

Das hydrostatisch regenerative Bremssystem von Rexroth

Dr.-Ing. Matthias Beck

Dr. rer. nat. Christine Ehret

Dr.-Ing. Markus G. Kliffken

Bosch Rexroth AG, Elchingen

1 Einleitung

Die Bedeutung der Faktoren Umwelt, Energie, Funktion und Kosten wird für die Mobilhydraulik immer größer. Mit dem Hydrostatisch Regenerativen Bremssystem von Rexroth, kurz HRB, zeigt dieser Beitrag eine technische Lösung zur sinnvollen Verbindung dieser Faktoren am Beispiel von Gabelstaplern. Grundidee ist, die kinetische Energie im Fahrtrieb eines Staplers mit hydrostatischem Antrieb beim Bremsen nicht zu vernichten, sondern in hydraulischen Speichern zwischenzuspeichern. Bei der nächsten Beschleunigung wird die gespeicherte Energie wieder in den Fahrtrieb eingespeist und entlastet so die antreibende Verbrennungskraftmaschine. In dieser Kombination trägt das HRB-System zur Einsparung von Kraftstoff und Energie, zur Erhöhung der Umschlagsleistung und gleichzeitig zur Schonung der Umwelt bei /1/, /2/.

2 Abgrenzung elektrischer und hydraulischer Hybridantrieb

Das HRB-System ist im Grunde ein Hybrid-System, indem es einen zusätzlichen Energiespeicher an den vorhandenen hydrostatischen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor anbindet. Darin ist es einem elektrischen Hybrid ähnlich, der eine zusätzliche Batterie und eine Kombination von Elektromotor und -generator an den Antriebsstrang ankoppelt. Der Hybridantrieb im allgemeinen eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade, die heute vorrangig zur Kraftstoffeinsparung genutzt werden sollen:

- Speicherung der auftretenden Bremsenergie in dem Energiespeicher und Nutzung der Energie beim Fahren
- Lastpunktanhebung der Verbrennungsmotor zur Erreichung eines besseren Wirkungsgrades und Speicherung der überflüssigen Energie. Anschließende

Nutzung der gespeicherten Energie beim Fahren ohne Verbrennungsmotor oder zum Abdecken von Leistungsspitzen

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Komponenten im elektrischen und hydraulischen Hybridantrieb, insbesondere der Batterien gegenüber den hydraulischen Speichern können die obigen Potentiale zur Verbrauchsreduzierung unterschiedlich gut genutzt werden. Beim elektrischen Hybrid verfügen die Batterien über eine geringe Leistungsdichte. Große Brems- und Anfahrleistungen können aufgrund des Innenwiderstands bei sinnvollen Baugrößen der Batterie in einem Stapler mit Verbrennungsmotor nicht in der Batterie gespeichert beziehungsweise aus der Batterie abgefordert werden. Zudem verringert eine zyklische Auf- und Entladung die Lebensdauer stark. Elektrische Batterien verfügen jedoch über eine große Energiedichte und können langsam und kontinuierlich große Mengen Energie bezogen auf Ihre Baugröße speichern.

Beim hydraulischen Hybrid hingegen bieten hydraulische Blasenspeicher deutliche Vorteile gegenüber den elektrischen Batterien in Bezug auf die Leistungsdichte. Die auftretende Bremsleistung kann selbst bei großen mobilen Arbeitsmaschinen und starken Verzögerungen in einem hydraulischen Blasenspeicher aufgenommen werden. Gegenüber elektrischen Batterien besitzen hydraulische Speicher jedoch eine geringe Energiedichte. Übliche Baugrößen erlauben die Speicherung der Bremsenergie eines Fahrzeugs, im allgemeinen jedoch keine zusätzliche, kontinuierliche Speicherung ungenutzter Dieselleistung.

