

Weiss Mobiltechnik GmbH

Harlachweg 15

72229 Rohrdorf

Kooperationspartner

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA)**

Rintheimer Querallee 2

76131 Karlsruhe

Vorhaben:

**„Elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung mit Hybridfunktion zur
Steigerung der Energieeffizienz von Forstmaschinen“**

(EfHyFo III)

Abschlussbericht über ein FuE-Projekt,

gefördert unter dem Aktenzeichen AZ 32624/01 – 24/0 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von:

**Herr Björn Weiss
Weiss Mobiltechnik GmbH**

**Tel.: 07452/9308-75
Mail: bweiss@weiss-can-sps.de**

**Herr M.Sc. Marco Wydra
Karlsruher Institut für Technologie
(KIT)**

**Tel.: 0721/608-48647
Mail: marco.wydra@kit.edu**

Rohrdorf, im Januar 2019

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	32624/01	Referat	24/0	Fördersumme	124.693,00
Antragstitel	Elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung mit Hybridfunktion zur Steigerung der Energieeffizienz von Forstmaschinen (EfHyFo III)				
Stichworte	Effizienzsteigerung, Hydrauliksystem, Forstmaschinen, Hybridfunktion				
Laufzeit	33 Monate	Projektbeginn	01.01.2016	Projektende	30.09.2018
				Projektphase(n)	1
Bewilligungsempfänger	Weiss Mobiltechnik GmbH Harlachweg 15 72229 Rohrdorf			Tel	07452/9308-75
				Fax	07452/9308-2
				Projektleitung	Herr Björn Weiß
				Bearbeiter	Herr Björn Weiß
Kooperationspartner	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) Rintheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In einem vorangegangenen, ebenfalls DBU-geförderten Forschungsprojekt (AZ 28036/02 – 24/0) wurde die übliche hydraulisch-mechanische Load-Sensing Hydraulik eines Forstkrans durch die innovative eBSS ersetzt. Für einen charakteristischen Lastzyklus konnte auf diese Weise eine Reduzierung des Energiebedarfs um 11 % erzielt und nachgewiesen werden.

Aus diesen Vorarbeiten entstand die Idee für das hier vorgestellte Vorhaben, welches durch eine mögliche Kombination des eBSS-Systems mit dem Prinzip der getrennten Steuerkanten und einer Erweiterung zum Hybriden, weitere Energieeinsparungen erreicht. Diese liegen bei erwarteten 5 - 6 % durch die Kombination mit getrennten Steuerkanten und weiteren 4 - 5 % durch die Hybridisierung.

Die vorgeschlagene Verknüpfung ermöglicht die Zusammenstellung zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, die als Baukasten von Hydraulikschaltungen, auch kleineren Firmen den Zugang zu umweltfreundlicher Technik ermöglichen werden.

Das Ergebnis soll Hersteller und Käufer von mobilen Maschinen motivieren die nur geringen Mehrkosten bewusst in Kauf zu nehmen, weil sich diese Investition während der Betriebszeit der Maschine wirtschaftlich rentiert und gleichzeitig einen Beitrag für die Umwelt leistet.

Die Hauptziele des Projektes sind:

- Verbesserung des Wirkungsgrades und der Energieeffizienz des Gesamtsystems
- Erfahrung mit hydraulischen Speichern sammeln
- Erfolgreiches Marketing durch Schlagwort „Hybrid“

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Hauptarbeitsschritte des Projektes sind:

- 1 Simulationsgestützte Systemauslegung
- 2 Entwicklung der Steuerung des Systems
- 3 Systemtest und Optimierung
- 4 Validierung an einem Funktionsmuster
- 5 Dokumentation

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Entwicklung einer Software zur Steuerung von getrennten Steuerkanten sowie einer Hybridisierung konnte eine weitere Effizienzsteigerung des eBSS erreicht werden. Die Regelung der getrennten Steuerkante funktioniert sehr gut und bringt nicht nur energetische Vorteile.

Die Bedienung des Krans wurde weiter verbessert. So können jetzt große Lasten kontrollierter und präziser manipuliert werden, als es mit herkömmlichen Kransteuerungen möglich ist. Auch die Belastung des Dieselmotors war bei den Testmaschinen deutlich geringer, so dass manche Arbeiten mit einer geringeren Dieselmotordrehzahl ausgeführt werden können, was wiederum die Effizienz steigert. Durch diese weiteren Vorteile hat sich die Chance der Vermarktung weiter erhöht.

Durch lange Lieferzeiten der Komponenten und Verzögerungen beim Prüfstands Aufbau konnten in der Projektlaufzeit nicht alle Funktionen auf die Funktionsmuster übertragen werden. Es wurde aber in allen Bereichen die nötige Erfahrung gesammelt, um dies weiter umzusetzen. Die Umsetzung der restlichen Funktionen wird durch die Firma Weiss Mobiltechnik weiter fortgeführt.

Die Serieneinführung des Systems ist im Jahr 2019 geplant. Dazu finden in den nächsten Monaten schon erste Treffen mit Maschinenherstellern statt. Dass ein großes Interesse besteht, hat sich auch an dem Vorfahrtstag der Fa. Weiss Mobiltechnik gezeigt. Weiter will ein Hersteller von Steuerblöcken das neue System in seine Produkte integrieren. Dadurch wird das System auch in anderen Maschinentypen und in der Industrie eingesetzt. Durch diese Aussichten und die erreichte Effizienzsteigerung hat das System das Potential, die gesteckten Ziele in den nächsten Jahren zu erreichen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Projektarbeiten und Ergebnisse wurden auf internationalen Konferenzen, auf Fachtagungen, in Projekttreffen sowie auf einer Abschlusspräsentation veröffentlicht. Darüber hinaus erfolgt die kontinuierliche Ansprache von potentiellen Kunden zur Verbreitung der Ergebnisse.

Fazit

Das Vorhaben war ein weiterer Schritt auf dem Weg hin zur Entwicklung energieeffizienter Forstmaschinen. Der Einsatz innovativer elektrohydraulischer Komponenten ist mit lediglich geringen Mehrkosten in Bezug auf den gesamten Anschaffungspreis einer Forstmaschine verbunden. Die Umweltfreundlichkeit, die Betriebskosten und die Energieeffizienz werden jedoch signifikant verbessert. Das Ergebnis soll Hersteller und Käufer von mobilen Maschinen motivieren, diese Mehrkosten bewusst in Kauf zu nehmen, weil sich diese Investition während der Betriebszeit der Maschine wirtschaftlich rentiert und gleichzeitig einen Beitrag für die Umwelt leistet.

Die vorgeschlagene Verknüpfung aus elektrohydraulischer Bedarfsstromsteuerung, dem Prinzip der getrennten Steuerkanten sowie optional eines Speichers zur Systemerweiterung zum hydraulischer Hybriden, ermöglicht die Zusammenstellung zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, die als Baukasten von Hydraulikschaltungen, auch kleineren Firmen den Zugang zu umweltfreundlicher Technik ermöglichen werden.

Im Projekt konnten die Zielstellungen weitestgehend erreicht werden. Abschließend müssen noch Anpassungen für die Serientauglichkeit der Software durchgeführt und ein finaler Test mit dem Serienstand durchgeführt werden. Die Markteinführung ist für das zweite Halbjahr 2019 geplant. Dass große Interesse konnte aufgrund zahlreicher Gespräche mit möglichen Anwendern bestätigt werden.

Inhaltsverzeichnis:

1.	Zusammenfassung	1
1.1.	Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels	1
1.2.	Erzielte Ergebnisse	1
1.3.	Empfehlungen für das weitere Vorgehen	3
1.4.	Angaben von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Förderung durch die DBU	3
2.	Einleitung	3
2.1.	Ausgangssituation.....	3
2.2.	Zielsetzung	4
2.3.	Aufgabenstellung	4
3.	Hauptteil	6
3.1.	Beschreibung der Arbeitsschritte	6
3.1.1.	AP 1: Simulationsgestützte Systemauslegung	6
3.1.1.1.	AP 1.1: Geteilter Schieber	6
3.1.1.2.	AP 1.2: Hybrid	8
3.1.2.	AP 2 Entwicklung der Steuerung des Systems	9
3.1.2.1.	AP 2.1 Auswahl/Beschaffung der Komponenten.....	9
3.1.2.2.	AP 2.2 Erstellung der Schaltpläne Hydraulik und Elektronik	10
3.1.2.3.	AP 2.3 Programmierung der Steuerung	12
3.1.3.	AP 3 Systemtest und Optimierung	15
3.1.3.1.	AP 3.1 Aufbau und Betrieb Prüfstand	15
3.1.3.2.	AP 3.2 Auswertung der Versuche	17

3.1.3.3.	AP 3.3 Optimierung der Steuerung	24
3.1.4.	AP 4 Validierung an einem Funktionsmuster	24
3.1.4.1.	AP 4.1 Einbau des Hydrauliksystems in eine Maschine.....	24
3.1.4.2.	AP 4.2 Einbindung der Steuerung	25
3.1.4.3.	AP 4.3 Funktionsuntersuchungen im Feld.....	25
3.1.5.	AP 5: Dokumentation	28
3.2.	Diskussion der Ergebnisse	29
3.3.	Ökologische und technologische Bewertung	30
3.4.	Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	32
4.	Fazit	33
5.	Glossar	34
6.	Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 2.1.1:	elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung (a) mit getrennten Steuerkanten (b) und Hybridisierung (c) des Hubarms Schaltplan und Leistungsbilanzen.....	4
Abbildung 3.1.1:	Für einen Forstkranyklus nach /Sch 2015/ sind die Pumpenleistung und –energie dargestellt. Verglichen werden die Systeme: konventionell, HM, EM, TRkM.....	8
Abbildung 3.1.2:	Hydraulikschaltplan des Prüfstandes	11
Abbildung 3.1.3:	Nutzerschnittstelle zur Steuerung und Überwachung des Prüfstands und der Belastungseinheit.....	16
Abbildung 3.1.4:	Soll- und Istkraft während der Versuche mit einer Steuervorgabe von 10 % im konventionellen System.....	17
Abbildung 3.1.5:	Druckverläufe in den Zylinderkammern A (Kolben) und B (Ring) für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %	19
Abbildung 3.1.6:	Stellsignale für das Ventil am Verbraucheranschluss A (Kolben) und B (Ring) für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %	19
Abbildung 3.1.7:	Volumenstromverlauf während des Aus- und Einfahrens für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %	20
Abbildung 3.1.8:	Pumpenleistung während eines Zyklus für eine Belastung von - 50 kN und einem Stellsignal von 10 %.....	21
Abbildung 3.1.9:	Verteilung der Energiedifferenzen in Abhängigkeit des Stellsignals und der Last.....	21
Abbildung 3.1.10:	Messung der Zylinderdrücke für die Funktion Teleskop mit normalem Schieber	26
Abbildung 3.1.11:	Messung der Zylinderdrücke für die Funktion Teleskop mit geteiltem Schieber	27
Abbildung 3.3.1:	Verkaufstatistik Forstspezialmaschinen in Deutschland /KWF 2014/	30

1. Zusammenfassung

1.1. **Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels**

Gegenstand des Vorhabens war es, durch eine mögliche Kombination des eBSS-Systems mit dem Prinzip der getrennten Steuerkanten und einer Erweiterung zum Hybriden, weitere Energieeinsparungen zu erreichen.

Das Ergebnis soll Hersteller und Käufer von mobilen Maschinen motivieren die nur geringen Mehrkosten bewusst in Kauf zu nehmen, weil sich diese Investition während der Betriebszeit der Maschine wirtschaftlich rentiert und gleichzeitig einen Beitrag für die Umwelt leistet.

1.2. **Erzielte Ergebnisse**

Verbesserung des Wirkungsgrades und der Energieeffizienz des Gesamtsystems

Damit eine Last mit konventionellen Hauptsteuerventilen sicher gesteuert werden kann, wird nach dem Stand der Technik das ablaufende Öl gedrosselt. Dies kann mit sogenannten Senkbremsventilen oder einer angepassten Steuerkante für den Ablauf realisiert werden. Diese Drosselung erhöht bei kleinen Lasten den Druck im Zulauf, was wiederum systemabhängig zu einem erhöhten Energiebedarf der Pumpe führt.

Die oben genannten Drosselverluste können durch den Einsatz des geteilten Schiebers vermieden werden. Die Ablaufseite passt sich dabei der aktuellen Last an und regelt einen geringen Zulaufdruck (Pumpendruck) ein.

Durch Abwandlung eines konventionellen eBSS-Systems mit getrennte Steuerkanten und einer zusätzlichen Speichersektion ergeben sich fünf mögliche Betriebsmodi: *Hauptmodus (HM)*, *Energieneutraler Modus (EM)*, *Regenerationsmodus (RgM)* und *Pumpen-/Tank-Rekuperationsmodus (P-/TRkM)*

Die möglichen Verbesserungspotentiale hängen somit unmittelbar mit den eingesetzten Betriebsmodi und dem zu vergleichenden Ausgangssystem zusammen.

