



Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess 29./30. September 2011 Veitshöchheim

KonZwi – Effizienzsteigerung eines Konstantdrucksystems durch eine Zwischenleitung

Vortragender

von Dombrowski, René
FLUIDON GmbH
Jülicher Straße 338a
52070 Aachen



Weitere Autoren

Dengler, Peter
Karlsruher Institut für Technologie

Baum, Heiko
FLUIDON GmbH

Einleitung

Die Entwicklung energieeffizienter hydraulischer Systeme stellt gerade im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen aufgrund immer schärfer werdender Abgasgesetze und der Forderung nach immer geringer werdenden Betriebskosten hohe Anforderungen an die am Entwicklungsprozess beteiligten Ingenieure. Für den hydraulischen Antrieb von Arbeitssystemen mobiler Arbeitsmaschinen werden derzeit Konstantstromsysteme, Konstantdrucksysteme oder Load-Sensing Systeme (LS-Systeme) eingesetzt. LS-Systeme gelten dabei aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit an den geforderten Bedarfsdruck und -volumenstrom als besonders effizient.

Bild 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau gängiger Antriebskonzepte und die dazugehörigen Leitungsbilanzen bei Betrieb zweier Verbraucher. Die hydraulische Leistung, welche von der Pumpe aufgebracht werden muss ergibt sich dabei nach Gl. 1 aus dem Produkt von notwendiger Druckdifferenz und Volumenstrom.

$$P = \Delta p \cdot Q = (p_S - p_T) \cdot Q \quad \text{Gl. 1}$$

Ein Konstantstromsystem liefert stets einen konstanten Volumenstrom. Der für die Verbraucher notwendige Volumenstrom ist je nach Betriebsart jedoch deutlich geringer, so dass ein großer Teil des Volumenstromes über Druckbegrenzungsventile direkt in den Tank zurückgeführt wird, was zu einer großen Verlustleistung P_{Verlust} führt. Bei einem Konstantdrucksystem wird hingegen eine deutlich kostspieligere Verstellpumpe eingesetzt, welche nur soweit ausgeschwenkt wird, dass der eingestellte Solldruck nach der Pumpe konstant gehalten werden kann. Als Folge wird nur der von den Verbrauchern benötigte Volumenstrom von der Pumpe geliefert. Da der Solldruck nach der Pumpe jedoch konstant auf dem maximalen Systemdruck gehalten wird, entstehen bei Betriebszyklen im Teillastbereich deutliche Verluste. Ein Load-Sensing System geht noch einen Schritt weiter, indem stets der maximale Druck p_{LS} der von den Verbrauchern benötigt wird an die Druckversorgung zurückgegeben wird. Damit der sichere Betrieb aller Verbraucher gewährleistet werden kann wird die Verstellpumpe stets auf ein um Δp_{LS} höheren Solldruck eingeregelt. In bestimmten Betriebspunkten, wie z.B. dem zeitgleichen Betrieb zweier Verbraucher mit unterschiedlichen Lastdrücken, weist jedoch auch das LS-System hohe Drosselverluste auf. Ein weiterer Nachteil dieses Antriebskonzeptes ist, dass potentielle Energie in der Arbeitshydraulik systembedingt nicht rekuperiert werden kann und eine hohe Anfälligkeit zur Schwingungsneigung besteht.

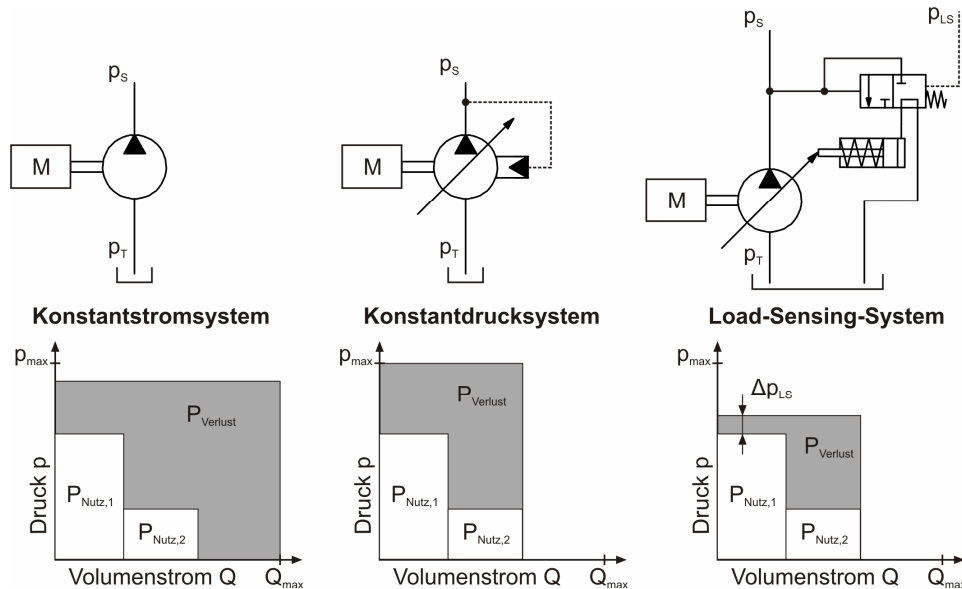


Bild 1: Energieeffizienz hydraulischer Antriebskonzepte

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes "Effizienzsteigerung eines Konstantdrucksystems durch eine Zwischendruckleitung" wird ein neuartiges Hydraulikkonzept entwickelt, welches zum Ziel hat, die Effizienz des Arbeitssystems einer mobilen Arbeitsmaschine zu verbessern. Im Fokus der Untersuchungen steht dabei der energieeffiziente Betrieb von Hydraulikzylindern. Dabei wird ein bekanntes Konstantdrucksystem so modifiziert, dass die Drosselverluste, die bei der Ansteuerung von Zylindern heute entstehen, reduziert werden können. Dies wird erreicht, indem das System neben der Hochdruck- und der Tankdruckleitung mit einer zusätzlichen so genannten Zwischendruckleitung ausgestattet wird, siehe Bild 2.

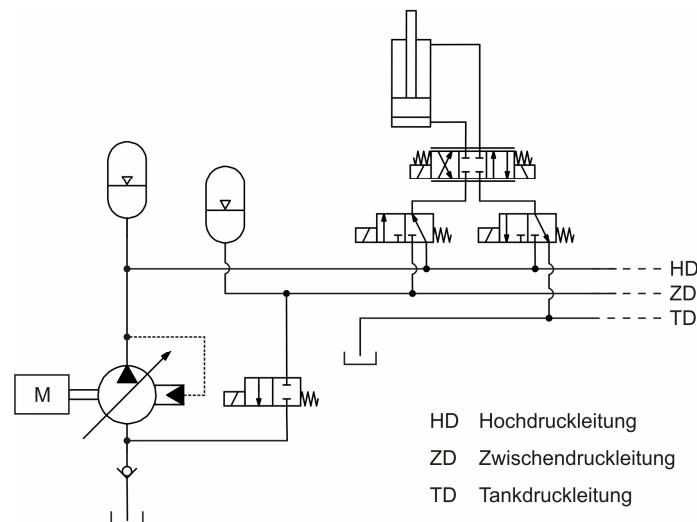


Bild 2: Prinzip des Konstantdrucksystems mit Zwischendruckleitung (KonZwi-System)

Die Zwischendruckleitung des Systems ist mit einem Hydraulikspeicher verbunden und weist einen Betriebsdruck (ZD) auf, welcher zwischen Hochdruck (HD) und Tankdruck (TD) liegt. Über zwei Vorwahlventile (Schaltventile) kann dann für jeden Verbraucher individuell das treibende Druckniveau in Stufen als Kombination von Hoch-, Zwischen- und Tankdruck an die Last des Verbrauchers angepasst werden. Bild 3 zeigt die verschiedenen Schaltzustände des Systems und die damit verbundenen Druckniveaus, die am Proportionalventil angelegt werden können.

