

Thomas Fleczonek, Hans-Heinrich Harms und Thorsten Lang

# Voraussetzungen zur Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Maschinen

Die Effizienz von mobilen Maschinen bekommt aufgrund von stetig steigenden Kraftstoffpreisen und die zu erwartenden Folgen durch CO<sub>2</sub>-Emissionen eine immer größere Bedeutung. Dieser Trend spiegelt sich im Entwicklungsprozess von Antriebssystemen durch eine steigende Gewichtung der Effizienz als Bewertungskriterium wider und erfordert für aussagekräftige Bewertungen detaillierte Effizienzanalysen. Die wesentlichen Voraussetzungen der Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Maschinen sind die Kenntnis der Antriebseigenschaften einerseits und der Einsatzprofile der Maschine andererseits. In diesem Artikel werden diese Aspekte im Allgemeinen und am Beispiel von zwei Arbeitshydrauliksystemen eines Mähdreschers näher beleuchtet.

## Schlüsselwörter

Effizienz, Analyse, Bewertung, Einsatzprofil, Antrieb, Arbeitshydraulik, mobile Maschine, Mähdrescher

## Keywords

efficiency, analyse, benchmark, working condition profile, drive, hydraulic system, mobile machine, combine harvester

## Abstract

Fleczonek, Thomas; Harms, Hans-Heinrich and Lang, Thorsten

## Fundamentals of efficiency benchmarking of mobile machine drive systems

Landtechnik 66 (2011), no. 6, pp. 426–429, 3 figures, 1 tables, 6 references

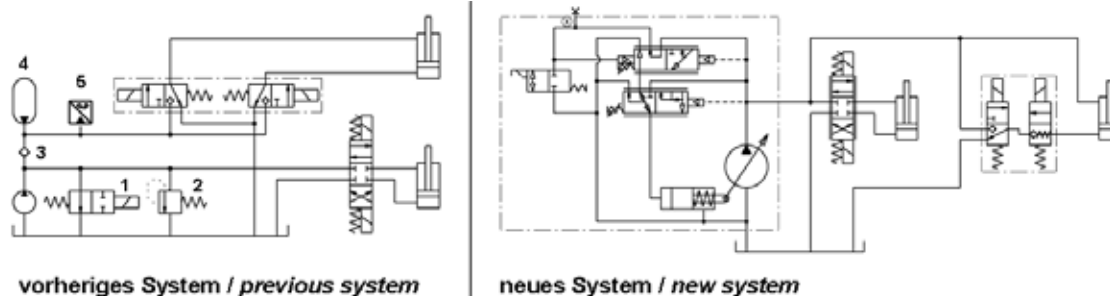
Due to steadily increasing fuel prices and problems caused by CO<sub>2</sub>-emissions, the efficiency of mobile machines becomes more and more important. Within the development process this leads to an increasing relevance of efficiency as assessment criterion and requires detailed efficiency analyses. The fundamentals of efficiency benchmarking of mobile machine drive systems are the knowledge of the drive system characteristics on the one hand and the machines working condition profiles on the other hand. Within this paper these aspects are presented in general and exemplified by two hydraulic systems of a combine.

■ Für die Effizienz von mobilen Maschinen spielen die Antriebseigenschaften eine maßgebende Rolle. Um diese insbesondere bei Antrieben mit vielfältigen Funktionen bewerten zu können, ist die Modellbildung und Simulation ein geeignetes Mittel. Dieser Ansatz ermöglicht die Effizienz einzelner Funktionen in verschiedenen Betriebspunkten zu analysieren. Eine präzise Modellierung der Komponenten und Baugruppen ist dafür Voraussetzung. Neben der Verwendung von Verlustmodellen aus der Literatur sind insbesondere auch die Verwendung von gemessenen Wirkungsgradkennlinien und -kennfeldern anzustreben sowie die Verifikation mit bereits validierten Messdaten. Dennoch erfordert jede Simulation, insbesondere von potenziellen Konzepten, einige Annahmen, deren Einflüsse auf die Ergebnisse mittels Sensitivitätsanalysen untersucht werden können.

Im Hinblick auf die Effizienz von Hydrauliksystemen spielen häufig Pumpen und Motoren eine entscheidende Rolle. Wie die Verlustmodellierung auf Basis von Messdaten erfolgen kann, wird von Rahmfeld et al. [1] dargestellt. Weitere Möglichkeiten werden von Kohmäscher [2] vergleichend zusammengefasst. Bei der Verlustmodellierung sind auch Verluste durch Strömungswiderstände in Rohrleitungen, Schläuchen, Verschraubungen und Ventilen sowie beispielsweise Verluste durch Reibung und Leckage in Hydraulikzylindern zu berücksichtigen.

