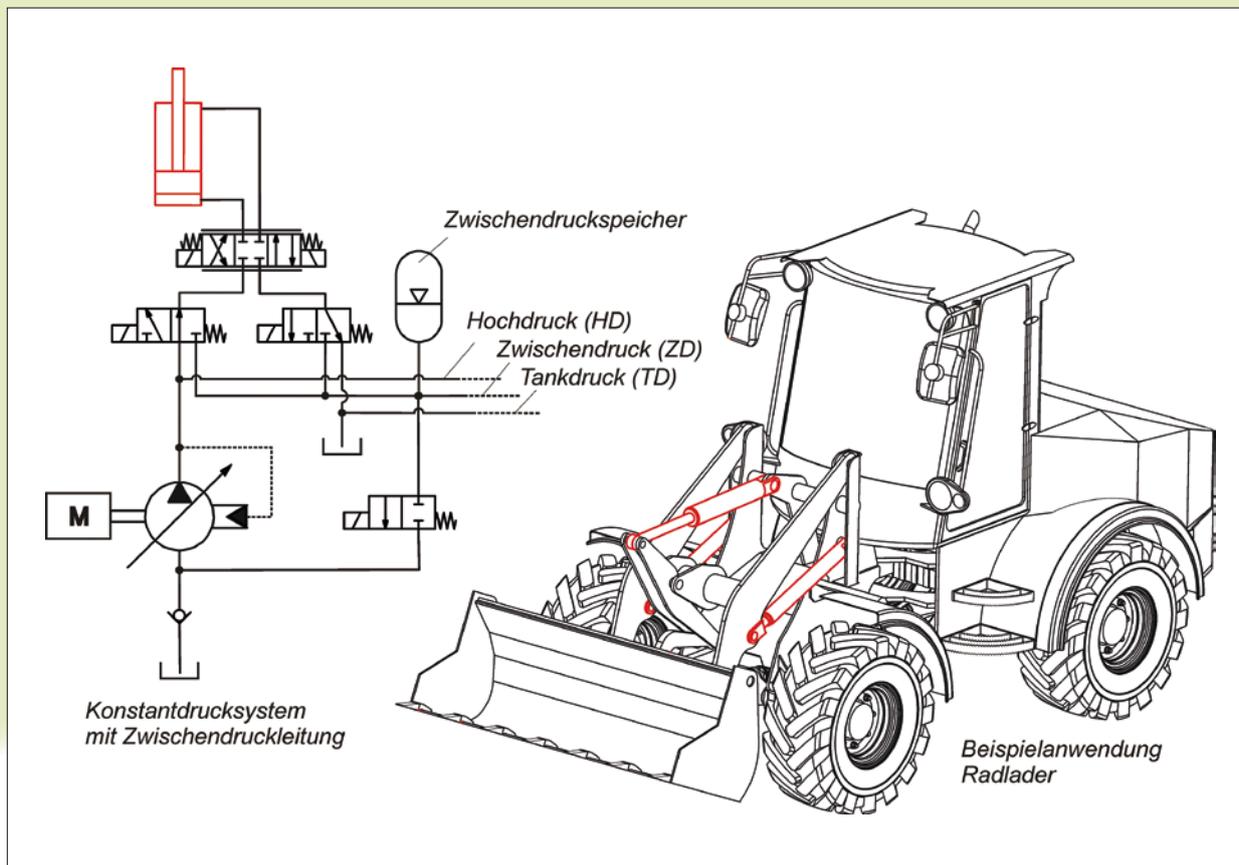


Hybrider hydraulischer Antriebsstrang

Energieeffizienter Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen



Peter Dengler, Marcus Geimer

Konstantdrucksysteme mit sekundärregulierten Hydraulikmotoren im 4-Quadrantenbetrieb ermöglichen eine effiziente Leistungsübertragung und Rekuperation von Bremsenergie. Auch Linearaktuatoren können durch die Schaffung diskreter Druckniveaus und einer geeigneten Steuerung in einem Konstantdrucknetz effizient betrieben werden, wenn eine Zwischendruckleitung verwendet wird. Im vorliegenden Beitrag wird am Beispiel eines Radladers gezeigt, wie eine Steuerstrategie aus einer numerischen Analyse hergeleitet und in eine Maschinensteuerung umgesetzt werden kann.

