

Beginn des Vorhabens:
01.09.2019
gepl. Ende des Vorhabens:
30.09.2022


AK: Hydraulik – Effizienzsteigerung im Konstantdrucksystem

Thema: **„Selbst-Optimierende Steuerstrategie zur Verlustminimierung eines Konstantdrucksystems mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylinder“**

Inhalt:	Seite
1 Einleitung	2
2 Forschungsziel und Lösungsweg	2
3 Projektfortschritt und weiteres Vorgehen	5
4 Zusammenfassung und Ausblick	13
5 Literatur	13

Informationsveranstaltung des Forschungsfonds
des Fachverbandes Fluidtechnik
Dienstag, den 28.06.2022

Institutsleitung:



Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Bearbeiter:



Marco Wydra, M. Sc.

1 Einleitung

„The cheapest energy is what you don't use.“ [1] Effizienzsteigerungen in einem System sind geeignet, laufende Kosten einer mobilen Arbeitsmaschine zu reduzieren. Zudem wirken sich Effizienzsteigerungen bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Systemen unmittelbar auf den CO₂e-Ausstoß aus und beeinflussen das Klima positiv. Vor diesem Hintergrund leistet das vorgeschlagene Projekt einen Beitrag zur Verringerung des klimaschädlichen CO₂e-Ausstoßes und ist gleichzeitig wirtschaftlich interessant.

Aufgrund der Anpassung des Druckniveaus an die Bedürfnisse der Aktoren besitzt ein Load-Sensing System (LSS) grundsätzlich energetische Vorteile gegenüber einem Konstantdrucksystem (KDS). Bei stark unterschiedlichen Lastdrücken besitzen LSSs jedoch hohe systembedingte Druckverluste. Kann die im KDS zur Verfügung gestellte Leistung an die Aktorlast angepasst werden, so sind die systembedingten Druckverluste eines KDSs geringer als die eines LSSs. Zudem wird eine Möglichkeit zur Regeneration und Rekuperation geschaffen.

Rotatorische hydraulische Aktoren besitzen heute die Möglichkeit, durch eine Verstellung des Schluckvolumens den Leistungsbedarf eines Aktors an das vorgegebene Druckniveau eines Konstantdrucksystems anzupassen. Zylindrische Aktoren haben diese Möglichkeit nicht, so dass der Einsatz von Zylindern im Konstantdrucksystem heute i.d.R. mit Verlusten behaftet ist.

In dem am Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) bearbeiteten Projekt *Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung (KonZwi)* wurden die Vorteile eines Konstantdrucksystems mit einem zusätzlichen Druckniveau am Beispiel eines Radlers nachgewiesen, [2]. Zudem ist aus Untersuchungen im Bereich der Digitalhydraulik bekannt, dass durch den Einsatz eines 4-Flächen-Zylinders die Zylinderkraft in einem gestuften Bereich an die Aktorlast angepasst werden kann, [3; 4].

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und Kenntnissen werden in dem beantragten Projekt weiterführende prädiktive und lernfähige Steuerstrategien zur Verlustreduktion in einem Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylinder entwickelt. Zudem wird eine Methode zur Auslegung der Abmessungen eines 4-Fläche-Zylinders und zur Festlegung eines dazu passenden Zwischendruckniveaus sowie dessen Hydrospeicher für ein solches System erstellt.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

2.1 Forschungsziel

Das Vorhaben verfolgt mehrere Ziele, siehe Abbildung 2.1. Zunächst wird eine Methode zur Auslegung der Komponenten für ein Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylinder erarbeitet. An Randbedingungen geknüpft, werden die Zylinderflächen, der Vorspanndruck sowie das Nennvolumen des Hydrospeichers im Zwischendruck ermittelt.

Eine so ausgelegte Maschine wird anschließend steuerungstechnisch untersucht. Hierfür wird mit einem Software-in-the-Loop Ansatz ein Simulationsmodell erstellt, welches mit einer Steu-

ren wird eine Topologie der Hydraulik zur Ansteuerung und Versorgung des Systems festgelegt. Für die Systemauslegung werden der in [5] dargestellte Y-Zyklus eines Radladers vom Typ *Paus RL655* und der in [6] dargestellte 90°-Grabzyklus eines Baggers vom Typ *Atlas 1804LC* betrachtet.

AP 2: Potentialanalyse

Das ausgelegte Hydrauliksystem wird mit einem KonZwi- und einem LS-System in quasistatischen Arbeitspunkten verglichen. Ein solcher quasistatischer Vergleich ist methodisch in [7; 8] dargestellt. Die Arbeitspunkte sind durch die Volumenströme und Drücke charakterisiert. Durch die Potentialanalyse kann aufgezeigt werden, in welchem Maße sich das zu untersuchende System energetisch von den bisher bekannten Systemen unterscheidet. Zudem kann die Auslegung der Zylinderdurchmesser, des Vorspanndrucks und Nennvolumens bewertet werden.

AP 3: Aufbau des Simulationsmodells

Die Simulation erfolgt anhand eines Modells mit konzentrierten Parametern, auch 1D-Simulation genannt. Die Simulation bietet die Möglichkeit, den Energiefluss in einem Hydrauliksystem unter Berücksichtigung der auftretenden Verluste zu berechnen. Für das Projekt wird das Simulationsprogramm DSHplus [9] eingesetzt.

Der Aufbau des hier zu untersuchenden Konstantdrucksystems mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylindern orientiert sich an dem in [10] gezeigten Modell. Hierfür gilt es das bestehende Modell um den 4-Flächen-Zylinder zu ergänzen. Das Simulationsmodell des Baggers wird auf Basis der in [6] dargestellten Forschungsergebnisse angepasst. Die Parametrierung der Komponenten erfolgt zur Vergleichbarkeit anhand des in [10] gezeigten Modells.

