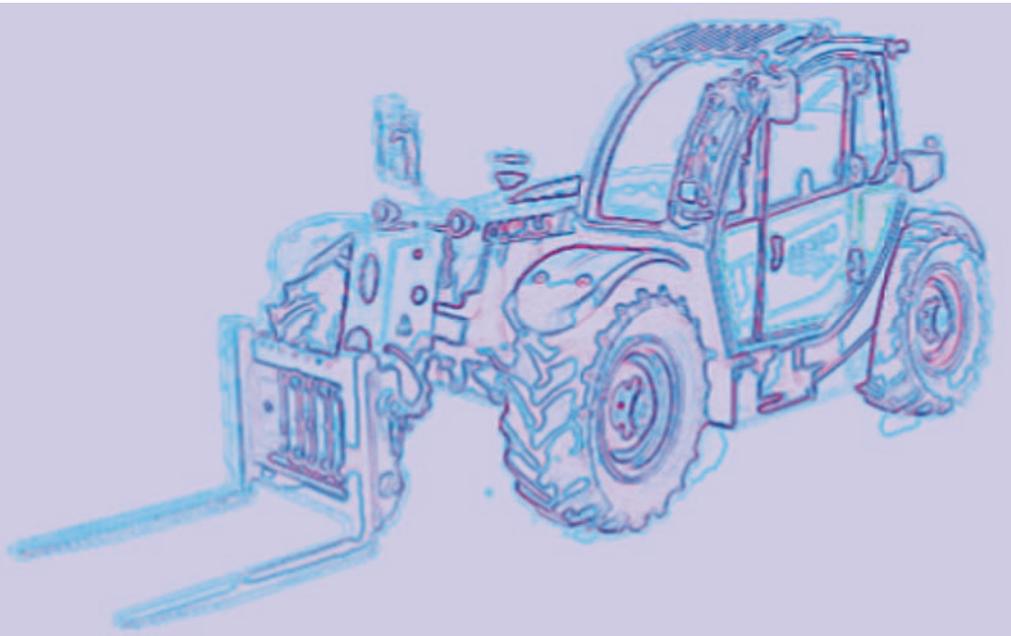


Serieller hydrostatischer Hybrid – Teil 2: Regelung und Potenzialabschätzung

Umrüstung zum seriellen Hybrid schafft bis zu 15 Prozent geringeren Verbrauch

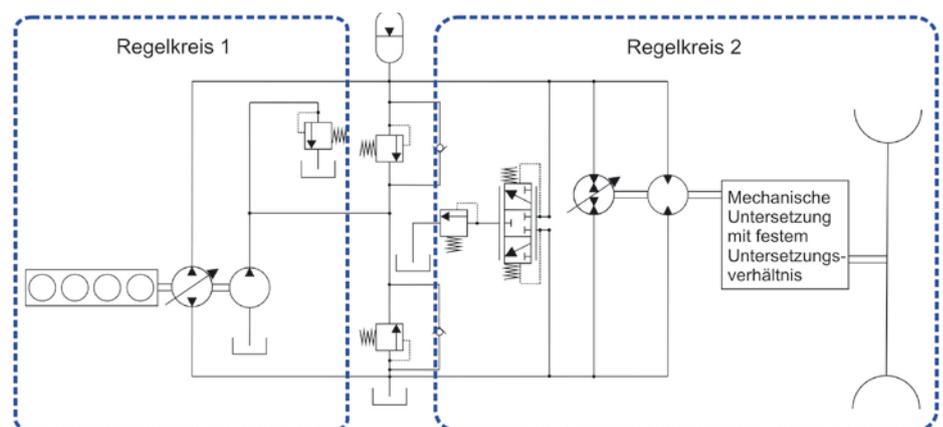


T. Kautzmann, Ph. Thiebes, M. Geimer

Im Artikel „Serieller hydrostatischer Hybrid – Teil 1: Aufbau und Betriebsstrategie“ der *Mobile Maschinen-Ausgabe 3/2009* wurde der Aufbau und die Betriebsstrategie eines am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) entwickelten seriellen Hybridantriebsstrangs vorgestellt. In diesem zweiten Teil geht es darum, die Regelung und Ergebnisse der Simulation, insbesondere die erzielten Verbrauchseinsparungen, vorzustellen.