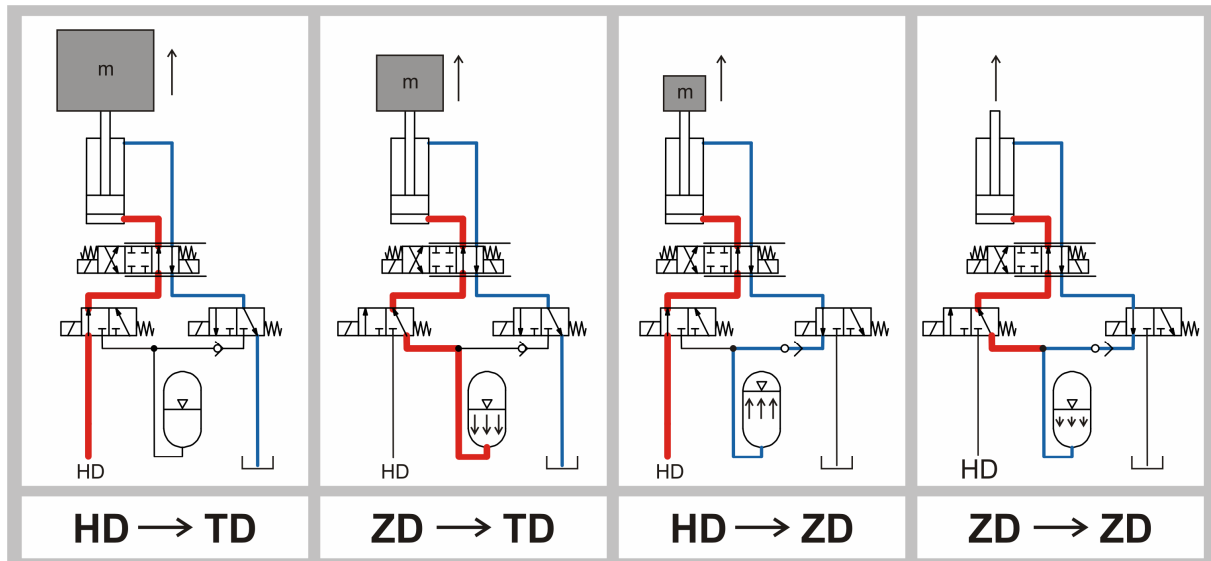


Bild 3: Schaltzustände des KonZwi-Systems

Der überschüssige Druck wird an einem Proportionalventil abgedrosselt, dessen Funktion die Feinsteuerung und Richtungsvorgabe des Verbrauchers ist. Durch die somit erreichten unterschiedlichen Druckstufen können Drosselverluste in den Steuerventilen reduziert und zusätzlich potentielle Energie im hydraulischen Speicher der Zwischendruckleitung gespeichert werden, was zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades des Systems führt. Weiteres Energieeinsparpotenzial besteht in der Möglichkeit die Saugseite der Pumpe bei ausreichend großem Füllstand des Zwischendruckspeichers mit der Zwischendruckleitung zu verbinden, was die notwendige hydraulische Pumpenleistung reduziert.

Innerhalb des Forschungsprojektes soll die komplette Entwicklungskette einer Systemoptimierung bis hin zum fertigen Endprodukt anhand einer Referenzanwendung aus dem Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen vollzogen werden. Um dies innerhalb der kurzen Projektlaufzeit gewährleisten zu können ist die kontinuierliche Integration von unterstützenden Simulationswerkzeugen in den Entwicklungsprozess unabdingbar. Des weiteren spielt die Bündelung vorhandener Kompetenzen für die Bewältigung des umfangreichen Arbeitsplanes eine wichtige Rolle. Das Forschungsvorhaben wird daher durch ein Konsortium aus verschiedenen klein- und mittelständischen Unternehmen bearbeitet, welche alle erforderlichen Kernkompetenzen abdecken. Im Projektkonsortium ist die Firma PAUS als Gesamtsystemlieferant und Maschinenbauer, die Firma ARGO-HYTOS als Spezialist für Ventil- und Systemtechnik, das Institut für mobile Arbeitsmaschinen des KIT als Forschungsstelle, sowie die Firma FLUIDON als Simulationsspezialist vertreten.

Nachfolgend wird das Vorgehen einer simulationsgestützten Entwicklung energieeffizienter Hydrauliksysteme, von ersten Modellvalidierungen anhand Messdaten des Ausgangssystems, über Machbarkeitsstudien und Optimierungen der neuen Systemstruktur, bis hin zu virtuellen Inbetriebnahmen mittels Software- und Hardware-in-the-Loop Simulationen veranschaulicht.

Simulation des Ausgangssystems

Als Referenzsystem dient innerhalb des Projektes ein mit einem LS-System ausgestatteter Radlader der Firma PAUS, siehe Bild 4. Um zuverlässige Aussagen über die zu erwartende Steigerung der Energieeffizienz des KonZwi-Systems treffen zu können und somit auch die Energieeinsparungen des KonZwi-Systems mittels angepasster Schaltstrategien optimal auslegen zu können erfolgte in einem ersten Schritt die simulationstechnische Modellierung des Ist-Zustandes und die Validierung der Modellgüte anhand Messungen am Referenzsystem.



Da, wie anfangs erwähnt, die hydraulischen Zylinderantriebe im Fokus der Systemoptimierung stehen wurden im Projekt Lenkungs- und Fahrtrieb des Radladers vernachlässigt.



Bild 4: Ausgangssystem PAUS Radlader RL655

Um die Gesamtheit des Systems der Arbeitshydraulik abbilden zu können, wurde für die Modellierung ein eindimensionales Systemsimulationsprogramm gewählt. Aufgrund einer umfangreichen Komponentenbibliothek hydraulischer Bauteile und diversen Schnittstellen zu weiteren Software-Tools, wie Steuerungsprogrammen oder Programmen der Mehrkörpermechanik (MKS), wurde hierfür das Simulationsprogramm *DSHplus* genutzt. Gerade die Kopplungsmöglichkeit mit Spezialwerkzeugen aus unterschiedlichen technischen Domänen gewährleistet hierbei eine Durchgängigkeit in der Entwicklungskette und verhindert Dateninkonsistenz sowie Redundanzen in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen /Ulir06/.

In Bild 5 ist das Simulationsmodell des Ausgangssystems dargestellt. Innerhalb des Systemsimulationsprogrammes erfolgte eine detaillierte Modellierung der Hydraulik von Hub- und Kippsystem mittels unterschiedlicher Komponentenmodelle für Zylinder, Ventile, Leitungen und Pumpen. Das hydraulische Teilmodell gliedert sich dabei grob in die Druckversorgung des Systems, den Ventilblock inklusive allen Sicherheitsventilen und in die Aktuatorik in Form von Zylinderantrieben mit entsprechender Berücksichtigung der Verrohrung.