Insgesamt werden im AP 3 vier Simulationsmodelle erstellt: das LS-Referenzmodell und das neue Konstantdrucksystem je für den Radlader und den Bagger. Mit Hilfe der Modelle und Lastzyklen wird anschließend der spezifische Energieverbrauch berechnet. Das Ergebnis bildet die Basis für einen späteren Effizienzvergleich.

AP 4: Entwicklung der Steuerstrategie

Die in AP 2 ermittelte Optimalsteuerung gilt unter idealen Bedingungen und Vereinfachungen – d.h. sprunghafte Ventilschaltung, verlustfreie Aktoren, Regeneration und Rekuperation, keine Leckage. Da diese Voraussetzungen in der Praxis nicht gegeben sind, wird im AP 4 eine Steuerstrategie entwickelt, die einen möglichst großen Teil des optimalen Effizienzsteigerungspotentials realisieren kann. Ziel der Steuerstrategie ist die Minimierung (Zielfunktion) der für die Aktoren (Hydraulikzylinder) notwendigen Energieerzeugung durch den Antrieb (Hydraulikpumpe).

In [11] wurde gezeigt, dass der Bewegungsverlauf der Hydraulikzylinder beim Radlader prädiziert werden kann. Um eine Echtzeitfähigkeit der Steuerung zu gewährleisten, wurde eine rekursive Optimierungsmethode eingesetzt, bei der ausgehend vom Zielzustand eine optimale Steuerfolge berechnet wird. Neben dieser Methode wird zunächst eine Recherche des Stands der Forschung im Bereich der Steuerungsmethoden vorangestellt. So können neue, effiziente Steueralgorithmen für das Projekt identifiziert werden. Eine Echtzeitfähigkeit der Steuerstrategie ist Voraussetzung für den Einsatz in Folgeprojekten.

Die ausgewählte Steuerstrategie wird anschließend modelliert, in einem SPS-Programm programmiert und in Verbindung mit der Simulation verifiziert– Software-in-the-Loop (SiL). Hierzu eignen sich z.B. CoDeSys [12] oder MATLAB/Simulink [13].

Im Weiteren werden lernfähige Steuerstrategien recherchiert, mit denen das System gesteuert werden kann. Es wird erwartet, dass durch Methoden des Machine Learning eine effizientere Steuerstrategie erreicht werden kann.

AP 5: Simulationsgestützte Potentialanalyse

Zunächst wird die Simulation des Radlader- und Baggerzyklus für das neue Konstantdrucksystem mit der ausgearbeiteten prädiktiven Steuerstrategie durchgeführt und der Energiebedarf ermittelt. Zur Validierung des Systems wird untersucht, in wie weit die aus AP 2 ermittelten Einsparpotentiale für die Optimalsteuerung durch das Steuerungskonzept erreicht werden können. Treten Abweichungen auf, was erwartet wird, werden diese analysiert und die Steuerstrategie angepasst. Dabei werden die Simulationen mit einem lernfähigen Steuerungsalgorithmus angepasst.

Im Weiteren wird das untersuchte Konstantdrucksystem mit dem LS-System, das heute den aktuellen Stand der Technik darstellt, verglichen. Auf Basis der Ermittlung des Einsparpotentials und der zusätzlich notwendigen Komponenten, kann eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit des Systems erfolgen.

Eine weitere Optimierung zielt auf die Umschaltvorgänge während der Zylinderbewegung ab. Auch wenn in [14] gezeigt wurde, dass die durch den Schaltvorgang erzeugten Druckstöße beherrschbar sind, so sind dazu regelungstechnische Maßnahmen und spezifische Systemanpassungen notwendig. Die Steuerung muss dazu die transienten Vorgänge im System berücksichtigen. Eine Optimierung der Umschaltvorgänge erfolgt im Projekt simulationsgestützt.

AP 6: Dokumentation

Die Ergebnisse werden abschließend in Form eines Berichts zusammengefasst. Wesentliche Erkenntnisse des Projekts, die für den Transfer von Bedeutung sind, werden näher erläutert.

3 Projektfortschritt und weiteres Vorgehen

Der bisherige Projektverlauf kann der Abbildung 2.2 entnommen werden. AP1 und AP2 wurden abgeschlossen. AP3 bis AP5 befinden sich in einem iterativen Prozess und sind derzeit in Bearbeitung. AP6 bildet den Projektabschluss. Die konstituierende Sitzung fand am 10.02.2020 statt. Zwischen dem 01.10.2020 und 31.07.2021 pausierte das Projekt und wurde infolge dessen bis zum 30.09.2022 kostenneutral verlängert. Im Weiteren wird der Stand des Projektes zum 30.04.2022 näher beschrieben.

AP 1: Systemauslegung

Das Ziel, sowohl die Zylinderdurchmesser $d_{1...4}$, als auch den Vorspanndruck p_{ZD0} und das Nennvolumen V_{ZD0} des Hydrospeichers für das Zwischendruckniveau zu optimieren, ist ein iterativer Prozess aus den erarbeiteten Methoden von AP 1 und AP 2. In AP 1 wird für den statischen Fall eine Durchmesser-Druckniveau-Kombination identifiziert, die eine möglichst konstante Kraftstufung ermöglicht. In AP 2 werden anhand eines Zyklus p_{ZD0} sowie V_{ZD0} bei gegebener Zylindergeometrie optimiert.