Einleitung

Hydraulikmotoren mit Sekundärregelung können ohne systembedingte Verluste in Konstantdrucksystemen betrieben werden, da sie ihr Schluckvolumen stets an den gegenwärtigen Leistungsbedarf anpassen können und keine leistungssteuernden Ventile benötigen [Haa89]. Sekundärregulierte Motoren im 4-Quadrantenbetrieb können zudem durch einen Wechsel in den Pumpenbetrieb Bremsenergie rekuperieren, welche in einem Hydrospeicher zwischengespeichert oder direkt von anderen Verbrauchern genutzt werden kann. Beide Eigenschaften, hoher Systemwirkungsgrad und die Rekuperationsmöglichkeit potentieller oder kinetischer Energie, sind wichtige Eigenschaften hybrider Antriebsstränge und machen Konstantdrucksysteme zu geeigneten Systemen für hybride hydraulische Antriebsstränge mobiler Arbeitsmaschinen.

Autoren: Dipl.-Ing. Peter Dengler ist akademischer Mitarbeiter und Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer ist Leiter des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Anders als Hydromotoren lassen sich Hydraulikzylinder heute nicht mit Sekundärregelung betreiben, da sie ihre Kolbenfläche nicht an den aktuellen Leistungsbedarf anpassen können. Im Teillastbetrieb muss der Druck abgedrosselt werden, was zu hohen Verlusten führt. Existierende Lösungskonzepte für dieses Problem, wie z. B. der hydraulische Transformator [Rot98] oder der „Sekundärregelte Zylinder“ [Lin09], welcher eine zumindest stufenweise Anpassung der Kolbenfläche ermöglicht, sind mit erheblichem Aufwand verbunden und erfordern Komponenten, welche serienreif nicht am Markt verfügbar sind. Eine alternative Möglichkeit, Hydraulikzylinder in ein Konstantdrucksystem einzugliedern, eröffnet sich durch die Verwendung einer weiteren Druckleitung, welche mit einem Hydraulikspeicher verbunden ist. Dieser ist auf einen Druck vorgespannt, welcher zwischen dem Hochdruck und dem Tankdruck liegt. Durch diese Zwischendruckleitung können verschiedene diskrete Druckpotenziale erzeugt werden, welche je nach gegenwärtig anliegender Last gewählt werden, um die Drosselverluste so gering wie möglich zu halten. Dieses in [Den11] und [Den12] beschriebene System ist in **Bild 1** dargestellt und benötigt neben der erwähnten Zwischendruckleitung mit Speicher zusätzlich zwei 3/2-Schaltventile und ein Proportionalventil pro Verbraucher. Drucksensoren in beiden Kammern des Zylinders sowie ein Wegesensor ermöglichen eine Bestimmung der

Last und eine lastunabhängige Geschwindigkeitsregelung des Zylinders. Über die Schaltventile kann zwischen Schaltzuständen mit folgenden Druckpotenzialen gewählt werden:

- Hochdruck zu Zwischendruck (HDZD),
- Zwischendruck zu Tankdruck (ZDTD),
- Zwischendruck zu Zwischendruck (ZDZD, nur bei geladenem Speicher),
- Hochdruck zu Tankdruck (HDTD).

Zusätzlich ist ein weiteres Schaltventil integriert, welches ein Zuschalten des Zwischendruckspeichers an die Saugseite der Pumpe ermöglicht, was aufgrund der niedrigeren anliegenden Druckdifferenz einen geringeren Energiebedarf der Pumpe zur Folge hat. Damit ergeben sich zwei weitere Schaltstufen:

- Hochdruck zu Zwischendruck mit Zuschalten (HDZD(2)),
- Hochdruck zu Tankdruck mit Zuschalten (HDTD(2)).

Dieses System ist einfach im Aufbau und mit gewöhnlichen, am Markt erhältlichen Komponenten realisierbar. Allerdings erfordert es eine intelligente Steuerung, um es effizient betreiben zu können. Am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde dieses System am Beispiel eines Radladers entwickelt und aufgebaut (**Bild 2**).

