

# ATZ offhighway

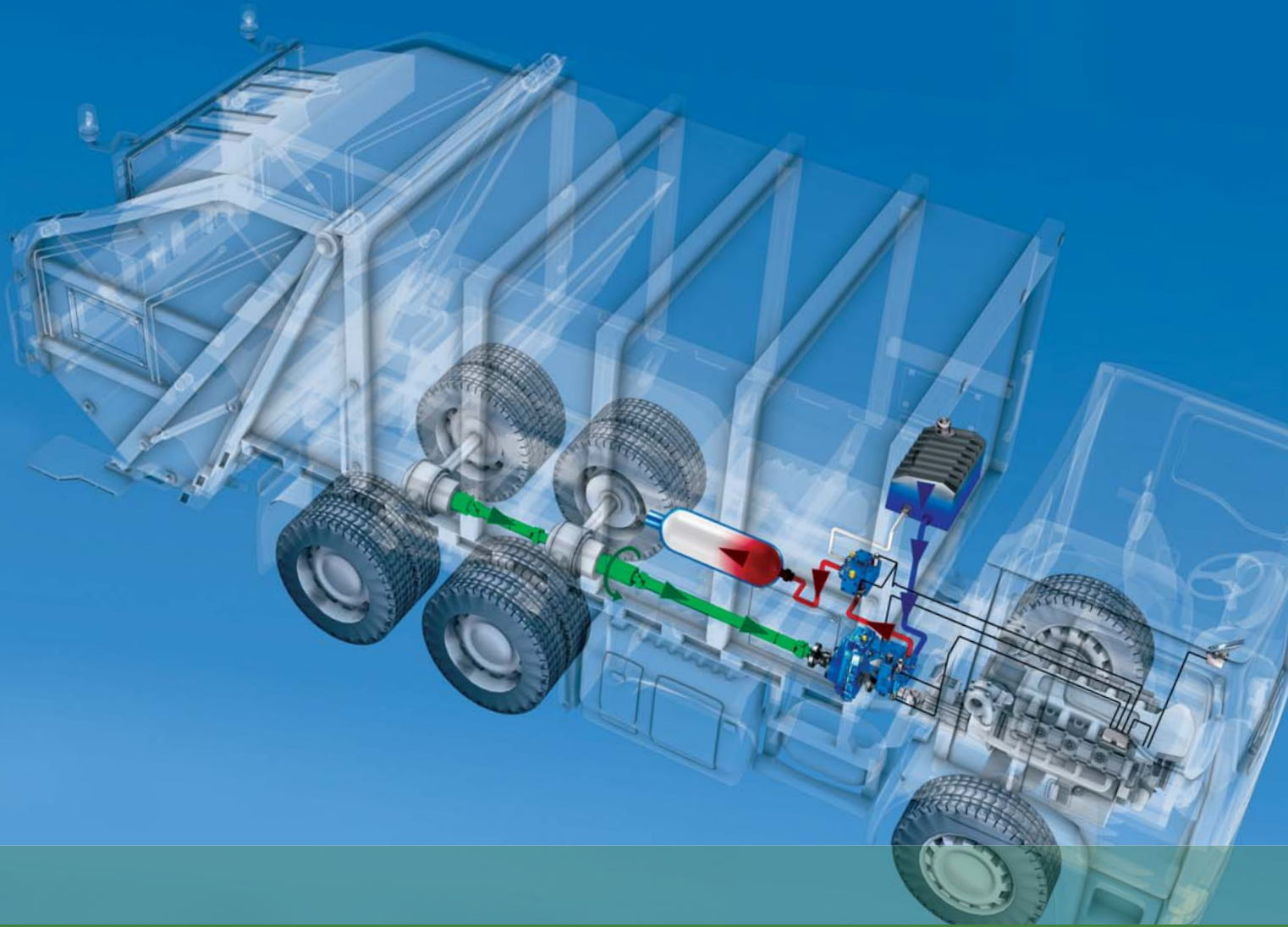
**Kosten bremsen und Umwelt schonen mit  
hydraulischem Hybridantrieb**

**Put the Brake on Costs and Preserve the  
Environment with Hydraulic Hybrid Drive**

**Sonderdruck/Offprint**  
aus/from ATZoffhighway 03/2009  
Springer Automotive Media  
GWV Fachverlage GmbH,  
Wiesbaden







# Kosten bremsen und Umwelt schonen mit hydraulischem Hybridantrieb

Mit dem Hydrostatisch Regenerativen Bremssystem (HRB) verbindet Rexroth die Vorteile von Hybridkonzepten mit der hohen Leistungsdichte hydraulischer Speicher für den wirtschaftlichen Einsatz in Nutzfahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen. Das Ergebnis: Kraftstoffersparnis von bis zu 25 % sowie entsprechend reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das System beruht auf Serien- beziehungsweise seriennahen Komponenten und erfordert nur geringe Modifikationen an vorhandenen Antriebssträngen. Damit eignet sich das HRB sowohl zur Erstausrüstung als auch zur Nachrüstung von Fahrzeugflotten.

## 1 Einleitung

In Zeiten steigender Energiepreise und zunehmendem Umweltbewusstsein bekommen Lösungen im Nutzfahrzeugbereich, die Treibstoff sparen und Emissionen reduzieren, eine immer größere Bedeutung. Eine dieser Lösungen ist die Hybridisierung des Antriebstranges.

Alle Hybridantriebe verbinden mindestens zwei Energieumwandler und zwei im Fahrzeug eingebaute Energiespeichersysteme, um das Fahrzeug anzutreiben. Energiewandler können Verbrennungsmotoren, Elektro- oder Hydraulikmotoren sein. Energie kann im Kraftstofftank, in der Batterie oder im Hydrospeicher gespeichert werden.

Die Gemeinsamkeit aller Hybridkonzepte besteht darin, dass die Vorteile zusätzlicher Energiequellen bei unterschiedlichen Betriebszuständen zum Tragen kommen. Die gespeicherte Energie kann später im Bedarfsfall den Verbrennungsmotor in ungünstigen Betriebspunkten entlasten oder ersetzen. Als Resultat sinken der Kraftstoffverbrauch und gleichzeitig die Emissionen.

## 2 Einsatzbereiche für den hydraulischen Hybrid

Das von Rexroth entwickelte „Hydrostatisch Regenerative Bremsssystem“ (HRB)

## Die Autoren | The Authors



**Dr.-Ing. Markus G. Kliffken** ist Leiter Systementwicklung Mobilhydraulik bei der Bosch Rexroth AG in Elchingen.

**Dr.-Ing. Markus G. Kliffken** is Vice President System Engineering Mobile Hydraulics at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).



