

Rückgewinnung potentieller Energie in der Mobilhydraulik

Richard Käsler, Weber Hydraulik GmbH, 74363 Güglingen

Konrad Stingl, LOG Hydraulik GmbH - ein Unternehmen der Weber Hydraulik
Gruppe, 84051 Unterahrain

Sebastian Riedmaier, Jungheinrich Moosburg GmbH, 85368 Moosburg

Hybridantriebe sind in aller Munde. Auch bei mobilen Arbeitsmaschinen setzt sich das Konzept zur Rückgewinnung kinetischer Energie durch. Völlig neu ist aber der Ansatz, auch die Lasten in mobilen Arbeitsmaschinen und Flurförderfahrzeugen, wie z.B. Gabelstaplern, zur Energierückgewinnung zu nutzen. Am Beispiel des innovativen Elektro-Kommissionier-/Dreiseitenstaplers EKX von Jungheinrich zeigt sich, dass mit einer intelligenten Hubmaststeuerung bis zu 35 % der über die Hubarbeit eingebrachten Energie zurückgewonnen werden kann. Der Maschinenhersteller hat hierfür gemeinsam mit einem Entwicklungspartner ein spezielles System entwickelt.

1. Einleitung

Bremsvorgänge bei mobilen Arbeitsmaschinen für die Rückgewinnung der kinetischen Energie über Hybridantriebe zu nutzen, erweist sich als logische Konsequenz bei der Optimierung der Energieeffizienz. Vergleichbare Einsparpotentiale bietet die Energierückgewinnung aus der potentiellen Energie, die über die Hubarbeit in den eingelagerten Lasten steckt und bei mobilen Arbeitsmaschinen wieder gewonnen werden kann. Vor dem Hintergrund des stetigen Anstiegs der Energiekosten kommt der Energierückgewinnung, welche neben der kinetischen auch die potentielle Energie einschließt, steigende Bedeutung zu.

	Einheit	EFG D30	EKX 515 DZ	EKS 310 DZ
Tragfähigkeit/ Last	Tonne	3,0	1,5	1,0
Gesamthub	mm	1.000	4.000	3.500
Hubmotor / Elektro	kW	24	24	9,5
Fahrgeschwindigkeit	km/h	20,0	10,5	8,8
Hubgeschwindigkeit	m/s	0,50	0,47	0,32
Senkgeschwindigkeit	m/s	0,56	0,45	0,34

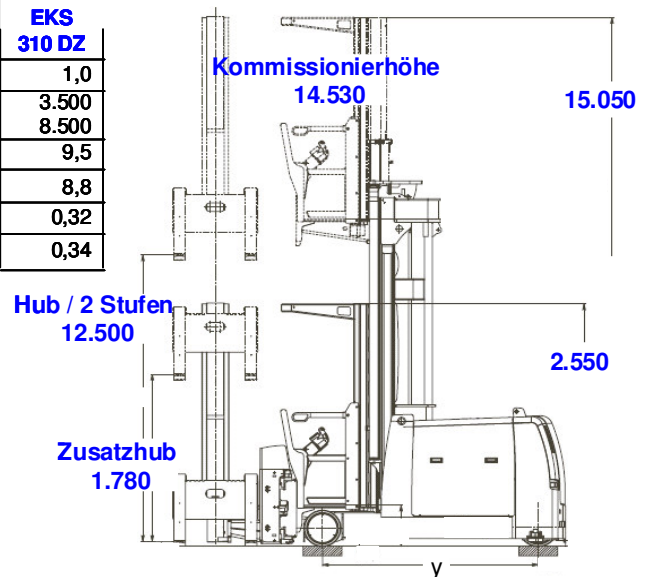


Abb. 1: Leistungsdaten von Staplern (Gegengewichtsstapler, Hochregalstapler und Vertikalkommissionierer) im Vergleich

Bei der potentiellen Energie handelt es sich um diejenige Energie, welche ein Körper durch seine Position oder Lage im Erdanziehungsfeld erhält. Diese Energie lässt sich besonders dann sinnvoll zurückgewinnen, wenn eine Maschine die Lage des Körpers häufig ändert, wie es z.B. bei Gabelstaplern und auch einer Vielzahl weiterer Arbeitsmaschinen der Fall ist.