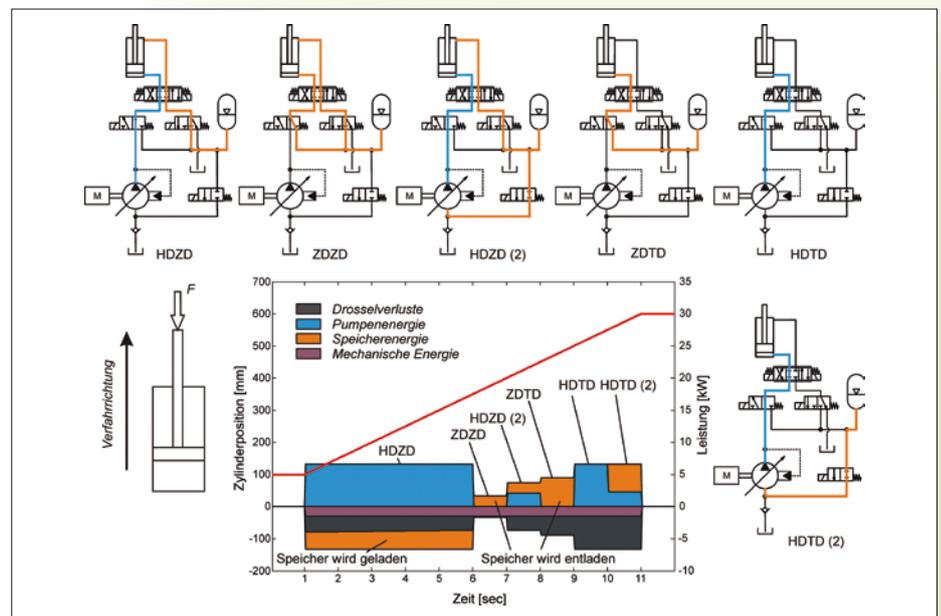
In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie eine auf die Anwendung „Radlader“ abgestimmte Steuerstrategie hergeleitet und in der Steuerung umgesetzt wurde.

Offline-Bestimmung optimaler Schaltsequenzen

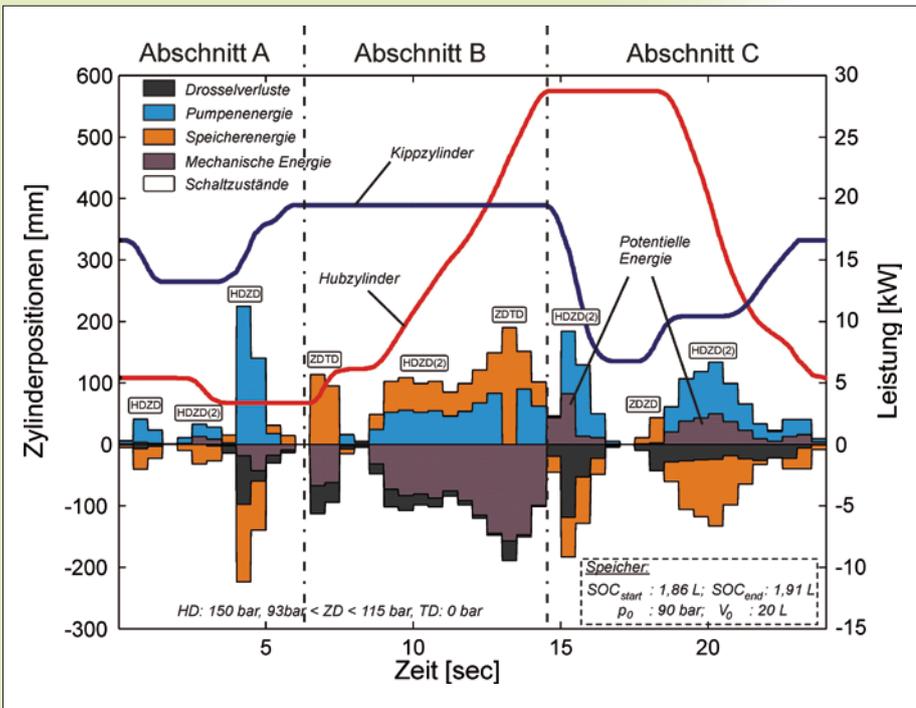
Die verfügbaren Schaltzustände eines Konstantdrucksystems mit Zwischendruckleitung (KonZwi-System) unterscheiden sich neben den Druckpotenzialen auch in der Art, wie sie den Speicher verwenden. Während es – einen ausfahrenden Differentialzylinder angenommen – in den Stufen ZDZD, ZDTD sowie HDTD(2) und HDZD(2) zu einer Entladung des Speichers kommt, wird in der Stufe HDZD der Speicher geladen. Mit einer Änderung des Ladezustandes des Speichers ändert sich jedoch auch sein Druck, was eine direkte Auswirkung auf die Druckpotenziale der einzelnen Stufen hat. Diesen Effekt kann eine Steuerung nutzen, indem sie Be- und Entladevorgänge so steuert, dass das Druckpotenzial stets optimal an die Last angepasst ist und potenzielle Energien, sofern vorhanden, möglichst rekuperiert werden können. Anders als bei Load-Sensing-Systemen, in welchen sich stets ein konstanter Regeldruckverlust zwischen Systemdruck und höchstem Lastdruck einstellt, sind die Drosselverluste in einem KonZwi-System abhängig vom Druckpotenzial der gewählten Stufe, so dass die Steuerung eine Sequenz von Schaltzuständen finden muss, welche einerseits Drosselverluste minimiert und andererseits die Rekuperation potenzieller Energie maximiert. In einem ersten Schritt wird an Hand eines gemessenen Lastprofils zunächst offline das Einsparpotenzial des Systems abgeschätzt, indem eine optimale Se-



