

LSP Innovative Automotive Systems GmbH

**Weiterentwicklung des RPA-Antriebes (RPA-IV) im Hinblick auf  
energetische Effizienz und Industrialisierbarkeit  
(RPA – Rotatorischer Permanentmagnet Antrieb)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 22381 – 24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Thomas Leiber  
Dr.-Ing. Jochen Keller  
Dipl.-Ing. Thomas Heckner

Unterföhring, Mai 2008

Projektkennblatt  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>22381-24/0</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>315.000,00 €</b>
----	-------------------	---------	-------------	-------------	---------------------

**Antragstitel** **Weiterentwicklung einer Aktuatorik und der Regelung (RPA – Rotatorischer Permanentmagnet Antrieb) für die vollvariable Ventilsteuerung - Folgeprojekt**

**Stichworte** **Energie, Motor, Emission**

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>16 Monate</b>	<b>06.07.2006</b>	<b>01.11.2007</b>	<b>2</b>

Zwischenberichte	27.08.2007
------------------	------------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	LSP Innovative Automotive Systems GmbH Feringastr. 11	Tel 089/287 2468 – 0 Fax 089/287 2468 – 15
	85774 Unterföhring	Projektleitung Herr Dr. Thomas Leiber
		Bearbeiter Herr Dr.-Ing. Jochen Keller

**Kooperationspartner**

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das RPA-System (RPA – Rotatorischer Permanentmagnet Antrieb) erlaubt als vollvariable, elektromechanische Ventilsteuerung für Otto- und Dieselmotoren die Nutzung erheblicher, bisher ungenutzter Effizienzpotenziale des verbrennungsmotorischen Energiewandlungsprozesses und damit die Schonung der begrenzten fossilen Energiere Ressourcen.

Ziele des Projektes sind eine weitere Reduktion des systeminternen Energiebedarfs sowie die Sicherstellung der Dauerfestigkeit aller mechanischen Komponenten. Ergänzender Schwerpunkt der Arbeiten ist die Regelung des Systems mit einem kostengünstigen Sensor.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die Weiterentwicklung des RPA-Systems umfasst die Fortführung des mechanischen Aufbaus des Systems einschließlich der Erprobung der Dauerfestigkeit, die komplette Identifikation der Parameter des Simulationsmodells einschließlich der Verfeinerung der Modellstruktur mit dem Ziel, eine detailgetreue Abbildung der Realität zu erreichen, die Entwicklung der Ansteuerelektronik für den Aktuator insbesondere in Hinblick auf höhere Verlustleistungen und Stromspitzen, die Reglerentwicklung und -erprobung mit Schwerpunkt auf Robustheit, Steuerzeitengenauigkeit und befriedigendes Geräuschverhalten, die Realisierung der vollen Variabilität des Ventilhubes sowie die Entwicklung eines motor-tauglichen Positionssensors, welcher die erforderliche Auflösung für eine effektive Positionsregelung gewährleistet.

Dazu wurden die Arbeiten in insgesamt 7 Arbeitspakete gegliedert. Im AP1 **Detailkonstruktion und Musterbau RPA IV** und AP3 **Weiterentwicklung des RPA-IV und Erprobung** wurden die Aktuatorik an wesentlichen Stellen verbessert sowie drei weitere Baustufen der Aktuatorik konstruiert, gebaut und dauererprobt. Im AP2 **Entwicklung adaptiver Regler** wurde ein Regelverfahren zur selbstständigen Anpassung an geänderte Einflüsse implementiert. Parallel dazu wurde im AP4 **Sensorentwicklung** ein motor- und serientauglicher Drehwinkelsensor konzipiert und getestet. Im AP 5 **Systemidentifikation** wurde zur Verbesserung der Regelgüte und der energetischen Effizienz die komplette Regelstrecke vermessen und realitätsgetreuer modelliert. Im AP6 **Entwicklung thermisches Modell** wurde thermische Verlustsstrecke realitätsgetreuer modelliert und mit Messungen abgeglichen. Im AP7 **Entwicklung einer integrierten Elektronik** wurde eine verbesserte, jedoch nicht-integrierte Elektronik gebaut und getestet.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Rahmen des Projektes zur Entwicklung des RPA-Systems wurden folgende Aufgabenstellungen erfolgreich bearbeitet:

- die Konstruktion und Fertigung mehrerer mechanischer Baustufen des Systems, die Beseitigung von konstruktiven Schwachstellen sowie die Erprobung auf Dauerfestigkeit des Systems,
- die Weiterentwicklung des Systems hinsichtlich Industrialisierbarkeit
- die komplette Identifikation der Parameter des Simulationsmodells einschließlich der Verfeinerung der Modellstruktur mit dem Ziel, eine detailgetreue Abbildung der Realität zu erreichen,
- die Entwicklung der Ansteuerelektronik in Hinblick auf Reduzierung der Verlustleistung und der Stromspitzen,
- die Reglerentwicklung und -erprobung mit Schwerpunkt auf einer Anpassung an geänderte Umweltbedingungen, um jederzeit eine befriedigende Steuerzeitengenaugigkeit und Geräuschverhalten zu gewährleisten,
- die Entwicklung eines motortauglichen Drehwinkelsensors, der die erforderliche Auflösung für eine effektive Positionsregelung gewährleistet,
- die Entwicklung eines thermischen Modells und die Umsetzung eines Konzeptes zur Versorgung von jedem Aktuator mit Kühlwasser.

Als Ergebnis des Förderprojekts lässt sich hervorheben, dass wie schon im Vorgängerprojekt in sehr kurzer Zeit ein außerordentlich großer Projektfortschritt erzielt werden konnte. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde eine weitere Baustufe der Aktorik (RPA-IV) in einer Kleinserie von 20 Einheiten gebaut, mit der die im **Meilenstein 1** definierten Anforderungen erfüllt werden konnten. Diese wurden beim Kunden Volkswagen AG auf einem Einzylinder-Verbrennungsmotor hinsichtlich mechanischer Stabilität und thermodynamischer Effektivität positiv bewertet, so dass Anfang 2007 die Zusammenarbeit intensiviert wurde. Während der Testphase beim Kunden wurde eine weitere Baustufe (RPA-V) in 1-facher Ausführung mit höherer Kraftausbeute sowie einem motortauglichen Sensorprinzip konzipiert und gebaut. Auch dieser Aktuator wurde dem Volkswagen-Konzern vorgestellt und positiv bewertet.

Der Anspruch an die sechste Baustufe der Aktorik (RPA-VI) wurde weit höher als bislang gelegt, da diese Aktuatoren auch im 4-Zylinder-Otto- und -Dieselverbrennungsmotor eines Testfahrzeugs verbaut werden sollen. Ein wesentlicher Punkt bei der Konzeption der Aktorik war, dass es sich hierbei um eine Sonderlösung zur uneingeschränkten Darstellung aller Funktionalitäten handeln soll. Der Anspruch, bei der Konstruktion ein Serienkonzept zu berücksichtigen, wurde verlassen. Es konnten somit auch Materialien verwendet werden, die im Automotive-Bereich bislang noch keinen Serieneinsatz gefunden haben sowie Fertigungstechniken mit aussichtsreicher aber ungeprüfter Serienumsetzungsmöglichkeit. Diese Baustufe wurde in einer Kleinserie von 70 Einheiten produziert und wird derzeit auf dem Test-Zylinderkopf montiert (Stand 04/2008). Die im **Meilenstein 2** definierten Anforderungen sind im wesentlichen erfüllt, jedoch noch nicht von einem Automobilhersteller bzw. -zulieferer bewertet. Gespräche zur Lizenzvergabe an Automobilhersteller bzw. -zulieferer sind noch nicht abgeschlossen und hängen im beträchtlichen Maße auch von den Ergebnissen der thermodynamischen Untersuchungen beim Kunden ab.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das RPA-System wurde dem VW-Konzern während zahlreicher Besprechungstermine vorgestellt. Die Entwicklung wurde vom VW-Konzern begleitet und teilfinanziert. In die Entwicklung ist zudem ein namhafter Automobilzulieferer eingebunden. Das System wurde auf dem *27sten Internationalen Wiener Motorsymposium* durch den VW-Konzern vorgestellt. Weiterhin soll das System auf einem Messestand des *17. Aachener Kolloquium "Fahrzeug- und Motorentechnik"* präsentiert werden. Derzeit laufen Gespräche zur Kooperation mit weiteren deutschen Automobil-Forschungseinrichtungen.

## **Fazit**

Die Entwicklungsgeschwindigkeit ist deutlich höher als zu Beginn des Projektes angenommen, so dass innerhalb der Projektlaufzeit Kleinserien von 3 Baustufen gefertigt wurden. Die jüngste Baustufe wird den hohen Erwartungen seitens der Automobilindustrie hinsichtlich mechanischer Stabilität, Leistungsbedarf und dynamischer Belastbarkeit vollauf gerecht. Dank des Förderungskapitals ist es gelungen, das System für Kleinserien soweit zu entwickeln, dass es als „Tool“ für Thermodynamik-Untersuchungen vermarktet werden kann. Derzeit erstellt der Automobilzulieferer Valeo eine Akquise zur Vermarktung des Ventiltriebs. Ein Serieneinsatz ist ab 2015 denkbar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>PROJEKTDURCHFÜHRUNG UND -ERGEBNISSE .....</b>	<b>14</b>
2.1	AP 1: WEITERENTWICKLUNG DES MECHANISCHEN AUFBAUS DES RPA-SYSTEMS.....	14
2.1.1	Baustufe 1 (RPA-I) .....	14
2.1.2	Baustufe 2 (RPA-II) .....	16
2.1.3	Baustufe 3 (RPA-III und RPA-III mod).....	17
2.1.4	Baustufe 4 (RPA-IV).....	18
2.1.5	Baustufe 5 (RPA-V).....	21
2.1.5.1	Ökonomische Bilanzierung .....	25
2.1.6	Baustufe 6 (RPA-VI).....	26
2.1.6.1	Gehäuse mit integriertem Kühlkreislauf .....	27
2.1.6.2	Magnetkreis .....	28
2.1.6.3	Spulentechnik .....	29
2.1.6.4	Integrierter Rotoranschlag.....	30
2.1.6.5	Sensorintegration.....	31
2.2	AP 2: ENTWICKLUNG EINES ADAPTIVEN REGLERS .....	33
2.2.1	Auswahl eines geeigneten Verfahrens.....	33
2.2.2	Implementierung des adaptiven Reglers in dSpace .....	33
2.2.3	Erprobung des realen Systems mit Adaption .....	34
2.3	AP3: WEITERENTWICKLUNG DER AKTORIK UND ERPROBUNG .....	35
2.3.1	Teil 1: Ventilankopplung.....	35
2.3.2	Teil 2: Industrialisierbarkeit der Aktorik .....	41
2.3.3	Teil 3: Detaillierte Erprobung.....	42
2.3.3.1	Dauerlaufversuche.....	42
2.3.3.2	Nachweis der Regelbarkeit des Systems.....	44
2.4	AP4: SENSORENTWICKLUNG .....	47
2.4.1	Messung des magnetischen Feldes - Halleffekt.....	48
2.4.1.1	Valeo-Prinzip .....	48
2.4.1.2	Halleffekt – Sentron-Prinzip .....	49
2.4.1.3	Halleffekt – Timken-Prinzip .....	51
2.4.2	Messung des elektrostatischen Feldes – Netzer Prinzip.....	52
2.4.3	Messung der Lichtintensität – Elektrooptische Verfahren .....	54
2.4.4	Messung des elektrischen Widerstands – Potentiometer.....	54
2.4.5	Bewertung der verschiedenen Messprinzipien.....	54
2.4.6	Statistische Untersuchungen mit der verwendeten Sensorvariante ....	54
2.5	AP 5: SYSTEMIDENTIFIKATION.....	59
2.5.1	Verminderung der Wirbelstromverluste .....	59
2.5.2	Identifikation der Strecke.....	59
2.5.3	Erhöhung der Güte der Lageregelung.....	61
2.5.4	Vergleich zwischen Simulation und Messung .....	61
2.5.4.1	Vergleich der dissipierten Leistungen im Aktuator .....	61
2.5.4.2	Vergleich der simulierten und gemessenen Kraftverläufe .....	63
2.5.4.3	Gemessene Leistungsaufnahme .....	66
2.6	AP6: ENTWICKLUNG THERMISCHES MODELL.....	67
2.6.1	Thermische Massen.....	68
2.6.2	Thermische Leitwerte.....	69
2.6.3	Vergleich der thermischen Simulation mit Messungen.....	70
2.6.4	Entwicklung eines Kühlkonzepts.....	71
2.7	AP7: ENTWICKLUNG ANSTEUERELEKTRONIK .....	72

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ZIELERREICHUNGSGRAD RPA-VI GEGENÜBER RPA-IV (1).....	9
ABBILDUNG 2: ZIELERREICHUNGSGRAD RPA-VI GEGENÜBER RPA-IV (2).....	9
ABBILDUNG 3: POTENZIAL ZUR REDUZIERUNG DES KRAFTSTOFFVERBRAUCHES MIT DEM RPA-SYSTEM.....	11
ABBILDUNG 4: VERGLEICH VERSCHIEDENER TECHNOLOGIEN FÜR DEN NOCKENWELLENLOSEN VENTILTRIEB (1) 12	
ABBILDUNG 5: VERGLEICH VERSCHIEDENER TECHNOLOGIEN FÜR DEN NOCKENWELLENLOSEN VENTILTRIEB (2) 13	
ABBILDUNG 6: GESAMTAUFBAU RPA-I .....	15
ABBILDUNG 7: GESAMTAUFBAU RPA-II MIT INTEGRIERTEM SENSOR UND NEUER VENTILANKOPPLUNG .....	16
ABBILDUNG 8: EXPLOSIONSDARSTELLUNG DES RPA-III MOD .....	17
ABBILDUNG 9: STUDIE RPA-IV AUF ZYLINDERKOPF .....	19
ABBILDUNG 10: EXPLOSIONSDARSTELLUNG DES SERIENKONZEPTE DER ROTORKONSTRUKTION .....	20
ABBILDUNG 11: RPA-VI (CAD-DESIGN UND PROTOTYP) .....	20
ABBILDUNG 12: RPA-VI (EXPLOSIONSDARSTELLUNG) .....	21
ABBILDUNG 13: SCHNITTDARSTELLUNG RPA-V (LSP-PATENTSCHRIFT ENTNOMMEN).....	22
ABBILDUNG 14: RPA-V BIEGESTATORKONZEPT.....	23
ABBILDUNG 15: RPA-V STANZGITTERKONZEPT .....	23
ABBILDUNG 16: RPA-V EXPLOSIONSDARSTELLUNG .....	24
ABBILDUNG 16: ÖKONOMISCHE BILANZIERUNG ANHAND RPA-V .....	25
ABBILDUNG 17: RPA-VI EXPLOSIONSDARSTELLUNG AM BEISPIEL DES AKTUATORS FÜR DEN OTTOMOTOR .....	27
ABBILDUNG 18: RPA-VI ALUMINIUMGUSSROHLING UND FERTIGBEARBEITETES GEHÄUSE .....	28
ABBILDUNG 19: RPA-VI MAGNETKREIS (BEISPIEL: AKTUATOR FÜR DAS AUSLASSVENTIL EINES OTTOMOTORS) 29	
ABBILDUNG 20: RPA-VI FORMSPULENTECHNIK.....	30
ABBILDUNG 21: RPA-VI INTEGRIERTER ROTORANSCHLAG.....	31
ABBILDUNG 22: RPA-VI PLATINE UND HALLSENSORELEMENT .....	32
ABBILDUNG 23: RPA-VI INTEGRIERTER SENSOR.....	32
ABBILDUNG 24: AKTUATOR-BEDIENOBERFLÄCHE MIT INTEGRIERTEM ADAPTIVEN REGELALGORITHMUS .....	34
ABBILDUNG 25: ANFORDERUNGSLISTE AN VENTILANKOPPLUNG (F = FORDERUNG, W = WUNSCH) .....	35
ABBILDUNG 26: ERSTE UMSETZUNG DES BIEGESCHAFTKONZEPTE FÜR DIE VENTILANKOPPLUNG.....	36
ABBILDUNG 27: KONZEPT A FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG (FÜR SERIE).....	37
ABBILDUNG 28: KONZEPT B FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG (FÜR SERIE).....	38
ABBILDUNG 29: KONZEPT C FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG (FÜR SERIE).....	38
ABBILDUNG 30: KONZEPT D FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG (FÜR SERIE).....	39
ABBILDUNG 31: KONZEPT E FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG (FÜR SERIE) .....	39
ABBILDUNG 32: BEWERTUNG DER KONZEPTE FÜR VENTILDREHEINRICHTUNG.....	40
ABBILDUNG 33: TRW-VENTIL FÜR RPA-VI .....	41
ABBILDUNG 34: DAUERLAUFVERSUCH UNTER REALEN BEDINGUNGEN.....	42
ABBILDUNG 35: ERGEBNISSE DES DAUERLAUFS (A) .....	43
ABBILDUNG 36: ERGEBNISSE DES DAUERLAUFS (B) .....	44
ABBILDUNG 37: ZYKLENVERGLEICH RPA-V .....	45
ABBILDUNG 38: ZYKLENVERGLEICH RPA-VI .....	46
ABBILDUNG 39: VERSUCHSAUFBAU RPA-IV MIT HALLCHIP NACH VALEO-PRINZIP.....	49
ABBILDUNG 40: FLUSSDICHTE INNERHALB DES TARGETS (VALEO-PRINZIP).....	49
ABBILDUNG 41: SENTRON-PRINZIP: SENSORPRINZIP UND AUSGANGSIGNAL.....	50
ABBILDUNG 42: SENTRON-PRINZIP: AUFBAU ZUR EVALUIERUNG DES MESSPRINZIPS .....	50
ABBILDUNG 43: TIMKEN-PRINZIP: AUFBAU ZUR EVALUIERUNG DES MESSPRINZIPS .....	51
ABBILDUNG 44: TIMKEN-PRINZIP: KONZEPTION FÜR SERIEEINSATZ .....	52
ABBILDUNG 45: SENSOR NACH NETZER-PRINZIP (BILDQUELLE: HOMEPAGE DES HERSTELLERS).....	53
ABBILDUNG 46: SENSOR NACH NETZER-PRINZIP (BILDQUELLE: HOMEPAGE DES HERSTELLERS).....	53
ABBILDUNG 47: BEWERTUNGSMATRIX ZUR AUSWAHL DES SENSORPRINZIPS .....	55
ABBILDUNG 48: STATISCHE VERMESSUNG: STREUUNG DER SENSOREN IM SM-Co-TARGET.....	56

ABBILDUNG 49: STATISCHE VERMESSUNG: TEMPERATURVERHALTEN OHNE FELD ( $B=0T$ ).....	57
ABBILDUNG 50: STATISCHE VERMESSUNG: UNTERSUCHUNGEN ZUM REGELVERHALTEN.....	58
ABBILDUNG 51: STATISCHE VERMESSUNG: VERGLEICH HALLSENSOR ZU WIRBELSTROMSENSOR .....	58
ABBILDUNG 52: AUSSCHWINGVERSUCH ZUR BESTIMMUNG DER SYSTEMKOEFFIZIENTEN .....	60
ABBILDUNG 53: SIMULIERTES VENTILTRIEBVERHALTEN .....	62
ABBILDUNG 54: GEMESSENES VENTILTRIEBVERHALTEN .....	63
ABBILDUNG 55: RPA-V: VERGLEICH SIMULATION – MESSUNG DER VENTILKRAFT (SIMULATION) .....	64
ABBILDUNG 56: RPA-V: VERGLEICH SIMULATION – MESSUNG DER SÄTTIGUNG (SIMULATION) .....	64
ABBILDUNG 57: RPA-VI: VERGLEICH SIMULATION – MESSUNG DER VENTILKRAFT (MESSUNG) .....	65
ABBILDUNG 58: RPA-VI: VERGLEICH SIMULATION – MESSUNG DER SÄTTIGUNG (MESSUNG).....	65
ABBILDUNG 59: GEMESSENE LEISTUNGS-AUFNAHME RPA-VI (OTTO-AUSLASS).....	66
ABBILDUNG 60: GEMESSENE LEISTUNGS-AUFNAHME RPA-VI (DIESEL-EINLASS) .....	67
ABBILDUNG 61: AUFBAU DES THERMISCHEN MODELLS .....	69
ABBILDUNG 62: DARSTELLUNG DER LEITWERTE AM BEISPIEL DES AUßENSTATORS .....	70
ABBILDUNG 63: VERGLEICH THERMISCHE SIMULATION MIT MESSUNG .....	71
ABBILDUNG 64: GEHÄUSE DES RPA-VI MIT INTEGRIERTEM WASSERMANTEL .....	72
ABBILDUNG 65: BLOCKSCHALT-BILD DIGITALE ANSTEUER- UND LEISTUNGSELEKTRONIK.....	74
ABBILDUNG 66: DARSTELLUNG DER VERSCHIEDENEN MÖGLICHKEITEN ZUR SPANNUNGSKREISGENERIERUNG ...	75

## Zusammenfassung und Ausblick

Als Ergebnis des Förderprojekts lässt sich hervorheben, dass wie schon im Vorgängerprojekt in sehr kurzer Zeit ein außerordentlich großer Projektfortschritt erzielt werden konnte. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde eine weitere Baustufe der Aktorik (RPA-IV) mit einer Kleinserie von 20 Einheiten gebaut. Diese wurden beim Kunden Volkswagen AG auf einem Einzylinder-Verbrennungsmotor hinsichtlich mechanischer Stabilität und thermodynamischer Effektivität positiv bewertet, so dass Anfang 2007 eine weitere Beauftragung für Aktuatoren erfolgte. Während der Testphase beim Kunden wurde eine weitere Baustufe (RPA-V) in 1-facher Ausführung mit höherer Kraфтаusbeute sowie einem motortauglichen Drehwinkelsensorprinzip konzipiert und gebaut. Diese Baustufe wurde hinsichtlich Industrialisierbarkeit aller Komponenten optimiert. Auch dieser Aktuator wurde dem Volkswagen-Konzern vorgestellt und positiv bewertet.

Der Anspruch an die sechste Baustufe der Aktorik (RPA-VI) wurde weit höher als bislang gelegt, da diese Aktuatoren auch im 4-Zylinder-Otto- und -dieselvebrennungsmotor eines Testfahrzeugs verbaut werden sollen. Ein wesentlicher Punkt bei der Konzeption der Aktorik war, dass es sich hierbei um eine Sonderlösung zur uneingeschränkten Darstellung jeglicher Funktionalität handeln soll. Der Anspruch, bei der Konstruktion ein Serienkonzept zu berücksichtigen, wurde verlassen. Es durften somit auch automotive-ungebräuchliche Materialien sowie Fertigungstechniken ohne abgesicherte Großserienumsetzungsmöglichkeiten verwendet werden. Diese Baustufe wurde in einer Kleinserie von 70 Einheiten produziert und wird derzeit auf dem Test-Zylinderkopf montiert (Stand 04/2008).

Als weitere Projektziele wurden im Antrag folgende Tätigkeiten definiert:

- Die Entwicklung eines adaptiven Reglers
- Die Modellidentifikation des mechanischen und elektromagnetischen Systems
- Die Entwicklung eines thermischen Modells und eines Kühlkonzeptes
- Die Entwicklung der ersten Baustufe einer integrierten Aktuator-Elektronik-Einheit

Ein adaptiver Regelalgorithmus wurde in die vorhandene Bedienoberfläche integriert, mit dessen Hilfe der Aufwand zur Einstellung der Regelparameter verringert werden konnte.