**Dr. rer. nat. Christine Ehret** ist Projektleiterin HRB bei der Bosch Rexroth AG in Elchingen.

**Dr. rer. nat. Christine Ehret** is Project Manager HRB at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).



**Dr.-Ing. Matthias Beck** ist Projektleiter HRB seriell bei der Bosch Rexroth AG in Elchingen.

**Dr.-Ing. Matthias Beck** is Project Manager Series HRB at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).



**Dipl.-Ing. Robert Stawiarski** ist Mitarbeiter Systementwicklung Mobilhydraulik bei der Bosch Rexroth AG in Elchingen.

**Dipl.-Ing. Robert Stawiarski** is Staff Member System Engineering Mobile Hydraulics at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).

zählt zu den hydraulischen Hybridantrieben. Grundidee des HRB ist, die kinetische Energie beim Bremsen nicht zu vernichten, sondern in hydraulische Energie umzuwandeln und zu speichern.

Beim nächsten Beschleunigungsvorgang wird die gespeicherte Energie wieder in den Fahrtrieb eingespeist und entlastet so den antreibenden Verbrennungsmotor. Treibstoffeinsparungen von bis

### **Put the Brake on Costs and Preserve the Environment with Hydraulic Hybrid Drive**

*With their Hydrostatic Regenerative Braking System (HRB) Rexroth combines the advantages of hybrid concepts with the high power density of hydraulic accumulators for economical use in commercial vehicles and mobile machines. The result: Fuel savings of up to 25 percent with corresponding reductions in CO<sub>2</sub> emissions. The system is based on off-the-shelf and modified components and requires only slight modifications to existing drive trains. This makes the HRB ideal for new equipment or retrofitting vehicle fleets.*

### **1 Introduction**

*In times of rising energy prices and increasing environmental awareness, solutions in the field of commercial vehicles that save fuel and reduce emissions take on greater importance. One of these solutions is hybridization of the drive train.*

*All hybrid drives combine at least two energy converters and two energy storage systems built into the vehicle for powering the latter. Energy converters may be combustion engines, electric or hydraulic motors. Energy may be stored in the fuel tank, the battery or the hydraulic accumulator. What all hybrid concepts have in common is that the advantages of additional energy sources come to the fore under different operating conditions. The stored*

*energy can be used later to relieve or replace the combustion engine at unfavorable operating points. The result is reduced fuel consumption and emissions.*

### **2 Areas of Application for the Hydraulic Hybrid**

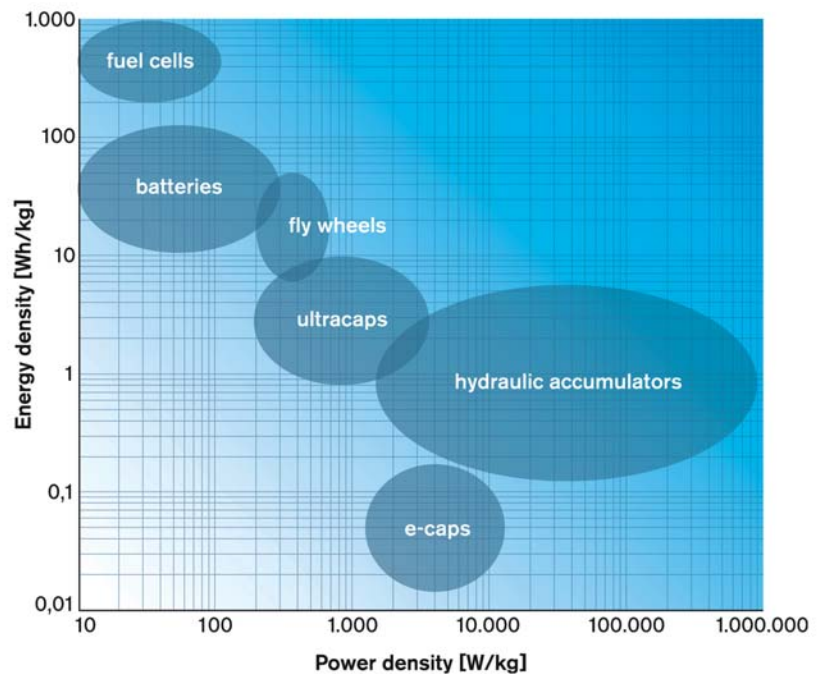
*The "Hydrostatic Regenerative Braking System" (HRB) is classified as a hydraulic hybrid drive. The basic idea of the HRB is not to waste the kinetic energy during braking, but rather to convert it into hydraulic energy and store it. The next time the vehicle accelerates, the stored energy is fed into the traction drive to relieve the driving combustion engine. Fuel savings of up to 25 % and a corresponding reduction in CO<sub>2</sub> emissions become possible. In addition, brake wear of*

the mechanical brakes is significantly reduced, resulting in further savings. The acceleration response which the HRB improves increases drive comfort, since there is no longer an interruption in driving power during shifting.

In its basic architecture the HRB system is similar to an electric hybrid, in that it links an additional energy accumulator and converter to the existing drive train with combustion engine. Due to the differing characteristics of the individual components in the electric and hydraulic hybrid, especially in terms of batteries compared with hydraulic accumulators, the potentials for reducing consumption can be used differently. In the electric hybrid the batteries have considerable energy density and can slowly and continuously store large amounts of energy compared with their physical size. But given their comparatively low power density and high internal resistance, at meaningful sizes they cannot store significant braking power, nor can any corresponding acceleration power be demanded from them in a short time.

In a hydraulic hybrid, however, hydraulic bladder accumulators offer a considerably greater power density. The generated braking power can be fully contained in a hydraulic bladder accumulator even on large mobile machines and commercial vehicles and under strong braking. But hydraulic accumulators are characterized by relatively low energy density. Practical sizes allow the braking energy of a vehicle to be stored, but do not generally allow additional, continuous storage of unused diesel power. The Ragone plot in **Figure 1** illustrates this relationship. This means that vehicles with electric and hydraulic hybrid drives require different operating strategies, and that these concepts are best applied to different vehicle categories.

**Electric hybrid:** Focus on raising the load point of the combustion engine and storage of the continuously generated energy for use in a purely electric traction drive or for covering peak power levels. Limited suitability for cyclical starting and stopping, since this involves large braking and acceleration forces. Primarily suited for passenger car applications in moderate partial load conditions, especially sufficiently large-engined passenger cars in typical European or North American operating conditions.