Mithilfe der Simulation kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz getrennter Steuerkanten und der alleinigen Nutzung des HM für das abgebildete System – bestehend aus Hubarm, Schwenkwerk und Rotator – je Zyklus bis zu 0,85 % Energie im Vergleich zu einem konventionellen eBSS-System eingespart werden kann. Unter Hinzunahme des EM kann laut Simulation für den betrachteten Zyklus und das genannte System eine Energieersparnis von bis zu 18,7 % erreicht werden. Die Erweiterung des Systems mit einem Hydraulikspeicher ermöglicht unter Verwendung des TRkM eine zum EM zusätzliche Energierückspeicherung von bis zu 8,8 % der eingesetzten Pumpenenergie, vgl. 3.1.1. /Wei 2017/

Am Prüfstand kann gezeigt werden, dass mithilfe der getrennten Steuerkanten und der Verwendung des HM eine Energieeinsparungen von bis zu 0,8 % im Vergleich zu einer konventionellen Ansteuerung erreicht werden. Dies gilt für das einmalige Aus- und Einfahren eines Hydraulikzylinders bei einer statischen Belastung mit der am KIT entwickelten Belastungseinheit, vgl. 3.1.3.2. Für den EM und TRkM konnten am Prüfstand keine geeigneten Versuche durchgeführt werden, welche eine Vergleichbarkeit der Systeme zugelassen hätte. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um Kavitation während des EM und TRkM am Prüfstand auszuschließen.

Durch die getrennten Steuerkanten und einer Optimierung des HM an der Maschine konnte in der Praxis der benötigte Druck in den Verbrauchern Hubarm, Ausleger und Teleskoparm deutlich gesenkt werden, vgl. 3.1.4.3. Es wird nur noch der Druck benötigt, der zum Füllen der Zulaufseite notwendig ist, da sich die Ablaufseite der Last anpasst. Dadurch konnte auch im HM in der Maschine eine höhere Einsparung erreicht werden, als dies am Prüfstand möglich war. Diese Funktion ist seit 03/2018 auf zwei Testmaschinen im Einsatz und läuft zufriedenstellend.

Der EM kann in der Maschine nur in bestimmten Situationen genutzt werden, da bei zu langen Leitungslängen der Druck zum Füllen der Zulaufseite nicht ausreicht. Diese Technik ist nach Projektende weiterhin in der Erprobung und wird von Weiss Mobiltechnik in den nächsten Monaten verbessert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die prognostizierten Energieeinsparungen in Höhe von bis zu 5 bis 6 % durch die Einführung getrennter Steuerkanten und weitere 4 bis 5 % mithilfe des Hydraulikspeichers kumuliert für das gesamte Kransystem erreicht werden können.

Erfahrung mit hydraulischen Speichern sammeln

Die Rekuperation wurde am Prüfstand entwickelt und ist praxistauglich. Diese Technik kann auf eine mobile Arbeitsmaschine übertragen werden. Wie die gespeicherte Energie in das System zurück gespeist wird hängt stark von der Maschine und der Betriebsstrategie ab. Dies wurde in diesem Vorhaben nicht untersucht.

Erfolgreiches Marketing durch Schlagwort „Hybrid“

Durch lange Lieferzeiten bei den Komponenten konnten nicht alle Techniken während der Projektlaufzeit auf eine Maschine übertragen werden. Die Möglichkeit der Rekuperation ist im System vorhanden und kann bei der Vermarktung der Systeme oder Maschinen eingesetzt werden.

Insgesamt konnte durch die Entwicklung einer Software zur Steuerung von getrennten Steuerkanten eine weitere Effizienzsteigerung des eBSS erreicht werden. Die Regelung der getrennten Steuerkante funktioniert sehr gut und bringt nicht nur energetische Vorteile.

So lässt sich eine individuelle Abstimmung für unterschiedliche Systeme mit baugleichen Ventilen erreichen. Die dafür notwendigen Anpassungen erfolgen durch die Software und nicht mehr über den mechanischen Schieber. Die Einstellung der Parameter ist damit ohne großen Aufwand bei der Inbetriebnahme möglich.

Zudem konnte die Bedienung des Krans weiter verbessert werden. So können mit dem neuen System hohe Lasten kontrollierter und präziser gesteuert werden, als es mit herkömmlichen Kransteuerungen möglich ist. Auch die Belastung des Dieselmotors war bei den Testmaschinen deutlich geringer, so dass manche Arbeiten mit einer geringeren Dieselmotordrehzahl ausgeführt werden können. Dies wiederum steigert die Effizienz des Verbrennungsmotors.

Durch diese weiteren Vorteile hat sich die Chance der Vermarktung nochmals erhöht.

1.3. Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Die Ergebnisse werden direkt durch die Weiss Mobiltechnik GmbH verwertet. Als nächster Schritt wird die Umsetzung der restlichen Funktionen durch die Firma Weiss Mobiltechnik GmbH weiter fortgeführt. Die Serieneinführung des Systems ist für das zweite Halbjahr 2019 geplant.

1.4. Angaben von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Förderung durch die DBU

Das Kooperationsprojekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 32624/01 – 24/0).

2. Einleitung

2.1. Ausgangssituation

In einem vorangegangenen, ebenfalls *DBU*-geförderten Forschungsprojekt (AZ 28036/02 – 24/0) wurde die übliche hydraulisch-mechanische Load-Sensing Hydraulik eines Forstkrans durch eine innovative elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung (eBSS) ersetzt. Für einen charakteristischen Lastzyklus konnte auf diese Weise eine Reduzierung des Energiebedarfs um 11 % erzielt und nachgewiesen werden.

Aus diesen Vorarbeiten entstand die Idee für das hier beschriebene Vorhaben, welches durch eine mögliche Kombination des eBSS-Systems mit dem Prinzip der getrennten Steuerkanten und einer Erweiterung zum Hybriden, weitere Energieeinsparungen erreicht. Diese liegen bei erwarteten 5 - 6 % durch die Kombination mit getrennten Steuerkanten und weiteren 4 - 5 % durch die Hybridisierung (vgl. Abbildung 2.1.1).

Die vorgeschlagene Verknüpfung ermöglicht die Zusammenstellung zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, die als Baukasten von Hydraulikschaltungen, auch kleineren Firmen den Zugang zu umweltfreundlicher Technik ermöglichen werden.

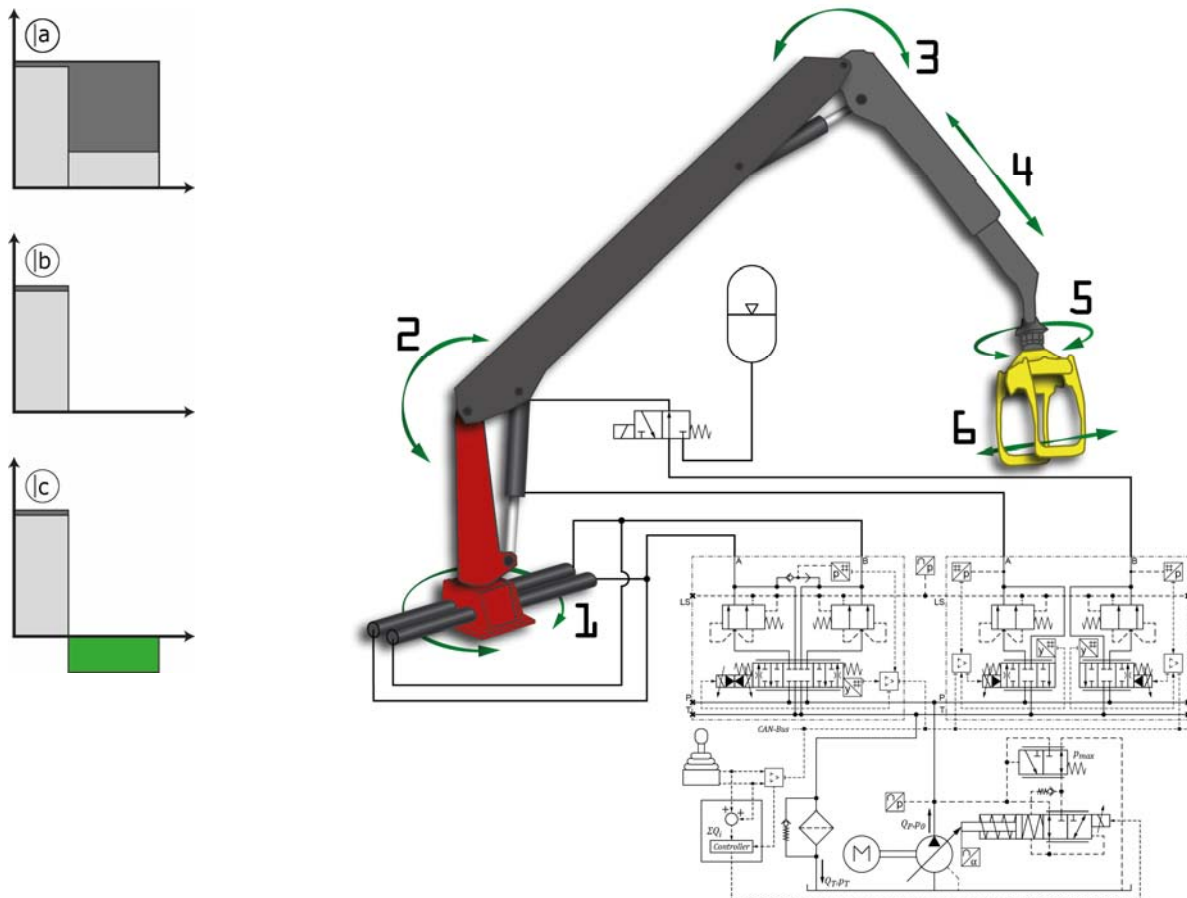


Abbildung 2.1.1: elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung (a) mit getrennten Steuerkanälen (b) und Hybridisierung (c) des Hubarms | Schaltplan und Leistungsbilanzen

2.2. Zielsetzung

Folgende Hauptziele wurden definiert:

- Verbesserung des Wirkungsgrades und der Energieeffizienz des Gesamtsystems
- Erfahrung mit hydraulischen Speichern sammeln
- Erfolgreiches Marketing durch Schlagwort „Hybrid“

2.3. Aufgabenstellung

Die vorgeschlagene Verknüpfung aus elektrohydraulischer Bedarfsstromsteuerung, dem Prinzip der getrennten Steuerkanäle sowie optional eines Speichers zur Systemerweiterung zum hydraulischen Hybriden, ermöglicht die Zusammenstellung zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, die als Baukasten von Hydraulikschaltungen,

auch kleineren Firmen den Zugang zu umweltfreundlicher Technik ermöglichen werden. Zur Erreichung und Validierung der genannten Ziele wurde folgender Arbeitsplan festgelegt:

AP 1 Simulationsgestützte Systemauslegung

- AP 1.1 Geteilter Schieber
- AP 1.2 Hybrid

AP 2 Entwicklung der Steuerung des Systems

- AP 2.1 Auswahl/Beschaffung der Komponenten
- AP 2.2 Erstellung der Schaltpläne Hydraulik und Elektronik
- AP 2.3 Programmierung der Steuerung

AP 3 Systemtest und Optimierung

- AP 3.1 Aufbau und Betrieb Prüfstand
- AP 3.2 Auswertung der Versuche
- AP 3.3 Optimierung der Steuerung

AP 4 Validierung an einem Funktionsmuster

- AP 4.1 Einbau des Hydrauliksystems in eine Maschine
- AP 4.2 Einbindung der Steuerung
- AP 4.4 Funktionsuntersuchungen im Feld

AP 5 Dokumentation

3. Hauptteil

3.1. *Beschreibung der Arbeitsschritte*

3.1.1. AP 1: Simulationsgestützte Systemauslegung

Die Simulation ist ein sehr wichtiger Baustein in der Entwicklung des neuen Systems. Für beide Varianten sind sehr anspruchsvolle und schnelle Regelungen nötig, um das System für den Bediener optimal zu gestalten. Durch die Simulation können schon im Vorfeld kritische Situationen erkannt werden und entsprechende Lösungen erarbeitet werden. Aufbauend auf das Simulationsmodell des Vorprojektes werden die beiden neuen Systeme in der Simulation ergänzt und getestet.

In den Projekttreffen hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, das spätere Steuergerät direkt mit der Simulation zu koppeln, um die Zeit zur Programmierung des Steuergerätes zu verkürzen. Aus diesem Grund wurde entschieden, das Simulationsmodell mit einer Integrationsschnittstelle zur Einbindung der Steuerung zu gestalten.

Ein erstes Modell, das die Kommunikation zwischen Simulation und Steuergerät herstellt wurde erstellt und getestet. In weiteren Schritten mussten nun das komplexere Hydraulikmodell des Beispielsystems aus den vorausgegangenen Projekten verändert und auf die Kommunikation mit dem Steuergerät vorbereitet werden.