Die Identifikation des elektromagnetischen und mechanischen Systems führte zu einer Verbesserung der Regelung hinsichtlich Steuerzeitengenauigkeit und Leistungsbedarf. Während bei den RPA-Modellen bis zur Baustufe V weitestgehende Übereinstimmung erzielt wurde, ergaben sich bei dem statischen Kraftkennfeld der Baustufe VI Abweichungen zwischen Simulation und Messung. Diese lassen sich zurückführen auf die Verwendung eines bislang unbekanntes Statormaterials.

Um den Einsatz der Aktuatoren auch bei höchstem Energieverbrauch nicht aufgrund der Temperaturgrenzen der verwendeten Materialein einschränken zu müssen, wurde ein thermisches Modell entwickelt und mit Messungen abgeglichen.

Die Entwicklung und Fertigung einer integrierten Elektronik wurde zurückgestellt zugunsten einer externen, dafür digitalen Leistungselektronik.

Abbildung 1 und Abbildung 2 illustriert den Zielerreichungsgrad der Baustufen RPA-IV, geplant vor Projektbeginn und der letzten und aktuellen Baustufe RPA-VI.

Nur in den Punkten, welche die Elektronik und die Verknüpfung zwischen Elektronik und Aktuatorik betreffen, ist die Erwartung nicht vollstens erfüllt.

Um die Vermarktungssituation zu verbessern ist geplant, ein Komplettsystem bestehend aus Aktuatorik und Zylinderkopf, integrierter Elektronik und Regelungssoftware anzubieten, um Kunden ein Modul zur Verfügung zu stellen, mit dessen Hilfe eigene thermodynamische Untersuchungen zur Optimierung des Verbrennungs- und Hybridmotors durchgeführt werden können. So soll das System auf einem LSP-eigenen Messestand des *17. Aachener Kolloquium "Fahrzeug- und Motorentechnik"* präsentiert werden. Derzeit laufen Gespräche zur Kooperation mit weiteren deutschen Automobil-Forschungseinrichtungen.

Ziel soll sein, das bislang ungenutzte Potential, welches durch eine variable Luftführung im Verbrennungsmotor entsteht, zu nutzen, um die begrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen an fossilen Brennstoffen zu schonen und so nachhaltig die Umwelt zu fördern.

	Anforderung erfüllt
	Anforderung z.T. erfüllt, Konzept zur Lösung vorgelegt
	Anforderung nicht erfüllt, kritische Schwachstelle

### Zielerreichungsgrad RPA-VI im Vergleich zum RPA-IV

	RPA-IV (Oktober 2006)	Bewertung RPA-VI (März 2008)
<b>Funktionalität</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Komplette Erfüllung der Spezifikation zu erwarten	Komplette Erfüllung der Spezifikation <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Leistungsbedarf</b>	<span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Leistungsbedarf noch hoch	Leistungsbedarf sehr gering <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Packaging</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Sehr attraktives Packaging zu erwarten (Reduzierung Bauhöhe)	Packaging aufgrund integrierter Kühlung höher als RPA-IV, jedoch zufriedenstellend <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Mechanik</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Aktuatoraufbau unkritisch, verbleibende Schwachstelle: Ventilkopplung	Alle mechanischen Schwachstellen behoben <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Elektronikkonzept</b>	<span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Konzept für Banklösung und Integration Aktuatorik ausgearbeitet	Siehe RPA-IV <span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Montierbarkeit</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Montagekonzept ausgearbeitet	Montagewerkzeuge gefertigt <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Kosten</b>	<span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> RPA IV ermöglicht signifikante Kostenreduzierungen bei der Elektronik und Mechanik (verb. Wirkungsgrad, höhere Leistungsdichte), Kosten jedoch nach wie vor eine Herausforderung	Kosten hoch durch Verwendung von Automotiveungebräuchlichen Materialien sowie Fertigungstechniken mit aussichtsreicher aber ungeprüfter Serienumsetzungsmöglichkeit (Alternative: RPA-V) <span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Potenzial</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> System ist noch nicht optimiert (viele Ideen für Systemweiterentwicklung vorhanden)	System ist noch nicht optimiert (viele Ideen für Systemweiterentwicklung vorhanden) <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>

Abbildung 1: Zielerreichungsgrad RPA-VI gegenüber RPA-IV (1)

	Anforderung erfüllt
	Anforderung z.T. erfüllt, Konzept zur Lösung vorgelegt
	Anforderung nicht erfüllt, kritische Schwachstelle

### Zielerreichungsgrad RPA-VI im Vergleich zum RPA-IV

	RPA-IV (Oktober 2006)	Bewertung RPA-VI (März 2008)
<b>Anwendungsmöglichkeiten</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Volle Flexibilität für Applikation	Volle Flexibilität für Applikation <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Applikationsaufwand</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> <ul style="list-style-type: none"> <li>Einfache Applikation durch adaptive Regelung</li> <li>Verbesserung der Regelbarkeit durch reduzierte Induktivität</li> </ul>	Siehe RPA-IV <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Ausfallsicherheit</b>	<span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Elektronikkonzept ausgearbeitet	Siehe RPA-IV <span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Sensorik</b>	<span style="background-color: #FFA500; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> <ul style="list-style-type: none"> <li>Konzept für im Aktuator integrierten Sensor (Winkelsensor) ausgearbeitet</li> <li>Prinzipmuster soll Einsatzfähigkeit der Winkelsensorik zeigen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Im Aktuator integrierte Drehwinkelsensoren verwendet <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span></li> </ul>
<b>Patentsituation</b>	<span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Patentschutz aussichtsreich	Patentschutz für Bauprinzip des Aktuators sowie einzelner Komponenten gewährt <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
<b>Entwicklungs-kompetenz LSP</b>	<b>Aufbau umfassende Kompetenz</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Aufbau Kompetenz im Musterbau durch eigene Werkstatt</li> <li>+ Aufbau Serienkompetenz durch Einstellung erfahrener Mitarbeiter</li> <li>+ Aufbau Elektronikkompetenz</li> </ul>	<b>Aufbau umfassende Kompetenz</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Aufbau Kompetenz im Musterbau durch eigene Werkstatt gelungen <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span></li> <li>+ Aufbau Serienkompetenz durch Einstellung erfahrener Mitarbeiter gelungen <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span></li> <li>+ Aufbau Elektronikkompetenz gelungen <span style="background-color: #00FF00; width: 20px; height: 15px; display: inline-block;"></span></li> </ul>

Abbildung 2: Zielerreichungsgrad RPA-VI gegenüber RPA-IV (2)

# 1 Einleitung

Die Forderung an neue Antriebsaggregate nach maximalem Wirkungsgrad bei minimaler Umweltbelastung („ökologischer Imperativ“) stellt einen zentralen Punkt in der Konzeption zukünftiger Motoren dar. Insbesondere steht die Motorenentwicklung im Zeichen der weltweiten CO<sub>2</sub>-Diskussion. Der Gesetzgeber setzt durch schärfere Emissionsgrenzwerte zusätzliche Randbedingungen.

Die technische Antwort auf diese Anforderungen ist der verstärkte Einzug von Variabilitäten –von hochflexiblen Dieseleinspritzsystemen und verschiedenen Formen der Getriebeautomatisierung bis hin zum variablen Ventiltrieb.

Variable Ventiltriebe, d. h. mit variabler Öffnungszeit, variablem Ventilhub und/oder variabler Spreizung, reduzieren durch die Beeinflussung der Ladungswechselarbeit, der Gemischaufbereitung und der Verbrennung den Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren. Durch die Variation der Spreizung auf der Ein- und/oder Auslassseite kann durch eine interne Abgasrückführung der Restgasanteil im Teillastbereich gesteuert werden und durch Entdrosselung und verbesserter Gemischaufbereitung der Wirkungsgrad verbessert werden.

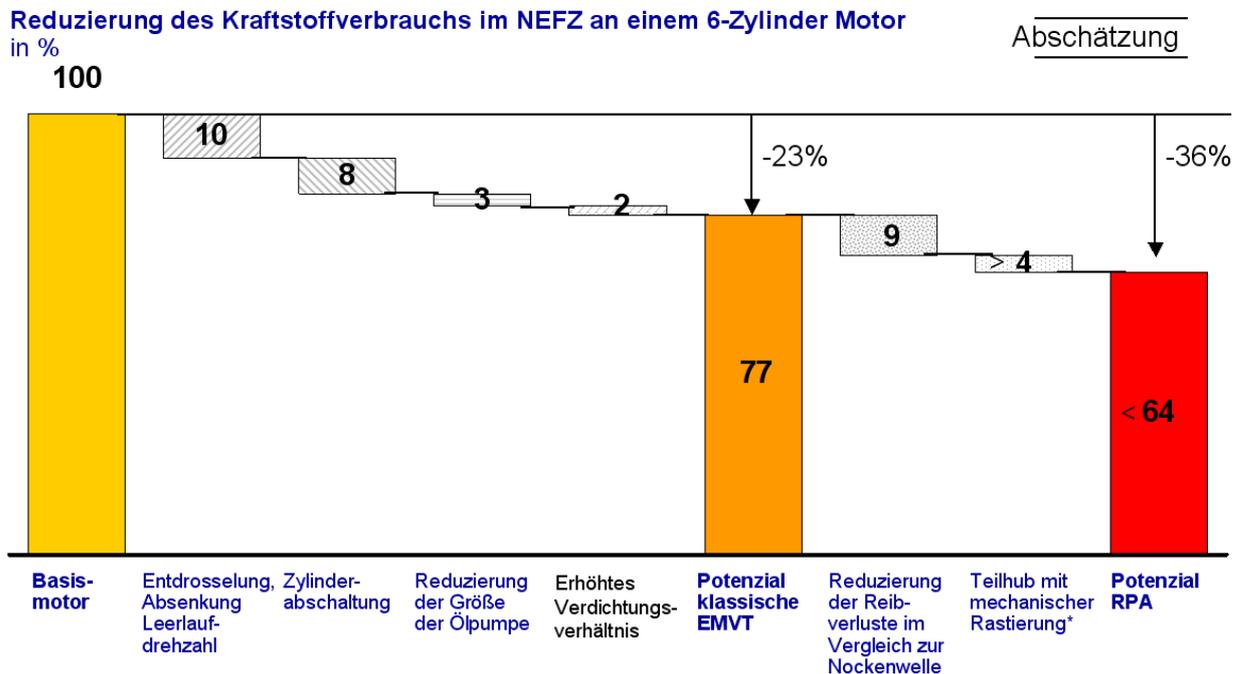
Ein Erfolg versprechender Ansatz zur individuellen Steuerung der Ventile ist das RPA-System, welches Gegenstand des Projektes ist und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wird. Motivation zur Konzipierung dieser neuartigen Aktuatorik sind die veränderten Rahmenbedingungen und Forderungen aus der Automobilindustrie:

- Applikation für turboaufgeladene Ottomotoren sowie Dieselmotoren
- Vollständige Variabilität des Ventilhubes
- Höhere Dynamik
- Weitere Reduzierung des Energiebedarfs in verbrauchsrelevanten Betriebspunkten
- Kostenreduzierung der Mechanik
- Öffnungsdrücke über 12bar darstellbar

Für den Betrieb einer kompletten 4-Zylinder-4-Ventil-Verbrennungsmotors mit dem RPA-System wurde der Leistungsbedarf in einem motorrelevanten, mittleren Betriebspunkt zu 38W abgeschätzt. Dies entspricht einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von ca. 9% im Vergleich zum Nockenwellenbetrieb und eine Verbrauchersparnis von 0,7l/100km, wenn man den Verbrauch eines klassischen Mittelklasse-Pkws ansetzt.

Der Nutzen des Systems ist aus heutiger Sicht vielversprechend, muss jedoch noch quantifiziert werden. Insbesondere die Nutzenermittlung des RPA-Systems wird noch mehrere Jahre erfordern, da die thermodynamischen Untersuchungen sehr aufwän-

dig sind und erst nach Abschluss des Förderprojektes beginnen können. Insgesamt ergibt sich für das RPA-System ein Potenzial zur Reduzierung des Verbrauchs um bis zu 36%.



**Abbildung 3: Potenzial zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches mit dem RPA-System**

Neben den beachtlichen Potenzialen zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung zeigen gemessene Emissionsergebnisse, dass es sich bei der vollvariablen Ventilsteuerung ebenfalls um ein Niedrigemissionskonzept handelt. Diese Potenziale wurden bereits im Förderantrag zum Vorgängerprojekt (Az: 19805/01) beschrieben. Diese sind auf das RPA-System übertragbar und es wird erwartet, dieses aufgrund der vollen Variabilität in den Ventilhuben weiter zu verbessern.

Historisch gesehen entstand das RPA-System aus dem IVC-System, welches in seiner zweiten Generation ebenfalls von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 19805/01) gefördert wurde. Innerhalb dieses Projektes wurde ebenso ein Aktuatorik für die vollvariable Ventilsteuerung von Verbrennungsmotoren erfolgreich entwickelt. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien ‚Klassischer Feder-Masse Schwinger EMVT‘, IVC und RPA sind in den Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

Beim Motornutzen ergibt sich für das RPA-System aufgrund der vollen Variabilität des Ventilhubes ein hohes Potential zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen und somit ein enormer Vorteil gegenüber anderen Technologien. Die RPA-Technologie ist aufgrund seines Drehkonzeptes universell einsetzbar für Diesel- und Ottomotoren. Der Leistungsbedarf ist besonders für kleine Drehzahlen und Hübe niedrig. Für hohe Lasten und Drehzahlen steigt jedoch der Leistungsbedarf an. Ab-

schätzungen der Kostenaufwendungen für die Serie zeigen, dass die mechanischen Komponenten vergleichsweise günstig ausfallen, höhere Kosten werden allerdings für die Ansteuer- und Leistungselektronik erwartet.

## Vergleich RPA mit alternativen Technologien für den nockenwellenlosen Ventiltrieb

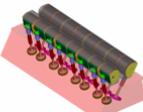
	“Klassischer” Feder-Masse-Schwinger (EMVT)	Hebelaktuator (IVC)	RPA
	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenztes Potenzial zur Kraftstoffreduzierung (keine Hubvariation, hohe Reibverluste im Leerlaufbetrieb)</li> <li>• Begrenzte Motorleistung (Aktuatordynamik nicht ausreichend)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringerer Kraftstoffverbrauch als EMVT (kleiner Reibverluste, erweiterte Variabilität- 1mm, Vollhub)</li> <li>• Akzeptable Ventilhubdynamik (Flugzeit: 2,5 ms)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohes Potenzial zur Reduzierung Kraftstoffverbrauch + Emissionen durch volle Variabilität, hohe Steuerzeitgenauigkeit</li> <li>• Steigerung der Motorleistung (Flugzeit &lt; 2 ms)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Packaging nicht optimal aufgrund hoher Bauhöhe (Fußgängerschutzlimitierung)</li> <li>• Akzeptables Gewicht (1kg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Günstiges Packaging (niedrigere Bauhöhe als EMVT)</li> <li>• Gewicht zu hoch (1,5 kg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr attraktives Packaging (reduzierte Bauhöhe)</li> <li>• Akzeptables Gewicht (1kg)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz begrenzt auf Otto-Motoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz begrenzt auf Otto-Motoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Universeller Einsatz (Otto, Diesel, aufgeladene Motoren)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akzeptabler Leistungsbedarf für Einlassventil</li> <li>• 12V (für Einlassaktuator - Hybridlösung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr niedriger Leistungsbedarf</li> <li>• 12V (für Einlass- und Auslassaktuator)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedriger elektrischer Leistungsbedarf für kleine Drehzahlen, Teillast; Elektrischer Leistungsbedarf ansteigend mit Drehzahl, Last</li> <li>• 12V für Einlassaktuator denkbar</li> </ul>

Abbildung 4: Vergleich verschiedener Technologien für den nockenwellenlosen Ventiltrieb (1)

## Vergleich RPA mit alternativen Technologien für den nockenwellenlosen Ventiltrieb

	“Klassischer” Feder-Masse-Schwinger (EMVT)	Hebelaktuator (IVC)	RPA
<b>Kosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akzeptable Kosten für Einlassaktuator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten vergleichbar mit EMVT (höhere Kosten für Aktuator, niedrigere Kosten für Elektronik aufgrund geringerer Leistung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedrige Kosten für Mechanik (&lt;10€/ Ventil)</li> <li>• Höhere Elektronikkosten (24V, Hochstromanwendung)</li> </ul>
<b>Systemrisiken</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regelung sehr aufwändig</li> <li>• Bei Ausfall Spule oder Sensor =&gt; Gefahr Motorschaden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleichbar mit EMVT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redundanz bei Spulenausfall, voller Betrieb mit eingeschränkter Dynamik möglich</li> <li>• Ventil bleibt geschlossen im stromlosen Zustand</li> </ul>
<b>Reifegrad des Systems</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• System marktreif (Serieneinführung für 2008 angekündigt)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reifegrad des Systems geringer als EMVT (in Entwicklung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• System bis zum B-Muster ausgereift</li> </ul>
<b>Markt-penetration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzte Marktchancen durch begrenzte Potenziale (Icebreaker für Technologie!)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkt (vergleichbar mit EMVT)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzial für hohen Marktanteil (Diesel, Otto, aufgeladene Motoren)</li> </ul>

Abbildung 5: Vergleich verschiedener Technologien für den nockenwellenlosen Ventiltrieb (2)

In Bezug auf die Bewertungskriterien Regelbarkeit, Geräusch, Variabilität, Dynamik, Gewicht und Applikationsmöglichkeiten ist das RPA-System deutlich im Vorteil und somit gut geeignet für Dieselmotoren und turboaufgeladene Ottomotoren. Das IVC-System eignet sich insbesondere für Fahrzeuge, die ein 14V-Bordnetz voraussetzen sowie für nicht aufgeladene Ottomotoren. Jedoch bietet der RPA deutlich mehr Potenzial sowohl in Hinblick auf Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs in verbrauchsrelevanten Betriebspunkten sowie in Hinblick auf die Verbesserung der motorischen Eigenschaften.

## 2 Projektdurchführung und -ergebnisse

Zur Umsetzung der Anforderung an den Ventiltrieb in eine mechatronische Baueinheit wurden im Projektantrag verschiedene Arbeitspakete definiert, welche im folgenden hinsichtlich ihrer Erfüllung diskutiert werden sollen. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen wurden in den folgenden Kapiteln einige Arbeitspakete zusammengefasst.

### 2.1 AP 1: Weiterentwicklung des mechanischen Aufbaus des RPA-Systems

Ausgehend von der Baustufe 3 des Ventiltrieb-Aktuators, dessen Entwicklung ebenfalls von der DBU gefördert wurde, wurden zwei weitere Baustufen des Aktuators entwickelt und gebaut.

Um das Verständnis zu fördern, soll der Entwicklungsstand sowie die Funktionsweise des Aktuators bis zur dritten Baustufe erläutert werden.

#### 2.1.1 Baustufe 1 (RPA-I)

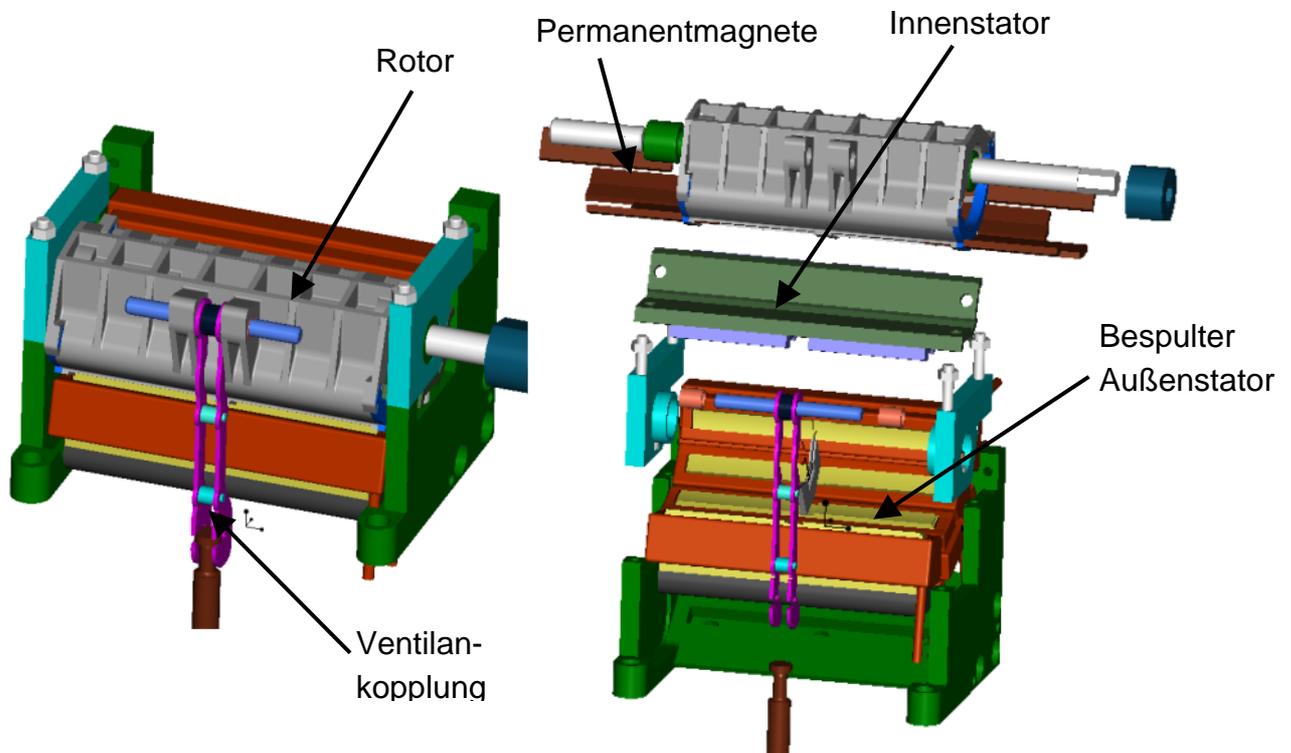
Schon bei den ersten Konzepten zum RPA wurde eine mögliche Applikation des Aktuators auf den Zylinderkopf eines Verbrennungsmotors berücksichtigt. Eine 3D-Ansicht ist in Abbildung 6 farbig dargestellt. Die Explosionsdarstellung in der rechten Bildhälfte zeigt die wesentlichen Komponenten des Aktuators.

Der funktionale Aufbau des Aktuators besteht aus folgenden Komponenten. Der Rotor, grau dargestellt, befindet sich mit kleinem Spaltmaß zwischen Außen- und Innenstator (gelb bzw. hellblau) und trägt am Umfang mehrere Permanentmagnete. Hierbei ist eine sichere Befestigung der Magnete wesentlich, da auf diese hohe Kräfte einwirken, welchen der Rotor auch bei hoher Dynamik standhalten muss. Zur Lagerung des Rotors dient eine Welle, welche formschlüssig mit dem Rotor verbunden ist.

Bei Bestromung der Spulen wird am Außenstator ein Magnetfeld erzeugt, welches die Permanentmagnete und den Innenstator durchdringt. Dies bewirkt auf die Magnete im Rotor eine Kraft: der Rotor versucht durch Drehung um die Welle auf das Magnetfeld zu reagieren. Durch eine schnelle Regelung des Stroms in den Spulen lässt sich die Bewegung des Rotors exakt steuern.

Kupfer- und Eisenverluste im Aktuator bewirken eine Erwärmung des Aktuators. Einer möglichst guten Abfuhr der erzeugten Verlustwärme wird eine hohe Bedeutung beigemessen. Eine solide Befestigung des Aktuatorgehäuses mittels mehrerer Schrauben sorgt für einen guten Wärmeübergang zum Zylinderkopf.