Dipl.-Ing. Timo Kautzmann, Dipl.-Ing. Phillip Thiebes, beide wissenschaftl. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima); Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer, Leiter des Lehrstuhls für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT)

Der bereits in der Ausgabe 3/2009 von *Mobile Maschinen* vorgestellte hybride Antriebsstrang ist nochmals in **Bild 1** gezeigt. Umrahmt sind weiter die Regelstrecken für Regelkreis eins und zwei, auf die später näher eingegangen wird. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass der abgebildete Antriebsstrang, durch Ergänzung um einen Speicher und einen zusätzlichen Tankanschluss, aus einem geschlossenen Kreislauf abgeleitet wurde. Einige Komponenten des geschlossenen Kreises haben dadurch ihre Funktion verloren, sie wurden jedoch nicht aus dem System entfernt. Die Betriebsstrategie sieht, wie in Teil 1 erwähnt, vor, einen ausreichend dimensionierten Hydraulikspeicher zu verwenden, der in der Lage ist, die gesamte maximale kinetische Energie des Fahrzeuges aufzunehmen. Im Stillstand der Maschine soll der Speicher voll geladen sein und diese potenzielle Energie in der Weise abgeben, dass die Summe aus kinetischer und potenzieller Energie konstant gleich der maximalen Speicherenergie ist.

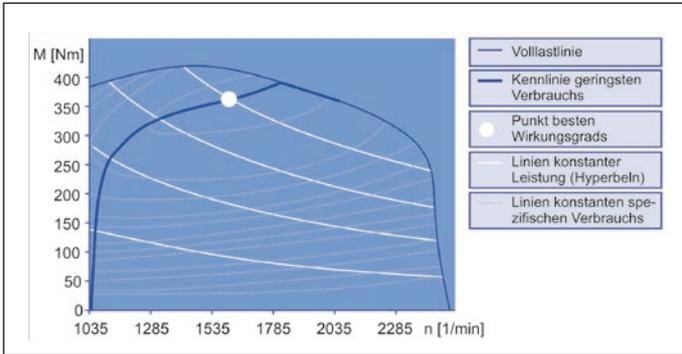


1: Antriebsstrang mit Regelkreisen

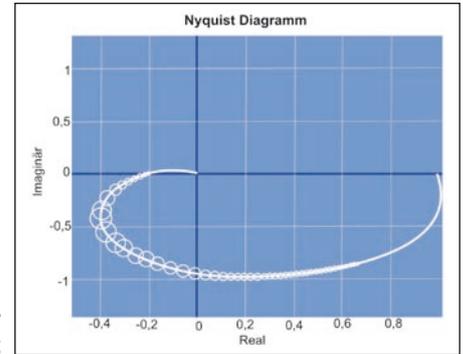
lik-speicher zu verwenden, der in der Lage ist, die gesamte maximale kinetische Energie des Fahrzeuges aufzunehmen. Im Stillstand der Maschine soll der Speicher voll geladen sein und diese potenzielle Energie in der Weise abgeben, dass die Summe aus kinetischer und potenzieller Energie konstant gleich der maximalen Speicherenergie ist.

Druckregelung

In Anbetracht der zu erfüllenden Aufgaben des Antriebsstrangs, optimale Energiebereitstellung und Soll-Geschwindigkeitsfolge, erweist es sich als sinnvoll, diesen in zwei Teile aufzuteilen und getrennt zu regeln. Regelkreis eins ist zuständig für die optimale Energiebereitstellung in den Hydraulikkreis und muss daher Verbrennungskraftmaschine (VKM) und Hydropumpe so regeln, dass der Soll-Druck im Hochdruckteil verbrauchsoptimal eingehalten wird. Dies erfolgt in zwei verschiedenen Ansätzen, die miteinander verglichen werden. Einerseits wird die VKM auf der Linie (Kennlinien-Betrieb) und andererseits im Punkt (Ein-Punkt-Betrieb) minimalen Verbrauchs des Motorkennfeldes betrieben. Im Kennlinien-Betrieb ist die Leistungsabgabe in den Hydraulikkreis proportional zur Druckdifferenz Δp zwischen Soll- und Ist-Druck, im Ein-Punkt-Betrieb speist die VKM dann Energie im wirkungsgradoptimalen Punkt in das System, wenn Δp über einen gewissen Grenzwert steigt und erst dann wieder abgeschaltet wird, wenn Δp gleich Null ist. Diese Betriebsstrategie ist vergleichbar mit einer Speicherladeschaltung. In **Bild 2** sind jeweils die möglichen Aufenthaltsorte der VKM im Kennfeld eingetragen.



2: Verbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors



3: Robustheit der Regelung

Geschwindigkeitsregelung

Für Regelkreis 2, der die Sekundäreinheit ansteuert und damit die Geschwindigkeit am Abtrieb einstellt, wird bei der Erstellung des Modells für die Reglersynthese von einem konstanten mittleren Systemdruck p

INFO Teil 1+2 online

Sie haben den ersten Teil verpasst? Kein Problem, unter www.mobile-maschine.info Rubrik Hybridantriebe finden Sie beide Teile auch als PDF. Damit Sie keine Ausgabe verpassen empfehlen wir Ihnen ein Abo. Damit sichern Sie sich den lückenlosen Bezug von Fachinformationen.

im Hochdruckteil ausgegangen. Diese Annahme stellt zwar eine starke Vereinfachung dar, allerdings kann gezeigt werden, dass das geregelte System äußerst robust gegenüber Parameterschwankungen des Drucks ist. In **Bild 3** ist die Ortskurve des offenen Systems mit unsicherheitsbehaftetem Parameter p gezeigt. Wie zu erkennen ist, erfüllen alle Kurven die vereinfachte Form des Nyquist-Kriteriums („Linke-Hand-Regel“). Die eingezeichnete Kurve zeigt den Verlauf bei p=400 bar, die Radien der Kreise entsprechen den maximalen Ausdehnungen der Ortskurven bei maximalen Druckschwankungen von ± 50 bar.

Diese Interpretation bietet die Möglichkeit, das System als SISO-Modell (single input, single output) aufzufassen, welches mit den Grundlagen der Regelungstechnik be-

handelt werden kann. Ein PDT2 Regler, dessen Parameter nach Identifikation der Regelstrecke sinnvoll eingestellt werden, erweist sich als tauglich, die Schwingungen so aus dem System zu filtern, dass eine ausreichende Regelgüte entsteht. Weiter kann der gesamte Antriebsstrang gedanklich in zwei Teilsysteme geteilt werden, mit dem Speicher als verbindendes Element, der alleine für die erforderliche Bereitstellung der Fahrenergie zuständig ist. Die VKM mit Hydropumpe sorgt lediglich dafür, Störungen und Wirkungsgradverluste auszugleichen und den Systemdruck auf Sollniveau zu halten. Störungen im betrachteten Arbeitszyklus entstehen vor allem durch Einfahren in das Haufwerk (**Bild 4**: t=7 bis 12 s). Diese Betrachtungsweise hat aufgrund allgemein beschränkter Stördynamik (I-Verhalten der

▼ Weitere Informationen www.vfv1.de/#4875000

Kunststoff-Schutzelemente für alle Fälle.

Entdecken Sie KAPSTO®: Normprogramm mit ca. 3.000 Ausführungen – sofort ab Werk lieferbar.