Um die Lastbedingungen des Systems nicht durch statische Lastzyklen oder vereinfachte Lastkraftberechnungen annehmen zu müssen erfolgte eine Modellierung der Mechanik innerhalb des MKS-Programmes *MOBILE /Kes93/*, welches, in Kooperation mit der Universität Duisburg, als eingebettetes Modul innerhalb *DSHplus* genutzt und in Co-Simulation mit der Systemsimulation betrieben werden kann. Durch dieses Vorgehen konnte sowohl die Hydraulik als auch die Mechanik des Systems detailliert berücksichtigt werden.

Die Steuerung des Ausgangsmodells wurde innerhalb der Systemsimulation durch regelungstechnische Elemente, in Form einer vereinfachten Lageregelung mit Hilfe von P-Reglern mit Verzögerungen erster Ordnung, implementiert. Die Generierung der Sollwertvorgaben erfolgte



in den ersten Modellierungsschritten durch Funktionsgeneratoren, im späteren Verlauf zu Zwecken der Modellverifizierung durch gemessene Wegprofile von Hub- und Kippzylindern des Referenzsystems.

DSH^{plus} - Hydraulikmodell

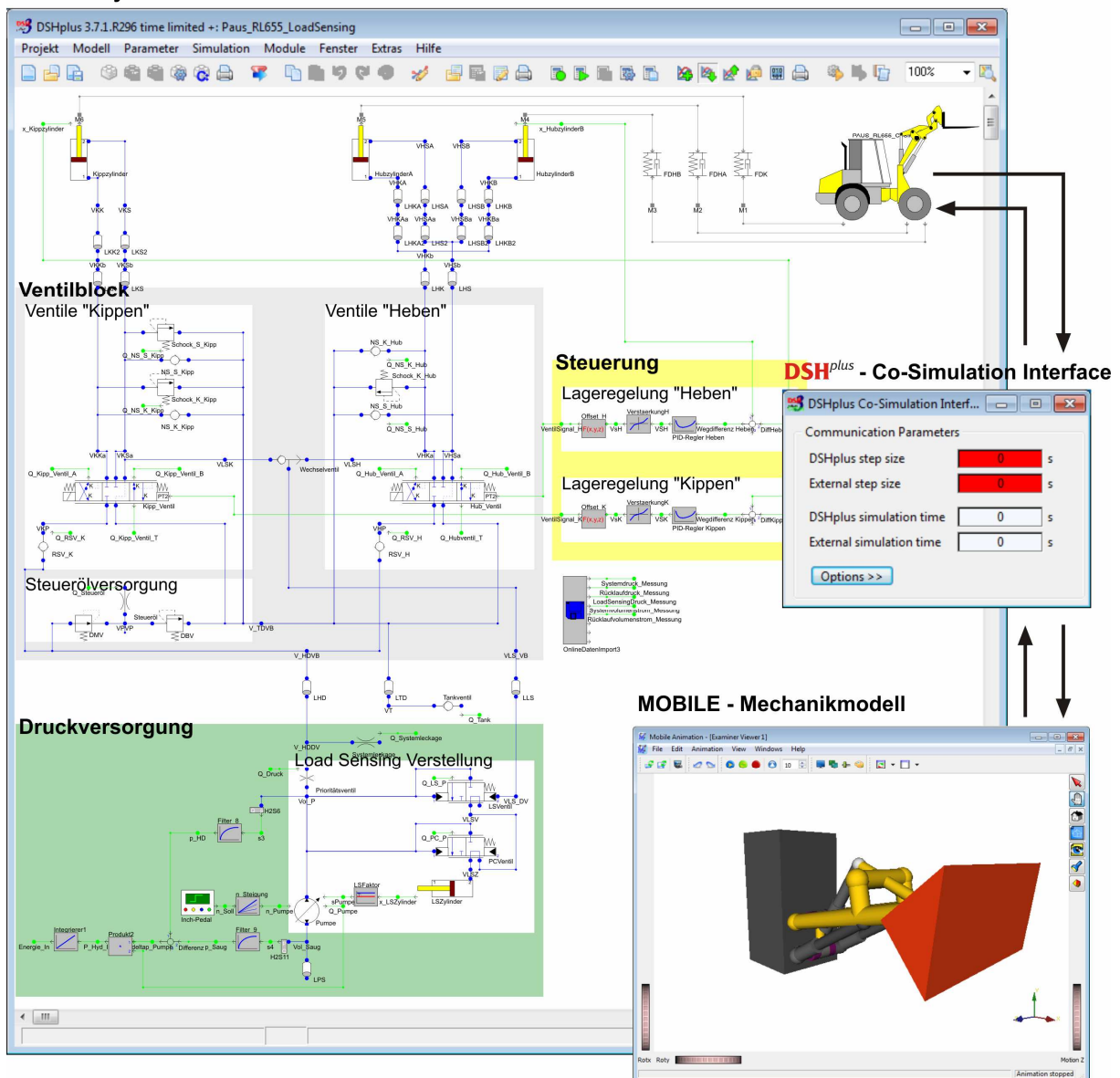


Bild 5: DSH^{plus} Simulationsmodell der Arbeitshydraulik mit eingebettetem Mechanikmodell

Bild 6 zeigt die Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und Messungen des Referenzsystems am Beispiel eines Hubzyklus. Dargestellt sind exemplarisch die Bewegungsgrößen der Hubzylinder, sowie die für die Energieeffizienz relevanten Werte Systemdruck und Pumpenvolumenstrom. Das Verhalten des Simulationsmodells zeigt dabei sehr gute Übereinstimmungen mit dem realen System.

Durch das detaillierte Modell des Ist-Zustandes konnte neben dem erhöhten Erkenntnisgewinn über die Wirkzusammenhänge im Ausgangssystem eine virtuelle Referenzbasis geschaffen werden, welche belastbarere Aussagen über die Einsparpotenziale des KonZwi-Systems ermöglicht.