Ein analytischer Ansatz zur Berechnung der vier unbekanntem Zylinderdurchmesser benötigt mindestens vier Bedingungen, die einen Zusammenhang zwischen den Durchmessern herstellt. Erste Überlegungen zielten auf das Kräftegleichgewicht, die Abhängigkeit zwischen Zylinderbewegung und Volumenstrom, eine Materialgleichung, z.B. zur Bestimmung der Mindestwandstärke, und einer unbekanntem Gleichung ab.

Da es in diesem Projekt primär um eine Vorbemessung der 4-Flächen-Zylinderdurchmesser geht, wurde ein empirischer Ansatz gewählt. Im Anschluss muss eine Dimensionierung unter Berücksichtigung von Festigkeitsnachweisen etc. erfolgen.

Zunächst wird eine Permutationstabelle aller gültigen Durchmesserkombinationen, welche die Bedingungen $d_1 > d_2 > d_3 > d_4$ und $d_n - d_{n+1} > r \cdot 5 \text{ mm}$ (Mindestwandstärke), $r \in \mathbb{Z}$ und $d_n \in [d_{\min}, d_{\max}]$ erfüllen, erstellt. Mit dieser Tabelle, den möglichen Schaltkombinationen und den Druckniveaus lassen sich Kraftprofile errechnen. Eine Filterung der Kraftprofile nach den Anforderungen an ein Zielkraftprofil ergibt schließlich eine optimale Parameterkombination. Die Auslegungsschritte sind in Abbildung 3.1 dargestellt.



Abbildung 3.1: Methode zur Berechnung einer optimalen Durchmesserkombination in Abhängigkeit der gegebenen Druckniveaus $p_{\text{HD}}, p_{\text{ZD}}, p_{\text{ND}}$ und der geforderten Grenzkraft $F_{\text{max/min}}$

Unter Berücksichtigung der Systemanforderungen – maximal und minimal geforderte Zylinderkraft $F_{\text{max/min}}$ – werden bei vorgegebenen unterschiedlichen Druckniveaus – Hochdruck (HD) p_{HD} , Zwischendruck (ZD) p_{ZD} , Niederdruck (ND) p_{ND} – die zugehörigen Zylinderdurchmesser $d_{1...4}$ variiert und das zugehörige, resultierende Kraftprofil berechnet.

Ein Kraftprofil besteht bei einer Anzahl von $n_{\text{Druckniveau}} = 3$ und $m_{\text{Zylinderfläche}} = 4$ aus max. $n^m = 3^4 = 81$ Kraftstufen. Durch Einschränkungen, aufgrund z.B. der eingesetzten Ventiltechnik, können Schaltkombinationen entfallen. Eine Kraftstufe stellt die resultierende Kraft in Abhängigkeit der anliegenden Druckniveaus dar. Das Zielkraftprofil weist im Intervall $[F_{\min}, F_{\max}]$ eine gleichmäßige Differenz zwischen den einzelnen Kraftstufen auf. In Abbildung 3.2 ist beispielhaft das Ergebnis einer optimalen Konfiguration dargestellt.

Eine systematische Variation der gegebenen Größen hat gezeigt, dass die Schaltkombinationen (Anschluss 1|2|3|4) $HD|ND|HD|ND$ und $ND|HD|ND|HD$ stets die Grenzkraft, $F_{\text{max/min}}$ erzielen. Das Verhältnis zwischen HD und ND liegt für eine möglichst konstante Kraftabstufung bei $HD : ZD = 2$. Für die Durchmesser konnte beobachtet werden, dass in diesem Fall stets $d_3 = 1,5 \cdot d_4$ gilt. Eine Variation der Durchmesser in 1 mm- und 5 mm-Schritten hat gezeigt, dass die optimale Parameterkombination beider Varianten eine Abweichung von ca. 3 mm aufweist.

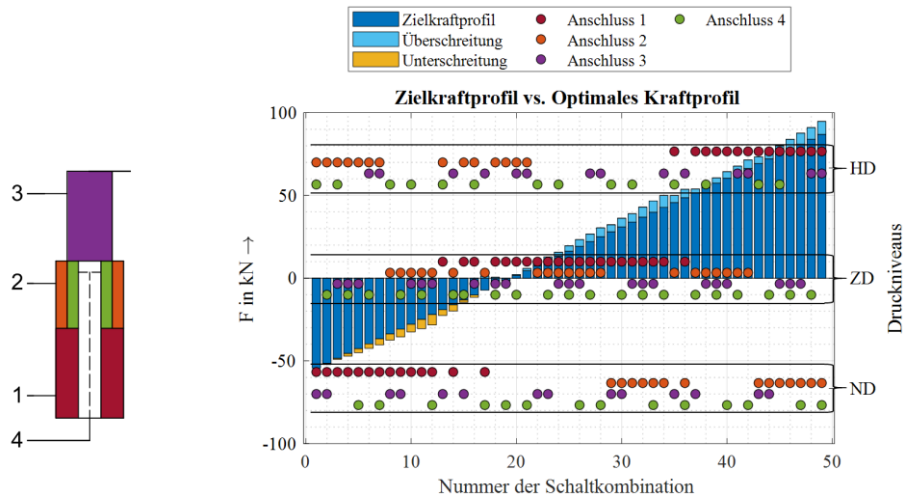


Abbildung 3.2: Beispiel eines Kraftprofils für einen 4-Flächen-Zylinder mit den Druckniveaus

$p_{HD} = 200 \text{ bar}$, $p_{HD} = 100 \text{ bar}$, $p_{HD} = 5 \text{ bar}$ und den geforderten Grenzkraften

$F_{\max} = 87 \text{ kN}$, $F_{\min} = -54 \text{ kN}$. Die Durchmesser ergeben sich wie folgt

$d_1 = 75 \text{ mm}$, $d_2 = 50 \text{ mm}$, $d_3 = 30 \text{ mm}$, $d_4 = 20 \text{ mm}$

Das in Abbildung 3.2 dargestellte Kraftprofil gilt nur für statische Druckniveaus. Werden in der Betriebsstrategie z.B. der HD und ND konstant gehalten und der ZD kann dynamisch variieren, dann verändert sich je nach Schaltkombination die resultierende Kraft des 4-Flächen-Zylinders, Abbildung 3.3. Dies gilt es durch eine geeignete Steuerstrategie aufzufangen. Zum einen um die Verluste im Betrieb zu minimieren und zum anderen um die Aktorlast weiterhin bedienen zu können.