Vierkantstopfen



Schraubkappen



Schutzstopfen ohne Gewinde



Griffstopfen



Schraubstopfen



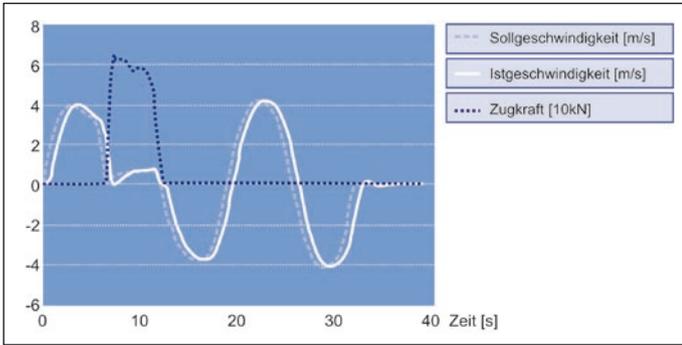
Schutzkappen ohne Gewinde



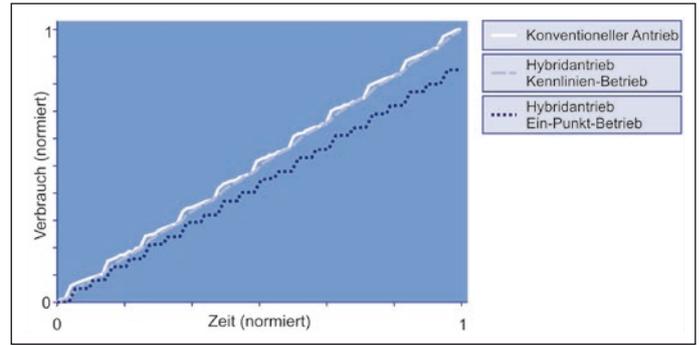
PÖPPELMANN

KAPSTO®

Pöppelmann GmbH & Co. KG · Kunststoffwerk-Werkzeugbau · Bakumer Straße 73 · 49393 Lohne · Telefon 04442 982-9100
 Fax 04442 982-9150 · kapsto@poeppelemann.com · www.poeppelemann.com



4: Der Vergleich im Arbeitszyklus zeigt die hohe Regelgüte, die bei dieser Reglersynthese ermöglicht wird



5: Kraftstoffverbrauch beider Konzepte, sowie der des hydrostatischen Getriebes im Serienfahrzeug bei Durchfahren des Arbeitszyklus

Störung) den Vorteil, dass für die Druckregelung ebenfalls eine träge Dynamik ausreichend ist.

Ergebnisse

Der Vergleich von Führungs- und Regelgröße der Geschwindigkeitsverläufe im Arbeitszyklus in **Bild 4** zeigt die hohe Regelgüte, die bei dieser Reglersynthese ermöglicht wird. Zu sehen ist weiterhin die erhöhte Zugkraft, die beim Einfahren ins Haufwerk entsteht. Diese wird als Störkraft betrachtet.

Der Kraftstoffverbrauch beider Konzepte, sowie der des hydrostatischen Getriebes im Serienfahrzeug bei Durchfahren des Arbeitszyklus sind in **Bild 5** gezeigt. Das größte Einsparpotenzial ist hier mit etwa 15 % gegenüber dem hydrostatischen Getriebe beim Ein-Punkt-Betrieb festzustellen. Der Kennlinien-Betrieb hingegen zeigt praktisch keine Einsparungen.

Interpretation der Ergebnisse

Der Ein-Punkt-Betrieb verspricht die größten Verbrauchsvorteile. Gründe dafür sind in der wirkungsgradoptimalen Betriebsführung der VKM, der realisierten Start-Stopp-Automatik und in der Rekuperation zu finden. Mit einem Einsparpotenzial von 15 %