Gabelstapler sind fördertechische Maschinen (**Abb.1**), die aus dem logistischen Prozess eines Unternehmens heute nicht mehr wegzudenken sind. Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwischen verbrennungsmotorisch und elektrisch angetrie-

ben Staplern. Je nach Antriebsart haben sich heute unterschiedliche Systeme in den Staplern durchgesetzt: elektrisch angetriebene Stapler besitzen in der Regel einen drehzahlgeregelten Konstantpumpenantrieb und eine elektrohydraulische Hubmaststeuerung. Das Antriebskonzept eignet sich ideal für die angestrebte Energierückgewinnung. Verbrennungsmotorisch betriebene Stapler besitzen hingegen einen hydrostatischen oder hydrodynamischen Fahrantrieb mit automatischem Lastschaltgetriebe. Die Arbeitshydraulik ist herstellerspezifisch sowohl mit Konstantpumpen, als auch Verstellpumpen ausgestattet. Unter dem Aspekt der Energierückgewinnung wäre bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Staplern grundsätzlich die Verwendung von Verstellpumpen vorteilhaft.

Neben den Gegengewichtsstaplern (EFG – Elektrostapler / DFG – Diesel- und Treibgasstapler) und Schubmaststaplern werden im Bereich der Warenkommissionierung die Horizontal- und Vertikalkommissionierer EKS mit Kommissionierhöhen bis zu 10.390 mm eingesetzt. Darüber hinaus finden Hochregalstapler für alle Hochregalsegmente bis zu 14.570 mm Kommissionierhöhe ihre Anwendung. Bestes Beispiel hierfür ist der EKX, der als "Man-up"-Fahrzeug das Ein-/Ausstapeln ganzer Paletten mit dem Kommissionieren einzelner Artikel kombiniert (**Abb. 1**).



Im Rahmen des Beitrags sollen die Möglichkeiten zur Rückgewinnung der Lage- bzw. Hubenergie dargestellt und diskutiert werden. In einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt haben hier Maschinenhersteller und Entwicklungspartner ein solches System zur Rückgewinnung potentieller Energie aus Hebevorgängen für die neue Baureihe EKX und EKS Elektro-Kommissionierstapler (**Abb. 2**) entwickelt.

Abb. 2: Der neue EKX von Jungheinrich verfügt als erster Elektro-Kommissionierstapler über ein System zum Nutzsenken

Die Staplertechnologie der Lager- und Systemgeräte hat sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt. Neben der Energierückgewinnung zählen zu den Kernpunkten der Neuentwicklungen beim Hochregalstapler: die Steuerung der Fahrzeuge mittels RFID-Technologie und die Erhöhung der Resttragfähigkeit durch aktive Sicherheitssysteme. Die Tragfähigkeit der Hochregalstapler beträgt heute 1.500 kg bei Hubhöhen von bis zu 15m. Darüber hinaus konnte die Hubgeschwindigkeit auf bis zu 0,5 m/s und die Fahrgeschwindigkeit auf bis zu 12 km/h gesteigert werden.

2. Energiespeicher

Basis für die Auslegung und Optimierung des Systems zur Rückgewinnung der Hubenergie war die grundlegende Analyse möglicher Energiespeicher. Die bei der Hubarbeit von Staplern aufgebrauchte Energie, die es zurückzugewinnen gilt, beträgt bereits ohne Berücksichtigung des Hubgerüsts bei einer Last von 1.000 kg und 10 m Hubhöhe ca. 100 kWs bzw. 27 Wh. Im Vergleich dazu können bei einem Fahrzeug mit 3.000 kg Gesamtgewicht, das aus 30 km/h abgebremst wird, ebenfalls ca. 105 kWs zurückgewonnen werden.

