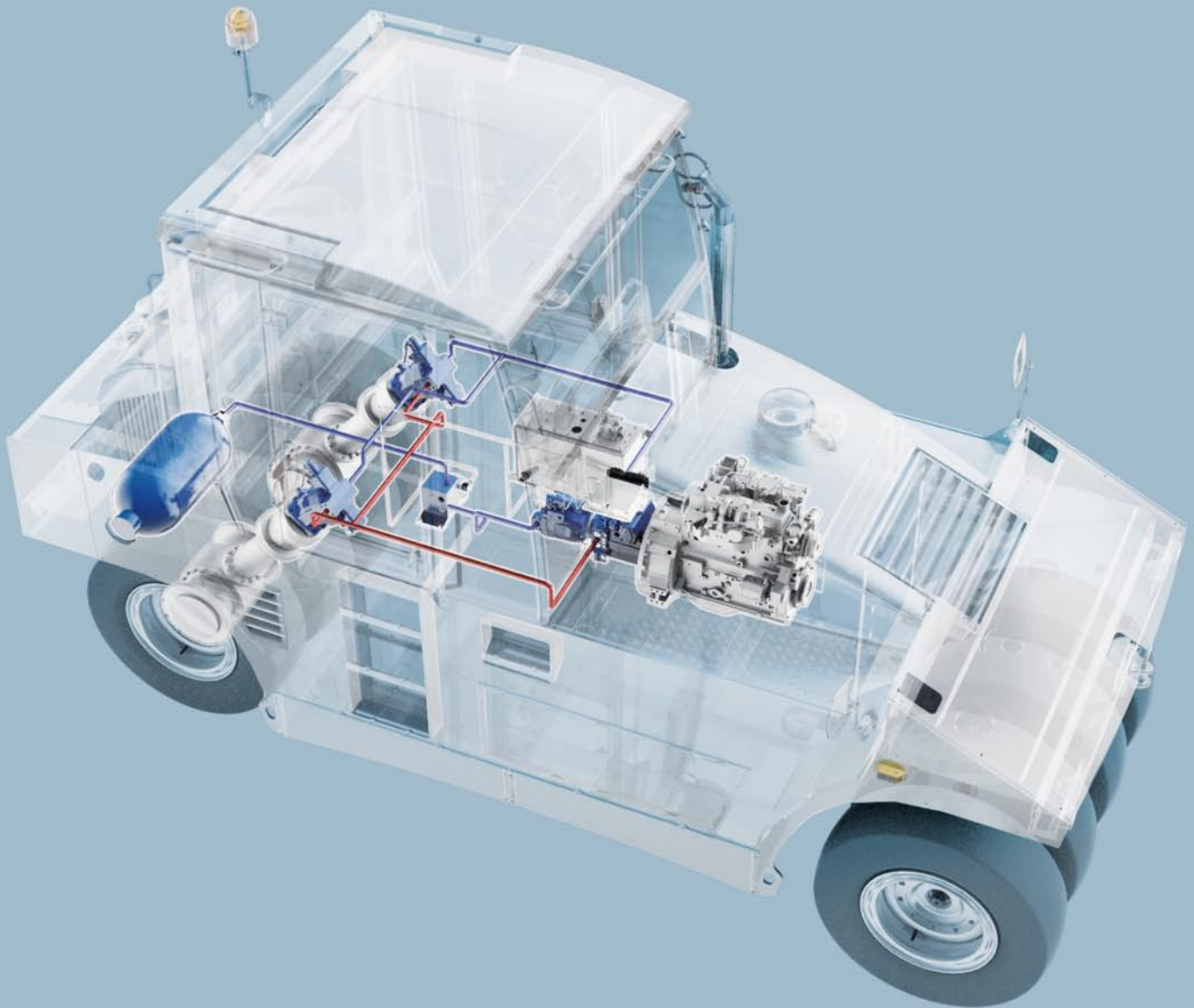


# HYDRAULISCHER ENERGIESPEICHER FÜR HYDROSTATISCHE FAHRANTRIEBE

Mit dem Hydraulic Fly Wheel (HFW) hat Bosch Rexroth ein neues Konzept für hydrostatische Fahrtriebe entwickelt, das auf die veränderte Charakteristik der neuesten Motorengeneration eingeht. Aufgrund der Tier-4-final-Vorschriften weisen die Motoren künftig ein trägeres Lastannahmeverhalten auf – das hydraulische Schwungrad kompensiert dies und unterstützt den hydrostatischen Fahrtrieb oder die Arbeitshydraulik.



## AUTOREN



**DIPL.-ING. (FH) KLAUS RENZ**  
ist Leiter Anwendungstechnik  
Straßenbaumaschinen &  
Raupenfahrzeuge bei der Bosch  
Rexroth AG in Elchingen.



**DIPL.-ING. (FH) KARL-HEINZ VOGL**  
ist Leiter Anwendungstechnik und  
Technischer Vertrieb bei der Bosch  
Rexroth AG in Elchingen.



**DIPL.-ING. MICHAEL BRAND**  
ist Gruppenleiter Anwendungs-  
entwicklung Arbeitsmaschinen bei  
der Bosch Rexroth AG in Elchingen.

## VOM GYROBUS ZUM HYBRID-RENNFAHRZEUG

In den 50er Jahren gab es einen ersten Versuch, den Schwungrad- oder Friktionsantrieb in größerem Maßstab zu nutzen. Der Schweizer Bushersteller MFO präsentierte den Gyrobus (gyros (griechisch) = Kreisel). Sein Elektroantrieb wurde nicht von Oberleitungen mit Energie versorgt, sondern von einem 1,5 t schweren Schwungrad mit 1,60 m Durchmesser, das an Ladestationen „aufgeladen“, das heißt beschleunigt wurde. Der Vorteil dieses Prinzips: Man kommt ohne Oberleitungen aus und kann auch regenerativ bremsen. Der Nachteil: Das Zusatzgewicht ist erheblich und die technischen Anforderungen hoch, weil die Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrades 900 km/h erreichen kann. Zudem beeinflusst das rotierende Schwungrad die Fahreigenschaften und nach 6 km muss eine Ladestation verfügbar sein. Deshalb wurden nur etwa 20 Gyrobusse gebaut.

Im Jahr 2010 ließ Porsche das Prinzip wieder aufleben und stellte den 911 GT3 R Hybrid vor. Er ist mit zwei zusätzlichen 60-kW-Elektromotoren an den Vorderachsen ausgestattet, die nicht von Batterien gespeist werden, sondern von einer weiteren Elektromaschine, die als Schwungradspeicher arbeitet. So wird auf Knopfdruck für sechs bis acht Sekunden ein „Boost“ erzeugt, der die Leistung steigert und den Verbrauch senkt.