Das Simulationsmodell konnte auf das neue System angepasst und mit einer virtuellen CAN-Kommunikation versehen werden. Die Übertragung der in Matlab/Simulink erstellten Steuerstrategie auf das reale Steuergerät konnte, wie angedacht, vereinfacht werden sodass eine Steuerungssoftware vorliegt.

In der Simulation konnte sowohl die Integration verschiedener Betriebsmodi ohne, als auch mit Speicher, realisiert werden.

Die Ausgangssoftware aus der Simulation wurde am Prüfstand sowie auf dem Funktionsträger erweitert und angepasst.

3.1.1.1. AP 1.1: Geteilter Schieber

Grundlagen

Durch den geteilten Schieber ist die Möglichkeit gegeben den Zu- und Ablauf eines Verbrauchers getrennt zu steuern. Dadurch kann lastfallabhängig der Pumpenvolumenstrom gesteuert werden. Kritische Punkte sind der Übergang von ziehender zu drückender Last und die Versorgung des Systems ohne Pumpenvolumenstrom.

Die vorläufigen Recherchen haben ergeben, dass verschiedenste Systeme mit einer getrennten Zu- und Ablaufsteuerung der Verbraucher bereits aufgebaut und analy-

siert wurden. Beispielhaft sind hier /Bor et. al. 2014/ und /Mey et. al. 2011/ zu nennen. Die meisten Lösungsansätze der Steuerungen arbeiten dabei mit diskret gesteuerten Betriebsmodi, was speziell beim Wechsel von aktiven zu passiven Lasten einen Nachteil birgt /Din 2016/. Dies ist deutlich bei der Bedienbarkeit der Verbraucher spürbar. Aus diesem Grund versucht /Din 2016/ mittels einer hysteresebehafteten Modisteuerung häufige Modiwechsel an den Grenzen zu vermeiden. Des Weiteren sorgt eine adaptive Sollwertberechnung in den einzelnen Modi dafür, dass es zu keinen Sollwertsprüngen bei einem Modiwechsel kommt. Dadurch kann die Bedienbarkeit deutlich verbessert werden.

Da in diesem Projekt weiterhin das eBSS-System zur Ansteuerung der Pumpe genutzt werden soll, wurde eine Ventilkombination aus Wegeventil und Druckwaage vorgesehen. Wird ein Verbraucheranschluss mit der Pumpe verbunden, so dient die Druckwaage zur lastunabhängigen proportionalen Steuerung des Volumenstroms über den Joystick. Wird ein Anschluss mit dem Tank verbunden, so geschieht dies lediglich über das Wegeventil, welches in diesem Moment als Ablaufsteuerkante arbeitet.

Nach /Axi 2013/ gibt es die Betriebsmodi Hauptmodus (HM), Regenerations-Modus (RgM), Energieneutraler Modus (EM) und Rekuperations-Modus (RkM). Während im HM der Verbraucher mit Tank und Pumpe verbunden ist, ist der Verbraucher im RgM beidseitig mit der Pumpe verbunden. Im EM sind beide Anschlüsse eines Verbrauchers mit dem Tank verbunden. Der RkM kann in einen Pumpen-Rekuperations-Modus (PRkM) und einen Tank-Rekuperations-Modus (TRkM) unterschieden werden. Der TRkM ist eine Abwandlung des EM, wobei das ablaufende Öl in den Speicher anstatt in den Tank gefördert wird. Dieser Modus realisiert die in der Literatur als Rückgewinnung von Energie aus Abbremsvorgängen definierte Rekuperation /Mat 2014/. Das heißt, die äußere Last wird zur Speicherung von Energie herangezogen. Der PRkM ist eine Abwandlung des HM, wobei der Ablauf eines Verbrauchers mit dem Speicher anstelle des Tanks verbunden ist. Dadurch wird bei Betätigung eines oder des lathöchsten Verbrauchers eine zusätzliche Pumpenleistung angefordert und zwischengespeichert. In diesem Sinne handelt es sich um keine klassische Rekuperation, wird an dieser Stelle jedoch stellvertretend so benannt.

Bei der Umsetzung der Steuerung wurde hauptsächlich das Augenmerk auf die Betriebsmodi HM, EM und P-/TRkM gelegt. Der RgM wird im Rahmen dieses Projektes als wenig zielführend eingeschätzt und daher nicht weiterverfolgt.

Ergebnisse der Systemauslegung

Mittels der Simulation kann gezeigt werden, dass die Steuerung nur unter Verwendung des HM wenig, bis gar keine Verbesserung bzgl. der Energieeffizienz des Systems bringt. Eine zusätzliche steuerungstechnische Verbesserung durch den HM kann aufgrund von Vereinfachungen im Simulationsmodell nicht festgestellt werden.

Mit der Einführung des EM können die erwarteten 5 - 6 % Energieeinsparungen und mehr gegenüber einem System ohne geteilten Schieber erbracht werden, vgl. Abbildung 3.1.1. Die Steuerbarkeit wird dabei im Vergleich zum HM nicht signifikant beeinträchtigt /Wei2017/.

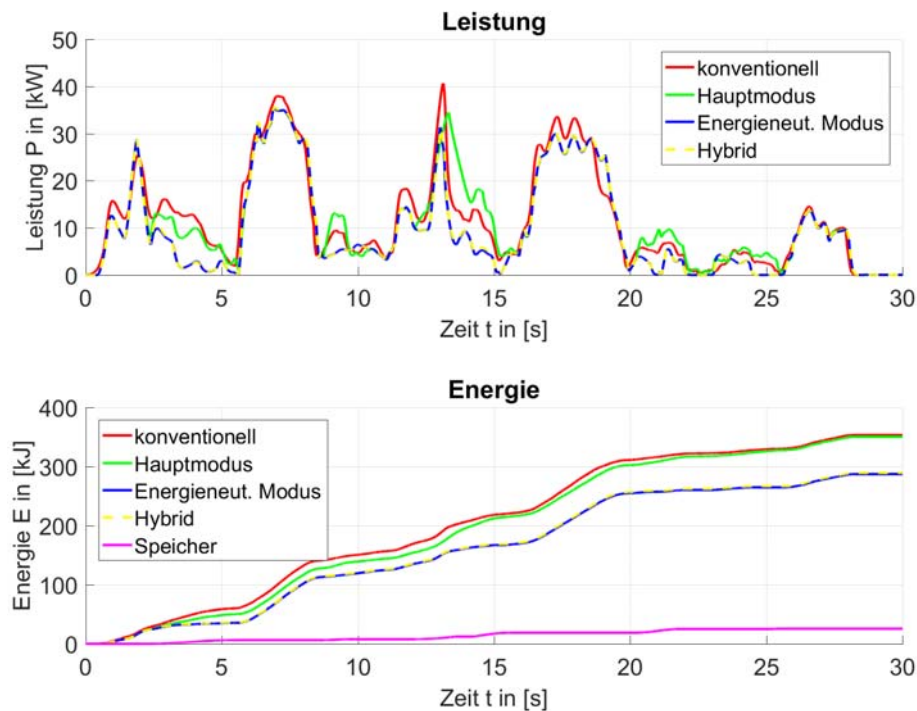


Abbildung 3.1.1: Für einen Forstkranzyklus nach /Sch 2015/ sind die Pumpenleistung und -energie dargestellt. Verglichen werden die Systeme: konventionell, HM, EM, TRKM

Voraussetzungen für die Umsetzung des EM sind zum einen das Vorhandensein von aktiven Lasten sowie die Möglichkeit der Nachsaugung von Öl aus dem Tank. Ersteres ist zyklusabhängig und damit vom Einsatz und Art der Maschinen. Letzteres kann durch eine begünstigte Auslegung der Komponenten, einer Vorspannung des Tanks oder softwaretechnisch, durch bspw. Begrenzung des EM auf langsame Fahrgeschwindigkeiten oder unter der Prämisse von einem Parallelbetrieb mehrerer Verbraucher, realisiert werden. Spätere Tests am Prüfstand haben gezeigt, dass eine Kombination der obigen Lösungsvorschläge notwendig ist, um den EM realisieren zu können.

3.1.1.2. AP 1.2: Hybrid

Grundlagen

Während dem Absenken von Lasten können Hydraulikspeicher geladen werden. Durch diesen Ladevorgang erhöht sich der Gegendruck im Speicher und die Funktion wird langsamer. Dieses Verhalten ist nicht erwünscht und muss deshalb durch geeignete Ventile und eine entsprechende Regelstrategie verhindert werden. Die

Simulation bietet optimale Möglichkeiten verschiedene Systeme zu evaluieren und zu testen.

Die Gespräche zwischen dem Mobima/KIT und Weiss Mobiltechnik GmbH haben ergeben, dass bei der Umsetzung der Hybridfunktion das Hauptaugenmerk auf der benutzerfreundlichen Steuerung und dessen Integration in das System mit getrennter Zu- und Ablaufsteuerung liegt. Das bedeutet, dass zunächst primär das Füllen des Hydrospeichers im Vordergrund steht und die weitere Verwendung der gespeicherten Energie in den Hintergrund rückt. Damit ist gemeint, dass die rückgewonnene Energie zunächst einmal, beispielsweise in Form eines parallelen Konstantdrucksystems für Nebenverbraucher, in das System zurückgeführt werden soll.

Ergebnisse der Systemauslegung

Wie in AP 1.1 erwähnt, ist die geplante Steuerung in der Lage zu entscheiden, in welchen Betriebssituationen der Speicher gefüllt werden soll. Dies geschieht im Wechsel mit dem EM und dem HM. Eine geeignete Rückspeisung und die damit zusammenhängende Steuerstrategie ist rudimentär hinterlegt und ermöglicht eine Unterstützung von Nebenverbrauchern. Die mit einer Tank-Rekuperation im Speicher zwischengespeicherte Energie kann für das Testsystem, bestehend aus Hubarm, Rotator und Schwenkwerk, je Zyklus auf ca. 8,8 % der von der Pumpe bereitgestellten Energie beziffert werden (siehe Abbildung 3.1.1.).

Dies gilt für einen am Zyklusbeginn voll entleerten Speicher. Weitere Steuerstrategien, wie das Speichern von Öl über mehrere Zyklen oder das Regenerieren über die Speichersektion, sollen im Weiteren nicht betrachtet werden. Der Pumpen-Rekuperations-Modus wurde am Prüfstand entwickelt und daher nicht in der Simulation getestet. Erkenntnisse zu diesem Modus sind in AP 3.2 festgehalten.

3.1.2. AP 2 Entwicklung der Steuerung des Systems

3.1.2.1. AP 2.1 Auswahl/Beschaffung der Komponenten

Im Laufe des Hauptprojektes waren drei verschiedene Testphasen geplant. Der „Hardware-in-the-Loop“-Test der Steuerung. Der Test eines Teilsystems auf dem Prüfstand und der Test in der Beispielmachine. Für alle drei Testarten wurde der Bedarf an Komponenten ermittelt. Die folgenden Tabellen zeigen den Bedarf der jeweiligen Komponenten. Um das System testen zu können wurde eine entsprechende Messtechnik zusammengestellt und zum Teil neu beschafft.

Hardware-in-the-Loop:

- Steuerungsgerät
- Kabelbaum
- CAN-Adapter
- Matlab/Simulink-Schnittstelle

Prüfstand:

- Elektromotor
- Pumpe + Wellenflansch
- Steuerblock
- 2 Kranarmzylinder
- Lüfter (mit Motor)
- 8 Rückschlagventile
- 4 elektr. prop. DBV
- Schaltschrank mit Steuerung und Verteilung
- 8 Drucksensoren
- 4 Volumenstromsensoren
- 2 Wegsensoren
- Bedieneinrichtungen für Prüfstand
- Tank, Filter, Leitungen und Verschraubungen
- Zylinderhalterungen, Schlitten
- Hydrauliköl (Tank)
- Messdatenerfassung
- Hydrospeicher
- Sicherheitsblock Hydrospeicher
- Ventile zur Steuerung des Speichers

Beispielmaschine

- Steuerblock
- Schaltschrank und Zubehör
- Verschraubungen und Hydraulikschläuche
- Pumpenflansch

3.1.2.2. AP 2.2 Erstellung der Schaltpläne Hydraulik und Elektronik

Im Rahmen des AP 2.2 wurde der Hydraulikschaltplan des aufzubauenden Prüfstandes erstellt (siehe Abbildung 3.1.2). Der Prüfstand wird durch einen Elektromotor des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am KIT betrieben. Es waren insgesamt vier Verbraucher geplant.