Speicher mit hoher Energiedichte sind z.B. elektrische Batterien (Bleiakkumulatoren) mit Werten von bis zu 100 Wh/kg. Hydrospeicher haben besonders hohe Leistungsdichten, die Energiedichten liegen jedoch im Bereich von nur 1 Wh/kg. In der vorliegenden Anwendung, die hohe Energiedichten erfordert, wären somit Hydrospeicher von bis zu 50 Litern erforderlich, um die Energie des obigen Hubvorgangs zu speichern. Da die vorliegende Staplerbaureihe elektromotorisch angetrieben wird, lag es nahe, die Staplerbatterie mit 20 kWh auch als Speicher für die rückgewonnene Energie zu nutzen.

3. Die Last als Energiequelle genutzt - Systemwirkungsgrade

Zur Rückgewinnung der Hubenergie wurde folgender Systemaufbau entwickelt (**Abb. 3**). Die Staplerbatterie als Energiequelle und Energiespeicher speist einen frequenzgeregelten Drehstrommotor, der die Konstantpumpe (Außenzahnradpumpe) antreibt. Die erzeugte hydraulische Leistung wird über einen Ventilblock zur Hubmaststeue-

rung auf den Hubmastzylinder übertragen. Der Zylinder wandelt die hydraulische Leistung in mechanische Hubenergie um. Die im Regal positionierte Masse besitzt schlussendlich die zwischengespeicherte potentielle Energie. Beim Senken wird mit diesem System erstmals die Nutzlast bzw. im Leerzustand das Eigengewicht des Hubgerüsts als Energiequelle genutzt. Die in das System eingebrachte potentielle Energie wird über das Hydrauliksystem und die Pumpe, die jetzt den Motor als Generator betreibt, als elektrische Energie in die Batterie zurückgespeist.

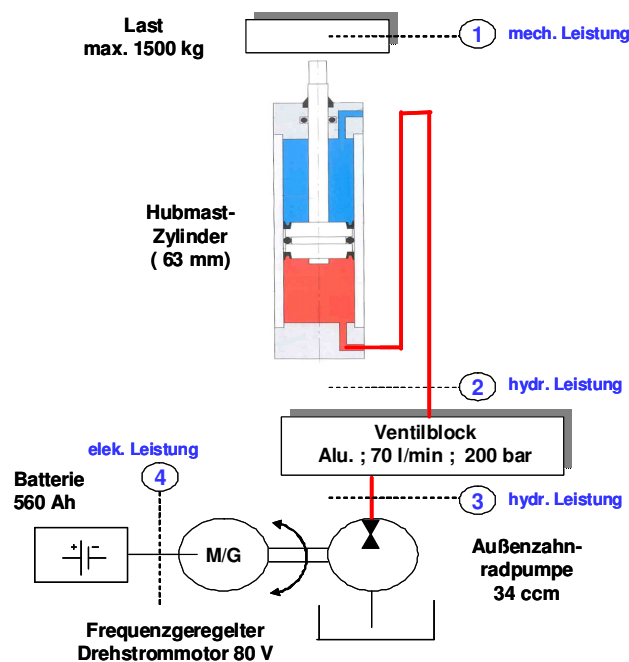


Abb. 3: Mit dem System wird die mechanische Energie, die in einem ausgefahrenen Hubgerüst mit oder ohne Last steckt, als elektrische Energie zurückgewonnen.

Welche Rückgewinnungspotentiale in dieser faszinierend einfachen Systemlösung stecken, zeigt die Abbildung 4. In diesem Diagramm sind die Wirkungsgrade dargestellt, die bei der Energiewandlung beim Heben und über die Rückgewinnung beim Senken – mit Last als gelbe Balken und ohne Last als blaue Balken – realisiert werden. Die von der Stapler-Batterie eingebrachte elektrische Leistung bildet mit 100 % die Ausgangsbasis. Die Umformung in hydraulische Leistung über die Pumpe erfolgt weitgehend lastunabhängig und besitzt einen Wirkungsgrad von ca. 70 %. Das weitere hydraulisch-mechanische System hat weitgehend unabhängig von der Last einen Druckverlust von im Mittel 25 bar. Dadurch ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Druckniveaus geringere Wirkungsgrade beim Heben ohne Last ($\eta = 0,8$ mit Last