Daraus ergeben sich für Fahrzeuge mit elektrischen und hydraulischen Hybridantrieben unterschiedliche Betriebsstrategien, beziehungsweise eignen sich diese Konzepte für unterschiedliche Fahrzeugkategorien

- Elektrischer Hybrid: Fokus auf Lastpunktanhebung der Verbrennungsmotor und Speicherung der kontinuierlich erzeugten Energie zur Nutzung für rein elektrischen Fahrantrieb oder zur Abdeckung von Leistungsspitzen. Eingeschränkt geeignet für Maschinen im zyklischen Umschlagsbetrieb da dort hohe Brems- und Anfahrleistungen auftreten. Vornehmlich geeignet für PKW-Anwendungen im moderaten Teillastverkehr, insbesondere großzügig motorisierte PKWs im europäischen oder nordamerikanischen Normzyklus.
- Hydraulischer Hybrid: Fokus auf Rekuperation der Bremsenergie. Sehr gut geeignet für mobile Arbeitsmaschinen mit hoher Umschlagsleistung, d.h.

hohen Brems- und Anfahrleistungen, wie zum Beispiel Flurförderfahrzeuge. Bei diesen Fahrzeugen steht die Umschlagsleistung im Vordergrund unter Ausnutzung der installierten Fahr- und Bremsleistung.

Der Zusammenhang wird in **Bild 1** veranschaulicht. In den grün hinterlegten Abschnitten wird beim elektrischen Hybrid die überschüssige Leistung der Verbrennungsmotor in der Batterie gespeichert und in dem roten Abschnitt mit erhöhter Leistungsanforderung wieder eingesetzt. Anders hingegen beim hydraulischen Hybrid: Dort wird die Leistung der Bremsphase beim darauffolgenden Anfahrvorgang wieder eingesetzt. Aufgrund der hohen Leistungsdichte des hydraulischen Speichers können große Bremsleistungen mit einem hydraulischen System abgedeckt werden. Das HRB-System eignet sich daher hervorragend für alle mobilen Arbeitsmaschinen im zyklischen Betrieb und somit auch für Gabelstapler.

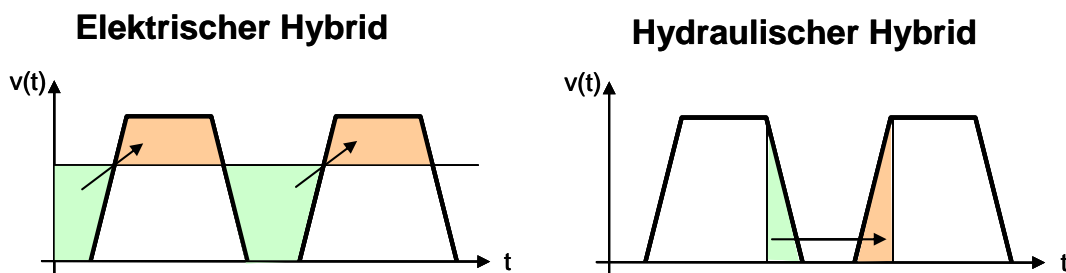


Bild 1: Abgrenzung hydraulischer und elektrischer Hybridantrieb

3 Das HRB-System für den hydrostatischen Fahrtrieb

Bild 2 zeigt den hydrostatischen Fahrtrieb in der Grundstruktur, bestehend aus einer Verbrennungsmotor, daran angeflanscht eine verstellbare Hydraulikpumpe, die mit einem verstellbaren Hydraulikmotor im geschlossenen Kreis hydraulisch verbunden ist. Die Verbindung zum Rad erfolgt über ein Radgetriebe.



Bild 2: Hydrostatischer Fahrtrieb in der Grundstruktur

Dieses System wird um einen HRB-Schaltblock und einen Hoch- und einen Niederdruckspeicher erweitert. **Bild 3** zeigt diese Kombination bei einem Bremsvorgang, bei dem der Speicher aufgeladen wird. Die Ventile auf dem Schaltblock werden derart betätigt, dass der Motor beim Bremsen das Öl aus dem Niederdruckspeicher in den Hochdruckspeicher fördert und sich dabei auf dem Hochdruckspeicher abstützt. Daraus resultiert ein Bremsmoment am Motor und Rad. Die Pumpe am Dieselmotor wird im Fördervolumen stark zurückgenommen um den Dieselmotor nicht im Schub anzutreiben, sondern die zur Verfügung stehende Energie in den Speicher zu laden. Das Bremsmoment ist einstellbar über das eingestellte Fördervolumen am Hydraulikmotor und damit an den Fahr- und Speicherladezustand anpassbar /3/, /4/.