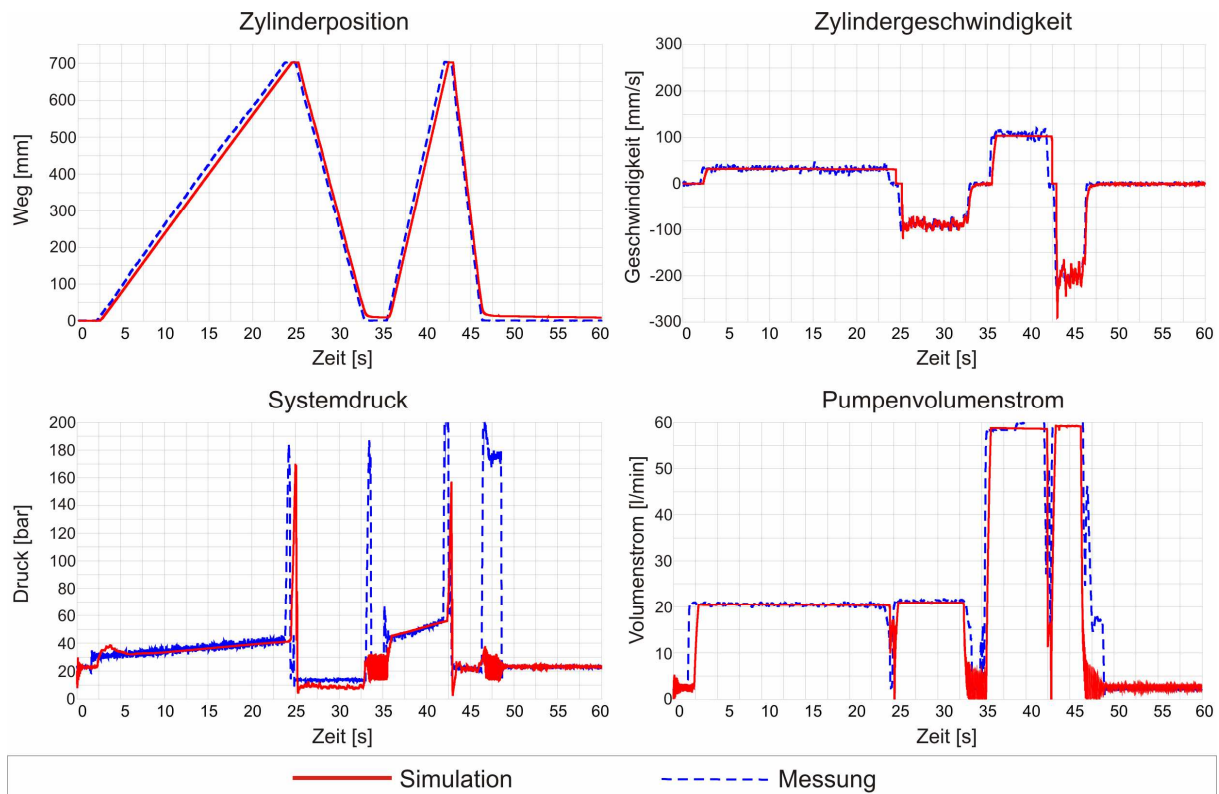


Bild 6: Vergleich von Simulations- und Messergebnissen des Ausgangssystems

Simulation des KonZwi-Systems

Nach erfolgter Validierung des Ist-Zustandes wurde in einem zweiten Schritt die Load-Sensing-Verschaltung innerhalb des Simulationsmodells durch die neue Systemstruktur mit Zwischendruckleitung ersetzt. Für die Bestimmung des Einsparpotentials des neuen Systems im Vergleich zum LS-System ist bei gegebenem Last- und Bewegungsprofil der Zylinder die Kenntnis der Abfolge an Druckstufen, welche die höchste Energieersparnis erlaubt, von zentraler Bedeutung, da diese die globale Effizienz des Systems bestimmt. Ausgehend von theoretischen Überlegungen wurde eine allgemeingültige Betriebsstrategie abgeleitet, welche für variable Lastfälle eine energieoptimale Abfolge von Druckstufen wählen soll.

Die Umsetzung des Steuerungskonzeptes in der Simulation erfolgte zunächst vereinfacht mittels einer Zustandsmaschine, in der die für die Steuerungsstrategie relevanten Schaltzustände, Aktionen und Prüfbedingungen des KonZwi-Systems hinterlegt wurden. Eine Zustandsmaschine (auch „endlicher Automat“, englisch: finite state machine (FSM)) ist ein Modell eines Verhaltens, bestehend aus Zuständen, Zustandsübergängen und Aktionen. Zustandsmaschinen werden hauptsächlich in der Entwicklung digitaler Schaltungen, Modellierungen des Applikationsverhaltens (Steuerungen), in der generellen Softwaretechnik sowie in der Wort- und Spracherkennung genutzt. In Bild 7 ist zur Veranschaulichung vereinfacht das Zustandsdiagramm für einen Wechsel der Druckstufe HD→TD auf das niedrigere Druckniveau ZD→TD dargestellt. Sobald bei gewählter Druckstufe „Hochdruck auf Tankdruck“ der gemessene Druckabfall über das Proportionalventil zu groß ist und damit zu hohe Leistungsverluste über dem Ventil erzeugt werden erfolgt ein Übergang in den Zustand des nächstniedrigeren Druckniveaus „Zwischendruck auf Tankdruck“. Beim Eintritt in diesen Zustand werden die Druckvorwahlventile dann entsprechend geschaltet. Unterschreitet die Druckdifferenz über dem Proportionalventil jedoch einen Grenzwert, so dass gegebenenfalls nicht genügend Druck für die Ausführung der gewünschten Antriebsaufgabe bereitgestellt werden kann wird die Druckstufe erhöht.

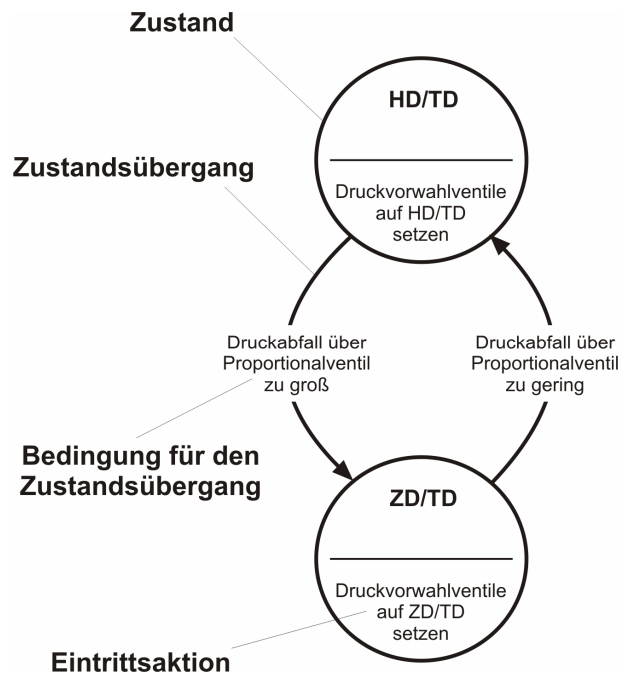


Bild 7: vereinfachtes Zustandsdiagramm eines Druckstufenwechsels

Die Ansteuerung des Simulationsmodells erfolgte mit dem innerhalb des Simulationsprogrammes zur Verfügung stehenden Zustandsautomaten *DSHplus-Director*, der es ermöglicht einfache Steuerungszusammenhänge mit geringem Aufwand in das Modell zu implementieren. Durch Zugriff auf alle globalen Zustandsgrößen und Parameter im Modell und durch die benutzerfreundliche Definition der Steuerung über Zustände, Übergangsbedingungen und Aktionen konnte zunächst eine vereinfachte KonZwi-Steuerung auch ohne tiefere Programmierkenntnisse im Modell berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zum späteren Steuerungsprogramm, welches mit dem speziell hierfür entwickelten SPS-Programm *CoDeSys* erstellt wird, bietet der Zustandsautomat jedoch nur einen sehr begrenzten Funktionsumfang. Begleitend zur Entwicklung des eigentlichen Steuerungsprogrammes konnten anhand dieser Modellierungsstufe jedoch bereits verschiedene Effekte oder die generelle Funktion der Schaltlogik getestet werden.

Bild 8 zeigt die Simulationsumgebung des KonZwi-Systems mit einer vereinfachten Abbildung der Steuerung in Form eines Zustandsautomaten. Innerhalb des Zustandsautomaten wurde zunächst eine Schaltlogik implementiert, welche nur in Abhängigkeit der anliegenden Ventildruckdifferenz und dem aktuellen Füllstand des Zwischenspeichers zwischen den einzelnen Druckstufen wechselt. Mit Hilfe dieses Modellansatzes erfolgte die Auslegung und Dimensionierung der neuen Komponenten. Des Weiteren konnten bereits kritische Elemente und Betriebszustände, wie zum Beispiel ein Auftreten von Kavitation am Sauganschluss der Pumpe, identifiziert und entsprechende Abhilfemaßnahmen erarbeitet werden. Diese Modellierungsstufe zeigte bereits auf, dass die spätere reale Steuerung ein deutliches komplexeres Speicherlademanagement, welches eine verbrauchs- und betriebszustandsoptimale Speicherbe- und Entladung ermöglicht, enthalten muss.