und $\eta = 0,7$ ohne Last). Ohne Energierückgewinnung dissipiert die in das System eingebrachte Energie beim Senken bisher völlig nutzlos. Mit dem innovativen Energierückgewinnungssystem können beim Senken bei ähnlichen Druckverlusten folgende Wirkungsgrade realisiert werden ($\eta = 0,85$ mit Volllast bzw. ohne Last $\eta = 0,7$). Der Wirkungsgrad der Motor-/Pumpeneinheit ist im generatorischen Betrieb stark lastabhängig und liefert Wirkungsgrade von $\eta = 0,7$ bei Volllast und $\eta = 0,5$ beim Senken ohne Last (**Abb. 4**). Dabei kommt dem System beim Senken ohne Last das relativ hohe Eigengewicht des Gerüsts zugute.

Die zurückgewonnene, elektrische Energie wird in der Regel zeitgleich für andere Funktionen genutzt und nur selten direkt in die Staplerbatterie eingespeist. Das heißt, wenn beim Absenken gleichzeitig gefahren wird, nutzt man die Senkenergie direkt für den Fahrmotor und muss dafür keine Energie aus der Batterie ziehen. Der Wirkungsgrad der Batterie bleibt deshalb bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

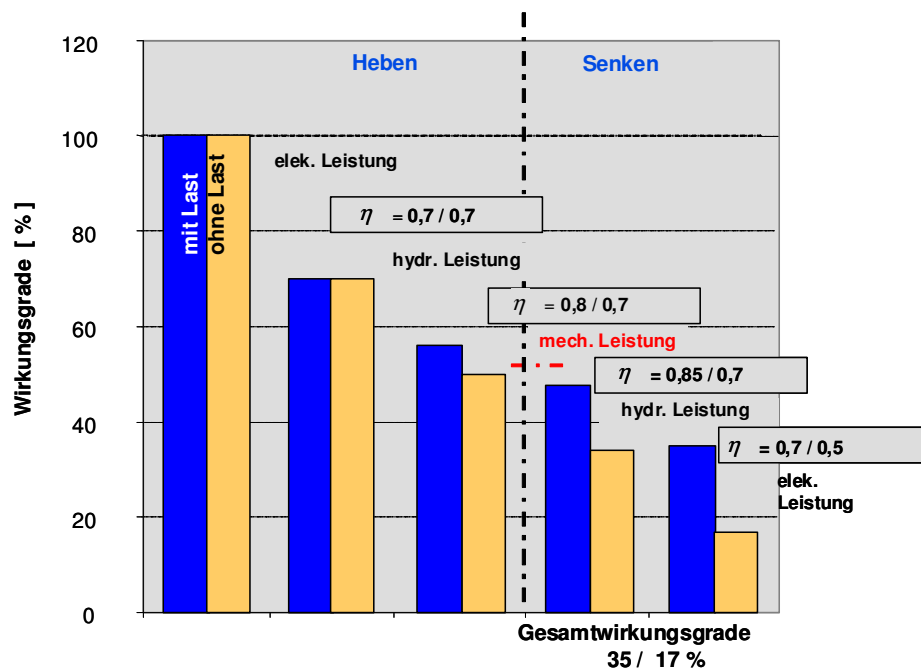


Abb. 4: Bis zu 35 % der zum Heben eingebrachten Energie wird mit dem System zum Nutzsenken wieder gewonnen.

Mit Energierückgewinnungssystem werden auf diese Weise 35 % der eingesetzten Energie bei Volllast, bzw. 17 % beim Senken ohne Last zurückgewonnen. Mit diesem sogenannten Nutzsenken sind in einem normalen Arbeitszyklus also rund 30 %

Energieeinsparungen möglich. Damit liegen die Energieeinsparpotentiale durch das Nutzsinken im Rahmen der Potentiale, die sich beim regenerativen Bremsen aus der kinetischen Energie realisieren lassen - diese liegen gemäß aktuellen Studien bei 15 % bis 30 %.