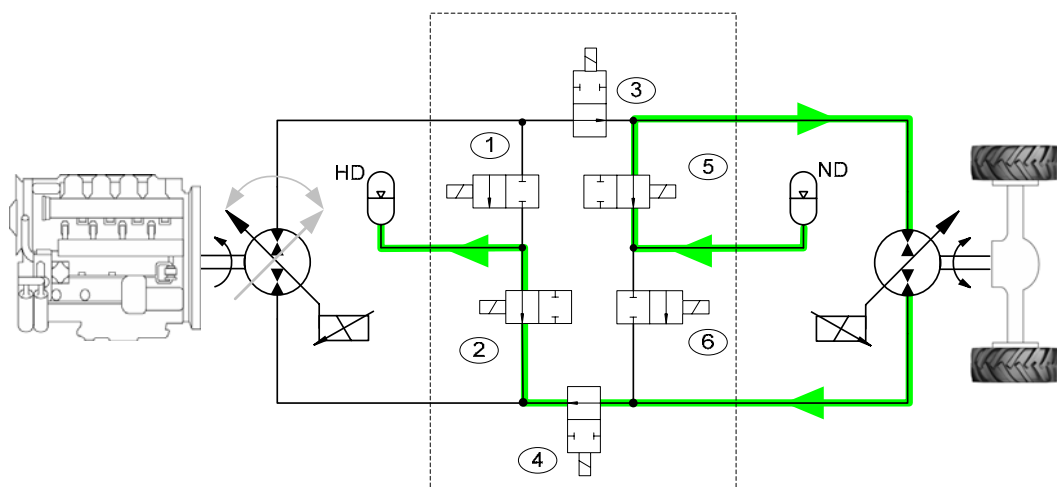


Bild 3: Hydrostatischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten im Bremsbetrieb

Bild 4 stellt das nachfolgende Anfahren dar. Die Ventile werden so verschaltet, dass der Druck aus dem Hochdruckspeicher auf die Saugseite der Pumpe geschaltet wird. Dadurch wird die Verbrennungsmotor im aufzubringenden Moment entlastet. Über die Einstellung von Motor- und Pumpenfördervolumen kann die Leistungsaufteilung zwischen der Verbrennungsmotor und dem hydraulischen Speicher wiederum an die jeweilige Fahrsituation und den Speicherladezustand angepasst werden.

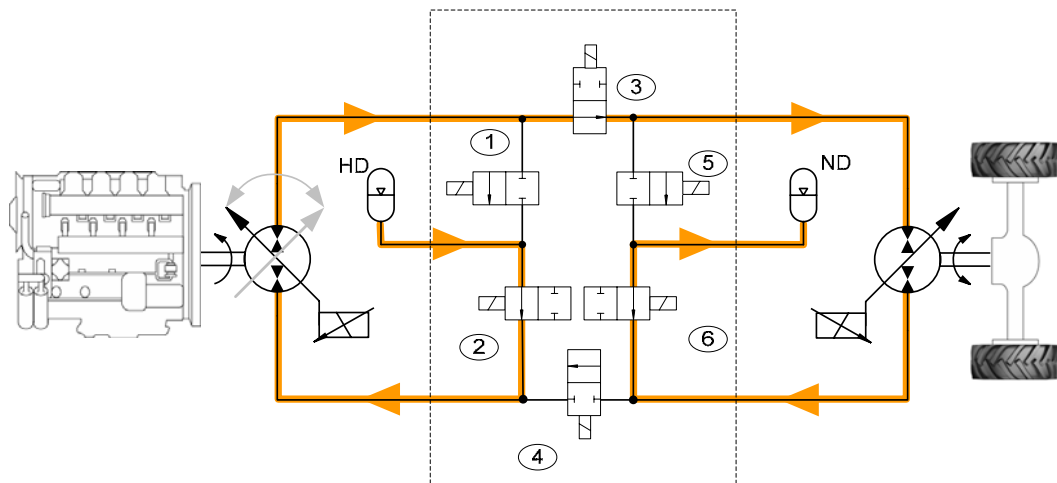


Bild 4: Hydrostatischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten beim Fahren aus dem HD-Speicher

Die Fahrmanöver in die entgegengesetzte Fahrtrichtung erfolgen analog.

Zusammenfassend ist eine wesentliche Voraussetzung zur Integration des HRB-Systems an einem hydrostatischen Stapler ein im Fördervolumen verstellbarer Hydraulikmotor an den Antriebsrädern im Unterschied zum heutigen Stand der Technik mit im Fördervolumen konstanten Motoren am Rad. Durch den Übergang auf Verstellmotoren mit einem Achsgetriebe können zudem die Pumpen kleiner dimensioniert werden was zu kleineren Volumenströmen im hydrostatischen Antrieb führt.