Neben den Verlusten in Komponenten spielt jedoch insbesondere der Aufbau des Hydrauliksystems eine entscheidende Rolle. Da die Eigenschaften der hydraulischen Grundsysteme in der Literatur, z. B. durch Lang [3], ausführlich beschrieben sind, werden im Folgenden lediglich die Systeme der Beispiele vorgestellt.

Abb. 1



Hydraulikschaltpläne nach [4]

Fig. 1: Hydraulic system layouts according to [4]

### Neues und vorheriges Arbeitshydrauliksystem eines Mähdreschers

Den schematischen Aufbau des neuen Hydrauliksystems des Claas Lexion 770 und des vorherigen Systems (Claas Lexion 600) zeigt **Abbildung 1**.

Beim vorherigen System handelt es sich um ein Konstantstrom-Hydrauliksystem mit Konstantpumpe (max. 48 l/min, max. 180 bar) und einem Konstantdruck-Subsystem. Dieses Subsystem besteht aus einem Rückschlagventil (3), einem Speicher (4) und einem Drucksensor (5) und dient der Effizienzsteigerung durch ein weniger häufig aktiviertes Sperrumlaufventil (1). Die Verwendung des Subsystems ist bei Funktionen möglich und sinnvoll, die niedrige Volumenströme erfordern, jedoch häufig betätigt werden. Ein Beispiel dafür ist das automatische Anpassen des Schneidwerks an unebenen Untergrund (Auto contour).

Das neue Hydrauliksystem ist hingegen ein Konstantdruck-System mit Verstellpumpe (max. 114 l/min, max. 205 bar). Um die größtmögliche Effizienz mit diesem System zu erreichen, sind alle Funktionen so ausgelegt, dass sie knapp unterhalb des Konstantdruckniveaus arbeiten. Dies ermöglicht ein Effizienzniveau, das vergleichbar mit dem von Load-Sensing Systemen ist. Weiterhin weist es den Vorteil einer höheren Dynamik auf, von welcher insbesondere die Funktion „Auto contour“ profitiert.

### Einsatzprofile – Grundlage aussagekräftiger Effizienzbewertungen

Die Modellierung der Eigenschaften des Antriebssystems ist ein wesentlicher Teil von Effizienzanalysen, lässt allein aber nur wenig Rückschlüsse auf die Effizienz des Antriebssystems unter Einsatzbedingungen der mobilen Maschine zu. Insbesondere bei Antrieben mit mehreren Funktionen treten vielfältige Leistungsanforderungen mit unterschiedlichen Zeitanteilen auf, die Analysen zur Einsatzprofilbeschreibung erfordern.

Um den Umfang der Analysen gering zu halten, die Aussagekraft aber nicht zu verringern, sind die relevanten Funktionen des Antriebs zu identifizieren. Dies sind Funktionen, die kontinuierlich oder häufig betätigt werden. Im Gegensatz dazu können Funktionen, die nur selten im Maschineneinsatz betä-

tigt werden und geringe Leistungsanforderungen aufweisen, vernachlässigt werden.

Für die identifizierten Funktionen sind die zugehörigen Leistungsanforderungen und Zeitanteile zu bestimmen. Dabei hat der Maschinentyp einen wesentlichen Einfluss. Antriebe von Radladern und Gabelstaplern sind aufgrund ihrer Arbeitsaufgaben ständig wechselnden Leistungsanforderungen ausgesetzt. Um die Effizienz unter solchen Bedingungen bewerten zu können, entwickelte Deiters [5] eine Methode. Andere Maschinen, wie z. B. Mähdrescher und Feldhäcksler, weisen hingegen Arbeitstätigkeiten mit typischen Betriebspunkten auf, die vereinfachend als quasi-stationär betrachtet werden können. Die Anzahl dieser Betriebspunkte hängt vom betrachteten Antrieb und der Maschine selbst ab.