Lager- und Systemfahrzeuge sind dabei für die Nutzung der Senkenergie prädestiniert, weil mit ihnen große Hubhöhen realisiert werden (bis zu 15m) und die Rückspeisungsphasen bis zu 30 Sekunden andauern. Darüber hinaus wird auch das komplette Hubgerüst und der Fahrerplatzträger (Gewicht ca. 700kg) permanent gehoben und gesenkt. Beide liefern einen erheblichen Gewichtsanteil und verbessern den Wirkungsgrad insbesondere beim Leersinken. Bei Gegengewichtsstaplern hat sich bisher noch keine Nutzsenkung durchgesetzt, da die Hubhöhen meist unter 3 m liegen und die Senkphasen relativ kurz sind.

4. Weitere Potentiale beim Nutzsinken

Weitere Potentiale von bis zu 10 % lassen sich durch die Optimierung des mechanischen Wirkungsgrades im Hubgerüst sowie durch die Minimierung der Schlauchverluste realisieren. Letztere liefern bei Schlauchlängen von über 15 m einen erheblichen Beitrag. Die Motorpumpeneinheit ist unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte mit einem vertretbaren Wirkungsgrad ausgestattet. Der Steuerungsblock wurde auf der Basis langjähriger Erfahrungen extrem druckverlustarm gestaltet. Dabei kam der Gestaltung der Funktionsbohrungen, der kompakten Bauweise und der Verwendung abgestimmter Ventile die maßgebliche Bedeutung zu. Ein eingangs durchgeführtes Benchmarking verschiedener Steuerblockkonstruktionen verdeutlichte die möglichen Potentiale bei der Gestaltung von Steuerblöcken (**Abb. 5**). In diesem Rahmen wurden Steuerblockvarianten mit gleicher Funktionalität verglichen, dabei konnten erhebliche Unterschiede mit Druckverlusten zwischen 3 und 24 bar analysiert werden.

Bei verbrennungsmotorisch betriebenen, mobilen Arbeitsmaschinen und Flurförderfahrzeugen bietet sich die Zwischenspeicherung der hydraulischen Energie im Hydrorpeicher an. Dieser Ansatz erfordert recht große Speicher und eine zusätzliche

Durch die enge und partnerschaftliche Zusammenarbeit wurde für die neuen Elektro-Kommissionierstapler ein System zur Rückgewinnung von Hubenergie realisiert, das neue Maßstäbe für effektives Energiemanagement und hohe Wirtschaftlichkeit setzt.

Hervorzuheben ist, dass durch die Verbesserung der Energie-Effizienz mit dem Hochregalstapler heute selbst Hochleistungseinsätze mit bis zu 2 Schichten ohne Batteriewechsel gefahren werden. Das ist ein echter Kostenvorteil, man spart eine Wechselbatterie, die Wechseleinrichtung und natürlich auch die Zeit für den Batteriewechsel. Darüber hinaus spart man auch Energiekosten in nicht unerheblichem Maße. Eine Übersicht über den Energieverbrauch von Systemfahrzeugen der Generationen von 1987 bis 2007 verdeutlicht, dass heute für die gleiche Arbeit nur noch die Hälfte der Energie als vor 20 Jahren benötigt wird. Ein entscheidender Punkt dabei ist die Nutzsenkung.

6. Literatur

- /1/ VDI-Richtlinie 3586: Flurförderfahrzeuge, Begriffe, Kurzzeichen; Regalbedien-
geräte; VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Band 2, VDI-Verlag
2006
- /2/ Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen, Informationstagung des VDMA
und der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2007.
- /3/ Mittwollen, M.: Untersuchungen der Schwingungseigenschaften von teles-
kopierbaren Maschinenelementen mit Spiel am Beispiel eines Gabelstapler-
Hubgerüsts; Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und
Logistiksysteme der Universität Karlsruhe, Band 68, 2006
- /4/ Murrenhoff, H.: Grundlagen der Fluidtechnik, Vorlesungsmanuskript Teil 1
Hydraulik, IFAS Reihe Fluidtechnik, Shaker Verlag 2007
- /5/ Rühlicke, I.: Elektrohydraulische Antriebssysteme mit drehzahlveränderbarer
Pumpe, Dissertation, Institut für Fluidtechnik der technischen Universität Dres-
den, Dresden 1997
- /6/ Jungheinrich Moosburg GmbH, Diverses Informationsmaterial und Produktin-
formationen zu Gabelstaplern, www.Jungheinrich.de, 2007