

# **Der Rotatorische Ventiltrieb (RVT) – ein vollvariabler, elektromechanischer Ventiltrieb zur Betätigung von Gaswechselventilen**

## *The Rotary Valve Train (RVT) – A Fully Variable, Electromechanical Valve Train for Operation of Valves of a Combustion Engine*

Dr.-Ing. Jochen **Keller**, Dipl.-Ing. (FH) Christian **Köglasperger**, Dr. Thomas **Leiber**  
LSP Innovative Automotive Systems GmbH, Unterföhringen

### **Zusammenfassung**

Variable Ventiltriebe stellen einen zentralen Punkt in der Konzeption zukünftiger Motoren hinsichtlich maximalem Wirkungsgrad und minimaler Umweltbelastung dar. Die Firma LSP präsentiert einen elektromechanischen Antrieb zur uneingeschränkten, vollvariablen Steuerung der Ventile eines Verbrennungsmotors, den Rotatorischen Ventiltrieb (RVT). Sein Drehachsenkonzept ermöglicht den Einsatz des RVT sowohl bei Diesel- als auch bei Ottomotoren. Wiederholgenau und mit hoher Präzision können der Hub, das Ventilhubprofil sowie die Steuerzeiten individuell für jedes Ventil variiert werden. Hinzu kommt, dass der Aktoraufbau konventionelle Wälzlager verwendet, Vibrationen und Stöße beeinflussen nicht die Drehbewegung des Rotors. Aufgrund des magnetischen Wirkprinzips des doppelten Luftspalts resultieren kleine Massenträgheiten und ein kompakter Aktoraufbau.

Die wesentlichen Grundzüge der Konzeption und Konstruktion der Aktorik werden erläutert. Weiterhin werden die charakterisierende Messergebnisse zur Regelgüte und Leistungsbilanz präsentiert.

### **Summary**

Variable valve trains represent a major issue in the conceptual design of future engines regarding maximum efficiency and minimum environmental pollution. The company LSP presents a electromechanical actuator for non-restrictive fully variable control of the valves of combustion engines, the rotary valve train (RVT). Its rotary concept allows the application to both Diesel and gasoline engines. With high precision and repeat accuracy the lift, valve timing and lift profile can be individually varied for each valve. Additionally, the actuator uses conventional bearings. Thus, vibrations and shocks do not affect the rotational motion of the rotor. Due to the magnetic principle of having two air gaps result in small inertia and a compact construction of the actuator.

The main principles concerning concept and design of the actuator will be explained. Additionally, characterising measurement result regarding accuracy of control and power consumption will be presented.

## 1 Einführung

Seit den Anfängen des Verbrennungsmotorenbaus erfolgt die Betätigung der Ventile zum Zwecke des Gaswechselforgangs über einen mechanischen Aufbau, welcher direkt mit der Kurbelwelle angetrieben wird. Hieraus folgt, dass Zeitpunkt und Dauer des Ansaugens der Frischgase und des Ausstoßens der Abgase festgelegt sind.

Von einer flexiblen Steuerung der Ventilöffnungs- und -schließzeiten erwartet man sich eine Reihe von Verbesserungen [4] wie einer Kraftstoffreduktion von bis zu 15% sowie eine Steigerung des Motormoments auch bei niedrigen Motordrehzahlen. Zur Beherrschung der Ladungszusammensetzung in unterschiedlichen Betriebsbereichen für neuartige Brennverfahren wie z.B. HCCI [1], [3] ist ein vollvariabler Ventiltrieb von grundlegender Bedeutung.

Bisherige Konzepte weisen Einschränkungen hinsichtlich der Applikation für die Ventilanordnung aller Zylinderkopftypen auf sowie der nur eingeschränkten Variabilität des Ventilhubes [2]. Ein Erfolg versprechender Ansatz zur individuellen und vollvariablen Steuerung der Ventile ist das RVT-System. Der Rotatorische Ventiltrieb (RVT) ist ein elektromechanischer Antrieb zur vollvariablen Steuerung der Ventile von Verbrennungsmotoren.

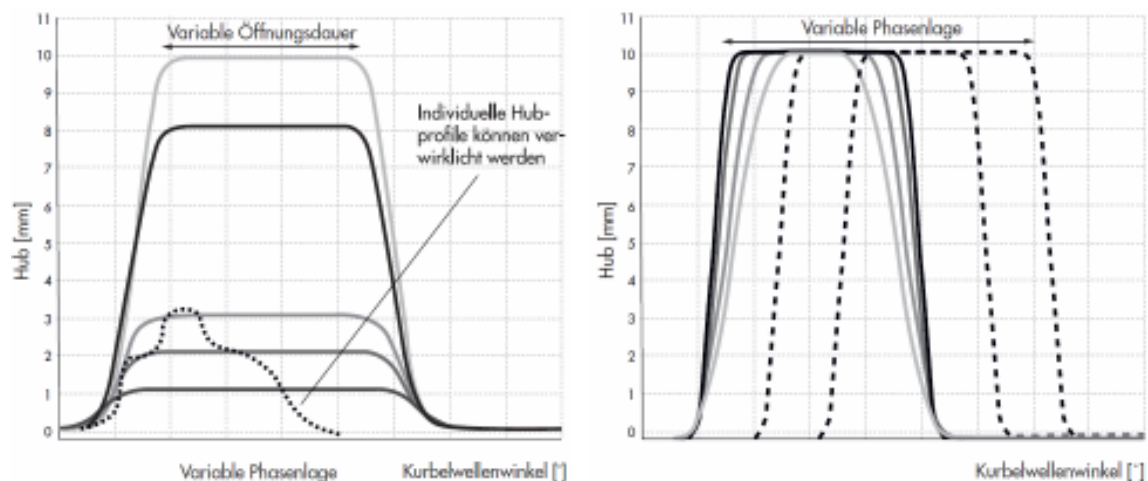


Abb. 1: Mit dem RVT mögliche Ventilhubvariabilität  
*Variability of the valve lift possible with RVT*