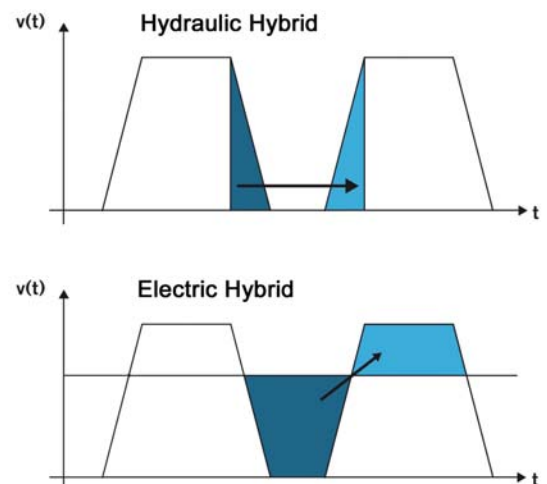


**Bild 1:** Das Ragone-Plott ordnet verschiedene Energiespeicher nach Energie- und Leistungsdichte

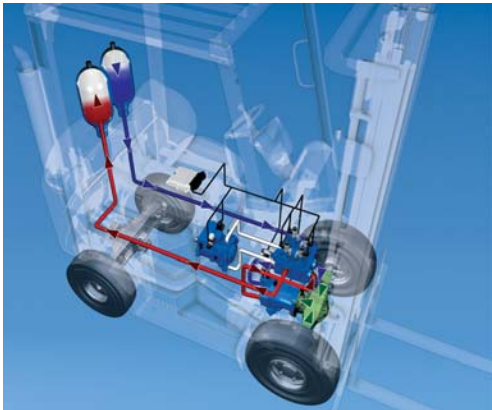
**Figure 1:** The Ragone plot ranks various energy storage devices by energy and power density

zu 25 % und eine entsprechende Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes werden so möglich. Darüber hinaus sinkt der Bremsverschleiß der mechanischen Bremsen erheblich, was weitere Kosten einspart. Das durch HRB verbesserte Beschleunigungsverhalten steigert den Fahrkomfort, da beim Anfahren die Zugkraftunterbrechung während der Schaltvorgänge entfällt.

In der Grundarchitektur ist das HRB-System einem elektrischen Hybridantrieb ähnlich, indem es einen zusätzlichen Energiespeicher und -wandler an den vorhandenen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor anbindet. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Komponenten im elektrischen und hydraulischen Hybridantrieb, insbesondere der Batterien gegenüber den hyd-

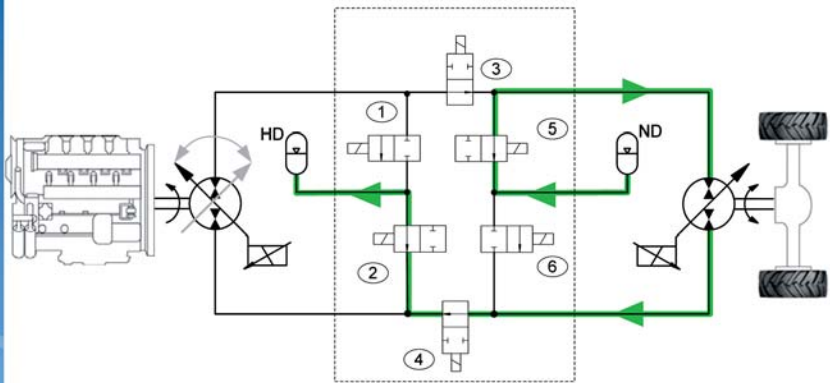


**Bild 2:** Abgrenzung hydraulischer und elektrischer Hybridantrieb  
**Figure 2:** Comparison of hydraulic and electric hybrid drive



**Bild 3:** Hydrostatischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten im Bremsbetrieb

**Figure 3:** Hydrostatic drive with HRB components in braking mode



raulischen Speichern können die Potenziale zur Verbrauchsreduzierung unterschiedlich genutzt werden. Beim elektrischen Hybrid verfügen die Batterien über eine große Energiedichte und können langsam und kontinuierlich große Mengen Energie bezogen auf Ihre Baugröße speichern. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Leistungsdichte und wegen des hohen Innenwiderstands können sie bei sinnvollen Baugrößen jedoch keine größeren Bremsleistungen speichern beziehungsweise können keine entsprechenden Anfahrleistungen in kurzer Zeit aus ihnen abgefordert werden.

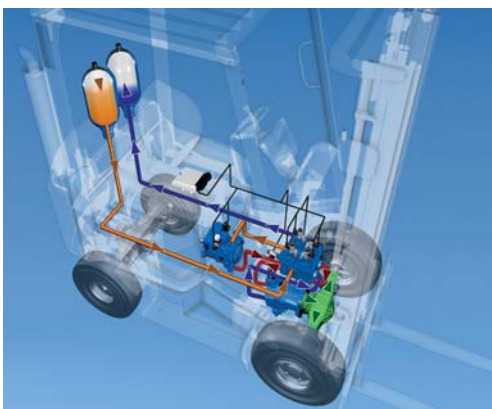
Beim hydraulischen Hybrid hingegen bieten hydraulische Blasenspeicher eine sehr viel höhere Leistungsdichte. Die auftretende Bremsleistung kann selbst bei großen mobilen Arbeitsmaschinen und starken Verzögerungen vollständig von einem hydraulischen Blasenspei-

cher aufgenommen werden. Hydraulische Speicher bieten jedoch eine vergleichsweise geringe Energiedichte. Sinnvolle Baugrößen erlauben die Speicherung der Bremsenergie eines Fahrzeugs, im allgemeinen jedoch keine zusätzliche, kontinuierliche Speicherung ungenutzter Dieselleistung. Das Ragone-Plott in **Bild 1** verdeutlicht diesen Zusammenhang. 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 Fahrtrieb oder zur Abdeckung von Leistungsspitzen. Eingeschränkt geeignet für Maschinen im zy-

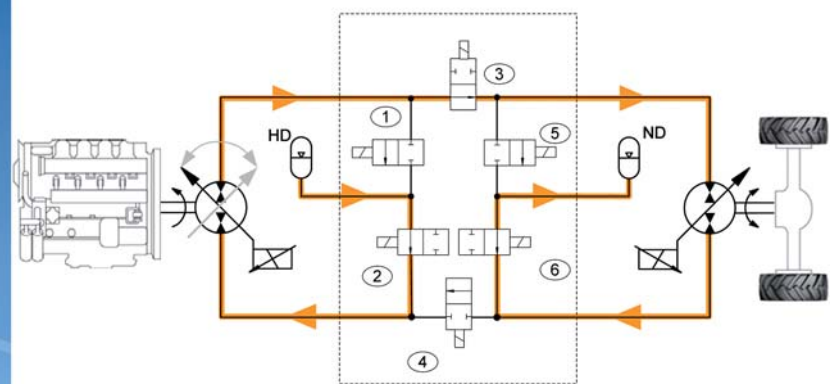
*Hydraulic hybrid: Focus on recuperation of the braking energy. Well suited for vehicles with high starting and stopping forces, i.e. high braking and acceleration forces, such as waste collection vehicles, city buses or fork lifts.*