## HFW FÜR MOBILE ARBEITSMASCHINEN

Man muss heute jedoch weder einen historischen Bus steuern (der einzige erhaltene Gyrobus ist in einem Antwerpener Museum zu besichtigen) noch Rennfahrer sein, um die Vorteile des Schwungradantriebs zu erfahren. Denn Rexroth hat mit dem HFW ein Antriebskonzept für mobile Arbeitsmaschinen entwickelt, das eine dem Schwungrad ähnliche Funktion in hydrostatischen Antrieben realisiert. Dabei kann der „Schwung“ sowohl von der Trägheitsmasse des Fahrzeugs als auch aus dem Verbrennungsmotor generiert werden.

Das Grundprinzip des HFW ist ganz einfach: Das System speichert nicht genutzte beziehungsweise überschüssige Energie und stellt sie exakt dann wieder zur Verfügung, wenn sie benötigt wird. Das Prinzip kann sowohl in einem hydrostatischen Fahrantrieb als auch bei hydraulischen Arbeitsfunktionen angewandt werden. Auch die technische Umsetzung auf der Komponentenebene ist vergleichsweise einfach, denn man kann bewährte Serienbauteile verwenden.

## HYDROSTATISCHER FAHRANTRIEB

Um die Funktionen des HFW als Energiespeicher im Antriebssystem im Detail zu beschreiben, ist es sinnvoll, sich zunächst die grundsätzliche Funktionsweise eines konventionellen hydrostatischen Fahrantriebs zu vergegenwärtigen. Wenn der Fahrer beispielsweise Leistung für die Fahrfunktion anfordert, schwenkt die Fahrantriebspumpe aus, der Dieselmotor erhöht die Einspritzmenge und die Fahrmotoren drehen damit zunehmend schneller. Die Vorlaufseite des Hydraulikkreislaufs steht dabei unter Hochdruck, die Rücklaufseite unter Niederdruck. Dabei gerät der Dieselmotor jedoch oft selbst unter Vollast, geht in Drückung und verlässt seinen optimalen Betriebspunkt.

# HYDRAULIC ENERGY STORAGE FOR HYDROSTATIC TRAVEL DRIVES

With their Hydraulic Fly Wheel (HFW) Bosch Rexroth has developed a new concept for hydrostatic travel drives which addresses the changed characteristics of the newest engine generation. As a consequence of the Tier 4 final regulations engines will soon exhibit more sluggish load assumption behaviour – the hydraulic fly wheel compensates for this and assists the hydrostatic travel drive or implement hydraulics.

## FROM GYROBUS TO THE HYBRID RACE CAR

The first attempt to apply the fly wheel or friction drive on a larger scale was in the 1950's, when the Swiss bus manufacturer MFO introduced the Gyrobus (gyros (Greek = turn or rotate). Its electric drive was powered not from overhead lines, but rather by a 1.5 t fly wheel 1.6 m in diameter which was "charged", that means accelerated at charging stations. The advantages of this principle: no overhead lines and regenerative braking can be used. The drawback: the additional weight is considerable and the technical demands quite high, since the circumferential speed of the fly wheel can reach 900 km/h. In addition, the rotating fly wheel affects the drive characteristics, and after 6 km a charging station has to be available. For these reasons only around 20 Gyrobuses were built.

In 2010 Porsche revived the principle and introduced the 911 GT3 R hybrid. It is equipped with two additional 60 kW electric motors on the front axles. The motors are fed not by batteries but rather by an additional electric machine which functions like a fly wheel storage unit. By pressing a button for six to eight seconds a boost is generated which increases the power and reduces fuel consumption.

## HFW FOR MOBILE MACHINES

But today you do not have to drive a historic bus (the only surviving Gyrobus can be seen at a museum in Antwerp) or be a race driver to experience the advantages

of a fly wheel drive. Rexroth namely has developed a drive concept for mobile machinery in the form of the HFW, which achieves a function similar to the fly wheel in hydrostatic drives. The momentum can be generated both by the inertia mass of the vehicle and by the combustion engine.

The basic principle of the HFW is quite simple: the system stores unused and excess energy and makes it available again exactly when and where it is needed. The principle can be applied in either a hydrostatic travel drive or for hydraulic work functions. The technical implementation on the component level is comparatively simple as well, since proven off-the-shelf parts are used.

## HYDROSTATIC TRAVEL DRIVES

To describe the function of the HFW in detail in terms of energy storage in the drive system, it makes sense to review first the basic functions of a conventional hydrostatic travel drive. When the driver, for example, requests power for the drive function, the travel drive pump swivels out, the diesel engine increases the injection amount and the travel motors turn increasingly faster. The influent flow side of the hydraulic circuit is under high pressure and the return side under low pressure. The diesel engine, however, often responds to a full load condition by starting to lug and leaves its optimal operating point.

During deceleration the high and low pressure sides are reversed in the drive.

The hydrostatic drive motors now use the diesel engine for drag torque, with the result that its revolutions per minute can rise to a non-permissible range. Whereas the combustion engine operates in drive mode at 1800 rpm (to use a realistic example), the engine speed under deceleration depending on the machine can rise to considerably more than 3000 rpm. The energy potential thus created is not used, but rather converted into friction and heat.

## BASIC PRINCIPLE OF THE HFW

The basic idea of the HFW in the travel drive is to store the kinetic energy of the machine released under deceleration – just as a mechanical fly wheel does. To realize this in hydraulic terms, only a few off-the-shelf system components are required. These are essentially the HFW

## AUTHORS

### DIPL.-ING. (FH) KLAUS RENZ

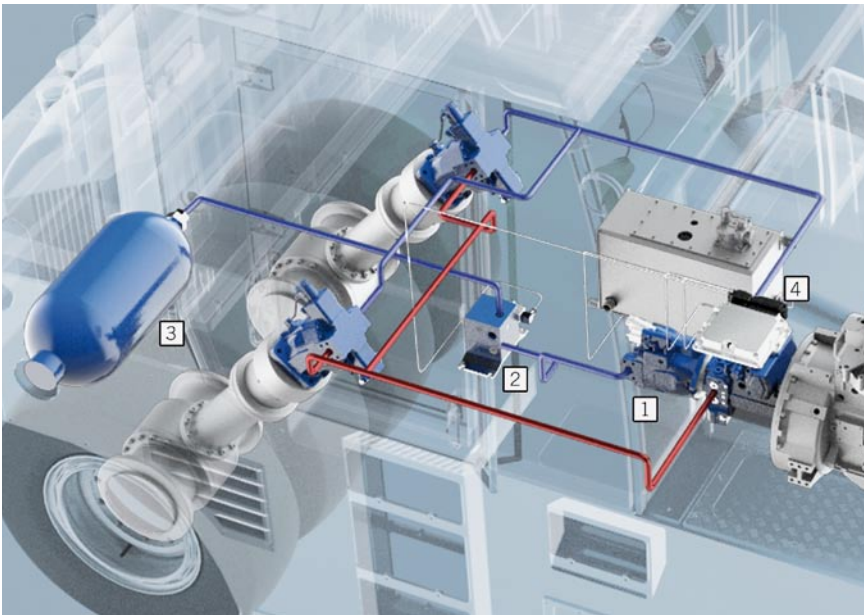
is Manager Application Engineering Road Construction Machines and Track Drive Vehicles at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).

