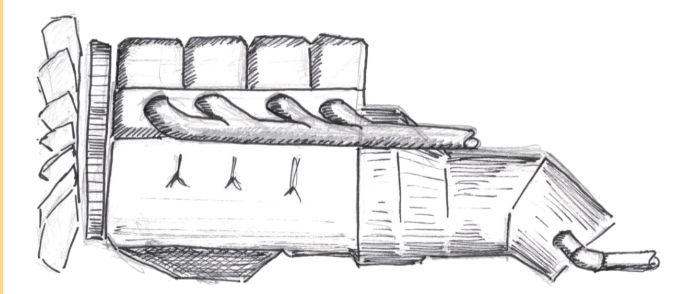


# Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen



2. Fachtagung des VDMA  
und der Universität Karlsruhe (TH)  
18. Februar 2009  
Karlsruhe

# Berechenbare Wirtschaftlichkeit: Hydraulischer Hybridantrieb im Feldversuch

Dipl.-Ing. Detlef van Bracht  
Dr. Christine Ehret  
Dr. Markus G. Kliffken

Bosch Rexroth AG  
Anwendungszentrum LKW-Antriebe  
Tel. +49 (0)7451 921441  
Fax +49 (0)7451 60886  
detlef.vanbracht@boschrexroth.de  
www.boschrexroth.com

## Abstract

Eine deutliche Reduzierung des Dieserverbrauchs von bis zu 25 Prozent bei schweren Nutzfahrzeugen und eine entsprechend geringere Abgasemission erzielt das neu entwickelte Hydraulisch Regenerative Bremssystem, HRB, von Rexroth. Das belegen Praxistests und die Felderprobung mit einem Abfallsammelfahrzeug der Haller Umweltsysteme GmbH & Co. KG bei der Berliner Stadtreinigung. Seit Juli 2008 stellt das Fahrzeug seine Alltagstauglichkeit unter Beweis. Dabei bestätigen Messergebnisse die in Simulationen berechneten Einsparungen. Über eine von Rexroth entwickelte Software können für Fahrzeughersteller vorab detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt werden.

**Schlüsselwörter:** Emissionsreduzierung, Hydraulischer Hybrid, Hydrostatisch Regeneratives Bremssystem, Mobile Arbeitsmaschinen, Nutzfahrzeuge, Verbrauchssenkung

## 1 Einleitung

Bei Abfallsammelfahrzeugen, Schul- und Stadtbussen sowie mobilen Arbeitsmaschinen und schweren Nutzfahrzeugen, die häufig anhalten und anfahren, fällt viel Bremsenergie an. Das erhöht den Dieselverbrauch und steigert die Emission von Abgasen. Das Hydrostatisch Regenerative Bremssystem von Rexroth speichert die beim konventionellen Bremsen in nutzlose Wärme umgewandelte Energie und stellt sie beim Beschleunigen wieder zur Verfügung. Dabei nutzt die Systemlösung die hohe Leistungsdichte der Hydraulik für eine hoch effiziente Rekuperation der Bremsenergie. So wird der Verbrennungsmotor beim Anfahren entlastet und es entstehen von vorne herein weniger Abgase, da der Kraftstoffverbrauch sinkt.

## 2 Das Hydrostatisch Regenerative Bremssystem

Der parallele Hybridantrieb eignet sich für Fahrzeuge mit konventionellem mechanischem Antriebsstrang und einem Verbrennungsmotor. Eine über ein Getriebe an den mechanischen Antriebsstrang angekoppelte hydraulische Axialkolbeneinheit wandelt beim Bremsen kinetische in hydraulische Energie um. Die Axialkolbeneinheit wirkt hierbei als Pumpe und lädt einen hydraulischen Blasenspeicher mit Hydrauliköl. Diesen Vorgang regelt ein elektronisches Steuergerät von Rexroth in Verbindung mit einem hydraulischen Ventilsteuerblock (Abbildung 1).

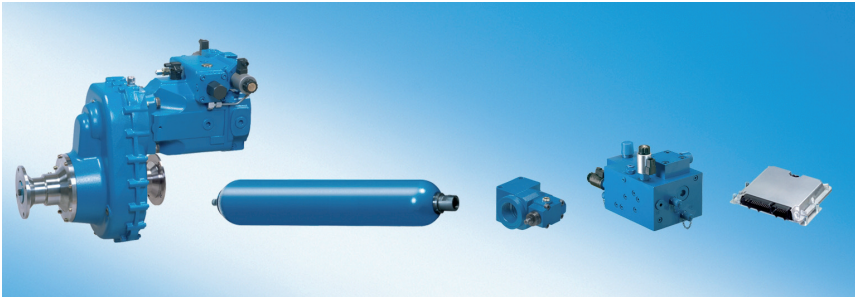


Abbildung 1: Systemkomponenten HRB parallel: Axialkolbeneinheit A4VSO mit Getriebe, Druckspeicher, Speichersicherheitsventil, Ventilsteuerblock HIC, elektronisches Steuergerät.

Beim Anfahren kehrt sich der gesamte Vorgang um: Das unter Druck stehende Öl entlädt sich kontrolliert aus dem Speicher und fließt zurück durch die Axialkolbeneinheit. Diese wird von dem Ölstrom angetrieben und gibt als Motor ihre Leistung an den mechanischen Antriebsstrang ab. Das entlastet den Verbrennungsmotor und reduziert so den Kraftstoffverbrauch. Je häufiger und intensiver das Fahrzeug bremst, desto höher liegt die mögliche Verbrauchssenkung. Ein

positiver Zusatzeffekt für den Fahrzeugbetreiber ist der deutlich geringere Bremsverschleiß dank HRB. Die Feinstaubbelastung durch Bremsenabrieb und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verbrennungsmotors sinken entsprechend.

Durch den modularen Aufbau ist das parallele HRB grundsätzlich in jedes gängige Nutzfahrzeuggestell integrierbar. Somit könnten vom Fahrzeughersteller auch Nachrüstätze für bestehende Fahrzeugflotten angeboten werden. Die Systemlösung besteht aus seriennahen Komponenten aus dem Hydraulik- und Elektronikprogramm von Rexroth.

### 3 Das Pilotfahrzeug

Seit Juli 2008 testet die Berliner Stadtreinigung in einem Praxisversuch ein Abfallsammelfahrzeug der x2eco-Serie von HALLER Umweltsysteme GmbH & Co. KG mit Parallelhybrid von Rexroth (Abbildung 2). Das Fahrzeug basiert auf einem Mercedes-Benz Actros Fahrgestell mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 26



Abbildung 2: Mit HRB ausgestattetes Pilotfahrzeug im Einsatz bei der Berliner Stadtreinigung.

Tonnen. Der Großserien-Antriebsmotor leistet 235 KW bei 1.800 U/min bei einem Drehmoment von 1650 Nm in Kombination mit einem automatisierten 16-Gang Schaltgetriebe. Das installierte HRB nutzt zwei Blasenspeicher mit jeweils 32 Liter Gasnennvolumen und einem maximalen Speicherdruck von 330 bar. Damit

erreicht die Speicherkapazität 550 Kilojoule (ca. 0,15 kWh) und steuert beim Beschleunigen ein Moment von bis zu 2.500 Nm bei. Der HRB-Geschwindigkeitsbereich reicht von null bis 43 km/h. Die kompakten Einzelkomponenten wiegen insgesamt rund 500 kg.

## 4 Individuelle Systemauslegung

Für die Auslegung des HRB im Versuchsfahrzeug und für die Berechnung der möglichen Deseinsparungen nutzte Rexroth eine Kombination aus Simulationsprogrammen für die Fahrzeugentwicklung, Matlab/Simulink, sowie die auf die physikalischen Besonderheiten der Hydraulik abgestimmte Simulationsumgebung AMESim. Daraus berechneten die Anwendungsspezialisten des Hydraulikherstellers die auf das Fahrzeug und den Fahrzyklus abgestimmte Dimensionierung der einzelnen Komponenten.

Das beim Pilotfahrzeug verifizierte Modell berechnet in einem ersten Schritt die zu speichernden Energie und die Vorgabe der gewünschten Verzögerungswirkung. Die Simulation berücksichtigt die Fahrzeugmasse, die gewünschte maximale Geschwindigkeit sowie die Rollreibung, den Wirkungsgrad der mechanisch wirkenden HRB-Komponenten und des von HRB genutzten Fahrzeugantriebsstrangs. Darüber hinaus fließen weitere Faktoren wie Antriebsmotorschleppmoment, Luftwiderstand und der Energiebedarf der während der Bremsung anzutreibenden Nebenaggregate des Fahrzeugs ein.

$$E_{\text{reg}} = (E_{\text{kin}} - E_{\text{roll}} - E_{\text{Luft}} - E_{\text{Schlepp}} - E_{\text{Neben}}) \cdot \eta_{\text{mh}} \cdot \eta_{\text{Antrieb}}$$

Zur Speicherung der Energie kommen Blasenspeicher zum Einsatz. Die Blase ist mit Stickstoff befüllt und steht unter einem definierten Vorspanndruck. Das in den Speicher einfließende Öl komprimiert die Blase weiter, so dass sich der Druck bis ungefähr zum dreifachen des Vorspanndrucks erhöht. Unter Annahme einer adiabaten Zustandsänderung vereinfacht sich die Berechnung der benötigten Speichergröße:

$$V_{\text{Speicher}} = E_{\text{reg}} \cdot \left[ \frac{n-1}{p_1} \cdot \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)^{-1} \right]$$

In einem zweiten Schritt erfolgt die Auslegung der Axialkolbeneinheit. Das erforderliche Bremsmoment ergibt sich aus den Fahrzeugdaten und der gewünschten Verzögerung.

$$T_{\text{HRB}} = \left( m \cdot a \cdot \frac{d}{2} - T_{\text{roll}} - T_{\text{Luft}} - T_{\text{Schlepp}} - T_{\text{Neben}} \right) \cdot \frac{\eta_{\text{mh}}}{i_{\text{Differential}}}$$

Das von der Axialkolbeneinheit aufgenommene Bremsmoment im Pumpenbetrieb bestimmt maßgeblich das erzeugte Moment. Es ergibt sich als Produkt aus dem anstehenden Druck, der als mittlerer Speicherdruck  $p_M$  angenommen wird, und dem Fördervolumen der Axialkolbeneinheit. Das Fördervolumen  $v_G$  der Axialkolbeneinheit und die HRB-Getriebeübersetzung  $i_{\text{HRB}}$  errechnet sich zu:

$$i_{\text{HRB}} \cdot v_G = \frac{T_{\text{HRB}} \cdot 100 \cdot \eta_{\text{mh}}}{1,59 \cdot p_M}$$

Die Auslegung des Fördervolumens der Axialkolbeneinheit muss berücksichtigen, dass die zulässige Drehzahl der Axialkolbeneinheit bei der vorgegebenen, maximalen Geschwindigkeit des Fahrzeugs während des HRB-Betriebs nicht überschritten wird.

## 5 Simulation und Berechnung der Kraftstoffersparnis

Eine von Rexroth entwickelte Software ermöglicht schon im Vorfeld der Konstruktion eine Abschätzung des möglichen Treibstoffeinsparpotenzials für das ausgewählte Fahrzeug bei vorgegebenen Fahrzyklen. Das Tool errechnet aus dem Geschwindigkeitsverlauf und der Fahrzeugmasse die am Rad auftretende Leistung (Abbildung 3). Antriebs- und Bremsleistungen sind als graue Flächen

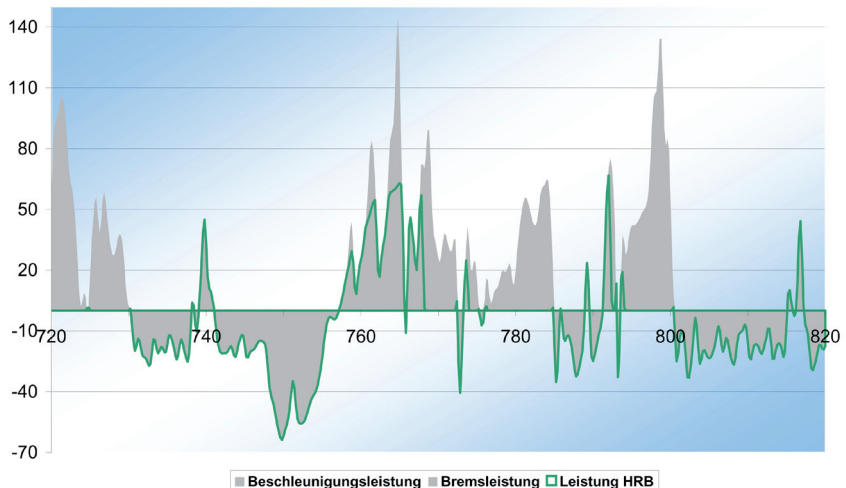


Abbildung 3: Simulation des HRB-Beitrags zu den Antriebs- und Bremsleistungen.

dargestellt. In grün ist der Anteil der Leistungen dargestellt der durch HRB rekurriert werden kann.

Die Software berücksichtigt die Wirkungsgrade der Axialkolbeneinheit und des HRB-Getriebes und berechnet die Menge der hydraulischen Energie, die das System aus der mechanischen Bremsenergie an der HRB-Getriebewelle in hydraulische Energie umwandelt. Gleichzeitig ermittelt es, wie viel mechanische Antriebsenergie die gespeicherte hydraulische Energie beim Beschleunigen an der HRB-Getriebewelle aufbringt. Je nach Auslegung, Fahrzeug und Fahrzyklus erreicht das System Gesamtwandlungsraten von deutlich über 60 Prozent. Diese Entlastung des Dieselmotors führt zu deutlichen Einsparungen beim Verbrauch. Darüber hinaus gehende Kostensenkungen wie ein reduzierter Bremsverschleiß erhöhen die Wirtschaftlichkeit weiter.

Vor der Inbetriebnahme des HRB-Systems am Pilotfahrzeug optimierte Rexroth die Steuerung und die Regelung über umfangreiche Simulationen (Abbildung 4). Damit identifizierten die Entwickler vorab mögliche Schwachstellen des Systems. Während des gesamten Feldversuchs mit verschiedenen Testsequenzen und Parameteränderungen zeichnet ein Datenlogger sämtliche Fehlermeldungen auf. Um eine richtige Umsetzung der Funktionen in C-Code sicherzustellen, haben die Softwarespezialisten eine sichere SIL-Umgebung innerhalb der Co-Simulation erstellt.

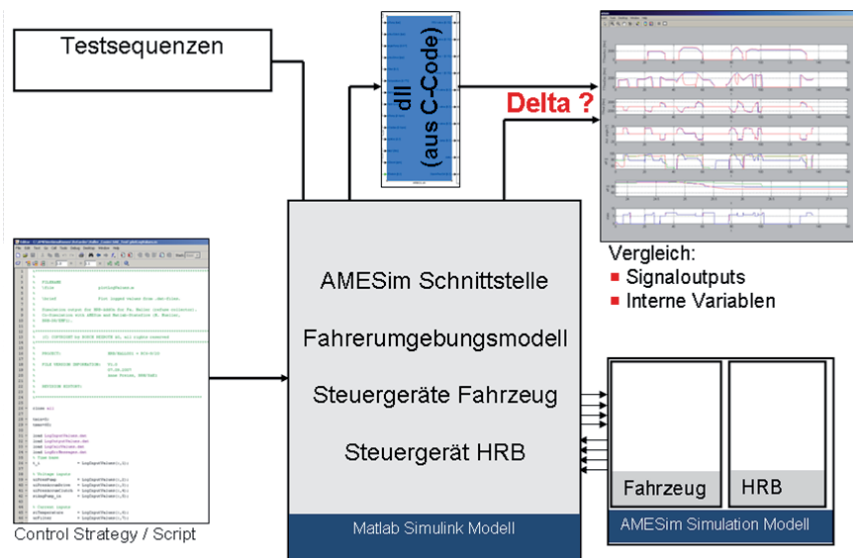


Abbildung 4: Sichere Softwareumgebung zur Optimierung des HRB-Systems.

## 6 Praxis bestätigt Simulation

Mit Hilfe der Simulation können Fahrzeughersteller und Betreiber schon vorab die möglichen Einsparungen berechnen und die Amortisationsdauer bei verschiedenen Fahrzyklen abschätzen. Verschiedene Fahrprofile zeigen die wirtschaftlichen Vorteile des Systems im Einsatz (Abbildung 5).

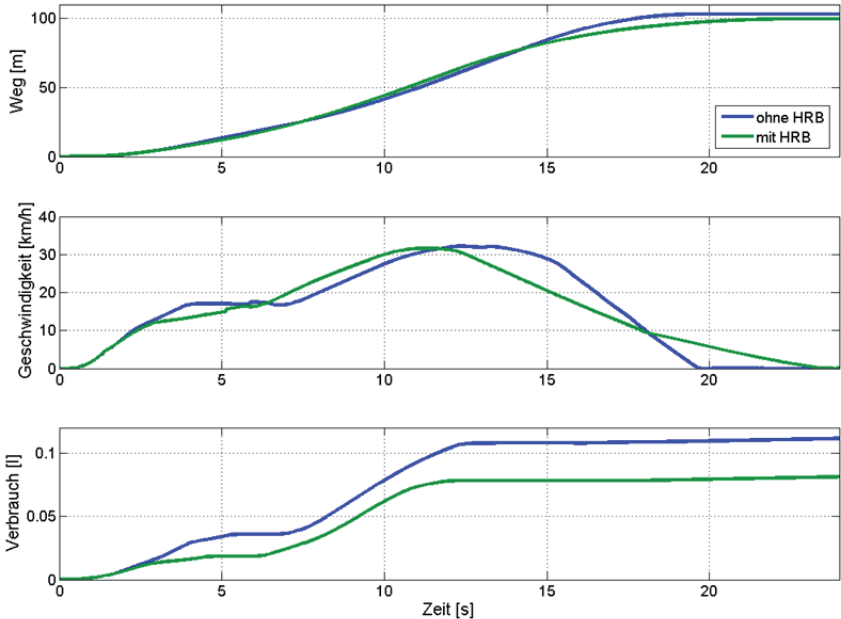


Abbildung 5: Simulation eines 100 m Zyklus mit HRB.

Diesen Berechnungen liegen Sammelzyklen eines Entsorgungsfahrzeugs mit Halbbelastung zu Grunde. Die Simulation bildet die wesentlichen Effekte des HRB ab und zeigt über die Verbrauchsreduzierung einen wichtigen Ergonomievorteil für die Besatzung des Fahrzeugs auf: Die Zugkraftunterbrechung durch Gangwechsel entfällt beim Anfahren.

Diese Simulationsergebnisse hat Rexroth am Pilotfahrzeug in umfangreichen Testreihen unter kontrollierten Bedingungen überprüft. Tabelle 1 zeigt die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der tatsächlich unter Versuchsbedingungen gemessenen Verbrauchswerte bei einem 100 m-Zyklus. Die Abweichungen der Simulation zu den ermittelten Testverbräuchen liegen unter 4 Prozent. Damit liefert die Simulation verlässliche Aussagen zur möglichen Kraftstoffeinsparung durch das HRB-System.

	ohne HRB absolut [l]	mit HRB absolut [l]	Ersparnis absolut [l]
Simulation	0.111	0.080	0.031
Messung	0.108	0.077	0.032
Abweichung	2.78 %	3.90 %	-3.13 %

Tabelle 1: Vergleich des simulierten und gemessenen Verbrauchs.

Die Testreihen umfassten unterschiedliche Fahrzyklen. Auf einem Rundkurs simulierten in definierten Abständen aufgestellte Pylonen den Mülltonnenabstand. Für die Messungen variierten die Inbetriebnehmer den Abstand von 10 auf 70 und 100 Meter (Tabelle 2). An jedem Pylon hielten die Fahrer eine Wartezeit von 30 Sekunden ein, um das „fiktive“ Leeren der Tonnen zu berücksichtigen. Das Gewicht des Fahrzeugs betrug bei allen Versuchen einheitlich 20 Tonnen. Mehrmalige Wiederholungsfahrten lieferten belastbare, mit einem Verbrauchsmessgerät des Typs KMA gemessene, Einsparungen zwischen 16 und 30 Prozent.

Abstand [m]	Gewicht [kg]	Still- standzeit [s]	Fahrzeit [s]	Verbrauch pro Stop [l] mit HRB	Verbrauch pro Stop [l] ohne HRB	Ersparnis pro Stop [l]
10	20000	30	7	0,021	0,025	0,004 (16%)
70	20000	30	16	0,059	0,079	0,020 (25%)
100	20000	30	22	0,076	0,108	0,032 (30%)

Tabelle 2: Mittlere Einsparungen in getesteten Sammelzyklen.

Diese kontrollierten Bedingungen kann der Feldversuch nicht bieten, da hier selbst bei identischen Fahrtrouten verschiedene Verkehrssituation und Müllzuladungen an unterschiedlichen Tagen die Vergleichbarkeit mindern. Die ersten Ergebnisse zeigen aber, dass die Einsparungen für die jeweiligen Fahrzyklen im Rahmen der Simulationsergebnisse und der kontrollierten Testreihen liegen.

## 7 Alltagstauglich, wetterfest und komfortabel

Der Schwerpunkt des im Juli 2008 gestarteten Feldversuchs liegt darin, die Alltagstauglichkeit und Zuverlässigkeit des HRB-System zu testen, da die Einsparungen beim Verbrauch bereits nachgewiesen sind. Während der ersten sechs

Monate bis zum Redaktionsschluss arbeitete das HRB-System ohne nennenswerte Ausfälle und lieferte damit eine Verfügbarkeit von nahezu 100 Prozent. Blasen Speicher haben einen geringen Wartungsaufwand, der sich im wesentlichen auf den Vorspanndruck und den Zustand der Blase beschränkt. Das Hydrauliköl dient neben der Leistungsübertragung auch der Schmierung der Axialkolbeneinheit. Zulässige Hydrauliköltemperaturen liegen im Bereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ . Die vibrationsfeste, und bis 25g schockfeste Steuerelektronik hat eine hohe elektromagnetische Verträglichkeit von 100V/m und kann über CAN-Bus mit anderen Systemen kommunizieren.

Das HRB arbeitet unter Einhaltung der zugelassenen Viskositätsbereiche nahezu temperaturunabhängig bei gleich bleibender Leistungsdichte. Selbst bei hohen, sommerlichen Außentemperaturen bis zu  $35^{\circ}\text{C}$  bleibt das Hydrauliköl auch bei sehr kurzen Zyklen zuverlässig im optimalen Temperaturfenster. Eine Stärke des hydraulische Hybridantriebs: Auch niedrige Temperaturen haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Energiespeicherung und die Leistungsdichte des HRB.

Während der Erprobung zeigte sich, dass durch das zusätzlich verfügbare Antriebsmoment von bis zu 2500 Nm das Fahrzeug auf ebener Strecke direkt in der dritten Gangstufe anfahren kann. Bei den Schaltvorgängen tritt keine, sonst zwangsläufige, Zugkraftunterbrechung auf (Abbildung 6). Über den höheren Fahrkomfort durch ruckfreie Beschleunigung hinaus eröffnen sich dadurch weitere wirtschaftliche Potenziale durch Getriebe mit weniger Gangstufen oder kleiner dimensionierten Verbrennungsmotoren.

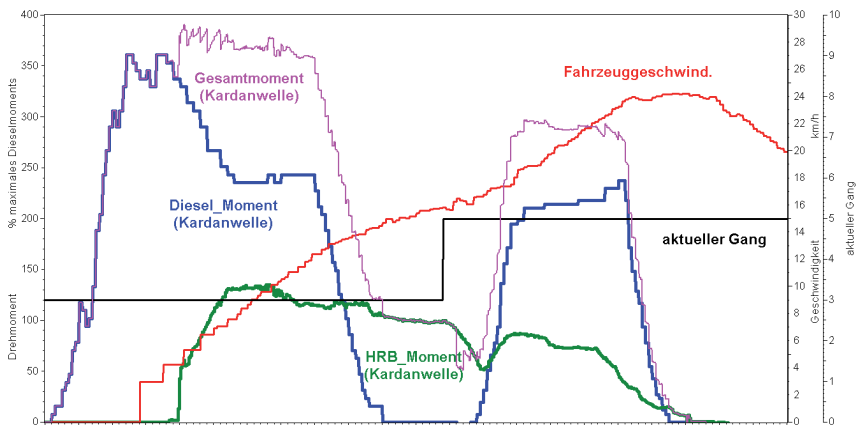


Abbildung 6: Nahezu lineare Beschleunigung beim Anfahren durch das zusätzliche HRB-Drehmoment.

## 8 Ausblick

Das HRB-System bewährt sich im Feldversuch bei der Berliner Stadtreinigung als technisch zuverlässiges Modul, das den Kraftstoffverbrauch deutlich senkt. Es erreicht die in Simulationen berechneten und in Testreihen validierten Einsparungen. Eine von Rexroth entwickelte Software kann schon vor der Inbetriebnahme die Verbrauchsminderung je nach Fahrzyklus realistisch abbilden. Damit können Fahrzeughersteller und Betreiber die Amortisation des Mehraufwands sehr präzise berechnen. Darüber unterstützt das Tool Betreiber bei der Optimierung von Einsatz- und Routenplänen.

Über den Start der Serienfertigung des HRB in der aktuellen Konfiguration hinaus, treibt Rexroth auch die Entwicklung weiterer hydraulischer Rekuperationssysteme voran. Dabei betrachten die Entwickler sowohl hydrostatische Fahrtriebe als auch die Arbeitshydraulik in mobilen Anwendungen.