Die erzielbare Energieeinsparung des KonZwi-Systems gegenüber einem Load-Sensing System wird maßgeblich durch eine optimale Steuerstrategie bestimmt und hängt unter anderem von der Wahl des Zwischenspeicherdruckes und vom jeweiligen Betriebszustand ab. Durch theoretische Voruntersuchungen ergaben sich betriebspunktabhängige Einsparungen von bis zu 20%.

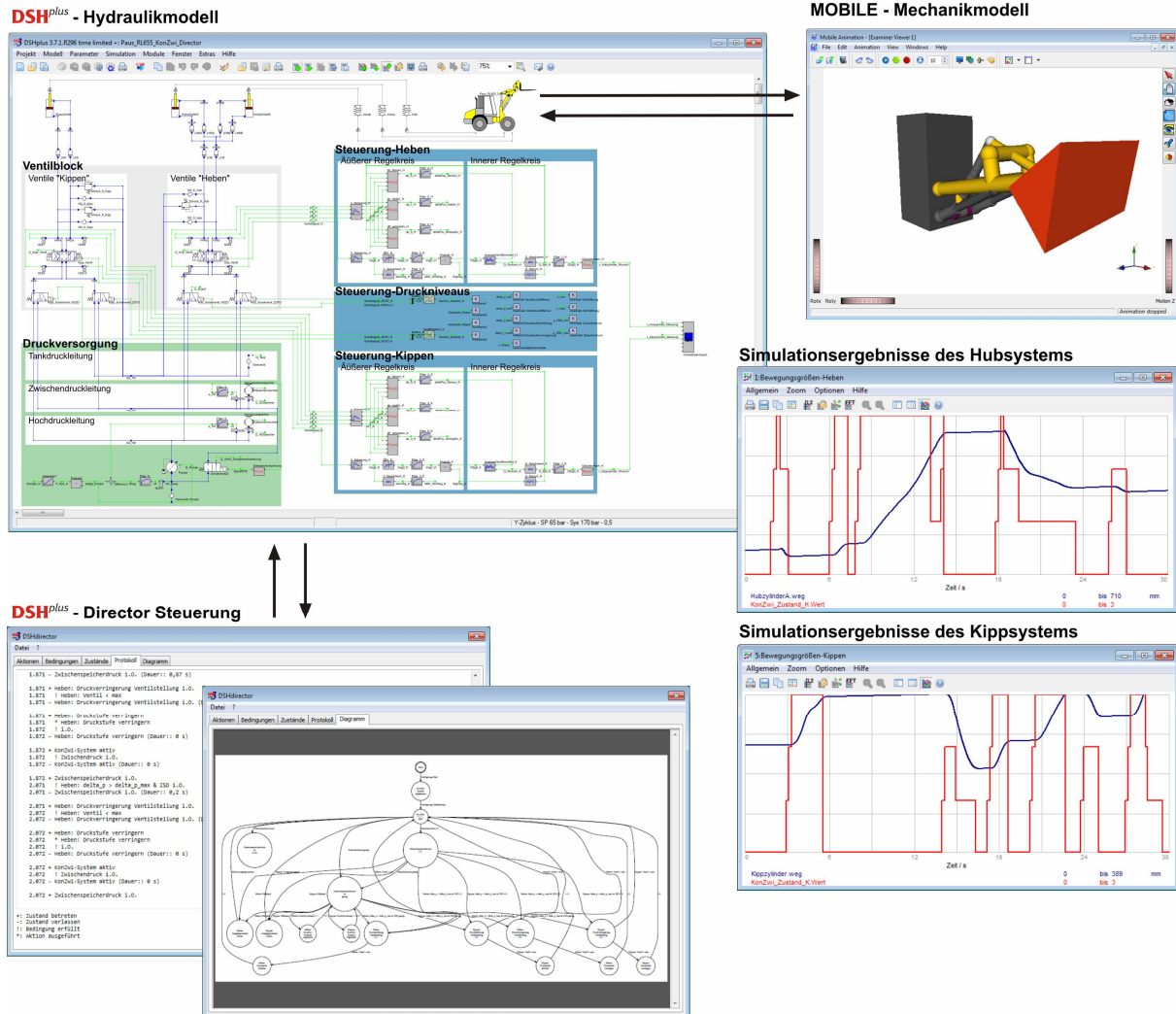


Bild 8: Simulationsumgebung des KonZwi-Systems mit einer vereinfachten Ansteuerung über einen Zustandsautomaten

Zum simulationstechnischen Vergleich zwischen Ausgangssystem und KonZwi-System wurde als Referenzzyklus ein Arbeitsablauf eines Radladers untersucht, welcher einen parallelen Betrieb von Hub- und Kippantrieb berücksichtigt. Hierfür wurde der in Bild 9 dargestellte Y-Zyklus gewählt.

Im Verlauf des betrachteten Y-Zyklus nimmt der Radlader mit der Schaufel ein Ladegut auf und entleert die Schaufel über einem Transportfahrzeug /Koh06/. In Bild 9 sind der Y-Zyklus aus der Vogelperspektive, die Zeitverläufe für die Zylinderpositionen sowie die Verläufe von Hub- und Kippkinematik dargestellt. Der abgebildete Ladezyklus setzt sich dabei aus fünf Teilen zusammen:

1. Der Radlader fährt von der Ausgangsstellung (A) zum Haufwerk (B). Die Schaufel wird über Kipp- und Hebekinematik abgesenkt und zum Boden ausgerichtet.
2. Der Ladevorgang wird ausgeführt, indem der Bediener gleichzeitig in das Haufwerk einfährt und die Hebe- und Kippfunktion der Schaufel bedient.
3. Der Radlader setzt vom Haufwerk (B) zum Ausgangspunkt (A) zurück und hebt die Schaufel an.
4. Der Radlader fährt bis zum Transportfahrzeug (C) vor, hebt gleichzeitig die Schaufel weiter an und entleert sie.
5. Der Radlader setzt vom Transportfahrzeug (C) zurück und der Bediener bringt die Schaufel zurück in die Ausgangsposition.