Weiterhin haben die Umgebungsbedingungen, insbesondere bei Erntemaschinen, einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsanforderungen und Zeitanteile. Diese resultieren u. a. aus der Ernte unterschiedlicher Fruchtarten und aus unterschiedlichen Erntebedingungen aufgrund von Witterung und geographischen Gegebenheiten. Zur Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren ist die Spezifikation von mehreren Einsatzprofilen sinnvoll. Um den erforderlichen Datenbedarf decken zu können, erlangen Condition-Monitoring-Systeme sowie Telemetrie-Systeme, wie z. B. das von Hamacher [6] vorgestellte Claas Telematics, neben ausführlichen Versuchsmessungen eine immer größere Bedeutung. Die durch diese Systeme verfügbare Datenbasis ermöglicht die Analyse der typischen Betriebsbedingungen und deren Zeitanteile im Kundeneinsatz und damit die Spezifikation verschiedener Einsatzprofile. Diese bilden die Grundlage für aussagekräftige Effizienzanalysen und für die Bewertung der Antriebe.

Ein Einsatzprofil für das Arbeitshydrauliksystem im Claas Lexion 600 zeigt **Tabelle 1**. Diese gibt die als relevant identifizierten Hauptfunktionen wieder, die neben den dauerhaften Nebenverbrauchern berücksichtigt werden, sowie das Ergebnis der Analyse von typischen Betriebspunkten samt aktiven Funktionen. Die zugehörigen Zeitanteile sind beispielhaft für die Weizenernte in Mecklenburg-Vorpommern in 2009 angegeben. Je nach Einsatzprofil können beispielsweise die Zeitanteile für „Straße“ durch regionale Gegebenheiten um bis zu 50 Prozent variieren.

Tab. 1

Beispiel eines Einsatzprofils

Table 1: Example of a working condition profile

Betriebspunkte / Operation points		Hydraulikfunktionen / Hydraulic functions				Zeitanteile [%] / Duration [%]
Motor Engine	Hydraulik hydraulic	Schneidwerk cutterbar	Auslaufrohr unloading auger	Radialverteilerbleche radial spreader plates	Lenkung steering	Beispiel example
Unter Last On-load running	Straße / street				aktiv / active	9,13
	Feld / field			schwenken / swivelling	aktiv / active	14,18
	Schneidwerk heben cutterbar lifting	heben lifting		schwenken / swivelling	aktiv / active	0,67
	Schneidwerk CAC cutterbar CAC	auto contour auto contour		schwenken / swivelling	aktiv / active	64,94
	Auslaufrohr 1 unloading auger 1	auto contour auto contour	ausschwenken swivelling out	schwenken / swivelling	aktiv / active	1,33
	Auslaufrohr 2 unloading auger 2	auto contour auto contour	einschwenken swivelling in	schwenken / swivelling	aktiv / active	1,33
Leerlauf Idle running	Straße / street					5,61
	Feld / field			schwenken / swivelling	aktiv / active	2,15
	Auslaufrohr 1 unloading auger 1		ausschwenken swivelling out	schwenken / swivelling	aktiv / active	0,33
	Auslaufrohr 2 unloading auger 2		einschwenken swivelling in	schwenken / swivelling	aktiv / active	0,33

### Effizienzanalyse und Bewertung – Ergebnisse der Beispielsysteme

Auf Basis von Simulationsmodellen wird eine aussagekräftige Effizienzanalyse erst in Verbindung mit Einsatzprofilen möglich. Dadurch können die Betriebspunkte und Funktionen mit den höchsten Verlustleistungen einerseits und mit den höchsten Energieverlusten andererseits identifiziert werden. Der Unterschied dieser beiden Betrachtungsweisen besteht in der Relevanz für die Gesamteffizienz des Antriebs im Maschineneinsatz. Ein Betriebspunkt mit hoher Verlustleistung aber geringem Zeitanteil kann z. B. insgesamt gesehen relativ geringe Energieverluste aufweisen. Im Hinblick auf Antriebe mit unterschiedlichen Funktionen und den zugehörigen Leistungsanforderungen ist weiterhin ein hoher Funktionswirkungsgrad nicht gleichbedeutend mit niedrigen Verlustleistungen und umgekehrt. Daher bilden die Einsatzprofile den entscheidenden Faktor, um Antriebssysteme von mobilen Maschinen auf Basis von Verlustenergien über der Maschinenlebensdauer analysieren und bewerten zu können.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Effizienzanalyse für die beiden Beispielsysteme vorgestellt. **Abbildung 2** zeigt die Analyse zum vorherigen Arbeitshydrauliksystem auf Basis des Einsatzprofils für die Weizenernte in Mecklenburg-Vorpommern in 2009. Das Tortendiagramm links gibt die Energieverlustanteile der einzelnen Betriebspunkte über dem Einsatzprofil wieder. Dabei wird deutlich, dass der Betriebspunkt „Schneidwerk CAC“ den entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Antriebs hat. Dieses Ergebnis ist u. a. auf die Zeitanteile zurückzuführen (**Tabelle 1**). Das Balkendiagramm rechts stellt die Verlustanteile der Funktionen und Baugruppen im Betriebs-