Abb. 1 zeigt die mit dem RVT möglichen Variabilität des Ventilhubs. Steuerzeiten, Öffnungs- und Schließzeiten sowie Öffnungs- und Schließwinkel können frei gewählt werden.

Ermöglicht wird dies durch den elektromechanischen Aufbau des Aktors als permanenterregter Segmentmotor. Der Magnetkreis ist um eine Drehachse angeordnet und nimmt einen Kreisausschnitt von bis zu  $245^\circ$  ein. Herzstück des Aktors ist der Rotor, dieser befindet sich mit kleinem Spaltmaß zwischen Außen- und Innenstator und trägt am Umfang mehrere Permanentmagnete. Der Rotor ist drehbar gelagert. Bei Bestromung der Spulen wird am Außenstator ein Magnetfeld erzeugt, welches die Permanentmagnete und den Innenstator durchdringt. Die daraus resultierende tangentielle Kraft führt zu einer Drehbewegung des Rotors. Durch eine schnelle Regelung des Stroms in den Spulen lässt sich die Bewegung des Rotors exakt steuern.

Der nicht vom Magnetkreis eingenommene Kreisausschnitt wird für die Ankopplung des Rotors an das Ventil benötigt. Zweck dieser Ventilankopplung ist es, die Drehbewegung des Rotors in eine längsgerichtete Bewegung des Ventils umzusetzen.

Dem Umstand zufolge, dass Rotorachse und Ventilachse nebeneinander und nicht-fluchtend angeordnet sind, es sich somit um einen oszillierenden Schwenkantrieb handelt, ist eine Umsetzung des Konzepts sowohl für die Motoren mit senkrecht stehenden als auch nicht-senkrecht stehenden Ventilen möglich. Die Konstruktion des RVT kann prinzipiell an jegliche Gegebenheit hinsichtlich der Zylinderkopfkonstruktion angepasst werden. Abb. 2 zeigt eine Darstellung des RVT-Konzepts für Ventilanordnungen unterschiedlicher Verbrennungsmotoren.

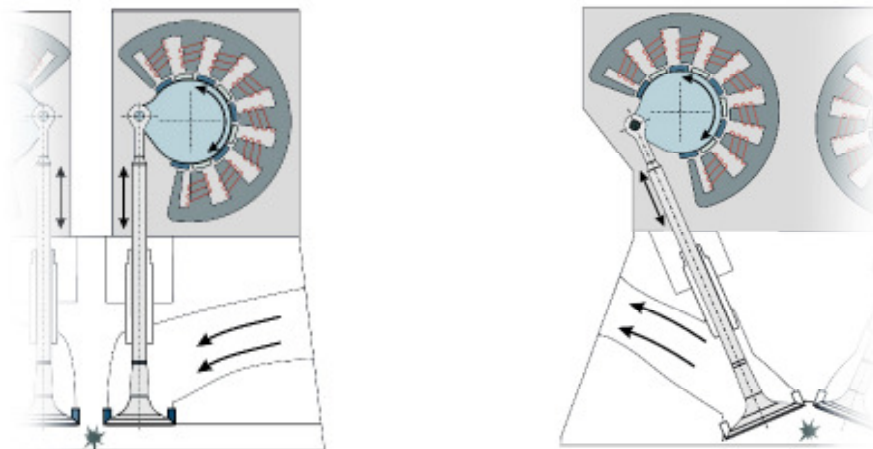


Abb. 2: Anwendung des Aktorkonzepts auf Diesel- und Ottomotoren  
*Application of the RVT-concept to Diesel and gasoline engines*

## 2 Konstruktion des RVT

In langjähriger Zusammenarbeit mit *Volkswagen AG* wurde der RVT über mehrere Baustufen bis zu einem hohen technischen Reifegrad entwickelt. Die jüngste Baustufe wurde für den Einsatz am befeuerten Verbrennungsmotor konzipiert, was einen erhöhten Anspruch hinsichtlich Funktionalität, Montage und Demontagemöglichkeit sowie Dauerfestigkeit bedeutet [1]. Für die Gegebenheiten je eines Forschungs-Otto- und Dieselmotors wurde das Aktorkonzept hinsichtlich Kraftcharakteristik, elektrischem Leistungsbedarf und dem zur Verfügung stehenden Bauraum angepasst. Abb. 3 zeigt Ansichten der gefertigten Aktoren.

