

Entwicklung einer Kransteuerung auf Basis der MOBiL-Methode

M. Sc. **M. Wydra**, Dipl.-Ing. **J. Siebert**, **B. Weiß***,
Prof. Dr. **M. Geimer**

Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen – Mobima
Karlsruher Institut für Technologie – KIT
Rintheimer Querallee 2
76131 Karlsruhe
E-Mail: marco.wydra@kit.edu, jan.siebert@kit.edu,
marcus.geimer@kit.edu

* Weiss Mobiltechnik GmbH
Harlachweg 15
72229 Rohrdorf
E-Mail: bweiss@weiss-can-sps.de

Abstract

In diesem Beitrag wird MOBiL auf die Entwicklung einer elektro-hydraulischen Kransteuerung angewandt. Das als Bedarfsstromsteuerung (Flow Matching, eBSS) ausgeführte System nutzt das Potential durch die Integration getrennter Steuerkanten und eines Hydraulikspeichers zur Rekuperation von Energie. In den einzelnen Entwicklungsschritten wird der Einfluss durch MOBiL berücksichtigt und Rückwirkungen von der Simulation bis hin zum finalen Einsatz in einer Forstmaschine benannt. Abschließend wird der durchgeführte Entwicklungsprozess in Bezug auf die Anforderungen der MOBiL-Methode bewertet und Herausforderungen bei der Umsetzung werden aufgezeigt.

Schlüsselwörter: X-in-the-Loop, Modellbasierte Entwicklung, Steuerungstechnik, Hydraulik, Hybrid, getrennte Steuerkante, MOBiL

1 Einleitung

Elektrische Steuerungen sind heute unerlässliche Bestandteile mobiler Arbeitsmaschinen, um den gewünschten Funktionsumfang bereitstellen zu können. Unter Verwendung von auf Multidomänensysteme angepassten Methoden kann die Komplexität dieser Systeme während des Produktentwicklungsprozesses beherrschbar gemacht bzw. teilweise sogar reduziert werden. Dabei gewinnen ganzheitliche Systemsimulationen und daher auch ganzheitliche Verifizierungs- und Validierungsansätze immer mehr an Bedeutung.

Um den Anforderungen einer ganzheitlichen Prüfmethode für mobile Arbeitsmaschinen gerecht zu werden, wurde am Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die Mobile Arbeitsmaschine-in-the-Loop (MOBiL) Methode entwickelt [1].

2 MOBiL – Eine Prüfmethode für mobile Arbeitsmaschinen

Moderne mobile Arbeitsmaschinen vereinen in sich eine Vielzahl verschiedener Technologien und Domänen und werden treffenderweise auch als *komplexes mechatronisches System* beschrieben [2]. Zukunftsweisende Systeme, wie z.B. Hybride, werden teilweise erst durch die Integration verschiedener elektrisch angesteuerter Komponenten und einer intelligenten zentralen Steuerungseinheit möglich.

Die am Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen entwickelte MOBiL-Methode basiert auf dem aus der PKW-Entwicklung bekannten X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz und erweitert diesen entsprechend den Anforderungen mobiler Arbeitsmaschinen. Im Gegensatz zu PKWs verfügen mobile Arbeitsmaschinen allerdings über einen Fahr- und Arbeitsantrieb, die beide signifikante Leistungsanteile während des Betriebs aufweisen und teilweise bei gleichzeitigem Betrieb auch Wechselwirkungen aufeinander haben. [3]

Daher muss das für die Entwicklung verwendete Umgebungsmodell eine Interaktion mit dem Arbeitsantrieb ermöglichen, was die Implementierung einer Arbeitsumgebung notwendig macht. Zusätzlich muss das verwendete Fahrermodell so erweitert werden, dass der komplette Arbeitsprozess, d.h. der prozessspezifisch anteilige Einsatz von Fahr- und Arbeitshydraulik, abgebildet wird.