Die Ventilkopplung, magenta dargestellt, hat den Zweck, die Drehbewegung des Rotors in eine längsgerichtete Bewegung des Ventils umzusetzen. Die Ankopplung muss dabei so konstruiert sein, dass sowohl Öffnen als auch Schließen des Ventils möglichst spielfrei vonstatten geht. Eine weitere Forderung seitens der Automobilhersteller ist die Drehbarkeit des Ventils um seine eigene Achse.



Hauptabmessungen: Breite: 68,5 mm, Länge: 88 mm, Höhe: 60 mm

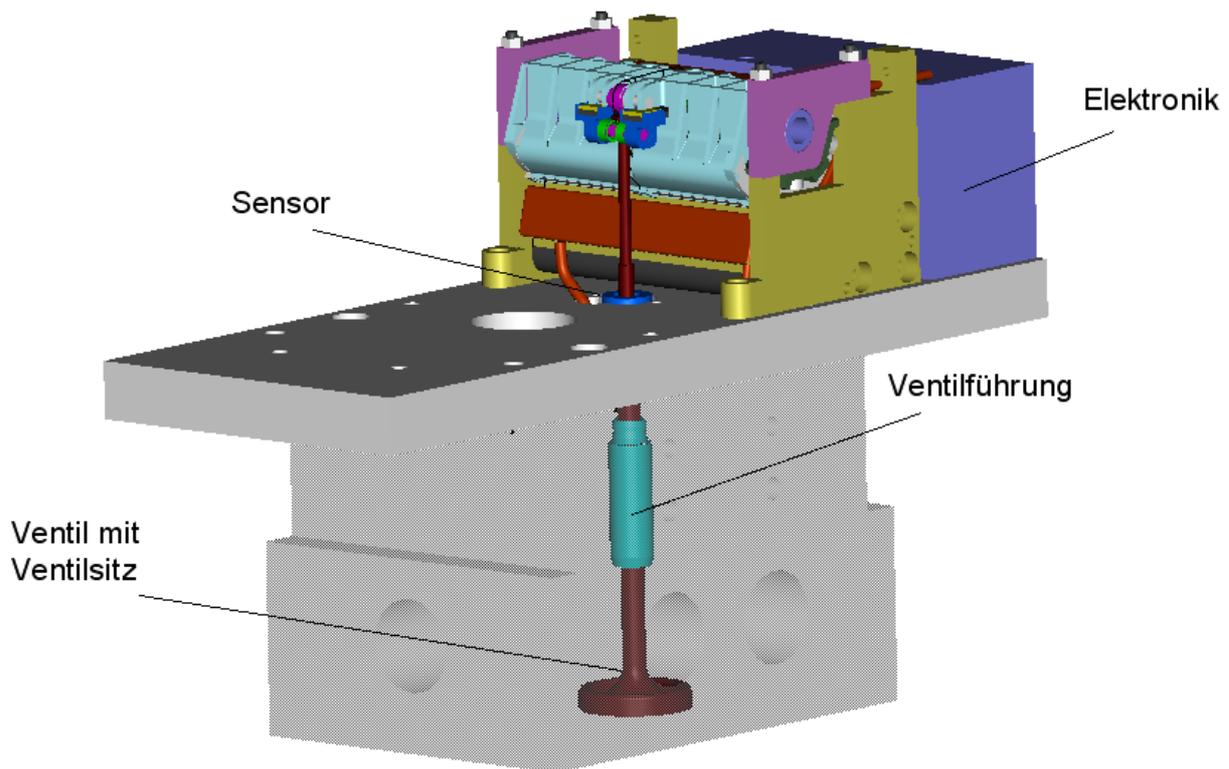
Abbildung 6: Gesamtaufbau RPA-I

Untersuchungen an dieser Aktuatorik zeigten, dass schon die erste Baustufe die wesentlichen im Vorgängerantrag definierten Kriterien der **Meilensteine 1 und 2** erfüllen. So konnte bspw. ein variabler Ventilhub dargestellt werden mit Auftreffgeschwindigkeiten des Ventils in seinen Sitz von  $<0.5\text{m/s}$ . Die Ergebnisse werden in einem nachfolgenden Kapitel gesondert behandelt.

Weiterer Entwicklungsbedarf erforderte die Entwicklung eines verbrennungsmotortauglicher Positionssensors und einer robusten und montagefreundlichen Ventilkopplung.

## 2.1.2 Baustufe 2 (RPA-II)

Abbildung 7 zeigt den gesamten Aufbau der zweiten Baustufe des RPA auf dem Pseudo-Zylinderblock. Der Grundaufbau entspricht im Wesentlichen dem der Baustufe I. Änderungen wurden vorgenommen hinsichtlich der Ventilankopplung und des Sensors.



**Abbildung 7: Gesamtaufbau RPA-II mit integriertem Sensor und neuer Ventilankopplung**

Eine weitere Herausforderung an die zweite Baustufe des RPA war die Implementierung eines seriennahen Sensors in die Aktuatorik. Hierzu wurde ein Sensor der Firma *Micro-Epsilon* ausgewählt, welcher auf dem Wirbelstromprinzip beruht. Die Platzierung erfolgt am Ventilschaft oberhalb der Ventilführung. Zur Detektion der Ventilposition benötigt der Sensor ein Target am Ventilschaft.

Während der Betrieb mit dem integrierten Sensor im allgemeinen positiv verlief, blieben die Ergebnisse mit der Ventilankopplung der zweiten Baustufe hinter den Erwartungen zurück. Zum einen lag dies an der anfangs unterschätzten Komplexität des Konzeptes, zum anderen an der extrem aufwändigen Fertigung der Teile, was die Gesamtkosten von Konstruktion und Herstellung in nicht mehr vertretbare Höhen ansteigen ließ.

Unter dem Gesichtspunkt der Stabilität, der bewegten Gesamtmasse und der Montagefreundlichkeit des Rotors hat sich die verwendete Konstruktion bewährt. Abschät-

zungen hinsichtlich der Kosten bei einer Serienfertigung des Rotors als Druckgussteil zeigten, dass der Rotor für eine Industrialisierbarkeit jedoch zu aufwändig ist.

### 2.1.3 Baustufe 3 (RPA-III und RPA-III mod)

Mit der Konstruktion der dritten Baustufe des Aktuators sollten folgende Herausforderungen bewältigt werden:

- Konstruktion eines industrialisierbaren Rotors
- Erhöhung des Kupferfüllfaktor der Spulen
- Verbesserung der Ventilankopplung

Aufgrund der unerwarteten Sprödigkeit der Magnete kam es beim Rotor der Baustufe III bei Regelungsfehlern während der Inbetriebnahme zu einem Totalausfall des Rotors infolge eines Magnetbruchs. Um einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten, wurde die Glocke so umgearbeitet, dass die Magnete auf einem Stahlträger aufgeklebt sind (RPA-III mod), siehe Abbildung 8.

Während der gesamten Betriebszeit auch unter Temperaturlast und Druckbeaufschlagung kam es seit der Einführung dieser Innenglockenkonstruktion zu keinem Ausfall aufgrund eines Magnetbruchs.

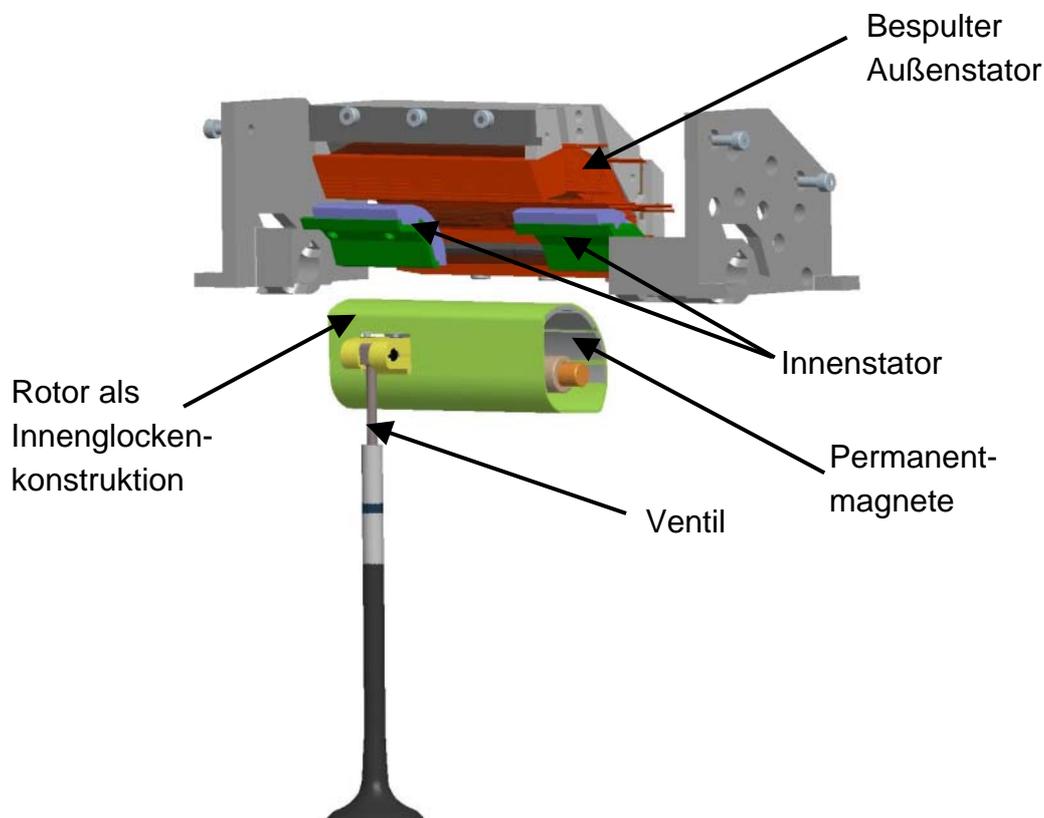


Abbildung 8: Explosionsdarstellung des RPA-III mod

Zur Verminderung der Erwärmung des Aktuators aufgrund der Kupferverluste wurde versucht, mithilfe von Formspulen den Kupferquerschnitt innerhalb des zur Verfügung stehenden Bauraums zu optimieren. Zwar ergab sich für die Prototypen ein beträchtlicher Aufwand zur Herstellung der Spulen, der Betrieb hinsichtlich der thermischen Belastung zeigte allerdings die erwarteten Vorteile.

Für die dritte Baustufe der Aktuatorik (RPA-III mod) wurde eine Ventilankopplung konzipiert, welche nicht auf einer kinematischen Bewegung von elastisch nicht verformbaren Körpern beruht sondern einen elastischen Biegeschaft zur Umsetzung der Dreh- in eine Längsbewegung besitzt. Der Biegeschaft ist als Verjüngung des Ventilschaftdurchmessers ausgeführt. Umfangreiche Untersuchungen auch unter Druck- und Temperaturlast zeigen, dass bei geeigneter Auslegung das Konzept des Biegeschafts die Anforderungen vollständig erfüllt, so dass für weitere Baustufen die Biegeschaftlösung beibehalten werden soll. Die Entwicklung des Biegeschaftventils wird in Kapitel 2.3 eingehend beschrieben.

#### **2.1.4 Baustufe 4 (RPA-IV)**

Mit der Konstruktion der vierten Baustufe der Aktuatorik (RPA-IV) sollen folgende Ziele verwirklicht werden:

- Verbesserung der Magnetkreiseffizienz
- Günstiges Packaging bzgl. dem zur Verfügung stehenden Zylinderkopf-Bauraum
- Sicherstellung der Industrialisierbarkeit aller Komponenten
- Entwicklung eines serientauglichen Sensorprinzip (Ziel: integrierter Drehwinkelsensor)

Umfangreiche Untersuchungen des Magnetkreises hinsichtlich Leistungs- und Kraftbedarf ebenso wie unter dem Gesichtspunkt der Platzverhältnisse auf dem Zylinderkopf führten zu einer Gesamtauslegung, wie sie in Abbildung 9 dargestellt ist.

Durch den Ventil- bzw. Zylinderabstand des Motors ist auch die Gesamtbreite des Aktuators festgelegt. Dies bedeutet, dass die Breite des Aktuators gegenüber der früheren Konzeption halbiert ist. Um die gleiche Magnetkraft zur Verfügung zu stellen, erstreckt sich der Magnetkreis über den doppelten Winkelausschnitt. Das Bauvolumen, welches grob formuliert ein Maß für die Aktuatormaximalkraft darstellt, wurde somit beibehalten.

Der grundsätzliche Aufbau gestaltet sich folgendermaßen:

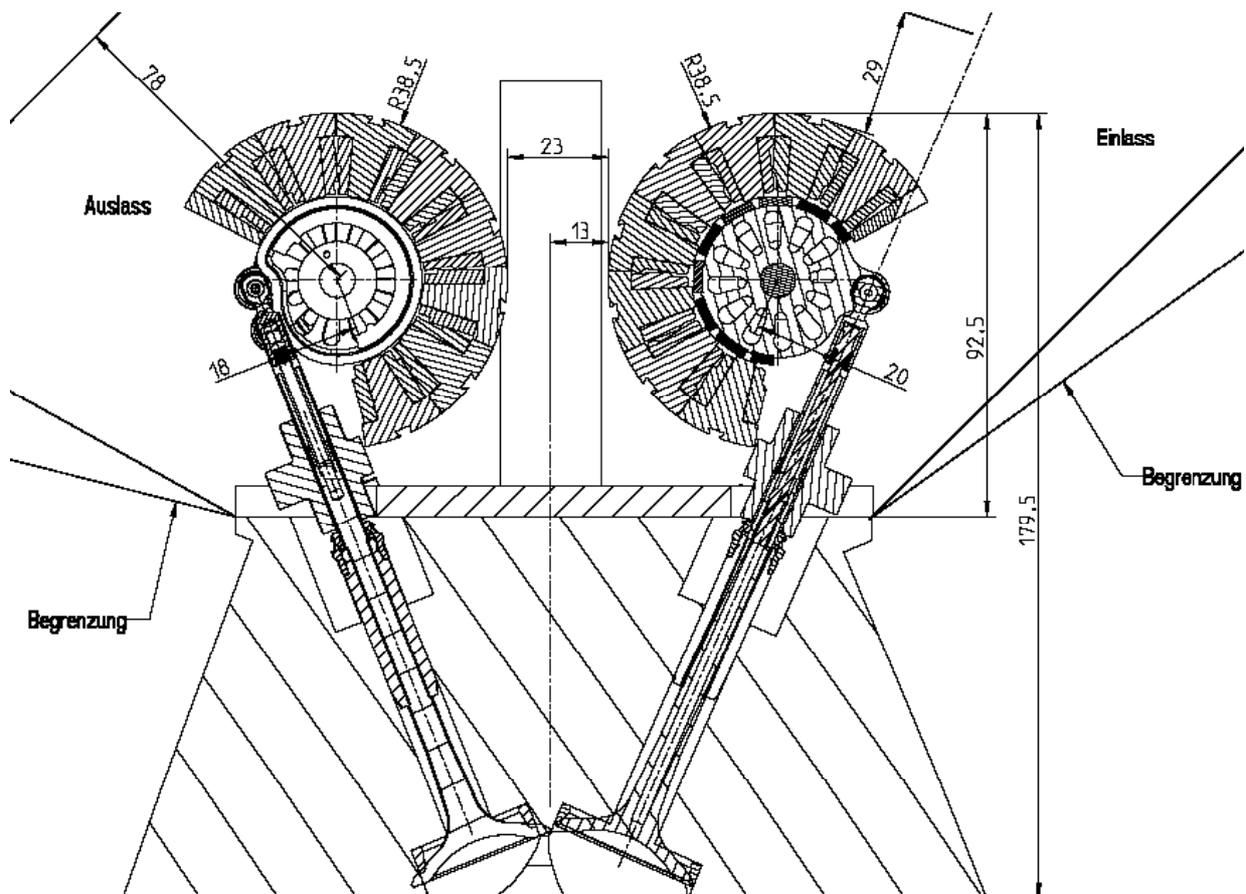


Abbildung 9: Studie RPA-IV auf Zylinderkopf

Da sich die Rotorgestaltung aus der vorigen Baustufe bewährt hatte, bei der die Magnete auf einem Stahlträger aufgeklebt sind wurde diese für die Baustufe V wieder verwendet. Umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich Materialauswahl des Trägers und Platzierung der Magnete führten zur Konzeption wie in Abbildung 10 dargestellt. Die Magnete sind wie bei einem Außenläufer außen auf einem Rotorträger aufgeklebt. Die Kraftübertragung von den Magneten zum Ventil erfolgt über einen Mitnehmer, welcher drehbar auf einer Welle gelagert ist. Die Glocken, auf denen letztendlich die Magnete geklebt sind, werden mittels einer Fügetechnik, bspw. Schweißen, mit dem Mitnehmer verbunden. Bei der Materialauswahl des Mitnehmers ist zu beachten, dass dieser eine möglichst hohe Zähigkeit besitzt bei gleichzeitiger guter Bearbeitbarkeit. Die Materialauswahl der Glocken stellt sich aus den verschiedenartigen Anforderungen schwieriger dar: da die Glocken sich im für die Krafterzeugung wichtigen Luftspalt zwischen Magneten und Erregerjoch befinden soll deren Material aus elektrodynamischen Gründen eine hohe Sättigungspolarisation besitzen und die Wirbelströme aus thermischen Gründen schlecht leiten. Das Material sollte für den Serieneinsatz tiefziehbar sein. Die Wahl fiel auf das Material *Permenorm* des Herstellers *Vacuumschmelze*.

Für die ersten Prototypen des Rotors wurde die mehrteilige Konstruktion einteilig gestaltet, so dass der Rotorträger vollständig aus Permenorm gefertigt werden kann. Dieser wurde aufwändig im Erosionsverfahren hergestellt.

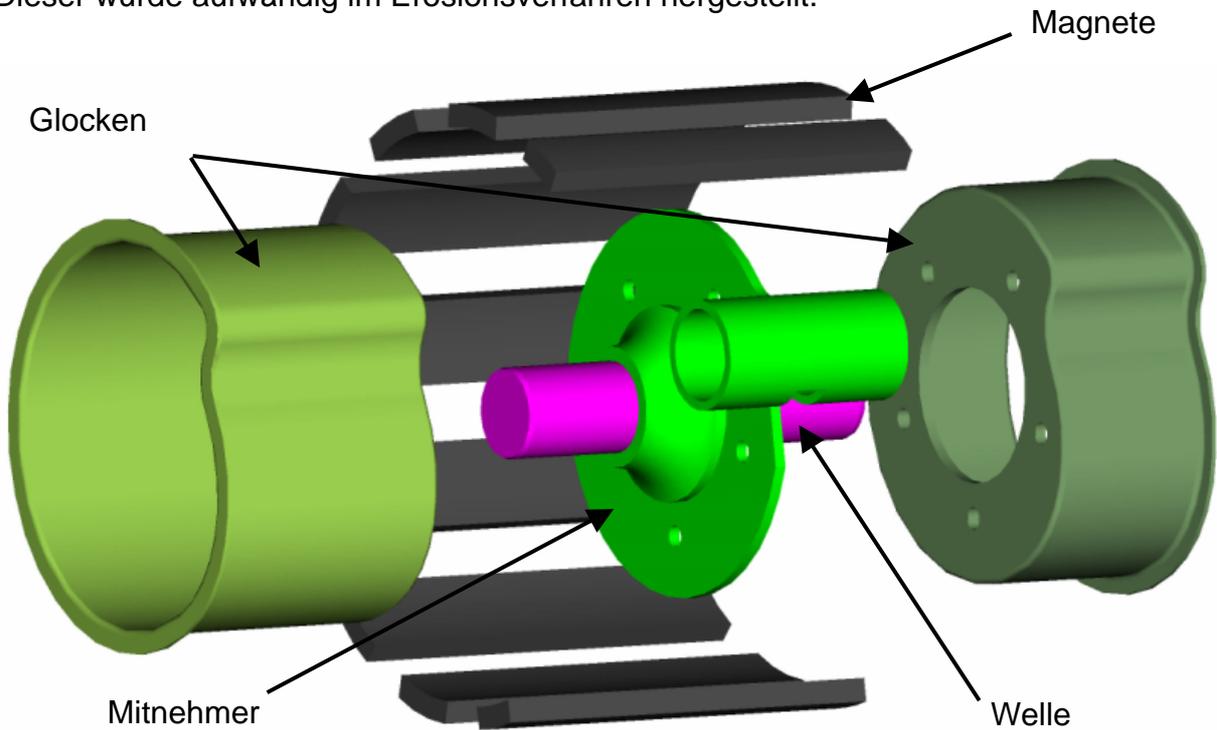


Abbildung 10: Explosionsdarstellung des Serienkonzeptes der Rotorkonstruktion

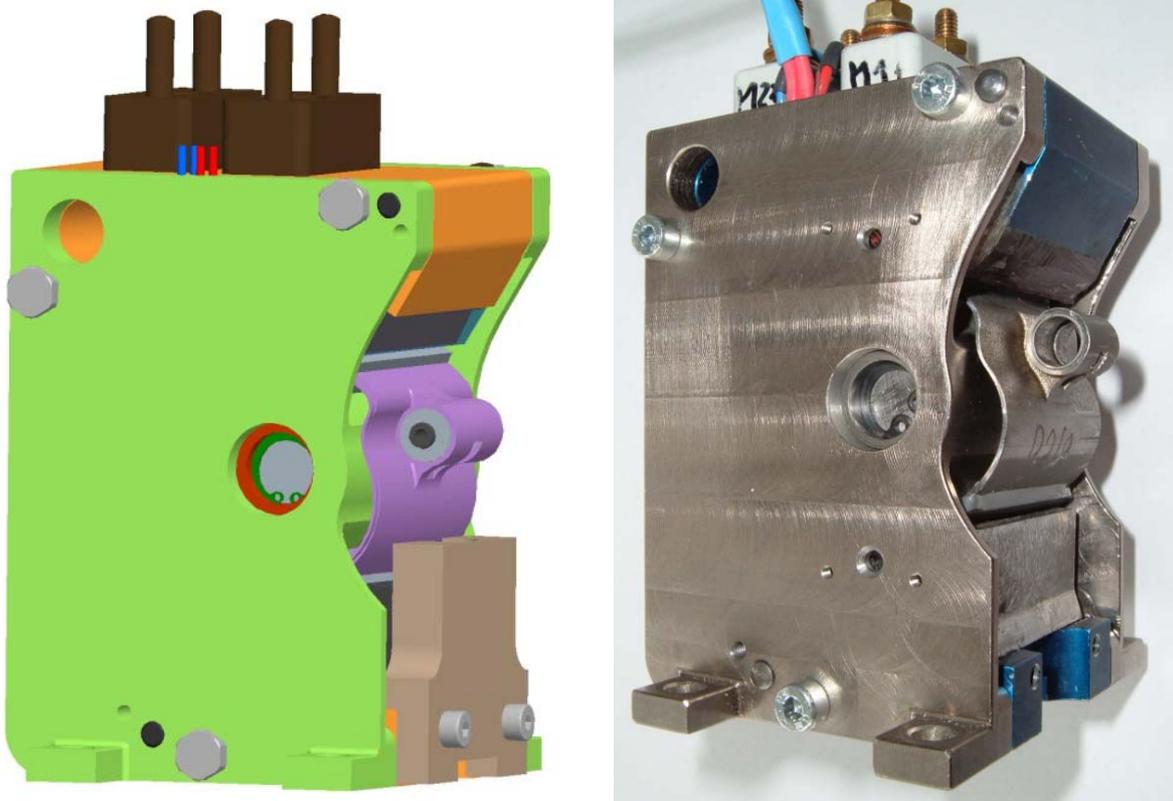


Abbildung 11: RPA-VI (CAD-Design und Prototyp)