Die erste Sektion beinhaltet einen Lüftermotor, welcher mit einer konstanten Drehzahl betrieben werden soll. Die zweite Sektion besteht aus zwei proportionalen Druckbegrenzungsventilen (PDBV), welche dem ganzen System einen Grunddruck aufprägen können. Da beide Systeme keine aktiven Lasten erzeugen können, werden diese mit konventionellen Ventilen angesteuert. Die dritte Sektion besteht aus einem freibeweglichen Differentialzylinder und zwei PDBVs. Diese dienen zur Lastsimulation des Zylinders. Dabei können lediglich passive Lasten erzeugt werden. Die letzte Sektion beinhaltet einen von außen mechanisch belasteten Differentialzylinder. Dafür wird die am Mobima/KIT entwickelte Belastungseinheit verwendet. Diese befand sich gleichzeitig mit dem Prüfstand im Aufbau. Durch die Belastungseinheit, können aktive Lasten hervorgerufen werden. Dadurch kann die Rekuperationsfunktion getestet werden. Die beiden Zylinder werden mit getrennten Steuerkanten verbunden, sodass an dieser Stelle die Modularität der Steuerung getestet werden kann.

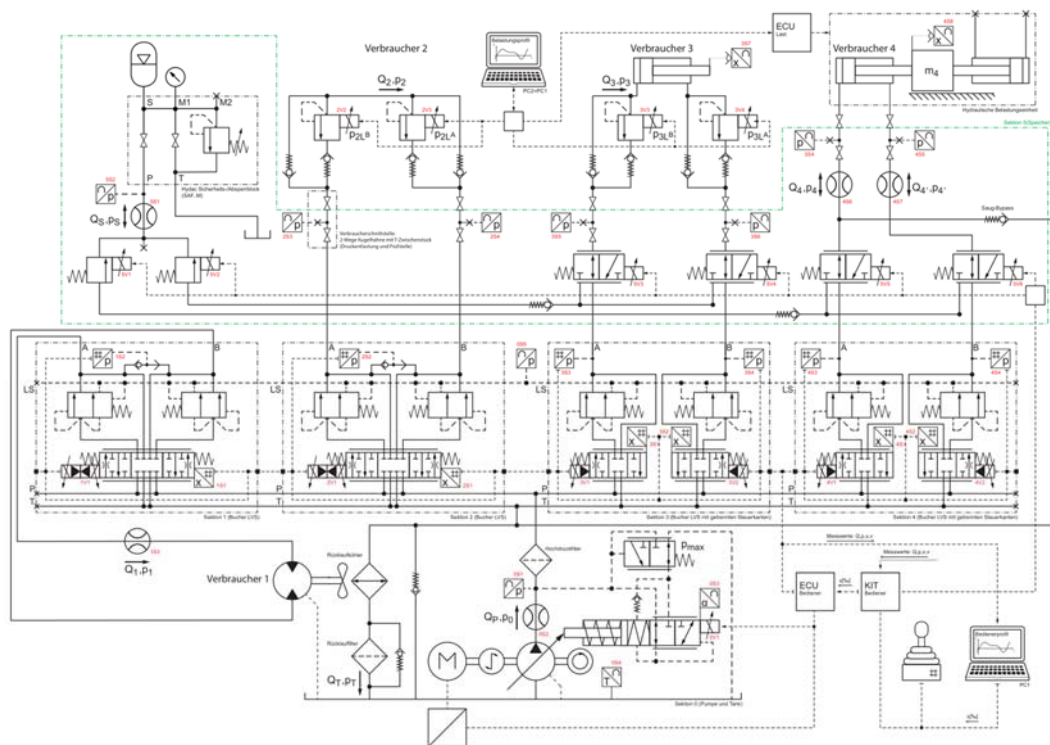


Abbildung 3.1.2: Hydraulischaltplan des Prüfstandes

Es hat sich gezeigt, dass das dynamische Verhalten der Belastungseinheit die Entwicklung der Steuerung erschwert. Dafür musste die Steuerung möglichst flexibel gestaltet werden. Für Tests an dem Versuchsträger waren daher verschiedene Parameter neu anzupassen. Dies ging mit einem erweiterten Aufwand am Versuchsträger einher.

Die Rekuperationseinheit erfordert pro Sektion zwei 3/2-Wegeventile(WV) und ein Proportionalventil zur Steuerung des Volumenstroms. Um Kosten zu sparen, sind die zwei 3/2-WV durch vier Schaltventile des Mobima/KIT substituiert worden. Der Spei-

cher wird durch einen Sicherheitsblock ergänzt. In diesem Projekt wird das zwischengespeicherte Öl zum Tank abgeführt.

Die Kommunikation findet am Prüfstand, wie auch später auf der Maschine, über das CAN-Protokoll statt. Für die Ansteuerung der Pumpe wird das eBSS-Steuerungsprogramm der Fa. Weiss Mobiltechnik GmbH genutzt. Dieses läuft unabhängig von der aktuell zu entwickelnden Steuerung auf einer separaten Steuerungseinheit. Die physikalische Trennung beider Steuerungsprogramme ermöglicht eine einfachere Diagnose und Austauschbarkeit der Software. Als Human-Machine-Interface(HMI) wird ein normaler PC mit zwei USBtoCAN-Modulen genutzt. Dies ermöglicht eine einfache Verarbeitung der Messergebnisse sowie das Abspielen unterschiedlicher Simulationszyklen auf dem Prüfstand. Des Weiteren wird der PC genutzt, um die Belastungseinheit für den Verbraucher 4 zu steuern.

Durch diesen komplexen Aufbau war es möglich die Software so zu gestalten, dass eine Applikation auf eine Beispielsmaschine durch Anpassung von Systemparametern erfolgen kann.

3.1.2.3. AP 2.3 Programmierung der Steuerung

Um das Konzept der Steuerung nicht unnötig oft zu programmieren, wird diese, wie in AP 1 erwähnt, direkt am Simulationsmodell konzipiert. Dafür musste entsprechender Code erstellt und im Anschluss in die vorhandene eBSS-Steuerung eingebunden werden. Im Rahmen von AP 2.3 wurden die benötigten Entwicklungswerkzeuge festgelegt und beschafft. Das Lastenheft wurde im Anschluss in ein Pflichtenheft überführt, anhand dessen die Programmierung erfolgt.

Ein funktionierender Programmcode konnte bereits mit Hilfe der Simulation erstellt werden. Auf dem Prüfstand wurde der vorhandene Code erweitert und besser strukturiert.

Funktionsumfang

Lastenheft eBSS

- 1) 1- und 2-Kreissysteme
- 2) max. 12 CAN-Hydraulik-Sektionen pro Kreis für Bedarfsstromsteuerung
- 3) Gesamtsystem: max. 24 CAN-Hydraulik-Sektionen für Bedarfsstromsteuerung, unbegrenzt Prop.- und Schalt-Sektionen für LS-Steuerung
- 4) LS-Systeme und Bedarfsstromsteuerung kombinierbar
- 5) Elektronische Volumenstrom- und Leistungsbegrenzung aktivierbar
- 6) Elektronischer Ausgleich bei Unterversorgung

- 7) Kaltstartmodus, Übersteuerung bei kaltem Öl
- 8) Integration in Kransteuerung WMT

Komponenten

- 1) Pumpe:
Verschiedene Flanschanschlüsse für Maschinen- und LKW-Anbau elektrisch.
prop. Verstellung mit Druckabschneidung oder hydraulisch-mechanische
Druckregelung, Option: Drehzahl- und Winkelsensor
- 2) Steuerblock:
 - Verschiedene Baugrößen
 - CAN-Ansteuerung
 - Sekundärventile Druck-/Nachsaugventile
 - Verschiedene Kolbenformen
 - Getrennte Steuerung von Verbraucherzu-/ ablauf
- 3) Speicher:
 - Verschiedene Baugrößen
 - Sicherheitsblock
 - Ventil zur Volumenstromsteuerung
 - Ventile zur Steuerung des Ölflusses zwischen Verbraucher-Tank oder Ver-
braucher-Speicher
- 4) Elektronik:
 - Skalierbar für verschiedene Anforderungen

Schnittstellen

- Schnittstelle zu Aufbauhersteller und Integration in bestehende Systeme
- Schnittstelle zu Industriemotoren und LKW-Aufbaumodulen

Sicherheit

- Risikobeurteilung
- FMEA
- Systemauslegung mit Sistema
- PLC für Funktion, PLd für Abschaltung

Entwicklung

- Entwicklungsdokumentation der einzelnen Schritte
- Anwendung von Norm 13849
- V-Model mit Testdokumentation
- Entwicklungsumgebung Codeblocks
- Entwicklungssprache C++, CodeSys

Stand der Programmierung

Durch die Weiss Mobiltechnik GmbH wurde die Software überarbeitet, damit die Software ohne große Änderungen für Simulation, Prüfstand und Funktionsmuster verwendet werden kann.

Das Grundgerüst der Ventilsteuerung ist bereits für das Steuerungsgerät umgesetzt. Weitere Funktionen, welche durch spätere Ergänzungen im Laufe der Simulationsoptimierung gemacht wurden, mussten noch eingepflegt werden. Der Test des Steuerungsprogramms konnte vorab parallel zum Aufbau des Prüfstandes durch die Simulation stattfinden.

Kenngrößen, welche einen Einfluss auf das Steuerverhalten haben, können benannt werden. So müssen die Hysteresegrenzen zwischen den Betriebsmodi anwendungsspezifisch angepasst werden. Bei der Anpassung der Reglerwerte muss ein Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Steuerbarkeit getroffen werden. Ein schneller Regler führt zu schnellerem Druckabbau im Ablauf, was wiederum die Effizienz steigert. Aufgrund starker Reaktionen auf kleine Sollabweichungen und der anwendungsbedingten Messwertschwankungen kann es hierbei zu Situationen kommen, in denen der Regler suboptimale Werte liefert und der Fahrer unerwartet auf dessen Verhalten reagieren muss.

Der Programmstand vom 07/2017 spiegelte den in der Simulation verwendeten Quellcode wieder. Dabei sind die Funktion eines Endanschlages und alle Betriebsmodi, ausgenommen des RgM, implementiert. Im weiteren Verlauf wurden nötige Sicherheitsmechanismen implementiert, welche beispielsweise Kavitation im hydraulischen Kreis verhindern sollen. Am Prüfstand wurden die nötigen Schnittstellen an CAN-Nachrichten und analogen Signalen angepasst, sodass eine Übertragung auf das Funktionsmuster gewährleistet ist.

Die Implementierung der Sicherheitsmechanismen hat dazu geführt, dass Teile der ursprünglichen Software neu geschrieben werden mussten. Wird das System im Hauptmodus betrieben kann durch eine Regelung der Ablaufkante ein unnötiger Druckaufbau bei passiven Lasten verhindert werden, vgl. AP 3.2. Gleichzeitig verhindert der Hauptmodus (HM) die durch aktiven Lasten hervorgerufene Kavitation im

Zulauf eines Verbrauchers, indem während einer Bewegung aktiv ein Mindestdruck gehalten wird. Dieser Mindestdruck kann variabel eingestellt werden. Dieser sollte aus energetischer Sicht möglichst klein gehalten werden. Auf dem Prüfstand hat sich ein Wert von 30 bar als steuerungstechnisch günstig erwiesen.

Aufgrund von Einflüssen durch die Belastungseinheit, vgl. AP 3.1, konnte am Prüfstand der Energieneutrale Modus (EM) nicht näher verfolgt werden. Da dieser Modus essentiell für eine energetische Verbesserung ist, wurde der dafür erstellte Programmteil unmittelbar am Funktionsmuster weiterentwickelt.

Der mit dem EM zusammenhängende Tank-Rekuperation-Modus (TRkM) konnte somit am Prüfstand ebenfalls nicht umgesetzt werden.

Komplementär zum HM enthält der am Prüfstand entwickelte Programmcode einen Pumpen-Regeneration-Modus (PRkM). Dieser ermöglicht die Integration des Speichers während aktiver Lasten, ohne das Steuerungsverhalten kritisch zu beeinflussen. Erkennt das System eine aktive Last, so wird bei Beginn einer Bewegung zunächst mit dem Speicher verbunden. Ist eine Verbindung mit dem Speicher nicht mehr erfüllt, so wird der Speicher bis zum Ende der Bewegung abgeschaltet. Das hat den Vorteil, dass aus steuerungstechnischer Sicht der Einfluss für den Fahrer minimiert wird. Aus energetischer Sicht sind mehr Zyklen zur Füllung des Speichers notwendig, vgl. AP 3.2.

3.1.3. AP 3 Systemtest und Optimierung

Mittels Simulation und Prüfstand kann die Technologie für das reale System entwickelt, untersucht und optimiert werden.

3.1.3.1. AP 3.1 Aufbau und Betrieb Prüfstand

Der bestehende Prüfstand wurde durch die neuen Komponenten (getrennte Steuerkante und Speicher) erweitert. Die Elektroinstallation und die Hydraulikverbindungen mussten angepasst werden. Außerdem wurde für die Simulation ziehender Lasten eine Belastungseinheit integriert.