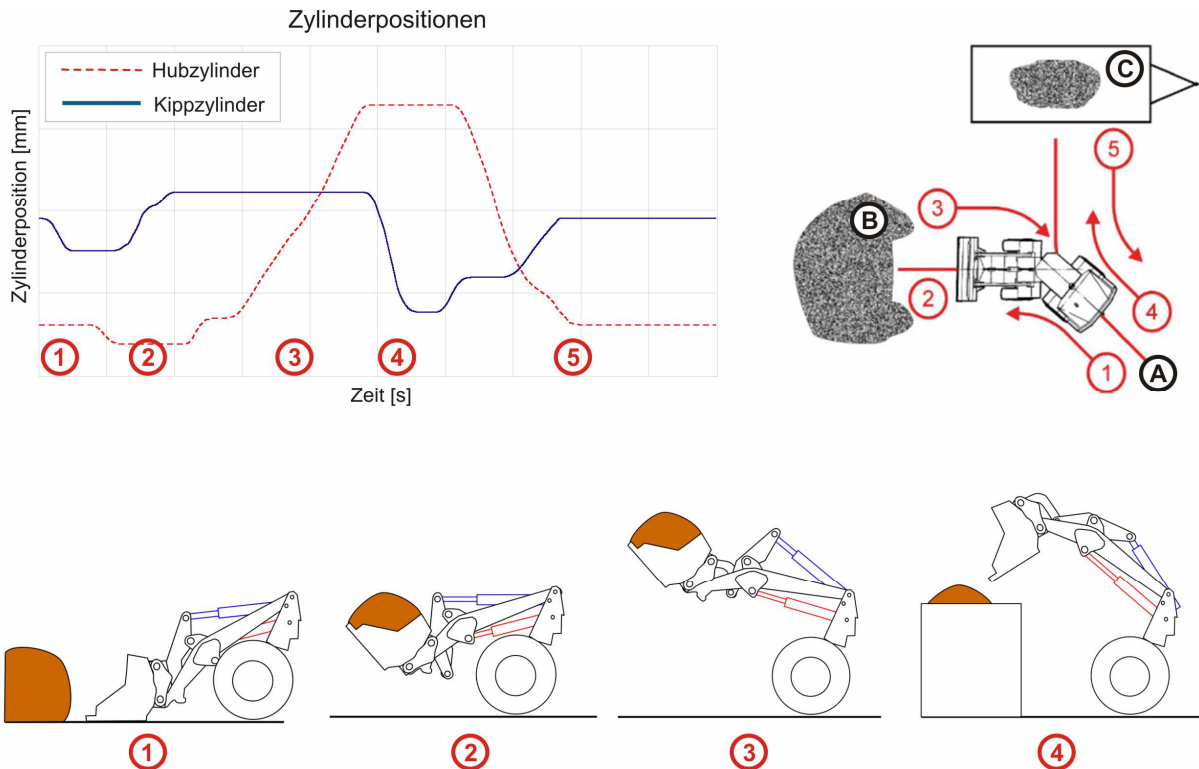


Bild 9: simulierter Y-Zyklus eines Radladers

Bild 10 zeigt die Simulationsergebnisse der Zylinderpositionen von Hub- und Kippssystem sowie die vom Zustandsautomaten gewählten Schaltzustände. Wird vom Bediener keine Bewegung gewünscht so wird immer die höchste Druckstufe $HD \rightarrow TD$ als Ausgangszustand gewählt, um zu Beginn einer anstehenden Bewegung stets genügend Druck zur Verfügung zu haben. Da zum Absenken der Schaufel nur eine geringe Kraft erforderlich ist werden sowohl Hubzylinder als auch Kippzylinder in dieser Verfahrungsrichtung aus dem Zwischenspeicher gespeist. Beim Anheben hingegen wird soweit möglich die Druckstufe "Hochdruck auf Zwischenspeicherdruck" gewählt. Dies reduziert die Drosselverluste über dem Proportionalventil und führt zugleich Energie in den Zwischenspeicher ab.

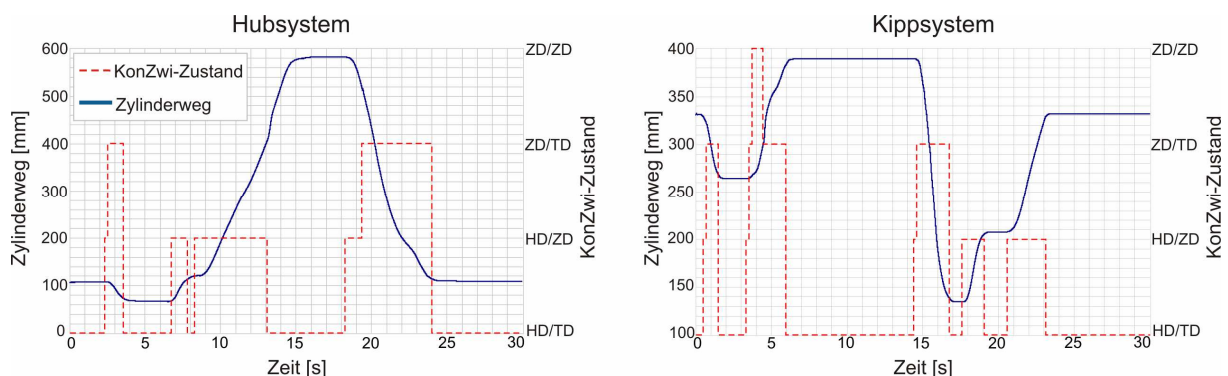


Bild 10: Simulationsergebnisse von Zylinderpositionen und KonZwi-Schaltzuständen

In Bild 11 sind die Simulationsergebnisse des KonZwi-Systems und des Load-Sensing-Systems für einen Y-Zyklus mit einer Lastmasse von 3000 kg gegenübergestellt. Da mit beiden derselbe Bewegungszyklus abgebildet wurde sind die Positionen der Zylinder nahezu deckungsgleich. Das KonZwi-System zeigt in ersten Simulationen eine Energieeinsparung von ca. 9 % im Vergleich zum LS-System. Vergleicht man die dargestellten Zeitverläufe des



Energiebedarfs mit den zugehörigen Schaltzuständen aus Bild 10, so erkennt man die deutliche Reduzierung der von der Pumpe aufzubringenden hydraulischen Leistung durch die Speisung des Systems aus dem Zwischenspeicher im Gegensatz zum Dauerbetrieb der Pumpe eines LS-Systems. Die teilweise größeren Gradienten im Energieverlauf des KonZwi-Systems kennzeichnen den Speicherladebetrieb (HD→ZD).

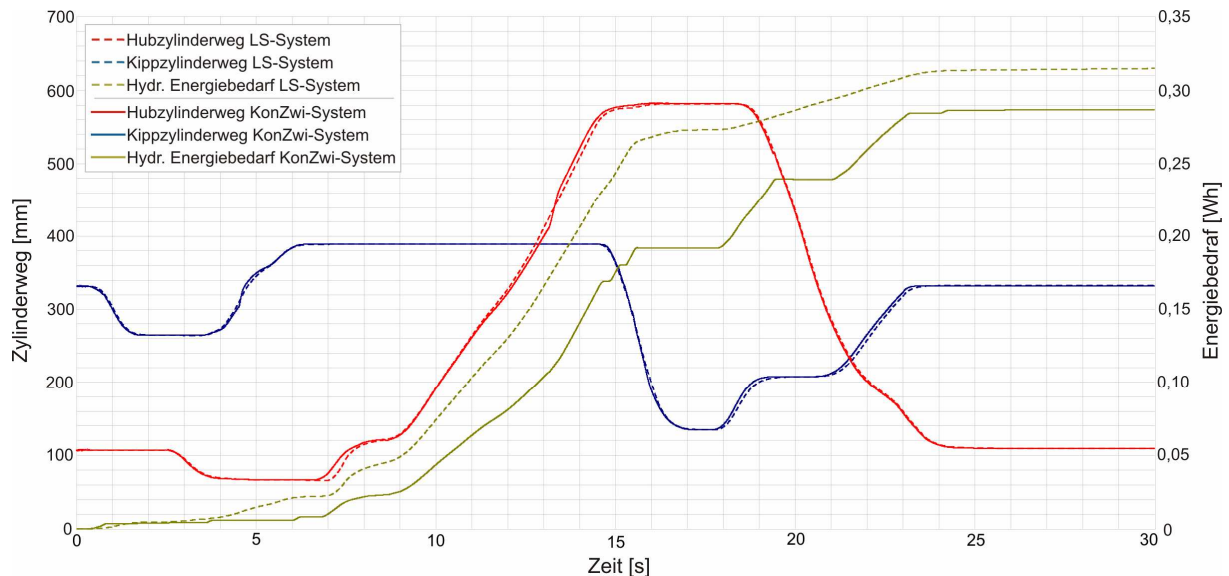


Bild 11: Simulationsergebnisse des hydraulischen Energiebedarfs von Load-Sensing- und KonZwi-System