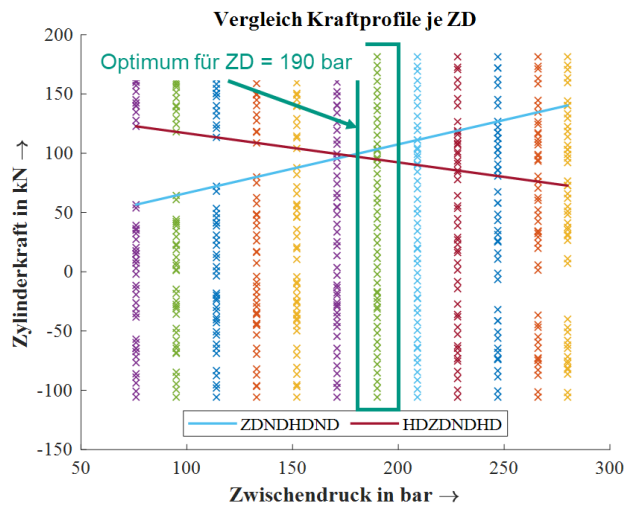


Abbildung 3.3: Einfluss des Zwischendrucks (ZD) auf die Kraftstufen bei fixen Durchmessern

$d_1 = 75 \text{ mm}$, $d_2 = 50 \text{ mm}$, $d_3 = 30 \text{ mm}$, $d_4 = 20 \text{ mm}$ und Druckniveaus $p_{HD} = 380 \text{ bar}$, $p_{ND} = 5 \text{ bar}$

Basierend auf den Erfahrungen aus [7; 8; 14] wurde die darin beschriebene Ventilschaltung übernommen und auf den 4-Flächen-Zylinder übertragen. Es ergibt sich allgemein betrachtet ein System, wie es in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Diese Darstellung dient lediglich der Funktionserfüllung und stellt keine detailgetreue Abbildung des Systems dar.

AP 2: Potentialanalyse

Die Potentialanalyse stellt dar, welche Energie das neuartige System verbraucht, wenn die drei Druckniveaus HD, ZD und ND ideal auf den Lastbedarf angepasst am Zylinder aufgeprägt werden. Das Resultat ist eine, für das jeweilige System zugehörige, optimale Steuerreihenfolge zur Minimierung der Pumpenleistung und Maximierung der regenerierten Leistung zwischen den Aktoren. Hierzu wird die in [5] vorgestellte Methode der dynamischen Programmierung und Pareto-Optimierung angewandt, siehe Abbildung 3.5.

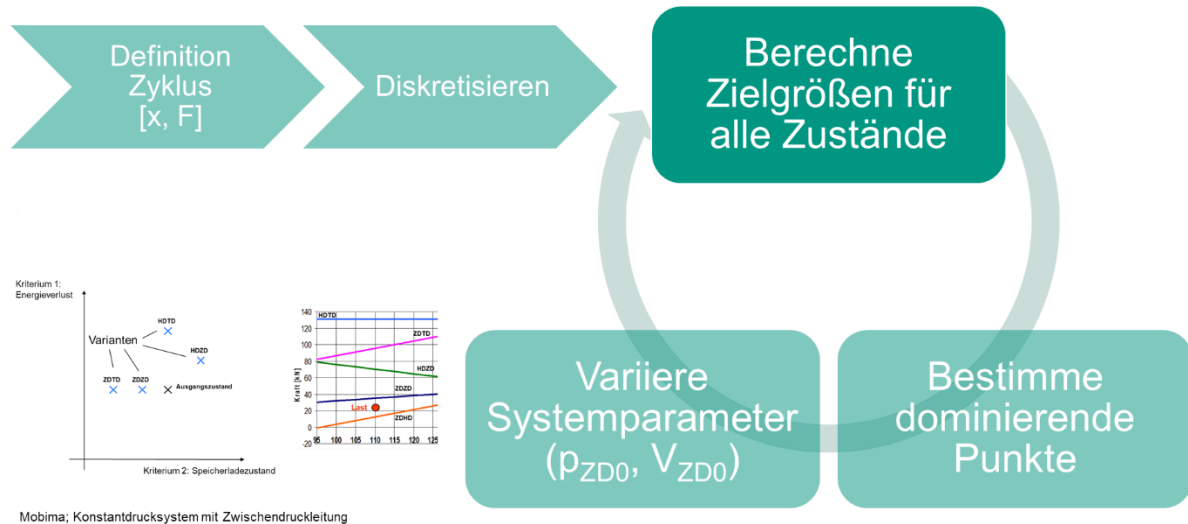


Abbildung 3.5: Vorgehen zur Berechnung einer energieoptimalen Steuerreihenfolge bzgl. eines Lastzyklus bei mehreren Zielkriterien

Zunächst wird ein Lastzyklus als Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Verlauf definiert und in feste Zeitabschnitte diskretisiert. Für jeden Zeitabschnitt werden anschließend die dominanten Schaltzustände – Verbesserung eines Zielkriteriums führt zur Verschlechterung eines anderen – bestimmt. Durch eine Parametervariation des Vorspanndrucks p_{ZD0} und des Nennvolumens V_{ZD0} kann die für einen Zyklus Pareto-optimale Systemkonfiguration bestimmt werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist exemplarisch für den Radlader in Abbildung 3.6 dargestellt.