Die Software zur Steuerung des Prüfstandes, die Messtechnik und die Messdatenerfassung und Messdatenauswertung musste an das neue System angepasst werden. Hierfür wurde eine neue Nutzerschnittstelle programmiert und erweitert, vgl. Abbildung 3.1.3. Das Erstellen dieser Software hat im 4. Quartal 2017 einen Großteil der Zeit in Anspruch genommen. Mit der Nutzerschnittstelle ist eine sichere Steuerung, Überwachung und Auswertung des Prüfstands möglich.

Im Laufe des 4. Quartals 2017 konnte der Prüfstand aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Aus zeitlichen Gründen erfolgte der Test an dem Funktionsmuster parallel zum Prüfstand. Das Funktionsmuster wurde bereits mit der nötigen Hardware ausgestattet, sodass an dieser Stelle eine direkte Übernahme der Software durchgeführt werden konnte.



Abbildung 3.1.3: Nutzerschnittstelle zur Steuerung und Überwachung des Prüfstands und der Belastungseinheit

Integration einer Belastungseinheit

In einem Projekt des Mobima/KIT wurde damit begonnen, eine Belastungseinheit für verschiedene Hydraulikprüfstände zu konzipieren. Diese war zu Beginn nicht vollständig betriebsbereit und befand sich im Aufbau. Es war vorgesehen, dass die Belastungseinheit vor Aufbau des Prüfstandes fertiggestellt wird. Für den Test unterschiedlicher Zyklen musste die Steuerung der Belastungseinheit mit der Steuerung des Prüfstandes gekoppelt oder zumindest synchronisiert werden. /Sie 2018/

Im Verlauf der Inbetriebnahme hat sich gezeigt, dass das Zusammenspiel der Belastungseinheit mit dem Systemprüfstand schlechter ist als erwartet. Wie in Abbildung 3.1.4 zu sehen, können vorgegebene Lasten nur statisch (0 s bis 2 s) ausreichend gut abgebildet werden. Dynamisch kommt es zu Abweichungen in der Kraft, je nach Last- und Steuerungsvorgabe, von bis zu 197,5 kN.

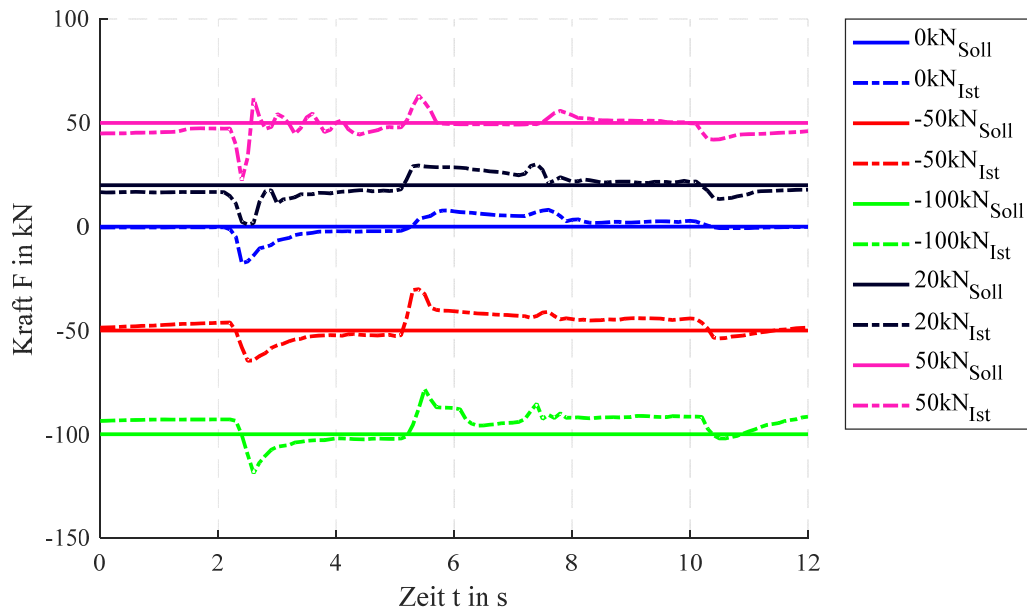


Abbildung 3.1.4: Soll- und Istkraft während der Versuche mit einer Steuervorgabe von 10 % im konventionellen System

Dadurch konnten die Tests der neuen eBSS-Steuerung nur in eingeschränktem Umfang durchgeführt werden. Der in der Simulation verwendete synthetische Maschinenzyklus kann somit am Prüfstand nicht realisiert werden. Aus diesem Grund wurden die Versuche nur mit quasistatischen Belastungen durchgeführt.

3.1.3.2. AP 3.2 Auswertung der Versuche

Die aufgezeichneten Daten werden in Matlab/Simulink ausgewertet und dienen zur weiteren Optimierung des Systems. Wie in AP 2.3 erwähnt, konnte am Prüfstand der HM und PRkM sinnvoll optimiert werden. Um die Eigenschaften dieser Modi im Vergleich zu einem konventionellen System darzustellen, wurden Messungen nach Tabelle 3.1 durchgeführt.

Die Last, hervorgerufen durch die Belastungseinheit, wurde systematisch variiert (-100 kN, -50 kN, 0 kN, 20 kN, 50 kN). Das Steuersignal entspricht einem positiven Rechtecksignal gefolgt durch ein Negatives. Die Amplitude des Steuersignals wurde ebenfalls systematisch variiert (100, 200, 400). Es liegen somit 45 Einzelmessungen zur Analyse vor. Für die Messungen wurde lediglich Verbraucher 4 (Prüfzylinder verbunden mit Belastungseinheit) betrachtet, da dieser belastet werden kann, mit dem Speicher verbunden ist und das Steuerventil in getrennter Bauweise ausgeführt ist. Der alleinig angesteuerte Zylinder führt zu einem Konstantstromsverhalten.

Tabelle 3.1: Versuchsplan für die Testsysteme: konventionell, HM und HM + PRkM

konventionell		HM		HM + PRkM	
Last	Steuersignal	Last	Steuersignal	Last	Steuersignal
0	100	0	100	0	100
-50	200	-50	200	-50	200
-100	400	-100	400	-100	400
20		20		20	
50		50		50	

Es wurden drei Systeme getestet. Für das konventionelle System wurden der Zu- und Ablauf proportional angesteuert, was einer mechanischen Kopplung entspricht. Der Speicher war nicht verbunden. Für das zweite System war nur der HM aktiv. Der Speicher war nicht verbunden. Das dritte System implementierte den HM und PRkM. Für jeden Zyklus wurde der Speicher entleert, sodass stets eine Rekuperation möglich war.

Im Folgenden werden die drei Systeme hinsichtlich der Hauptziele, vgl. Kapitel 2.2, *Wirkungsgrad*, *Erfahrungen mit Hydraulikspeicher* und *erfolgreiches Marketing „Hybrid“* untersucht.

Wirkungsgrad

Ziel des neuen Systems ist es, weniger hydraulische Verluste zu erzeugen und somit den Energieverbrauch zu senken. In konventionellen Maschinen ist die Ablaufsteuerrante stark geschlossen, um das Vorseilen eines Verbrauchers bei aktiven Lasten zu verhindern. Dies macht sich besonders bei kleinen Lasten durch einen hohen Gegendruck im Ablauf bemerkbar. Ein hoher Ablaufdruck führt zu einem hohen Zulaufdruck, sodass letztendlich ein Einfluss auf den notwendigen Pumpendruck besteht, siehe Abbildung 3.1.5.

Die Abbildung 3.1.5 stellt den Druckverlauf für das konventionelle System und das System mit getrennten Steuerkanten (nur HM) dar. Der Prüfzylinder wird mit einer Last von -50 kN belastet. Im Zeitabschnitt zwischen 2 s und 5 s fährt der Zylinder aus. Zwischen 7 s und 10 s fährt der Zylinder ein. Während des Ausfahrens muss die Pumpe gegen die Last arbeiten (passive Last). Beim Einfahren herrscht ein aktiver Lastzustand, sodass die Last durch die Ablaufsteuerrante abgefangen wird.

Es ist zu erkennen, dass während des Ausfahrens der Druck im System mit getrennten Steuerkanten annähernd konstant gehalten wird und das Druckniveau im Vergleich zum konventionellen System um ca. 50 bar niedriger ist. Das Gleiche ist während des Einfahrens zu beobachten.

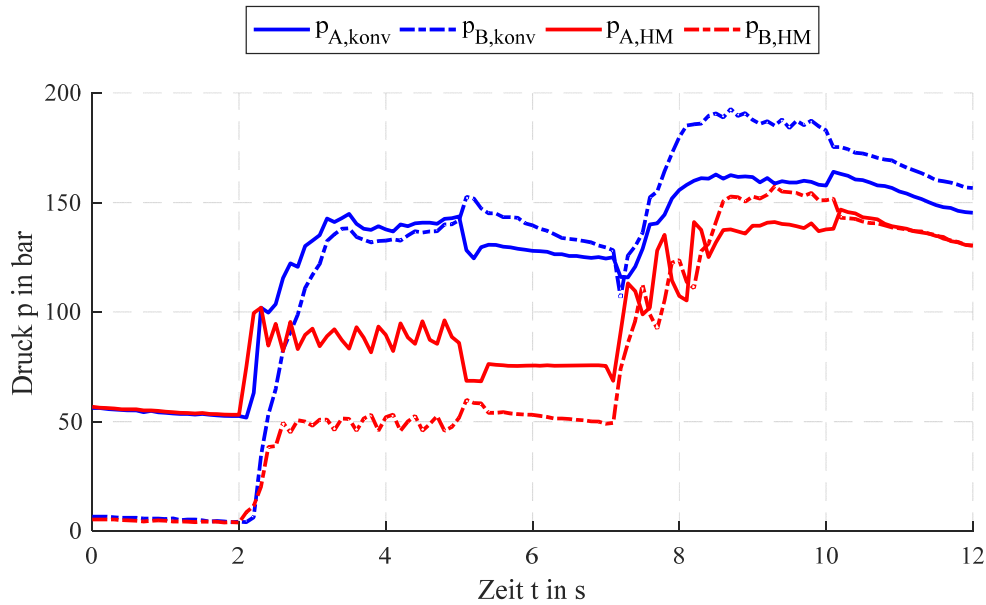


Abbildung 3.1.5: Druckverläufe in den Zylinderkammern A (Kolben) und B (Ring) für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %

Die Absenkung des Drucks wird durch die Steuerung hervorgerufen, indem die Ablaufsteuerkante weiter geöffnet wird als es im konventionellen System der Fall ist, vgl. Abbildung 3.1.6.

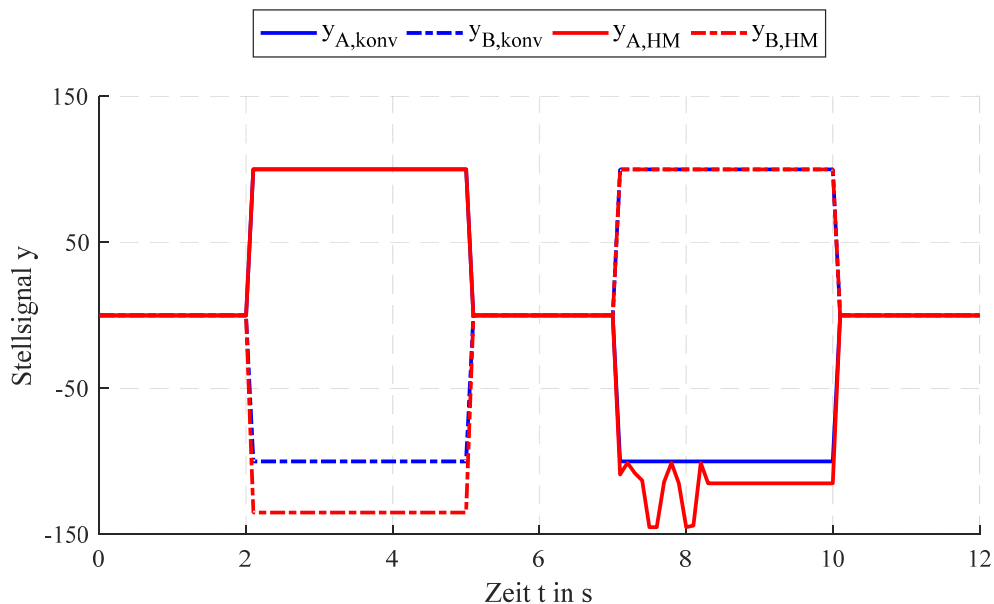


Abbildung 3.1.6: Stellsignale für das Ventil am Verbraucheranschluss A (Kolben) und B (Ring) für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %

Die Steuerung reagiert bei einer passiven Last (2 s – 5 s) mit einer proportionalen Öffnung des Ablaufs in Abhängigkeit der Zulaufsteuerkante. Im aktiven Lastfall steigt die Steuerung mit einem defensiven Stellsignal der Ablaufkante ein. Dieser Wert entspricht annähernd dem Stellsignal des konventionellen Systems (ca. 7 s). Anschließend versucht die Regelung die Ablaufsteuerkante zu öffnen, ohne dass das System durch die aktive Last vorseilt und dadurch der Druck im Zulauf einbricht. Nach einer Einschwingphase von ca. 1 s ist die Ablaufsteuerkante im Vergleich zum konventionellen System statisch weiter geöffnet, was sich wiederum in einem verringerten Druckniveau widerspiegelt.