4 Das HRB-System am Gabelstapler

Tabelle 1 zeigt für drei unterschiedliche Staplergrößen eine geeignete Komponentenauswahl. Der maximal auftretende Volumenstrom über die betrachteten Staplergrößen hinweg kann mit einem kleinen Zwei-Wege-Schaltventil gut abgedeckt werden.

Tabelle 1: Übersicht der Baugrößen der HRB-Komponenten für unterschiedliche Staplerklassen

Staplerklasse	1,6 - 2 to	2 – 3,5 to	3,5 – 5 to
Eigengewicht [kg]	3000	4100	6350
Last [kg]	2000	2500	4500
Dieselleistung [kW]	29	45	54
Zugkraft [kN]	16	20	30
Verstellpumpe [ccm]	28	40	56
Verstellmotor [ccm]	55	80	140
Achsübersetzung	14	14	14
Q_{\max} [Ltr/min]	60	85	120
Nenngröße Schaltblock [mm]	16	16	16
Speichervolumen [Ltr]	6	10	12
Speichermaße ØxH [mm]	168 x 550	221 x 565	221 x 664

5 Abschätzung der Verbrauchersparnis mit HRB am Gabelstapler

Die Berechnung einer möglichen Verbrauchersparnis für eine mobile Arbeitsmaschine hängt in erster Linie vom angenommenen Fahrzyklus der Maschine ab. Es werden hier für den Gabelstapler drei Fahrzyklen betrachtet (vgl. hierzu auch **Bild 5**):

1. VDI-Zyklus: Zur Verbrauchsangabe und Vergleich von Staplern untereinander ist der sogenannte VDI-Zyklus nach VDI 2198 üblich. Bei diesem Zyklus wird jedoch der Stapler relativ langsam bewegt um den vorgegebenen Parcours in der vorgegebenen Zeit zu absolvieren. Daraus resultieren zwar geringe Verbräuche zur Angabe in den technischen Daten, jedoch auch nur ein geringes, kaum praxisrelevantes Einsparpotential.

2. TO-Zyklus: Ein ebenfalls bekannter Zyklus ist der Test-Zyklus der niederländischen Fachzeitschrift Transport+Opslag, kurz TO-Zyklus. Dort entfällt eine Zeitvorgabe und der Stapler wird an der Leistungsgrenze bewegt. Dieser Zyklus entspricht unserer Ansicht nach eher den Betriebsbedingungen in der Staplerpraxis.
3. „Sägezahn“-Zyklus: Eine obere Grenze der möglichen Verbrauchseinsparung ergibt sich in einem Sägezahn-Zyklus. Dabei wird der Stapler aufeinanderfolgend beschleunigt bis zur Maximalgeschwindigkeit und unmittelbar darauf abgebremst bis zum Stillstand. Im Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit stellt sich dies ähnlich einem Sägezahn dar. Mehr Verbrauchersparnis als in diesem Zyklus kann durch Rückgewinnung der Bremsenergie am Stapler nicht generiert werden.