Optimaler Speicher: $p_{ZD0} = 100$ bar, $V_0 = 24$ L

Systemtyp	Pumpenenergie in kJ	
	gesamt	bzgl. LS
Load Sensing	118,1	100 %
Konstantdruck mit Zwischendruck	83,4	71 %
Konstantdruck mit Zwischendruck und 4-Flächenzylinder	55,5	47 %

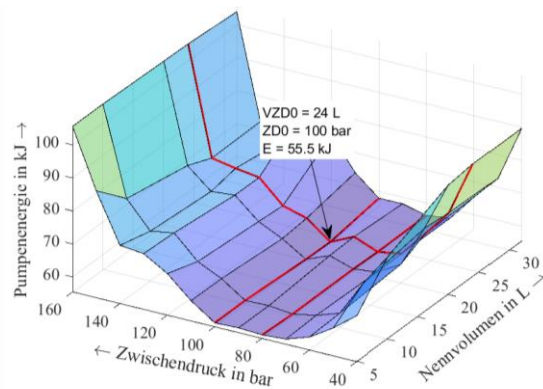


Abbildung 3.6: (links) Tabelle mit Einordnung der Ergebnisse bzgl. eines LS-Systems (rechts) Ergebnisse der Parametervariation und Darstellung des Optimums

Für den in Abbildung 3.6 betrachteten Zyklus beträgt die hydraulisch über die Aktoren abgegebene Arbeit ca. 63 kJ und das hydraulische Regenerationspotential ca. 25 kJ. Ohne Verluste und vollständiger Regeneration/Rekuperation benötigt das System minimal ca. 38 kJ. Das LS-System benötigt 118 kJ, wo hingegen das Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung (KonZwi) ca. 83 kJ benötigt. Die Erweiterung mit einem 4-Flächen-Zylinder (KonZwi4FIZyl) reduziert die notwendige Pumpenenergie auf ca. 56 kJ, sodass in diesem Fall der Wirkungsgrad von ca. 32 % (LS-System) über ca. 46 % (KonZwi) auf bis zu 68 % (KonZwi4FIZyl) gesteigert werden könnte.

Zudem ist aus Abbildung 3.6 ist zu entnehmen, dass für den betrachteten Radlader Systeme mit einem ZD von 80 bar und 100 bar vergleichbare Ergebnisse erzielen. Gleichzeitig ist der Einfluss des Speichernennvolumens in den betrachteten Fällen vernachlässigbar, was auf einen hohen Regenerationsanteil schließen lässt.

In der folgenden Abbildung 3.7 sind die benötigte Pumpenleistung, die Speicherleistung sowie die mechanische Arbeit von Hub- und Kippzylinder für jeden Zeitabschnitt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Speicher in Situationen geladen wird, in denen die mechanische Arbeit Energie an das System überträgt. Dies ist der Fall, wenn die Speicherleistung negativ und die mechanische Leistung positiv ist, vgl. Sekunde 40 bis 45. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Pumpe ebenfalls zum Füllen des Speichers genutzt wird, vgl. Sekunde 1 bis 5.

Ab ca. Sekunde 40 ist zu erkennen, dass keine Pumpenleistung zur Bewegung des Hubzylinders benötigt wird. Die Senkbewegung des Hubzylinders liefert ausreichend Leistung, um den ZD-Speicher zu laden. Ab ca. Sekunde 46 wird der Speicher genutzt, um das erneute Anfahren des Kippzylinders zu ermöglichen. Das System ermöglicht sowohl eine Regenerierung, als auch eine Rekuperation der zwischengespeicherten Energie.

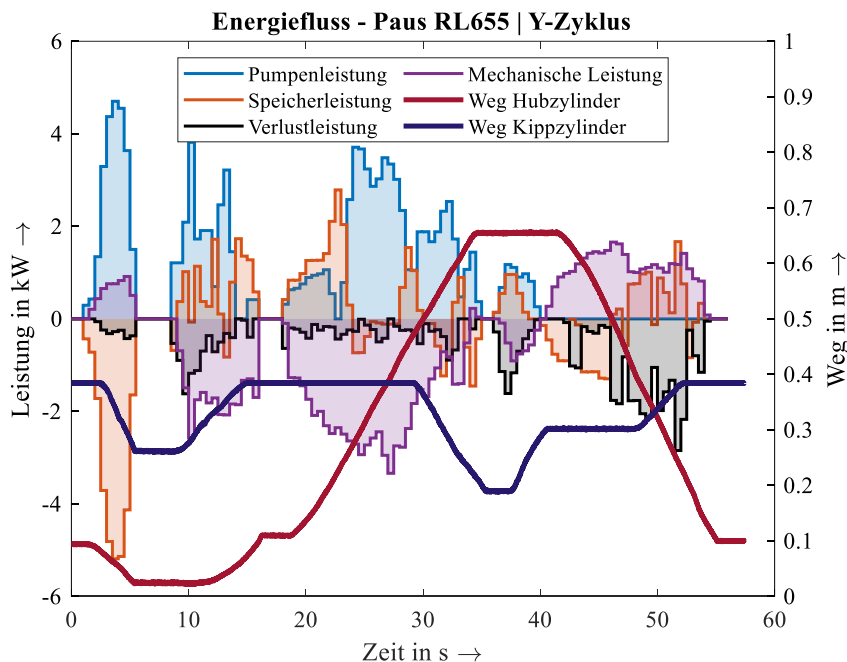


Abbildung 3.7: Leistungsverlauf von Pumpe, Speicher und Zylinder über die Zeit für den Y-Zyklus eines Radladers

In Abbildung 3.8 ist die optimale Steuerreihenfolge der Schaltzustände dargestellt. Es ist zu erkennen, dass 20 von 49 möglichen Schaltzuständen genutzt werden. Ein überwiegender Teil der Schaltzustände verbindet den 4-Flächen-Zylinder mit der ZD-Leitung. Dies ist darin begründet, dass das Fahrzeug im Teillastbereich betrieben wird und die Eckleistung nur in wenigen Zeitabschnitten benötigt wird.

