einer möglichst vollständigen Modellbeschreibung ausgeht. Dabei muß insbesondere nichtlineares Verhalten und unsicheres (unscharfes) Wissen beschrieben werden. Ausgehend von diesen Modellen kann bei einer Weiterführung der Arbeiten auch auf den Einsatz von Regelungssystemen eingegangen werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- Backé, W.** 1992a. *Grundlagen der Öhydraulik*. Aachen: Vorlesungsumdruck RWTH Aachen. 8. Auflage.
- Backé, W.** 1992b. *Servohydraulik*. Aachen: Vorlesungsumdruck RWTH Aachen. 6. Auflage.
- Bobrow, D. G.** 1984. *Qualitative Reasoning about Physical Structure*. Artificial Intelligence. Band 24.
- Buschmann, A.** 1992. *Modellbildung und Schwingungsbetrachtung einer zu einem Differentialzylinder über einen Seilzug angekoppelten Masse*. Studienarbeit (unveröffentlicht) MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Clemens, D.** 1992. *Parallele Simulation mit Transputer-Systemen*. Forschungsbericht 5/92 . MSRT. Universität-GH-Duisburg.
- Dreyfus, H. L. und E. Dreyfus.** 1988. *Künstliche Intelligenz; Von den Grenzen der Denkmachine und dem Wert der Intuition*. Reinbek: Rowohlt.
- Ebertshäuser, H. u. a.** 1973. *Grundlagen der Öhydraulik*. Mainz: Krauskopf.
- Ebertshäuser, H.** 1984. *Planung hydraulischer Anlagen*. Ö + P 28. 1-11.
- Ebner, R.** 1992. *Entwicklung eines Expertensystems zur Konfigurierung hydraulischer Fahrtriebe für Radlader*. Interner Abschlußbericht (unveröffentlicht) MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Eversheim, W.** 1990. *Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen*. Düsseldorf: VDI - Verlag.
- Faatz, H. u. a.** 1988. *Der Hydrauliktrainer Band 3*. Lohr a. Main: Mannesmann Rexroth GmbH.
- Fruechtenicht, H. W. (Hrsg.)** 1988. *Technische Expertensysteme: Wissensrepräsentation und Schlußfolgerungsverfahren*. München, Wien: Oldenbourg.
- GMA.** 1989. *Wissensbasierte Systeme*. Terminologiepapier der GMA.
- Harmon, P. und D. King.** 1987. *Expertensysteme in der Praxis*. München, Wien: Oldenbourg.
- Jungnickel, D.** 1990. *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*. Mannheim: BI. Wiss.-Verlag.
- Karras, D. u.a.** 1987. *Entwicklungsumgebungen für Expertensysteme*. Berlin: Walter de Gruyter.



- Kleine-Büning, H.** 1991. *Wissensbasierte Methoden für die Angebotserstellung*. Leipzig: Tagungsband Workshop Qualitätssicherung.
- Kretz, D. u. a.** 1988. *Der Hydrauliktrainer Band 2*. Lohr a. Main: Mannesmann Rexroth GmbH.
- Lemmen, R.** 1991a. *Entwicklungsmethodiken für Expertensysteme*. Seminarvortrag (unveröffentlicht). MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Lemmen, R.** 1991b. *Akquisition und Analyse von Wissen für die Inbetriebnahme von hydraulischen translatorischen Antrieben*. Diplomarbeit (unveröffentlicht). MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Lemmen, R.** 1991c. *Nutzen und Struktur eines Wissensbasierten Systems zur Inbetriebnahmeunterstützung einer hydraulischen Anlage*. Forschungsbericht 12/91 MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Lemmen, R.** 1992. *Konfigurationsprüfung einer hydraulischen Anlage mit einem modellbasierten System*. Forschungsbericht 2/92 MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Lunze, J.** 1990. *Qualitative Analysis of dynamical Systems*. Dresden: Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf.
- Matthies, K.J.** 1992. *Einführung in die Ölhydraulik*. Braunschweig: Teubner
- Pawlik, M.** 1991a. *Zur Modellbildung des dynamischen Verhaltens der Flüssigkeitssäule in den Verbindungsleitungen hydrostatischer Antriebe*. Forschungsbericht 3/91. MSRT. Universität-GH-Duisburg.
- Pawlik, M.** 1991b. *Ein mathematisches Modell zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Flüssigkeitssäule in den Verbindungsleitungen hydrostatischer Antriebe*. Forschungsbericht 11/91. MSRT. Universität-GH-Duisburg.
- Phillipow, E.** 1987. *Taschenbuch Elektrotechnik Band 2: Grundlagen der Informationstechnik*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Prandtl L. u. a.** 1969. *Strömungslehre*. Vieweg.
- Puppe, F.** 1988. *Einführung in Expertensysteme*. Berlin: Springer.
- Puppe, F.** 1990. *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*. Berlin: Springer.
- Reuter, H.** 1992. *Zur Wahl der Startparameter beim rekursiven Prädiktionsfehlerverfahren und zur Suche der Modellordnung nichtlinearer Systemmodelle*. Forschungsbericht 11/92 MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Schmitt, A.** 1986. *Der Hydrauliktrainer Band 1*. Lohr a. Main: Mannesmann Rexroth GmbH.

- 
- Schulte, A.** 1988a. *Grundlagen der Ölhydraulik*. Vorlesungstext. MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Schulte, A.** 1988b. *Hydraulische Regelkreise und Servosteuerungen*. Vorlesungstext. MSRT. Universität -GH- Duisburg.
- Schwarz, H.** 1991. *Nichtlineare Regelungssysteme*. München: Oldenbourg.
- Stein, B. und I. Weiner.** 1990. *MOKON*. Interner Report SM-DU-178 (unveröffentlicht). Universität -GH- Duisburg.