

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Angesichts des globalen Wettbewerbs stehen Industrieunternehmen unter hohem Zeit-, Kosten- und Innovationsdruck. Vorrangiges Ziel der Unternehmen ist es, Produktideen möglichst schnell und kostengünstig in qualitativ hochwertige Produkte umzusetzen und auf den Markt zu bringen. Im Rahmen der Produktentwicklung werden alle entscheidenden Produkteigenschaften festgelegt, die dann alle weiteren Geschäftsprozesse und Produktlebensphasen wie Fertigung, Montage, Vertrieb, Nutzung und Entsorgung bzw. Recycling bestimmen. Moderne Produkte zeichnen sich durch eine hohe Funktionsintegration aus, die oft mit einer Miniaturisierung der Systemkomponenten einhergeht. Die Folge ist eine zunehmende Komplexität der Produkte, die in hohem Maße auch auf die Integration mehrerer Ingenieursdisziplinen wie der Mechanik, der Elektrotechnik und der Informatik zurückzuführen ist. Häufig führen eine unstrukturierte Kommunikation zwischen Kunde und Unternehmen sowie eine unsystematische Informationsbereitstellung aus vorangegangenen Entwicklungsphasen zu unnötigen Iterationszyklen im Produktentwicklungsprozess und zu einer Verlängerung der geplanten Produktentwicklungszeit und damit zu einer Erhöhung der Kosten. Ferner sind die Ursachen für die Verzögerungen im Produktentwicklungsprozess in der oft mangelhaften Projektorganisation, den nicht immer klar definierten Prozessabläufen und einer unzureichenden Unterstützung der interdisziplinären Zusammenarbeit zu suchen.

Eine systematische Dokumentation und anschließende Nutzung von Erfahrungswissen aus vorangegangenen Entwicklungsprojekten findet in den meisten Unternehmen in der Regel nicht statt, da entweder geeignete Dokumentationsmethoden und -werkzeuge fehlen oder für diese Tätigkeit keine oder nur sehr wenig Zeit eingeplant wird. Der Nutzen einer durchgängigen Projektdokumentation wird vielfach verkannt, da der Aufwand und der Nutzen meist in unterschiedlichen Entwicklungsphasen und in unterschiedlichen Abteilungen oder Unternehmen entstehen.

Die Beherrschung des Produktentwicklungsprozesses wird zunehmend zu einem wettbewerbsentscheidenden Faktor. Arbeiten zur Verbesserung des Prozesses konzentrieren sich auf die frühen Phasen der Produktentwicklung, da hier die Weichen für den weiteren Produktentwicklungsprozess gestellt werden. Sie sind u.a. durch Bestrebungen für einen verstärkten Rechereinsatz gekennzeichnet. Eine erfolgreiche Produktentwicklung erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Entwicklungsprozesses und eine durchgängige und methodische

Unterstützung aller Produktentwicklungsphasen [Pahl-97], [Ehrl-03], [VDI-2221], [Grab-97]. Die heutige Situation entspricht dieser Forderung nur in Teilen; insbesondere bei Produkten mit hohem Individualitätscharakter wie Systemen der hydrostatischen Antriebstechnik fehlt häufig die Durchgängigkeit, ganz besonders zwischen Projektierung und Entwicklung/Konstruktion und Konstruktion und Kundendienst.