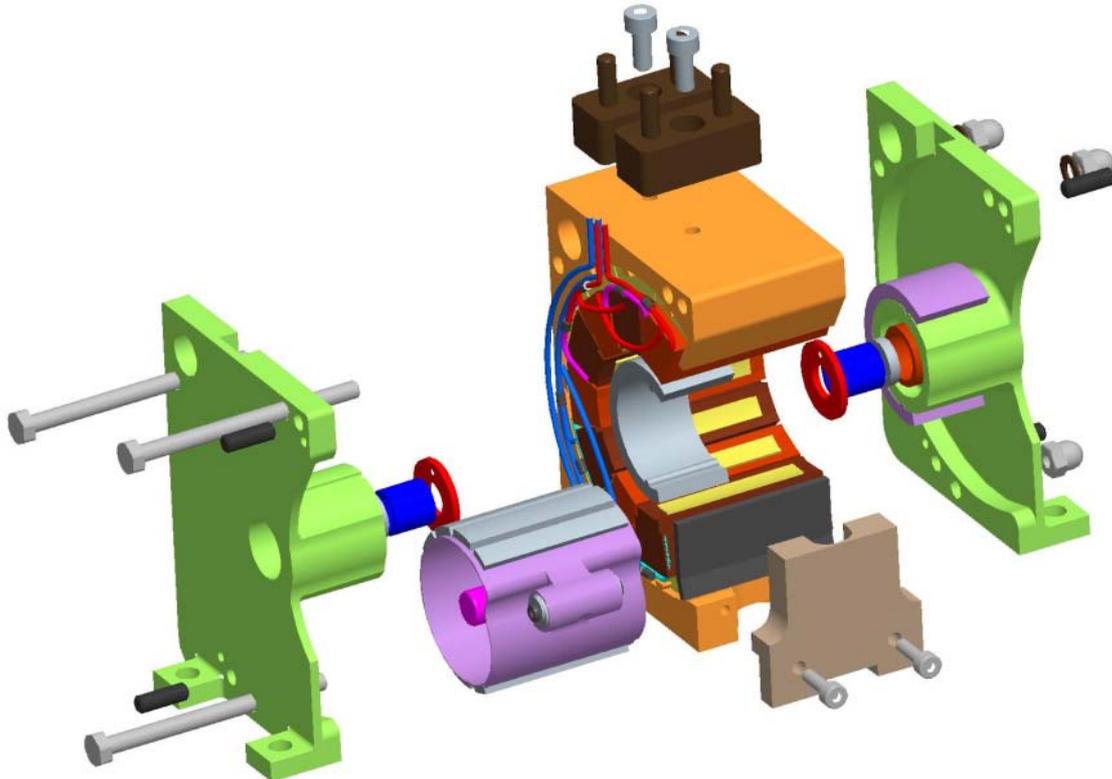
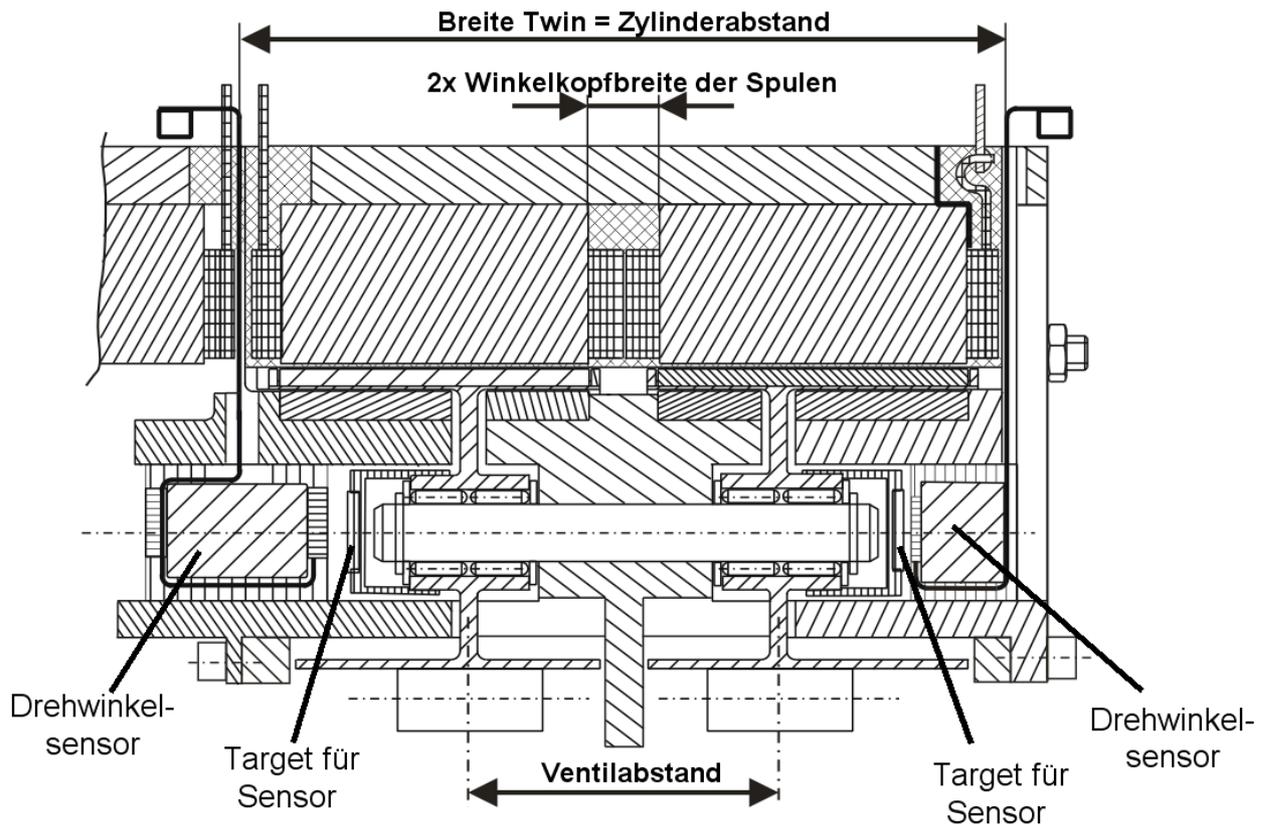


Abbildung 12: RPA-VI (Explosionsdarstellung)

### 2.1.5 Baustufe 5 (RPA-V)

Eine besondere Herausforderung bei der Konzeption des Ventiltriebsaktuators ist der Umstand, innerhalb eines begrenzten zur Verfügung stehenden Bauraums die optimale Ventilkraft bei möglichst geringer Verlustleistung, d.h. maximalem Füllfaktor der Spulen und möglichst geringer bewegter Masse darzustellen. Die Breite des Aktuators ist durch den Abstand der Zylinder des Verbrennungsmotors vorgegeben. Diese Breite sollte in der größtmöglichen Weise vom krafterzeugenden Stator ausgefüllt sein. Im Falle des RPA-VI ist die nutzbare Breite jedoch reduziert durch die Breite der Wandung der Seitenplatten, in Abbildung 12 grün dargestellt, welche die Lager aufnehmen. Durch eine Änderung des Lagerkonzeptes lässt sich somit der Stator um die Dicke der Seitenplatten, d.h. ca. 3.5% verbreitern. Die Maximalkraft steigt somit um den gleichen Prozentsatz von 3.5%.

Ein weiterer, bedeutsamer Vorteil ist die durch Änderung des Lagerkonzeptes gute Platzier- und Integrierbarkeit des Drehwinkelsensors. Abbildung 13 zeigt einen Schnitt durch den Ventiltriebsaktuator mit dem neuem Lagerkonzept.



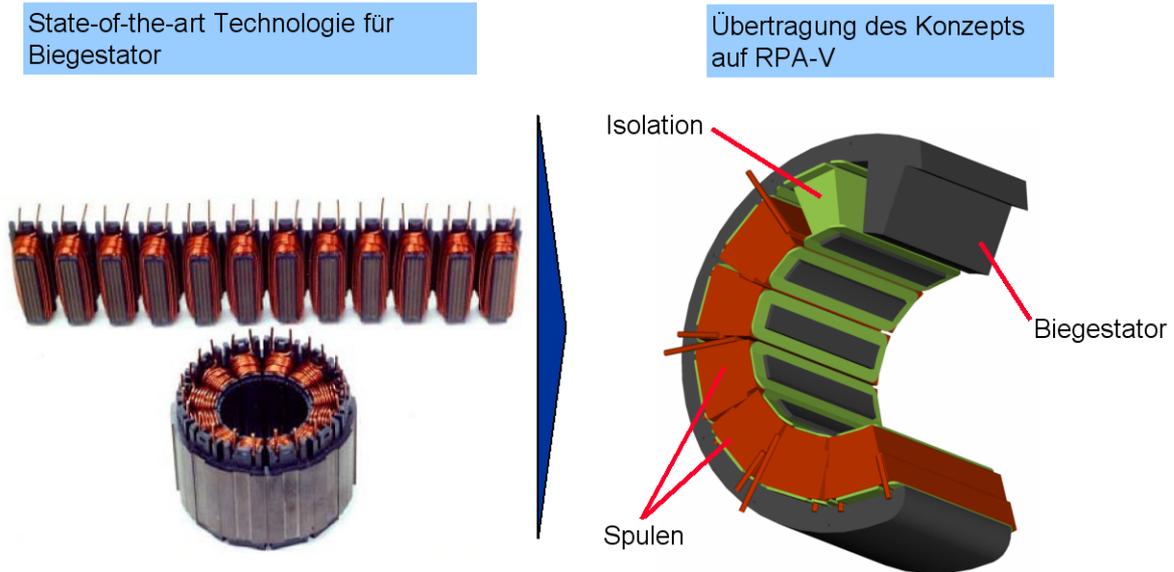
**Abbildung 13: Schnittdarstellung RPA-V (LSP-Patentschrift entnommen)**

Ersichtlich ist, dass der Zylinderabstand komplett für Spulen und Stator verwendet wird und somit die Kraftausbeute erhöht wird (die rechts in Abbildung 13 dargestellte Wandung ist nicht zwingend notwendig und stellt nur eine Abschluss- und Sichtfläche dar). Gut zu erkennen ist auch das neue Lagerkonzept: bislang war der Rotor direkt mit der Welle verbunden, die Welle war zweimal gelagert. Im neuen Lagerungskonzept ist die Lagerung im Rotor integriert. Die Welle wird somit zur feststehenden Achse und der Rotor ist fliegend gelagert, woraus sich Vorteile auch bei der Fertigung ergeben, da die Passung einer feststehenden Achse leichter zu bearbeiten ist als die Passungen zweier fluchtender Bohrungen. Außerdem zu erkennen ist die Platzierung des Drehwinkelsensors und die Positionierung des drehenden Targets, welches direkt mit dem Rotor verbunden ist.

Da sich bei der Konzeption der neuen Baustufe Unwägbarkeiten hinsichtlich eines einwandfreien Dauerbetriebs nicht ausschließen ließen, wurde beschlossen, einen Prototyp der neuen Baustufe zu fertigen und zu erproben. Das Augenmerk wurde auf die Auswirkungen der radialen Auslenkung der Achse bei Ventilkrafteinleitung gelegt und die möglichen Auswirkungen auf unzulässige Bewegungen des verbundenen Targets.

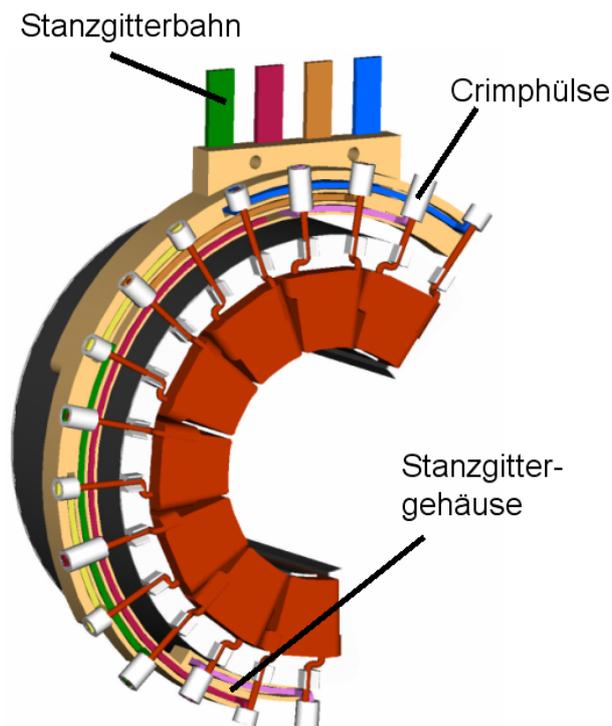
Während der Konstruktion der neuen Baustufe wurden noch weitere Verbesserungen berücksichtigt. In der früheren Baustufen wurden der Stator aus mehreren Einzeljochschenkel gebildet, welche jeweils separat bespult wurden. Nachteilig hierbei ist

die aufwändige und toleranzabhängige Montage. Wesentlich vorteilhafter ist das Konzept eines ebenen Stators, welcher bequem und sicher einzeln bespult wird. Anschließend wird der Stator zusammengerollt, wobei sich die gewünschte Geometrie des Stators ergibt, siehe Abbildung 14.



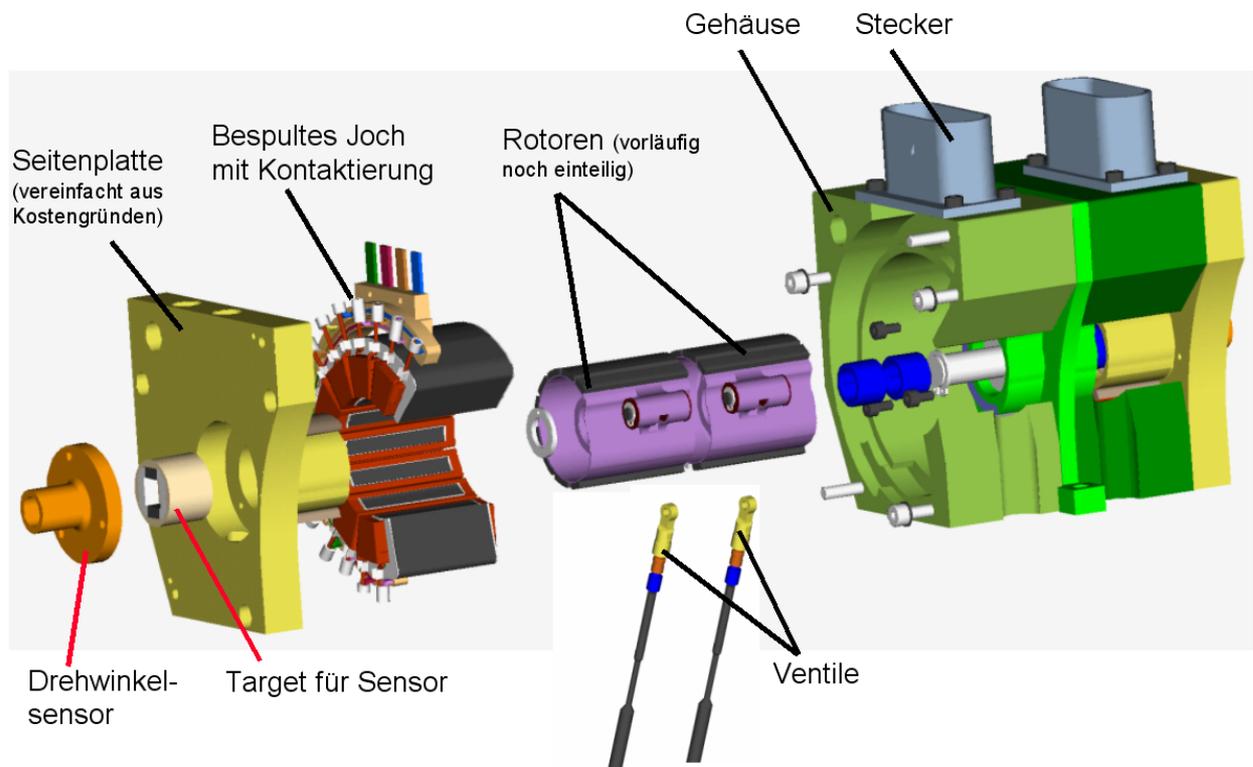
**Abbildung 14: RPA-V Biegestator-Konzept**

Eine weitere Verbesserung gegenüber der vorigen Baustufe ist die Verwendung eines Stanzgitters zur Kontaktierung der einzelnen Spulen, welches die Montage bezüglich Sicherheit und Einfachheit erheblich verbessert, in Abbildung 15 hellbraun dargestellt.



**Abbildung 15: RPA-V Stanzgitter-Konzept**

Abbildung 16 zeigt eine Explosionsdarstellung der Aktuatorkonstruktion.



**Abbildung 16: RPA-V Explosionsdarstellung**

Die mit der 6. Baustufe des Aktuators durchgeführten Dauertests zeigten ein überaus positives Ergebnis. Im einzelnen ergab sich folgendes:

- Die kürzere Lageraufstandsweite führt nicht zu einem stärkeren Verschleiß der Lager
- Die radiale Bewegung des Rotors und somit auch des Targets stören den einwandfreien Betrieb in keinsten Weise
- Der Drehwinkelsensor ist die zielführende Variante zur Regelung des Aktuators, siehe auch Kapitel 2.4 und 2.4.6
- Die Gesamtstabilität des Gehäuses ist einwandfrei

Für die nachfolgenden Baustufen der Aktorik wurde somit die vorgestellten Konzepte übernommen.

Der Magnetkreis des RPA-V ist jedoch identisch mit dem der Vorgängerbaustufe. Jedoch hat auch diese Baustufe noch einige Schwächen:

- Die zum Öffnen des Auslassventils bei maximaler Belastung notwendige Kraft wird trotz der beschriebenen Kraftsteigerung nicht erreicht

- Der Widerstand der Spulen und somit die thermische Belastung des Aktuators ist zu hoch
- Die Induktivität der Spulen und somit deren zeitliche Trägheit ist zu hoch
- Ein integriertes Kühlkonzept ist nicht verwirklicht
- Es fehlt ein mechanischer Anschlag, welcher den Rotor bei eventuellen Reglerausfälle vor Beschädigungen schützt

### 2.1.5.1 Ökonomische Bilanzierung

**Kostenabschätzung für 1 Mio. Aktuatoren**  
auf Basis Konstruktion RPA-V pro Ventil

Baugruppen	Baugruppe	Material	Fertigungsverfahren	Gewicht (g)	Material-kosten/ kg	Material -kosten	Kosten für Fertigung	Kosten inkl. Fertigung
<b>Stator</b>	Stator	Standard-Trafoblech Blech M330-35A	Stanzten+Laserschweißen	560	2,00 €	1,12 €	0,50 €	1,62 €
	Spulen	Kupferdraht	Standardwickeltechnik	150	4,80 €	0,72 €	1,00 €	1,72 €
	Innerloch	Standard-Trafoblech Blech M330-35A	Stanzten, Laserschweißen	100	2,00 €	0,20 €	0,50 €	0,70 €
<b>Gehäuse</b>	Gehäuse	Aluminium	Druckguss	450	1,90 €	0,86 €	0,30 €	1,16 €
	Lagerbock	Stahl	Schmieden	250	1,10 €	0,28 €	0,30 €	0,48 €
<b>Rotor</b>	Ferromagnetmagnete	VAC 803 TP	Bezugteil Vaccumschmelze	39	40,00 €	1,56 €	0,20 €	1,76 €
	Rotorkörper	Aluminium	Tiefziehen, Schmieden, Schweißen	350	1,20 €	0,42 €	1,50 €	1,92 €
	Hauptlagewelle+ Lagerung	Stahl	Drehteile	50	1,20 €	0,08 €	0,50 €	0,58 €
	Sensor, Target, Kabel	Kunststoff, Kupfer	Bezugsteil + Spritzguss			0,20 €	0,50 €	0,70 €
	Flexibel	Stahl	Schmieden	30	1,10 €	0,03 €	0,30 €	0,33 €
<b>Ventilankopplung + Ventil</b>	Ventil mit Biegeschalt	Stahl	Schmieden, Schleifen	40	1,10 €	0,05 €	2,30 €	2,35 €
	Überwurf	Stahl	Drehen + Schweißen	10		0,00 €	0,30 €	0,40 €
			<b>Gesamtgewicht</b>	<b>2035</b>	<b>Gesamtkosten für Einzelteile</b>		<b>13,69 €</b>	

Abbildung 17: Ökonomische Bilanzierung anhand RPA-V

Anhand der Baustufe der Aktuatorik, welche sich am günstigsten einer Serienfertigung zuführen ließe, wurde eine ökonomische Bilanzierung durchgeführt, siehe Abbildung 17. Als Gestehungskosten für eine Serieneinführung von 1 Million Aktuatoren, entspricht ca. 60000 Fahrzeugen im Premiumsegment, wurden etwa 14 Euro abgeschätzt. Dies entspricht einem Preis von ca. 230 Euro für die Systemeinführung. Üblicherweise wird der Einkaufspreis mit einem Faktor von 3 bis 6 bedacht. Hieraus folgt ein Einkaufspreis für die Aktuatorik von maximal 1400 Euro.

Zur Bilanzierung der Gestehungskosten der Elektronik wurde die integrierte Elektronik siehe Bericht aus dem Vorgängerprojekt (Az.: 22381-24/0) bewertet. Die Herstellungskosten wurde zu etwa 200 Euro abgeschätzt. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass diese Elektronik für eine Spannungsklasse von 42V konzipiert wurde. Für die derzeit verwendete Spannung von 24V könne kleinere und somit günstigere Bauteile verwendet werden.

Als Zusatzkosten muss die Anschaffung eines Generators (falls kein Hybridfahrzeug) mit berücksichtigt werden. Dies schlägt mit etwa 50 Euro zu Buche. Jedoch entfällt der mechanische Ventiltrieb, welcher derzeit ca. 160 Euro kostet. Weiterhin entfällt die Nachbehandlung des Abgases, wodurch eine Kostenreduzierung von etwa 40 Euro erzielt wird.

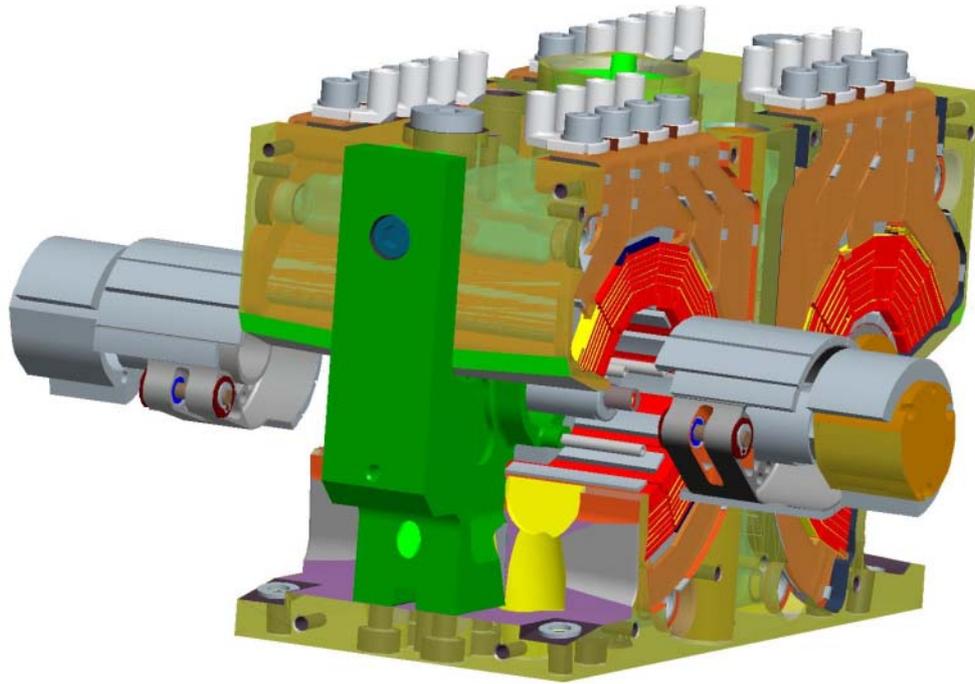
Insgesamt belaufen sich die Kosten für die Einführung der Aktuatorik in das Premiumsegment auf etwa 1100 Euro.