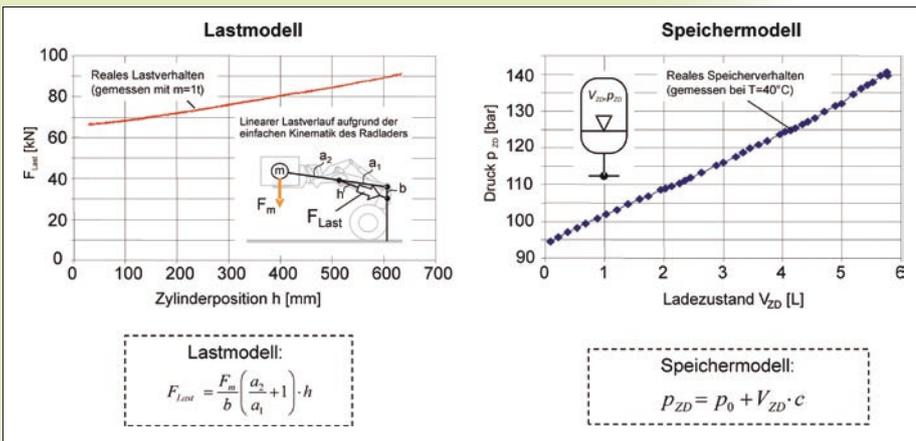
2: Versuchsträger am Mobima: Radlader Paus RL 655



3: Schaltsequenz in einem Beispiel-Lastprofil



4: Numerisch berechnete optimale Schaltsequenz für einen Y-Zyklus



5: Modellierung der Last und des Zwischendruckspeichers

quenz von Schaltzuständen bestimmt wird. Aufbauend auf dieser optimalen Sequenz kann dann mit Hilfe von Vereinfachungen, Modellen und Regeln eine Steuerstrategie entwickelt werden, welche in einen Steueralgorithmus auf dem Steuergerät der Maschine umgesetzt werden kann. Bild 3 zeigt zunächst ein einfaches Beispiel eines Lastprofils (konstante Bewegung eines konstant belasteten Differentialzylinders) mit einer Sequenz unterschiedlicher Schaltzustände, um die Bewegung durchzuführen. Je nach Schaltzustand entstehen hierbei unterschiedliche Energieanteile, welche in Eingangs- oder Ausgangsenergien aufgeteilt werden können. Energieanteile oberhalb der x-Achse sind hier als Eingangsenergien dargestellt, d. h. es handelt sich um Energien, die in das System eingeleitet werden. Diese teilen sich auf in Ausgangsenergien (unterhalb der x-Achse), also Energien, die entweder in mechanische Energie, in po-

tenzielle Energie durch Beladen des Zwischendruckspeichers oder in Verlustenergie in Form von Drosselverlusten umgesetzt werden. Während die benötigte mechanische Energie im gezeigten Beispiel konstant ist, variieren die Anteile an Pumpen-, Speicher- und Verlustenergie je nach Schaltstufe sehr stark. So wird aus der Speicherenergie, welche zu Beginn der Bewegung Ausgangsenergie war (Speicher wird geladen), nach dem ersten Umschaltvorgang Eingangsenergie, da nun der Speicher entladen wird. Ähnliches ist auch mit der mechanischen Energie möglich, wenn ziehende Lasten potenzielle Energien entstehen lassen, welche durch den Speicher rekuperiert werden können. Entscheidend für die Bestimmung des Einsparpotenzials ist jedoch ausschließlich die Pumpenenergie, da diese vom Verbrennungsmotor erzeugt werden muss und daher als einzige Größe den Kraftstoffverbrauch beeinflusst.