Das Gebiet der Hydrostatik umfasst Systeme, die mittels Druckflüssigkeiten Energie und Signale übertragen; die Systeme bestehen aus Komponenten wie hydrostatischen Pumpen und Motoren, Ventilen zur Steuerung oder Regelung von Volumenströmen und Drücken, Rohrleitungen, Druckspeichern, Behältern und Komponenten zur Konditionierung der für die Leistungsübertragung eingesetzten Druckflüssigkeiten. Elektrische, elektronische und informationstechnische Komponenten erfassen Betriebszustände und erzeugen Stellsignale zur Ansteuerung der hydrostatischen Komponenten. Kennzeichnend für die Hydrostatik ist das große Einsatzspektrum hydrostatischer Anlagen, die nahezu in jeder modernen Arbeitsmaschine Verwendung finden, sowohl im mobilen als auch im stationären Einsatz. Die Bandbreite der Anwendungen reicht von der Realisierung hoher Kräfte und Drehmomente in der stahl- und kunststoffverarbeitenden Industrie bis hin zu hochdynamischen und kompakten Stellsystemen in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie oder der Prüftechnik. Ein weiteres, typisches Einsatzgebiet ist das Feld der Nutzfahrzeuge; beispielhaft für den mobilen Einsatz von hydrostatischen Anlagen ist in *Bild 1* eine moderne Holzerntemaschine dargestellt. Die Klemm-, Förder- und Sägewerkzeuge sowie der Fahrantrieb werden durch ein Hydrostatiksystem angetrieben, dessen Teilsysteme durch die elektronische Mess-, Steuer- und Regelungstechnik koordiniert und damit integriert werden.

Hydrostatische Antriebe bieten gegenüber den mechanischen, elektrischen und pneumatischen Antrieben je nach Einsatzgebiet einige Vorteile. Hierzu zählen z.B. die Übertragung hoher Kräfte und Drehmomente in kleinen Einbauräumen, die hohe Leistungsdichte der An- und Abtriebe und die Möglichkeit der stufenlosen Änderung von Bewegungsgrößen bei gleichzeitig hoher Dynamik. Ferner ist die Ausfallsicherheit der Anlagen bei Verwendung erprobter Standardkomponenten in der Regel bekannt und vergleichsweise hoch. Trotz einiger Nachteile gegenüber anderen Antriebskonzepten hat sich die Hydrostatik in vielen Industriebereichen seit Jahrzehnten bewährt. Als wichtigste Nachteile sind jedoch die Strömungsverluste in den Komponenten, die vergleichsweise großen Anlagengewichte, die möglichen Leckageprobleme und die Kompressibilität der Druckflüssigkeiten zu nennen.

Die Komplexität der Anlagen führt dazu, dass nur noch Experten mit sehr fundiertem Fach-



Bild 1: Durch Mobilhydraulik angetriebene Holzernemaschine, Quelle: [NN-03b]

wissen und langer Projektierungserfahrung in der Lage sind, die Systemzusammenhänge so zu überblicken, dass ein funktionierendes Anlagenkonzept erstellt wird, ohne dass damit sichergestellt ist, dass die vorgeschlagene Lösung optimal ist.

Zur Sicherung des Wettbewerbsvorteils eines produzierenden Unternehmens zählt neben dem gleich bleibend hohen Qualitätsstandard der Produkte und deren Verfügbarkeit zu möglichst niedrigen Preisen die Fähigkeit der schnellen Reaktion auf Kundenanfragen. Eine zügige und verlässliche Angebotserstellung hat dabei hohe Bedeutung. Aufgrund von Konkurrenzdruck und oft auch aus Gründen der Zeitersparnis verzichten Unternehmen häufig auf eine systematische und vollständige Klärung der Aufgabenstellung. Das führt zu falsch oder zumindest unvollständig ausgearbeiteten Angeboten, die wiederum für den Kunden einen falschen (auch häufig nicht mehr zu korrigierenden) Preis ausweisen und unternehmensintern zu einer falschen Einschätzung des Entwicklungs- und Fertigungsaufwands mit der Folge von Mehrkosten und Zeitverzögerungen führen; es kommt durchaus auch vor, dass ein Auftrag technisch nicht ausgeführt werden kann und zurückgegeben werden muss.

Aufgrund der steigenden Produkthanforderungen seitens des Marktes müssen die hydrostatischen Anlagen eine immer größere Anzahl von Funktionen erfüllen und ein hohes Maß an Aus-

fallsicherheit bei gleich bleibend niedrigem Preisniveau bieten. Die Komponenten- und Anlagenhersteller reagieren darauf einerseits durch den Einsatz moderner Elektronik und Software zur Datenverarbeitung im Bereich der Betriebszustandserfassung, der Signalübermittlung und der Regelungstechnik. Andererseits wird die Entwicklung hydrostatischer Komponenten vorangetrieben, Ziele sind dabei größere Leistungsdichte, größere Genauigkeit, größere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer.