*Figure 2 illustrates this relationship. For an electric hybrid the excess power from the combustion engine is stored in the battery (dark blue shaded areas) and then reused in the light blue area characterized by increased power demand. The situation is different for the hydraulic hybrid: there the power from the braking phase is reused in the following acceleration phase. The high power density of the hydraulic accumulator means large braking power levels can be covered by a hydraulic system. The HRB system is therefore especially suited for heavy vehicles which start and stop often, such as waste collection vehicles, city buses, fork lifts or telehandlers.*



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

**Figure 4:** Hydrostatic traction drive with HRB components during acceleration



**Table 1:** Übersicht der Baugrößen der HRB-Komponenten für unterschiedliche Staplerklassen

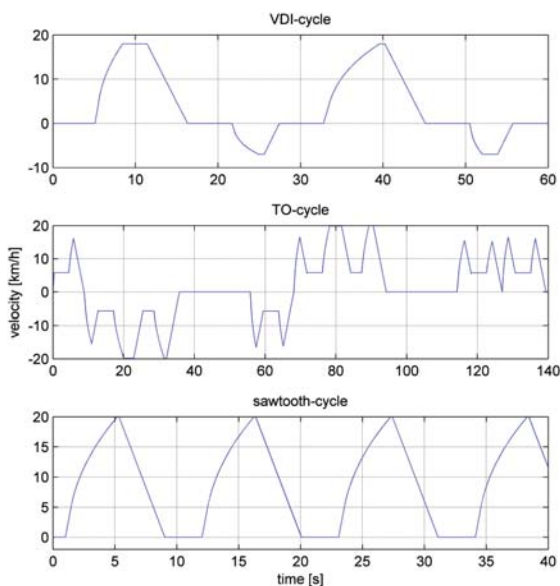
**Table 1:** Overview of dimensions of HRB components for various fork lift classes

Fork lift class	1.6 – 2 t	2 – 3.5 t	3.5 – 5 t
Unloaded weight [kg]	3000	4100	6350
Load [kg]	2000	2500	4500
Diesel power [kW]	29	45	54
Traction force [kN]	16	20	30
Variable displacement pump [ccm]	28	40	56
Variable displacement motor [ccm]	55	80	140
Axle ration	14	14	14
$Q_{max}$ [Ltr/min]	60	85	120
Nominal manifold size [mm]	16	16	16
Accumulator volume [Ltr]	6	10	12
Accumulator size $\varnothing \times H$ [mm]	168 x 550	221 x 565	221 x 664

lischen Umschlagsbetrieb da dort hohe Brems- und Anfahrleistungen auftreten. Vornehmlich geeignet für PKW-Anwendungen im moderaten Teillastverkehr, insbesondere großzügig motorisierte PKW im europäischen oder nordamerikanischen Normzyklus.

Hydraulischer Hybrid: Fokus auf Rekuperation der Bremsenergie. Sehr gut geeignet für Fahrzeuge mit hoher Umschlagsleistung, das heißt hohen Brems- und Anfahrleistungen, wie zum Beispiel Entsorgungsfahrzeuge, Stadtbusse oder Gabelstapler.

**Bild 2** veranschaulicht diesen Zusammenhang. In den dunkelblau hinterlegten Abschnitten wird beim elektrischen Hybrid die überschüssige Leistung der Verbrennungsmotor in der Batterie gespeichert und in dem hellblauen 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



**Bild 5:** Fahrzyklen zur Bestimmung der Verbrauchersparnis  
**Figure 5:** Drive cycles for determining fuel savings

### 3 System Components of the HRB

The system components needed for the HRB are for the most part off-the-shelf and slightly modified components from the Rexroth product range. This guarantees availability and repeatable series production quality.

#### 3.1 Accumulator and Tank

Rexroth determines the ideal accumulator size based on how much energy needs to be stored. The system configuration also takes into account the efficiency of the hydraulic system. A tank must be able to accommodate at least the volume resulting from the volume change of the gas bladder of the high pressure accumulator. Any existing tank for the working hydraulics can also be enlarged as needed.

#### 3.2 Axial Piston Motor

The axial piston motor is selected based on the power. The power depends on the mass, speed, and acceleration/braking associated with the vehicle. Typical values for acceleration/braking lie between one and one-and-a-half meters  $m/s^2$ . The converted power of the axial piston motor is calculated from the flow rate and pressure (up to a maximum of 250 kW). For vehicles with hydrostatic traction drive the already existing axial piston motor is used (series HRB, see Section 4).

#### 3.3 Transmission

The HRB transmission is used to link the mechanical drive train, generally the drive shaft, with the hydraulic hybrid drive (parallel HRB, see Section 4). It is generally configured such that the nominal speed of the axial piston motor is reached at the maximum travel speed at which the HRB is used for braking. There is no transmission in vehicles having a hydrostatic drive train (series HRB, see Section 4).

#### 3.4 Valves and Electronics

The necessary valves are determined by the maximum occurring pressure level and the flow rates which the valves see with the least possible pressure losses. An integrated pressure relief valve ensures the highest operational safety. The entire process is controlled by powerful, robust electronics (hard- and software) which also communicates with the existing vehicle electronics systems (e.g. ABS or ESP).

mit einem hydraulischen System abgedeckt werden. Das HRB-System eignet sich daher insbesondere für schwere Fahrzeuge, die oft anhalten und anfahren wie zum Beispiel Abfallsammelfahrzeuge, Stadtbusse, Gabelstapler oder Teleskoplader (Telehandler).

**3 Systemkomponenten des HRB**

Die für das HRB erforderlichen Systemkomponenten beruhen größtenteils auf Serien- und seriennahen Komponenten aus dem Produktprogramm von Rexroth. Das garantiert eine hohe Verfügbarkeit und eine reproduzierbare Serienqualität.