### **2.1.6 Baustufe 6 (RPA-VI)**

In Zusammenarbeit mit einem Kunden wurde Anfang 2007 beschlossen, eine weitere Baustufe der Aktuatorik zu konzipieren. Hierbei wurde der Anspruch weit höher als bislang gelegt, da die Aktuatoren auf den 4-Zylinder-Otto- und -Dieselverbrennungsmotor eines Testfahrzeugs montiert werden sollen.

Ein wesentlicher Punkt bei der Konzeption der Aktuatorik war, dass es sich hierbei um eine Sonderlösung zur vollständigen Darstellung der Funktionalität handeln soll. Der Anspruch, bei der Konstruktion ein Serienkonzept zu berücksichtigen, wurde verlassen. Es durften somit auch ungewöhnliche oder exotische Materialien verwendet werden.

Die konzeptionellen Änderungen werden in den untenstehenden Kapiteln umrissen. Eine Explosionsdarstellung des Aggregats für den Ottomotor, welches in einem Gehäuse 4 Aktuatoren zum individuellen Betrieb von 4 Ventilen eines Zylinders verient, zeigt Abbildung 18.



**Abbildung 18: RPA-VI Explosionsdarstellung am Beispiel des Aktuators für den Ottomotor**

### **2.1.6.1 Gehäuse mit integriertem Kühlkreislauf**

Im Betrieb erwärmen sich die Aktuatoren aufgrund der Ohmschen Verluste in den Kupferspulen und den sogenannten Eisenverlusten in den Statorn. Die einzelnen Komponenten des Aktuators haben eine Maximaltemperatur, welche für einen einwandfreien Betrieb nicht überschritten werden darf. So gilt bspw. für die verwendeten Magnete eine Maximaltemperatur von  $T_{\text{Magnet}} = 160^{\circ}\text{C}$ . Da die Aktuatoren eine Komponente des Verbrennungsmotors sind, ist eine Umgebungstemperatur von  $T_{\text{amb}} = 120^{\circ}\text{C}$  anzusetzen. Da somit der Arbeitstemperaturbereich relativ gering ist, wurde beschlossen, einen Kühlkreislauf mit möglichst großer Kühlfläche in jeden Aktuator zu integrieren. Am günstigsten lässt sich die Integration bewerkstelligen im Aktuatorgehäuse durch Verwendung eines Aluminiumgusses mit Kernen. In Zusammenarbeit mit einer versierten Gießerei für Automobilkomponenten wurde das Gussmodell entwickelt. Abbildung 19 zeigt am Beispiel des Gehäuses für den Ottomotor den Gussrohling mit integriertem Kühlkreislauf, transparent hellblau dargestellt, sowie das frästechnisch hergestellte Gehäuse.

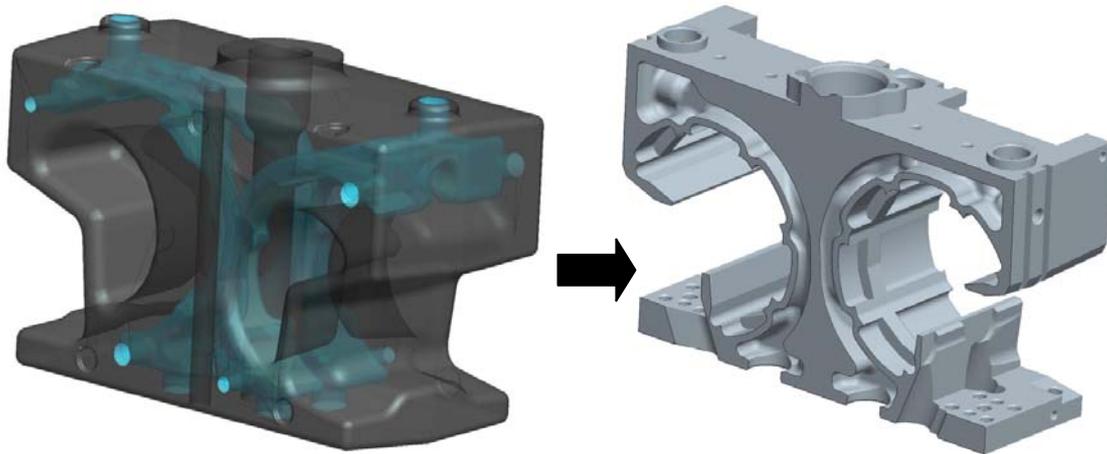


Abbildung 19: RPA-VI Aluminiumgussrohling und fertigbearbeitetes Gehäuse

### 2.1.6.2 Magnetkreis

Umfangreiche Untersuchungen zur Gestaltung des Magnetkreises in Zusammenhang mit einer Abschätzung der Leistungsaufnahme in bestimmten Lastpunkten wurden durchgeführt. Während der Evaluierung zeigte sich, dass sich die gewünschten elektrischen Leistungswerte nur mit dem High-End-Material *Vacoflux50* der Firma *Vacuumschmelze* erreichen lassen. Dieses Material besitzt die höchste Sättigungspolarisation und die geringsten Wirbelstromverluste aller käuflich erwerblichen weichmagnetischen Materialien. Das Material wird in der Automobilbranche laut Herstellerangabe nur in Nischenanwendungen verwendet.

Da die Spulen den größten Anteil an Verlustwärme erzeugen, wäre es sinnvoll, diese direkt zu kühlen. Dies ist bei Beibehaltung des Biegestators wie in der vorhergehenden Baustufe nicht realisierbar, da sich zwischen Gehäuse und Spulen der Stator befindet. Um jedoch die Kühlflächen näher an die Spulen heranzuführen, wurde beschlossen, den Stator zu unterbrechen und Einzelzähne zu verwenden.

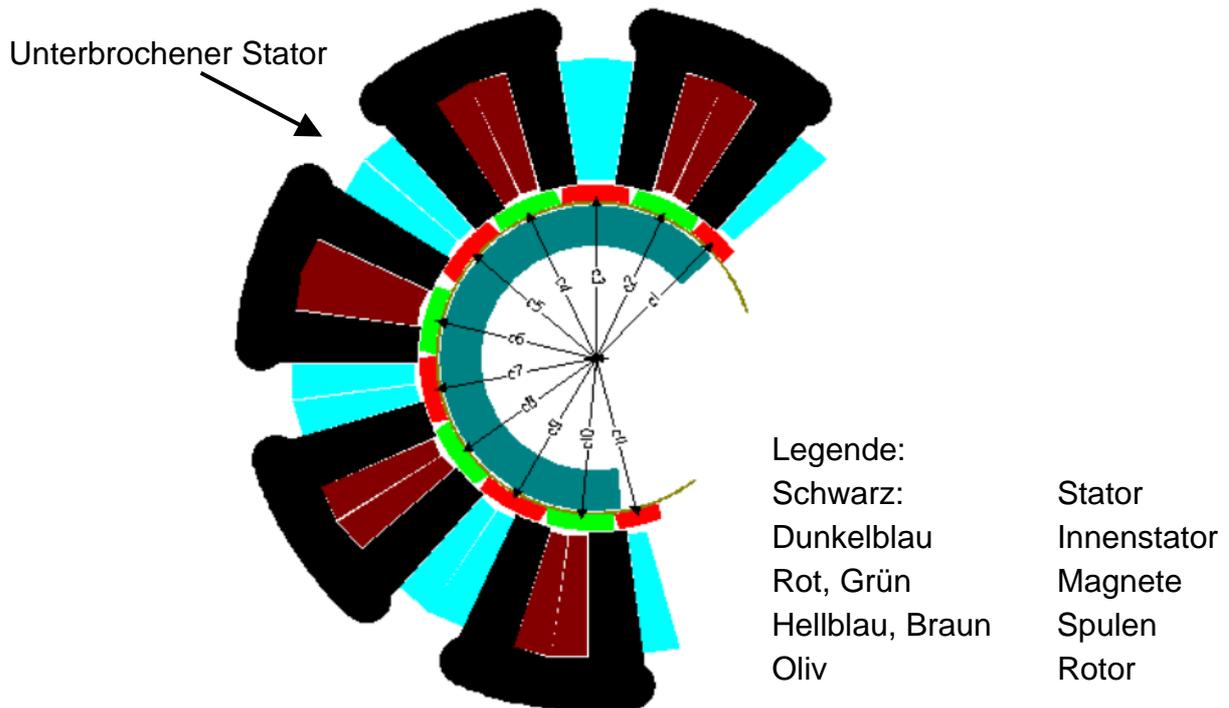


Abbildung 20: RPA-VI Magnetkreis (Beispiel: Aktuator für das Auslassventil eines Ottomotors)

### 2.1.6.3 Spulentechnik

Da die Leistungselektronik für den Betrieb des kompletten Verbrennungsmotors vom Kunden entwickelt wurde, wurden Vorgaben hinsichtlich Widerstand, Induktivität und somit Windungsanzahl gemacht. Diese Vorgaben lassen sich nur vereinen durch Verwendung einer Formspulentechnik. Die Optimierung bestand in der Aufgabe, bei möglichst geringem Spulenwiderstand die maximale Windungszahl bei bestmöglicher Fertigungs- und Montagefreundlichkeit zu erreichen. Abbildung 21 zeigt die entwickelten Formspulen in einer Explosionsdarstellung und im zusammengebautem Zustand. Die Spulen bestehen aus 2x7 Kupferlagen und einer Kupferverbindungslage. Die Dicke der Spulenlagen variiert zwischen 1.5mm und 2.5mm. Als Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Kupferlagen gibt es folgende Möglichkeiten:

- Weichlöten
- Hartlöten
- Laserschweißen

Die Schweißtechnik wurde nach Anfangsversuchen verworfen, da durch das Schweißverfahren immer Schweißperlen entstehen, welche schon während des Fügeprozesses zum Abbrand der Isolation und somit zu elektrischen Kurzschlüssen zwischen Spule und Stator führt. Auch im Dauerbetrieb wurde erwartet, dass durch äußerlich aufgebrachte Vibrationen und Eigenschwingungen der Spulen es zu Ausfällen aufgrund eines Kurzschlusses kommt.

Das Hartlötverfahren wurde verworfen, da der Prozess Füge Temperaturen von ca. 500°C benötigt und eine nachträgliche Isolation der einzelnen Lagen aufgrund der Geometrie der Spulen nicht möglich ist.

Somit ist das Weichlötverfahren die zielführende Variante. Die maximale Betriebstemperatur der Spulen ist somit eingeschränkt auf die Liquidustemperatur des verwendeten Lotes und liegt bei  $T_{\text{Lot}} = 200^{\circ}\text{C}$ .

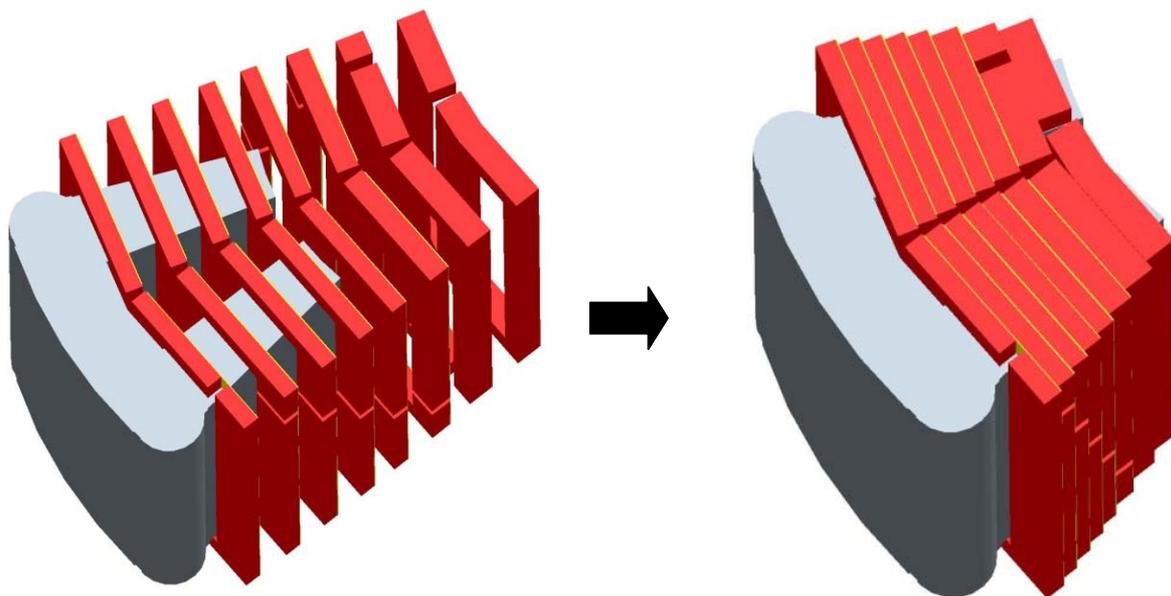


Abbildung 21: RPA-VI Formspulentechnik

#### 2.1.6.4 Integrierter Rotoranschlag

Zur Vermeidung von Beschädigungen am Rotor bei eventuellen Reglerausfällen, ist es sinnvoll und notwendig einen mechanischen Anschlag zu konzipieren, welcher z.B. auch zur Hubkalibrierung während des Betriebs genutzt werden kann und welcher zu keiner Zeit Beschädigung am Rotor hervorruft.

Die günstigste Stelle zur Platzierung eines Anschlags ist die intern an der Mittelwandung des Rotors, da dies die stabilste und zweckdienlichste Möglichkeit erscheint.

Abbildung 22 zeigt eine Seitenansicht des Konzeptes. In der Mittelwandung des Rotors sind nierenförmige Aussparungen eingearbeitet, welche als Anschlag für mehrere Zapfen dienen, die fest mit dem Lagerbock befestigt sind. Die Umfangs-

erstreckung der nierenförmigen Taschen ergibt sich aus dem maximalen zulässigen Drehwinkel. Die Anzahl und Größe der Zapfen ergibt sich aus der maximal zulässigen Belastung.

Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist die Möglichkeit einer Verbindung des Lagerbockes mit den außen liegenden Innenjochträgern. Hieraus ergibt sich eine komplette vorprüfbare Einheit aus Lagerbock und Rotoren.

3 Anschlagzapfen

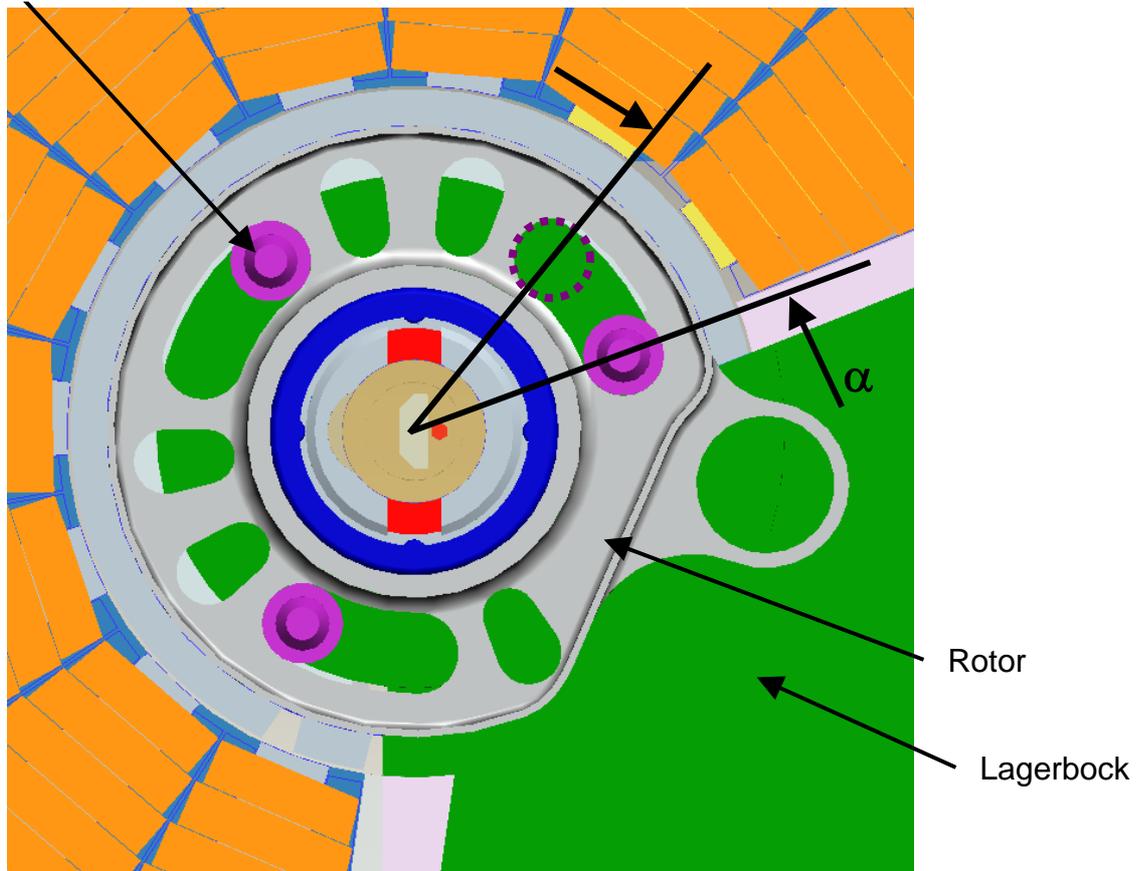
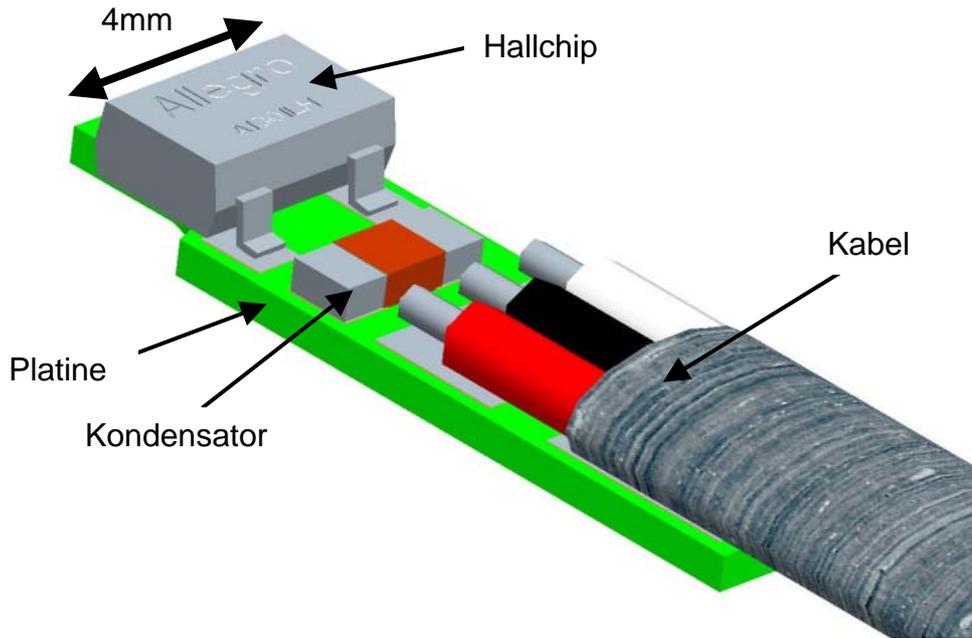


Abbildung 22: RPA-VI Integrierter Rotoranschlag

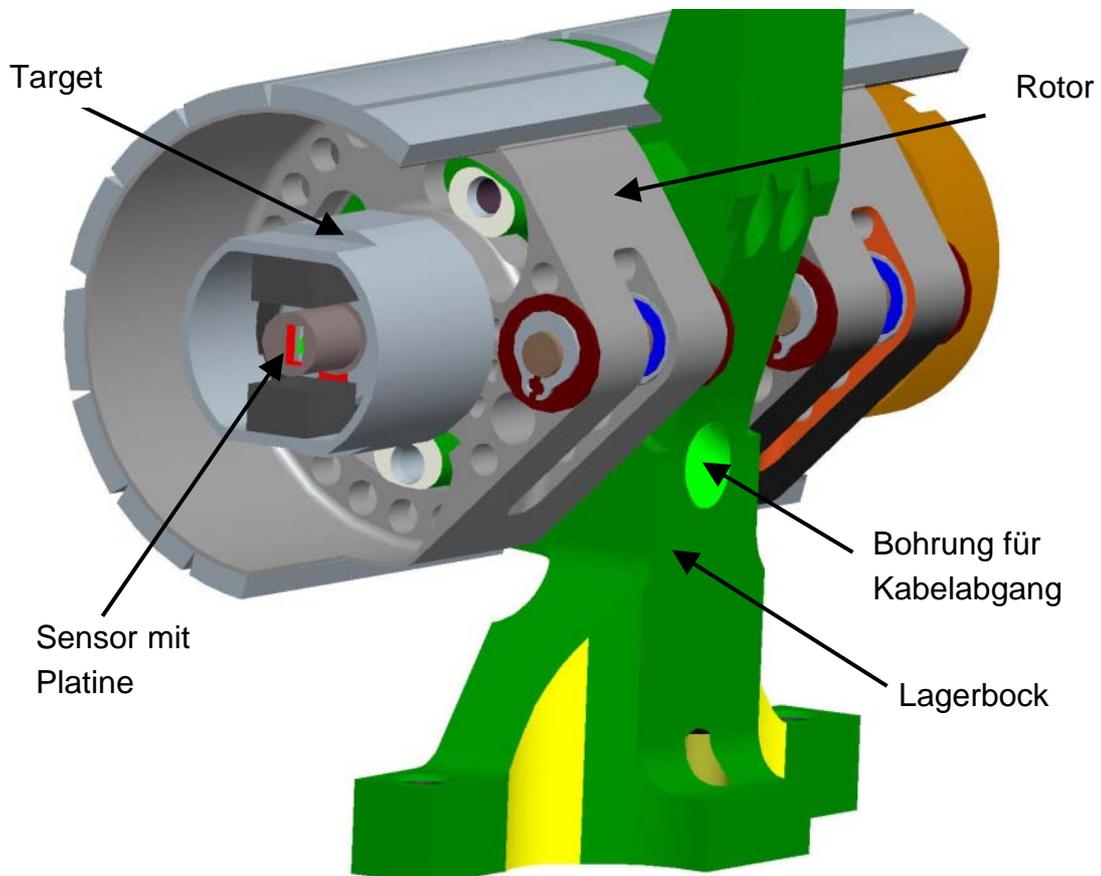
### 2.1.6.5 Sensorintegration

Schon in der vierten Baustufe der Aktorik wurde ein Drehwinkelsensor implementiert, siehe Kapitel 2.4 und 2.4.6, welcher auch in der Dauerprüfung verlässliche Ergebnisse lieferte. In dieser Baustufe war der Sensor noch außen an das Gehäuse angebracht. Eine Integrierung des Sensors wurde erst mit der darauf folgenden Baustufe bewältigt. In der sechsten Baustufe wurde dieses Konzept beibehalten. Abbildung 23 zeigt die Platine mit dem aufgelöteten Hallelement und den Kabeln.