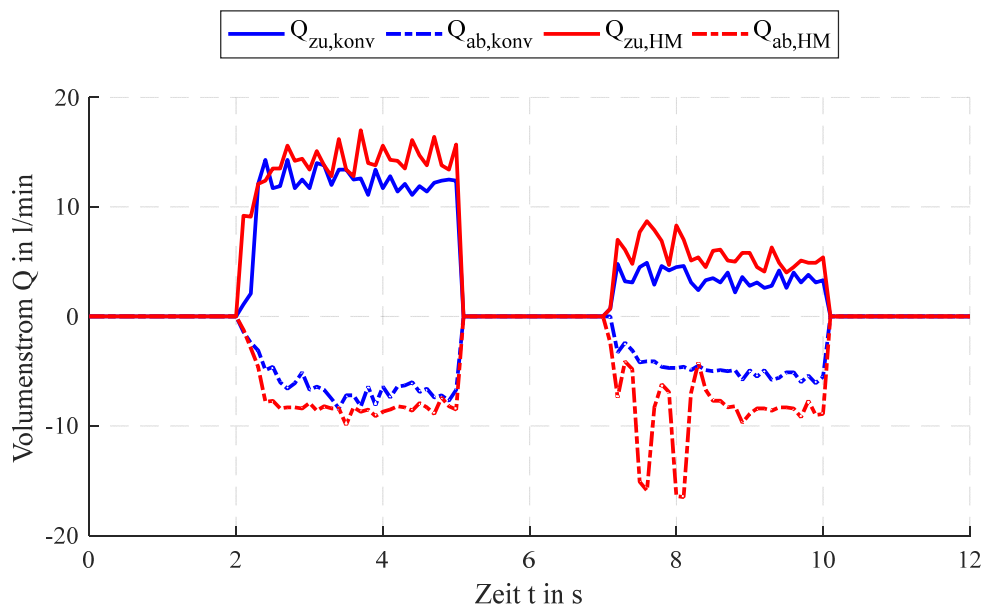


Abbildung 3.1.7: Volumenstromverlauf während des Aus- und Einfahrens für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %

Wird der Volumenstrom Q in Abbildung 3.1.7 betrachtet, ist zu erkennen, dass beim Ausfahren in beiden Systemen ein annähernd gleiches Q erreicht wird. Bei aktiven Lasten hingegen ist Q aufgrund der weiter geöffneten Ablaufsteuerkante erhöht. Damit steigt nach

$$Q = A * v \quad (3.1)$$

die Geschwindigkeit v des Zylinders.

Die von der Pumpe ausgehende hydraulische Leistung ist in Abbildung 3.1.8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch den geringeren Pumpendruck und den annähernd gleichen Pumpenvolumenstrom die notwendige Pumpenleistung beim Ausfahren reduziert ist. Während des Einfahrens ist die notwendige Pumpenleistung des HM-Systems vergleichbar mit dem des Konventionellen. Dies ist darin begründet, dass der Druck im Vergleich niedriger, allerdings der Volumenstrom erhöht ist.

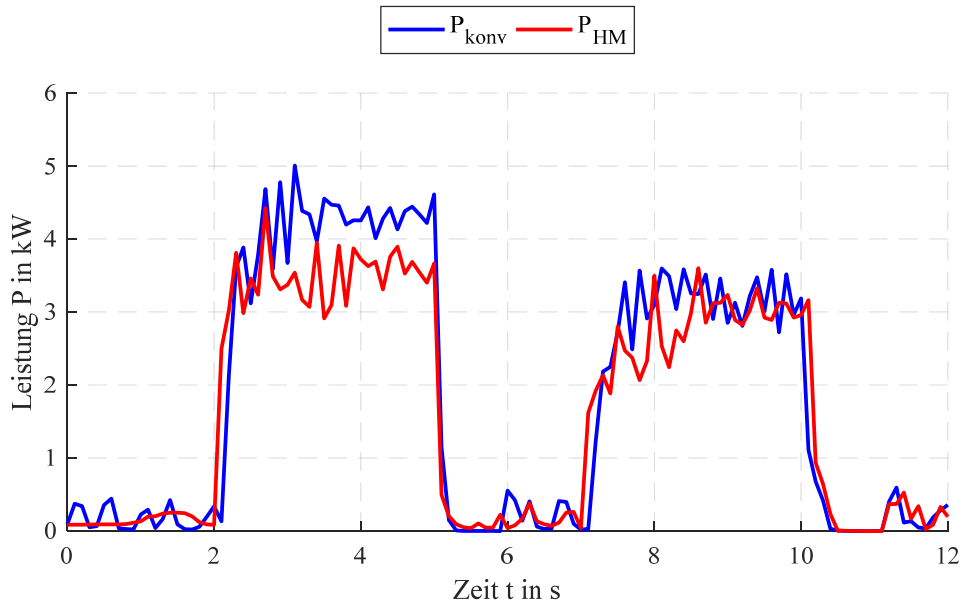


Abbildung 3.1.8: Pumpenleistung während eines Zyklus für eine Belastung von -50 kN und einem Stellsignal von 10 %

Wie oben erwähnt sind die energetischen Vorteile des geteilten Scheibers betriebspunktabhängig, vgl. Abbildung 3.1.9. Die Energiedifferenz berechnet sich durch die benötigte Energie des neuen Systems abzüglich der Energie des konventionellen Systems. Als Referenz dient das konventionelle System.

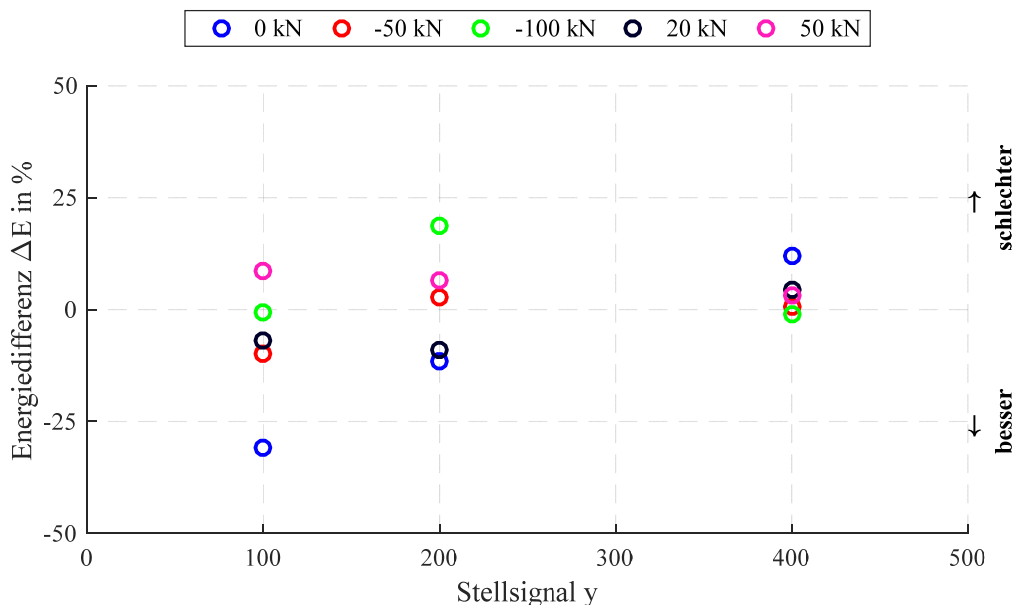


Abbildung 3.1.9: Verteilung der Energiedifferenzen in Abhängigkeit des Stellsignals und der Last

In der Versuchsreihe hat sich gezeigt, dass die energetischen Vorteile mit zunehmender Amplitude des Stellsignals schwinden können. Dies ist auf die Leistungsfähigkeit der ausgewählten Regler und den spezifischen Einstellparametern des Sys-

tems zurückzuführen. Wie genau sich dieses Verhalten in der Praxis widerspiegelt muss durch den Feldtest erprobt werden.

Allgemein kann festgehalten werden, dass auf dem Prüfstand über alle Betriebspunkte verteilt durch den geteilten Schieber eine Energieeinsparung im Mittel von bis zu 0,8 % gegenüber dem konventionell angesteuerten Systemen möglich ist. Eine Tendenz nach oben ist nicht ausgeschlossen und von der Einstellung des konventionellen Systems abhängig.

Erfahrung Hydraulikspeicher

Die Integration eines Hydraulikspeichers in die Arbeitshydraulik einer Maschine verändert das Systemverhalten auf verschiedene Weise. Eingesetzt als zusätzliche Leistungsquelle steigt aufgrund des vergleichbar erhöhten Volumens die hydraulische Kapazität. Dies hat Auswirkungen auf den Druckaufbau und damit auf die Steifigkeit des Systems. Dies kann sich nachteilig auf die Steuerbarkeit auswirken.

Mit veränderlichem Füllgrad des Speichers variiert das Druckniveau im Speicher, sodass dies steuerungstechnisch berücksichtigt werden muss.

Die erfolgreiche Integration eines Speichers kann anhand der Steuerbarkeit des Systems und einem optimalen Füllwert FW gezeigt werden. Die Steuerbarkeit kann durch eine Betrachtung des zurückgelegten Wegs und der Zylindergeschwindigkeit dargestellt werden. Da bei allen Zyklen das vorgegebene Steuersignal zeitlich demselben Rechteckprofil entspricht, können die Weg- und Geschwindigkeitsprofile direkt verglichen werden. Das Steuersignal entspricht in einem Bedarfsstromsystem dem Volumenstrom und ist damit proportional zur Geschwindigkeit. Aufgrund der Vorgabe sind konstante Geschwindigkeiten und lineare Wegverläufe zu erwarten.

Der Füllwert FW entspricht dem Anteil der gespeicherten Energie E_{Sp} im Verhältnis zur vorliegenden Energiequelle E_q . Diese setzt sich aus der zugeführten Energie E_{zu} zum Verbraucher und durch die von der Last ausgehende Energie E_L , vgl. Formel (3.3), zusammen. Der Betrag der Energiequelle E_q lässt sich aus dem Druckpotential Δp_{ab} des Verbraucherablaufs zum Tank und dem abfließenden Volumenstrom Q_{ab} berechnen und ist stets größer null. Es wird $p_T = 0$ angenommen. Ohne E_q ist eine Hybridisierung nicht sinnvoll.

$$FW = 1 - \frac{E_q - E_{Sp}}{E_q} \quad (3.2)$$

$$E_q = E_{zu} - E_L \quad (3.3)$$

$$E_q = \int \Delta p_{ab} * Q_{ab} dt = \int (p_{ab} - p_T) * Q_{ab} dt \quad (3.4)$$

Je größer der Füllwert FW pro Zyklus desto mehr Energie wird im Hydraulikspeicher geladen. Wird keine Energie zwischengespeichert, ist FW gleich null. Wird die gesamte zur Verfügung stehende Energie zwischengespeichert, ist FW gleich eins. Dies kann allerdings nur in einem verlustfreien System erreicht werden.

Eine Auflistung der Größen für das System mit HM + PRkM kann der Tabelle 3.2 entnommen werden.

Tabelle 3.2: Auswertung der Versuche für das System HM + PRkM

Last F in kN	E_q in kJ	E_{Sp} in kJ	Füllwert FW
0	4,82	0	0
-50	5,95	2,40	0,40
-100	8,69	2,60	0,30
20	4,20	1,11	0,27
50	6,83	1,35	0,20

Aus Tabelle 3.2 ist ersichtlich, dass bei kleinen Lasten der Füllwert FW größer ist, was darauf hindeutet, dass die Speicherladung in diesen Fällen effizienter ist. Des Weiteren ist festzuhalten, dass FW nicht über einen Wert von 0,5 hinausgeht. Dies deutet auf ein Verbesserungspotential der bestehenden Steuerung.

Marketing „Hybrid“

Die Ergebnisse aus den Erfahrungen mit dem Hydraulikspeicher zeigen, dass eine Hybridisierung durch Erweiterung eines Systems mit getrennten Steuerkanten erfolgen kann. Zur Implementierung sind mindesten folgende Komponenten notwendig:

- Hydraulikspeicher
- Sicherheitsabsperrblock
- Stromregelventil
- Logikventile
- Zusätzliche Kabel, Leitungen und Fittings
- Rückspeisung

Zur erfolgreichen Durchsetzung auf dem Absatzmarkt gilt es die nahezu konstanten einmaligen Mehrkosten der Komponenten, den Ersparnissen in den Betriebskosten gegenzurechnen. Die Betriebskosten sind stark vom Einsatzprofil des Hydrauliksystems abhängig, sodass Kunden keine pauschale Empfehlung gegeben werden kann.