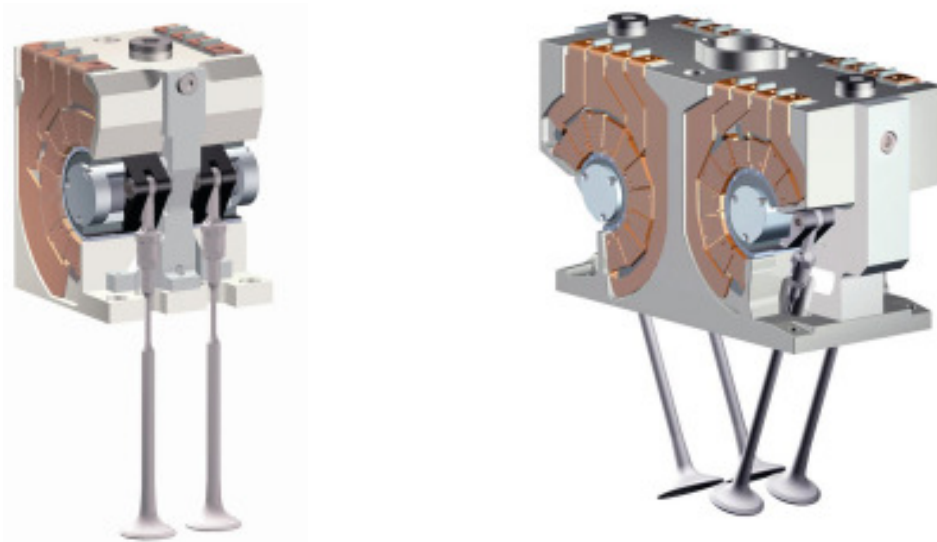


Abb. 3: RVT-Aktoren für Otto- und Dieselmotor  
*RVT actuator for gasoline (left) and Diesel engine application (right)*

Für den Einsatz der Aktoren im Testfahrzeug steht nur der Strom bzw. die Leistung eines konventionellen Bordnetzes zur Verfügung. Daher ist die Minimierung der elektrischen Verlustleistung der Aktoren entscheidend. Technisch beantwortet wurde diese Forderung anhand einer Formspulenlösung. Hierdurch lassen sich Kupferfüllfaktoren bis zu 71% erreichen. Die Spulen bestehen aus mehreren einzeln isolierten Kupferlagen, diese sind an den jeweiligen Kontaktstellen mit einem Weichlot verlötet. Zum Spulenabgang sind speziell gefertigte Bleche mit eingelötet. Im Falle, dass während des Betriebs eine Spulenwicklung ausfällt, wurde aus Redundanzgründen die Gesamtwicklung in zwei elektrische Kreise aufgeteilt. Auch mit nur einem elektrischen Kreis kann das Aktor sicher betrieben werden, wenn auch mit eingeschränkter Dynamik.

Der bespulte Außenstator wird in ein Aluminiumgussgehäuse eingesetzt. Dieses Gehäuse enthält einen Wassermantel und kann an den Kühlwasserkreislauf des Verbrennungsmotors angeschlossen werden. Im Fall des Ottomotors sind die Aktoren für vier Ventile eines Zylinders in einem Gehäuse zusammengefasst, bei der Dieselanwendung trägt das Gehäuse die Aktoren für zwei Ventile eines Typs.

Die mit Permanentmagneten bestückten Rotoren sind fliegend auf einer Achse gelagert. Ein Lagerbock, welcher die Achse trägt, sorgt für eine stabile Aufnahme der Rotoren. Fluchtend zur Rotordrehachse ist ein integrierter Absolutdrehwinkelsensor angeordnet. Der Sensor, der auf dem Hall-Prinzip basiert, ist sehr einfach und kostengünstig aufgebaut und liefert entsprechend dem Absolutdrehwinkel ein analoges Spannungssignal. Mit einer üblichen Auswertung von 12 Bit über dem Spannungsbereich ergibt sich somit eine Genauigkeit für die Hubbestimmung von ca. 7µm.

Die Rotoren haben zur Umsetzung ihrer Drehbewegung in die längsgerichtete Bewegung des Ventils eine Ankopplung. Zweck dieser Ankopplung ist es, die vom Magnetfeld erzeugte Kraft auf das Ventil zu übertragen. Öffnen und Schließen des Ventils soll möglichst spielfrei vonstatten gehen. Hierzu ist die Ankopplung als Gelenk mit zwei symmetrisch angeordneten Nadellagern ausgeführt.

Durch ein elastisches Bauteil wird der Versatz quer zur Ventilachse ausgeglichen, welcher aus der Umsetzung der rotatorischen in eine translatorische Bewegung des Ventils resultiert. Dieses Biegeelement ist als verjüngter Schaft zwischen Ventilführung und Rotorankopplung ausgeführt. Umfangreiche Untersuchungen der Ventilankopplung auch unter den Bedingungen am befeuerten Einzylinder-Testprüfstand zeigten ausnahmslos positive Ergebnisse hinsichtlich Spielfreiheit, Abrieb und Funktionalität. Die Biegeschafftlösung ist somit die zielführende Variante zur Umsetzung der Drehbewegung des Rotors in die Längsbewegung des Ventils.