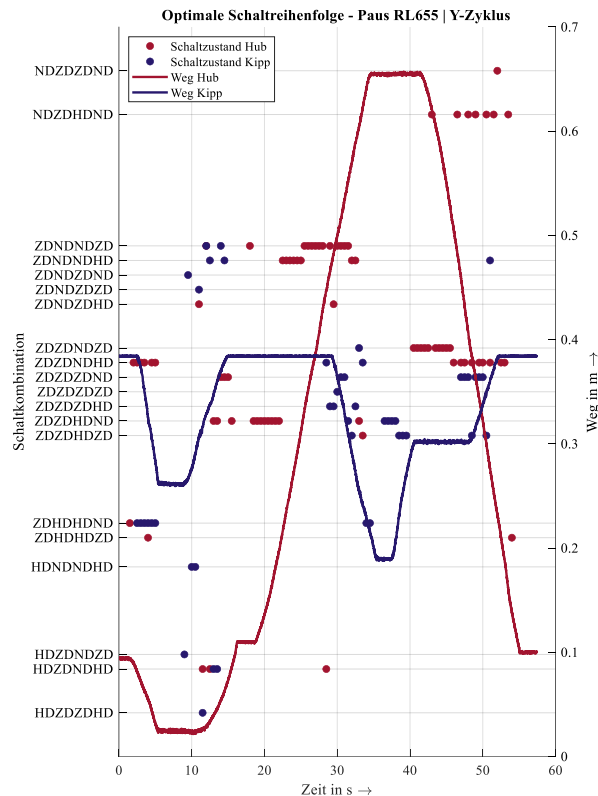


Abbildung 3.8: Wegverlauf des Hub- und Kippzylinders über die Zeit.
Alle 0,5 Sekunden wird der Schaltzustand dargestellt.

AP 3: Aufbau des Simulationsmodells

Zur Entwicklung der Steuerung wird derzeit eine Software-in-the-Loop (SiL) Umgebung aufgebaut. Diese besteht aus einem Simulations-PC, welcher einen digitalen Zwilling des Versuchsträgers bereitstellt, und einem Steuerungs-PC, auf dem der Steueralgorithmus entwickelt wird. Das Gesamtsystem besteht aus den Bausteinen: Hydraulik, Mehrkörpermodell, Fahrermodell und Steuerung. Die Schnittstellen zwischen den Bausteinen wurden mit Hinblick auf einen Realversuch definiert. Der überwiegende Teil der SiL-Umgebung wurde bereits umgesetzt. Im Projekt wird derzeit die Umsetzung am Beispiel des Radladers *Paus RL655* fokussiert.

AP 4: Entwicklung der Steuerstrategie

Die Untersuchung verschiedener Forschungsarbeiten, [2; 3; 16 - 21], zum Thema Konstantdrucksystem und 4-Flächen-Zylinder hat ergeben, dass die Steuerungsstrukturen einen vergleichbaren Aufbau vorweisen, siehe Abbildung 3.9. Dieser Aufbau besteht maßgeblich aus:

- Detektion der Zustandsgrößen vor Schaltentscheidung (Sensorik + Datenaufarbeitung)
- Kraftberechnung + Lastprädiktion (Lasterfüllung)
- Schaltentscheidung / Steuerstrategie

- Schaltventil-Steuerung (Effizienzoptimierung)
- Proportionalventil-Steuerung (Bewegungssteuerung)
- Generierung der Stellsignale (Signalverarbeitung)

Die genaue Umsetzung der Steuerungsstruktur und -strategie sowie die Auswahl geeigneter Methoden sind derzeit Gegenstand der Untersuchungen.

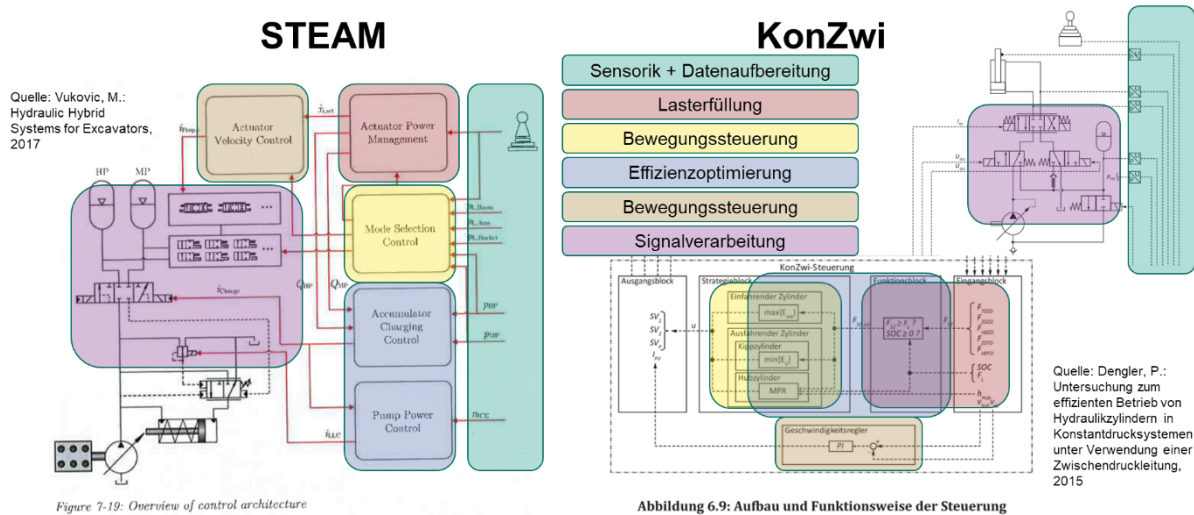


Abbildung 3.9: Vergleich der Steuerstrategie aus den Forschungsprojekten STEAM [22] und KonZwi [2]

