

HYDAC

INTERNATIONAL

Doppelkolbenspeicher

Innovativer Hydrospeicher für hydraulische Hybridantriebe



Doppelkolbenspeicher

Innovativer Hydraulikspeicher für hydraulische Hybridantriebe

Kurzfassung

Hydraulische Hybridsysteme verwenden zur feinfühlig und effizienten Dosierung des An- bzw. Abtriebsmomentes häufig Motor-Pumpen-Einheiten, die ein „Durchschwenken durch Null“ ermöglichen. Hochdruckspeicher dienen bei diesen Systemen der Energiespeicherung. Auf der Saugseite der Hydrostaten werden häufig Niederdruckspeicher verwendet, um stets günstige Ansaugverhältnisse im Pumpenbetrieb zu gewährleisten. Diese Konfiguration hat allerdings den Nachteil eines unerwünschten Druckanstiegs im Niederdruckspeicher bei dessen Beladung, was negative Auswirkungen auf die nutzbare Energie und die Leistung des Gesamtsystems hat.

Der Doppelkolbenspeicher der Fa. HYDAC stellt eine Speicherlösung dar, die das Druckniveau auf der Saugseite der Hydrostaten konstant hält. Dadurch kann das volle Leistungspotenzial des Hochdruckspeichers ausgeschöpft werden. Außerdem ergeben sich durch das spezielle Systemdesign im Vergleich zu konventionellen Systemen weitere Vorteile bzgl. der Energiebilanz, des benötigten Bauraums und des Gewichts.

Am Beispiel konkreter Lastzyklen aus der Praxis werden die Auswirkungen auf die Energie- und Leistungsbilanz demonstriert sowie die Systemvorteile für den potenziellen Anwender von Hybridapplikationen aufgezeigt. In einem Ausblick wird letztlich ausgeführt, welche Möglichkeiten zur Leichtbauausführung sich im kompakten Doppelkolbenspeicherdesign verbergen.

1 Einleitung

Die steigende Sensibilität für die Energieeffizienz in der mobilen sowie stationären Antriebstechnik führt neben energetischen Optimierungen auch zur verbreiteten Anwendung von Hybridlösungen. Es zeigt sich allerdings, dass das Hybridkonzept sehr eng an das spezifische Lastprofil der verschiedensten Maschinen angepasst werden muss. Folglich existiert eine Reihe unterschiedlicher Hybridkonzepte, die sich hinsichtlich der Energieform (elektrisch, hydraulisch, mechanisch), der Struktur (parallel, seriell, leistungsverzweigt) oder der Anordnung (primär-/ sekundärseitig) deutlich voneinander unterscheiden können.

Die Stärke der hydraulischen Hybridsysteme liegt dabei in der enormen Leistungsdichte, d.h. der Eigenschaft, Energiemengen in sehr kurzen Zeitintervallen umsetzen zu können [1]. Dies prädestiniert die Hydraulik für Anwendungen in der mobilen sowie stationären Antriebstechnik, bei denen hochdynamische Arbeitszyklen auftreten. Es handelt sich um eine robuste, bewährte Antriebstechnologie, die durchgängig vertreten ist und durch den Einsatz von Hydrospeichern relativ einfach erweitert werden kann.

Hydrospeicher werden nach den einschlägigen Regelwerken, wie z.B. der Druckgeräterichtlinie [2], konstruiert, wodurch ein Höchstmaß an Sicherheit garantiert wird. Mit diversen technischen Einrichtungen (Druckbegrenzungsventile, Berstscheiben, Schmelzsicherungen usw.) können Hydrospeicher in Folge eines Unfalles zuverlässig entspannt und somit energielos geschaltet werden. Auch dies macht Hydrospeicher zu sehr sicheren Energiespeichern.

Anspruchsvolle Hybridlösungen verwenden zur feinfühligten Aufprägung des Antriebsmomentes bzw. zur Leistungsregelung hydrostatische Verstelleinheiten. Um Druckverluste durch zusätzliche Umsteuerventile zu vermeiden, wird die Umschaltung zwischen Motor- und Pumpenbetrieb häufig mit Hydrostaten realisiert, die ein „Durchschwenken über Null“ ermöglichen. Hierzu eignen sich beispielsweise Verdrängereinheiten, die im geschlossenen Kreis Verwendung finden. Um deren ordnungsgemäße Funktionsweise (guter Wirkungsgrad, Verhindern von Kavitation, geringe Geräuschemission usw.) auch im Hybridbetrieb zu garantieren, ist die Saugseite dieser Einheiten vorgespannt. Es ergibt sich somit eine Konfiguration, wie sie in Abb. 1 dargestellt ist. Dabei ist die Hybrid-einheit mit Hochdruck- (HD-) und Niederdruck- (ND-) Speichern ausgestattet.

Der zusätzliche Einsatz des separaten ND-Speichers bringt allerdings Nachteile bezüglich der umsetzbaren Energien und Leistungen sowie des benötigten Bauraums und des Gewichts mit sich. Letztlich ist auch das Management der Ölvolumina, d.h. die Überwachung des Füllgrades mittels Druck- und Temperaturmessung bzw. Füllstandsmessung mittels Wegmesstechnik, mit einem erheblichen Mehraufwand und erhöhter Komplexität verbunden.

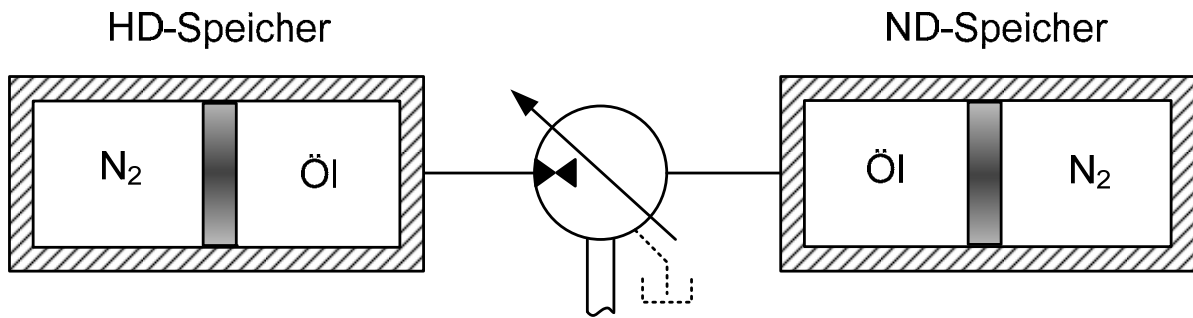


Abb. 1: Prinzipskizze konventionelles HD- und ND-Speicher-System

Das Doppelkolbenspeichersystem (DKS-System) der Fa. HYDAC stellt eine innovative, technologische Lösung dar, welche die Nachteile des separaten ND-Speichers kompensiert und gleichzeitig die idealen Ansaugverhältnisse an der Verdrängereinheit garantiert. Das DKS-Konzept wurde bereits erfolgreich bei einem Demonstrator-Pkw des IFAS an der RWTH Aachen getestet und im Rahmen des 7. IFK vorgestellt [3]. Daneben verfügt HYDAC über jahrzehntelange Erfahrung bei der Konstruktion, Entwicklung, Produktion und Verwendung von Doppelkolbenspeichern bei anderen (Nicht-Hybrid-) Applikationen, wie z.B. Tiefseeanwendungen.

Im Folgenden werden der konstruktive Aufbau und die Funktionsweise des Doppelkolbenspeichers erläutert. Am Beispiel konkreter Lastzyklen aus der Praxis werden die Auswirkungen auf die Energie- und Leistungsbilanz demonstriert sowie die Systemvorteile für den potenziellen Anwender von Hybridapplikationen aufgezeigt.

2 Konstruktiver Aufbau / Funktionsweise von Doppelkolbenspeichern

Die charakteristische Eigenschaft des Doppelkolbenspeichers besteht in der starren Kopplung der Kolben von HD- und ND-Seite (siehe Abb. 2). Dabei sind die Kolben fest mit einer Stange verbunden. Die daraus resultierenden vier Arbeitsräume sind bzgl. ihrer Volumina direkt miteinander gekoppelt. Die Energiespeicherung erfolgt wie beim konventionellen System durch die Kompression von Gas (hier Stickstoff N_2). Von diesem Bereich durch den HD-Kolben abgetrennt, wird das Hochdruck-Öl (Öl HD) in einer Kammer vorgehalten.

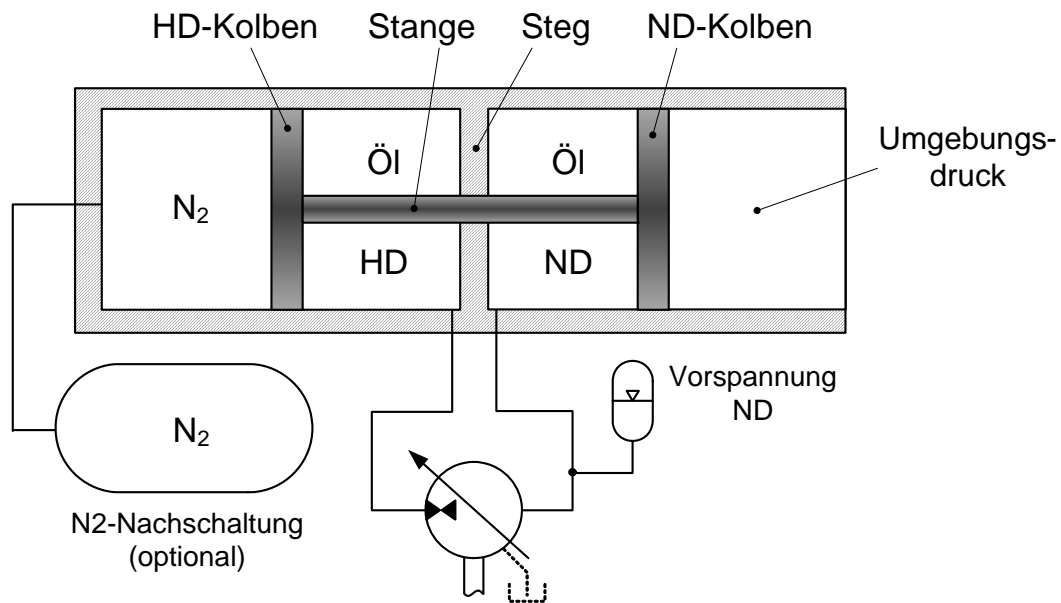


Abb. 2: Prinzipskizze Doppelkolbenspeicher

Der Steg trennt den Hochdruck- vom Niederdruckraum ab. Letzterer wird durch den ND-Kolben in den ND-Ölraum und einen „drucklosen“ Raum (Umgebungsdruck) geteilt. Die hier beschriebene Belegung der Kammern stellt die für die Anwendung bevorzugte Ausführung dar. Andere Verteilungen sind ebenfalls möglich.

Im Motorbetrieb wird der HD-Ölraum entleert und der ND-Ölraum gefüllt. Die Kolben-Stangen-Einheit bewegt sich dann nach rechts. Im Pumpenbetrieb verläuft der Vorgang jeweils in umgekehrter Richtung. Wie im HD- wird auch im ND-Ölraum eine Bewegung der Kolben-Stangen-Einheit durch zu- oder abfließendes Öl ausgeglichen. Durch eine Vorspannung mit Hilfe eines kleinen Membranspeichers wird der Druck auf der Saugseite der Pumpe auf dem erforderlichen Niveau (Vorspannung ND) konstant gehalten. Der Membranspeicher dient hierbei lediglich der Kompensation von Temperatureffekten.

Leckage-Effekte an der Motor-Pumpen-Einheit sollen bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden; sie können durch eine geeignete Nachspeiseeinrichtung ausgeglichen werden.

Die sich durch den speziellen Aufbau ergebenden systembezogenen Vorteile werden auf Basis der Kräftebilanz am Doppelkolbenspeicher erläutert (siehe Abb. 3).

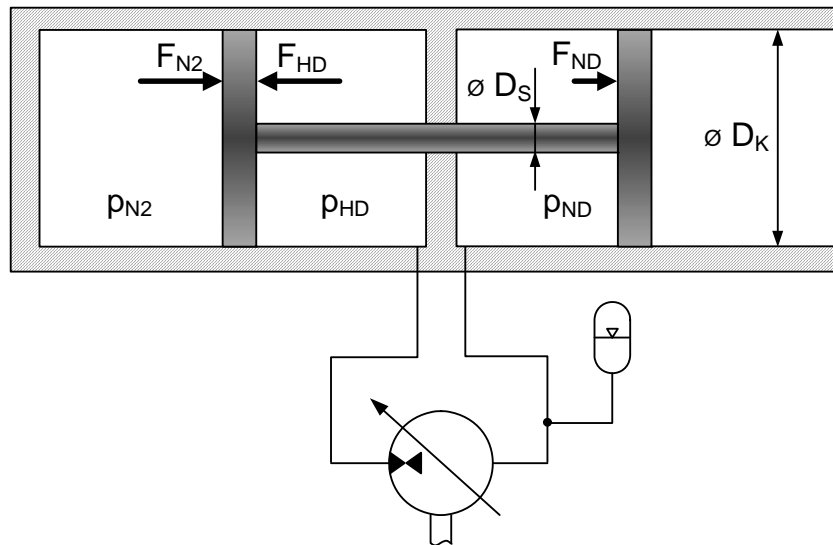


Abb. 3: Kräftebilanz am Doppelkolbenspeicher

Es gilt:

$$F_{ND} + F_{N_2} - F_{HD} = 0 \quad (1)$$

Für den Öl-Druck auf der HD-Seite (p_{HD}) folgt daraus mit dem Druck in der Stickstoffkammer p_{N_2} , dem Druck im ND-Raum p_{ND} , dem Kolbendurchmesser D_K und dem Stangendurchmesser D_S :

$$p_{HD} = \frac{D_K^2}{D_K^2 - D_S^2} \cdot p_{N_2} + p_{ND} \quad (2)$$

Gleichung (2) zeigt, dass sich der Öl-Druck auf der HD-Seite betragsmäßig aus zwei Summanden zusammensetzt. Der erste Summand stellt die Druckübersetzung zwischen dem N_2 -Raum (p_{N_2}) und dem HD-Raum (p_{HD}) dar. Der Faktor vor p_{N_2} ist stets größer als 1, überschreitet diesen Wert aufgrund der typischen Verhältnisse zwischen D_S und D_K ($D_S \ll D_K$) allerdings nur in geringem Maße. Der zweite Summand ist der konstante Druck im ND-Ölraum, der sich dem Hochdruck überlagert.

Der typische Druckverlauf für ein DKS-System ist qualitativ in Abb. 4 dargestellt. p_{HD} und p_{ND} sind über dem zugehörigen Austauschölvolume ($\Delta V_{\text{Öl}}$) aufgetragen, p_{N_2} über dem entsprechenden Gasvolumen (ΔV_{N_2}). Diese Bezugsvolumina sind auf Grund der unterschiedlichen Kolbenflächen leicht verschieden. p_{ND} ist wie oben erläutert konstant – bezüglich der saugseitigen Anforderungen der Pumpe frei wählbar. p_{N_2} folgt dem Realgasverhalten und Wärmeübergangsprozessen zur Umgebung entsprechenden Druckverlauf. Nahezu parallel dazu verläuft p_{HD} aufgrund des in Gleichung (2) gezeigten Zusammenhangs.

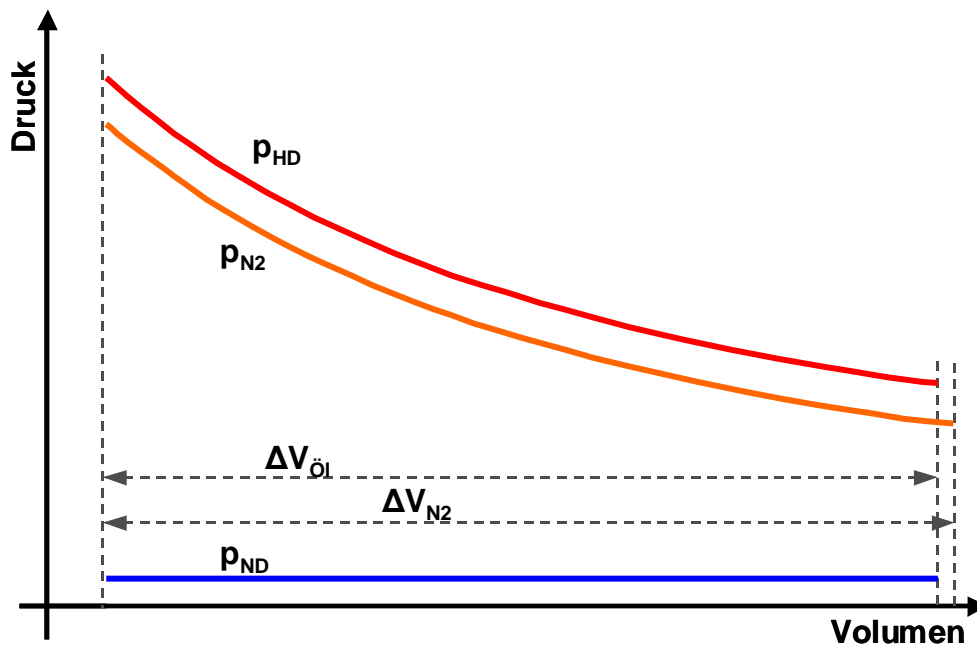


Abb. 4: Typischer Druckverlauf für ein Doppelkolbenspeichersystem

3 Systemvergleich

Der folgende, simulative Systemvergleich soll die Energie- und Leistungsbilanz des konventionellen HD-ND-Systems und des Doppelkolbenspeichers einander gegenüber stellen. Zur Simulation der verschiedenen Speichersysteme wurden das zum freien Download [4] verfügbare *Accumulator Simulation Program (ASP)* sowie ein entsprechendes Speichermodell für Matlab/Simulink der Fa. HYDAC verwendet. In beiden Simulationsmodellen steckt das Knowhow zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten, bei denen das Speicherverhalten unter Berücksichtigung des Realgasverhaltens und der thermodynamischen Vorgänge exakt abgebildet wurde. Der Vergleich der Energie- und Leistungsbilanz der beiden Systeme erfolgt anhand konkreter Simulationsbeispiele.

3.1 Energie- und Leistungsbilanz eines Teilzyklus'

Um die prinzipiellen Unterschiede zwischen den beiden Speichersystemen zu zeigen, wird im Folgenden ein Teilzyklus (Entladevorgang) betrachtet. Eine Zusammenfassung der verwendeten Simulationsparameter zeigt Tab. 1.

Parameter	V_0	ΔV	$p_0\text{-HD}$	$p_0\text{-ND}$	$p_1\text{-ND}$	$p_{\text{Start-Öl}}$	$P_{\text{Start-N}_2}$	$\Delta t_{\text{entl.}}$	$Q_{\text{entl.}}$
Standard	50 l	15 l	170 bar	22,5 bar	25 bar	360 bar	360 bar	12 s	75 l/min
DKS				-	25 bar = const.		329 bar		

Tab. 1: Simulationsparameter

Bezüglich der Speicherparameter wurde eine praxisnahe Konfiguration gewählt, wobei das HD-Stickstoffvolumen 50 Liter beträgt. Der Vorspanndruck p_0 auf den Hochdruckseiten wurde jeweils mit 170 bar angenommen. Bei dem betrachteten Entladevorgang (z.B. zur Beschleunigung eines Fahrzeugs oder Drehwerks) beträgt der Startdruck beispielhaft 360 bar.

Auf der ND-Seite beträgt der Startdruck, der beim DKS-System in allen Betriebspunkten konstant ist, 25 bar. Der Vorspanndruck beträgt bei diesem Beispiel im ND-Speicher 22,5 bar. Aus dem Hochdruckraum der Speichersysteme werden jeweils in 12 Sekunden 15 Liter Öl entnommen.

Die entsprechenden Simulationsergebnisse zeigt Abb. 5. Hierbei sind die Drücke des HD- und des ND-Speichers jeweils über dem verschobenen Ölvolumen ($\Delta V_{\text{Öl}}$) aufgetragen.

Die Betrachtung der Druckverläufe auf den ND-Seiten zeigt, dass der Niederdruck des DKS' konstant ist. Naturgemäß ist ein Druckanstieg beim Standard-System zu beobachten. Der Maximaldruck im Standard-ND-Speicher am Ende des Beladevorgangs beträgt 43,5 bar. Die Enddrücke in den Hochdruckkammern unterscheiden sich ebenfalls erheblich.

Die Ursache für den steileren Abfall des Öldrucks auf der HD-Seite des Standard-Systems im Vergleich zum DKS liegt im niedrigeren Startdruckniveau auf der Stickstoffseite des DKS (329 bar) im Vergleich zum HD-Speicher (360 bar). Dadurch arbeitet der DKS bei gleichem Ölvolumenaustausch auf einer flacheren Kennlinie als der konventionelle Hochdruckspeicher.

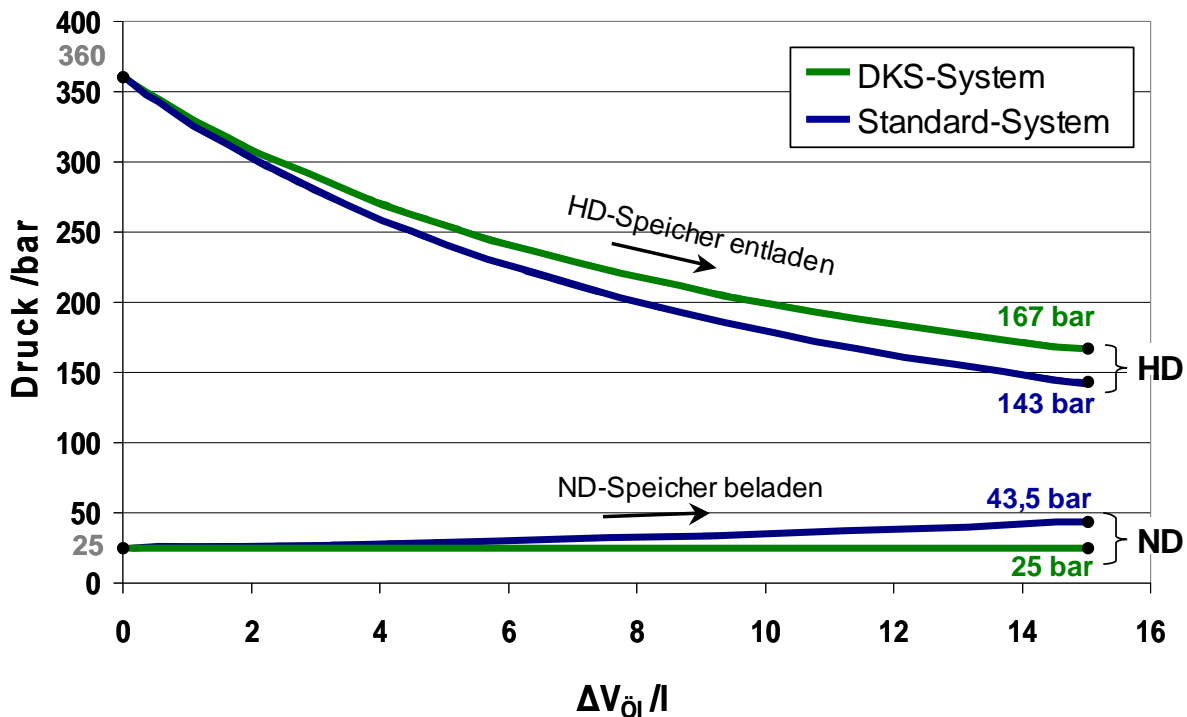


Abb. 5: Öldruck-Verläufe beim Standard- und beim DKS-System (Entladevorgang)

Entscheidend für die Leistungs- und Energieabgabe bzw. –aufnahme der Speichersysteme ist der Differenzdruck Δp (HD – ND) an der Motor-Pumpen-Einheit. Abb. 6 zeigt den Verlauf der aus Abb. 5 abgeleiteten Differenzdrücke. Der Differenzdruck beim DKS-System ist am Ende des Entladeprozesses um 42 % größer im Vergleich zum Standard-System. Dementsprechend ist die Momenten- bzw. Leistungsabgabe (z.B. zur Unterstützung der Beschleunigung eines Fahrzeugs oder Drehwerks) beim DKS ebenfalls um 42 % höher.

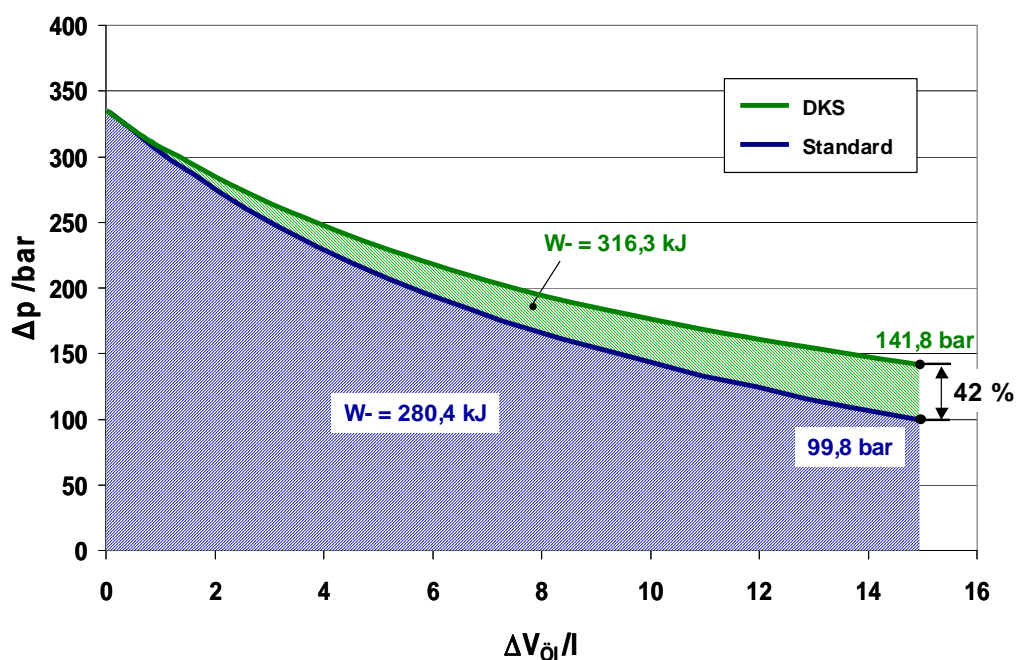


Abb. 6: Differenzdruckverläufe mit Energien und Enddrücken

Zur Bewertung der Energiebilanz kann die Fläche unter der Druckdifferenzkurve herangezogen werden, die gemäß Gleichung (3) definiert ist:

$$W = \int p \, dV \quad (3)$$

Demnach ist die Energieentnahme aus dem DKS mit 316 kJ ca. **13%** größer als beim konventionellen System mit HD- und ND-Speicher.

3.2 Bewertung des DKS in einer Praxisanwendung

Um den DKS praxisnah bewerten zu können, soll ein konkreter Lastzyklus einer Beispielapplikation herangezogen werden. Dabei wird ein Stadtbus mit einem hydraulischen Parallelhybrid betrachtet. In Abb. 7 ist die zugehörige Antriebskonfiguration mit einem konventionellen HD-ND-System (mit jeweils 50 Litern Volumen) dargestellt.

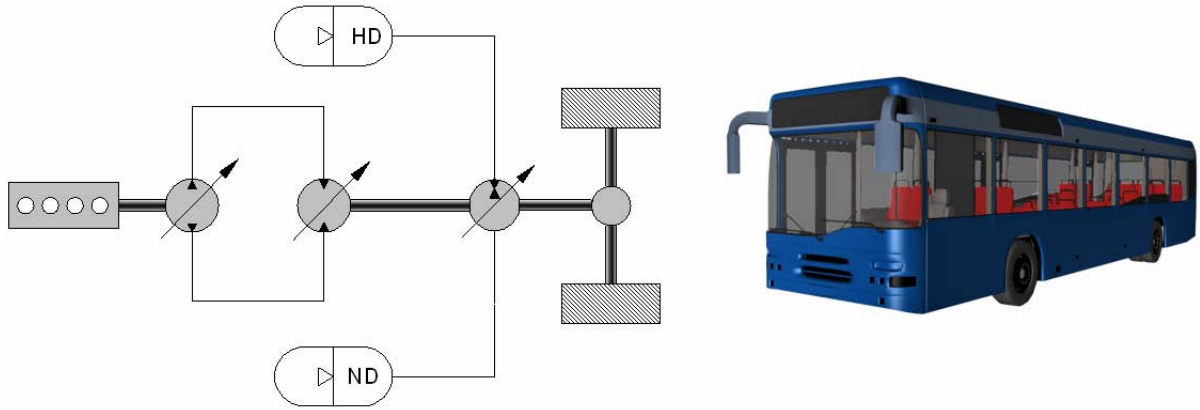


Abb. 7: Funktionsschema Stadtbus

Abb. 8 zeigt einen dazugehörigen exemplarischen Messschrieb. Hierbei handelt es sich um die Aufzeichnung der Fahrgeschwindigkeit und des Drucks im Hochdruckspeicher während einer Linienfahrt über eine Fahrstrecke von ca. 2,5 km und einer Dauer von ca. zehn Minuten.

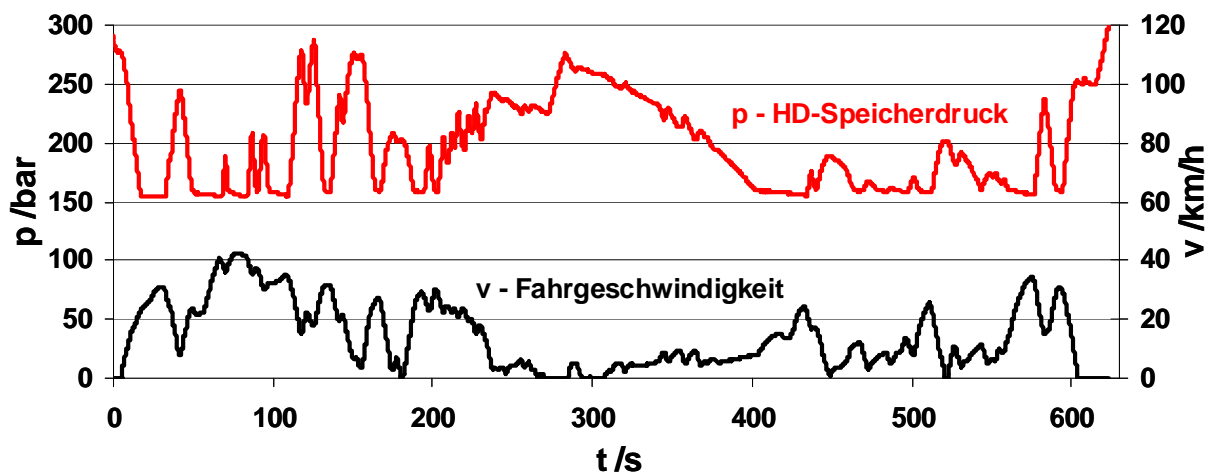


Abb. 8: Druck-/ Geschwindigkeitsverlauf

Aus den gemessenen HD- und ND-Drücken des hydraulischen Standard-Hybrid-Systems des Stadtbusse wurden nun mit Hilfe eines druckgesteuerten Hydrospeichermodells der Fa. HYDAC in Matlab/Simulink zunächst die entsprechenden Volumenströme berechnet. Aus diesen Volumenstromverläufen konnten dann unter Verwendung des volumenstromgesteuerten Hydrospeichermodells die Energie- und Leistungsbilanz für die beiden Systeme simuliert und verglichen werden. Abb. 9 zeigt die sich daraus ergebenden, an der Motor-Pumpen-Einheit zur Verfügung stehenden, Druckdifferenzen im p-V-Diagramm. Da diese aus einer tatsächlichen Straßenverkehrssituation resultieren und sich somit kein thermodynamischer Gleichgewichtszustand im Speicher einstellen kann, handelt es sich um jeweils eine Kurvenschar mit entsprechender Hysterese.

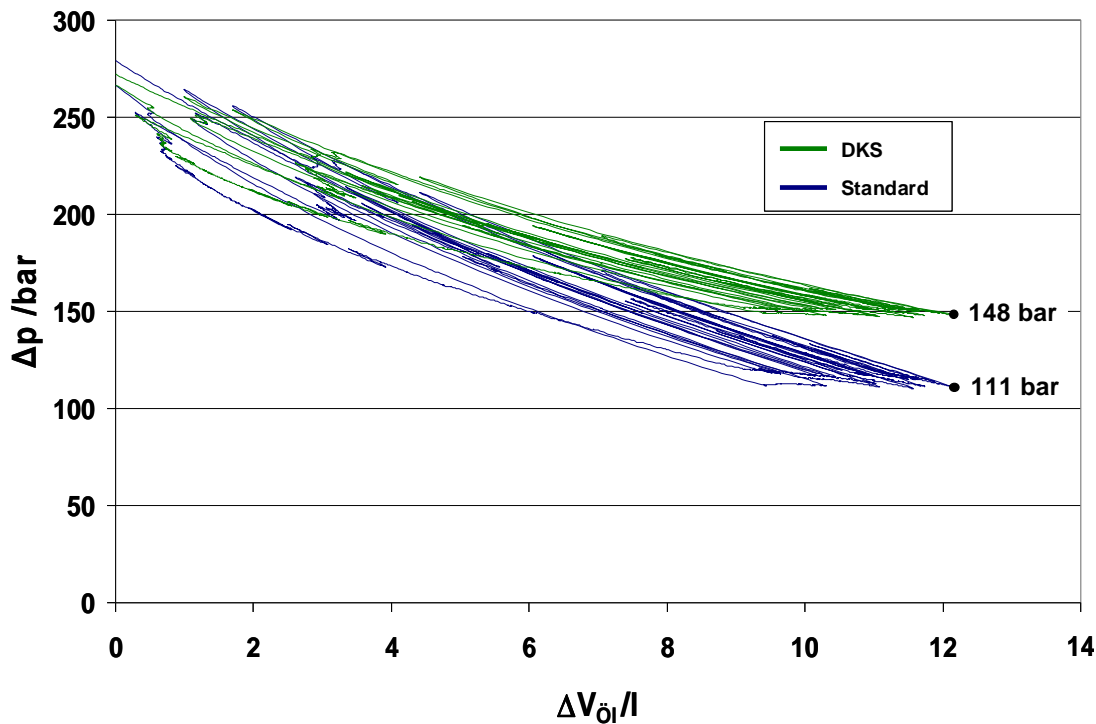


Abb. 9: Druckdifferenzverläufe beim Stadtbus-Zyklus

Vergleichbar mit den Simulationsergebnissen aus Abb. 6 bewegen sich die Druckdifferenzen beim Standard-System verglichen mit dem DKS-System auf einem niedrigeren Niveau. Dies wird mit zunehmendem Entleerungsgrad des HD-Speichers immer deutlicher. Im entladenen Zustand des HD-Speichers bietet der DKS mit einer Druckdifferenz von 148 bar einen Systemvorteil von 37 bar.

Bei der Betrachtung der Energiekapazitäten muss zwischen den aufgenommenen und den abgegebenen Energiebeträgen des Fahrzyklus unterschieden werden. Mit W_+ wird dabei die Summe aller während des Zyklus in die Speichersysteme aufgenommenen Energien (Ladevorgänge) bezeichnet. W_- ist entsprechend die Summe aller abgegebenen Energien (Entladevorgänge). Führt man diese Bilanz für den dargestellten Zyklus in Abb. 9 durch, so stellt sich heraus, dass der Doppelkolbenspeicher im Vergleich zum Standard-System 14 % mehr Energie aufnehmen bzw. umsetzen kann. Bezogen auf die Kraftstoffeinsparung des Hybridsystems, die derzeit bei ca. 20 % gegenüber dem konventionellen Antriebsstrang liegt, bedeutet dies eine erneute Optimierung um 3%.

Neben den Untersuchungen zu den Energiekapazitäten wurden zusätzlich die Wirkungsgrade der beiden Hydrospeichersysteme betrachtet. Diese lagen jeweils bei ca. 98 %, was durch die Dynamik der Zyklen begründet werden kann und für die betrachtete Applikation Stadtbus nicht untypisch ist.

3.3 Vergleich von Bauraum und Gewicht

Wie aus dem konstruktiven Aufbau in Abb. 2 ersichtlich wird, kann im DKS im Vergleich zur Standard HD-ND-Lösung ein Teil des ND-Speichers entfallen, was zur Reduktion des benötigten Gewichtes und ggf. auch Bauraumes führt. Durch die gekoppelte Anordnung fallen die ölseitigen Deckel von HD- und ND-Kammer in einem gemeinsamen Trennsteg zusammen. Dieser bietet die Möglichkeit zur Integration weiterer Hydraulikkomponenten wie z.B. von Druckbegrenzungs- und Absperrventilen sowie Filtern zur Gewährleistung der geforderten Ölrinheit. Die kurze, unmittelbare Verbindung zwischen HD- und ND-Kammer bietet hier sicherheitsrelevante Systemvorteile, da keine externe Verrohrung notwendig ist. Darüber hinaus lassen sich Druck- und/oder Temperatursensoren sowie Längenmesssysteme zur Überwachung des Speicherfüllgrades auf einfachem Wege integrieren. Ein Ausführungsbeispiel ist in [3] beschrieben. Der bodenseitige Deckel auf der Niederdruckseite kann gänzlich entfallen. Letztlich bedeutet alleine der Verzicht auf den niederdruckseitigen Stickstoff (50 l mit 20 bar) eine Gewichtsreduktion von ca. 1,2 kg. Demgegenüber steht lediglich das zusätzliche Gewicht der Kolbenstange, die nur die Zugkräfte zwischen den Kolben übertragen muss.

Zur weiteren Gewichtsoptimierung können die äußeren Durchmesser des DKS jeweils exakt an die max. auftretenden Arbeitsdrücke der Hoch- und Niederdruckkammer angepasst werden, wobei auch sehr einfach eine Leichtbauausführung mit Umfangsumwicklung (z.B. Kohlefasern) realisierbar ist.

Besonders interessant wird die DKS-Lösung für Anwendungen mit relativ geringem Ölverschiebevolumen und großem Stickstoffvolumen, da der Niederdruckraum hierbei vergleichsweise kurz ausgeführt werden kann. Vorteile im Packaging können wiederum durch eine nachgeschaltete Stickstoffflasche erzielt werden, wobei im DKS lediglich das aktive Ölvolumen ausgetauscht wird. Dieses ist in vielen Hybridapplikationen mit paralleler Antriebsstruktur durch die kinematische Zwangskopplung zwischen Abtrieb und Verdrängervolumen des Hydrostaten vordefiniert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Doppelkolbenspeicher garantieren optimale Ansaugverhältnisse an den Pumpe-Motor-Einheiten von hydraulischen Hybridsystemen, da im Gegensatz zu konventionellen HD-ND-Systemen der Druck auf der Saugseite konstant bleibt. Dies erfordert keine zusätzlichen Speisepumpen. DKS erhöhen die Energiekapazität sowie die umsetzbare Leistung gegenüber konventionellen HD-ND-Speichersystemen, da – speziell bei zunehmender Entleerung der HD-Speicher – an den Pumpe-Motor-Einheiten höhere Differenzdrücke zur Verfügung stehen. Dies wurde beispielhaft an einem Entladevorgang und einem konkreten Simulationsbeispiel auf Basis realer Messdaten eines Stadtbusses demonstriert.

Auch bzgl. Gewicht und ggf. Bauraum kann der DKS Vorteile gegenüber einer konventionellen HD-ND-Speicherlösung besitzen. Die Entkopplung des Gasvolumens vom Ölvolumen bietet weitere Systemvorteile bezüglich des Packagings und erleichtert die Integration in die Maschine.

Durch die permanente Kopplung der HD- und ND-Kammern muss lediglich eine Seite des Speichers bezüglich des Füllgrades bzw. des Kolbenhubes überwacht werden. Dies erleichtert das Ölmanagement bzw. die Nachspeisung von volumetrischen Verlusten erheblich.

Aufgrund der bestechenden Effizienzvorteile wird der Doppelkolbenspeicher in Kürze in einigen Hybridapplikationen zum Einsatz kommen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bauer, F.; Feld, D.: Warum hydraulische Hybridsysteme?. In: Het Hydrauliek Symposium, Delft, 2010, S. 87-104.
- [2] 97/23/EG Druckgeräterichtlinie
- [3] Verkoyen, T.; Schmitz, J.; Vatheuer, N.; Inderelst, M.; Murrenhoff, H.: Retrofittable hydraulic hybrid system for road vehicles. In: Efficiency through Fluid Power: 7th International Fluid Power Conference (7th IFK), Aachen, 2010, S. 433-444.
- [4] Internet: <http://www.hydac.com/de-de/service/download-software-auf-anfrage/software/software-download/speichertechnik.html>. Stand: 20.11.2010.



Pro.: Speichertechnik D 30.000



Prospekt: Filtertechnik D 70.000



Pro.: Verfahrenstechnik D 77.000



Prospekt: Filter Systems D 79.000



Pro.: Compact-Hydraulik E 53.000



Prospekt: Accessories D 61.000






Prospekt: Elektronik D 180.000



Prospekt: Kühlsysteme DEF 5.700

Globale Präsenz. Lokale Kompetenz. www.hydac.com



-  HYDAC Head Office
-  HYDAC Companies
-  HYDAC Service Partner

HYDAC INTERNATIONAL

Head Office
HYDAC INTERNATIONAL
GMBH

Industriegebiet
66280 Sulzbach/Saar
Deutschland

Telefon:
+49 6897 509-01
Fax:
+49 6897 509-577

E-Mail: info@hydac.com
Internet: www.hydac.com