Eine Forderung seitens der Automobilhersteller ist die passive Drehbarkeit des Ventils um seine eigene Achse. Hierzu ist das Ventil mehrteilig ausgeführt. Eine zylindrische Passung von Ankoppelpleuel und Ventilstange erlaubt die Drehbarkeit. Abb. 4 zeigt die derzeitig verwendete Biegeschafftkonstruktion mit Dreheinrichtung. Konstruktion der Dreheinrichtung sowie Fertigung übernahm die Firma TRW.



Abb. 4: Exemplarische Ansicht eines RVT-Gaswechselventile inkl. Ankoppelpleuel und Dreheinrichtung (Konstruktion Dreheinrichtung und Fertigung Fa. TRW)  
*View on valve incl. valve coupling and rotation mechanism (design of rotation mechanism and manufacture company TRW)*

### 3 Konzeption der Aktorelektronik

Die speziell für den Prüfstands Aufbau eines Verbrennungsmotors entwickelte RVT-Elektronik zeichnet sich durch ihren hohen Integrationsgrad aus. Leitungslängen konnten so auf ein Minimum reduziert werden, was sich positiv auf die Störanfälligkeit der Signalleitungen und die Leistungsverluste des Gesamtsystems auswirkt.

Aus bauraumtechnischen Gründen erschien eine Platzierung der Elektronik auf der Gehäuseoberseite trotz der äußerst begrenzten Platzverhältnisse am günstigsten. Die hierdurch erzielte gute thermische Anbindung an den Kühlkreislauf bzw. das Alugehäuse des RVT-Gehäuses ist Voraussetzung für den einwandfreien Betrieb auch unter extremen Leistungsanforderungen.

Aufgrund der Zusammenfassung von zwei bzw. vier Ventilaktoren innerhalb eines Gehäuses bietet sich ebenso die Vereinigung der kompletten Ansteuerung von zwei Ventilen in einem Elektronikgehäuse an. Die Elektronik besteht aus einer Leistungsplatine, einem Prozessorbord, einer Pufferplatine und dem dazugehörigen Elektronikgehäuse. Innerhalb des Elektronikgehäuses sind somit die Platinen zum Betrieb zweier benachbarter Ventile gleichen Typs untergebracht, siehe Abb. 5.

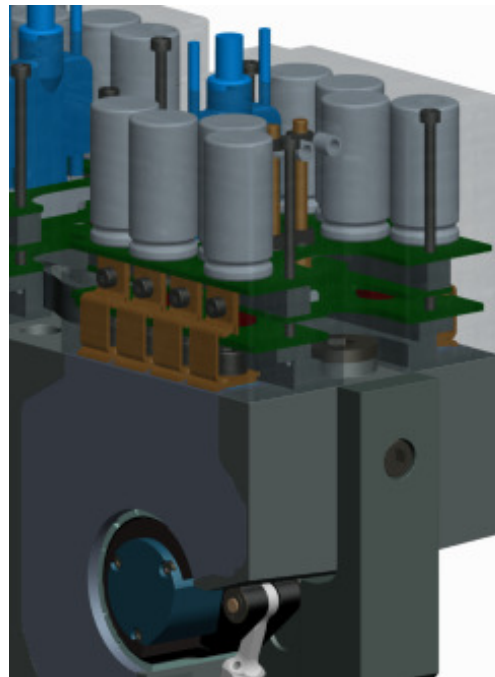


Abb. 5: Integrierte Aktorelektronik  
*Integrated actuator electronics*

Die Leistungsplatine enthält im wesentlichen vier MOSFET-Vollbrücken (vier pro Ventil) mit den dazugehörigen Treibern sowie eine Auswerteschaltung zur Strommessung über einen Shunt für jeden Magnetkreis. Jede Spule wird über eine individuell ansteuerbare Vollbrücke betrieben. Es lassen sich hiermit die in Abb. 6

dargestellten Schaltzustände realisieren. Über den Freilauf, Abb. 6 rechts, kann der Stromrippel minimiert werden, was sich positiv auf die Regelbarkeit des Systems und die Eisenverluste im Aktor auswirkt.

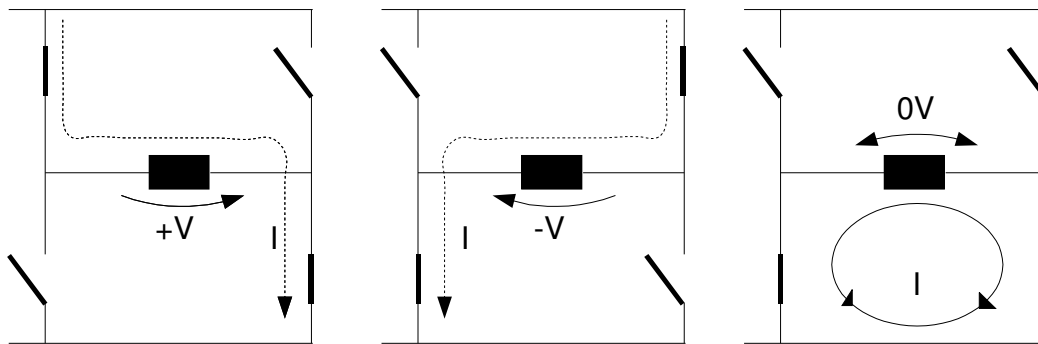


Abb. 6: Verschiedene Schaltzustände einer Vollbrücke  
*Different states of a full-bridge*

Die Ansteuerung der Vollbrücken übernimmt ein Mikrocontroller, der auf dem Prozessorbord untergebracht ist. Auf der dritten und obersten Platine befinden sich mehrere Kondensatoren, die im wesentlichen als dynamischer Energiespeicher dienen.