punkt „Schneidwerk CAC“ dar. Dominierend sind die Verluste im Hauptventilblock, der aus dem Umlaufsperrventil und dem Druckbegrenzungsventil (**Abbildung 1**, Nummer 2) besteht. Und dies obwohl durch das Konstantdruck-Subsystem die Dauer des aktivierten Sperrumlaufventils deutlich verringert ist. Folglich ist für eine weitere Effizienzsteigerung der Wechsel zu einem anderen Hydrauliksystem erforderlich.

Die Ergebnisse für das gleiche Einsatzprofil des neuen Arbeitshydrauliksystems zeigt **Abbildung 3**, wobei im Tortendiagramm zusätzlich die Einsparung der Verlustenergie gegenüber dem vorherigen System dargestellt ist. Diese beträgt je nach Einsatzprofil zwischen 21 und 45 Prozent und ist der entscheidende Faktor bei der Effizienzbewertung. Weiterhin wird deutlich, dass ebenfalls der Betriebspunkt „Schneidwerk CAC“ am relevantesten ist. Die weiterreichende Analyse dieses Betriebspunkts im Balkendiagramm verdeutlicht, dass die Verstellpumpe den größten Einfluss auf die Verluste hat. Weitere Ideen zur Effizienzsteigerung des Systems bestehen und werden derzeit untersucht und bewertet.

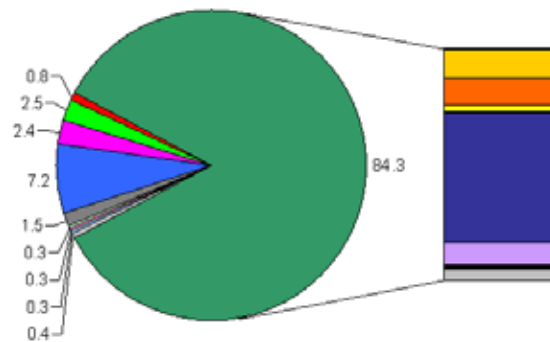
### Schlussfolgerungen

Die Modellierung von Antriebssystemen ist hilfreich, um die Effizienz von Antrieben mobiler Maschinen zu analysieren. Jedoch ermöglicht die Simulation erst in Verbindung mit zu spezifizierenden Einsatzprofilen aussagekräftige Analysen und Bewertungen auf Basis von Energieverlusten. Die z. B. aufgrund von regionalen Gegebenheiten unterschiedlichen typischen Betriebsbedingungen von mobilen Maschinen, können durch die Spezifikation mehrerer Einsatzprofile berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieser Aspekte ermöglicht eine funda-

Abb. 2

Betriebspunkte  
operational points

□	Leerlauf Straße / idle street
□	Leerlauf Feld / idle field
□	Leerlauf Auslaufrohr 1 / idle unloading auger 1
□	Leerlauf Auslaufrohr 2 / idle unloading auger 2
□	Straße / street
□	Feld / field
□	Auslaufrohr 1 / unloading auger 1
□	Auslaufrohr 2 / unloading auger 2
□	Schneidwerk heben / cutterbar lifting
□	Schneidwerk CAC / cutterbar CAC



Funktionen und Baugruppen  
functions and modules

■	Schneidwerk auto contour / cutterbar auto contouring
■	Auslaufrohr schwenken / unloading auger swivelling
■	Lenken / steering
■	Radialverteilerbleche schwenken / radial spreader plates swivelling
■	Nebenverbraucher / auxiliary consumers
■	Kühlung / cooling
■	Hauptventilblock / main valve block
■	Hauptpumpe / main pump
■	1. Zahnradpumpe / 1st gear pump
■	2. Zahnradpumpe / 2nd gear pump

Energieverluste über dem Einsatzprofil  
Energy losses of the working condition profile