### DIPL.-ING. (FH) KARL-HEINZ VOGL

is Director Application Engineering and Technical Sales at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).

### DIPL.-ING. MICHAEL BRAND

is Manager Application Development Mobile Machines at the Bosch Rexroth AG in Elchingen (Germany).



❶ Bestandteile des hydraulischen Schwungrads sind die HFW-Pumpe (1), der HFW-Steuerblock (2), der HFW-Speicher (3) und das Bodas-Steuergerät (4)  
 Components of the hydraulic fly wheel are the HFW pump (1), the HFW control block (2), the HFW accumulator (3) and the Bodas controller (4)

Während der Verzögerung der Maschine vertauschen sich Hochdruck- und Niederdruckseite im Antrieb. Die hydrostatischen Fahrmotoren stützen sich jetzt voll auf dem Dieselmotor ab – mit der Folge, dass dessen Drehzahl unzulässig hoch ansteigen kann. Während der Verbrennungsmotor im Fahrbetrieb mit 1800/min arbeitet (um ein realistisches Beispiel zu wählen), steigt die Drehzahl im Schubbetrieb je nach Maschine auf deutlich über 3000/min. Das Energiepotenzial, das hierbei entsteht, wird nicht genutzt, sondern in Reibung und Wärme umgesetzt.

#### BASISPRINZIP DES HFW

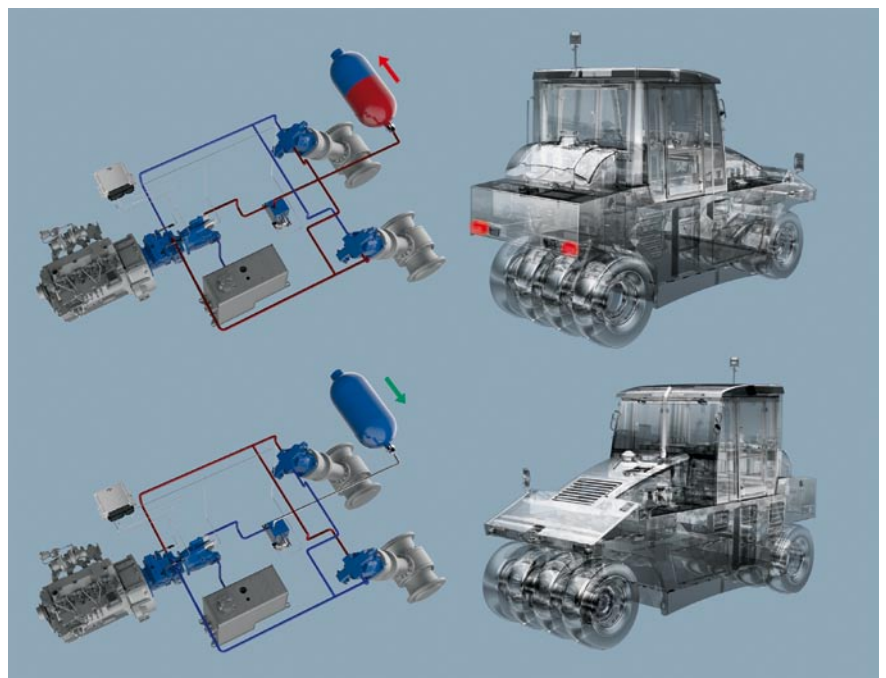
Die Grundidee des HFW im Fahrtrieb besteht nun darin, die kinetische Energie der Maschine, die bei der Verzögerung frei wird, zu speichern – genau wie ein mechanisches Schwungrad dies tut. Um dies hydraulisch zu realisieren, benötigt man nur wenige bewährte Systemkomponenten: Im Wesentlichen sind dies die HFW-Pumpe, der HFW-Steuerblock und der HFW-Speicher sowie eine Anbindung an das Bodas-Steuergerät mit einer eigens dafür entwickelten und patentierten Software, ❶.

Über das Bodas-Steuergerät, welches die gesamten hydraulischen Fahrfunktionen regelt und steuert, ist das Hydraulic

Fly Wheel in das Antriebssystem eingebunden. Da das Bodas-Steuergerät über eine Standardschnittstelle via CAN-Bus mit der elektronischen Steuerung des Die-

selmotors verbunden ist, erkennt es den Drehzahlanstieg beim Verzögern und sendet einen entsprechenden Impuls an die HFW-Pumpe und den HFW-Steuerblock. Die HFW-Pumpe schwenkt daraufhin aus, fördert Öl unter Druck in den HFW-Speicher und lädt diesen somit auf, ❷. Gleichzeitig erzeugt sie ein zusätzliches Stützmoment am Dieselmotor und verhindert dessen Hochdrehen. Dadurch steigt die Bremsleistung des hydrostatischen Fahrtriebs signifikant an, da die installierte hydrostatische Leistung nun auch während des Verzögerungsvorgangs weitestgehend genutzt werden kann – der Bremsweg verkürzt sich deutlich.

Beim Wiederanfahren unterstützt das HFW den Primärtrieb nach ähnlichem Grundprinzip. Beim Beschleunigen der Maschine gerät der Dieselmotor durch die aufgeprägte Leistungsanforderung oft auch bei maximaler Leistungsabgabe in Drückung. Er verlässt dadurch den optimalen Betriebspunkt und verliert an Dynamik. Diesen Leistungsverlust erkennt die Bodas-Elektronik und sendet Signale an die HFW-Pumpe und den HFW-Steuerblock. Daraufhin kehrt sich der Speichervorgang um: Die im Speicher enthaltene Energie wird in Form von Druck und Volumenstrom



❷ Beim Verzögern wird die kinetische Energie der Maschine hydraulisch gespeichert und beim Anfahren wieder zur Verfügung gestellt  
 Under deceleration the kinetic energy of the machine is hydraulically stored and made available again for acceleration

pump, the HFW control block and the HFW accumulator, as well as a link to the Bodas controller with custom developed and patented software, ①.

The Bodas controller which regulates and controls the entire hydraulic drive functions is the link between the HFW and the drive system. Since the Bodas controller is connected to the diesel engine ECU via CAN bus, it detects the rise in revolutions per minute during deceleration and sends a corresponding signal to the HFW pump and HFW control block. The HFW pump responds by swivelling out, sending oil under pressure to the HFW accumulator and thereby charging it, ②. At the same time it generates an additional drag torque on the diesel engine and prevents it from over-revving. In this way the braking force of the hydraulic travel drive rises significantly. The installed hydrostatic power can now be used-up effectively even during the deceleration phase, in turn drastically reducing the braking distance.