#### 4 Modellierung des Aktors

Das Gesamtsystem Aktor kann in ein elektromagnetisches und ein mechanisches Teilsystem zerlegt werden. Das folgende nicht-lineare Differentialgleichungssystem beschreibt dabei das elektromagnetische Modell.

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_1 &= U_1 - \frac{R_{Cu}}{w} \cdot f_{\Theta_1} \left( s, \frac{\Psi_1}{w} \right) \\ \dot{\Psi}_2 &= U_2 - \frac{R_{Cu}}{w} \cdot f_{\Theta_2} \left( s, \frac{\Psi_2}{w} \right) \\ F_M &= f_{F_1} \left( s, f_{\Theta_1} \left( s, \frac{\Psi_1}{w} \right) \right) + f_{F_2} \left( s, f_{\Theta_2} \left( s, \frac{\Psi_2}{w} \right) \right) + f_{F_0} (s) \end{aligned} \quad (1)$$

Hierbei sind  $\Psi_{1,2}$  die verketteten magnetischen Flüsse in den elektrischen Kreisen bzw. Magnetkreisen 1 und 2,  $R_{Cu}$  der Kupferwiderstand der Spule,  $w$  die Windungszahl,  $s$  der Ventilhub und  $U_{1,2}$  die angelegte Spulenspannung.

Der Zusammenhang zwischen magnetischem Fluss und der magnetischen Durchflutung wird durch die nichtlinearen Funktionen  $f_\Theta$  beschrieben. Die Funktionen  $f_F$  bilden die Nicht-Linearität zwischen der magnetischen Durchflutung und der resultierenden Magnetkraft  $F_M$  ab. Das mechanische Teilsystem wurde als lineares Gleichungssystem zweiter Ordnung modelliert (siehe Gleichung (2) mit der Masse  $m$  und dem Reibkoeffizienten  $r$ ).

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} \cdot F_M - \frac{r}{m} \cdot v \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 5 Reglerauslegung

Basierend auf dem Aktormodell wurde nun ein Reglerkonzept entworfen, welches eine hochpräzise Positionsregelung des Ventils ermöglicht.

Da die Zeitkonstanten des mechanischen Teilsystems deutlich größer als die des elektrischen bzw. elektromagnetischen Teilsystems sind, bot es sich an, den Regler in einer Kaskadenstruktur aufzubauen. Innerster Regler der Kaskade ist damit je ein PI-Stromregler pro Magnetkreis dem die Sollströme  $I_1$  und  $I_2$  zugewiesen werden.

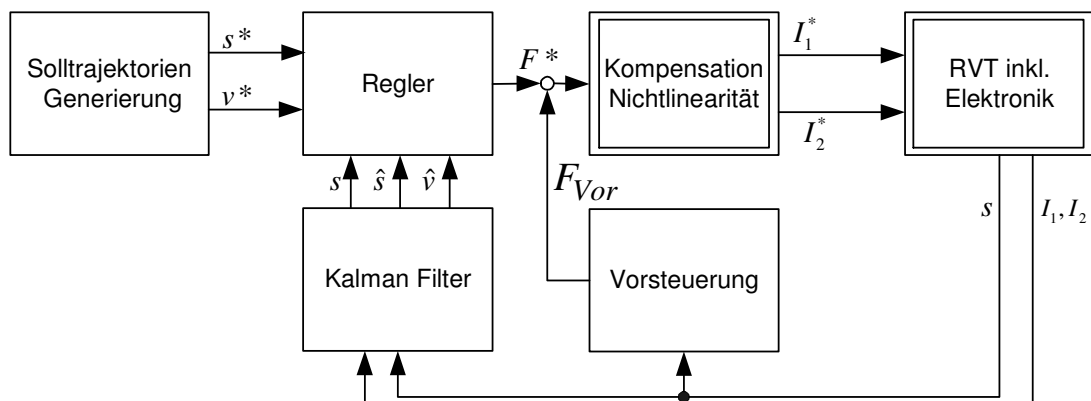


Abb.7: Gesamte Regelkreisstruktur zur Regelung des RVT  
*Complete structure of the control circuit*

Aus der Finite-Elemente-Magnetkreissimulation erhält man Kennfelder, welche die Abhängigkeit der Magnetkraft von Ventilhub und Spulenstrom beschreiben. Somit kann auch folgender nichtlinearer Zusammenhang bestimmt werden:

$$[I_1, I_2] = f_K(F, S) \quad (3)$$

Im Regelkonzept wird (3) zur Kompensation der Aktor-Nichtlinearität verwendet. Aufgabe des überlagerten Reglers ist es nun, die Sollkraft  $F^*$  so zu berechnen, dass



sich ein gewünschter Positionsverlauf  $s^*(t)$  ergibt. Im Falle des RVT übernimmt dies ein PID-Positionsregler, der im D-Anteil mit einer gefilterten Ist-Geschwindigkeit  $\hat{V}$  arbeitet. Da die Geschwindigkeit nicht direkt über den Hallsensor gemessen werden kann, handelt es sich bei  $\hat{V}$  um eine berechnete Größe.  $\hat{V}$  wird mit Hilfe eines Kalmanfilters aus den gemessenen Strömen  $I_1$  und  $I_2$  sowie der gemessenen Position  $s$  berechnet. Um eventuelle Störkräfte zu kompensieren, wird zusätzlich eine geeignete Vorsteuerkraft addiert. Die beschriebene Regelkreisstruktur ist in Abb.7 dargestellt.