bestätigt diese Arbeit die beim Hybridkonzept HRB von Bosch Rexroth ermittelten Ergebnisse [Ehr07]. Weiterhin belegen die Untersuchungen, dass bei gleicher Antriebsstrangkonfiguration die Betriebsstrategie signifikanten Einfluss auf den Erfolg des Hybridkonzeptes hat. Mit ein und derselben mechanischen Konfiguration können im ungünstigen Fall keine Ersparnisse erzielt werden, wie der Verbrauch beim Kennlinien-Betrieb in **Bild 5** zeigt. Denkbar wäre hier sogar ein Mehrverbrauch. Das Kraftstoffeinsparpotenzial, das durch die Komponenten und ihre Anordnung gegeben ist, kann also mehr oder weniger von der darüber stehenden Strategie ausgeschöpft werden: Der Ein-Punkt-Betrieb zeigt deutliche Einsparungen, der Kennlinien-Betrieb in seiner implementierten Form hingegen keine. Würden zusätzlich die Komponenten des Antriebsstrangs an die veränderten Möglichkeiten, die der Hybridantrieb bietet, angepasst, so wäre wiederum ein anderes (größeres) Potenzial vorhanden, das durch eine sinnvolle Betriebsstrategie auszunutzen wäre. Eine kleinere VKM würde beim Kennlinien-Betrieb beispielsweise dazu führen, dass die VKM häufiger im wirkungsgradgünstigen Bereich der maximalen Leistung betrieben wird, was zu einem verringerten Kraftstoffverbrauch führen würde.

Ausblick

Mit einem ermittelten Einsparpotenzial von rund 15 % gegenüber der aktuellen Technologie und angesichts der steigenden Kraftstoffpreise scheint der Trend in Richtung Hybridantriebe in mobilen Arbeitsmaschinen vorgegeben. Dabei ist unterstreichend anzumerken, dass zur Ermittlung dieses Wertes allein der Fahrtrieb betrachtet wurde. Es ist davon auszugehen, dass bei Rückgewinnung der potenziellen Energie aus der Arbeitshydraulik mit einem weiteren Einsparpotenzial zu rechnen ist, wie es aus [Ste09] hervorgeht. Zudem spielen hier nur energetische Gesichtspunkte eine Rolle. Weitere Vorteile wie abnutzungs-freies Bremsen und damit verbundene höhere Standzeiten der Bremse können bei der wirtschaftlichen Betrachtung der Gesamtmaschine durchaus große Bedeutung haben. Des Weiteren muss den Betriebsstrategien große Aufmerksamkeit gewidmet werden, da diese maßgeblich über die tatsächlichen Kraftstoffeinsparungen entscheiden. Einen signifikanten Einfluss hat überdies die installierte VKM-Leistung. Wird diese an die Anforderungen des hybriden Systems angepasst (man spricht von Rightsizing [Thi09]), so ist davon auszugehen, dass auch im Kennlinien-Betrieb deutliche Kraftstoffverbrauchseinsparungen auftreten.

Summary

Considering rising fuel costs and CO₂-emission minimization, the professorship Institute for Mobile Machines (Mobima) at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) at the University of Karlsruhe (TH) investigates the potentials of hybrid-drive trains for mobile machines. In the study to which this article refers to, a conventional hydrostatic drive train was transformed into a serial hybrid drive train by adding a hydraulic accumulator, thereby implementing a system with impressed pressure. The hydraulic accumulator is able to store the machines entire kinetic energy, thus providing ideal support both for recuperation and acceleration. Two

operation strategies were developed and compared. In strategy one, the engine operates solely along the efficiency-optimal curve within the efficiency map. In strategy two, the engine operates exclusively in the spot of best efficiency. This study's focus was to analyze a hydraulic hybrid drive train and to develop and compare appropriate control strategies. The hydraulic motor is closed loop speed controlled in a system with impressed pressure. The developed control strategies show great robustness both for pump and motor. Regarding fuel savings, 15 % are achievable.

MOBIMA
6057930

WWW
www.vfv1.de/#6057930

Literatur:

[Ehr07] Ehret, C. et al.: *Hydrostatisch regeneratives Bremsen (HRB)*. In: *Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen: Informationstagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH)*, 2007: S. 141-153
 [Ste09] Steindorff, K. et al.: *Betriebsstrategien zur Energierückgewinnung an einem hydraulischen Antrieb*. In: *Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 2. Fachtagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH)*, 2009: S. 97-107
 [Thi09] Thiebes, P., Geimer, M. und Jansen, G.: *Hybridantriebe abseits der Straße - Methodisches Vorgehen zur Bestimmung von Effizienzsteigerungspotentialen*. In: *Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 2. Fachtagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH)*, 2009: S. 125-135