Es ist anzumerken, dass durch die Erkenntnisse dieses Projektes eine Hybridisierung von Maschinen mit bereits ausgestatteten getrennten Steuerkanten kostengünstiger durchgeführt werden kann als eine Maschine mit konventionellen Ventilen. Im Falle steigender Treibstoffkosten bietet dies dem Besitzer einer Maschine mit getrennten

Steuerkanten eine schnelle und kostengünstige Handlungsoption zur Reduktion der Betriebskosten.

3.1.3.3. AP 3.3 Optimierung der Steuerung

Da die Anhand der Simulation erstellte Steuerung nicht auf den Prüfstand abgestimmt ist, musste dies direkt am Prüfstand getan werden. Durch das direkte Feedback des Prüfstandes ist es möglich, Einflüsse für die Adaption auf der Maschine zu benennen und Maßnahmen zu ergreifen.

Es hat sich am Prüfstand gezeigt, dass die in der Simulation als kritisch erachteten Betriebspunkte bestätigt werden können. Das Problem der Kavitation während des EM konnte am Prüfstand nicht behoben werden, vgl. AP 2.3.

3.1.4. AP 4 Validierung an einem Funktionsmuster

Um das System zu validieren sollte ein Funktionsmuster aufgebaut werden, welches umfangreich im Feldversuch erprobt werden soll.

Zwei Maschinen wurden dafür ausgewählt. Das Aufgabefahrzeug einer Entrindungsmaschine und ein Rückezug. Beide Maschinen waren mit dem herkömmlichen eBSS-System ausgestattet. Diese Maschinen sind seit März 2018 mit geteilten Schiebern im Dauereinsatz.

3.1.4.1. AP 4.1 Einbau des Hydrauliksystems in eine Maschine

Die bestehende Hydraulik musste durch die neuen Komponenten ersetzt werden und die entsprechenden Hydraulikleitungen mussten neu verlegt werden. Die nötigen Umbauten sind erfolgt und mussten durch neue Erkenntnisse am Prüfstand ergänzt werden.

Für die Erprobung wurden die Funktionen Hubarm, Ausleger und Teleskop mit geteilten Schiebern ausgerüstet.

Die Funktion Hubarm hat überwiegend aktive Lastfälle, wodurch die Regelung beim Senken erprobt wird. Zum einen können Einstellparameter untersucht werden. Zum anderen kann der energieneutrale Modus untersucht werden.

Die Funktion Ausleger hat beim Schwenken durch den Totpunkt einen Lastwechsel und eignet sich zum Test dieser Situation.

Die Funktion Teleskop hat lange Anschlussleitungen und hohe Staudrücke sowie überwiegend aktive Lastfälle. Daher eignet sich diese Funktion zur Verbesserung der Regelung der Ablaufsteuerkante.

3.1.4.2. AP 4.2 Einbindung der Steuerung

Die Steuerung musste in das bestehende System eingebunden werden und die zusätzlichen Maschinenfunktionen mussten integriert werden.

Die Software des bestehenden eBSS-Systems wurde um die Funktion des geteilten Schiebers erweitert. Dazu wurde die auf dem Prüfstand getestet Software angepasst und auf die Maschine übertragen.

Weiter mussten die Ablaufkennlinien der Schieber ermittelt werden. Dies wurde zusammen mit dem Hydraulikhersteller an dessen Prüfstand durchgeführt. Diese Kurven wurden im System hinterlegt.

3.1.4.3. AP 4.3 Funktionsuntersuchungen im Feld

Alle relevanten Daten können über ein Modem abgerufen werden und ausgewertet werden. Dadurch kann die Funktion bestätigt werden und die Daten bieten die Grundlage für weitere Optimierungen.

Die ersten Versuche im Feld zeigten, dass die Regelung des Systems sehr aufwendig ist. Nach diesen Tests wurden die Regler angepasst und die Software überarbeitet.

Für die Hubarmfunktion hat sich gezeigt, dass die Auflösung des Steuerschiebers zu groß ist. Zusammen mit dem Hydraulikhersteller wurde ein neuer Schieber entworfen, gefertigt, vermessen und in die Maschine eingebaut. Danach konnte die gewünschte Funktion der Regelung erreicht werden.

Die folgenden Diagramme Abbildung 3.1.10 und Abbildung 3.1.11 zeigen die Funktion *Teleskop* vor und nach dem Umbau der Maschine.

Beim Ausfahren mit normalen Schieber wird ein Pumpendruck von über 100 bar benötigt und der Gegendruck liegt bei ca. 250 bar, Abbildung 3.1.10. Unter Verwendung des geteilten Schiebers regelt sich der Pumpendruck auf 20 bar (Abbildung 3.1.11, blau) ein und der Gegendruck beträgt ca. 30 bar (Abbildung 3.1.11, gelb).

Dies zeigt, dass der benötigte hydraulische Druck p_F dieser Funktion um 80 % gesenkt werden konnte. Unter der Annahme eines gleichbleibenden Volumenstroms Q und denselben Druckverlusten p_{Ver} zwischen Pumpe und Verbraucher reduziert sich die benötigte Antriebsleistung P nach der allgemeinen Formulierung der hydraulischen Leistung $P = \Delta p \cdot Q = p_F \cdot Q$ um ebenfalls 80 %.

Beim Einfahren erkennt das System den aktiven Lastfall und steuert die Ablaufseite weiter auf. Dadurch senkt sich der Gegendruck im Ventil und der Pumpendruck konnte von ca. 220 bar auf 140 bar gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion der Antriebsleistung um etwa 37 %.

Die Feldversuche bestätigen die auf dem Prüfstand aufgezeigte Tendenz einer energetischen Verbesserung durch die getrennten Steuerkanten.

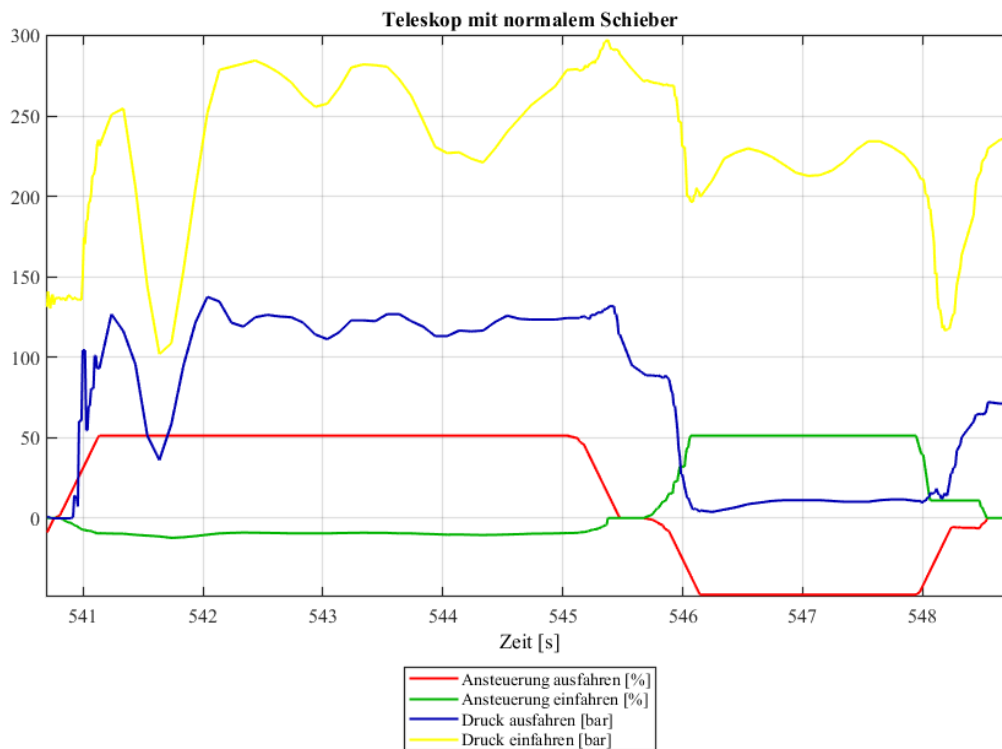


Abbildung 3.1.10: Messung der Zylinderdrücke für die Funktion Teleskop mit normalem Schieber

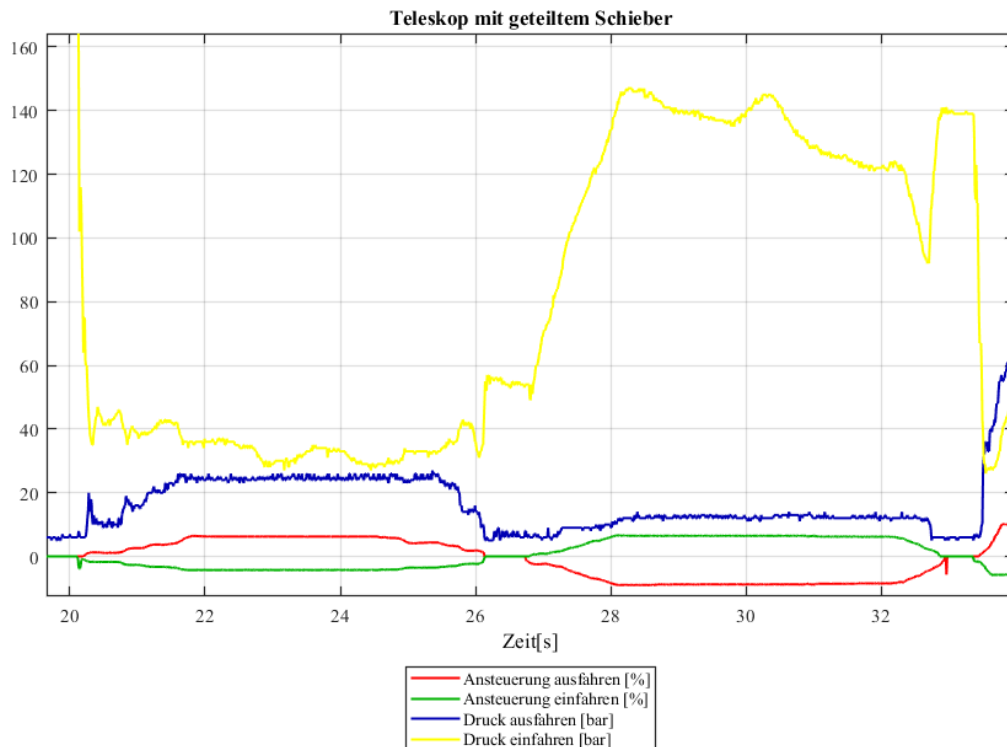


Abbildung 3.1.11: Messung der Zylinderdrücke für die Funktion Teleskop mit geteiltem Schieber

Da bei normalem Betrieb sich die Lastfälle mischen und mehrere Funktionen parallel gefahren werden, ist die genaue Nennung einer Energieeinsparung für das Gesamtsystem zur Zeit der Berichterstellung nicht möglich.

Die gesichteten Messungen und die beobachtete Motorbelastung im Betrieb – Motorgeräusch und verringerter Drehzahlabfall bei Belastung – deuten darauf hin, dass sich die benötigte Leistung während des Betriebs verringert hat. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass ein ungewollter Stillstand des Verbrennungsmotors aufgrund von Überlast – was im konventionellen System gelegentlich passiert – mit der neuen Steuerung vermieden wird.

Offener Entwicklungsaufwand bis zur Serienreife

Nach Abschluss des Projekts sind noch weitere Untersuchungen und Arbeiten notwendig, um den bisherigen Stand als Produkt auf den Markt verkaufen zu können.

Die Erkenntnisse aus dem Feldtest haben noch folgende offenen Punkte aufgezeigt:

Die Regelung ist nicht schnell genug, wenn das gesamte System in starker Unterversorgung betrieben wird. Dann wird die angenommene Zulaufmenge nicht erreicht und die Regelung ist zu langsam. Dieses Problem kann mit einer elektronischen Zulaufregelung gelöst werden. Diese Funktion wird bis zur Serienreife integriert.

Die Pumpe erfüllt für den Mitteldruckbereich nicht die geforderte Regelungsqualität. Deshalb wird zusammen mit einem Hydraulikhersteller eine Pumpe für dieses System entwickelt. Diese sollte im laufenden Kalenderjahr 2019 für eine weitere Verbesserung des Systems verfügbar sein. Erste Tests finden in Zusammenarbeit mit dem Hydraulikhersteller im Februar 2019 statt.

Abschließend werden noch Anpassungen für die Serientauglichkeit der Software durchgeführt und ein finaler Test mit dem Serienstand durchgeführt. Die Markteinführung ist für das zweite Halbjahr 2019 geplant.

3.1.5. AP 5: Dokumentation

Die durchgeführten Arbeiten wurden in Form von Zwischenberichten und dem vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert. Die im Projektverlauf erarbeiteten Dokumente wurden in einer Ordnerstruktur gespeichert und stehen zur weiteren Verwendung zur Verfügung.