## 5.1 Generierung der Solltrajektorien

Aufgabe des Blockes „Solltrajektorien-Generierung“ in Abb.7 ist es, einen gewünschten Sollpositionsverlauf  $s^*(t)$  zu generieren, so dass folgende Anforderungen erfüllt sind:

- Energieoptimaler Verlauf
- Stufenlose Einstellung des Hubes
- Stufenlose Einstellung der Öffnungs- bzw. Schließdynamik

Um diese Anforderungen zu erfüllen, hat sich folgendes Vorgehen als zweckmäßig erwiesen: Ausgangspunkt ist ein stetiger, aber nicht differenzierbarer Beschleunigungsverlauf, welcher an das Systemverhalten angepasst werden kann. Aus dem erzeugten Beschleunigungsverlauf wird anschließend ein Sollgeschwindigkeitsverlauf und ein Sollpositionsverlauf generiert. Die Sollposition  $s^*(t)$  wird zusammen mit der Sollgeschwindigkeit  $v^*(t)$  dem Positionsregler zugeführt.

## 6 Messergebnisse

Mit Hilfe des in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Gesamtkonzept bestehend aus Aktor, integrierter Elektronik und dem entwickelten Reglerkonzept, ist nun der vollvariable Betrieb eines Gaswechselventils möglich. Um für die thermodynamischen Untersuchungen am Verbrennungsmotor stabile und wiederholgenaue Verhältnisse zu liefern, ist ein präzise arbeitender Regelalgorithmus von grundlegender Bedeutung. Im Folgenden werden die Hauptkriterien zur Bewertung des Reglers genauer beleuchtet.

## 6.1 Reglerpräzision

Ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Regelgüte ist Geschwindigkeit beim Aufsetzen des Ventils. Aus Gründen der Geräuscentwicklung und der mechanische Belastung auf das Ventil, die Ventilankopplung und die Lagerung des Rotors sollte das Aufsetzen möglichst sanft vonstatten gehen. Abb. 8. zeigt eine über 1000 Zyklen bilanzierte Statistik, aufgenommen bei einer Motordrehzahl von  $n = 6000$  U/min und einer Ventilerhebungskurve mit Nockenwellencharakteristik. Im Mittel liegt die Auftreffgeschwindigkeit bei  $v = -0.03$  m/s, was durch eine sehr präzise Regelung im letzten Abschnitt der Ventilflugphase erreicht wird.

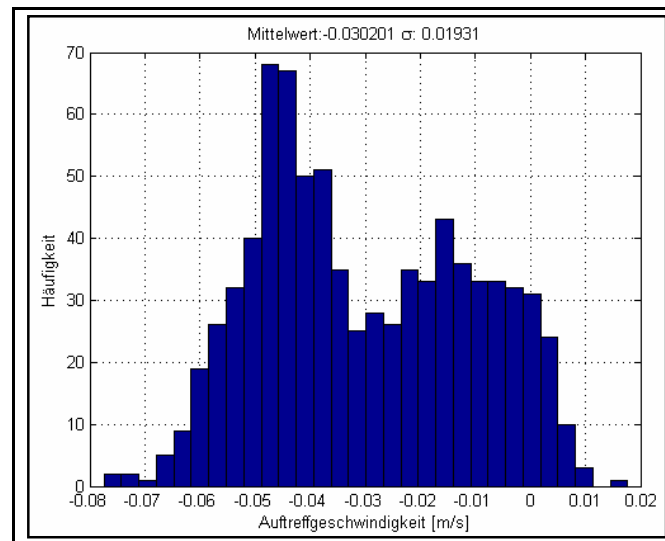


Abb. 8: Statistik zur Auftreffgeschwindigkeit beim Schließen des Ventils  
*Impact speed statistics when closing the valve*

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung der Regelgüte ist die Streuung der Öffnungs- und der Schließwinkel. Den Statistiken liegt wieder der selbe Lastfall zu Grunde. Abb. 9 zeigt das Histogramm zum Öffnungswinkel. Die Standardabweichung beträgt hier lediglich  $\sigma = 0,21^\circ$ , angegeben als Kurbelwellenwinkel. Für den Schließwinkel in Abb. 10 ergibt sich eine Standardabweichung von  $\sigma = 0,41^\circ$ . Die größere Streubreite im Schließfall hat zur Ursache, dass mit fortschreitender Zeit des Regelungszyklus grundsätzlich die Regelgenauigkeiten ansteigen. Insgesamt belegen die Ergebnisse wieder die hohe Regelbarkeit des Gesamtsystems.