Virtuelle Entwicklung und Optimierung des Steuerungsprogrammes

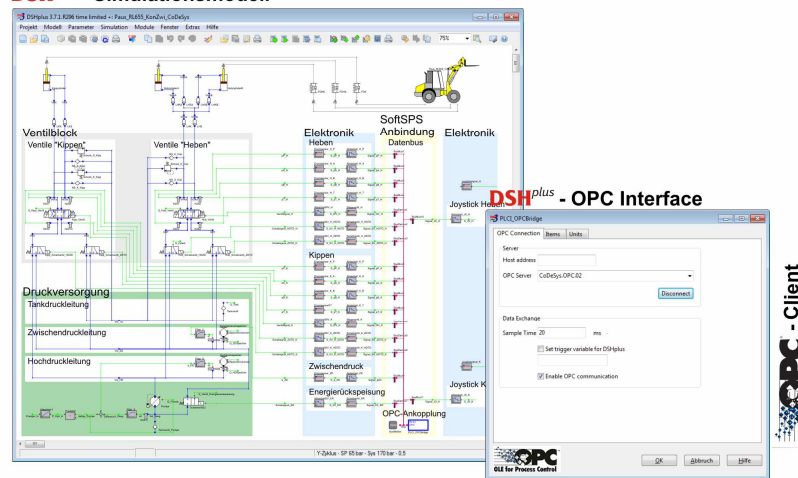
Da zum Nachweis des Energieeinsparpotentials auch am realen Referenzsystem eine Umrüstung auf den Betrieb mit Zwischendruckleitung vorgesehen ist, erfolgen im aktuellen Projektstatus die detaillierten Entwicklungs- und Testphasen der Steuerstrategie zeitsparend anhand der Ankopplung des realen SPS-Programmes CoDeSys an das virtuelle Modell. Dieses Vorgehen ist auch unter dem Begriff Software-in-the-Loop bekannt und bildet zusammen mit der Ankopplung realer Hardware an virtuelle Modell (Hardware-in-the-Loop) den Stand der Technik in der Steuerungsauslegung /Dom10/. Somit kann das Steuerungsprogramm bereits parallel zum Umbau des realen Systems entwickelt und detailliert getestet werden. Das so entwickelte und optimierte SPS-Programm kann dann im Anschluss direkt auf die reale SPS geladen und anhand erneuter Messungen des Referenzsystems bewertet werden.

In Bild 12 ist das Kopplungsprinzip von realem Steuerungsprogramm und virtuellem Radladermodell dargestellt. Kern dieser Simulationsumgebung ist eine virtuelle SPS, die sogenannte SoftSPS, welche die reale Steuerung initiiert. Genau wie auf der späteren Steuerungshardware wird von der SoftSPS ein OPC-Server (Object Linking and Embedding for Process Control) zur Verfügung gestellt. Innerhalb dieses OPC-Serverraumes stehen alle Zustandsgrößen der Steuerung, wie Drücke oder Ventilstellensignale, als Objekte zur Verfügung. An diesen OPC-Server können verschiedene OPC-Clients angekoppelt werden. Die OPC-Clients erhalten vollen Zugriff auf den gemeinsamen OPC-Serverraum und können Daten einzelner Objekte in diesem schreiben oder lesen. Bei der späteren realen Steuerung werden diese einzelnen Objekte zum Beispiel mit den Speicherplätzen der Sensoranschlüsse verknüpft. Im Fall der dargestellten Kopplung erfolgt die Zuweisung von Zustandsgrößen des Modells auf die einzelnen Objekte mittels einer OPC-Schnittstelle innerhalb des Simulationsprogrammes. Für das Steuerungsprogramm, welches direkt aus CoDeSys auf die SoftSPS geladen wird, ist nicht ersichtlich ob die einzelnen Objekte nun von Daten des realen Systems oder von Simulationsergebnissen des virtuellen Modells gespeist werden.



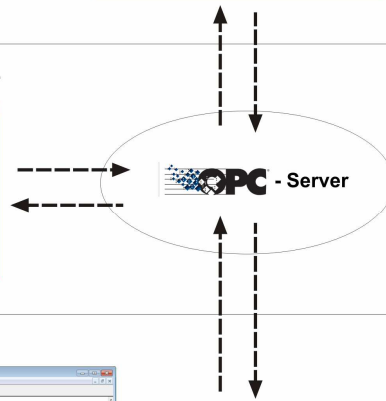
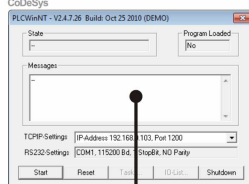
Modellebene

DSH^{plus} - Simulationsmodell



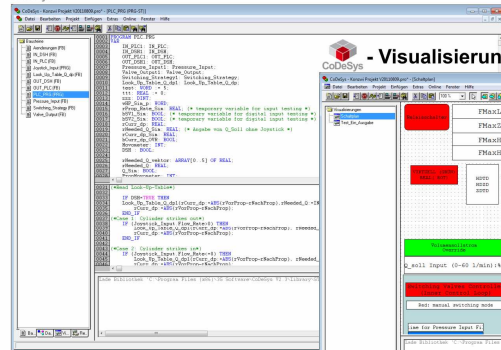
Virtuelle SPS

CoDeSys - SoftSPS PLCWin NT



Steuerungsebene

CoDeSys - SPS-Programm



CoDeSys - Visualisierung/ Benutzerschnittstelle

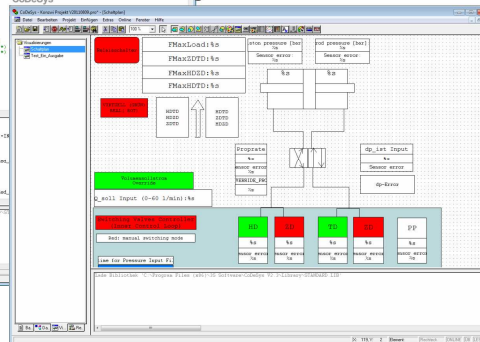


Bild 12: Kopplung von virtuellem Radladermodell und Steuerungsprogramm

Ähnlich wie die OPC-Schnittstelle in DSH^{plus} stellt auch die CoDeSys-Benutzerschnittstelle einen OPC-Client dar. Somit kann der Benutzer zur Laufzeit Parameter der Steuerung ändern oder sich mit Hilfe einer Visualisierung relevante Betriebszustände anzeigen lassen.

Bild 13 zeigt die grundsätzliche Struktur des Steuerungsprogrammes. Das eigentliche Steuerungsprogramm, welches zum Beispiel die Schaltlogik oder die Kalibrierung der Signale beinhaltet bleibt dabei identisch, sowohl für die Kopplung mit dem virtuellen Modell als auch für die spätere Zielapplikation. Es mussten lediglich zwei unterschiedliche Ein- und Ausgangsschnittstellen definiert werden, welche die Zuweisung der Speicherplätze zu den in der Steuerung verwendeten Objekten koordinieren. Innerhalb des Steuerungsprogrammes kann dann einfach zwischen diesen umgeschaltet werden.



Damit auch die Kalibrierung der Ein- und Ausgangssignale bereits im Vorfeld anhand des virtuellen Modells vollzogen werden kann, musste innerhalb des Simulationsmodells auch die Elektronik von Sensorik und Aktuatorik abgebildet werden, so dass die Modellsignale mit den entsprechenden elektrischen Einheiten, Strom und Spannung, mit der Steuerung ausgetauscht werden können.