**3.1 Speicher und Tank**

Die optimale Speichergröße ermittelt Rexroth über die zu speichernde Energie. Die Systemauslegung berücksichtigt zusätzlich den Wirkungsgrad für das hydraulische System. Ein Tank muss mindestens das Volumen aufnehmen können, das sich aus der Volumenänderung der Gasblase des Hochdruckspeichers ergibt. Es kann auch ein gegebenenfalls vorhandener Tank für die Arbeitshydraulik entsprechend vergrößert werden.

**3.2 Axialkolbeneinheit**

Die Auswahl der Axialkolbenmaschine erfolgt auf Basis der Leistung. Die Leistung hängt von Fahrzeugmasse, Geschwindigkeit, Beschleunigung/Verzögerung ab, die das Fahrzeug aufweist beziehungsweise erzielen soll. Typische Werte

für Beschleunigung/Verzögerung liegen zwischen einem und anderthalb  $m/s^2$ . Die umgesetzte Leistung der Axialkolbenmaschine berechnet sich aus dem Volumenstrom und dem Druck (bis zu maximal 250 kW). Bei Fahrzeugen mit hydrostatischem Fahrtrieb wird die bereits vorhandene Axialkolbeneinheit verwendet (HRB seriell, siehe Kapitel 4).

**3.3 Getriebe**

Das HRB-Getriebe dient dazu, den mechanischen Antriebsstrang, in der Regel die Kardanwelle, mit dem hydraulischen Hybridantrieb zu verbinden (HRB parallel, siehe Kapitel 4). Es ist meist so ausgelegt, dass bei der maximalen Fahrgeschwindigkeit, bis zu der mit HRB gebremt wird, die Nenndrehzahl der Axialkolbeneinheit erreicht wird. Ein Getriebe entfällt bei Fahrzeugen mit hydrostatischem Antriebsstrang (HRB seriell, siehe Kapitel 4).

**3.4 Ventile und Elektronik**

Die notwendigen Ventile ergeben sich

aus dem maximal auftretenden Druckniveau und den Volumenströmen, die über die Ventile mit möglichst geringen Druckverlusten gelangen müssen. Ein integriertes Druckbegrenzungsventil sorgt für höchste Sicherheit im Betrieb.

Gesteuert wird der gesamte Vorgang von einer leistungsfähigen und robusten Elektronik (Hard- und Software), die auch mit den vorhandenen elektronischen Systemen im Fahrzeug kommuniziert (zum Beispiel ABS oder ESP).

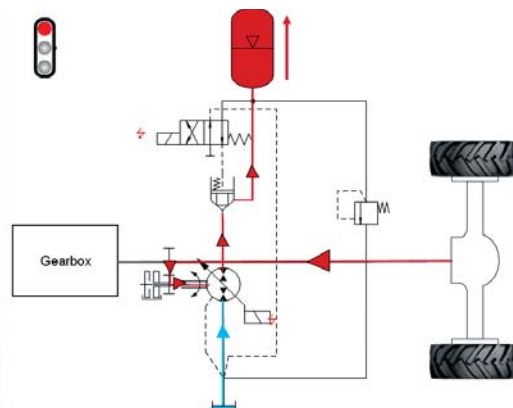
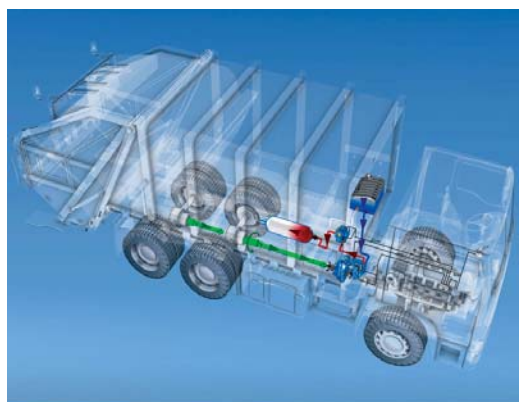
**4 Für mechanische und hydrostatische Getriebe: HRB seriell und parallel**

Rexroth entwickelt einen hydraulischen Hybridantrieb für Fahrzeuge mit mechanischem Antriebsstrang (HRB parallel) und einen für Fahrzeuge mit hydrostatischem Antriebsstrang (HRB seriell), die im folgenden näher beschrieben werden. Für beide Varianten gilt: Je größer die Fahrzeugmasse und je häufiger und intensiver

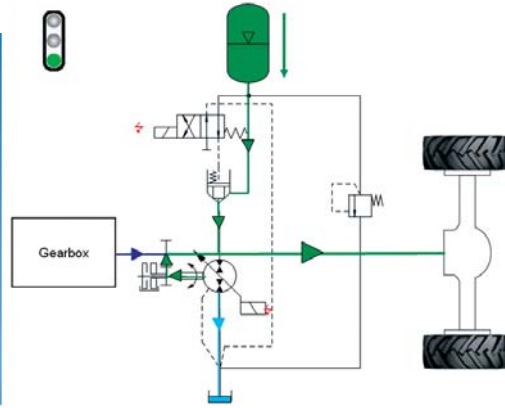
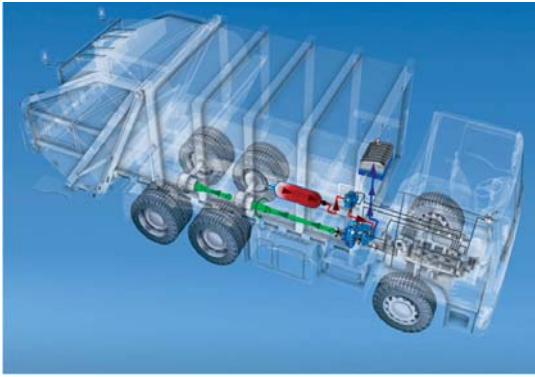
**Table 2:** Mögliche Verbrauchersparnis durch HRB abhängig vom Fahrzyklus und Staplerklasse

**Table 2:** Possible fuel savings using HRB based on drive cycle and fork lift class

Fork lift class	1.6 – 2 t	2 – 3.5 t	3.5 – 5 t
VDI cycle	0.25 l/h	0.35 l/h	0.55 l/h
T0 cycle	0.5 l/h	0.7 l/h	1.1 l/h
Sawtooth cycle	1.0 l/h	1.3 l/h	2.1 l/h



**Bild 6:** Mechanischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten im Bremsbetrieb  
**Figure 6:** Mechanical traction drive with HRB components in braking mode



**Bild 7:** Mechanischer Fahrtrieb mit HRB-Komponenten beim Fahren aus dem Hochdruckspeicher  
**Figure 7:** Mechanical traction drive with HRB components during acceleration

die Abbrems- und Anfahrvorgänge, desto höher die Verbrauchs- und Emissionsreduktion und letztlich die Kostenersparnis.

