



Technische
Universität
Braunschweig

INSTITUT FÜR
mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Jihao Guo

**Hydrostatisches Antriebssystem mit
gemeinsamer Versorgung von Fahr- und
Arbeitshydraulik**

Herausgeber:
Freundes- und Förderkreis des Instituts
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

Hydrostatisches Antriebssystem mit gemeinsamer Versorgung von Fahr- und Arbeitshydraulik

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jihao Guo

geboren in: Beijing

eingereicht am: 10.07.2023

mündliche Prüfung am: 08.12.2023

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge an der Technischen Universität Braunschweig und basiert wesentlich auf einem durch die AiF geförderten Forschungsprojekt.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater und Mentor, Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs, für die Übernahme der Betreuung meiner Promotion und die ständige Unterstützung während meiner Tätigkeit am Institut. Sein Fachwissen und seine wertvollen, über das Fachliche hinausgehenden Hinweise haben mir sehr viel geholfen. Mein herzlicher Dank gilt ferner seinem entgegengebrachten Vertrauen und dem Freiraum, den er mir bei der Bearbeitung des Forschungsprojekts und der Verfassung der Dissertation gewährte. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die Übernahme des Mitberichtes sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den ehemaligen Kollegen im IMN, die immer hinter mir standen. Sowohl die hervorragende Zusammenarbeit und freundschaftliche Atmosphäre im Arbeitsalltag als auch die privaten Veranstaltungen lassen meine Zeit am Institut in sehr positiver Erinnerung bleiben. Weiterhin gilt mein Dank den Kollegen in der Werkstatt, für die Unterstützung beim Aufbau und der Inbetriebnahme des hydraulischen Versuchsstands. Studierenden, die im Rahmen ihrer Hiwi-Tätigkeit oder studentischen Arbeit zur Untersuchung beitragen haben, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls danken.

Mein Dank gilt außerdem den Projektpartnern, mit denen ich im Forschungsprojekt zusammengearbeitet habe. Die Unterstützung bei den Einsatzmessungen, Bereitstellungen der Komponenten für den Prüfstands Aufbau und alle fachlichen Anregungen führten das Projekt und auch meine Dissertation zum Erfolg.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Frau Danyang sowohl für ihre Mithilfe und Ermunterung während der ganzen Promotionsphase als auch für die ständige Unterstützung und die Begleitung im Leben. Meinen Eltern danke ich, dass sie mich immer wie selbstverständlich unterstützen und mir den heutigen Erfolg ermöglichen. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die in schwierigen Zeiten stets für mich da waren.

Poing, im Januar 2024

Jihao Guo

Kurzfassung

Aufgrund der steigenden Energiekosten und der immer strengeren Emissionsregelungen lastet u. a. auf der Baumaschinenbranche ein hoher Innovationsdruck hinsichtlich der Erarbeitung geeigneter Antriebskonzepte zum Zweck der Effizienzsteigerung. Darüber hinaus stellen sich die Hersteller der Herausforderung, immer kompaktere Maschinen zu entwickeln. Ein hydrostatischer Antrieb mit einer gemeinsamen Versorgung der Fahr- und Arbeitshydraulik wird nun entwickelt, um die oben genannten Ziele zu erreichen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie ein hydrostatischer Antrieb mit gemeinsamer Versorgung die dynamischen Anforderungen einer mobilen Arbeitsmaschine erfüllen und gleichzeitig hohe Effizienz hinsichtlich der Komponenten und des Energieverbrauchs erzielen kann. Um diese Frage zu beantworten, wird zunächst die optimale Topologie des neuen Antriebskonzepts erarbeitet. Anschließend werden Betriebs- und Regelungsstrategien entwickelt, um in dem neuen Konzept sowohl hohe Dynamik als auch Effizienz im Vergleich zu serienproduzierten Maschinen zu erreichen. Da der Wirkungsgrad eines hydrostatischen Antriebs stark von den Anwendungsfällen abhängt, wird die Systemeffizienz bei verschiedenen Arbeitszyklen mit der des konventionellen Antriebs verglichen.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wird im ersten Schritt ein Überblick über die hydraulischen Grundschaltungen und Regelungen der hydraulischen Komponenten gegeben. Der Stand der Technik dient als Grundlage für die Konzeptionierung sowie die Entwicklung der Betriebs- und Regelungsstrategie. Zunächst wird der neue Antrieb auf Basis der Sekundärregelung am veränderbaren Drucknetz entwickelt, anschließend erfolgt dessen simulativer Funktionsnachweis mithilfe eines vereinfachten Simulationsmodells. Die Kernparameter der Regler und der Regelungsstrategie werden entsprechend der Simulationsergebnisse optimiert, bevor das Antriebskonzept auf den Prüfstand gebracht wird. Der Fokus der experimentellen Untersuchung liegt in der Bewertung und Optimierung des dynamischen Verhaltens des gesamten Systems. Nach der Validierung auf dem Prüfstand wird eine energetische Bewertung in der Simulationsumgebung durchgeführt. Es wird nachgewiesen, dass das neue Antriebskonzept, je nach Arbeitszyklus, ein energetisches Einsparpotenzial von 1 ~ 8 % im Vergleich zur Beispielmachine besitzt. In Bezug auf den praktischen Nutzen werden abschließend notwendige Anpassungen der Komponenten und Weiterentwicklungen der Betriebs- und Regelungsstrategien zur Umsetzung ermittelt.

Abstract

Due to the increased fuel prices and ever stricter emission regulations, the construction machine manufacturers are under great pressure to develop suitable drive train concepts for the purpose of increasing efficiency. On the other hand, the manufacturers are facing the challenge of building compact machines. A hydrostatic drive with a combined supply for both traction and working hydraulics has been developed to achieve the above mentioned goals.