**Abbildung 23: RPA-VI Platine und Hallsensorelement**

Vorteilhaft ist die Fixierung des Sensors innerhalb der feststehenden Hauptachse. Die Kabelführung liegt somit innerhalb des Lagerbocks. Dieser hat frontseitig eine Bohrung für den Kabelabgang.



**Abbildung 24: RPA-VI Integrierter Sensor**

## 2.2 AP 2: Entwicklung eines adaptiven Reglers

In den vorangegangenen Baustufen des RPA musste festgestellt werden, dass die zu regelnde Strecke nicht vernachlässigbare Regelparameteränderungen während des Betriebs unterliegt, welche nicht allein durch die Robustheit des Lagereglers beherrscht werden können. Zum Beispiel ändert sich die Ventilreibung stark (Faktor 2) entlang der Produktlebensdauer, ebenso hat die momentane Aktuatortemperatur einen großen Einfluss auf den Wicklungswiderstand, welcher wiederum auf den Spulenstrom und somit auf das Kraftkennfeld des Aktuators erheblich rückwirkt. Weiterum haben Fertigungs- und Montagetoleranzen einen Einfluss auf die Regelparameter und dürfen nicht vernachlässigt werden. Zusätzlich ist die Minimierung der manuellen Adaption des Systems zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme von entscheidender Wichtigkeit für die Serieneinführung, da dieser Aspekt einen erheblichen Kosteneinfluss mit sich bringt.

### 2.2.1 Auswahl eines geeigneten Verfahrens

Zielsetzung des adaptiven Reglers ist es, die Regelabweichung der Position zu eliminieren beziehungsweise soweit wie möglich zu minimieren. Deshalb wurde als Messgröße, welche den Erfolg der Adaption beschreiben soll, das Integral über dem Quadrat des Positionsfehlers genutzt. Als Stellgröße wurde der hubabhängige integrale Anteil des Positionsreglers verwendet. Um die Stellgröße nachzuführen, wären prinzipiell eine ganze Reihe von Verfahren denkbar, wie zum Beispiel ‚Neuronale Netze‘, ‚Fuzzy-Logic‘ oder evolutionäre Algorithmen. Aus folgenden Gründen hat man sich jedoch für ein Gradientenabstiegsverfahren entschieden:

- Der Abstand zum globalen Minimum ist gering, weshalb die Gefahr des Konvergierens zu einem lokalen Minimum eher gering ist.
- Die Rechenzeit, welche für Adaptionzwecke zur Verfügung steht ist in der Zielapplikation nur knapp bemessen, da die Regelung an sich bereits sehr große Ressourcen verschlingt.
- Der Bereich, in dem der integrale Anteil des Positionsreglers variiert werden kann, ist nicht beliebig, da eine falsche Adaption im extremsten Fall zur Zerstörung des Systems führen kann.

### 2.2.2 Implementierung des adaptiven Reglers in dSpace

Für die Umsetzung der Adaption wurde auf eine Modellierung mittels Matlab/Simulink verzichtet, da die Anpassung der Parameter sehr störgrößenspezifisch ist und der Aufwand zur Modellierung nicht vertretbar zum resultierenden Nutzen gewesen wäre.

Als Grundlage zur Umsetzung des adaptiven Reglers diente die Software und die dazugehörige Bedienoberfläche der Vorgängerbaureihe. In die Oberfläche wurden lediglich die nennenswerten Parameter integriert, um die Adaption entlang des Betriebes verfolgen zu können.

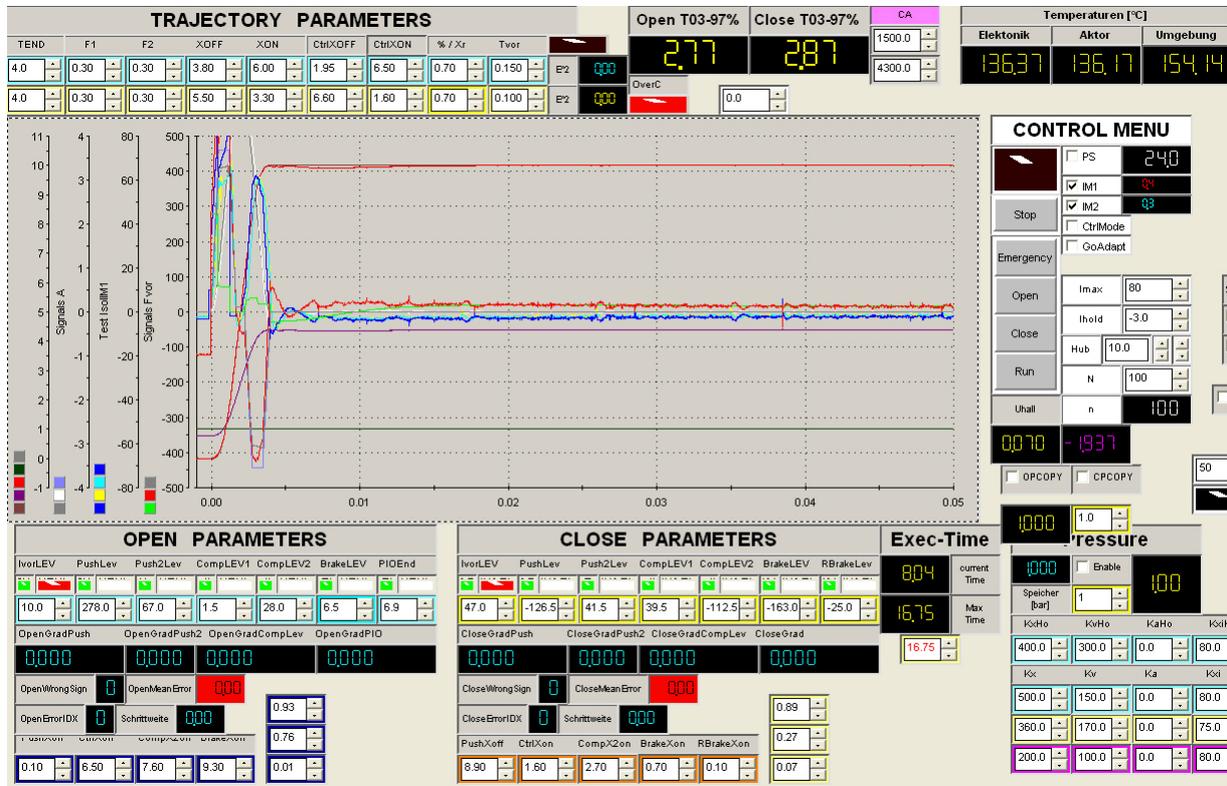


Abbildung 25: Aktuator-Bedienoberfläche mit integriertem adaptiven Regelalgorithmus

Die eigentliche Implementierung des Algorithmus wurde direkt in dem Regleraufruf auf dem RT-PC integriert (C-Code).

## 2.2.3 Erprobung des realen Systems mit Adaption

Die Ergebnisse aus der Erprobung des adaptiven Reglers waren insgesamt sehr positiv. Es konnte jederzeit eine akzeptable Parametrierung des Hubverlaufs gefunden werden, so dass die Positionsabweichung trotz aller Umwelteinflüsse ein tolerierbares Maß erreicht hat. Bei großen Abweichungen der Stellparameter wurde jedoch festgestellt, dass die Konvergenzgeschwindigkeit der Adaption ziemlich niedrig ist, was zum Beispiel zu einem deutlich hörbaren Klopfen des Ventils über mehrere Sekunden hinweg führen kann. Außerdem sollte das Gütekriterium noch gewichtet werden, da nicht alle Regelabweichungen gleich gravierende Folgen für die Aktorik haben. Beispielsweise ist eine negative Regelabweichung beim Schließen des Ventils fatal, da das Auftreffen des Ventils zum einen deutlich hörbar ist zum anderen zu erhöhtem Verschleiß führt. Andererseits spielt ein Positionsüberschwinger bezüglich

der Endposition beim Öffnen keine große Rolle, da zu allen mechanischen Begrenzungen ausreichend Abstand vorhanden ist.

## 2.3 AP3: Weiterentwicklung der Aktorik und Erprobung

### 2.3.1 Teil 1: Ventilankopplung

Eine Großteil der Entwicklungsarbeit im Projekt ‚Ventiltriebaktuator‘ wurde für die Lösung der Ventilankopplung beansprucht.

Die Ventilankopplung hat die Aufgaben zu erfüllen, die rotatorischen Bewegung des Rotors in eine Längsbewegung des Ventils umzusetzen. Die Anforderungen an die Ventilankopplung werden untenstehend aufgelistet.

Nr.	Anforderung	Wert	W/F
1	Kraft, Auslass öffnet gegen Innendruck	800N	F
2	Kraft im Umkehrpunkt (Schließkraft)	300N	F
3	Stoß bei Regelungsfehler	2000N	F
4	Hub Einlassventil	11mm	F
5	Hub Auslassventil	10mm	F
6	Schwenkwinkel, Aktuator	30°	F
7	Ventilschaftdurchmesser	6mm	F
8	Ventil drehbar		F
9	Ankopplung spielfrei / definiertes Spiel		F
10	dauerfeste Auslegung		F
11	montagefreundliche Konstruktion		F
12	verschleißfrei / verschleißausgleichend		F
13	Trockenlauf / Lebensdauerschmierung		F
14	Zwangsdrehung des Ventils		W
15	geringstmögliche Masse		W

Abbildung 26: Anforderungsliste an Ventilankopplung (F = Forderung, W = Wunsch)

Als zielführende Lösung der Problematik ergab sich Konzeption eines elastischen Gliedes in der Stellerkette. Dieses elastische Stellglied wird als verjüngter Schaft zwischen Ventilfehrung und Rotorankopplung ausgeführt. Die Lösung lässt sich folgendermaßen bewerten:

- + Ventildrehung möglich
- + Rel. geringes Gewicht
- + Elast. Aufsetzen durch Dehnschaft
- + Rel. geringes Spiel
- + verschleißarm
- Spiel an 2 Stellen (jedoch definiert)

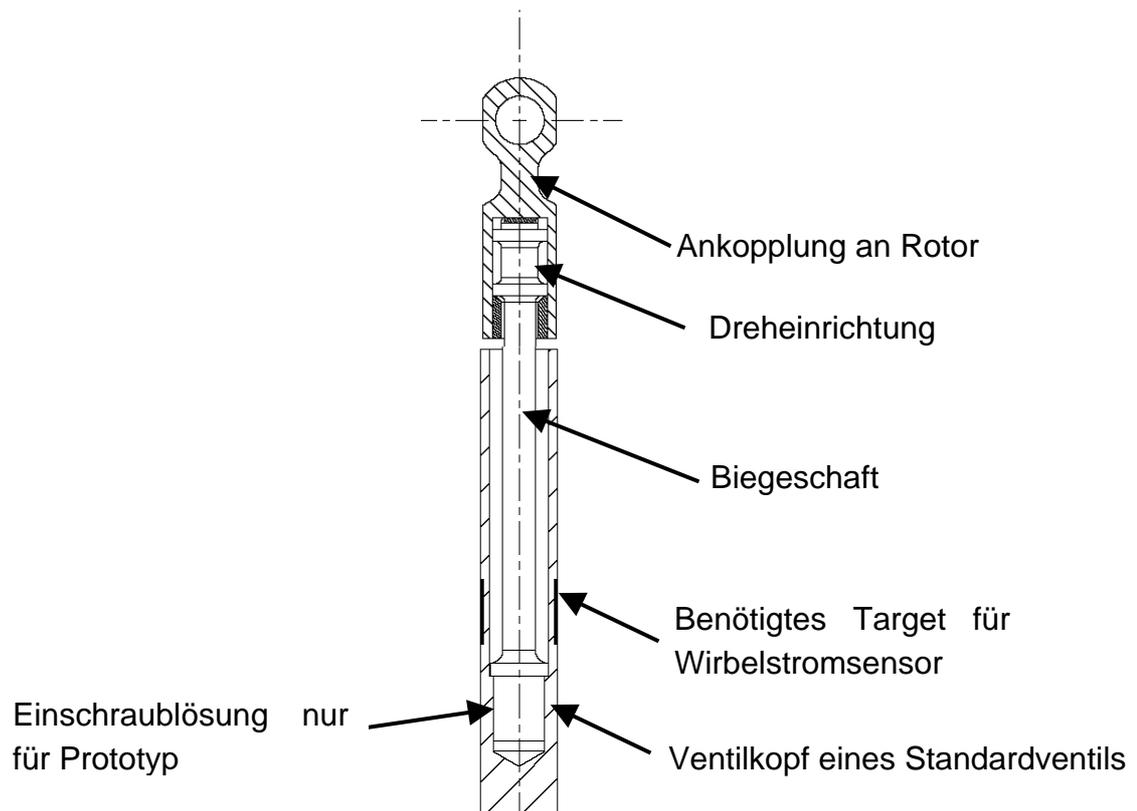
Die Auslegung des Biegeschafte stellt ein Optimierungsproblem aus folgenden, teilweise sich widersprechenden Anforderungen dar.

- Die aus der Verbiegung des Biegeschafte resultierenden Querkräfte sollen zur Schonung der Ventilfehrungen so niedrig wie möglich sein, maximal so hoch wie bei einer klassischen Nockenwellenlösung
- Die aus der Verbiegung des Biegeschafte resultierenden Biegespannungen sollen aus Lebensdauergründen so niedrig wie möglich sein
- Die Knicksicherheit sollte so hoch wie möglich sein

Die Optimierung des Biegeschafte beeinflusst die Abmessungen folgender Teile:

- Länge des Biegeschafte
- Durchmesser des Biegeschafte
- Platzierung des Biegeschafte

Abbildung 27 zeigt die erste konstruktive Umsetzung des Biegeschaftekonzepts.



**Abbildung 27: Erste Umsetzung des Biegeschaftekonzepts für die Ventilankopplung**

Diese aufwändige Konstruktion ergibt sich aus folgenden Randbedingungen

- Wirbelstromsensor benötigt ein Target am Ventilschaft sowie oberhalb und unterhalb des Targets gleiche Materialverhältnisse
- Lösung muss montier- und demontierbar sein

Für die Dreheinrichtung oberhalb des Biegeschäfts ergab sich für den Serieneinsatz folgende Systematik, siehe Abbildung 28:

- Vorgespannter Überwurf, siehe Abbildung 28
- Vorgespannter Überwurf, siehe Abbildung 29
- Überwurf mit Distanzelement, siehe Abbildung 30
- Ausführung des Überwurfs als Doppelschale, siehe Abbildung 31
- Geschlitzte Lagerwelle, siehe Abbildung 32

Das für die Drehbewegung notwendige Spiel wird über eine Vorspannung der Überwurfhülse erreicht.

### Drehgelenk – Lösungen

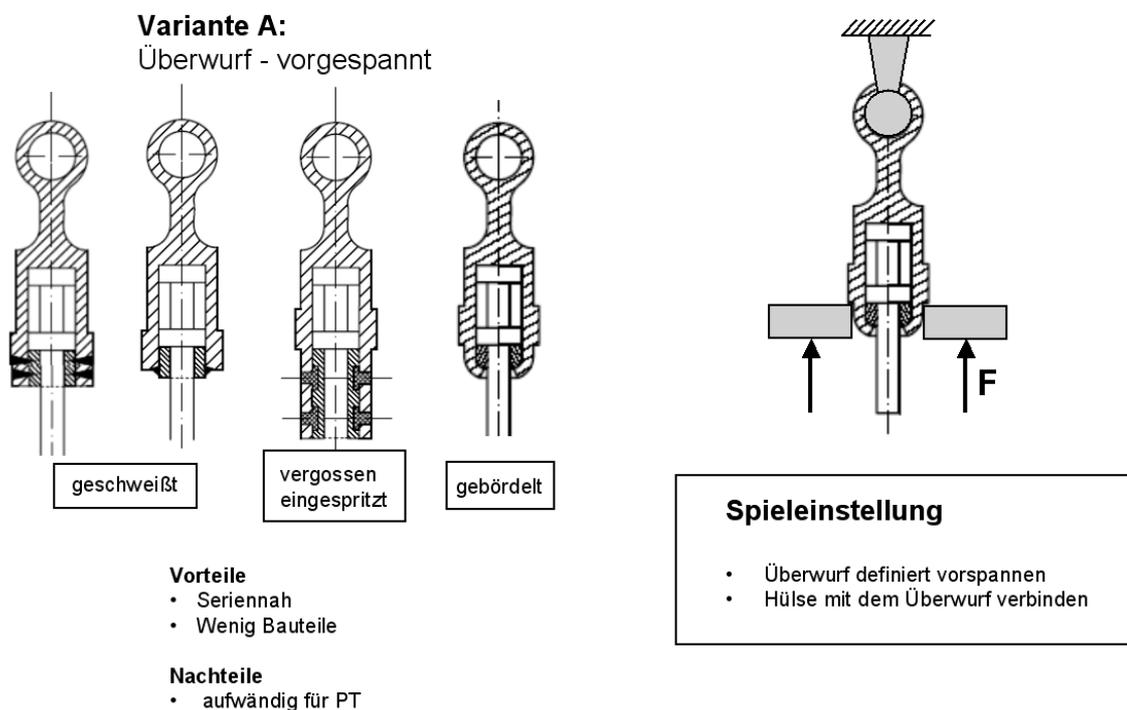


Abbildung 28: Konzept A für Ventildreheinrichtung (für Serie)

## Drehgelenk – Lösungen

### Variante B: Überwurf - gestreckt

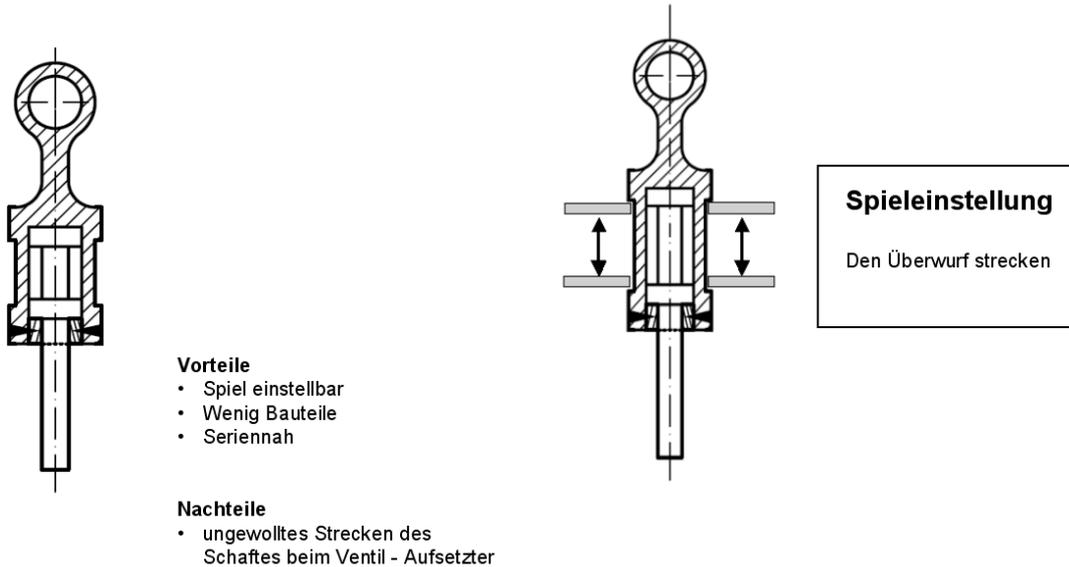


Abbildung 29: Konzept B für Ventildreheinrichtung (für Serie)

## Drehgelenk – Lösungen

### Variante C: Distanzelement

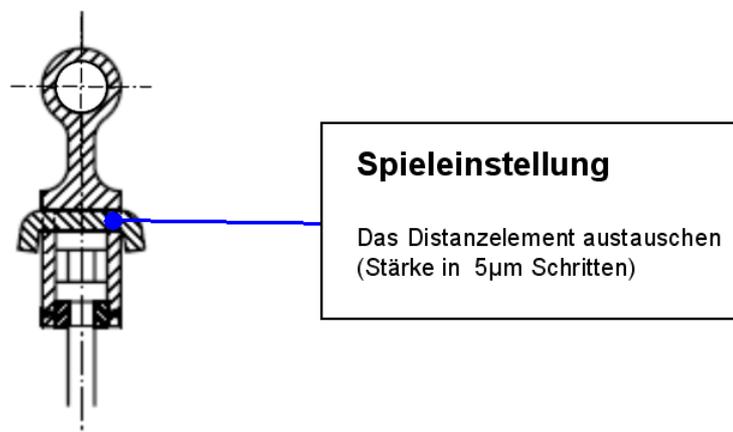


Abbildung 30: Konzept C für Ventildreheinrichtung (für Serie)

## Drehgelenk – Lösungen

### Variante D: Doppelschale

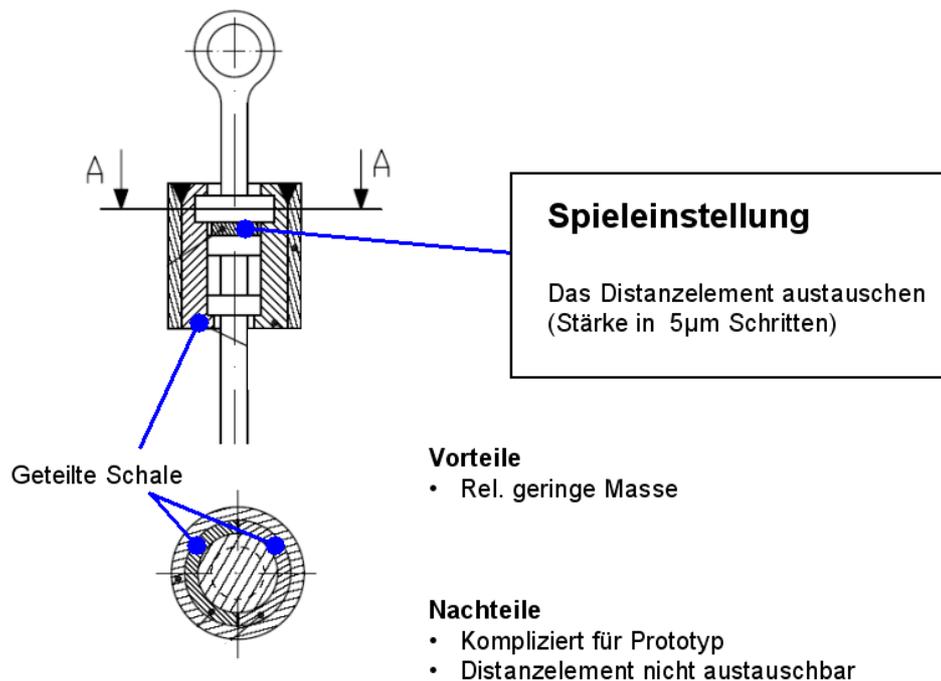


Abbildung 31: Konzept D für Ventildreheinrichtung (für Serie)

## Drehgelenk – Lösungen

### Variante E: Gebaehrte Lagerwelle

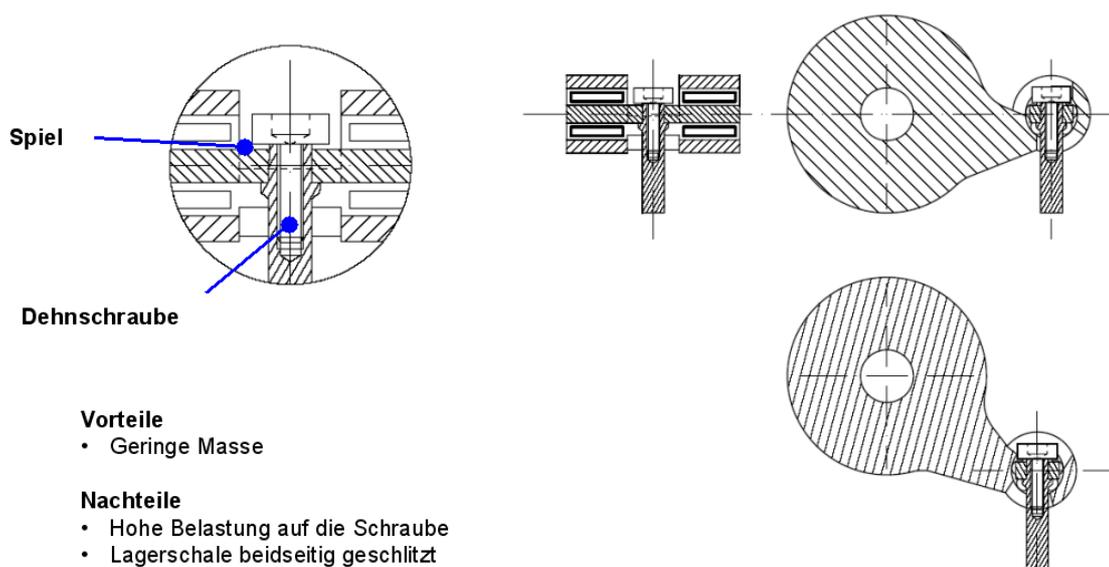


Abbildung 32: Konzept E für Ventildreheinrichtung (für Serie)

	Var A	Var B	Var C	Var D	Var E
Spiel definiert	++	++	++	++	++
Spiel nachjustierbar	--	++	++	--	0
Handhabung Prototyp	--	+	++	--	+
Masse	+	+	+	+	+

**Abbildung 33: Bewertung der Konzepte für Ventildreheinrichtung**

Die Bewertung der Ventildrehkonzepte ist in Abbildung 33 aufgeführt. Für die Prototypen des RPA-VI wurde die Variante C ausgewählt.