#### 4.1 HRB seriell für den hydrostatischen Fahrtrieb

In der Grundstruktur besteht ein hydrostatischer Fahrtrieb aus einem 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.

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.

**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 der Verbrennungsmotor im aufzubringenden Moment entlastet. Über die Einstellung von

Motor- und Pumpenfördervolumen kann die Leistungsaufteilung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem hydraulischen Speicher wiederum an die jeweilige Fahr-situation und den Speicher-ladezustand angepasst werden. Die Fahr-ma-nö-ver in die entgegengesetzte Fahr-trich-tung erfolgen analog.

Zusammenfassend ist eine wesentliche Voraussetzung zur Integration des HRB-Systems an einem hydrostatischen Stapler ein im Fördervolumen verstellbarer Hydraulikmotor an den Antriebsrädern.

#### 4.2 HRB seriell: Anwendungsbeispiel Gabelstapler

**Tabelle 1** zeigt für drei unterschiedliche Staplergrößen eine geeignete Komponentenauswahl. Der maximal auftretende Volumenstrom über die betrachteten Staplergrößen hinweg kann mit

#### 4 For Mechanical and Hydrostatic Transmissions: Series and Parallel HRB

Rexroth is developing a hydraulic hybrid drive for vehicles having a mechanical drive train (parallel HRB) and one for vehicles having a hydrostatic drive train (series HRB), which will be described in greater detail below. In each case, the greater the vehicle mass and the more frequent and intense the deceleration and acceleration cycles, the greater the reduction in fuel consumption and emissions and, as a consequence, the greater the cost savings.

#### 4.1 HRB Series for Hydrostatic Traction Drive

A hydrostatic traction drive consists essentially of a combustion engine and an associated adjustable hydraulic pump which is hydraulically linked to an adjustable hydraulic motor in a closed loop. The wheel is linked through a gear train. To this system an HRB manifold block and a high- and low-pressure accumulator are added. **Figure 3** shows this combination in braking operation, whereby the accumulator is charged. The valves on

the manifold are actuated such that when braking, the motor moves the fluid from the low-pressure accumulator into the high-pressure accumulator, thereby receiving resistance from the high-pressure accumulator. The result is a braking torque at the motor and wheel. The pump on the diesel motor has its flow rate strongly reduced so as not to propel the diesel motor, but rather to load the available energy into the accumulator. The braking torque can be varied by the set flow rate on the hydraulic motor and

thereby adjusted to the driving and accumulator charging state.

**Figure 4** shows the acceleration phase. The valves are actuated such that the pressure is switched from the high-pressure accumulator to the suction side of the pump. This relieves the combustion engine in the amount torque which needs to be provided. By setting the motor and pump flow rate the power distribution between the combustion engine and the hydraulic accumulator can in turn be adapted to the respective driving situation and the accumulator charge state. Driving in the reverse direction is analogous. In summary, an essential prerequisite for integrating the HRB system on a hydrostatic

fork lift is a hydraulic motor on the drive wheels whose flow rate can be changed.

#### 4.2 Series HRB: Example of a Fork Lift

**Table 1** shows an appropriate component selection for three different fork lift sizes. The maximum flow rate for the fork lift sizes in question can be easily covered by a small two-way control valve.

##### 4.2.1 Estimating the Fuel Savings with HRB on a Fork Lift

The calculation for potential fuel savings in a mobile piece of equipment depends primarily on the assumed drive cycle of the vehicle. Three drive cycles are considered here for the fork lift, **Figure 5**:

**VDI cycle:** The so-called VDI cycle according to VDI 2198 is commonly used for specifying consumption and comparing fork lifts. But in this cycle the fork life is moved relatively slowly to travel the specified course in the specified time. The result is low consumption for inclusion in the technical data, but this does not necessarily represent a realistic, practical savings potential.

**TO cycle:** Another commonly used cycle is the test cycle developed by the Dutch trade journal *Transport+Opslag*, abbreviated the TO cycle. Here there is no time specification, and the fork life is moved to the limit of its performance. According to the authors this cycle best replicates actual fork lift operating conditions.

einem kleinen Zwei-Wege-Schaltventil gut abgedeckt werden.

#### 4.2.1 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, **Bild 5**.

**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 Einsparpotenzial.

**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 nach Ansicht der Verfasser am ehesten den Betriebsbedingungen in der Staplerpraxis.

„Sägezahn“-Zyklus: Eine obere Grenze der möglichen Verbrauchersparnis 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.

**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. Abhängig von den jährlichen Betriebsstunden des Staplers und dem Dieselpreis kann so direkt eine jährliche Einsparung an Betriebskosten berechnet werden.

#### 4.3 HRB parallel für den mechanischen Fahrtrieb

Ein mechanischer Fahrtrieb besteht in der Grundstruktur aus einem Verbrennungsmotor, daran angeflanscht ein Getriebe (das HRB-System eignet sich für Fahrzeuge mit automatisiertem Getriebe oder Automatikgetriebe) und die Kardanwelle. Die Verbindung zum Rad erfolgt

über ein Radgetriebe. Dieser Grundaufbau wird um ein HRB-Getriebe, eine hydraulische Einheit, einen Ventilblock mit Sicherheitsventil, einen Hochdruckspeicher und einen Tank erweitert.

**Bild 6** zeigt diese Kombination bei einem Bremsvorgang, bei dem der Speicher aufgeladen wird. Die Ventile des Ventilschaltblocks, der auch Absicherungs- und Absperrfunktionen übernimmt, werden derart betätigt, dass die schwenkbare Axialkolbenpumpe beim Bremsen das Öl aus dem Tank in den Hochdruckspeicher fördert. Die Pumpe wird von der Kardanwelle über das angekoppelte HRB-Getriebe angetrieben. Daraus resultiert ein Bremsmoment an der Kardanwelle und Rad. Das Bremsmoment ist einstellbar über das eingestellte Fördervolumen an der Hydraulikpumpe und damit an den Fahrerwunsch und Speicherladezustand anpassbar. Die konventionelle, mechanische Bremse muss nicht eingesetzt werden, was den Verschleiß deutlich reduziert.