This doctoral thesis analyses if a hydrostatic drive with combined supply can meet the dynamic requirements of a mobile working machine and achieve high efficiency in terms of components and energy consumption at the same time. In order to answer this question, the study begins with developing the optimal topology of the new drive concept. Subsequently, operating and control strategies are developed for excellent dynamic properties and high efficiency. Since the efficiency of a hydrostatic drive is highly dependent on its application case, different duty cycles are considered by the comparison of the new and the conventional drive train concepts.

To achieve the above goals, an overview of basic hydraulic circuits and controls of the hydraulic components are given in the first step. The state of the art serves as a basis for the conceptual design, component selection and the development of operation and control strategies. The new hydrostatic drive is developed on the basis of secondary control system with variable operating pressure. A function verification is carried out using a simplified simulation model. Core parameters of the controllers and the control strategy are optimized according to the simulation results, before the drive concept is validated on the test bench. The focus of the experimental investigation is on evaluating and optimizing the dynamic behavior of the entire system. After the validation, an energetic evaluation is carried out in the simulation environment. It is proved that the new drive concept has an energetic saving potential of 1 ~ 8% in comparison to the reference system, depending on the duty cycle. Finally, necessary adaptations of the components and further developments of the operating and control strategies for implementation in real machines are discussed.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
Indizes	XVI
Abkürzungen	XVII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand von Wissenschaft und Technik	4
2.1 Hydrostatische Antriebe.....	4
2.1.1 Grundschtaltung und Verstellungsart des hydrostatischen Antriebs	4
2.1.2 Konventioneller hydrostatischer Antrieb in der mobilen Arbeitsmaschine.....	8
2.1.3 Sekundärregelung und deren Applikationen.....	12
2.1.4 Differenzialzylinder im geschlossenen Kreislauf	16
2.2 Systeme mit kombinierter Fahr- und Arbeitshydraulik	18
2.3 Regelung der Hydrostaten und Modellbildung.....	19
2.3.1 Verfügbare Regelungsarten der Verstelleinheiten	19
2.3.2 Auswahl der Regelungsarten der Hydrostaten im Fahrentrieb	20
2.3.3 Modellierung des hydraulischen Antriebs	21
2.4 Radlader als beispielhafte Maschine.....	23
2.4.1 Radlader	23
2.4.2 Typische Lastzyklen des Radladers und deren Leistungsanteile.....	23
2.4.3 Einsatzprofil des Radladers.....	25
2.5 Effizienzbewertung der mobilen Arbeitsmaschinen	26
3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	29
3.1 Zielsetzung und Forschungsfrage	29
3.2 Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage.....	30
4 Erarbeitung des Antriebskonzepts mit integrierter Versorgung	33
4.1 Erarbeitung der Systemstruktur	33
4.1.1 Konzeptionierung der Arbeitshydraulik.....	33
4.1.2 Konzeptionierung der Fahrhydraulik	34
4.1.3 Bewertung und Auswahl der optimalen Topologie	37
4.1.4 Auswahl des Basissystems und der Komponenten	39
4.2 Erarbeitung des Regelungskonzepts	42
4.2.1 Festlegung der Regelungsart der Hydropumpe.....	42
4.2.2 Festlegung der Regelungsart des Hydromotors	43
4.3 Regelungsstrategien für hydrostatischen Antrieb mit integrierter Versorgung	44
5 Simulativer Funktionsnachweis des Antriebskonzepts mit integrierter Versorgung	51
5.1 Methodisches Vorgehen.....	51

5.2	Voraussetzungen des simulativen Funktionsnachweises.....	52
5.2.1	Betrachtete Zyklen und Erfassung der Lastprofile	52
5.2.2	Modellbildung.....	55
5.3	Ergebnisse und Bewertung	59
5.4	Gewonnene Erkenntnisse und Grenzen der simulativen Untersuchung.....	66
6	Experimentelle Untersuchungen des Systemverhaltens.....	67
6.1	Vorbereitung der experimentellen Validierung	67
6.1.1	Vorgehensweise der Validierung.....	67
6.1.2	Versuchsaufbau.....	67
6.1.3	Inbetriebnahme und Versuchsplanung.....	71
6.2	Validierung der „Integrierten Versorgung“ hinsichtlich Dynamik	72
6.2.1	Einfluss des Druckregelungsmodus.....	73
6.2.2	Möglichkeit eines Einsatzes ohne Hochdruckspeicher.....	75
6.2.3	Einfluss der Antriebsdrehzahl.....	78
6.3	Validierungsversuche und Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Dynamik	80
7	Analyse des Potenzials zur Energieeffizienzsteigerung.....	82
7.1	Methodisches Vorgehen der Effizienzbetrachtung.....	82
7.2	„Integrierte Versorgung“ mit höchstem Wirkungsgrad.....	84
7.2.1	Effizienzsteigerung beim Betrieb mit veränderbarem Druck	84
7.2.2	Einsparpotenzial gegenüber dem Betrieb mit konstantem Druck	88
7.3	Einsparpotenzial gegenüber dem Referenzsystem bei verschiedenen Anwendungsfällen	91
7.3.1	Modellierung der Referenzsysteme	91
7.3.2	Methodisches Vorgehen der Berechnung des Wirkungsgrads	92
7.3.3	Vergleich der Effizienz zwischen neuen und konventionellen Systeme	95
7.4	Weitere Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Effizienz	98
8	Fazit und praktischer Nutzen	100
8.1	Wichtige Ergebnisse der vorliegenden Arbeit	100
8.2	Praktischer Nutzen.....	101
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
Literatur	105
Anhang	113