Upon acceleration, the HFW assists the primary drive according to a similar basic principle. When the machine is accelerated the diesel engine often begins to lug under the sudden increase in demand as well when it is putting out maximum power. It thereby leaves its optimal operating point and loses dynamic response. The Bodas electronics detects this power loss and sends signals to the HFW pump and the HFW control block. The storage function is then reversed: the energy contained in the accumulator is released in the form of pressure and flow and now drives the HFW pump, ③. In this way the diesel engine is assisted and can return to its optimal operating point.

Because of the fast cross-linking and transfer of all the required electronic information as well as the ideally matched components, these processes run in the background in fractions of seconds so that the driver of the machine hardly notices anything. The necessary revolutions per minute changes are virtually undetectable.

### OPEN CIRCUIT

The HFW module always works as a separate system in the open circuit. Normally this means that an oil flow is only possible in one direction. The Rexroth A10VO hydraulic pump, a proven component in

the market for many years, is available in a patented special version with negative swivel capability, allowing reversing back and forth between pump and motor mode, ④. This “mooring” function is an elementary component and an important prerequisite for implementing the HFW, as it is the only way to efficiently reverse the energy flow of the hydraulic energy storage.

The HFW module for drive mode, which was designed from the ground up for use in off-highway equipment, is significantly simpler in its construction than a comparable hydraulic hybrid drive for on-highway use. For example, the HFW gets by with a much simpler control block with no regulated control valves. Vehicle manufacturers can also choose pumps and motors from the standard catalog line, since the actual intelligence of the HFW concept lies in the controller.

### FIRST SERIES APPLICATION IN A PNEUMATIC-TYRED ROLLER

Use of the HFW module for assisting the travel drive is always practical when the machine equipped with a hydrostatic drive must brake and accelerate frequently. This kind of cyclical operation is typical of many types of machines – for example fork lifts, telehandlers, compact wheel loaders and a variety of handling equipment.

The first series application of the HFW is in a pneumatic-tyred roller, ⑤. Here the objectives and advantages of the HFW are very clear. The focus in such equipment is almost exclusively on the cyclically recurring forward and reverse motion. That means continually alternating acceleration and deceleration of the machine, so as to achieve even compacting with the greatest possible area coverage.

The machine designer generally has several options for using the HFW to assist the drive train:

- : The energy recovered by the HFW can be used to smooth out power peaks and thereby make it possible to use a smaller combustion engine depending on the system configuration (downsizing).
- : If the focus is not on downsizing, the stored energy can also be used for a momentary boost function in addition to the already existing engine output. This means faster acceleration or greater efficiency with no sacrifice in fuel consumption.

The HFW can also be used in a wide variety of mobile equipment to assist work functions. Here we find motion sequences in which energy recovery is possible – such as slewing drive in a closed circuit. When integrated into the implement hydraulics, the HFW function module takes over the task of keeping the speed of the diesel engine in a defined revolutions per minute range and in the specific, optimal fuel consumption range during the various work sequences and associated varying load requirements.

One potential application for HFW is the implement hydraulics in hydraulic excavators. Their primary drive must always be sized so that in load peak phases, for example when breaking-up material, there is sufficient power available. In combination with the HFW, which is “loaded” by the excess diesel engine power when the power demands are low, the excavator can in these situations easily provide the needed power without having the diesel to leave its specific optimal consumption range, ⑥. If the HFW-module is installed in the implement hydraulics, there are again several ways to define the benefit of the function module: power smoothing, downsizing or the boost function, ⑦.

### POWER SMOOTHING OF THE COMBUSTION ENGINE

The challenge of power smoothing is that on one hand in intervals of less engine load – in other words the “power valleys” of the implement hydraulics – the engine receives an additional load from the HFW and energy is hydraulically buffered. On the other hand in intervals of high engine load – the “power peaks” of the implement hydraulics – the combustion engine is assisted by the HFW. In this way the HFW smoothes out the power demanded by the engine and ideally keeps it constant. The hydraulic energy storage thus helps to reduce energy consumption, minimize emissions from the combustion engine, and ensure the accustomed machine dynamics in the future.

### DOWNSIZING OR BOOST FUNCTION

With the conventional configuration of a combustion engine, the rated torque is selected such that it can overcome the load peaks of the implement hydraulics. Use of

freigesetzt und treibt nun die HFW-Pumpe an, ②. Auf diese Weise wird der Dieselmotor unterstützt, der in seinen optimalen Betriebspunkt zurückkehren kann.

Aufgrund der schnellen Vernetzung aller erforderlichen Informationen sowie der optimal abgestimmten Einheiten laufen all diese Vorgänge „im Hintergrund“ in Bruchteilen von Sekunden ab, so dass der Fahrer der Maschine kaum Notiz davon nimmt. Die erforderlichen Drehzahländerungen sind nahezu nicht spürbar.

### OFFENER KREISLAUF

Das HFW-Modul arbeitet stets als separates System im offenen Kreislauf. Dies bedeutet normalerweise, dass nur in eine Richtung ein Ölstrom möglich ist. Die am Markt bereits seit vielen Jahren bewährte Rexroth-Hydraulikpumpe A10VO ist jedoch in einer patentierten Sonderausführung durchschwenkbar, um vom Pumpen- in den Motorbetrieb und umgekehrt wechseln zu können, ③. Diese „Mooring“-Funktion ist elementarer Bestandteil und wichtige Grundvoraussetzung für die Umsetzung des HFW, denn nur damit lässt sich der Energiefluss des hydraulischen Energiespeichers effizient umkehren.

Das HFW-Modul für den Fahrtrieb, das von Grund auf für den Einsatz in Off-Highway-Maschinen konzipiert wurde, ist deutlich einfacher aufgebaut als ein vergleichbarer hydraulischer Hybridantrieb



③ Die durchschwenkbare (Mooring) Pumpe A10VO ist das „Herz“ des HFW. The zero swivel-capable (mooring) pump is the heart of the HFW.

für den On-Highway-Bereich. So kommt das HFW zum Beispiel mit einem deutlich einfacheren Steuerblock ohne Regelventile aus. Die Fahrzeughersteller können zudem Pumpen und Motoren aus dem Standardprogramm auswählen, denn die eigentliche „Intelligenz“ des HFW-Konzeptes steckt in der Steuerung.

### ERSTER SERIENEINSATZ IN EINER GUMMIRADWALZE

Sinnvoll ist der Einsatz des HFW-Moduls zur Unterstützung des Fahrtriebs immer dann, wenn eine Arbeitsmaschine, die mit

hydrostatischem Antrieb ausgestattet ist, häufig abbremst und wieder anfährt. Diese Art von zyklischen Fahrbewegungen gibt es bei vielen Maschinen – zum Beispiel bei Gabelstaplern, Teeladern, Kompakt-Radladern und zahlreichen weiteren Umschlaggeräten.

Der erste Serieneinsatz des HFW wurde in einer Gummiradwalze realisiert, ④. Bei dieser Anwendung werden die Zielsetzungen und Vorteile des HFW sehr deutlich. Der Fokus liegt bei diesen Geräten fast ausschließlich auf der zyklisch wiederkehrenden Vor- und Rückwärtsbewegung, das heißt auf ständig abwechselnder Beschleunigung und Verzögerung der Maschine, um eine möglichst gleichmäßige Verdichtung bei höchst möglicher Flächenleistung zu erhalten.

Generell ergeben sich beim Einsatz des HFW zur Unterstützung des Antriebsstrangs mehrere Optionen für den Maschinenkonstrukteur:

- : Die durch HFW reperierte Energie kann dazu verwendet werden, anfallende Leistungsspitzen zu bedienen und eröffnet je nach Systemauslegung die Möglichkeit, einen kleineren Verbrennungsmotor für die Maschine zu wählen (Downsizing).
- : Liegt der Fokus nicht auf Downsizing, kann die gespeicherte Energie auch für eine kurzzeitige Boost-Funktion zusätzlich zu der bereits vorhandenen Motorleistung genutzt werden. Dies bedeutet schnellere Beschleunigung oder höhere Effizienz bei gleichbleibendem Verbrauch. Darüber hinaus kann das HFW auch zur Unterstützung von Arbeitsfunktionen in



④ Der erste Serieneinsatz des HFW-Moduls wurde in einer Gummiradwalze realisiert. The first production use of the HFW modules was implemented in a pneumatic-tired roller.

an HFW system eliminates these peaks for the diesel engine so that a smaller rated torque is sufficient. This approach using a smaller engine is referred to as downsizing and saves energy, costs and installation space without compromising the peak power of the vehicle.

If downsizing is of less importance due to considerations of the machine, the HFW can also be used to provide a power peak. With this so-called boost function the machine can produce more work power with the same installed combustion engine, which ultimately results in higher efficiency and reduced operating costs.

### GREATER DYNAMIC RESPONSE FOR TIER 4 ENGINES

The development of the HFW must also be seen against the looming horizon of the stricter emissions regulations for mobile work equipment. Diesel engines which meet the requirements of Tier 4 final will be conspicuously more sluggish in their load assumption behaviour. They respond slower when power is demanded by the travel drive or implement hydraulics.

This characteristic, which also affects the productivity of the machine, will be immediately perceived by the operator as negative. The HFW concept can compensate for this condition and thereby not only reduce the fuel consumption of the machine, but also even increase its power capability by – just as with the Porsche race car – providing momentary additional power. This retains the original dynamic response of the machine or even enhances it.

One requirement must be met for use of the hydraulic energy storage: Since the HFW system primarily assists the diesel engine, communication between the control units for the combustion engine and the hydraulics is essential. This prerequisite is easily met in most work equipment, since modern diesel engines are already electronically controlled and there are stan-

dard interfaces based on CAN bus (J1939), which enable rapid communication of the control and regulation variables.

### OPTIMIZATION OF THE BRAKING FUNCTION

Drivers of a machine equipped with hydrostatic travel drive appreciate not only the power and good control capability of the drive, but also the hydrostatic braking function. Here again the HFW concept promises advantages for future machine generations: for machines with a maximum speed of up to 25 km/h the hydrostatics can completely take over the function of the service brakes.

In the future however it will be significantly more difficult for designers of mobile work equipment to realize this type of braking. This is because the new Tier 4 compatible engines have much lower drag torque and less towing power. This means in turn that the hydrostatic travel drives can assume less braking power, since in this operating condition the diesel engine is the weakest link in the chain. The braking distance of these machines increases with the introduction of Tier 4 exhaust gas regulations if you want to preclude damage to the diesel engine from to high revolutions. Here again the HFW system can come to the rescue by providing additional drag torque and thereby significantly increasing the braking effect of the diesel engine itself along with the transferable braking power of the hydrostatics.

### KIT SYSTEM TO BE INDIVIDUALLY TAILORED

Rexroth has developed the HFW as a kit system: there are five different pump sizes and four different accumulator volumes available. The systems operate at 280 bar and provide power figures of from 39 to 118 kW. The components as well as the overall system can be easily integrated in-

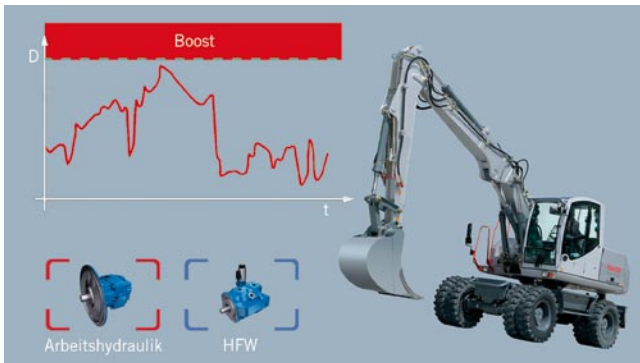
to the vehicle and into the existing hydrostatic drive, so that the HFW can be used in existing machine types as part of regular model updating. In all cases the functions of the hydraulic energy storage are individually tailored to the desired characteristics. The electronics upon which the HFW is essentially based allows a high degree of flexibility and possibilities for adaptations.

### SUMMARY AND OUTLOOK

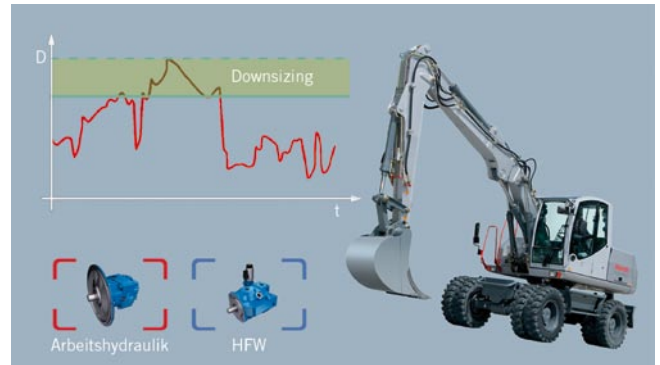
In summary it can be seen that the hydraulic fly wheel (HFW), in spite of its relatively simple design and construction, offers significant advantages for the use, operation and fuel consumption of off-highway machines. Which advantage needs to be primarily exploited is a matter of the machine builder's requirements and desires:

- : Power smoothing achieves better machine dynamics and keeps the combustion engine in quasi-stationary operating points.
- : The ability to employ a boost function increases the work power.
- : The combustion engine and exhaust gas aftertreatment systems can be sized smaller with no sacrifice in power, saving fuel through downsizing.
- : By means of energy recovery fuel savings are realized while the braking effect and machine dynamics are both improved.

Expansion stages of the HFW are also conceivable, especially in terms of integration into implement hydraulics systems. Additional functions such as Diesel Hydraulic Control (DHC) or a High Level Braking function (HLB) of Rexroth, further increase the usefulness of this efficient system. This underscores the flexibility of hydraulic drives and how much energy saving potential they offer when the hydraulics is controlled electronically and this control is coordinated with the ECU of the combustion engine.



5 Als Boost-Funktion steht dem Rexroth-Versuchsträger kurzfristig mehr Arbeitsleistung zur Verfügung als der Verbrennungsmotor eigentlich bereitstellen kann  
In terms of a boost function the Rexroth test vehicle has more work power available than the combustion engine can actually provide



6 Die Lastspitzen der Arbeitshydraulik (rot) werden vom HFW kompensiert (blau), wodurch ein konstanter Betriebspunkt des Verbrennungsmotors (grün) erreicht wird  
The load peaks of the implement hydraulics (red) are compensated for by the HFW (blue), resulting in a constant operating point of the combustion engine (green)

einer breiten Palette unterschiedlicher Arbeitsmaschinen eingesetzt werden. Hier kommen Bewegungsabläufe in Frage bei denen eine Rekuperation von Energie möglich ist – wie beispielsweise ein Drehwerksantrieb im geschlossenen Kreis. Bei der Integration in die Arbeitshydraulik übernimmt das HFW-Funktionsmodul die Aufgabe, die Drehzahl des Dieselmotors während der unterschiedlichen Arbeitsvorgänge und damit verbundenen unterschiedlichen Lastanforderungen in einem definierten Drehzahlband und im spezifisch optimalen Verbrauchsbereich zu halten.

Eine potenzielle Anwendung vom HFW ist die Arbeitshydraulik bei Hydraulikbaggern. Deren Primärtrieb muss stets so dimensioniert sein, dass in Phasen von Lastspitzen, zum Beispiel beim Losbrechen von Material, genügend Leistung zur Verfügung steht. In Kombination mit dem HFW, das bei geringeren Leistungsanforderungen der Arbeitshydraulik von der überschüssigen Dieselmotorleistung „geladen“ wird, kann der Bagger in diesen Situationen problemlos die entsprechende Leistung aufbringen, ohne dass der Diesel seinen spezifisch optimalen Verbrauchsbereich verlassen muss, 5. Wird das HFW-Modul in der Arbeitshydraulik installiert, bieten sich auch hier mehrere Möglichkeiten, den Nutzen des Funktionsmoduls zu definieren: Leistungsglättung, Downsizing oder Boost-Funktion, 6.

#### LEISTUNGSGLÄTTUNG DES VERBRENNUNGSMOTORS

Die Herausforderung beim Leistungsglätten besteht darin, dass einerseits in Zeit-

abschnitten geringer Verbrennungsmotorbelastung – also den „Leistungstälern“ der Arbeitshydraulik – der Verbrennungsmotor durch das HFW zusätzlich belastet und Energie hydraulisch zwischengespeichert wird. Andererseits soll in Zeitabschnitten hoher Verbrennungsmotorbelastung – also den „Leistungsbergen“ der Arbeitshydrau-

lik – der Verbrennungsmotor durch das HFW unterstützt werden. Dadurch glättet HFW die vom Verbrennungsmotor abverlangte Leistung und hält sie idealerweise konstant. Der hydraulische Energiespeicher trägt somit dazu bei, den Energieverbrauch zu senken und auch die Emissionen des Verbrennungsmotors zu minimieren sowie die

MASSGESCHNEIDERTE LÖSUNGEN

## BLECHFORMTEILE FÜR BAU- UND LANDMASCHINEN

- ◆ Konstruktion und Produktion hochbelastbarer Bauteile in kleinen und großen Serien
- ◆ Stahl, Edelstahl, Aluminium und Buntmetall – poliert oder lackiert
- ◆ Jede gewünschte Geometrie, einbaufertig und mit Anbauelementen
- ◆ Zertifizierte Qualität nach DIN EN ISO 9001

**HELMUT RÜBSAMEN GMBH & CO.KG**  
Metalldrückerei · Umformtechnik  
Carl-Goerdeler-Allee 6 · 56470 Bad Marienberg  
Telefon 0049 (0)2661/98 51-0 · Fax (0)2661/98 51 51  
E-Mail info@helmut-ruebsamen.de  
www.helmut-ruebsamen.de

gewohnte Maschinendynamik in Zukunft auch weiterhin zu gewährleisten.

### Downsizing oder Boost-Funktion

Bei konventioneller Auslegung des Verbrennungsmotors wird das Nennmoment normalerweise so gewählt, dass es die Belastungsspitzen der Arbeitshydraulik bewältigen kann. Der Einsatz eines HFW-Systems eliminiert diese Spitzen für den Dieselmotor, so dass ein kleineres Nennmoment ausreicht. Diese als Downsizing bezeichnete Möglichkeit zur Installation eines kleineren Verbrennungsmotors spart Energie, Kosten und Bauraum, ohne dass die Spitzenleistung des Gerätes beeinträchtigt wird.

Ist Downsizing aufgrund der Umstände in der Maschine von untergeordneter Bedeutung, kann das HFW auch dazu genutzt werden, einen Leistungsspeak bereit zu stellen. Mit dieser sogenannten „Boost-Funktion“ kann die Maschine dann bei gleichem installiertem Verbrennungsmotor mehr Arbeitsleistung erbringen, das sich schlussendlich in einer höheren Effizienz und damit reduzierten Betriebskosten widerspiegelt.

### Höhere Dynamik für Tier-4-Motoren

Die Entwicklung des HFW muss man auch vor dem Horizont der sich verschärfenden Emissionsvorschriften für mobile Arbeitsmaschinen sehen. Dieselmotoren, welche die Anforderungen von Tier 4 final erfüllen, werden in ihrem Lastannahmeverhalten deutlich träger sein. Sie sprechen also langsamer an, wenn durch den Fahrtrieb oder die Arbeitshydraulik Leistung angefordert wird.

Diese Eigenschaft, welche auch die Produktivität der Arbeitsmaschine beeinträchtigt, wird der Fahrer sofort als negativ empfinden. Das HFW-Konzept kann diesen Nachteil ausgleichen und dabei nicht nur den Kraftstoffverbrauch der Maschine senken, sondern auch deren Leistungsvermögen noch erhöhen, indem – genau wie beim Porsche-Rennfahrzeug – kurzfristig zusätzliche Leistung zur Verfügung gestellt wird. Dadurch kann die ursprüngliche Dynamik der Maschine erhalten oder noch weiter optimiert werden.

Eine Voraussetzung für den Einsatz des hydraulischen Energiespeichers muss aller-

dings gegeben sein: Da das HFW-System in erster Linie den Dieselmotor unterstützt, ist eine Kommunikation zwischen den Regelungen des Verbrennungsmotor und der Hydraulik zwingend erforderlich. Diese Voraussetzung ist bei den meisten Arbeitsmaschinen leicht zu erfüllen, denn moderne Dieselmotoren sind bereits heute elektronisch geregelt und es stehen Standard-Schnittstellen auf CAN-Basis (J1939) zur Verfügung, die einen schnellen Austausch der Steuerungs- und Regelungsstellgrößen erlauben.

### Optimierung der Bremsfunktion

Die Fahrer einer Maschine mit hydrostatischem Fahrtrieb schätzen nicht nur deren Leistung und die gute Regelbarkeit des Antriebs, sondern auch die hydrostatische Bremsfunktion. Auch hier verspricht das HFW-Konzept Vorteile für künftige Maschinengenerationen, denn bei Maschinen mit einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von bis zu 25 km/h kann und darf die Hydrostatik bislang die Funktion der Betriebsbremse komplett übernehmen.

Zukünftig wird es für die Konstrukteure von mobilen Arbeitsmaschinen jedoch deutlich schwieriger sein, diese Art des Bremsens zu realisieren. Denn die neuen, Tier 4 kompatiblen Motoren weisen ein deutlich niedrigeres Stützmoment und eine geringere Schleppleistung auf. Dies bedeutet, dass die hydrostatischen Fahrtriebe weniger Bremsleistung aufnehmen können, da der Dieselmotor in diesem Betriebszustand das „schwächste Glied in der Kette“ ist. Dadurch verlängert sich der Bremsweg dieser Maschinen mit Einführung der Abgasvorschriften gemäß Tier 4, wenn man einen Schaden des Dieselmotors aufgrund von zu hohen Drehzahlen ausschließen will. Auch hier kann das HFW-System unterstützend eingreifen, indem es dem Dieselmotor ein zusätzliches Stützmoment liefert und auf diese Weise die Bremswirkung des Diesels selbst sowie die übertragbare Bremsleistung des Hydrostaten signifikant erhöht.

### Baukastensystem wird individuell angepasst

Rexroth hat das HFW im Baukastensystem entwickelt: Es stehen fünf verschiedene Pumpengrößen und vier verschiedene

Speichervolumina zur Verfügung. Die Systeme arbeiten mit 280 bar Druck und stellen Leistungen von 39 bis 118 kW bereit. Sowohl die Komponenten als auch das Gesamtsystem können leicht ins Fahrzeug und in den vorhandenen hydrostatischen Antrieb integriert werden, so dass das HFW im Zuge der Modellpflege auch in existierenden Maschinentypen genutzt werden kann. Bei allen Einsatzfällen werden die Funktionen des hydraulischen Energiespeichers individuell auf die gewünschten Eigenschaften abgestimmt. Die Elektronik, auf deren Möglichkeiten das HFW letztlich basiert, erlaubt hier sehr viele Freiheitsgrade und Anpassungsmöglichkeiten.

### Fazit und Ausblick

Zusammengefasst kann man feststellen, dass das Hydraulic Fly Wheel (HFW) trotz des relativ einfachen Aufbaus erhebliche Vorteile für den Einsatz, die Bedienung und den Energieverbrauch von Off-Highway-Maschinen bringt. Dabei liegt es an den Anforderungen und Wünschen des Maschinenbauers, welcher Vorteil im Vordergrund stehen soll:

- : Durch Leistungsglättung erreicht man eine bessere Maschinendynamik und hält den Verbrennungsmotor in quasi-stationären Betriebspunkten.
- : Die Möglichkeit, eine Boost-Funktion zu realisieren, erhöht die Umschlagsleistung.
- : Bei gleicher Leistung kann man den Verbrennungsmotor und die Abgasnachbehandlungssysteme kleiner dimensionieren und durch das Downsizing Kraftstoff sparen.
- : Durch die Energierückgewinnung spart man einerseits Kraftstoff, andererseits wird die Bremswirkung sowie die Maschinendynamik verbessert.

In naher Zukunft sind auch weitere Ausbaustufen des HFW insbesondere im Bereich der Integration in Arbeitshydrauliksysteme denkbar. Zusatzfunktionen wie beispielsweise Diesel Hydraulic Control (DHC) oder eine Hochleistungsbremsfunktion (HLB) von Rexroth erhöhen nochmals den Nutzen dieses effizienten Systems. Dies beweist einmal mehr, welche Flexibilität hydraulische Antriebe aufweisen und welche Energieeinsparpotenziale sie bieten, wenn man die Hydraulik elektronisch regelt und diese Regelung mit der elektronischen Steuerung des Verbrennungsmotors koordiniert.

## SONDERAUSGABE ATZ

### SPECIAL EDITION ATZ

September 2010 | September 2010

Springer Automotive Media | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

P. O. Box 15 46 - 65173 Wiesbaden - Germany | Abraham-Lincoln-Straße 46 - 65189 Wiesbaden - Germany  
Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811148419**Geschäftsführer** | Managing Directors Dr. Ralf Birkelbach (Vorsitzender | Chairman), Armin Gross, Albrecht Schirmacher**Gesamtleitung Anzeigen und Märkte** | Senior Advertising Armin Gross | **Gesamtleitung Marketing** | Senior Marketing Rolf-Günther Hobbeling**Gesamtleitung Produktion** | Senior Production Christian Staral | **Gesamtleitung Produktion** | Sales Director Gabriel Göttlinger

#### WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT SCIENTIFIC ADVISORY BOARD

#### ATZ

Dipl.-Ing. Dietmar Bichler, Bertrandt AG,  
Dipl.-Ing. Kurt Blumenröder, IAV GmbH,  
Dr.-Ing. Bernd Bohr, Robert Bosch GmbH,  
Dipl.-Ing. Michael Dick, Audi AG, Dr.-Ing.  
Klaus Draeger, BMW AG, Prof. Dr.-Ing.  
Lutz Eckstein, RWTH Aachen, Dr.-Ing./U.  
Cal. Markus Flik, Behr GmbH & Co. KG,  
Dipl.-Ing. Rita Forst, Adam Opel GmbH,  
Hans-Georg Frischkorn, VDA, Prof. Dr.-Ing.  
Burkhard Göschel, Magna International  
Europe AG, Prof. Dipl.-Ing. Jörg Grabner,  
Hochschule München, Dr.-Ing. Peter  
Gutzmer, Schaeffler Gruppe, Martin Haub,  
Valeo, Dipl.-Ing. Christoph Hub, VDI-FVT,  
Dipl.-Ing. Bernd Maierhofer, MAN Nutzfahrzeuge AG, Dr.-Ing. Michael Paul, ZF  
Friedrichshafen AG, Prof. Dr.-Ing. Ulrich  
Spicher, WKM, Dr.-Ing. Thomas Weber,  
Daimler AG, Prof. Dr. rer. nat. Martin  
Winterkorn, Volkswagen AG

#### MTZ

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende, Universität Stuttgart, Prof. Dr. techn. Christian Beidl, TU Darmstadt, Dr.-Ing. Ulrich Dohle, Tognum AG, Dipl.-Ing. Wolfgang Dürheimer, Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Dr. Klaus Egger, Dipl.-Ing. Dietmar Goericke, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Prof. Dr.-Ing. Uwe-Dieter Grebe, GM Powertrain, Dipl.-Ing. Thorsten Herdan, VDMA-Fachverband Motoren, und Systeme, Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Junker, Mahle GmbH, Prof. Dr. Hans Peter Lenz, ÖVK, Prof. Dr. h. c. Helmut List, AVL List GmbH, Dipl.-Ing. Wolfgang Maus, Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger, FEV Motorentechnik GmbH, Prof. Dr. Hans-Peter Schmalzl, APC – Advanced Propulsion Concepts Mannheim GmbH, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, TU Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher, WKM

#### HERAUSGEBER | EDITORS-IN-CHARGE

Dr.-Ing. E. h. Richard van Basshuysen  
Wolfgang Siebenpeiffer

#### REDAKTION | EDITORIAL STAFF

#### CHEFREDAKTEUR | EDITOR-IN-CHIEF

Johannes Winterhagen (win)  
phone +49 611 7878-342 - fax +49 611 7878-462  
johannes.winterhagen@springer.com

#### STELLVERTRETENDER CHEFREDAKTEUR

I VICE-EDITOR-IN-CHIEF  
Dipl.-Ing. Michael Reichenbach (rei)  
phone +49 611 7878-341 - fax +49 611 7878-462  
michael.reichenbach@springer.com

#### CHEFIN VOM DIENST | CHIEF-ON-DUTY

Kirsten Beckmann M. A. (kb)  
phone +49 611 7878-343 - fax +49 611 7878-462  
kirsten.beckmann@springer.com

#### PROJEKTKOORDINATION

I PROJECT COORDINATION  
Dipl.-Reg.-Wiss. Caroline Behle (beh)  
phone +49 611 7878-244 - fax +49 611 7878-462  
caroline.behle@springer.com

#### RESSORTS | SECTIONS

*Elektrik, Elektronik* | *Electrics, Electronics*  
Markus Schöttle (scho)  
phone +49 611 7878-257 - fax +49 611 7878-462  
markus.schoettle@springer.com

#### *Forschung* | *Research*

Dipl.-Ing. (FH) Moritz-York von Hohenthal (mvh)  
phone +49 611 7878-278 - fax +49 611 7878-462  
moritz.von.hohenthal@springer.com

#### *Getriebe* | *Transmission*

Dipl.-Ing. Michael Reichenbach (rei)  
phone +49 611 7878-341 - fax +49 611 7878-462  
michael.reichenbach@springer.com

#### *Motor* | *Engine*

Ruben Danisch (rd)  
phone +49 611 7878-393 - fax +49 611 7878-462  
ruben.danisch@springer.com

#### *Online* | *Online*

Katrin Pudenz M. A. (pu)  
phone +49 6172 301-288 - fax +49 6172 301-299  
redaktion@kpz-publishing.com

#### *Produktion, Werkstoffe* | *Production, Materials*

Stefan Schlott (hlo)  
phone +49 8191 70845 - Fax +49 8191 66002  
Redaktion\_Schlott@gmx.net

#### *Veranstaltungskalender* | *Event Calendar*

Martina Schraad (mas)  
phone +49 611 7878-276 - fax +49 611 7878-462  
martina.schraad@springer.com

#### ADDRESS

P. O. Box 15 46, 65173 Wiesbaden, Germany  
redaktion@ATZonline.de

#### ENGLISH LANGUAGE CONSULTANT

Paul Willin (pw)

#### STÄNDIGE MITARBEITER

#### I PERMANENT CONTRIBUTORS

Richard Backhaus (rb),  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Breuer (sb),  
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Fuchs (fu),  
Jürgen Grandel (gl), Prof. Dr.-Ing. Fred Schäfer (fs)

#### ANZEIGEN | ADVERTISING

#### ANZEIGENLEITUNG | AD MANAGER

Britta Dolch  
phone +49 611 7878-323 - fax +49 611 7878-140  
britta.dolch@gww-media.de

#### KEY ACCOUNT MANAGEMENT

Elisabeth Maßfeller  
phone +49 611 7878-399 - fax +49 611 7878-140  
elisabeth.massfeller@gww-media.de

#### ANZEIGENVERKAUFSLEITUNG

#### I AD SALES MANAGER

Sabine Röck  
phone +49 611 7878-269 - fax +49 611 7878-140  
sabine.roeck@gww-media.de

#### ANZEIGENVERKAUF | AD SALES

Frank Nagel  
phone +49 611 7878-395 - fax +49 611 7878-140  
frank.nagel@gww-media.de

#### ANZEIGENDISPOSITION

#### I DISPLAY AD MANAGER

Susanne Bretschneider  
phone +49 611 7878-153 - fax +49 611 7878-443  
susanne.bretschneider@gww-media.de

#### ANZEIGENPREISE | AD PRICES

Anzeigenpreisliste Nr. 53 | Price List No. 53  
(10/2009)

#### MARKETING | MARKETING

#### PRODUKTMANAGEMENT AUTOMEDIEN

#### I PRODUCT MANAGEMENT AUTOMOTIVE

MEDIA  
Sabrina Brokopp  
phone +49 611 7878-192 - fax +49 611 7878-407  
sabrina.brokopp@springer.com

#### PRODUKTION | PRODUCTION | LAYOUT

Heiko Köllner  
phone +49 611 7878-177 - fax +49 611 7878-464  
heiko.koellner@springer.com

#### DRUCK / VERARBEITUNG

#### I PRINT / PROCESSING

Kliemo, Eupen/Belgien. Printed in Europe.

### YOUR HOTLINE TO ATZoffhighway

Editorial Staff

☎ +49 6146 837056

Reader's Service

☎ +49 611 7878-151

Advertising

☎ +49 611 7878-395

#### ABONNEMENTS | SUBSCRIPTIONS

VVA-Zeitschriftenservice, Abt. D6 F6, ATZextra  
P. O. Box 77 77, 33310 Gütersloh, Germany  
Renate Vies  
phone +49 5241 80-1692 - Fax +49 5241 80-9620  
SpringerAutomotive@abo-service.info

#### BEZUGSBEDINGUNGEN

#### I SUBSCRIPTION CONDITIONS

Diese Sonderausgabe der ATZ ist in Verbindung mit einem ATZ/MTZ-Abonnement erhältlich und mit dem Abonnementpreis abgegolten. Einzelbezugspreis: 29,90 €.

This special issue of ATZ is available in conjunction with a subscription of ATZ/MTZ and compensated with the subscription rate. Price per copy: 29,90 €.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und allen anderen elektronischen Datenträgern. The journal and all articles and figures are protected by copyright. Any utilisation beyond the strict limits of the copyright law without permission of the publisher is illegal. This applies particularly to duplications, translations, microfilming and storage and processing in electronic systems.

© Springer Automotive Media /  
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH,  
Wiesbaden 2010

Springer Automotive Media ist eine Marke von Springer Fachmedien. Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media. Springer Automotive Media is a brand of Springer Fachmedien. Springer Fachmedien is part of the specialist publishing group Springer Science+Business Media.