**Bild 7** stellt das nachfolgende Anfahren dar. Die Ventile werden so aktiviert, dass das Hydrauliköl aus dem Hochdruckspeicher auf die Druckseite der Pumpe geschaltet wird. Die Pumpe ist dann im Motorbetrieb. Sie liefert das Moment, welches den Verbrennungsmotor wirksam entlastet. Über die Einstellung des Fördervolumens kann die Leistungsaufteilung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem HRB-System verändert

**Tabelle 3:** Vergleich des simulierten und gemessenen Verbrauchs

**Table 3:** Comparison of simulated and measured consumption

	W/out HRB absolute [l]	With HRB absolute [l]	Savings absolute [l]
Simulation	0.111	0.080	0.031
Measured	0.108	0.077	0.032
Difference	2.78 %	3.90 %	-3.13 %

werden. Diese Aufteilung regelt ein Steuergerät in Abhängigkeit von der Fahrsituation und dem Speicherladezustand.

Durch den nachträglichen Einbau und die geringe Modifikation des Antriebsstrangs sind keine Einflüsse auf die Lebensdauer anderer Fahrzeugkomponenten zu erwarten, insbesondere da keine Momentenüberhöhung gegenüber dem maximalen Dieselmoment vorgesehen ist.

#### 4.4 HRB parallel: Anwendungsbeispiel Abfallsammelfahrzeug

Gegenwärtig (erstes Quartal 2009) durchlaufen mehrere Prototypen verschiedener Fahrzeug- beziehungsweise Aufbauhersteller in Europa und in den USA ausgiebige Feldtests, deren Ergebnisse sukzessive ausgewertet werden. Die Auslegung des jeweiligen HRB-Systems erfolgt auf Basis von Fahrzeugdaten und realen Fahrzyklen. Die Komponentenauswahl hinsichtlich der optimalen Kraftstoffersparnis trifft Rexroth anhand einer eigenen Berechnungssoftware.

##### 4.4.1 Abschätzung der Verbrauchersparnis durch HRB im Abfallsammelfahrzeug

Entscheidend für den Betreiber beim Einsatz von HRB in einem Fahrzeug sind die möglichen Einsparungen. Dabei müssen sich die zusätzlichen Anschaffungskosten durch Betriebskostensparnisse in einem möglichst kurzen Zeitrahmen amortisieren. Um eine Einschätzung über die Wirtschaftlichkeit von HRB zu ermöglichen, werden nachfolgend die potenziellen Einsparungen im Betrieb anhand von Fahrprofilen verdeutlicht.

Für die Abschätzung der Verbrauchersparnis wird hier ein Sammelzyklus eines Entsorgungsfahrzeugs mit Halb-

beladung simuliert und danach mit den Messungen aus dem Fahrzeugversuch verifiziert. Als Simulationsumgebung wird AMESim verwendet, in dem das Fahrzeugmodell nachgebaut wurde. Die wesentlichen Effekte des HRB sind nachgebildet. Dazu gehört neben der Verbrauchs- und Emissionsreduktion auch der Wegfall der Zugkraftunterbrechung als positiver „Nebeneffekt“.

**Tabelle 3** zeigt die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der tatsächlich unter Versuchsbedingungen gemessenen Verbrauchswerte des 100 m-Zyklus. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten von unter vier Prozent. Somit erweist sich die Simulation als verlässliches Werkzeug, um die Kraftstoffersparnis abzuschätzen.

##### 4.2 Messungen vom Abfallsammelfahrzeug mit HRB

Die Funktionalität des HRB-Systems wurde unter definierten Testbedingungen ausgiebig überprüft. **Bild 8** zeigt das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs mit HRB-System.

Beim Anfahren mit HRB kann man nach einem ersten Anstieg des Dieseldrehmoments die Entlastung des Verbrennungsmotors erkennen, wobei das Gesamtmoment an der Kardanwelle weiter steigt. Diese Dieselmotorentlastung führt zur Kraftstoffersparnis und deswegen auch zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Zusätzlich tritt während des Gangwechsels keine Zugkraftunterbrechung auf, da HRB das Moment kontinuierlich an den Abtrieb liefert, und somit das kurzzeitige Auskuppeln des Verbrennungsmotors überbrückt. Die Eliminierung der Zugkraftunterbrechung erhöht den

*“Sawtooth” cycle: The sawtooth cycle provides an upper limit to possible fuel savings. Here the fork life is accelerated successively up to its maximum speed and then immediately brought to a stop. In the speed curve over time this resembles a sawtooth. Recovery of the braking energy on the fork life cannot generate greater savings than in this cycle.*

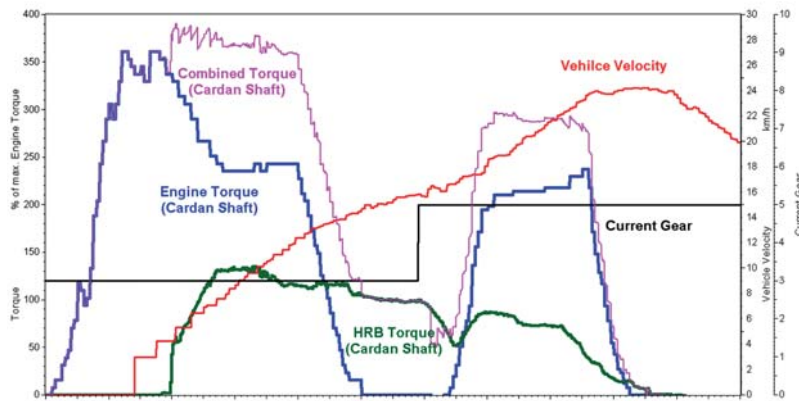
**Table 2** shows the calculated fuel savings for various fork lift classes. The fuel savings is given in liters per second and not in percent. Indicating the savings in percent would require exact knowledge of the power requirement of all associated consumers, including the steering, during operation in the respective cycle. This data is not usually available, and any assumption comes with great uncertainty. Underestimating the requirement of the associated consumers results in a percentage savings estimate which is too great, and so this method will not be used here.

Depending on the annual operating costs of the fork lift and the price of diesel fuel, the L/h method allows the annual savings in operating costs to be directly calculated.

##### 4.3 Parallel HRB for the Mechanical Traction Drive

A mechanical traction drive consists essentially of a combustion motor, a transmission (the HRB system is compatible with vehicles having an automated transmission or automatic transmission), and the cardan drive shaft. The link to the wheel is accomplished using a gear train. To this basic structure an HRB transmission, a hydraulic unit, a valve manifold with safety valve, a high pressure accumulator and a reservoir are added.