Während sich beim Beispiel in Bild 3 noch recht einfach bestimmen ließe, welche Schaltsequenz zu einem minimalen Bedarf an Pumpenenergie führt, ist dies bei komplexeren Bewegungen mit mehreren Verbrauchern nicht ohne weiteres möglich. Hierzu müssen Methoden wie z. B. die multikriterielle Optimierung angewandt werden, um für ein gegebenes Lastprofil eine optimale Schaltsequenz numerisch bestimmen zu können.

Es wird angenommen, dass zum Durchlaufen des Profils n Schaltentscheidungen getroffen werden müssen. Für jede Schaltentscheidung i , bei der Öl aus der Hochdruckleitung entnommen wird, wird eine Pumpenenergie $\Delta E_{Pumpe,i}$ nötig, um dieses Öl nachzufördern. Je öfter dieser Fall im Laufe eines Zyklus auftritt, desto höher wird der Gesamtenergiebedarf E_{Pumpe} und letztlich der Kraftstoffbedarf des Systems (Gleichung 1).

$$E_{Pumpe} = \sum_i^n \Delta E_{Pumpe,i} \quad (Gl.1)$$

Um eine energieoptimale Schaltsequenz zu erhalten, muss man also die Anzahl der Schaltentscheidungen, welche zu einer Ölentnahme aus der Hochdruckleitung führen, so gering wie möglich halten, so dass der minimale Energiebedarf angegeben werden kann als:

$$E_{Pumpe,min} = \min \left\{ \sum_i^n \Delta E_{Pumpe,i} \right\} \quad (Gl.2)$$

Um diesen zu erreichen, kann die Pumpenenergie durch Speicherenergie ersetzt werden, wenn der Zylinder z. B. in der Stufe ZD(2) verfahren wird. Hierzu muss der Speicher jedoch vorher gefüllt werden, wie z. B. durch das Absenken schwerer Lasten oder über die Schaltstufe HDZD, wobei bei dieser Art der Beladung die Drosselverluste so gering wie möglich gehalten werden müssen. Da Pumpenenergie durch Speicherenergie ersetzt werden kann, sind beide Energiearten energetisch äquivalent und es kann für einen gegebenen Zyklus mit Hilfe der multikriteriellen Optimierung eine optimale Schaltsequenz bestimmt werden, welche für die Kriterien „Speicherenergie“ und „Pumpenenergie“ gleichermaßen optimiert ist. Bild 4 zeigt eine verbrauchsoptimale Schaltsequenz, welche für einen typischen Y-Grabzyklus eines Radladers nach [Koh06] berechnet wurde, der für das Projekt nachgefahren und vermessen wurde. Der Zyklus lässt sich grob in drei Abschnitte einteilen:

- Abschnitt A: Einstechen ins Haufwerk und Aufnahme des Schüttguts,

- Abschnitt B: Anfahren zur Abladestelle und Anheben der Schaufel,
- Abschnitt C: Auskippen und Absenken der Schaufel und Rückfahrt zum Haufwerk.