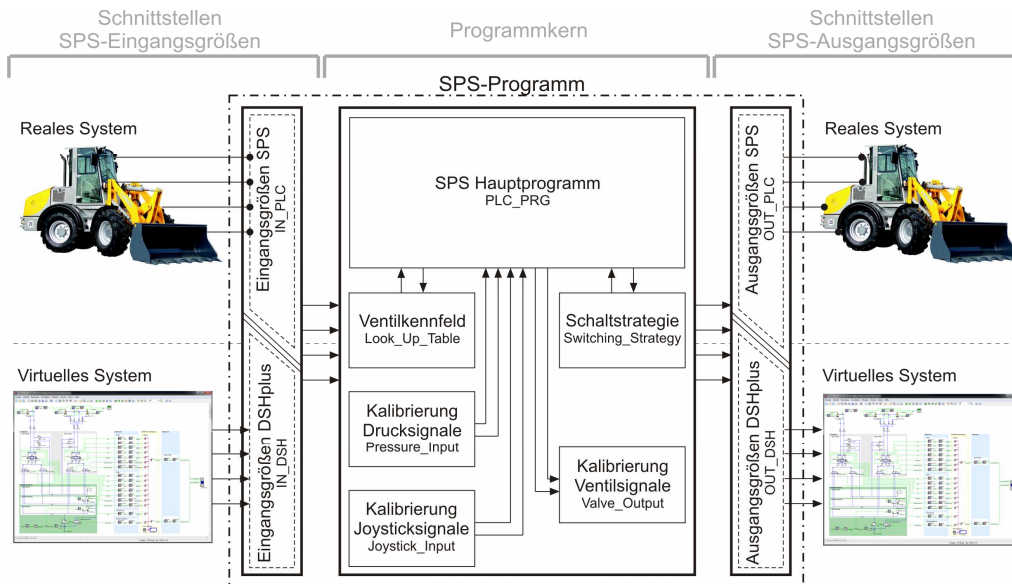


Bild 13: Struktur des Steuerungsprogrammes

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe einer kontinuierlichen Integration von Simulationswerkzeugen in den Entwicklungsprozess konnte ein energieeffizientes Antriebskonzept für Zylinderantriebe mobiler Arbeitsmaschinen zeit- und kostensparend entwickelt und optimiert werden.

Die Verifikation der Simulationsansätze und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das reale System erfolgten zunächst anhand von Messungen an einem Referenzsystem. Nach erbrachtem Beweis der Modellgüte konnte die Entwicklung und Optimierung des neuen Antriebskonzeptes durch eine Implementierung im virtuellen Modell erfolgen.

Die Einbindung der Steuerungslogik, welche maßgeblich die globale Energieeffizienz des neuen Antriebskonzeptes beeinflusst, erfolgte zunächst anhand eines vereinfachten Zustandsautomaten und im späteren mit Hilfe einer Software-in-the-Loop-Kopplung von realem Steuerungsprogramm und virtuellem Simulationsmodell.

Nach weiteren ausstehenden Optimierungen an der Steuerungslogik anhand der Software-in-the-Loop Kopplung des Steuerungsprogrammes CoDeSys mit dem virtuellen Radladermodell kann das so erarbeitete Steuerungsprogramm direkt auf die reale SPS geladen werden und die ersten Test am realen System vollzogen werden. Hierzu steht der Einbau des mit Hilfe der Systemsimulation entwickelten Konzeptes in das Ausgangssystem an.

Bild 14 zeigt das Einbaukonzept des KonZwi-Systems in den Radlader. Das KonZwi-System wird dabei redundant zum bestehenden Load-Sensing-System aufgebaut, so dass über entsprechende Kugelhähnen zwischen beiden System hin- und hergeschaltet werden kann. Dies bietet einerseits die Möglichkeit den Nachweis der Energieersparnis an ein und demselben Radlader mit Hilfe von Kraftstoffverbrauchsmessungen durchzuführen und gewährleistet andererseits eine Funktionsfähigkeit des Radladers bei Ausfall oder Funktionsstörungen des



KonZwi-Systems.

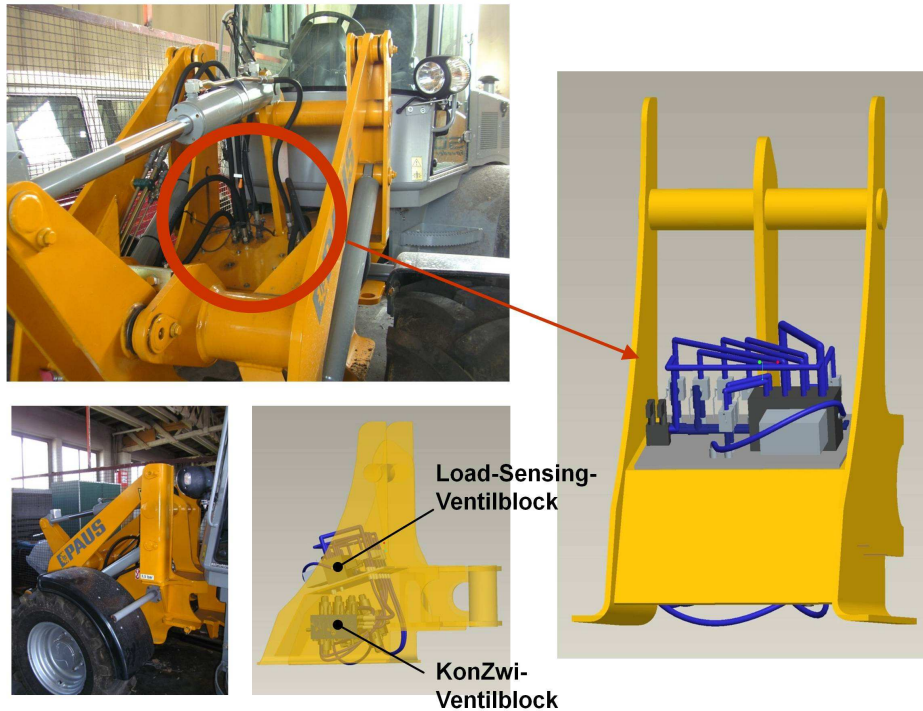


Bild 14: Einbau des KonZwi-Systems im Radlader

Literaturverzeichnis

- | | | |
|---------|--------------------------|---|
| /Dom10/ | R. v. Dombrowski | Simulation – Ein unverzichtbares Werkzeug im modernen Entwicklungsprozess, O+P Konstruktionsjahrbuch 2010 / 2011, ISBN 978-3-7830-0380-2, Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2010 |
| /Kec93/ | A. Kecskemethy | Objektorientierte Modellierung der Dynamik von Mehrkörpersystemen mit Hilfe von Übertragungsfunktionen, Dissertation, Universität Duisburg, 1993 |
| /Koh06/ | T. Kohmäscher
et. al. | Moderne voll- und teilhydrostatische Fahrtriebe - Untersuchung und Weiterentwicklung von Antriebsstrangkonzzepten mobiler Arbeitsmaschinen, O+P Zeitschrift für Fluidtechnik, 5/2006, Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2006 |
| /Ulr06/ | H. Ulrich,
H. Baum | Interfacing Digital Controller Hardware and Virtual Prototyping Environments – Benefits and State of the Art Techniques, Proceedings of the 5 th International Fluid Power Conference, Aachen, 2006 |