3.2. *Diskussion der Ergebnisse*

Durch die Entwicklung einer Software zur Steuerung von getrennten Steuerkanten konnte eine weitere Effizienzsteigerung des eBSS erreicht werden. Die Regelung der getrennten Steuerkante funktioniert sehr gut und bringt nicht nur energetische Vorteile.

Die Bedienung des Krans wurde weiter verbessert. So können jetzt große Lasten kontrollierter und präziser manipuliert werden, als es mit herkömmlichen Kransteuerungen möglich ist. Auch die Belastung des Dieselmotors war bei den Testmaschinen deutlich geringer, so dass manche Arbeiten mit einer geringeren Dieselmotordrehzahl ausgeführt werden können, was wiederum die Effizienz steigert. Durch diese weiteren Vorteile hat sich die Chance der Vermarktung weiter erhöht.

Durch lange Lieferzeiten der Komponenten und Verzögerungen beim Prüfstands Aufbau konnten in der Projektlaufzeit nicht alle Funktionen auf die Funktionsmuster übertragen werden. Es wurde aber in allen Bereichen die nötige Erfahrung gesammelt, um dies weiter umzusetzen. Die Umsetzung der restlichen Funktionen wird durch die Firma Weiss Mobiltechnik weiter fortgeführt.

Die Serieneinführung des Systems ist im Jahr 2019 geplant. Dazu finden in den nächsten Monaten schon erste Treffen mit Maschinenherstellern statt. Dass ein großes Interesse besteht, hat sich auch an unserem Vorführtag gezeigt. Weiter will ein Hersteller von Steuerblöcken unser System in seine Produkte integrieren. Dadurch wird das System auch in anderen Maschinentypen und in der Industrie eingesetzt. Durch diese Aussichten und die erreichte Effizienzsteigerung hat das System das Potential, die gesteckten Ziele in den nächsten Jahren zu erreichen.

3.3. *Ökologische und technologische Bewertung*

Anhand einer überschlägigen Rechnung lässt sich die Relevanz des Projektes für den Forstmaschinensektor kalkulieren. Abbildung 3.3.1 zeigt die Verkaufsstatistik für Forstspezialmaschinen der letzten Jahre in Deutschland. Nahezu alle in der Legende aufgeführten Maschinentypen besitzen einen Forstkran, der als elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung ausführbar wäre. Hinzu kommen Kurz- und Langholztransporter sowie selbstfahrende und gezogene Holzhacker, deren genaue Verkaufszahlen der Autor zwar nicht belegen kann, die jedoch in ähnlicher Größenordnung liegen sollten. Die Lastzyklen all dieser Maschinen korrelieren weitestgehend mit der im Projekt zu untersuchenden Beispielmachine; der Energiebedarf liegt bei etwa 10 l/h für Kranarbeiten. Aufgrund der Einsatzprofile der unterschiedlichen Maschinentypen variiert der Anteil der Kranarbeiten an der Gesamtarbeitszeit zwischen vernachlässigbar gering bis vollumfänglich. Er soll deshalb konservativ mit durchschnittlich 500 h/a abgeschätzt werden.

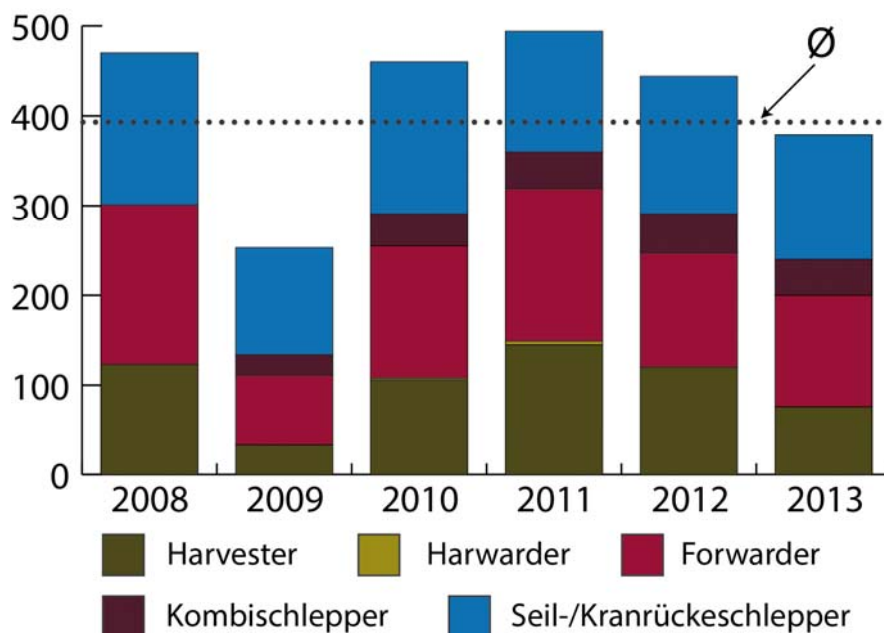


Abbildung 3.3.1: Verkaufsstatistik Forstspezialmaschinen in Deutschland /KWF 2014/

Die möglichen Einsparpotentiale ergeben sich als Addition der bereits nachgewiesenen mind. 10 % durch die reine elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung, zuzüglich erwarteter 5 bis 6 % durch die Kombination mit getrennten Steuerkanten und weiteren 4 bis 5 % durch die Hybridisierung. Hieraus ergibt sich bei einer 10 %-igen Marktdurchdringung des Gesamtvolumens von etwa 1.000 Forstmaschinen pro Jahr eine Einsparung von Dieselkraftstoff in Höhe von ca. 95.000 bis 105.000 l/a. Bei einem CO₂-Äquivalent (CO₂e) von 2,75 kg/l ergibt sich daraus eine Reduktion der CO₂e-Emissionen um 261 bis 289 t.

Diese prognostizierten Verbesserungen können in der Simulation und Praxis bestätigt werden, sodass das neuartige System, bei ausreichender Marktdurchdringung, einen wertvollen Beitrag zum Umweltschutz liefern kann.

Die Simulation hat gezeigt, dass sowohl der Einsatz der getrennten Steuerkanten, als auch die Erweiterung des Systems durch einen hydraulischen Speicher ökologisch sinnvoll sind. Eine ökonomische Betrachtung ist nicht pauschal möglich, da je nach Betrieb und Maschine starke Abweichungen entstehen können.

Reale Verbrauchsdaten sind noch nicht verfügbar, können allerdings mit einer Begleitforschung der umgerüsteten Maschinen ermittelt werden. Die vorausgehend aufgeführten Messungen für die Funktion Teleskop der Testmaschine, als auch die Versuche auf dem Prüfstand, zeigen, dass die Annahmen der Simulation plausibel sind.

3.4. Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Lösung wird zukünftig durch die Weiss Mobiltechnik GmbH angeboten und in das Leistungsspektrum des Unternehmens integriert. Auch ein Hersteller von Steuerblöcken möchte das System in seine Produktpalette integrieren.

Im weiteren Verlauf wird das System somit entsprechend beworben und versucht neue Kunden zu akquirieren, um die Verbreitung der Technologie voranzutreiben. Hierbei werden dann noch jeweils projektspezifische Optimierungen durchgeführt werden.

Aus dem Projekt heraus wurden folgende Veröffentlichungen getätigt:

- Weiß, B.; Wydra, M.; Geimer, M.: Effizienterer Einsatz von Forstmaschinen durch die Verwendung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit einer unabhängigen Zu-/Ablaufsteuerung, Tagungsbeitrag, 6. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, Februar 2017, S. 31-50
- Wydra, M.; Geimer, M.; Weiß, B.: An Approach to Combine an Independent Metering System with an Electro-Hydraulic Flow-on-Demand Hybrid-System, Tagungsbeitrag, The 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'17, Linköping, June 2017
- Wydra, M.; Siebert, J.; Weiß, B.; Geimer, M.: Entwicklung einer Kransteuerung auf Basis der MOBIL-Methode, Tagungsbeitrag, 10th Colloquium Mobile Hydraulics 2018, Braunschweig, Oktober 2018
- Siebert, J.; Wydra, M.; Heber, S.; Geimer, M.: Development and implementation of a control concept for a hydraulic load unit, Tagungsbeitrag, Proceedings of 11th International Fluid Power Conference Vol.1., Aachen, March 2018, S. 130-143

Darüber hinaus erfolgte eine Präsentation am 12.04.2018 im Rahmen des Tags der offenen Tür der Weiss Mobiltechnik GmbH, an welchem zwei Vorträge zum Thema eBSS durch die Antragsteller gehalten wurden.

4. Fazit

In dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt sollte die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) fortgeführt werden.

Das beantragte Vorhaben war ein weiterer Schritt auf dem Weg hin zur Entwicklung energieeffizienter Forstmaschinen. Der Einsatz innovativer elektrohydraulischer Komponenten ist mit lediglich geringen Mehrkosten in Bezug auf den gesamten Anschaffungspreis einer Forstmaschine verbunden. Die Umweltfreundlichkeit, die Betriebskosten und die Energieeffizienz werden jedoch signifikant verbessert. Das Ergebnis soll Hersteller und Käufer von mobilen Maschinen motivieren, diese Mehrkosten bewusst in Kauf zu nehmen, weil sich diese Investition während der Betriebszeit der Maschine wirtschaftlich rentiert und gleichzeitig einen Beitrag für die Umwelt leistet.

Die vorgeschlagene Verknüpfung aus elektrohydraulischer Bedarfsstromsteuerung, dem Prinzip der getrennten Steuerkanäle sowie optional eines Speichers zur Systemerweiterung zum hydraulischen Hybriden, ermöglicht die Zusammenstellung zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, die als Baukasten von Hydraulikschaltungen, auch kleineren Firmen den Zugang zu umweltfreundlicher Technik ermöglichen werden.

Im Projekt konnten die Zielstellungen weitestgehend erreicht werden. Abschließend müssen noch Anpassungen für die Serientauglichkeit der Software durchgeführt und ein finaler Test mit dem Serienstand durchgeführt werden. Die Markteinführung ist für das zweite Halbjahr 2019 geplant.

Dass große Interesse konnte aufgrund zahlreicher Gespräche mit möglichen Anwendern bestätigt werden.

5. Glossar

LS	hydraulisch-mechanisches Load-Sensing
eLS	Elektrisches Load-Sensing (Differenzdruckregelung)
eBSS	elektrohydraulische Bedarfsstromsteuerung

6. Literaturverzeichnis

- /Axi 2013/ Axin, M.: Fluid Power Systems for Mobile Applications with a Focus on Energy Efficiency and Dynamic Characteristics, Dissertation, Linköping University, Linköping, Sweden, 2013
- /Bor et. al. 2014/ Massimo Borghi, B.; Zardin, B.; Pintore F.: Energy Saving in the Hydraulic Circuit of Agricultural Tractors, Energy Procedia, Elsevier 2014
- /Din 2016/ Ding, R.; Xu, B.; Zhang, J.; Cheng, M.: Bumpless mode switch of independent metering fluid power system for mobile machinery, Automation in Construction, Elsevier 2016
- /KWF 2014/ Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF): Forstmaschinenstatistik 2013, Forst&Technik 9/2014, Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Berlin, 2014
- /Mat 2014/ Matthies, H.-J., Renius, K.-T.: Einführung in die Ölhydraulik: Für Studium und Praxis, Wiesbaden, Springer Vieweg Verlag 2014
- /Mey et. al. 2011/ Meyer, C.; Cochoy, O.; Murrenhoff, H.: Simulation of a Multivariable Control System for an Independent Metering Valve Configuration, The 12th Scandinavian Conference on Fluid Power, Tampere 2011
- /Sie 2018/ Siebert, J.; Wydra, M.; Heber, S.; Geimer, M.: Development and implementation of a control concept for a hydraulic load unit, Tagungsbeitrag, Proceedings of 11th International Fluid Power Conference Vol.1., Aachen, March 2018, S. 130-143
- /Sch 2015/ Scherer, M.: Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen: Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom, Dissertation, Karlsruhe, 2015
- /Thi 2011/ Thiebes, P.: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2011
- /Wei 2017/ Weiß, B.; Wydra, M.; Geimer, M.: Effizienterer Einsatz von Forstmaschinen durch die Verwendung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit einer unabhängigen Zu-/Ablaufsteuerung, Tagungsbeitrag, 6. Fachtagung Hybride und

energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, Februar 2017, S. 31-50

/Wyd 2017/

Wydra, M.; Geimer, M.; Weiß, B.: An Approach to Combine an Independent Metering System with an Electro-Hydraulic Flow-on-Demand Hybrid-System, Tagungsbeitrag, The 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'17, Linköping, June 2017

/Wyd 2018/

Wydra, M.; Siebert, J.; Weiß, B.; Geimer, M.: Entwicklung einer Kransteuerung auf Basis der MOBIL-Methode, Tagungsbeitrag, 10th Colloquium Mobile Hydraulics 2018, Braunschweig, Oktober 2018