**Figure 6** shows this combination in a braking operation, whereby the accumulator is charged. The valves on the valve manifold, which also assumes the protection and check function, are actuated such that the swiveling axial piston pump moves the fluid from the tank into the high pressure accumulator. The pump is driven by the cardan shaft through the coupled HRB transmission. The result is braking torque on the cardan shaft and wheel. The braking torque is adjustable using the set flow rate on the hydraulic pump, thus matching it to the driver's intention and to the accumulator status. The conventional me-



**Bild 8:** Beschleunigen mit HRB  
**Figure 8:** Acceleration values with HRB

Fahrkomfort und ermöglicht ein verbessertes Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs.

**5 Zusammenfassung und Ausblick**

Das im September 2008 auf der IAA Nutzfahrzeuge in Hannover vorgestellte HRB

parallel für Nutzfahrzeuge mit mechanischem Antriebsstrang entwickelt Rexroth aktuell zur Serienreife und projiziert es für verschiedene Pilotfahrzeuge. Entsprechende Feldversuche laufen bereits seit Mitte 2008 in Europa und seit Beginn 2009 in den USA. Die Serienfertigung soll Ende 2009 starten.

Mit der Reduzierung von Treibstoff-

verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen von bis zu 25 % bietet HRB parallel eine wirtschaftliche Lösung für Fahrzeug- und Flottenbetreiber in Zeiten steigender Kraftstoffpreise und sich verschärfender Abgasregulierungen. Darüber liefert HRB parallel „Zusatznutzen“ in Form von erhöhtem Fahrkomfort und weiteren Kosteneinsparungen durch einen deutlich reduzierten Bremsenverschleiß.

Das Einsparpotenzial des HRB seriell für Fahrzeuge mit hydrostatischem Antriebsstrang liegt auf einem ähnlichen Niveau wie HRB parallel – und lässt sich in bestimmten Anwendungen sogar noch steigern: Für Gabelstapler hat Rexroth bereits ein Patent angemeldet zur Integration der Arbeitshydraulik in das HRB seriell. Die Kopplung der Energierückgewinnung aus Fahr- und Arbeitshydraulik ermöglicht so die zusätzliche Speicherung und Wiederverwendung der potenziellen beziehungsweise kinetischen Energie beim Senken einer Last. Derzeit wird ein Fahrzeug als Prototyp aufgebaut, welches ab Mitte 2009 in die Kundenerprobung gehen wird. ■

chanical brake does not have to be used, which results in significant wear savings. **Figure 7** illustrates the next cycle, i.e. acceleration. The valves are actuated such that the hydraulic fluid is switched from the high pressure accumulator to the pressure side of the pump. The pump is then in motor operation. It provides the torque, which effectively takes the burden off the combustion motor. By setting the flow rate the power distribution between the combustion motor and the HRB system can be changed. This distribution is regulated by a controller depending on the drive situation and the accumulator charge status. The retrofit and only slight modification needed to the drive train have no adverse effect on the service life of other vehicle components, especially since there is no increase in torque compared with the maximum diesel engine torque.

**4.4 Parallel HRB: Waste Collection Vehicle Example**  
 At the present time (first quarter 2009) a

number of prototypes are undergoing extensive field testing the results are being successively analyzed. The configuration of the respective HRB system is based on vehicle data and actual drive cycles. Rexroth selects components for optimal fuel savings based on their in-house calculation software.

**4.4.1 Estimate of Fuel Savings Using HRB in a Waste Collection Vehicle**  
 The possible savings are critical for an operator when using HRB in a vehicle. The initial purchase cost needs to be recouped through operating cost savings in as short a time as possible. To make it possible to estimate the economy represented by HRB, the potential savings are shown below based on drive profiles. To estimate the fuel savings, a collection cycle for a half-loaded waste collection vehicle is simulated and then verified with the measurements from the vehicle test. AMESim is used as the simulation environment in which the vehicle model was replicated. The essential effects of the HRB

are recreated. In addition to consumption and emissions reductions, elimination of the traction force interruption is also counted as a positive “side-effect.” **Table 3** shows the comparison of the simulation values and the actual consumption values from the 100 m cycle measured under test conditions. It shows good agreement between simulation and measured values, with a deviation of less than four percent.

**4.2 Measurements from Waste Collection Vehicle with HRB**  
 The functionality of the HRB system was thoroughly verified under defined test conditions. **Figure 8** shows the acceleration response of the vehicle with HRB system. When accelerating with HRB on-board, one notices after the initial rise in engine torque how the motor is relieved, while the combined torque on the cardan shaft continues to rise. This diesel engine relief results in fuel savings and associated reduction in CO<sub>2</sub> emissions. Furthermore, there is no traction force interrup-

tion when the gear is changed, since HRB continuously provides torque to the drive side, thereby bridging the momentary uncoupling of the combustion motor. Eliminating the interruption in traction force increases driver comfort and provides improved acceleration response of the vehicle.

#### **5 Summary and Outlook**

The parallel HRB for commercial vehicles with mechanical drive train, introduced in September 2008 at the IAA Nutzfahrzeuge exhibition in Hanover, is currently being developed by Rexroth for

series production and is projected for a variety of pilot chassis types. Field testing has been underway since mid-2008 in Europe, and since early 2009 in the USA. Series production is scheduled to begin at the end of 2009.

With a reduction in fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of up to 25 %, parallel HRB offers an economical solution for vehicle and fleet operators in times of rising fuel prices and stricter exhaust regulations. Parallel HRB also offers "add-on" benefits in the form of increased driver comfort and additional cost savings through significantly reduced brake wear.

The savings potential of the series HRB for vehicles with hydrostatic drive train is comparable with that of parallel HRB – and in some cases may even exceed it: Rexroth has already applied for a patent for integration of the working hydraulics into series HRB in fork lifts. By coupling the energy recovery from the drive and working hydraulics, additional storage and reuse of the potential and kinetic energy is possible while lowering a load. A prototype vehicle is currently being built which will undergo customer testing starting mid-2009. ■





**More:**

25% fuel savings

**Less:**

Fueling stops

DIESEL  
ONLY

**The Hydraulic Hybrid from Rexroth reduces fuel costs by up to 25%.**

The Hydrostatic Regenerative Braking System HRB from Rexroth helps you bring fuel consumption under control. Virtually complete recovery of braking energy makes HRB especially effective for stop-and-go driving. Heavy vehicles like refuse trucks, buses, or fork lifts can achieve reductions of up to 25% in fuel costs and up to 40% in brake wear – protecting both the environment and your budget. Bosch Rexroth. **The Drive & Control Company**

Bosch Rexroth AG  
[www.boschrexroth.com/hrb](http://www.boschrexroth.com/hrb)

Electric Drives  
and Controls

Hydraulics

Linear Motion and  
Assembly Technologies

Pneumatics

Service

**Rexroth**  
Bosch Group