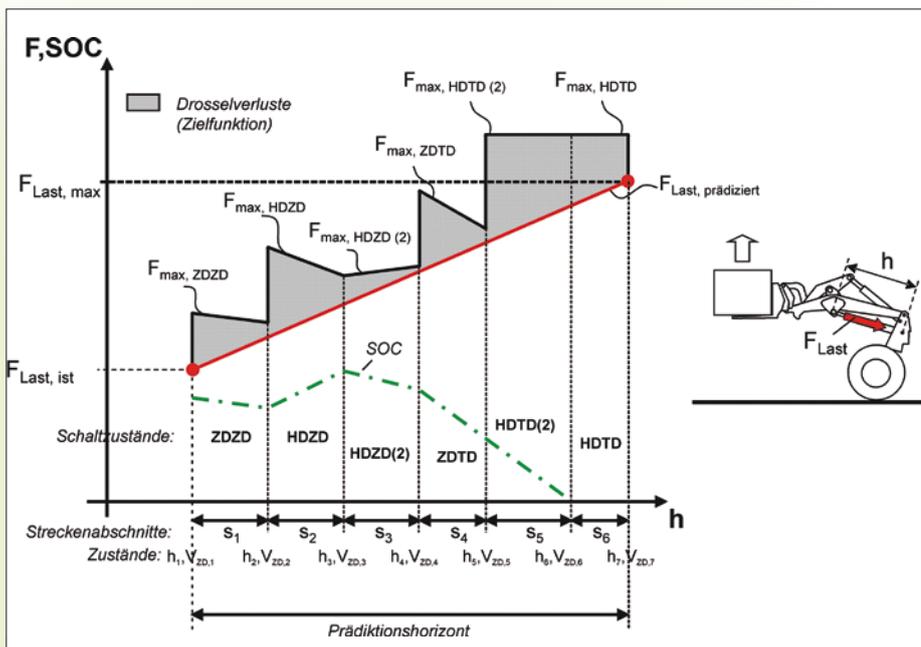
Die mit Hilfe der multikriteriellen Optimierung gefundene optimale Schaltsequenz ermöglichte eine erste Potenzialabschätzung dieses Systems und zeigte eine Energieeinsparung von 20 % im Vergleich zu einem konventionellen Load-Sensing-System [Den12].

Ableitung einer Steuerstrategie und Umsetzung

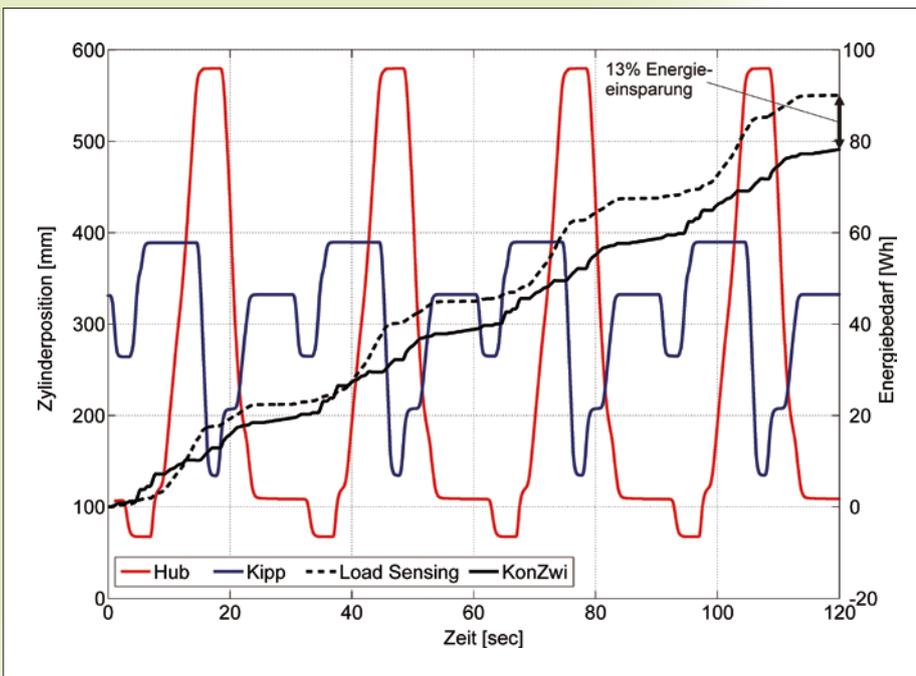
Die in Bild 4 gezeigte Schaltsequenz wurde an Hand bestehender Messdaten numerisch berechnet und kann nun dazu verwendet werden, Regeln und Vereinfachungen abzuleiten, um einen Steueralgorithmus zu entwerfen, welcher im Betrieb die optimale Schaltentscheidung trifft. Vereinfachungen sind hierbei notwendig, da aufwendige Rechenoperationen im Maschinenbetrieb nicht realisierbar sind, ohne unzulässige Verzögerungen zu riskieren. Abschnitt A (Einstecken ins Haufwerk und Aufnahme des Schüttguts) ist gekennzeichnet durch kurze Lastsprünge und relativ kurze Zylinderbewegungen. Die Steuerung muss in diesem Bewegungsabschnitt die Schaltstufe wählen, die ausreichend hohe Kräfte erzeugen kann, um die Schaufel anzuheben. Eine Steuerstrategie im Sinne der Reduzierung der Verlustenergie nach Gleichung 2 ist aufgrund des spontanen Charakters der auftretenden Belastungen in diesem Abschnitt nicht anwendbar. In Ab-

schnitt C sieht man, dass potenzielle Energie beim Auskippen und Absenken der Schaufel freigesetzt wird. Somit kann als einfache Strategie für diesen Fall definiert werden, dass der Speicher nach Ausfahren des Zylinders möglichst entladen sein muss, um potenzielle Energie effektiv rekuperieren zu können.