[4] beschreibt ein Vorgehen der MOBiL-Methode in vier Teilschritten:

- 1.) Arbeitsprozess definieren
- 2.) Messdaten des Arbeitsprozesses aufnehmen
- 3.) Versuchsträger vermessen
- 4.) MOBiL-Prüfumgebung generieren

Die Prüfumgebung umfasst die virtuell abgebildete Arbeitsumgebung und die auf Systemprüfständen eingebundene(n) Hardwarekomponente(n). Das Vorgehen nach der MOBiL-Methode ermöglicht es, die Entwicklung über weite Strecken auch ohne Gesamtsystemprototyp durchzuführen, da Einzelkomponenten, Teilsysteme und deren Wechselwirkungen in der Prüfumgebung unter Bedingungen getestet werden können, die sich an den realen Belastungen orientieren. Die virtuelle Umgebung und die Prüfstände interagieren dabei über definierte Schnittstellen und tauschen Ist- und Sollgrößen aus. [4, 1]

Die in dieser Veröffentlichung beschriebene Kransteuerung wurde unter Verwendung der MOBiL-Methode entwickelt. Dabei wurden die Teilschritte 3 und 4 auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen durchgeführt. Aufbauend auf einem bestehenden Simulationsmodell eines Versuchsträgers wurde mithilfe von *Digitalen Zwillingen* [5] das Hydrauliksystem so erweitert, dass die Funktion der Kransteuerung in den Prüfumgebungen *Simulation*, *XiL*, *Systemprüfstand* und *Feldversuch* verifiziert und teilweise validiert werden konnte. Die Anwendung ist in Kapitel 4 dokumentiert.

3 Entwicklungsgegenstand Kransteuerung

Wie eingangs erwähnt, wird im Folgenden das Kransystem vorgestellt und die damit einhergehenden Anforderungen an die Kransteuerung sowie die notwendigen Entwicklungsanforderungen definiert.

3.1 Systemaufbau und -schnittstellen

Die hier vorgestellte Kransteuerung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes *EfHyFo⁺ - Elektro-hydraulische Bedarfsstromsteuerung mit getrennten Steuerkanten und Hybrid-Funktion zur Steigerung der Energieeffizienz* entwickelt [6]. Ausgehend von einem klassischen Flow Matching System wurde in dem Projekt das Hydrauliksystem durch die Funktion getrennter Steuerkanten und die Hybridisierung mittels eines Hydraulikspeichers erweitert. Als Randbedingung galt es, marktübliche Ventile und möglichst wenige zusätzliche Sensoren oder anderweitige Komponenten einzusetzen.

Das betrachtete Hydrauliksystem besteht aus einer elektrisch proportional verstellbaren Pumpe, den gleichzeitig angesteuerten Hauptsteuerventilen (HSV), drei Verbrauchern und einem zum Hubzylinder parallel geschalteten Hybridsystem, vgl. Abbildung 3.1. Das Hybridsystem besteht aus zwei Logikventilen (LV) zwischen HSV und Verbraucheranschluss sodass der Verbraucher entweder mit dem Hydraulikspeicher oder dem HSV verbunden werden kann. Die betrachteten Verbraucher der Kranhydraulik sind ein Differentialzylinder für den Hub, zwei Gleichgangzylinder für das Schwenkwerk und ein Rotator des Greifarms.