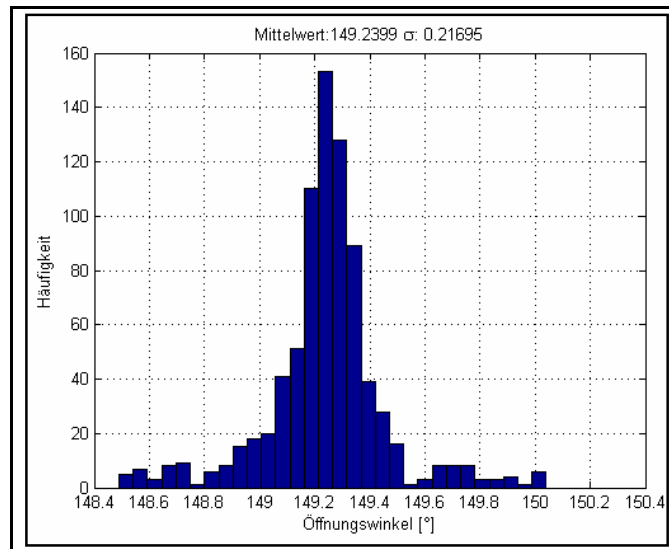


Abb. 9: Statistik zum Ventilöffnungswinkel  
*Opening crankshaft angle statistic*

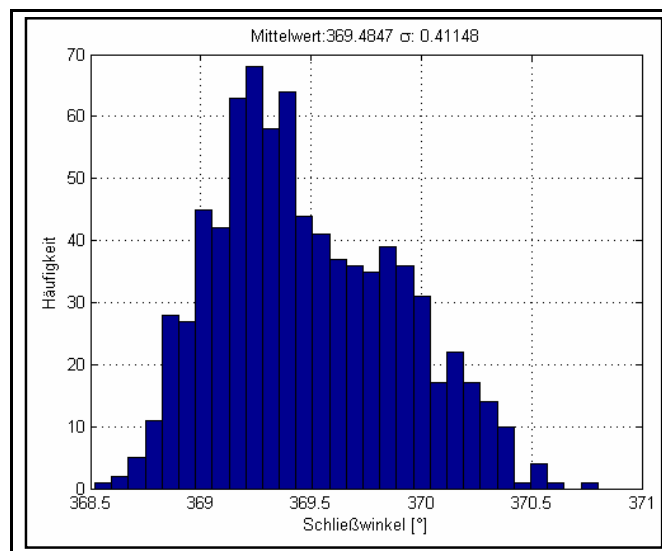


Abb. 10: Statistik zum Ventilschließwinkel  
*Close crankshaft angle statistic*

## 6.2 Leistungsmessung

Während die Steuerzeitengenauigkeit nur durch den mechanischen Aufbau des Aktors und die Regelgüte bestimmt ist, ist für die Leistungsbilanz der gesamte magnetische, elektrische und mechanische Aufbau ausschlaggebend. Hieraus folgt, dass für die unterschiedlichen Aktortypen, Diesel bzw. Otto und Einlass- bzw. Auslassventil, auch unterschiedliche Leistungskennlinien zugrunde liegen.

Exemplarisch werden in Abb. 11 und Abb. 12 die kalt gemessene Leistungsbilanz für die Aktoren zur Betätigung des Auslass- bzw. Einlassventils beim Ottomotor dargestellt. Variiert wurde hier die korrespondierende Drehzahl der Kurbelwelle sowie die Ventilerhebungskurven, welche dem Nockenwellenprofil der jeweiligen Kurbelwellendrehzahl angeglichen wurde.

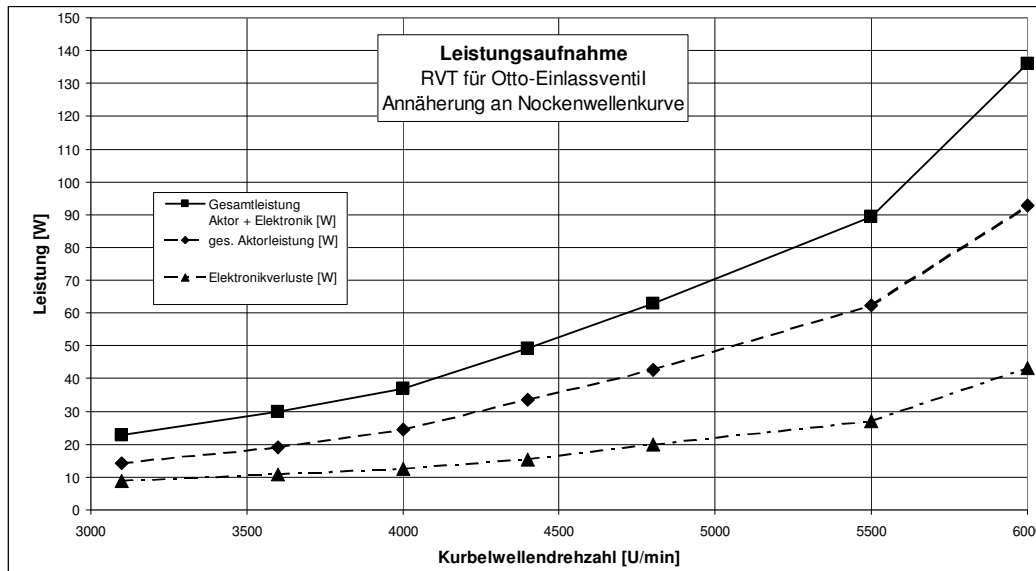


Abb. 11: Leistungsverbrauch für Otto-Einlass  
*Power consumption for otto-intake*

Dargestellt sind jeweils der Gesamtleistungsverbrauch des RVT ohne Gegenlast. Dieser kann unterteilt werden in die Elektronikverluste d.h. Schaltverluste und  $R_{dson}$ -Verluste sowie die Aktorverluste, welche sich zusammensetzen aus den Eisenverlusten, den mechanischen Reibverlusten in den Lagern und der Ventilfehrung und den Eisenverlusten d.h. Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste.