Im Abschnitt B ist erkennbar, dass am meisten Energie durch den Hubzylinder beim Heben der Schaufel vor der Abladestelle umgesetzt wird. Hier ist eine optimale Schaltsequenz zur Minimierung der Drosselverluste besonders wichtig, da dies aufgrund des hohen Energieumsatzes eine hohe Auswirkung auf die globale Effizienz des Systems hat. Für gute Ergebnisse hat sich die modellprädiktive Regelung als geeignet erwiesen [Dit04]. Dieses Verfahren, bei dem über einen Prädiktionshorizont das zukünftige Systemverhalten mit Hilfe aktuell gemessener Zustandsgrößen optimiert wird, ist bereits seit Jahrzehnten in der Verfahrenstechnik in der Regelung von chemischen Großanlagen im Einsatz [Qin97]. Dank der Fortschritte in der Prozessortechnologie kann dieses Verfahren nun auch auf Systeme übertragen werden, welche wesentlich schnelleren Zustandsänderungen unterzogen sind, wie z. B. beim Radlader. Hierzu wird der Hub in mm als Prädiktionshorizont verwendet. Zusätzlich wird ein Modell der Last und ein Modell des Speichers hinzugezogen, um ausgehend von der aktuellen Position und dem aktuellen Ladezustand (State of Charge, SOC) die zukünftigen Schaltentscheidungen berechnen zu können.



6: Optimierte Streckenlängen der einzelnen Schaltstufen



7: Simulierte Energieersparnis mit optimaler Steuerstrategie

Durch die einfache Kinematik des Radladers kann die Lastentwicklung als lineare Funktion angegeben werden. Bei Kenntnis der Last und der aktuellen Position des Hubzylinders kann das zukünftige Lastverhalten sehr schnell und präzise vorhergesagt werden. Ebenso kann der Speicherdruck in Abhängigkeit vom Ladezustand im interessierenden Bereich durch eine lineare Funktion approximiert werden (**Bild 5**).

Als weitere Vereinfachungsmaßnahme wurde die Reihenfolge der Schaltstufen nach aufsteigendem Druckpotenzial festgelegt. Der Steuerungsalgorithmus berechnet sukzessive für jede Schaltstufe, wie lange sie aktiv sein muss, bevor in die nächst höhere Stufe geschaltet werden kann. Die Verweildauer bzw. Streckenlänge jeder Schaltstufe ist als analytische Funktion hinterlegt, welche unter Verwendung aktueller Messdaten die Streckenlängen in mm ausgibt. Die Summe aller Strecken der einzelnen Schaltstufen ergibt die Restlänge der Bewegung, also den Prädiktionshorizont. Damit die Zylinderbewegung möglichst verlustfrei gestaltet werden kann, wird der Drosselverlust am Proportionalventil als Zielfunktion verwendet. Die einzelnen Streckenfunktionen werden bestimmt, indem ausgehend vom letzten Abschnitt rekursiv die optimalen Streckenlängen für jede Schaltstufe berechnet und über die gemeinsamen Zustandsgrößen (Ladezustand und Zylinderposition) miteinander verkettet werden. Durch diese Verkettung der lokalen Minima wird erreicht, dass sich über den gesamten Prädiktionshorizont für die Zielfunktion ein globales Minimum einstellt (Prinzip von Bellman, [Sni11]).