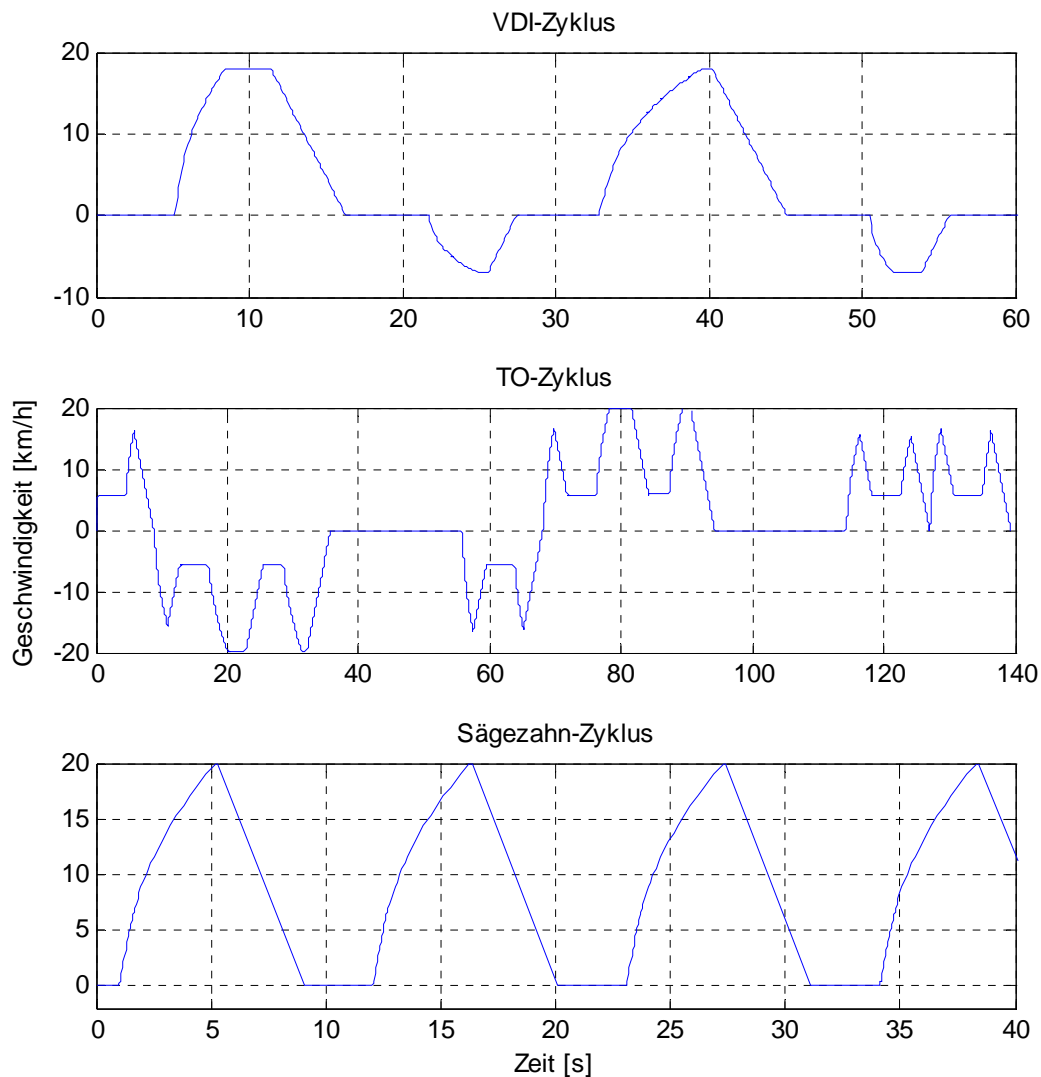


Bild 5: Fahrzyklen zur Bestimmung der Verbrauchersparnis

Tabelle 2 zeigt die berechneten Verbrauchersparnisse für die unterschiedlichen Staplerklassen. Die Verbrauchersparnis wird dabei in Litern pro Stunde angegeben und nicht in Prozent. Die Angabe der Ersparnis in Prozent erfordert bei der Berechnung eine genaue Kenntnis des Leistungsbedarfs aller Nebenverbraucher, einschließlich der Lenkung während des Betriebs im jeweiligen Zyklus. Diese Daten liegen meist nicht vor und eine Annahme ist mit großer Unsicherheit behaftet. Unterschätzt man den Bedarf der Nebenverbraucher führt dies zu einer prozentual zu groß angegebene Verbrauchersparnis weshalb hier darauf verzichtet wird.

Tabelle 2: mögliche Verbrauchersparnis durch HRB abhängig vom Fahrzyklus und Staplerklasse

Staplerklasse	1,6 - 2 to	2 – 3,5 to	3,5 – 5 to
VDI-Zyklus	0,25 L/h	0,35 L/h	0,55 L/h
TO-Zyklus	0,5 L/h	0,7 L/h	1,1 L/h
Sägezahn-Zyklus	1,0 L/h	1,3 L/h	2,1 L/h

Abhängig von den jährlichen Betriebsstunden des Staplers und dem Dieselpreis kann so direkt eine jährliche Einsparung an Betriebskosten berechnet werden. Geht man von einem Stapler der 2,5-to-Klasse und einem Fahrzyklus entsprechend dem TO-Zyklus aus, so ergeben sich abhängig vom Dieselpreis und der jährlichen Betriebsstundenzahl eine Einsparung gemäß **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Jährliche Betriebskostensparnis für einen Stapler der 2,5-to-Klasse und einem Zyklus entsprechend dem TO-Zyklus mit 0,7 Ltr/h Kraftstoffersparnis