Die Ergebnisse am befeuerten Einzylinder-Ottomotor beim Kunden zeigten durchweg positive Ergebnisse.

- Biegeschafftlösung ist die zielführende Variante zur Umsetzung der Drehbewegung des Rotors in die Längsbewegung des Ventils
- Die Dreheinrichtung mit definiertem Spiel hat sich prinzipiell bewährt. Eine Schwäche ist lediglich, dass bei der Montage das Spiel eingestellt wird und nicht während der Fertigung
- Schwächen wies die geschweißte Verbindung zwischen Serienventil und dem Biegeschafft auf, da diese Stelle im Betrieb hochbelastet ist. Eine einteilige Lösung ist hier zielführend

Die sechste Baustufe der Aktorik (RPA-VI) soll beim Kunden nicht nur am Testprüfstand im Labor voll funktionsfähig sein, sondern sich auch im Testfahrzeug bewähren. Da außerdem die zu fertigende Prototypenanzahl von ca. 60 Einheiten zu groß wurde, wurde beschlossen, einen bewährte Firma aus der Serienproduktion von Gaswechselventilen mit am Projekt zu beteiligen. Die Wahl fiel hierbei auf die Firma *TRW*, da diese schon Erfahrungen mit eigenen elektromotorischen Ventiltriebsstellern hat. Die von *TRW* erarbeitete Lösung verwendet die einteilige *LSP*-Biegeschafftlösung sowie eine Eigenentwicklung der Dreheinrichtung, welche sich stark an der Variante A aus Abbildung 28 anlehnt. Aus Demontagegründen besitzt diese Lösung jedoch ein Schraublösung mit Kontermutter.

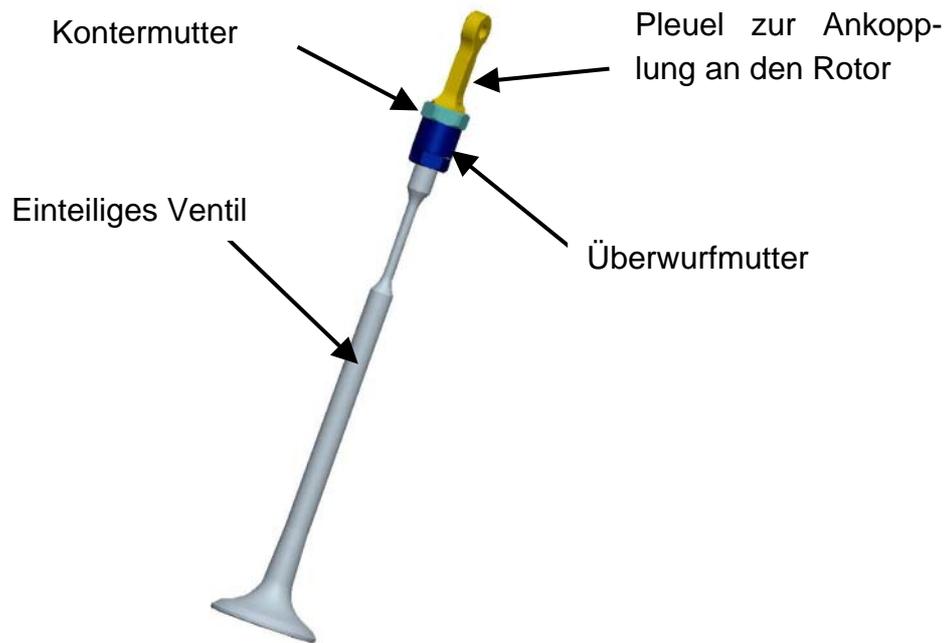


Abbildung 34: TRW-Ventil für RPA-VI

### 2.3.2 Teil 2: Industrialisierbarkeit der Aktorik

Eine Weiterentwicklung der Aktorik hinsichtlich Industrialisierbarkeit wurde im wesentlichen vorgenommen bei der fünften und sechsten Baustufe (RPA-V bzw. RPA-VI). Eine Beschreibung liefern die Kapitel 2.1.5 und 2.1.6. Diese Maßnahmen betreffen:

- Biegestator
- Kontaktierung
- Gussgehäuse mit integriertem Kühlkreislauf
- Integrierter Sensor
- Mehrteilige Rotorkonstruktion

Nicht weiterverfolgt wurde der Verguss der Spulen im Vakuum. Dies lag an folgenden Gründen:

- Vakuumverguss nur zwingend notwendig bei Hochspannungsanwendung  $U > 500 \text{ V}$ .
- Vakuumvergussmasse hat geringen Wärmeleitwert
- Versuche mit einer Gussmasse geeignet für Differenzdruckverfahren zeigten gute Ergebnisse im Aufschnitt und Schliffbild

### 2.3.3 Teil 3: Detaillierte Erprobung

Um die Einsatzfähigkeit des variablen Ventiltriebs zu demonstrieren wurden zahlreiche Messungen am sogenannten Hardware-in-the-Loop-Prüfstand unter möglichst realen Bedingungen durchgeführt. Die Messumgebung sowie die Resultate der Messungen sollen nachfolgend dargestellt werden.

#### 2.3.3.1 Dauerlaufversuche

Um Zweifel an der mechanischen Stabilität auszuräumen, wurde ein Dauerlaufversuch mit 5 Millionen Öffnungszyklen bei einer Öffnungsdynamik, welcher einer Drehzahl von konstant 6000 U/min der Kurbelwelle entspricht und 10 mm Hub durchgeführt (Abbildung 35).

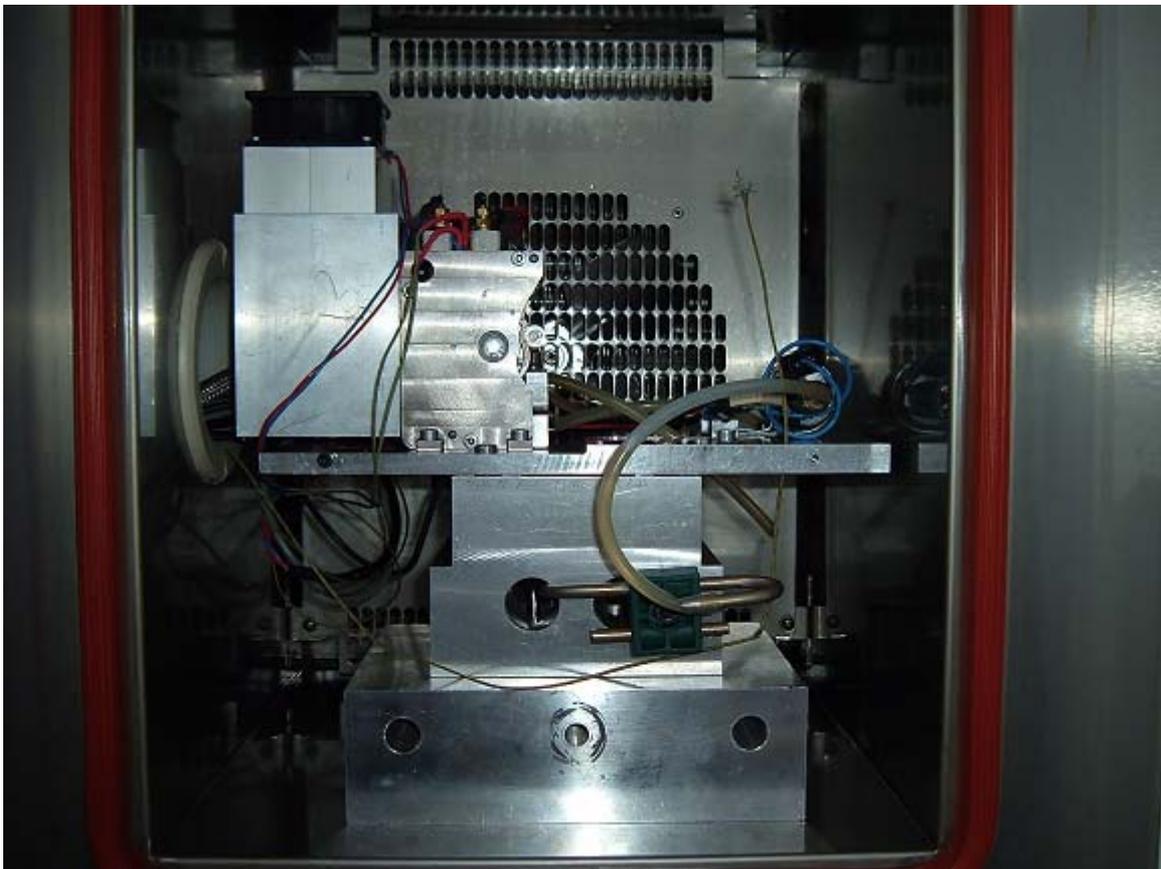


Abbildung 35: Dauerlaufversuch unter realen Bedingungen

Im Zuge des Versuchs konnten Verschleißprobleme bei der Ventilankopplung festgestellt werden, welche jedoch durch Härtung der entsprechenden Oberflächen ge-

löst werden konnten. Die Ergebnisse des Dauerlaufs sind in Abbildung 36 und

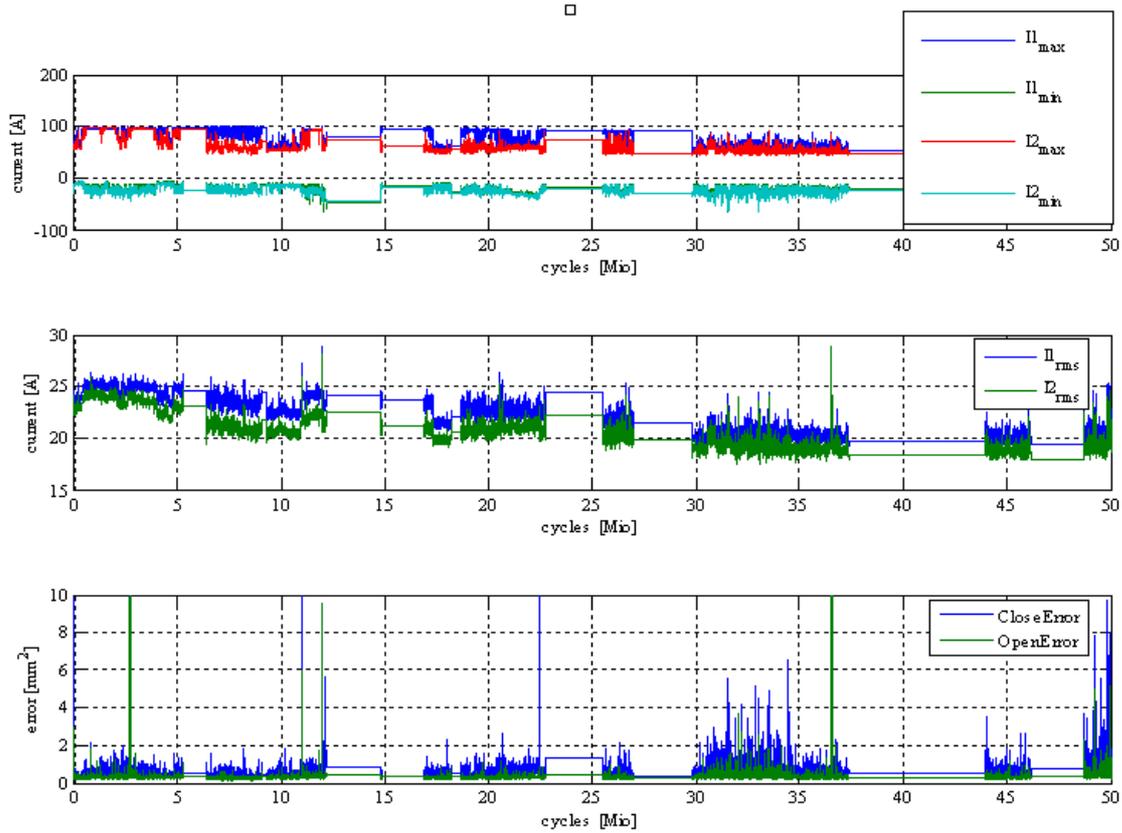
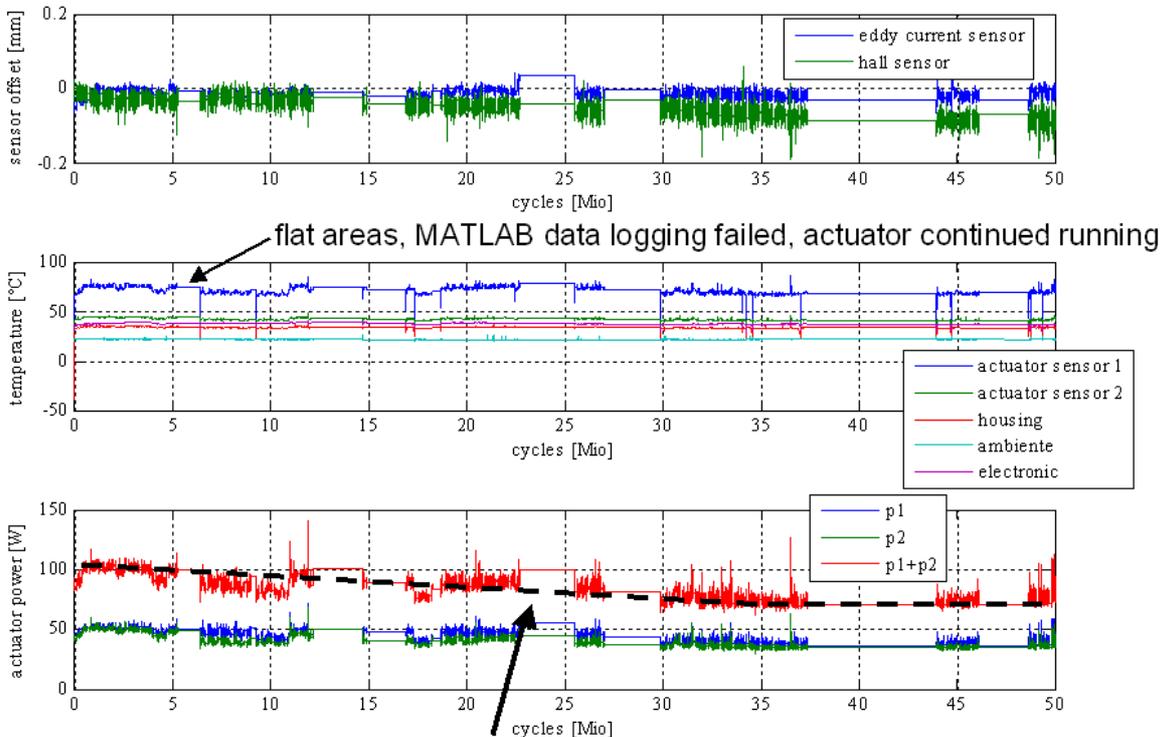


Abbildung 37 dargestellt. Besonders zu bemerken ist hierbei, dass mit steigender Lebenslaufdauer die aufgenommene Leistung nochmals stark sinkt.



=> Decrease of power consumption – most probable reason: shake down of the actuator

Abbildung 36: Ergebnisse des Dauerlaufs (A)

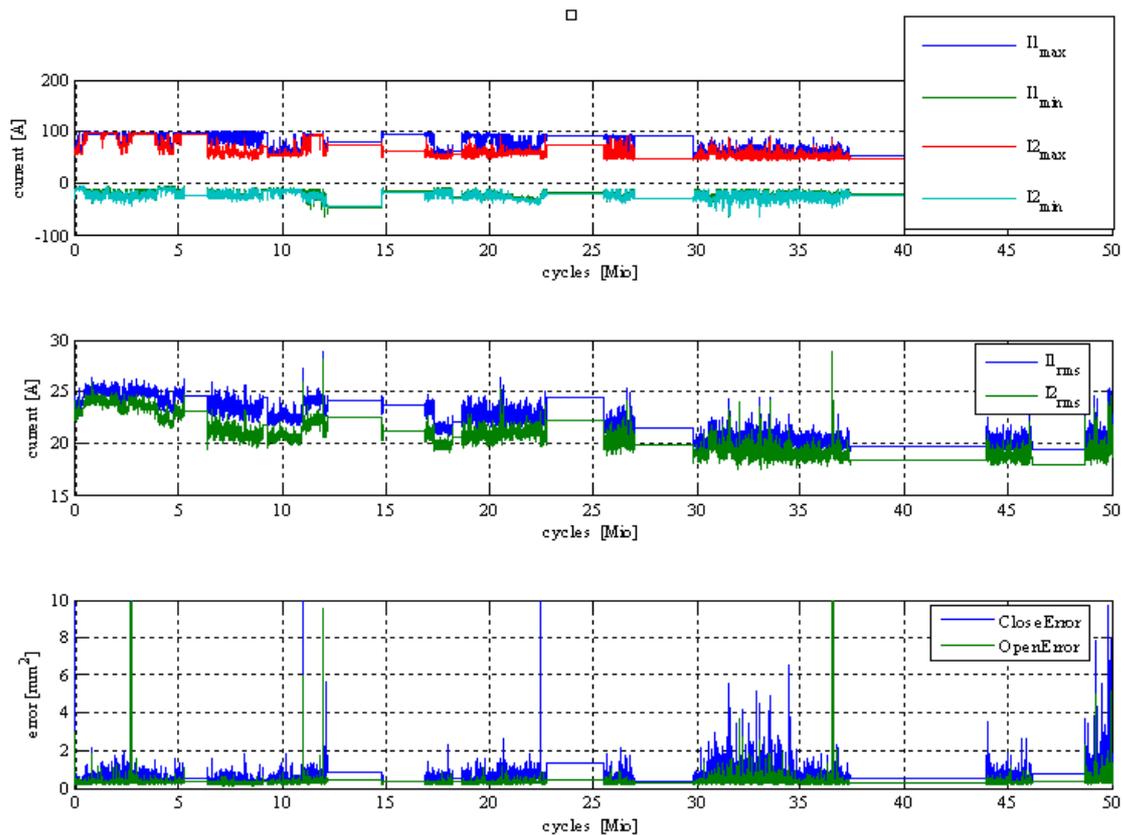
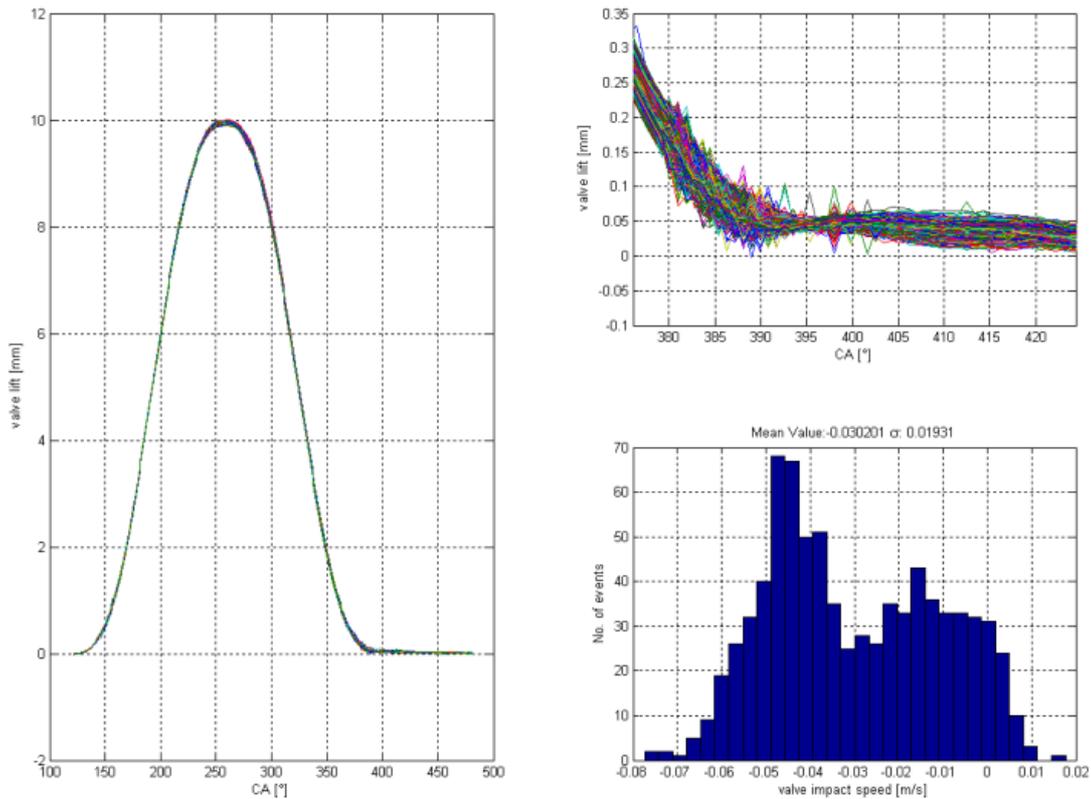


Abbildung 37: Ergebnisse des Dauerlaufs (B)

Der Dauerlauf wurde auf über 50 Mio. Zyklen ausgeweitet, ohne dass Schäden feststellbar waren (Meilenstein 1 erreicht). Weiterhin liefen beim Kunden VW überaus umfangreichere Belastungsuntersuchungen auch unter Temperatur und Gegendruck sowie am befeuerten Einzylinder-Ottomotor. Diese dienten als Grundlage zur Fortführung der Zusammenarbeit.