Die auf diese Weise bestimmten Streckenfunktionen werden in der Steuerung hinterlegt und bei jedem Programmdurch-

lauf mit den aktuellen Messwerten des Ladezustandes, der Last und der Zylinderposition neu berechnet. Damit kann das System jederzeit auf Störungen wie z. B. Abweichungen von der prädierten Lastentwicklung reagieren. Gleichzeitig ist das System sehr stabil, weil keine zeitliche Abhängigkeit zwischen Systemzuständen und Lastprädiktion besteht, sondern eine rein geometrische. Dadurch beeinflusst auch eine Unterbrechung der Hubbewegung die optimale Schaltsequenz nicht. **Bild 6** zeigt beispielhaft, wie die Steuerung ausgehend von den Ausgangszuständen für die aktuelle Hubposition h_i , der aktuell anliegenden Last $F_{Last, ist}$ und dem aktuellen Ladezustand (SOC) des Zwischendruckspeichers $V_{ZD, 1}$ die optimalen Wegstrecken s_1 bis s_6 für die einzelnen Schaltzustände berechnet.

Der so entwickelte Steueralgorithmus wurde auf einem mobilen Steuergerät programmiert und zunächst mit einem Simulationsmodell des Systems gekoppelt (Software-in-the-Loop) [Dom11]. Dieses Simulationsmodell simuliert sowohl die Hydraulik als auch die Kinematik des Radladers und wurde durch Messdaten validiert. Durch die Ankopplung des realen Steuerungsalgorithmus kann das Systemverhalten direkt beobachtet und die Steuerstrategie optimiert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen einen verringerten Energiebedarf von 13 % des neuen Systems im Vergleich zum Load-Sensing-System (**Bild 7**).

Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde eine Methode vorgestellt, wie ein Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung am Beispiel eines

Radladers gesteuert werden kann. Dabei wurde von realen Messdaten zunächst eine Offline-Optimierung durchgeführt, um die optimale Schaltsequenz und somit das theoretische Energieeinsparungspotenzial von 20 % zu bestimmen. Ausgehend vom Ergebnis dieser Optimierung wurde durch Vereinfachungen und Modellierung der Lasten und des Speicherverhaltens eine modellprädiktive Regelung entwickelt. Diese ist in der Lage, im Betrieb eine optimale Schaltsequenz für den Hubzylinder zu berechnen. Simulationsergebnisse haben eine Energieeinsparung von 13 % im Vergleich zum Load-Sensing gezeigt. Versuchsfahrten mit einem Demonstrator sind geplant, um die Auswirkung der Energieeinsparung auf den Kraftstoffbedarf zu untersuchen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde in Kooperation mit den Unternehmen ARGO-HYTOS GmbH, Fluidon GmbH und Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH bearbeitet. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert und vom Projektträger in der Deutschen Luft- und Raumfahrt (DLR) begleitet. Die Autoren bedanken sich beim BMBF und dem Projektträger in der DLR für die Unterstützung sowie bei den beteiligten Unternehmen für die gute Zusammenarbeit.

Literaturhinweise

- [Haa89] Haas, H.-J.: Sekundärgeregelte hydrostatische Antriebe im Drehzahl- und Drehwinkelregelkreis, Dissertation, RWTH Aachen, 1989
- [Rot98] Rothhäuser, S.; Achten, P.: Ein neuer alter Bekannter – Der Hydrotransformator, O+P Ölhydraulik und Pneumatik Heft 6, 1998
- [Lin09] Linjama et. al.: Secondary Controlled Multi Chamber Cylinder, 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping, 2009
- [Den11] Dengler, P., Geimer, M.: Zwischen den Drücken lesen – Effizienzsteigerung durch ein Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung, O+P Ölhydraulik und Pneumatik Heft 1-2, 2011
- [Den12] Dengler, P. et. al.: Efficiency Improvement of a Constant Pressure System Using an Intermediate Pressure Line, 8th International Fluid Power Conference, Dresden, 2012
- [Koh06] Kohmäscher, T., Jähne, H., Deiters, H.: Moderne voll- und teilhydrostatische Fahrtriebe – Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzepenten mobiler Arbeitsmaschinen, O+P Ölhydraulik und Pneumatik Heft 5, 2006
- [Dit04] Dittmar R., Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung – Eine Einführung für Ingenieure, Oldenbourg Verlag, 2004
- [Qin97] Qin, S. J., Badgwell, T. A.: An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology, AIChE Symposium Series 93 (316), S. 232-256, 1997
- [Sni11] Sniedovich, M.: Dynamic Programming: Foundations and Principles, CRC Press, 2011
- [Dom11] von Dombrowski R., Dengler P.: KonZwi – Effizienzsteigerung durch eine Zwischendruckleitung, SIMPEP – Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess, Veitshöchheim, Germany, 2011