Dieselpreis/Liter	Jährliche Betriebsstunden		
	1000	2000	3000
1,00 €	700 €	1400 €	2100 €
1,25 €	875 €	1750 €	2625 €
1,50 €	1050 €	2100 €	3150 €

6 Ausblick: Kopplung der Energierückgewinnung aus Fahr- und Arbeitshydraulik

Das oben gezeigte HRB-System zur Energierückgewinnung aus der Fahrhydraulik lässt sich mit vertretbarem Aufwand erweitern auf die Arbeitshydraulik. Dabei wird wie auf **Bild 6** gezeigt das System ergänzt um eine verstellbare Pumpe für den Hubzylinder als Hauptarbeitsfunktion. Der Volumenstrom aus dem Hubzylinder wird beim Ablassen nicht über ein Ventil abgedrosselt, sondern wird wieder durch die Arbeitspumpe geleitet, welche so als Motor betrieben wird. Wird nun momentan keine Fahrleistung benötigt, treibt die Arbeitspumpe die Fahrpumpe an, welche das Fluid vom Niederdruckspeicher in den Hochdruckspeicher fördert. So wird die Energie aus dem Hubwerk in dem Speicher der Fahrhydraulik gespeichert. Die Verstellung beider Pumpen erlaubt eine Anpassung der unterschiedlichen Druckniveaus auf der Seite der Arbeits- und Fahrhydraulik beziehungsweise dem Speicherladezustand ohne zusätzliche Drosselverluste zur Druckanpassung /5/.

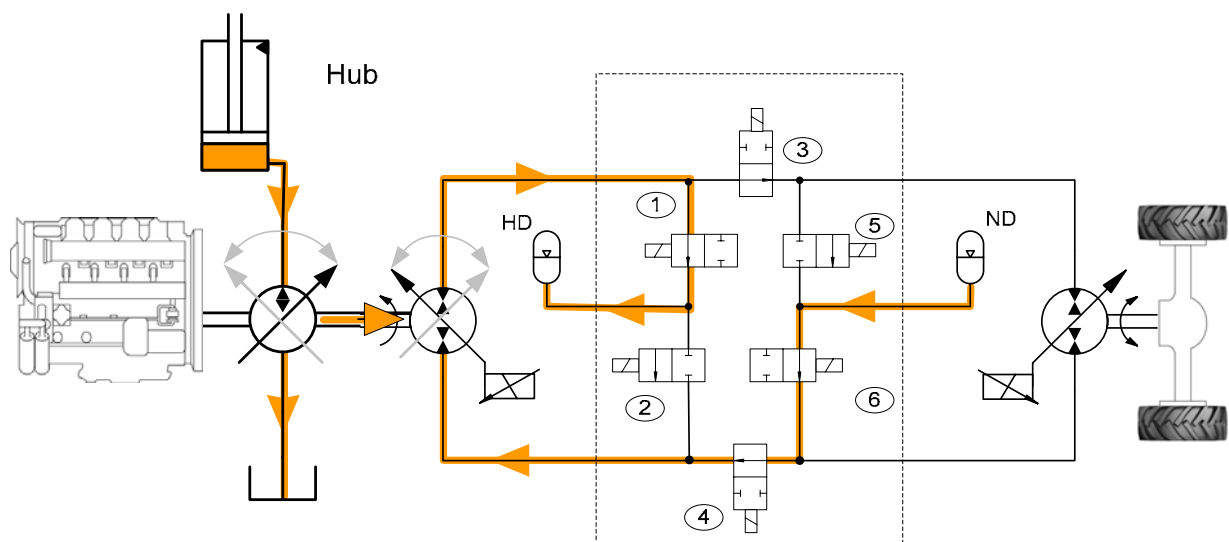


Bild 6: Rückgewinnung der Energie aus dem Hubwerk in den Hydraulikspeicher.

Umgekehrt kann die gespeicherte Energie direkt im Fahrentrieb benutzt werden wie als HRB-Grundfunktion oben ausgeführt. Wird hingegen gerade kein Fahrentrieb, aber der Arbeitsantrieb benötigt, dreht sich die Wirkung um, wie **Bild 7** zeigt: Mithilfe der gespeicherte Energie wird die Fahrpumpe zum Motor und treibt anstelle des Verbrennungsmotors die Arbeitspumpe an. Wiederum erlaubt die Verstellcharakteristik der beiden Pumpen eine Anpassung der unterschiedlichen Druckniveaus im Speicher und in der Arbeitshydraulik ohne Drosselverluste.