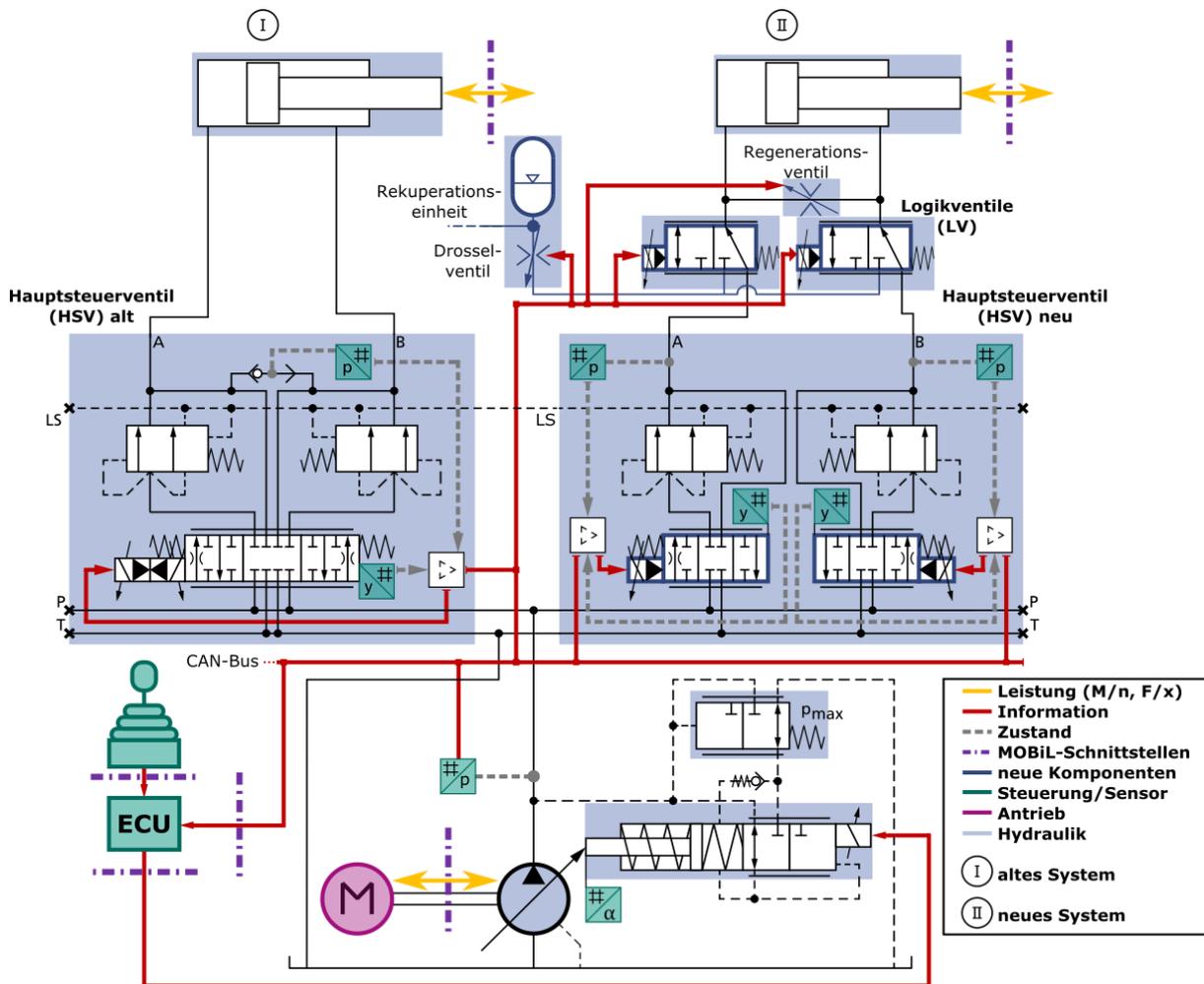


Bild 3.1: Schaltplan eines beispielhaften eBSS-Systems mit IM und Hybridmodul, nach [7]

Die HSVe können den Zu- und Ablauf eines Verbrauchers getrennt voneinander einstellen und bilden damit ein sogenanntes Independent-Metering(IM)-System. Während im Pumpenpfad eine Druckwaage für einen lastunabhängigen Volumenstrom im Zulauf sorgt, befindet sich ablaufseitig eine einfache Steuerkante, sodass an dieser Stelle der Ölfluss lastabhängig ist.

Um das Hydrauliksystem im Sinne des V-Modells als Gesamtsystem betrachten zu können, wird es durch eine Leistungsquelle angetrieben, mit von außen wirkenden Kräften belastet und mittels Elektronik gesteuert [8].

Verallgemeinert können folgende Teilsysteme des Versuchsträgers definiert werden, vgl. Abbildung 3.2:

- Systemantrieb
- Belastung
- Hydraulik
- Steuerungs- und Sensortechnik

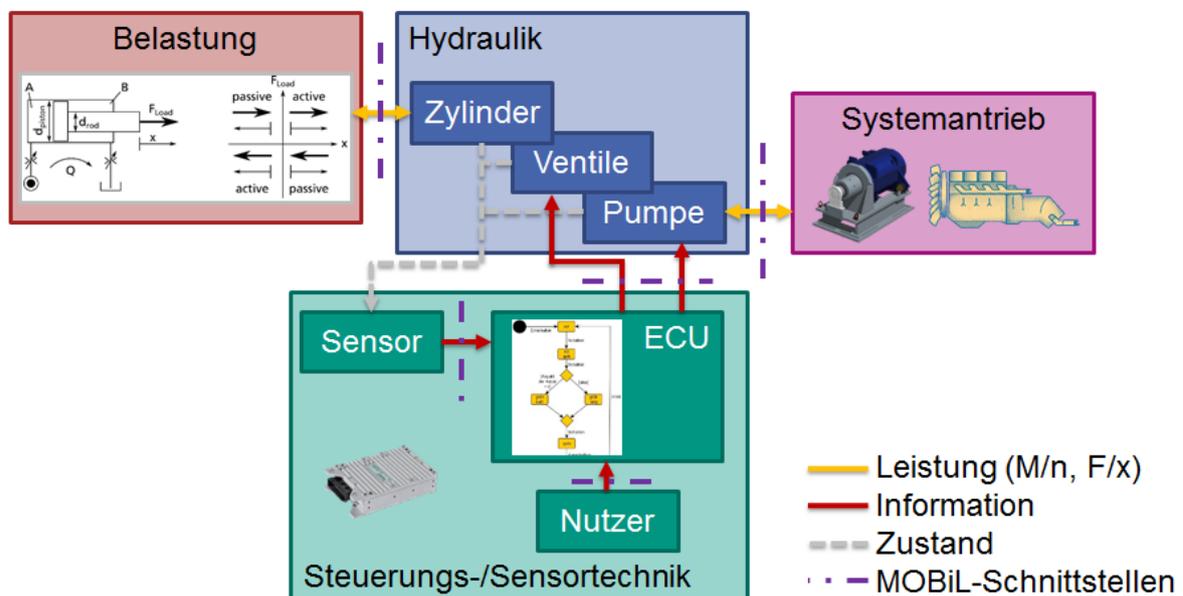


Bild 3.2: Allgemeiner Systemaufbau eines elektro-hydraulischen Systems mit geeigneten Schnittstellen für die MOBIL-Methode

3.2 Hydrauliksystem und zugehörige Betriebsmodi

Um verstehen zu können, welche Funktionen die Steuerung erfüllen muss, werden die anhand des Hydraulikaufbaus möglichen Betriebssituationen dargestellt.

Ziel der Steuerung ist es, belastungs- und bewegungsabhängig die HSVe und LVe energieeffizient und betriebssicher bzw. bedienerfreundlich einzustellen. Eine Bedienervorgabe verfolgt das Ziel die Verbrauchergeschwindigkeit einzustellen.

Nach [7] werden Verbraucher mit aktiven und passiven Lasten unterschiedlicher Amplitude beaufschlagt. Sind die äußere Last und die gewünschte Bewegungsrichtung des Zylinders gleichsinnig, so liegt ein *aktiver Lastfall* vor. Sind diese entgegengesetzt, so liegt ein *passiver Lastfall* vor, vgl. Abbildung 3.2. Im passiven Lastfall verrichtet das betrachtete Hydrauliksystem Arbeit an der Umgebung, beispielsweise durch Anheben eines Baumstamms. Im aktiven Lastfall verrichtet

die Umgebung Arbeit am betrachteten Hydrauliksystem, bspw. durch Senken eines Baumstamms. Die Energie der von außen wirkenden Last kann im aktiven Lastfall ggfs. rekuperiert bzw. regeneriert werden.

Diese Unterscheidung führt in dem betrachteten Hydrauliksystem steuerungstechnisch zu unterschiedlichen Betriebsmodi. Je nach Lastfall ist es die Aufgabe der Steuerungssoftware, Signale für die Ventile zu berechnen. Nach [6] und [9] können folgende Betriebsmodi auftreten:

- Hauptmodus (HM)
- Regenerations-Modus (RgM)
- Energieneutraler Modus (EM)
- Tank-Rekuperations-Modus (TRkM)
- Pumpen-Speicher-Modus (PSpM)

In diesem Beitrag stehen die Betriebsmodi HM und EM im Fokus. Befindet sich die Maschine im HM, so ist der betrachtete Zylinder im Zulauf mit der Pumpe und im Ablauf mit dem Tank verbunden. Im EM ist der Zylinder hingegen beidseitig mit dem Tank verbunden, was z.B. das Verfahren des Zylinders bei aktiven Lasten ermöglicht, ohne zusätzliche hydraulische Leistung aufzuwenden. Trotzdem muss in diesem Modus durch zusätzliche Maßnahmen sichergestellt werden, dass das System nicht kavitiert. Nähere Erläuterungen zu allen weiteren Betriebsmodi finden sich z.B. in [6, 7].

3.3 Die Electronical Control Unit (ECU) als zentrale Komponente

Um den Anforderungen des Projektes *EfHyFo⁺* gerecht zu werden, wird das mechatronische System mithilfe einer handelsüblichen ECU realisiert. Diese bietet sowohl digitale als auch analoge Ein- und Ausgänge sowie eine CAN-Bus-Schnittstelle zur Kommunikation.

Als Betriebsgrößen für die Kransteuerung stehen die durch Druckmessumformer ermittelten Drücke an den Verbraucheranschlüssen, dem Hydraulikspeicher und der Pumpe sowie die Bediener signale zur Verfügung. Aus Kostengründen und aufgrund des meist hohen Platzbedarfs wird die Steuerung so entwickelt, dass im finalen System auf Volumenstromsensoren verzichtet werden kann.

Die HSve sind positionsgeregelt und werden über den CAN-Bus angesteuert. Kennlinien für den Zusammenhang zwischen Ansteuersignal und Volumenstrom sind, so ein Fazit der Entwicklung, essentieller Bestandteil der Softwarearchitektur. Die restlichen Ventile sowie die Pumpe werden stromgesteuert.

4 Anwendung der MOBIL-Methode

Im Folgenden wird die Herangehensweise zur Entwicklung der Kransteuerung mithilfe der MOBIL-Methode dargestellt. Zunächst werden die Abstraktionsstufen beschrieben. Im Anschluss werden ausgewählte Untersuchungsgegenstände und Herausforderungen jeder Abstraktionsstufe aufgezeigt. Es folgt eine Erläuterung, in wie weit die Herausforderungen während des Projekts gelöst werden konnten.

4.1 Entwicklung der Kransteuerung in mehreren Stufen

Die nach [4] geforderten Teilschritte 1 und 2 können durch die Vorgabe idealisierter Zyklen und des Arbeitszyklus nach [10] als erfüllt angesehen werden. Die für Teilschritt 3 benötigten Informationen konnten [10] entnommen werden, da in dieser Arbeit ein bestehendes Kransystem einer Referenzmaschine vermessen wurde. Der Teilschritt 4 (MOBIL-Prüfumgebung generieren) wird mithilfe der vier Abstraktionsstufen:

- Simulation / Software-in-the-Loop (SiL)
- Hardware-in-the-Loop (HiL)
- Systemprüfstand
- Feldversuch

umgesetzt. Der Abbildung 4.1 kann entnommen werden, wie stark die Kriterien *Reproduzierbarkeit*, *Realitätsnähe* und *Wechselwirkung* zwischen den Teilsystemen erfüllt werden [1].

Als erste Prüfumgebung dient ein Simulationsmodell der Hydraulik, der Belastungen, des Antriebs und der Steuerung. Primäre Ziele sind das Erlangen von Systemverständnis und das Eruiere unterschiedlicher Ansätze für das neue Hydrauliksystem und die zugehörige Softwarearchitektur.

Als zweite Prüfumgebung wird ein HiL-Prüfstand, bestehend aus Simulations-PC und ECU, aufgebaut. Dabei wird die entwickelte Steuerungssoftware aus der ersten Prüfumgebung auf die ECU übertragen. Das Hydrauliksystem, die Belastungen und der Antrieb werden weiterhin durch die Simulationsmodelle abgebildet. Die ECU empfängt via CAN-Bus Zustandsdaten aus der Simulation (z.B. Druck und Volumenstrom,...), verwertet diese und sendet die errechneten Steuersignale wieder an die Simulation.

Die dritte Prüfumgebung stellt der Systemprüfstand dar. Auf diesem wird ein exemplarisches Hydrauliksystem mit mehreren Verbrauchern aufgebaut. Da die

Schnittstellen zur ECU durch die vorige Prüfumgebung klar definiert sind, ist eine Übernahme der Steuerung möglich. Idealerweise werden Antrieb und Last durch geeignete Vorrichtungen bereitgestellt, welche die Zyklusvorgaben aus der Simulation umsetzen können.

Stufe	Art des Versuchs	Simulation	Reproduzierbarkeit	Realitätsnähe	Wechselwirkung
(I)	Simulation (Software-in-the-Loop)				
(II)	Hardware-in-the-Loop				
(III)	Systemprüfstand				
(IV)	Fahrzeugprüfstand				
(V)	Feldversuch				
		Belastung	Hydraulik	Antrieb	Steuerung
		(I)	(I)	(I)	(I)
		(II)	(II)	(II)	(II)
		(III)	(III)	(III)	(III)
		(V)	(V)	(V)	(V)

Bild 4.1: Abstraktionsstufen der Prüfumgebung und Bewertung nach Reproduzierbarkeit, Realitätsnähe, Wechselwirkung; in Anlehnung an [1]

Eine abschließende Validierung der Software wird an einem Versuchsträger im Feldversuch durchgeführt.

4.2 Ergebnisdarstellung

Bereits mit Ergebnissen der **Simulation** ist es möglich, eine Aufwand/Nutzen-Abschätzung für die unterschiedlichen Betriebsmodi der neuen Kransteuerung durchzuführen. Der Aufwand wird durch die Anzahl zusätzlicher Komponenten und die Steuerungskomplexität durch die Implementierung der Betriebsmodi abgeschätzt. Der Nutzen wird anhand einer reduzierten Antriebsleistung sowie der zwischengespeicherten Energie am Ende eines Testzyklus definiert.

Wie bereits in [6] dargestellt, sind für den Arbeitszyklus nach [10] die Modi HM und EM am wirtschaftlichsten. Diese Betriebsmodi sind rein steuerungstechnisch umzusetzen. Mit dem EM ist ein hohes Energieeinsparpotential von bis zu 18 % bezogen auf die ursprüngliche Pumpenenergie von $E_{Hydr} = 353 \text{ kJ}$ möglich. Durch Umsetzung des TRkM konnten zusätzlich ca. 8 % der geleisteten Pumpen-

energie zwischenspeichert werden. In Folge dessen steigen die Anzahl an Komponenten und der Aufwand in der Softwareentwicklung. Der RgM konnte schon zu dem Zeitpunkt des o.g. Beitrags für eine Umsetzung ausgeschlossen werden.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse in [6] hat ergeben, dass in einem nicht angepassten Hydrauliksystem während des EM Kavitation auftritt. Entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung von Kavitation werden im o.g. Beitrag aufgezeigt. Allerdings wurden die Maßnahmen nicht näher untersucht. Hierfür eignet sich der MOBiL-Ansatz, indem zuerst mittels Simulation und anschließend an Systemprüfständen die Maßnahmen untersucht werden.

Zusätzlich ist es in der Simulation möglich, das Kommunikationsprotokoll für die weitere Entwicklung zu definieren und zu untersuchen. Durch Verwendung eines virtuellen CAN-Bus entstehen eindeutige Schnittstellen zu Sensoren, Aktoren und Bedienerschnittstellen. Damit konzentriert sich ein Wechsel der Abstraktionsstufe lediglich auf die Anpassung der Nachrichteninhalte und deren Anzahl.

Zum einen dient der **HiL-Prüfstand** zum Aufbau der Softwarearchitektur und als Vorbereitung für den Systemprüfstand. Mit der Übersetzung des Softwareentwurfs aus der Simulation in ECU-Quellcode reduziert sich der spätere Programmieraufwand auf das Ersetzen von Kennfeldern und Parametern sowie das Optimieren der Software und Anpassen der Schnittstellen.

Zum anderen kann durch HiL gezeigt werden, dass der entwickelte Softwareentwurf auf der ECU mit einer Rechenzeit von $t_R < 100$ ms realisiert werden kann und damit unterhalb der Reaktionsgrundzeit des Menschen agiert [11]. Daraus leitet sich ab, dass die im Projekt verwendete Hardware geeignet ist. Andernfalls hätte der Softwareentwurf nochmals überarbeitet oder auf eine leistungsstärkere Hardware zurückgegriffen werden müssen.

Hauptziel des **Systemprüfstands** ist es, Systemeffekte wie Reibung oder Schaltzeiten zu berücksichtigen, die in einer Simulation i.d.R. nur mit hohem Aufwand valide nachgebildet werden können. [12]

Der MOBiL-Teilschritt 4 fordert das Erstellen von Antriebs- und Belastungseinheiten für den Systemprüfstand. Im Projekt *EfHyFo*⁺ wurde ein drehzahl geregelter Elektromotor als Antrieb gewählt. Die auf das Hydrauliksystem wirkenden Belastungen wurden durch eine Belastungseinheit für hydraulische Linearaktuatoren hervorgerufen [13]. Abbildung 4.2 zeigt den Vergleich zwischen Sollwertvorgaben und den mittels Kraftmessdose gemessenen Belastungen an einem Prüfzylinder.

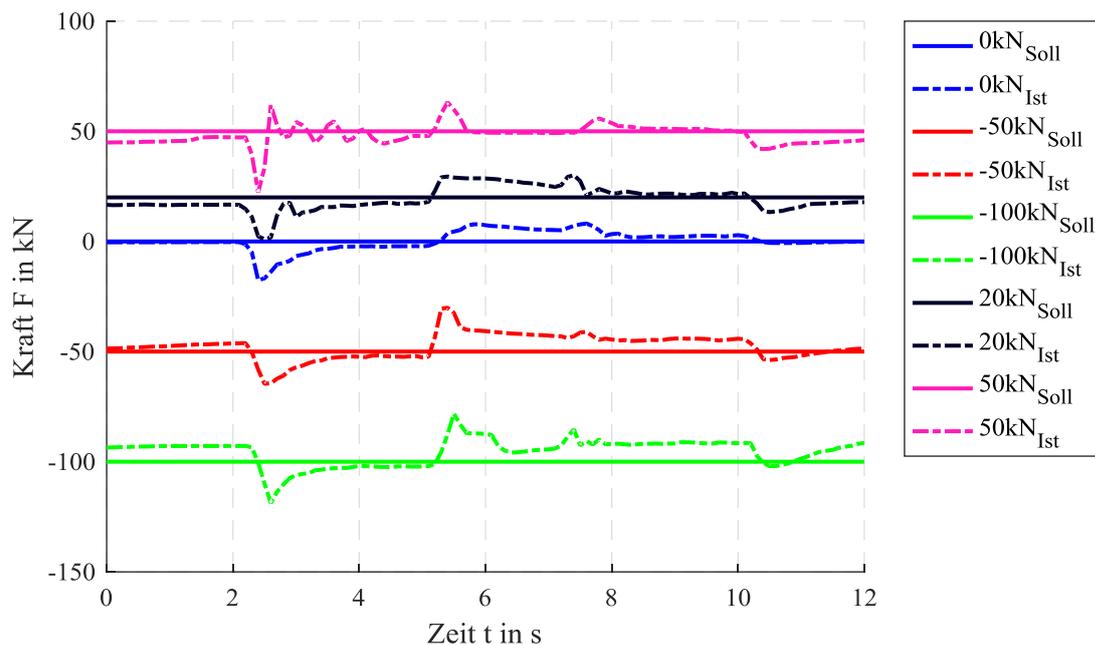


Bild 4.2: Messergebnisse der Belastungseinheit für stationäre Lastvorgaben während eines Ein-/Ausfahrzyklus des Prüfzylinders auf dem Systemprüfstand

Die Analyse hat ergeben, dass es während einer dynamischen Bewegung des Prüfzylinders zu Abweichungen in der Sollkraft von bis zu 25 kN kommt, die erst nach ca. 2 Sekunden ausgeglichen wurde. Dies ist auf die unzureichende Dynamik der Belastungseinheit zurückzuführen. Eine Nachahmung komplexerer Belastungen konnte somit am Systemprüfstand nicht nachgebildet werden. Die entwickelte Belastungseinheit konnte in diesem Fall nicht den Ansprüchen der MOBIL-Methode gerecht werden.

Eine finale Eruiierung der Kransteuerung wurde unmittelbar an einem Versuchsträger durchgeführt. Dessen Umsetzung konnte aufgrund der umfangreichen Vorkenntnisse auf wenige Tage reduziert werden, siehe z.B. [14, 15].

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung einer Kransteuerung für ein Flow Matching-System mit getrennten Steuerkanten und Hybridsystem vorgestellt, die unter Verwendung der MOBIL-Methode durchgeführt wurde.

Die entwicklungsbegleitend durchgeführte Aufwand/Nutzen-Abschätzung auf Basis einer Simulation hat aufgezeigt, dass die Betriebsmodi HM und EM wirtschaftlich am erfolgreichsten umgesetzt werden können.

Im Rahmen des Projektes hat sich weiterhin gezeigt, dass eine Vorentwicklung mittels simulationsgestützter Systeme den Programmieraufwand am Systemprüfstand und am Versuchsträger verringern kann. Dies ist primär auf die eindeutige Schnittstellendefinition zwischen der ECU und den restlichen Teilsystemen in den unterschiedlichen Abstraktionsstufen zurückzuführen.

Durch die Anwendung der MOBiL-Methode auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen konnte das Potential der neuen Kransteuerung im Kontext der Gesamtmaschine und unter realen Belastungen ermittelt werden, ohne dass aufwändige Versuche mit einem Gesamtprototyp durchgeführt werden mussten.

Mit der Durchführung von MOBiL entstehen durch unterschiedliche Abstraktionsstufen spezifische Prüfumgebungen, die es ermöglichen, gezielte Fragestellungen schrittweise zu beantworten. Gewonnene Erkenntnisse können auf diese Weise in weiteren Entwicklungsschleifen berücksichtigt werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Entwicklung mehrerer Prüfumgebungen einen hohen Aufwand erfordern kann. Bei erfolgreicher Umsetzung bieten diese allerdings individuelle und stetig wiederverwendbare Testplattformen für eine systemunabhängige Steuerungsentwicklung, die an nachfolgende Projekte adaptiert werden können.

6 Danksagung

Das für diese Veröffentlichung zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde gefördert durch die *Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)*. Ein weiterer Dank gebührt an dieser Stelle dem Projektpartner *Weiss Mobiltechnik GmbH*, welcher mit der Bereitstellung der Ergebnisse seinen Beitrag zu dieser Veröffentlichung geleistet hat. Die Autoren danken der Fa. *FLUIDON* für die Bereitstellung ihrer Software *DSHplus* zu Demonstrationszwecken und zur Durchführung der Simulationen.

7 Literatur

- [1] Brinkschulte, L.; Engelmann, D.; Siebert, J.; Geimer, M.: MOBiL – Eine auf mobile Arbeitsmaschinen optimierte Prüfmethode. In: *Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2017, S. 173–194.
- [2] Findeisen, D.; Helduser, S.: *Ölhydraulik – Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015.

- [3] Geimer, M.; Pohlandt, C.: Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2014.
- [4] Pohlandt, C.: Intelligentes Gesamtmaschinenmanagement für elektrische Antriebssysteme. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2018.
- [5] Muggeo, C.; Eigner, M.; Koch, W.: Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme – Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017.
- [6] Weiß, B.; Wydra, M.; Geimer, M.: Effizienterer Einsatz von Forstmaschinen durch die Verwendung einer elektro-hydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit einer unabhängigen Zu-/ Ablaufsteuerung. In: Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2017, S. 31–50
- [7] Wydra, M.; Geimer, M.; Weiss, B.: An Approach to Combine an Independent Metering System with an Electro-Hydraulic Flow-on-Demand Hybrid-System. In: Proceedings of 15:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 7-9, 2017, Linköping, Sweden. Linköping: Linköping University Electronic Press 2017, S. 161–170.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004-06-00.
- [9] Axin, M.: Fluid power systems for mobile applications – With a focus on energy efficiency and dynamic characteristics. Linköping: Linköping University Department of Management and Engineering 2013.
- [10] Scherer, M.: Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen – Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2015.
- [11] Burg, H.; Moser, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion – Unfallaufnahme Fahrdynamik Simulation. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017.
- [12] Zimmer, M.: Durchgängiger Simulationsprozess zur Effizienzsteigerung und Reifegraderhöhung von Konzeptbewertungen in der Frühen Phase der Produktentstehung. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- [13] Siebert, J.; Wydra, M.; Heber, S.; Geimer, M.: Development and implementation of a control concept for a hydraulic load unit. In: Fluid Power Networks. Aachen: Mainz, G 2018, S. 130–143.
- [14] Weiß, B.: eBSS – elektrohydraulische Bedarfstromsteuerung. Oberwolfach 2018-04-12.
- [15] Wydra, M.: eBSS+ – Die elektro-hydraulische Bedarfsstromsteuerung mit getrennten Steuerkanten. Oberwolfach 2018-04-12.