Energieverluste für Schneidwerk CAC  
Energy losses of cutterbar CAC

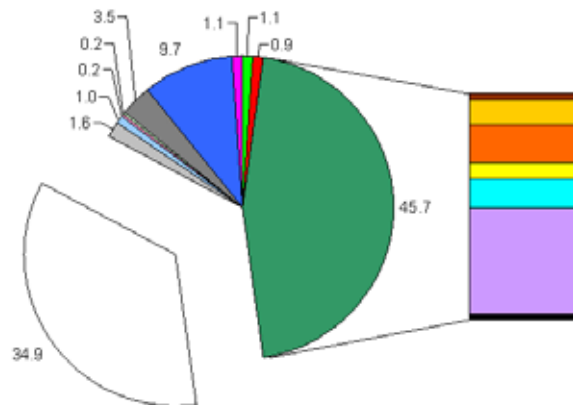
Effizienzanalyse für das vorherige Hydrauliksystem

Fig. 2: Efficiency analysis of the previous hydraulic system

Abb. 3

Betriebspunkte  
operational points

□	reduzierte Energieverluste / reduced energy losses
□	Leerlauf Straße / idle street
□	Leerlauf Feld / idle field
□	Leerlauf Auslaufrohr 1 / idle unloading auger 1
□	Leerlauf Auslaufrohr 2 / idle unloading auger 2
□	Straße / street
□	Feld / field
□	Auslaufrohr 1 / unloading auger 1
□	Auslaufrohr 2 / unloading auger 2
□	Schneidwerk heben / cutterbar lifting
□	Schneidwerk CAC / cutterbar CAC



Funktionen und Baugruppen  
functions and modules

■	Schneidwerk auto contour / cutterbar auto contouring
■	Auslaufrohr schwenken / unloading auger swivelling
■	Lenken / steering
■	Radialverteilerbleche schwenken / radial spreader plates swivelling
■	Nebenverbraucher / auxiliary consumers
■	Kühlung / cooling
■	Hauptpumpe / main pump
■	1. Zahnradpumpe / 1st gear pump

Energieverluste über dem Einsatzprofil  
Energy losses of the working condition profile

Energieverluste für Schneidwerk CAC  
Energy losses of cutterbar CAC

Effizienzanalyse für das neue Hydrauliksystem

Fig. 3: Efficiency analysis of the new hydraulic system

mentierte Entscheidungsbasis für oder wider die Entwicklung und Einführung von optimierten und neuen Antriebskonzepten. Durch das Ausweiten auf alle Antriebe einer Maschine wird das Analysieren und Bewerten einer ganzen Maschine möglich.

## Literatur

- [1] Rahmfeld, R.; Skirde, E. (2010): Efficiency Measurement and Modeling – Essential for Optimizing Hydrostatic Systems. 7<sup>th</sup> International Fluid Power Conference – Efficiency through Fluid Power, IFAS der RWTH Aachen, 22–24 March 2010, Aachen, Vol. 3, pp. 53–66
- [2] Kohmäscher, T. (2008): Modellbildung, Analyse und Auslegung hydrostatischer Antriebstrangkonzepte. Aachen, Shaker Verlag, Reihe Fluidtechnik, Band 51
- [3] Lang, T. (2011): Hydraulische Antriebstechnik in mobilen Maschinen. Aachen, Shaker Verlag
- [4] Hohlfeld, M.; Strieker, N.; Stiller, T. (2007): New Hydraulic Features for a Forage Harvester. Tagung LAND. TECHNIK AgEng 2007, VDF-MEG, 09–10 November 2007, Hannover, pp. 161–166
- [5] Deiters, H. (2009): Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen. Aachen, Shaker Verlag
- [6] Hamacher, H. (2007): Telematics – Maximum combine capacity over the whole season, Using Internet technology on combines to manage the harvest. Tagung LAND. TECHNIK AgEng 2007, VDF-MEG, 09–10 November 2007, Hannover, pp. 387–391

## Autoren

**Dipl.-Ing. Thomas Fleczonek** ist wiss. Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig (kommissarischer Institutsleiter: **Prof. Dr. T. Lang**),

**Prof. i. R. Dr.-Ing. Dr. h. c. H.-H. Harms** ist ehemaliger Institutsleiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig,

**Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang** ist kommissarischer Institutsleiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig,

Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig

E-Mail: t.fleczonek@tu-bs.de,

<http://www.tu-braunschweig.de/ilf>

## Danksagung

Die Autoren danken der Firma Claas Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Harsewinkel, Deutschland, für die finanzielle und fachliche Unterstützung sowie die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojekts.