

Ladungswechsel mit verschiebbaren Laufbüchsen

Günter Elsbett

Grundlagen für einen Ladungswechsel ohne klassische Ventile

Ein ventillosen Ladungswechsel ist bei Zweitaktmotoren seit langem etabliert. Dabei übernimmt der Kolben die Funktion eines Gaswechselorgans, indem er nahe UT die zu den Gaskanälen führende Durchbrüche in der Zylinderwand öffnet und verschließt. Andere Zweitakter, insbesondere gleichstromgespülte Groß-Dieselmotoren haben mindestens ein Auslassventil im Zylinderkopf und nur der Einlass ist kolbengesteuert. Solche Motoren haben einen hervorragenden spezifischen Kraftstoffverbrauch mit Wirkungsgraden über 50%. Ermöglicht wird dies, abgesehen von den thermodynamischen Vorteilen eines großen Hubvolumens, durch die bei diesem Ladungswechsel-Prinzip zur Verfügung stehenden großen Strömungsquerschnitte in den Gaswechselorganen.

Die Übertragung dieser Vorteile auf moderne und abgasarme schnelllaufende Motoren stößt jedoch auf einige Schwierigkeiten: Es lässt sich nicht verhindern, dass Schmieröl durch die Kolbenringe in die Steuerschlitze gestreift wird. Das Gaswechselsystem ist nicht ausreichend flexibel hinsichtlich der Steuerzeiten und ein Viertaktverfahren lässt sich mit kolbengesteuertem Ladungswechsel nicht realisieren. Auch die Nutzung der thermodynamischen Vorteile von Gegenkolbenmotoren scheitert an den Anforderungen für moderne Motoren wegen der Nachteile des bisherigen Zweitaktverfahrens, denn diese Motoren haben keinen Zylinderkopf und erlauben somit keinen klassischen Ladungswechsel. Erst wenn es gelingt Kolbenstellung und Steuerzeiten zu entkoppeln und ein Überstreifen der Kolbenringe über Öffnungen in der Zylinderwand zu vermeiden, können neue Wege zur Effizienzverbesserung beschritten werden.

Die Laufbüchse als Gaswechselorgan

Das hier gezeigte Gaswechselsystem weist verschiebbare Laufbüchsen am Beispiel eines Gegenkolbenmotors (GKM) auf, welche anstelle des Kolbens die Funktion eines Quasi-Ventils übernehmen, pro Zylinder jeweils eines für Einlass und Auslass (Bild 1).

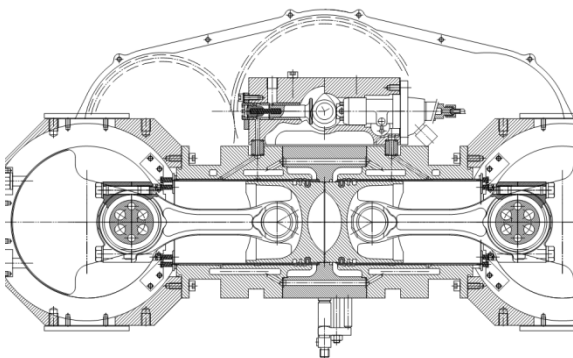


Bild 1: Konstruktion des Gegenkolbenmotors

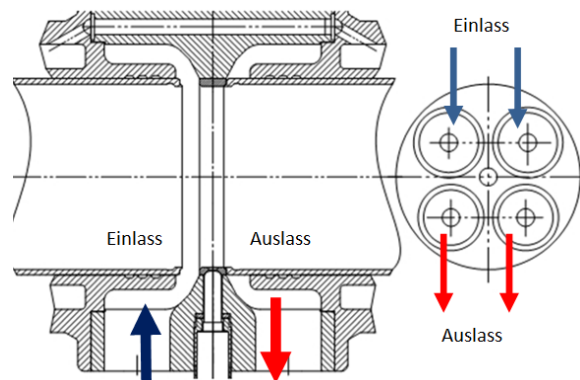


Bild 2: Vergleich Strömungsquerschnitte

Durch einen gesteuerten Hub können wie bei herkömmlichen Ventilen die Gaskanäle für Einlass und Auslass geöffnet und geschlossen werden. Diese Gaswege münden hierbei in Ringkanäle, die sich um den gesamten Zylinderumfang herum erstrecken. Zweitaktübliche Ringstege, welche der Führung der Kolbenringe dienen um das Einschnappen in die Schlitze zu verhindern, sind dabei nicht erforderlich; offene Steuerschlitze werden hier nie von Kolbenringen überlaufen und der Kolben bewegt sich über den gesamten Hub stets in einer unterbrechungsfreien Laufbüchse, die ihn von den Steuerschlitzen im Zylinder trennt. Damit kann nun geometrisch der maximal mögliche Querschnitt in den Gaswechselorganen erzielt werden, was kein anderes Ladungswechselsystem ermöglicht (Bild 2, Einlass offen, Auslass geschlossen gezeigt). Zudem wird die Luft beim Ein- und Ausströmen praktisch nicht umgelenkt, somit entsteht keine zusätzliche Querschnittsverengung wie bei klassischen Ventilen.

Mit diesem Prinzip können sowohl Zwei- als auch Viertaktverfahren verwirklicht werden. Die Laufbüchse wird wie ein herkömmliches Ventil betätigt und dichtet stirnseitig auf einem Kegel- oder Flachsitz ab, nicht – wie bei einem Schieberventil – am Umfang. Analog einer konventionellen Ventil-Kinematik wird die Laufbüchse mittels Federn auf ihren Sitz gedrückt und verschließt damit den Gasstrom. Zum Öffnen wird die Büchse von ihrem Sitz abgehoben und führt einen Hub aus, ähnlich einer üblichen Ventilerhebungskurve. Um die Dichtwirkung zu verbessern, wird der Dichtsitzdurchmesser etwas kleiner gewählt als der Zylinderdurchmesser. Dadurch wird die Laufbüchse durch den Gasdruck noch zusätzlich auf ihren Sitz gedrückt (siehe auch Bild 17 u.18).

Funktionsmodell und Prototyp

Zum Nachweis der beschriebenen Funktionen wurde ein GKM-Prototyp erstellt, der die Möglichkeiten des Systems aufzeigt und lauffähig ist (Bilder 3 bis 8).

Für die Umsetzung des Konzepts wurde als Versuchsträger ein wassergekühlter Saugmotor, d.h. ein nicht mittels Lader oder Gebläse gespülter Einzylinder-Diesel-GKM als Viertakter konstruiert und gebaut. Diese Ausführung ist deshalb für Demonstrationszwecke gut geeignet, weil hier mit herkömmlicher Technik weder ausreichende Zylinderfüllung, noch flexible Steuerzeiten oder gar Viertaktverfahren zu realisieren sind. Die Bohrung des Prototyp beträgt 108 mm, der Hub 115 mm je Kolben. Der Motor wurde mit einer Drehzahl von max. 2500 U/min betrieben.

Der Arbeitszyklus verläuft bei diesem Motor in bekannter Weise in vier Takten: Nach der Zündung bewegen sich die Kolben im Arbeitshub gegenläufig auseinander. Am Ende des Expansionstaktes öffnet die Auslassbüchse und schließt erst am Ende des folgenden Auslasshubes bei Erreichen des Spül-OT. Vor dem nun folgenden Ansaughub öffnet die Einlassbüchse und bleibt während des Ansaugtaktes geöffnet, bevor beim darauffolgenden Kompressionshub wieder beide Laufbüchsen geschlossen sind.

Ladungswechsel mit verschiebbaren Laufbüchsen

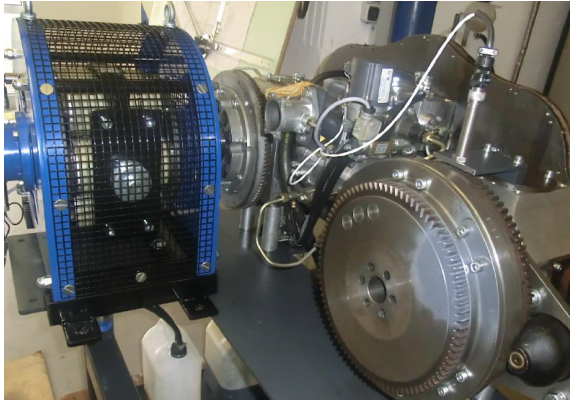


Bild 3: GKM auf dem Prüfstand

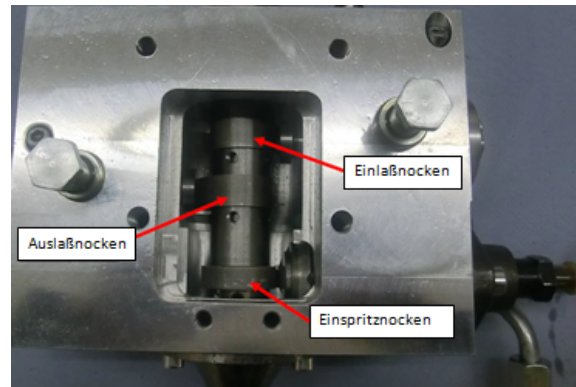


Bild 4: Nockensteuerung der Laufbüchsen



Bild 5: GKM Kurbelgehäusehälfte



Bild 6: GKM Kolben mit Einspritzschrauben



Bild 7: GKM Basismotor zusammgebaut



Bild 8: GKM Rädertrieb

Die Betätigung der Laufbüchsen erfolgt hydraulisch. Der gesamte Steuertrieb für die Operation der Laufbüchsen benötigt kaum Leistung ($<150 \text{ W}$ bei 1500 min^{-1}), was auch darauf zurückzuführen ist, dass unter Gasdruck die Büchsen nicht bewegt werden und Rückstellfedern – wie bei konventionellen Ventilen – für eine Rekuperation der aufgewendeten Kräfte sorgen. Außerdem erfolgt die Verschiebung der Laufbüchsen praktisch immer in Richtung der Kolbenbewegung, so dass hier der Reibung durch die Kolbenringe in der Laufbüchse mehr unterstützende als hemmende Wirkung zukommt.

Ein direkteinspritzendes Dieselverfahren wurde gewählt, weil der Motor hier mit höheren Drücken und Beanspruchungen der Bauteile getestet werden konnte. Hierfür ist eine einfache mechanische Steckpumpe eingebaut, die von einer, mit halber Motordrehzahl drehenden Nockenwelle angetrieben wird und die den Kraftstoff auf zwei am Zylinderumfang tangential einspritzende Düsen (siehe auch Bild 15) verteilt. Dieselbe Nockenwelle weist auch noch je einen Einlass- und Auslassnocken auf (Bild 4). Damit werden Tassenstößel betätigt, die als Plunger-Kolben ausgeführt sind (Bild 11), um die beiden Laufbüchsen hydraulisch zu bewegen. Das geschieht mittels der Ölsäule, die sich in den Leitungen zwischen Plunger und den Aktuatoren für die Laufbüchsen befindet und die damit in der Funktion einer mechanischen Stößelstange gleichkommt.

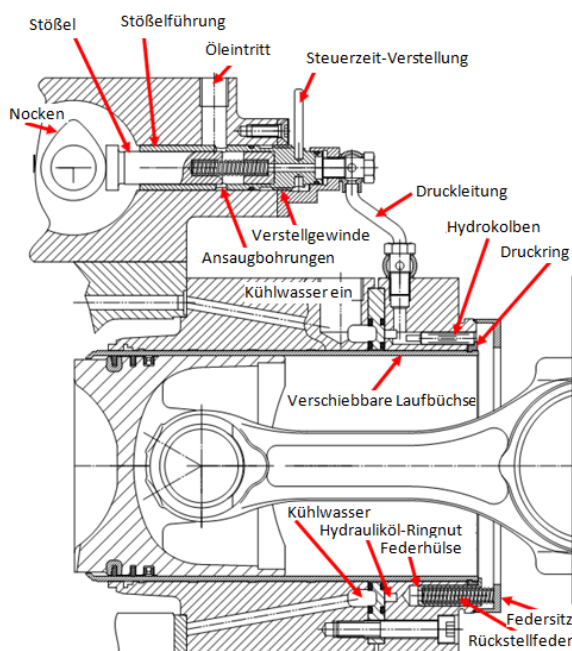


Bild 9: Hydrostatisch gesteuerter Hub der Laufbüchsen (hier gezeigt mit VVT)

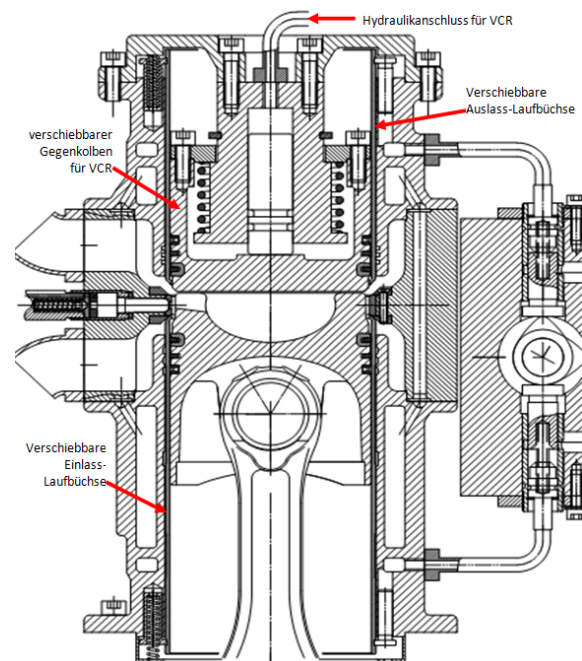


Bild 10: Beispiel gesteuerter Laufbüchsen bei konventionellen Motoren (hier mit VCR)

Als Hydraulikmedium dient das Motoröl, so dass geringfügige Leckagen im gesamten hydrostatischen System wieder in der Ölwanne landen. Das hat die Konstruktion sehr vereinfacht und stellt keine besonderen Anforderungen an die Fertigung der Teile.

Ladungswechsel mit verschiebbaren Laufbüchsen

Bild 9 zeigt einen Querschnitt des hydraulischen Systems, bei dem durch ein von außen verstellbares Gewinde an der Stößelführung (Bild 11) der Vorhub des Stößels verändert werden kann, wenn die Steuerzeiten während des Betriebes verändert werden sollen.

Bild 10 zeigt, dass dieses Gaswechselsystem auch bei konventionellen Motoren durch Stillsetzen eines der beiden Gegenkolben angewendet werden kann, wobei dieser dann durch kurzes Verschieben für ein variables Kompressionsverhältnis (VCR) dienen kann.



Bild 11: Hydraulikstößel mit Stellhülse

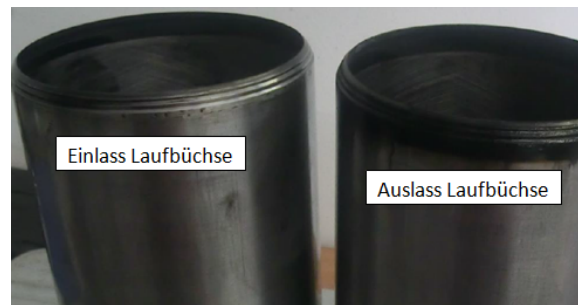


Bild 12: Laufbüchsen nach 24h-Dauerlauf

Bild 12 zeigt an den Laufbüchsen nach einem kurzen Dauerlauf (24h) keinerlei Verschleißspuren. Im Bereich der Auslassöffnung waren leichte Rückstände von Kohlenstoff zu sehen, wie sie auch am Feuersteg von Kolben üblicherweise zu finden sind.

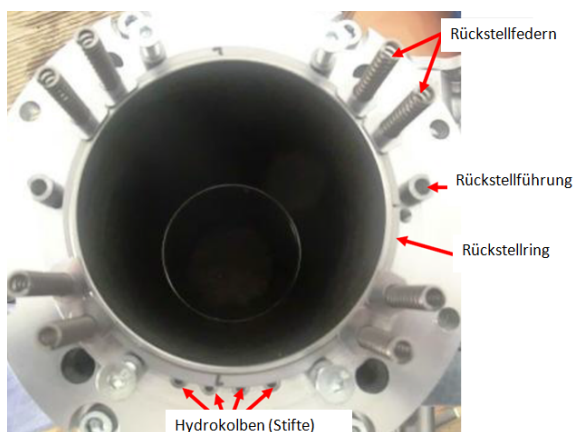


Bild 13: Betätigungselemente für die Laufbüchse, Rückstellfedern ungespannt

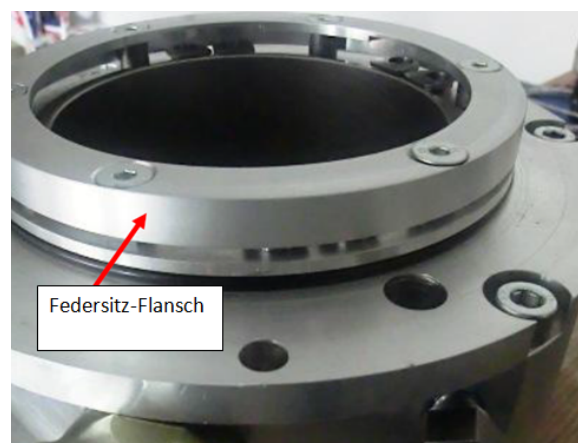


Bild 14: Rückstellfedern mit Flansch gespannt (halten Laufbüchsen geschlossen)

Der Mechanismus der Laufbüchsen-Verschiebung durch hydraulische Betätigung hat sich an diesem Prototyp bewährt. Als Hydrokolben sind 8 simple und billige Passstifte mit 6 mm Durchmesser verwendet, die platzsparend um den Zylinder herum angeordnet sind (Bild 13). Das gilt auch für die 8 Rückstellfedern, welche die Laufbüchse beim

Abwärtshub des Nockens zurückdrücken (Bild 14). Auf diese Weise sind die Ein- und Auslass-Zylinder sehr kompakt auszuführen und als komplettes Modul zu montieren.

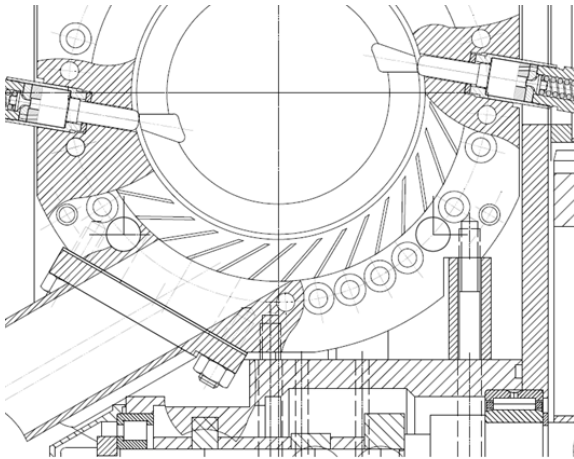


Bild 15: Düsenanordnung und Drallbildung



Bild 16: Drallring vor Einlass-Laufbüchse

Dem Einlasskanal vorgelagerten Drallringe (Bild 15 und 16) mit verschiedenen tangentialen Einströmwinkeln, erlauben es, den Mischvorgang zu beeinflussen. Auch eine variable Drallsteuerung ist hier mit relativ einfachen Mitteln – ähnlich VGT – machbar.

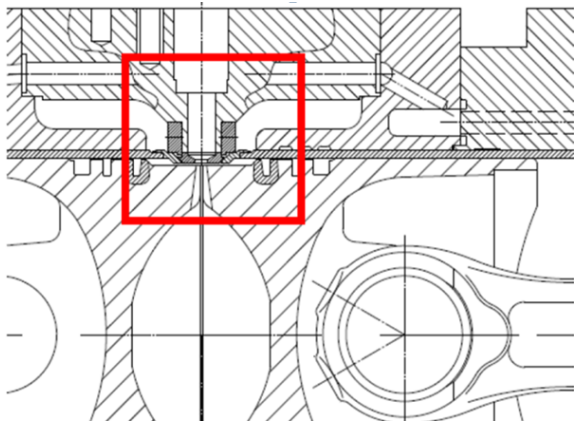


Bild 17: Laufbüchsen-Dichtsitz, Detail siehe nebenstehend

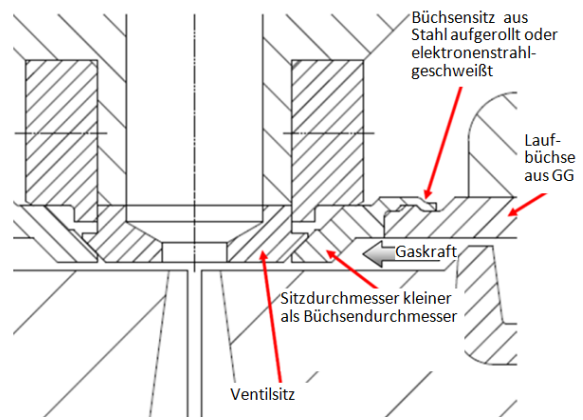


Bild 18: Laufbüchsen Dichtsitz (verstärkter Andruck auf Sitz unter Gasdruck)

Der in Bild 17 und 18 dargestellte Dichtsitz weist noch den von Ventilen her gewohnten traditionellen Winkel von 45° auf. Grundsätzlich kann der Dichtsitz jedoch auch plan ausgeführt werden, was die Fertigung vereinfacht und die Gase können dann ohne Umlenkung durch den Sitzwinkel ein- und ausströmen. Die Laufbüchse wird immer zusätzlich zur Federkraft durch den Gasdruck zugehalten.

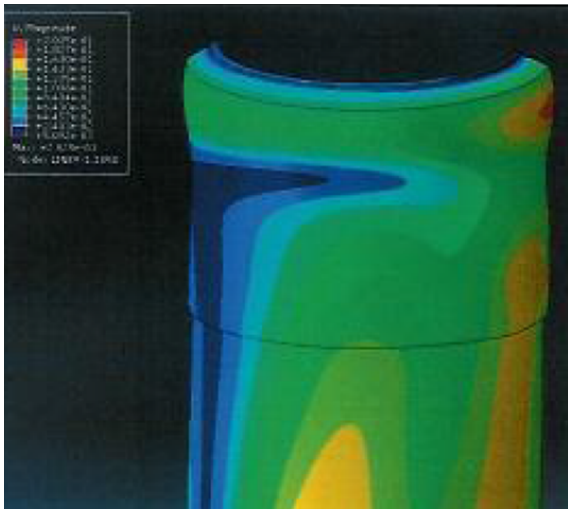


Bild 19: FEM Laufbüchse (200 bar)

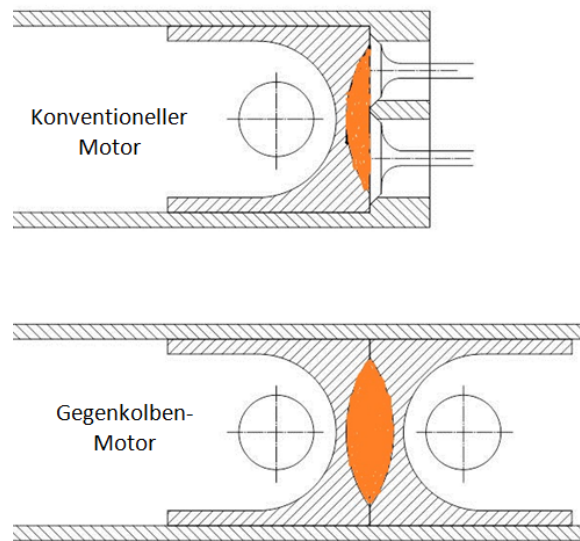


Bild 20: Brennraumvolumen zu Oberfläche

Eine FEM Belastungsberechnung der Laufbüchse (Bild 19) unter theoretisch hochaufgeladenen Bedingungen (25 bar Mitteldruck, 200 bar Spitzendruck) ergab keine ersichtlichen Schwachpunkte, jedoch der gebaute Prototyp als Saugmaschine konnte praktisch nur mit max. 7,5 bar Mitteldruck erprobt werden.

Möglichkeiten der Weiterentwicklung

Sinn der vorliegenden Entwicklung war es, einen Weg aufzuzeigen, wie die thermodynamischen Vorteile von Gegenkolbenmotoren unter heutigen Bedingungen genutzt werden können, da hier die Wärmeverluste infolge doppelten Volumens im Brennraum bei gleicher Oberfläche (Bild 20) geringer ausfallen. Darüber hinaus sollte allgemein der Gaswechsel verbessert werden. Es sollten aber auch die bei Viertaktmotoren hochentwickelten und bewährten modernen Emissions-Technologien anwendbar sein.

Mit dem Nachweis der einwandfreien Funktion des hier vorgestellten Gaswechselsystems eröffnen sich nun prinzipiell ganz neue Perspektiven für die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren. Es stehen sehr große Querschnitte für den Gaswechsel zur Verfügung. Eine Kollisionsgefahr zwischen Kolben und Ventil besteht selbst bei voller Öffnung nicht. Der Brennraum ist nicht durch drallstörende und den Totraum vergrößernde Ventiltaschen zerklüftet. Das thermodynamische Potential von Gegenkolbenmotoren ist ohne die zweitaktbedingten Nachteile erschließbar.

Wird einer der beiden Gegenkolben stillgesetzt, kann der Motor innerhalb der Dimensionen konventioneller Motoren mit nur einer Kurbelwelle ausgelegt werden. Der zweite Gegenkolben bietet sich dann als einfache Lösung (durch leichte Verschiebung) für ein variables Kompressionsverhältnis (VCR) an, wie bereits in Bild 10 gezeigt.

Durch die Anordnung von mehreren Injektoren am Zylinderumfang (Bild 21) kann der für einen guten Mischvorgang erforderliche Drall verringert oder durch sequentielle Einspritzung auch ganz vermieden werden. Eine nockenlose Steuerung ist durch Anwendung der Common-Rail Technologie möglich (Bild 22). Damit sind beliebige und variable Steuerzeiten für jeden Punkt des Kennfeldes machbar. Ebenso ist auch eine Umschaltung von Zweitakt auf Viertakt während des Betriebes möglich, sowie die Einfügung weiterer Takte, z.B. Leer- und Bremsakte, oder auch eine Zylinder-Abschaltung bei mehrzylindrigen Motoren.

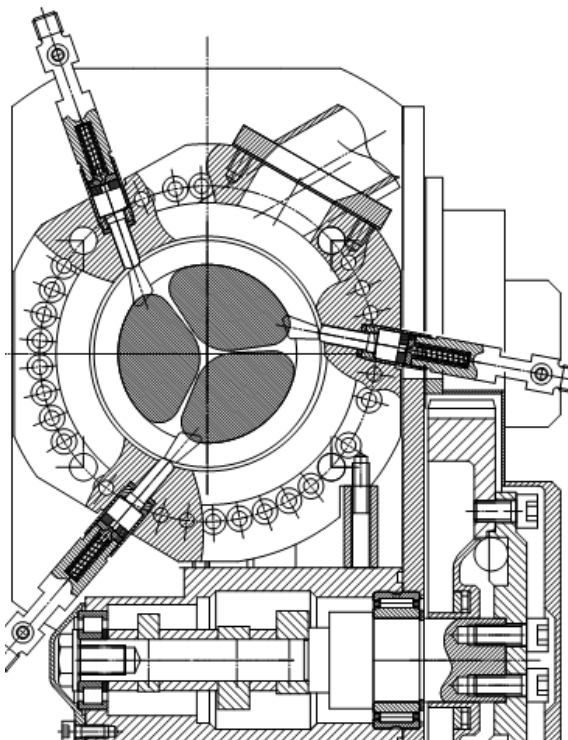


Bild 21: Aufteilung des Brennraumes in mehrere Einspritz-Sektoren

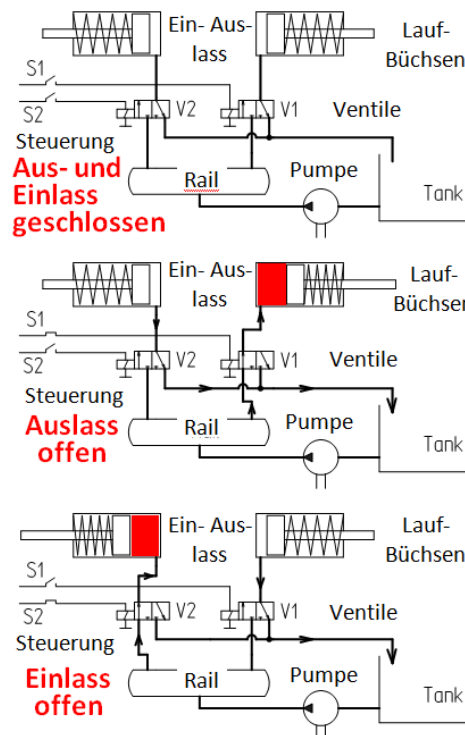


Bild 22: Hydraulische Steuerung der Laufbüchsen durch Common-Rail mit Solenoids

Bei weiterer Ausgestaltung dieser Technologie bei Gegenkolbenmotoren kann auch ein herkömmliches Brenn- und Einspritzverfahren simuliert werden, indem man sich die Zylinderwand als fiktiven Zylinderkopf vorstellt und eine, auf beide Kolben verteilte konventionelle Brennraumform um 90° dreht. Damit entstehen ähnliche Brennraum- und Einspritz-Verhältnisse im OT wie bei bekannten Motoren (Bild 23). Auch für ein Zweitaktverfahren mit einer gezielt gerichteten Gleichstromspülung von unten nach oben ist diese Anordnung tauglich.

Ladungswechsel mit verschiebbaren Laufbüchsen

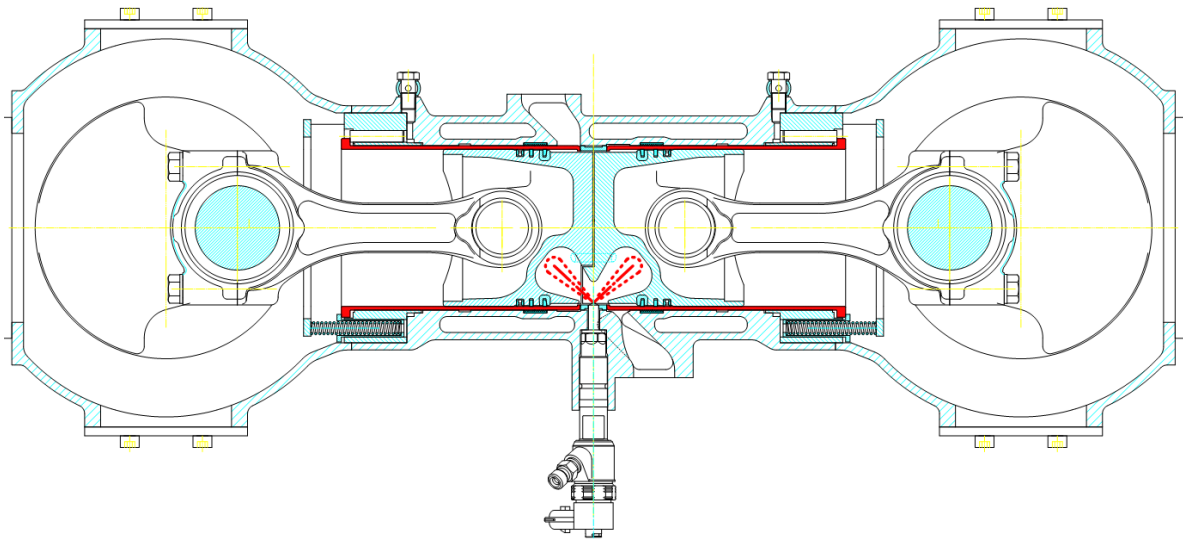


Bild 23: Auslegung eines GKM für bisherige Brennraumformen und Einspritzverhältnisse

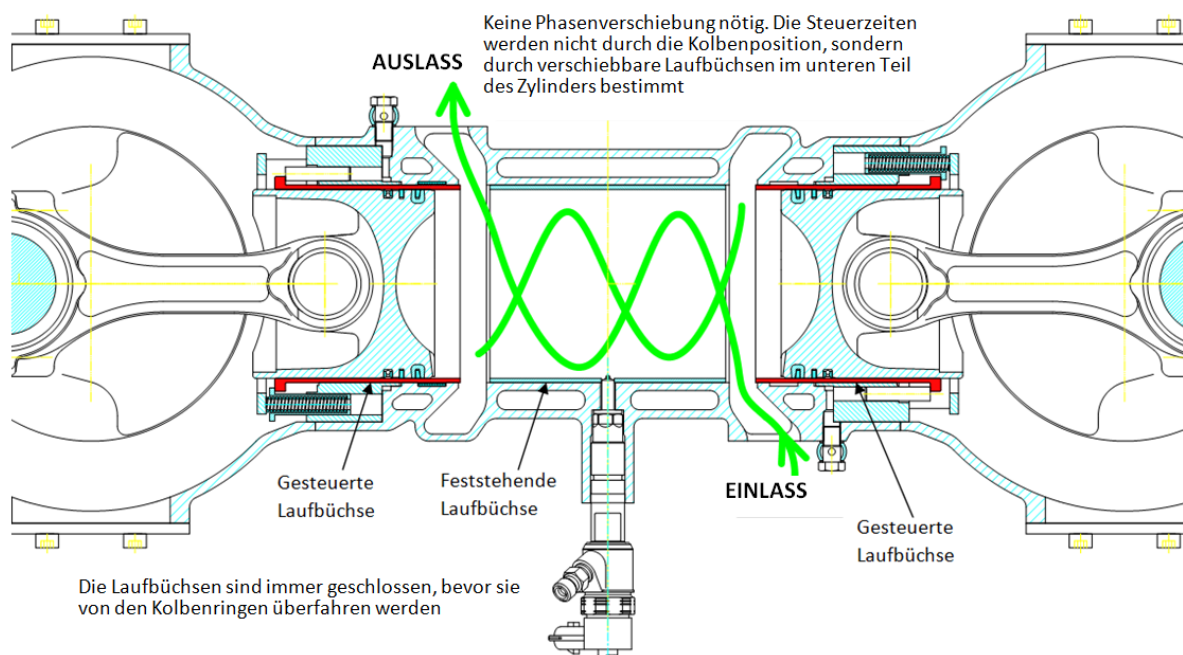


Bild 24: Zweitakt-GKM mit teilweise verschiebbaren Laufbüchsen und Gleichstromspülung

Um Zweitakt-Gegenkolbenmotoren konventioneller Bauweise ohne deren bekannte Nachteile zu entwickeln, können die Gaswechselorgane aus dem OT-Bereich, in den Bereich der unteren Totpunkte verlegt werden (Bild 24). Hierbei dürfen die Ringkanäle allerdings erst dann geöffnet werden, wenn der sich abwärts bewegende Kolben mit seinen Ringen diese überfahren hat, und sie werden geschlossen, bevor der zurückkehrende Kolben erneut darüber fährt. Das ermöglicht innerhalb dieses Bereiches variable

Steuerzeiten, erübrigt eine Phasenverschiebung zwischen den Kolben und ermöglicht deshalb auch einen vollständigen Massenausgleich.

Ausblick

Nach zahlreichen Tests und Erprobung verschiedener Versuchsvarianten wurde das Entwicklungsprogramm im April 2012 abgeschlossen. Nach insgesamt ca. 300 Betriebsstunden sind keine technischen Probleme aufgetreten, die einer Weiterentwicklung dieser Technologie für praktische Anwendungen im Wege stünden. Die Möglichkeiten dieser Technologie sind weitreichend und vielversprechend. Aufgrund der Variationsmöglichkeiten dieses Ladungswechselsystems können mit der vorliegenden Präsentation nur die grundsätzlichen Funktionen aufgezeigt werden. Ein breites Spektrum verschiedener Ausführungsdetails und Anwendungsbereiche ist durch zahlreiche deutsche, europäische und internationale Schutzrechte abgedeckt.