Derzeit werden folgende Methoden in die Untersuchungen einbezogen:

- Optimierungsalgorithmen (Pareto-Optimierung, Evolutionäre Algorithmen etc.) zur Effizienzsteigerung
- Künstlich Neuronale Netze zur Modellvereinfachung
- Model-Predictive Control zur vorausschauenden Zustandsbeschreibung
- Model-Based Non-Linear Control zur Verbesserung der Regelungsgüte

AP 5: Simulationsgestützte Potentialanalyse

Für den Vergleich der unterschiedlichen Systeme werden Auswerteskripte erstellt, welche die Ergebnisse grafisch aufbereiten und eine Interpretation ermöglichen. Als Zielgrößen sind zum einen der Energieverbrauch, der Leistungsfluss sowie die Steuersignale und die Aktorgeschwindigkeiten vorgesehen. Zusammen mit einer Aufwandsanalyse kann dann eine ökonomische Betrachtung erfolgen. Zudem werden Maßnahmen zur Optimierung bzw. Umsetzung auf dem Prüfstand oder einem Versuchsträger abgeleitet.

AP 6: Dokumentation

Die bisherigen Projektergebnisse wurden in Form von Präsentationen für die Arbeitskreissitzungen sowie in den Zwischenberichten für die AiF festgehalten. Der Schlussbericht, geplant zum 31.10.2022, sowie eine Vorstellung der finalen Ergebnisse im Arbeitskreis, voraussichtlich zum 27.09.2022, stehen noch aus. Für das Jahr 2022 ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung geplant.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Selbst-Optimierende Steuerstrategie zur Verlustminimierung eines Konstantdrucksystems mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylinder lautet der Titel dieses Forschungsprojekts und beschreibt dessen Ziel. Um dieses zu erreichen, wurden sechs Arbeitspakete definiert. Die Ergebnisse der ersten beiden Arbeitspakete beschreiben die Systemtopologie, ermöglichen eine Komponentenauslegung und zeigen das mögliche Effizienzpotential eines solchen Systems auf. Die folgenden drei Arbeitspakete beschreiben das Anwenden der erarbeiteten Methoden auf konkrete Maschinenbeispiele, dessen Umsetzung in der Simulation sowie die Entwicklung einer Steuerstrategie durch Anwendung von Software-in-the-Loop (SiL). Finalisiert wird das Projekt durch einen Vergleich des neuartigen Systems mit einem Load-Sensing (LS) System und einer Dokumentation der Arbeiten.

Die bisherigen Untersuchungen ergeben, dass eine klassische Auslegung des Systems auf Basis seiner Eckleistung nicht zielführend ist. Vielmehr hängen die Zylindergeometrie und die Kenngrößen des Zwischendruckspeichers, Vorspanndruck und Nennvolumen, vom Lastprofil einer Maschine ab. Eine zur Vorbemessung geeignete Methode wurde entwickelt. Dabei werden in einem ersten Schritt die Zylinderdurchmesser festgelegt, welche mit vorgegebenen Druckniveaus und Grenzlasten eine möglichst gleichmäßige Kraftstufung ergeben. Unter Einbezug eines Lastprofils wird darauffolgend mithilfe einer Potentialanalyse der Vorspanndruck und das Nennvolumen optimiert. Die Potentialanalyse berücksichtigt dabei, dass die erarbeitete Systemtopologie die mögliche Anzahl an Schaltkombination von 81 auf 49 je 4-Flächen-Zylinder reduziert. Eine Untersuchung aller Schaltkombination ist aufgrund der erarbeiteten Methode ebenfalls möglich. Eine erste Einschätzung zeigt, dass im Vergleich zu einem LS-System die benötigte Energie eines Radladers um mehr als die Hälfte reduzieren werden kann.

Die Entwicklung einer geeigneten Steuerstrategie ist Gegenstand der laufenden Arbeiten. Hierfür wurden bereits die notwendigen Simulationsmodelle erstellt und eine SiL-Umgebung in Betrieb genommen. Die Recherchen bzgl. Konstantdrucksystemen mit Zwischendruckleitung und 4-Flächen-Zylinder zeigen mögliche Steuerungsstrukturen und Methoden zur Umsetzung unterschiedlicher Steuerungsaufgaben auf.

Bereits jetzt haben sich neue Fragestellungen ergeben, die im Rahmen eines Nachfolgeprojektes behandelt werden sollen. Hierzu zählen die wirkungsgradoptimierte Auslegung der Druckversorgung auf die Primärenergiequelle – Verbrennungsmotor, Batterie, Brennstoffzelle etc. –, das Anwenden der hiesigen Methoden zur Auslegung der Komponenten: Hydrospeicher, Ventile und Mehrflächen-Zylinder auf einen Versuchsträger sowie das Anpassen der Steuerungssoftware auf die Anforderungen im Feldeinsatz – z.B. Messrauschen, in der Simulation unberücksichtigte Effekte wie den Temperatureinfluss, etc. Das Nachfolgeprojekt wird von den Mitgliedern des Arbeitskreises mehrheitlich unterstützt und wird beim Forschungsfonds Fluidtechnik präsentiert.