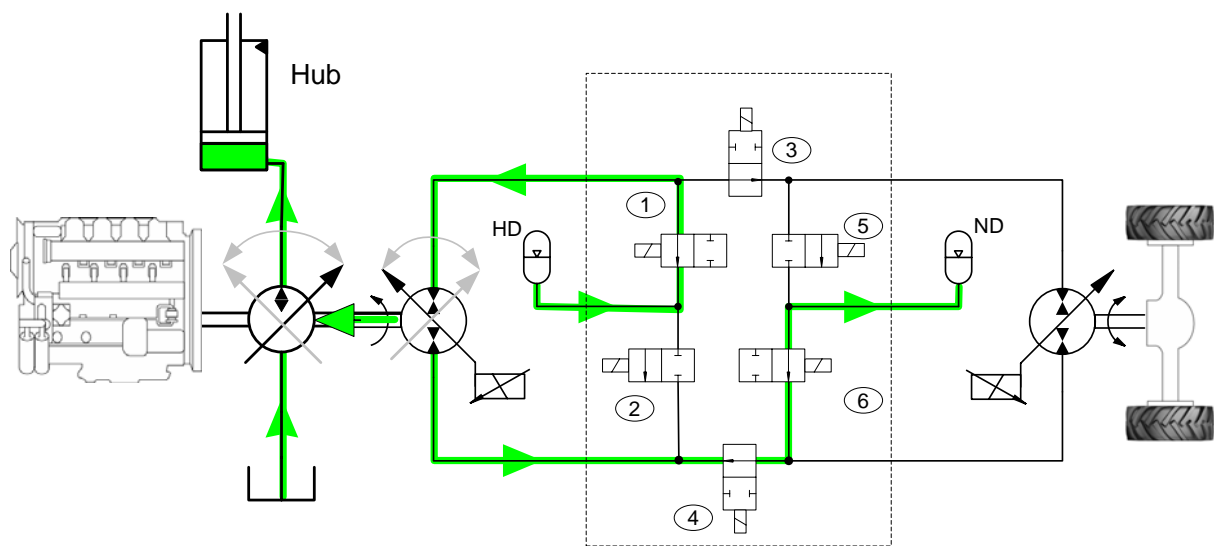


Bild 7: Verwendung der Energie aus dem Hydraulikspeicher für das Hubwerk

Damit ist ein geschlossenes Konzept zur Energierückgewinnung aus Fahr- und Arbeitshydraulik mit geringem Zusatzaufwand dargestellt.

7 Zusammenfassung

Das Hydrostatisch Regenerative Bremssystem (HRB) von Rexroth als hydraulischer Hybrid ist die richtige Hybridtechnologie für mobile Arbeitsmaschinen und insbesondere Gabelstapler mit extrem kurzen Fahrzyklen unter Ausnutzung der installierten Antriebsleistung. Abhängig vom Fahrzyklus sind je nach Staplerklasse Einsparungen von bis zu 2 L/h möglich und erlauben eine rasche Amortisation der zusätzlichen Investition.

Mit vertretbarem Zusatzaufwand kann die Arbeitshydraulik am Stapler in das HRB mit einbezogen werden. Somit stünde zukünftig ein geschlossenes, ganzheitliches System zur wirtschaftlichen Energierückgewinnung am Stapler bereit.

8 Literatur

- /1/ Tikkanen, S., Kliffken, M.G., Ehret, C., Baseley, S.
Hydraulic Hybrid Systems for Working machines and Commercial Vehicles
IFPE 2008, Technical Conference Paper 19.05, 2008
- /2/ Baseley, S., Ehret, C., Greif, E., Kliffken, M.G.
Hydraulic Hybrid Systems for Commercial Vehicles,
SAE 2007-01-4150, 2007
- /3/ Patent, WO, 2007/079935, „Hydrostatic Drive“, Bosch Rexroth AG, 2007
- /4/ Patent, WO, 2007/101467, „Method of Controlling a Hydrostatic Drive“,
Bosch Rexroth AG, 2007
- /5/ Patentanmeldung, DE, Aktenzeichen 10 2008 021 889.8, „Fahrzeug, insbe-
sondere mobile Arbeitsmaschine“, Bosch Rexroth AG, 2008