Obwohl bei derart komplexen Produkten eine systematische Herangehensweise an das Entwicklungsproblem zweifelsohne sinnvoll ist, kommt die allgemein anerkannte Konstruktionsmethodik nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI-2221] nicht im wünschenswerten Umfang zum Einsatz. Die Ursache hierfür ist nicht zuletzt in der historisch gewachsenen Arbeitsweise der Konstrukteure zu suchen, eine abstrakte Aufgabenstellung möglichst schnell in „fassbare“, d.h. konkrete Komponenten und Baugruppen umzusetzen, um dann vertraute Arbeitsweisen und Werkzeuge der Konstruktion anwenden zu können. So wird bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase, typischerweise schon in der Phase der Projektierung, mit der Schaltplanerstellung sowie der Berechnung und Auswahl von Komponenten und Baugruppen begonnen, anstatt zunächst lösungsneutrale Überlegungen zu den funktionalen Zusammenhängen anzustellen.

Das frühe Festlegen der Systemstruktur engt das Spektrum möglicher Produktkonzepte ein, wodurch das Potential, neue und innovative Produktkonzepte zu finden, sinkt. Die Projekt Ingenieure und die Konstrukteure sind allerdings infolge des Termindrucks zu schneller Ausarbeitung gezwungen, was eine systematische Klärung der Aufgabenstellung und eine funktionale Betrachtungsweise oft nicht möglich macht. Eine Beschleunigung des Entwicklungsprozesses durch Überspringen einzelner als unwichtig erachteter Entwicklungsphasen wird aber in vielen Fällen nicht erreicht; Beispiele aus der Praxis belegen, dass eine durchgängige Anwendung der Konstruktionsmethodik in der Regel eine Verkürzung der Entwicklungszeit bewirkt [Pahl-97].

Zur Unterstützung der Produktentwicklung in der Praxis finden Rechnerwerkzeuge wie 3D-CAD-Systeme, EDM/PDM¹-Werkzeuge und Schaltplanerstellungs- und Simulationsprogramme Verwendung, es ist bislang aber noch kein entwicklungsphasenübergreifendes DV-Werkzeug verfügbar; der Konstrukteur muss mit Insellösungen arbeiten. So existiert insbesondere keine zentrale Produktdatenbasis, was einerseits zu Inkonsistenzen und Redundanzen im Datenbestand führen kann und andererseits die systematische Suche nach Konstruktions erfahrung in Vorläuferprojekten erschwert.

¹EDM: Engineering Data Management; PDM: Product Data Management

Eine Reihe von in Kapitel 2 näher erläuterten Forschungsansätzen befasst sich bereits seit Beginn der 80iger Jahre mit der Thematik des rechnerunterstützten Entwicklungsprozesses von hydrostatischen Anlagen. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge berücksichtigen jedoch jeweils nur einen Teil der Prozesskette und beschränken sich in der Regel auf die Unterstützung der späten Entwicklungsphasen wie der Simulation des dynamischen Systemverhaltens, der regelungstechnischen Optimierung der Regler oder auch der konstruktiven Ausarbeitung von Systemkonzepten; als Beispiele für eine Rechnerunterstützung der Ausarbeitungsphase sind die Arbeiten von Bartelmei [Bart-92] und Pott [Pott-02] zu nennen, die sich mit der intelligenten Unterstützung des Konstruktionsprozesses hydrostatischer Steuerblöcke befassen. Methoden und Werkzeuge zur gezielten Unterstützung der frühen Projektierungsphasen existieren nur ansatzweise und sind bislang weder ganzheitlich konzipiert noch praxistauglich realisiert worden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, für den Bereich der Entwicklung von hydrostatischen Anlagen ein Rechnerwerkzeug zu konzipieren und prototypisch umzusetzen, das den Produktentwickler insbesondere in den frühen Entwicklungsphasen durch das Bereitstellen von DV-Werkzeugen und Wissensbasen situationsspezifisch unterstützt. Der durchgängige Rechnereinsatz auf Grundlage einer gemeinsamen Produkt- und Prozessdatenbasis sowie einer einheitlichen graphischen Benutzerschnittfläche soll helfen, Iterationszyklen im Produktentwicklungsprozess auf ein Minimum zu reduzieren und damit die Verkürzung der Entwicklungszeit und die Senkung der Entwicklungskosten bei gleichzeitig hoher Produktqualität zu ermöglichen. Arbeitsbasis ist die konsequente Umsetzung der VDI-Richtlinie 2221 [VDI-2221] für die Entwicklung von hydrostatischen Anlagen.

Das auf Produktmodellen basierende DV-Werkzeug soll neben der systematischen Dokumentation aller im Rahmen der Produktentwicklung erfassten und generierten Informationen auch die Nutzung von formalisierter Entwicklungserfahrung ermöglichen. Durch die webbasierte Kommunikation sollen die oft verteilt arbeitenden Projektteams auf der Basis einer gemeinsamen Entwicklungsplattform zusammengeführt werden. Die Realisierung des DV-Werkzeugs erfolgt prototypisch, wobei seine Leistungsfähigkeit anhand eines Beispiels aus dem Bereich der Mobilhydraulik gezeigt wird.

Der Anwendungsbereich der Hydrostatik wird gewählt, da einerseits für die rechnergestützte

Produktentwicklung in diesem Bereich bisher nur wenige Methoden und Werkzeuge verfügbar sind und andererseits auf Erkenntnisse zur formalisierten Abbildung hydrostatischer Aufgabenstellungen im Rahmen von Vorläuferprojekten [Nott-99], [Feld-92] des Arbeitsbereichs Konstruktionstechnik I, der TU Hamburg-Harburg aufgebaut werden kann.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „*Projektierungssystem für hydrostatische Systeme, das eine durchgängige DV-Unterstützung für Aufgabenerfassung, Lösungsfindung, Schaltplanerstellung und geometrische Gestaltung bietet*“ durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) als ein Teilprojekt des Schwerpunktprogramms 732 „*Innovative rechnergestützte Konstruktionsprozesse: Integration von Gestaltung und Berechnung*“ gefördert [DFG-732].

2 Stand der Technik: Projektierung hydrostatischer Anlagen

Typischerweise ist das hydrostatische System einer Anlage sowohl im Bereich der Mobil- als auch der Stationärhydraulik integraler Bestandteil eines mechanischen Gesamtsystems. Die Kraftübertragungen sowie die Bewegung und Steuerung der mechanischen Komponenten der Arbeitsmaschine erfolgt je nach angesteuertem Freiheitsgrad mit einem oder mehreren hydrostatischen Abtrieben; innerhalb einer hydrostatischen Anlage werden die verschiedenen Abtriebszweige in der Regel als „hydraulische Achsen“ bezeichnet. Die konstruktiven Ausführungen sind in Abhängigkeit von den zu realisierenden Produktfunktionen und den Einsatzgebieten sehr unterschiedlich, jedoch basieren alle hydrostatischen Anlagen auf dem in *Bild 2* vereinfacht dargestellten Prinzip und beinhalten Komponenten, die nach ihrer Aufgabe in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Antriebsmaschinen,
- Verbraucher,
- Hydrostatische Arbeitsmaschinen,
- Steuerungs- und Regelungskomponenten,
- Hydrostatische Kraftmaschinen,
- Komponenten zur Konditionierung der Druckflüssigkeit und
- Schlauch- und Rohrleitungen.

Die Bezeichnung der Gruppen wurde so allgemein gewählt, dass durch sie keine konkrete Aufgabenstellung eines Elements der Gruppe impliziert wird. *Bild 2* veranschaulicht unter Angabe wesentlicher Betriebsparameter die in einer typischen hydrostatischen Anlage vorhandenen Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Im Folgenden werden einige der genannten Komponentengruppen genauer beschrieben, um im Anschluss die generelle Vorgehensweise bei der Entwicklung von Hydrosystemen erläutern zu können.