5 Literatur

- [1] Rosenfeld, A. H.: Physiker – geboren in Birmingham (Alabama), USA.
- [2] Geimer, M.; Dengler, P.; Schuster, G.; Baum, H.; Dombrowski, R. von; Wessing, C.; Paul, W.: Effizienzsteigerung eines Konstantdrucksystems durch eine Zwischendruckleitung (KonZwi). 2012.

- [3] Dell'Amico, A.; Carlsson, M.; Norlin, E.; Sethson, M.: Investigation of a Digital Hydraulic Actuation System on an Excavator Arm. Scandinavian International Conference on Fluid Power; SICFP, 03.-05.06.2013, Linköping, Sweden. In: NN (Hrsg.): Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping: Linköping University 2013, S. 505-511.
- [4] Xiao-Ming, W.; Qian, L.; Xin, L.: The four-chamber hydraulic cylinder. DOI: 10.1109/AUS.2016.7748139. 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), 10.-12.10.2016, Beijing, China. In: Jiao, Z. (Hrsg.): 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), Piscataway, NJ: IEEE 2016, S. 686-689.
- [5] Dengler, P.: Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Band 28, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2015, DOI: 10.5445/KSP/1000043836.
- [6] Holländer, C.: Untersuchungen zur Beurteilung und Optimierung von Baggerhydrauliksystemen. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1997, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 307, Düsseldorf: VDI Verlag 1998, ISBN: 3183307014.
- [7] Dreher, T.; Geimer, M.: Entwicklung und Optimierung eines Konstantdrucksystems mit parallelen sekundärge-regelten Antrieben am Beispiel eines Mineraldüngerstreuers. 7. Kolloquium Mobilhydraulik, 27.09.-28.09.2012, Karlsruhe. In: Geimer, M. (Hrsg.): 7. Kolloquium Mobilhydraulik, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 14, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2012, ISBN: 978-3-86644-881-0, S. 125-143.
- [8] Dreher, T.: Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundäreregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertation, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Nr. 35, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2015, DOI: 10.5445/KSP/1000047003.
- [9] FLUIDON: DSHplus. URL: <http://www.fluidon.com/>, Zugriff am: 15.03.2022.
- [10] Dombrowski, R. von; Dengler, P.; Baum, H.: KonZwi – Effizienzsteigerung eines Konstantdrucksystems durch eine Zwischendruckleitung. Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess, 29.09.-30.09.2011, Veitshöchheim. In: NN (Hrsg.): Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess, Proceedings, 2011.
- [11] Dengler, P.: Efficiency Improvement of a Constant Pressure System using an Intermediate Pressure Line. 7th International Fluid Power Conference, 26.03.-28.03.2012, Dresden, Germany. In: NN (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Fluid Power Conference, Proceedings, Dresden 2012, S. 567-578.
- [12] CoDeSys: Programmiersprache auf Basis IEC 61131-3. URL: <http://www.codesys.com/>, Zugriff am: 15.03.2022.
- [13] Mathworks: Höhere Programmiersprache MATLAB und Simulationsumgebung Simulink. URL: <http://www.mathworks.de/>, Zugriff am: 15.03.2022.
- [14] Dengler, P.; Groh, J.; Geimer, M.: Valve Control Concepts in a Constant Pressure System with an Intermediate Pressure Line. 21st International Conference on Hydraulics

- and Pneumatics, 01.06.-03.06.2011, Ostrava, Czech Republic. In: NN (Hrsg.): Proceedings of the 21st International Conference on Hydraulics and Pneumatics, Proceedings, 2011.
- [15] Norrhydro Oy: NorrDigi – The revolutionary energy-saving system. URL: <https://www.norrhydro.com/en/engineering/norrdigi>, Zugriff am: 25.02.2020.
- [16] Pettersson, K.; Heybroek, K.; Mattsson, P.; Krus, P.: A novel hydromechanical hybrid motion system for construction machines. *International Journal of Fluid Power* 18 (2017) H. 1, S. 17-28.
- [17] Heybroek, K.; Sjoberg, J.: Model Predictive Control of a Hydraulic Multichamber Actuator: A Feasibility Study. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23 (2018) H. 3, S. 1393-1403.
- [18] Donkov, V.; Andersen, T. O.; Ebbesen, M. K.; Pedersen, H. C.: Applying Digital Hydraulic Technology on a Knuckle Boom Crane. *The Ninth Workshop on Digital Fluid Power*, 07.-08.09.2017, Aalborg, Denmark. In: *The Ninth Workshop on Digital Fluid Power*, 2017.
- [19] Yao, J.; Wang, P.; Yin, Y.; Li, M.; Li, Y.: Power management of multi-source network hydraulic system with multiple actuators. *Energy Conversion and Management* 223 (2020), Aufsatz 113247, S. 1-14.
- [20] Vukovic, M.: Hydraulic hybrid systems for excavators. Dissertation, RWTH Aachen, Reihe Fluidtechnik, Band 90, Aachen: Shaker Verlag 2017, ISBN: 978-3-8440-5312-8.
- [21] Vukovic, M.; Sgro, S.; Murrenhoff, H.: STEAM – a holistic approach to designing excavator systems. *9th International Fluid Power Conference*, 24.03.-26.03.2014, Aachen, Germany. In: NN (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Fluid Power Conference*, Proceedings, Aachen 2014, S. 250-260.
- [22] Murrenhoff, H.: Steigerung der Energieeffizienz in der Arbeitshydraulik mobiler Maschinen (STEAM). 2022.