Abschätzungen für den Betrieb eines mit RVT-Aktoren voll bestückten 16V-Zylinderkopfs ergeben, dass für den unteren Drehzahlbereich repräsentative Drehzahl des Motors von  $n = 1000$  U/min eine Leistungsbedarf von  $P = 135$  W herrscht. Im angenommenen Lastfall von  $n = 6000$  U/min ohne zusätzliche Gegenlast muss ein Leistungsbedarf von  $P = 2,3$  kW bereit gestellt werden.

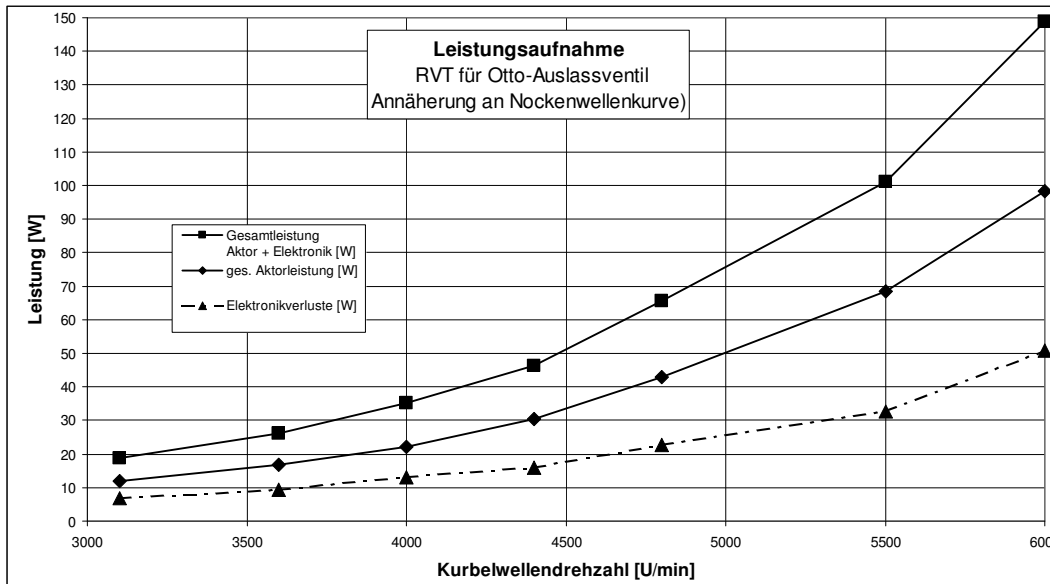


Abb. 12: Leistungsverbrauch für Otto-Auslass  
*Power consumption for otto-exhaust*

## 7 Formelzeichen und Indizes

$\Theta$	Durchflutung
$\Psi$	Verketteter magnetischer Fluss
$F$	Kraft
$I$	Strom
$m$	Masse
$n$	Drehzahl Kurbelwelle
$P$	Leistung
$r$	Reibkoeffizient
$R$	Widerstand
$s$	Ventilhub
$t$	Zeit
$U$	Spannung

v	Geschwindigkeit
w	Windungszahl
Cu	Kupfer
1	Magnetkreis 1
2	Magnetkreis 2
^	gefiltert bzw. gemittelt
*	Soll-

## 8 Literatur

- [1] STEIGER, W.; JELITTO, C.; SCHMERBECK, S.  
GCI und CCS – Zwei neue Brennverfahren von Volkswagen  
29. Internationales Wiener Motorensymposium  
Wien, 24.-25. April 2008
- [2] BLUMENRÖDER, K.; BUSCHMANN, G.; KAHRSTEDT, J.; SOMMER, A.;  
MAIWALD, O.  
Variable Ventiltriebe in PKW-Dieselmotoren – Potenziale, Grenzen und  
Realisierungsgrenzen  
27. Internationales Wiener Motorensymposium  
Wien, 27.-28. April 2006
- [3] KULZER, A.; FISCHER, W.; KARRELMAYER, R.; SAUER, C.; WINTRICH, T.;  
BENNINGER, K.  
Kontrollierte Selbstzündung beim Ottomotor – CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale  
MTZ 01/2009 Jahrgang 70
- [4] WURMS, R.; BUDACK, J.; BÖHME, R.; DORNHÖFER, A.; EISER, A.;  
HATZ, W.  
Der neue 2,0l TFSI mit Audi Valvelift System für den Audi A4 – die nächste  
Generation der Audi Turbo FSI Technologie  
17. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik  
Aachen 2008