Jede hydrostatische Anlage verfügt über mindestens einen Verbraucher, der die Abtriebsenergie E_{ab} nutzt und damit die Menge der erforderlichen Antriebsenergie E_{an} bestimmt, die von der Antriebsmaschine für das Gesamtsystem zur Verfügung gestellt werden muss. Das zwischen Antriebsmaschine und Verbraucher geschaltete Hydrosystem wandelt die von

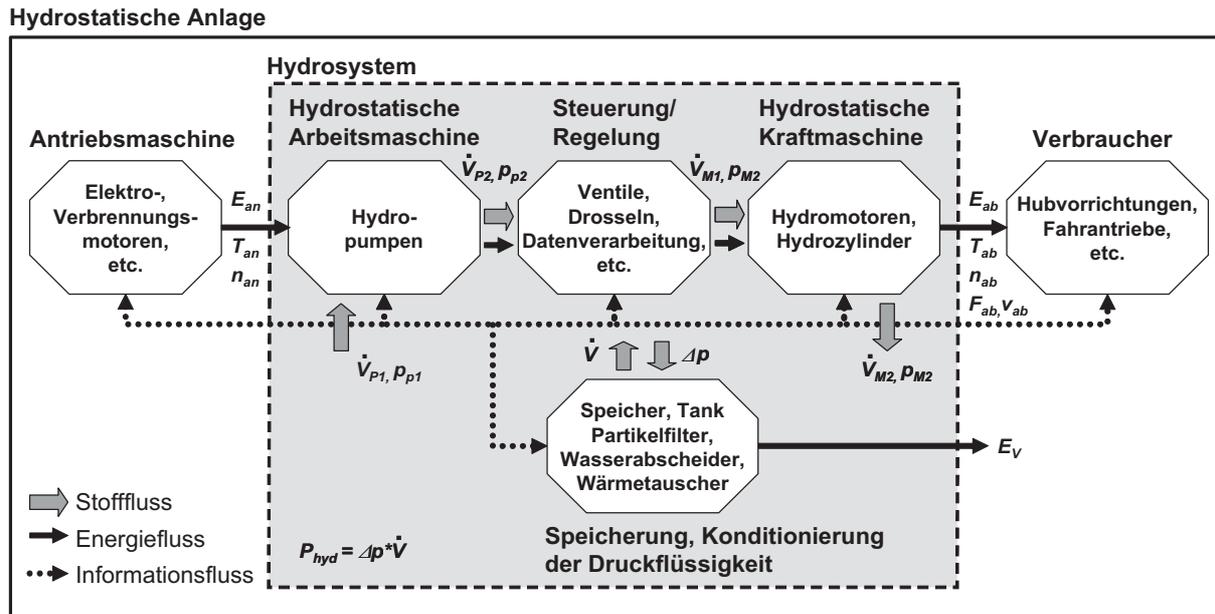


Bild 2: Schematischer Aufbau einer hydrostatischen Anlage

den Antriebsmaschinen zur Verfügung gestellten Eingangsgrößen, wie z.B. das Antriebsdrehmoment T_{an} und die Antriebsdrehzahl n_{an} , in die von den Verbrauchern nutzbaren Ausgangsgrößen Abtriebsdrehmoment T_{ab} und Abtriebsdrehzahl n_{ab} oder Abtriebskräfte F_{ab} mit Abtriebsgeschwindigkeiten v_{ab} . Als Antriebsmaschinen werden je nach verfügbarer Primärenergie Elektromotoren und Verbrennungsmotoren, im Fall von Flugzeugsystemen auch Turbomaschinen, eingesetzt. Verbraucher sind mechanische Teilsysteme, die von den hydrostatischen Kraftmaschinen linear oder rotatorisch angetrieben werden; Beispiele für linear angetriebene Verbraucher sind Formschließsysteme bei Kunststoffverarbeitungsmaschinen oder Schneid- und Presssysteme bei Schrottscheren und für rotatorisch angetriebene Verbraucher Winden, Plastifizierschnecken bei Kunststoffverarbeitungsmaschinen und Fahrtriebe für Arbeitsmaschinen. Das Hydrosystem ermöglicht neben der Steuerung und Regelung der Ausgangsgrößen die unaufwändige räumliche Trennung der Antriebsmaschine von den Verbrauchern, da beide durch freizügig zu verlegende Rohr- und Schlauchleitungen verbunden werden. Als energieübertragende Medien kommen überwiegend Druckflüssigkeiten zum Einsatz, die auf Mineralöl und synthetischen Estern basieren, wobei dem Grundöl anwendungsspezifische Additive beigegeben werden, um Eigenschaften wie z.B. das Viskositäts-Temperaturverhalten, das Lasttragevermögen, das Korrosionsschutzverhalten und das Alterungsverhalten gezielt zu verbessern.

Ein Hydrosystem beinhaltet mindestens eine hydrostatische Arbeitsmaschine zur Förderung der im Hydraulikkreislauf eingesetzten Druckflüssigkeit. Diese auch als Hydropumpen bezeichneten Komponenten wandeln die von der Antriebsmaschine bereitgestellte mechanische Energie E_{an} in hydrostatische Energie E_{hyd} , wobei je nach Systemanforderungen und Einsatzbedingungen verschiedene Pumpenbauarten wie Kolben-, Zahnrad- oder auch Flügelzellenpumpen eingesetzt werden. Der von den Hydropumpen bereitgestellte Fluidvolumenstrom \dot{V}_{P2} wird durch Leitungen und Komponenten zur Steuerung und Regelung an eine oder mehrere hydrostatische Kraftmaschinen verteilt; je nach Anlagenprinzip kann auch ein Teilvolumenstrom abgezweigt und ohne Nutzarbeit zu verrichten zum Tank geführt werden. Aufgabe der hydrostatischen Kraftmaschinen, wie Hydromotoren und -zylinder, ist die Bereitstellung von rotatorischen und translatorischen Bewegungen mit definierten Drehmoment- und Kraftverläufen. Die Wandlung der durch den Fluidvolumenstrom \dot{V}_{M1} zur Verfügung gestellte hydrostatische Energie in die für die Verbraucher benötigte mechanische Energie kann hierbei mit mehreren vom Einsatzgebiet der Anlage bestimmten Motorbauarten erfolgen. Angewendet werden unter anderem Zahnrad-, Radial- und Axialkolbenmaschinen und Differential-, Plunger- und Gleichgangzylinder.

Für die Steuerung und Regelung der Bewegungs-, Kraft- bzw. Druckverläufe der hydrostatischen Abtriebe werden volumenstrom-, druck- und wegsteuernde Komponenten eingesetzt, die als Stellglieder bezeichnet werden. Diese Funktionen werden unter anderem von Strom-, Druck- und Wegeventilen, Drosseln und Blenden übernommen; die Steuerung des Verdrängervolumens von Pumpen und Motoren sowie die direkte Beeinflussung der Antriebsmaschinen sind ebenfalls weit verbreitet.

Moderne Hydrosysteme zeichnen sich durch den Einsatz von elektronischen Reglern aus. Die Weiterleitung der mittels Rechnerprogramme erzeugten Steuerdaten an die Systemkomponenten erfolgt, wie auch die von Messwertaufnehmern erfassten Betriebsparameter, über Ein- und Ausgabeschnittstellen mit angebundenen analogen oder digitalen Datenleitungen.

Bei der Auswahl der Komponenten zur Steuerung und Regelung des Hydrosystems sind Kriterien wie Arbeitsweise, statisches und dynamisches Verhalten, Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Platzbedarf und Kosten der Stellglieder zu berücksichtigen. Die Auswahl des für die Erfassung der Betriebsparameter erforderlichen Messsystems erfolgt auf Basis von Kriterien wie der erforderlichen Messgenauigkeit (Auflösung, Hysterese), des erforderlichen Messbereichs, der oberen und unteren Grenzfrequenz, des zulässigen Drucks- und Temperaturbereichs und der Kosten.