### 2.3.3.2 Nachweis der Regelbarkeit des Systems

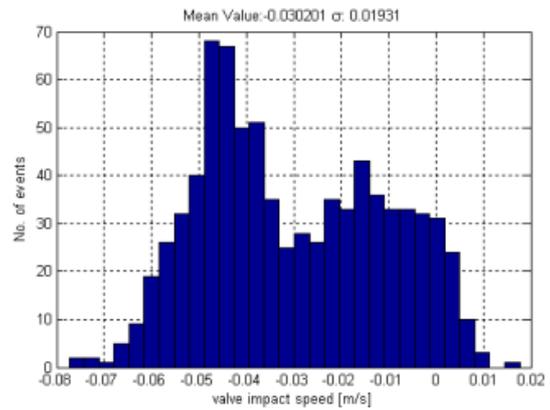
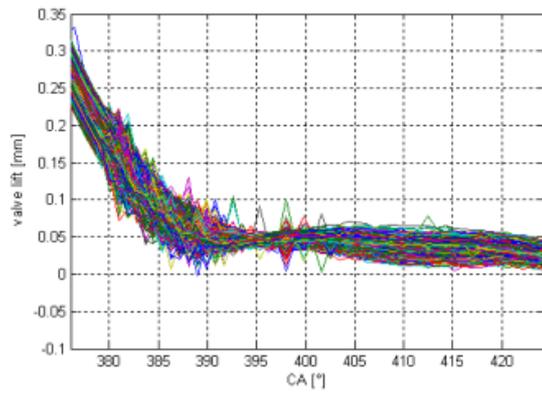
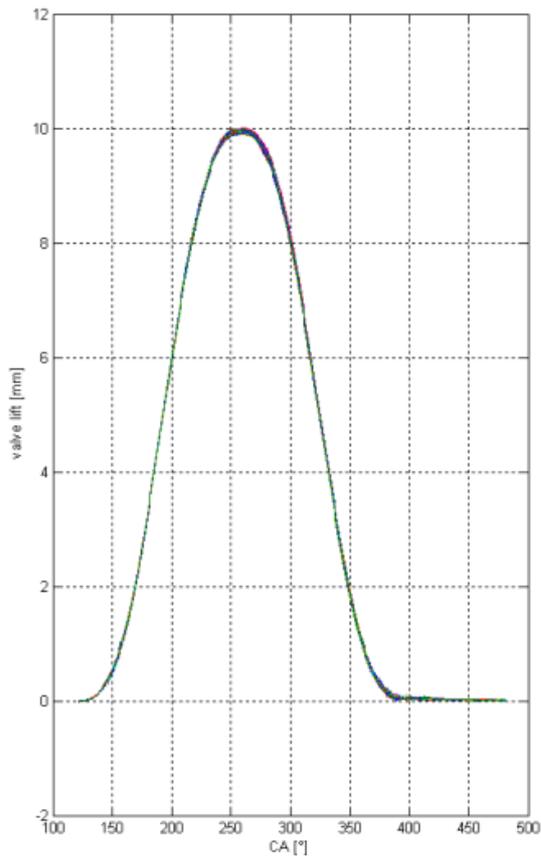
Um die Regelbarkeit des Systems unter realem Lastverhalten nachweisen zu können, wurden jeweils 100 Öffnungszyklen aufgezeichnet und mit einander verglichen. Diese Messungen wurden für spätere Baureihen des RPA wiederholt (Abbildung 38)



**Abbildung 38: Zyklenvergleich RPA-V**

Es kann festgestellt werden, dass die Hubverläufe (Abbildung 38 links) extrem ähnlich zueinander sind, was zum einen für ein spielfreies mechanisches System spricht, zum anderen für eine sehr gute Identifikation der zu regelnden Strecke und einem gut parametrisierten Regelalgorithmus. Beim Schließvorgang (Abbildung 38 rechts oben) kann eine gewisse statische Abweichung festgestellt werden. Jedoch kann gezeigt werden, dass selbst bei 6000 U/min die Auftreffgeschwindigkeiten kleiner als 0.05 m/s (Mittelwert + Standardabweichung) und somit der Meilenstein 1 als erreicht gilt. Diese Abweichung liegt an der elastischen Eigenschaft des Ventilsitzes. Zur Vermeidung dieser Abweichungen wäre ein möglicher Lösungsansatz, die Sollposition für den geschlossenen Zustand 0.1 mm oberhalb des Ventilsitzes zu setzen. Die vollständige Ventilschließung würde dann durch den Haltestrom erfolgen. Da man jedoch mit den erreichten Regelabweichungen äußerst zufrieden war, wurden in dieser Richtung keine weiteren Optimierungen mehr unternommen. In Abbildung 38 rechts unten ist die Auftreffwahrscheinlichkeit entlang der gemessenen Häufigkeit dargestellt. Es zeichnet sich ein klares Maximum bei einer Schließgeschwindigkeit von ungefähr  $v = 0.05$  m/s ab, welches der Zielvorgabe entspricht (Meilenstein 1). Außerdem kann beobachtet werden, dass die Verteilung sehr schmalbandig ist. Die gleichen Messungen mit vergleichbar guten Ergebnissen wurden für die Folgebaureihe RPA-VI ebenfalls durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

Statistic Analysis für 6000/min und transition time (3-97%)=2.7ms



Statistik für 3000U

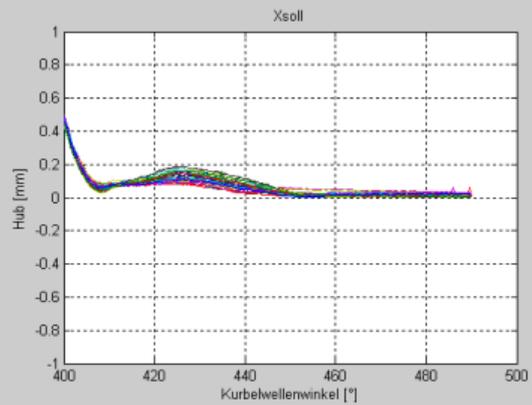
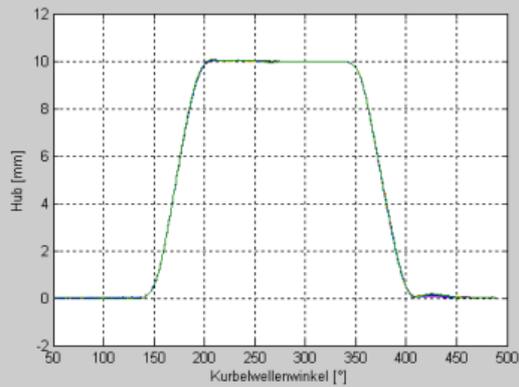
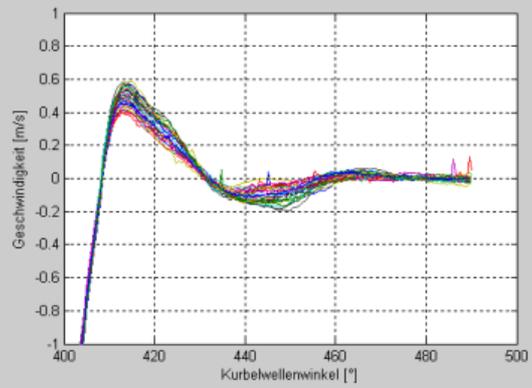
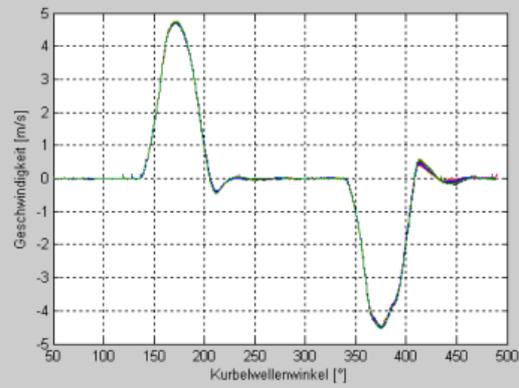


Abbildung 39: Zyklenvergleich RPA-VI

## 2.4 AP4: Sensorentwicklung

Für die Baustufen I bis IV der Aktuatorik wurde ein Ventilhubsensor der Firma *Micro-Epsilon* verwendet, dessen Messmethode auf dem Wirbelstromprinzip basiert. Der Sensor liefert ein analoges Ausgangssignal. Der Sensor ist am Ventil platziert und benötigt zur Ventilhubdetektion ein Target. In der Anfangslaufzeit des Projektes wurde dieser Sensor verwendet, um einen sicheren und temperaturunabhängigen Betrieb zu gewährleisten. Jedoch gab es schon zu Beginn des Projektes Konzepte für den Einsatz eines Drehwinkelsensors, jedoch wurden diese zeitlich zurückgestellt, um die Komplexität des Systems nicht zu erhöhen.

Nachteile des Ventilhubensors sind seine Platzierung, da die Konstruktion des Ventils teuer und aufwändig ist. Ein für den Aktuatorbetrieb notwendiges Spiel bspw. in der Lagerung wirkt sich für die Regelung des Systems nachteilig aus, da Messort und Krafteinleitungsort räumlich voneinander getrennt sind. Weiterhin ist das System für den Serieneinsatz kostspielig.

Folgende Gründe sprechen für den Einsatz eines Drehwinkelsensors:

- Lineare Kennlinie, da Schwenkwinkel des Rotors kleiner  $\alpha = 30^\circ$
- In die Aktuatorik integrierbar
- Funktion vorprüfbar während Aktuatormontage
- Regelung des Aktuators unempfindlich auf Spiel, z.B. in Lagern
- Reduzierung der Komplexität der Ventilkonstruktion
- Reduzierung der Serienkosten

Als Drehwinkelsensor kommen verschiedene Funktionalitätsprinzipien und mehrere Platzierungsmöglichkeiten in Frage. Die verschiedenen Sensoren werden hinsichtlich folgender Punkte bewertet:

- Zeitverzug
- Störverhalten
- Wiederholgenauigkeit
- Genauigkeit
- Auflösung
- Temperaturverhalten
- Einbaumöglichkeiten, Kosten
- Dauerbelastbarkeit

Die nachfolgenden Kapiteln beschreiben die physikalischen Grundzüge der Winkelbestimmung sowie die Bewertung der Sensoren.

## 2.4.1 Messung des magnetischen Feldes - Halleffekt

Der Hall-Effekt tritt in einem stromdurchflossenen elektrischen Leiter auf, der sich in einem Magnetfeld befindet, wobei sich ein elektrisches Feld aufbaut, das zur Stromrichtung und zum Magnetfeld senkrecht steht und das die auf die Elektronen wirkende Lorentzkraft kompensiert. Das elektrische Feld resultiert in einer elektrischen Spannung, welche direkt proportional der Stärke des magnetischen Feldes ist und somit zur relativen und absoluten Detektierung eines Drehwinkels verwendet werden kann.

Für den Ventiltriebsaktuator sollen käufliche Sensoren verwendet werden. Diese unterscheiden sich im Messaufbau und der im Chip integrierten Signalnachbehandlung. Die Integration des Chips im Aktuator gestaltet sich jedoch sehr ähnlich. Allen für den Ventiltriebsaktuator verwendbaren Sensoren ist folgendes gemein:

- Hallchip befindet sich innerhalb eines homogenen Magnetfeldes (spezielle Targetform), welches sich zusammen mit dem Rotor dreht.
- Geschlossenen Targetform => der Sensor ist gut gegen äußere magnetische Streufelder abgeschirmt
- Homogenes Magnetfeld => der Sensor ist relativ unempfindlich auf mechanische Toleranzen (radiale und axiale Positionstoleranzen führen nur zu einer geringen Änderung des Magnetfeldes).
- Ausgangssignal liegt als Differenzsignal vor
- Das Ausgangssignal des Hall-Chips beträgt 0.5V-4.5V (optimale Targetauslegung)
- Bandbreite: 30kHz
- Signalrauschen: 40mVpp

### 2.4.1.1 Valeo-Prinzip

Das Valeo-Prinzip verwendet einen Hallchip mit nur einer Messrichtung und ist somit nur zur Messung des relativen Drehwinkels geeignet. Um aus dem relativen auf den absoluten Drehwinkel schließen zu können, ist es notwendig, mechanische Anschläge der Rotorposition zu definieren, deren absoluter Drehwinkel aus dem CAD bekannt ist.

Vorteil dieser Messmethode ist die große Anzahl von käuflich erwerblichen Hallchips, für welche der Mess- und Targetaufbau angepasst werden kann. Abbildung 40 zeigt die Versuchsanwendung des Hallchips nach Valeo-Prinzip beim RPA-VI. In diesem Aufbau ist der Sensor noch extern an den Aktuator angeflanscht, um eine schnelle und einfache Demontage zu ermöglichen. Konzepte zur Sensorintegration sind vorhanden.

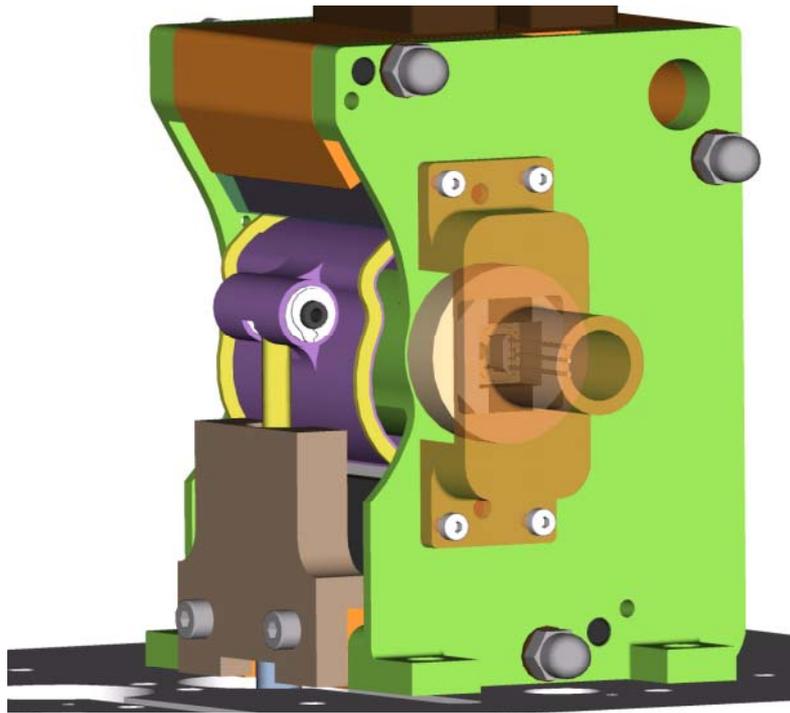


Abbildung 40: Versuchsaufbau RPA-IV mit Hallchip nach Valeo-Prinzip

Ein großer Vorteil des Valeo-Prinzips besteht in der umfangreichen Möglichkeiten der Gestaltung des Targets und der resultierenden Anpassbarkeit des Targets auf den jeweiligen Hallchip sowie die Einbaubedingungen. Beträchtliche Untersuchungen zur Targetgestaltung wurden mit dem Programm Maxwell3D unternommen, Abbildung 41 zeigt ein Ergebnis aus diesen Untersuchungen

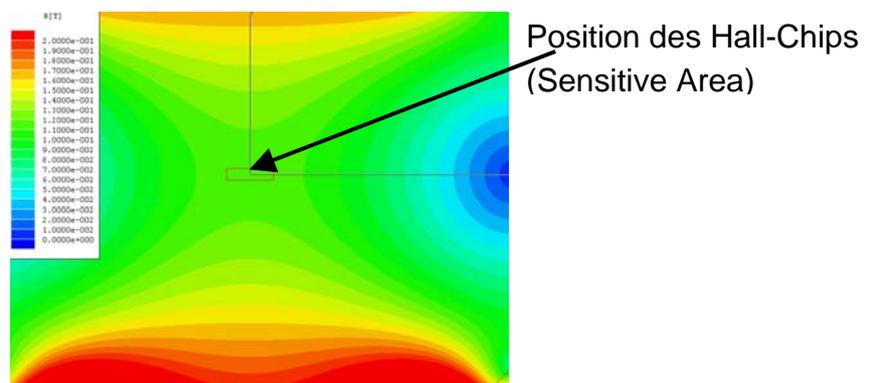
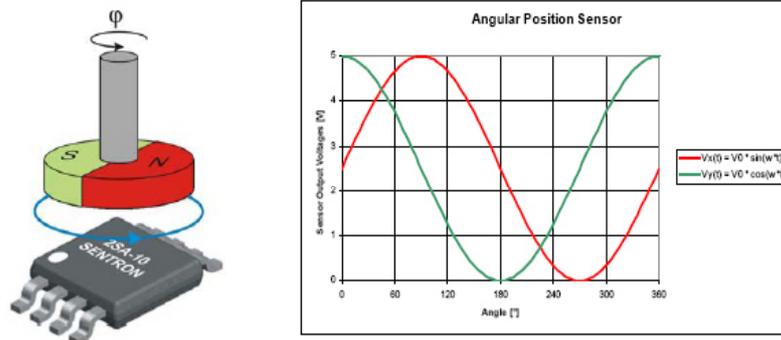


Abbildung 41: Flussdichte innerhalb des Targets (Valeo-Prinzip)

#### 2.4.1.2 Halleffekt – Sentron-Prinzip

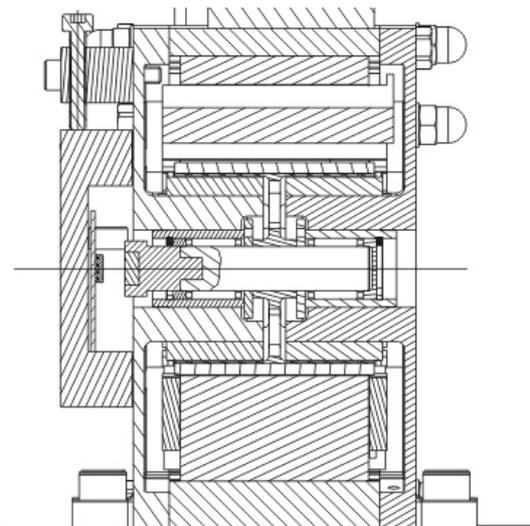
Das Sentron-Prinzip verwendet einen Hallchip zur Detektierung von zwei senkrecht aufeinander stehenden Messrichtungen und ist somit zur Messung des absoluten Drehwinkels geeignet.



**Abbildung 42: Sentron-Prinzip: Sensorprinzip und Ausgangssignal**

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 42 dargestellt und lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Hallchip befindet sich gegenüber einem Magneten welcher an der Rotorwelle befestigt ist und sich mit dieser dreht.
- Durch die Positionierung innerhalb des Innenjoches ist der Sensor gegen magnetische Streufelder abgeschirmt.
- Hallchip enthält zwei um 90° gedrehte Hallelemente, so dass je eine Cosinus- und eine Sinusspannung erzeugt werden. Hierdurch ist der Sensor relativ unempfindlich auf axiale Lagertoleranzen, da sich bei der Berechnung der Winkellage die Amplituden der Spannungen heraus kürzen.
- Das Messprinzip liefert eine Änderung der Ausgangsspannungen von ca. 0.8V bei einer Drehbewegung von 30°
- Sensorausgang kann für 35° optimiert werden



**Abbildung 43: Sentron-Prinzip: Aufbau zur Evaluierung des Messprinzips**

Derzeit existiert nur ein eine Bauform des Chips, welcher für eine 360°-Drehbewegung optimiert ist. Hierdurch entsteht der Nachteil, dass die Auflösung suboptimal ist, da in unsrem Falls nur eine ca. 30.°-Drehbewegung gefordert ist.

Allerdings lassen sich durch Verwendung mehrerer Pole bzw. Chips die Genauigkeit und leider auch die Komplexität erhöhen. Abbildung 43 zeigt den Versuchsaufbau zur Evaluierung des Messprinzips.

### 2.4.1.3 Halleffekt – Timken-Prinzip

Die Firma *Timken* benutzt zur Regelung einiger ihrer Motoren eine selbstentwickelte Hallelement-Einheit. Hierbei besitzt der Hallchip mehrere Hallelemente, um eine differentielle Messung zu ermöglichen.

Das Timken-Prinzip hat folgenden prinzipiellen Aufbau:

- Das Target besteht aus mehreren Magneten, welche über einen Hebelarm an der Rotorwelle oder direkt am Rotor befestigt werden.
- Hallchip generiert je eine Cosinus- und eine Sinusspannung am Sensorausgang
- Das Messprinzip liefert Ausgangsspannungen von ca. 1V bei einer Drehbewegung von  $35^\circ$
- Target und Chip werden für diese Anwendung speziell von Fa. *Timken* ausgelegt.
- Sensorprinzip ist automotive-erprobt und wird erfolgreich in rauen und gestörten Umgebungen eingesetzt.

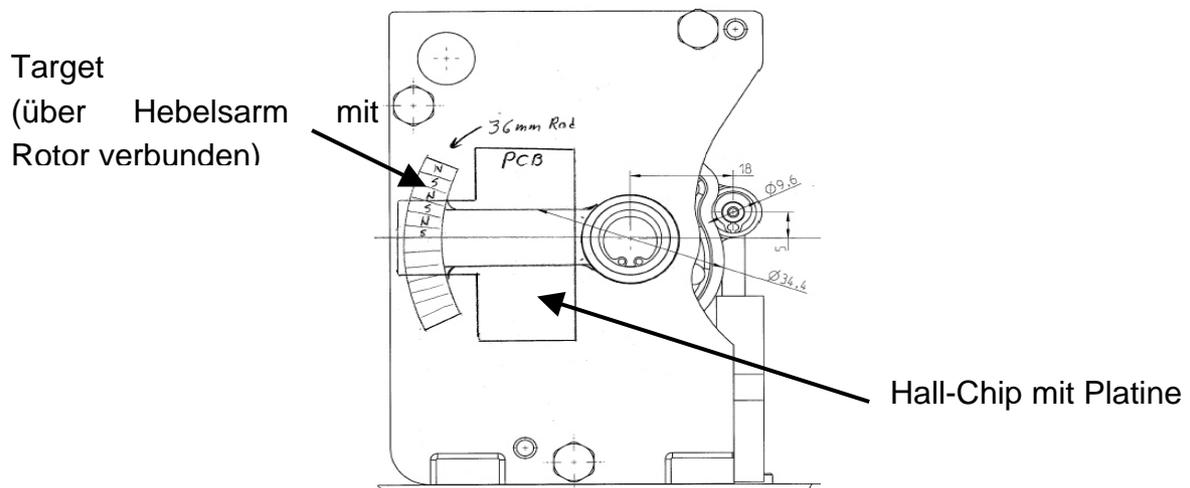


Abbildung 44: Timken-Prinzip: Aufbau zur Evaluierung des Messprinzips

Bei Verwendung des Timken-Prinzips entsteht eine gewisse Abhängigkeit vom Hersteller des Systems, welche sich nachteilig auf die Aktuatorenentwicklung auswirken kann. Weiterhin ist das System wesentlich aufwändiger als die beiden anderen vorgestellten Systeme.

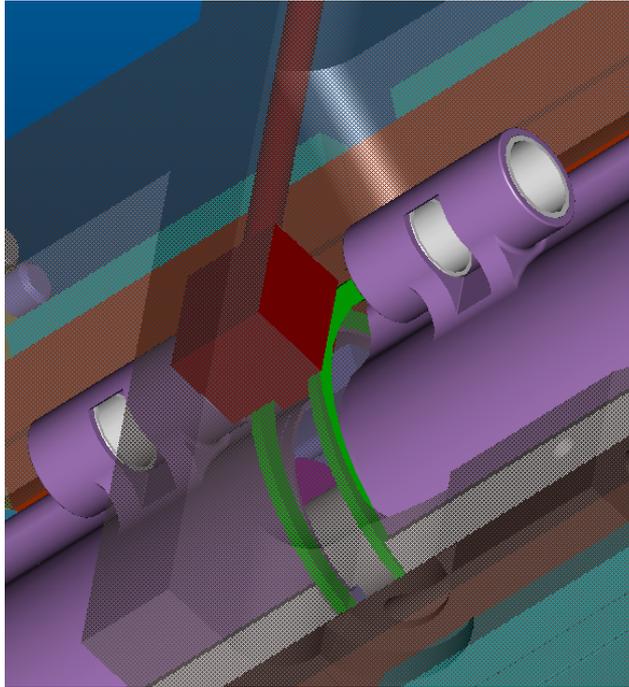


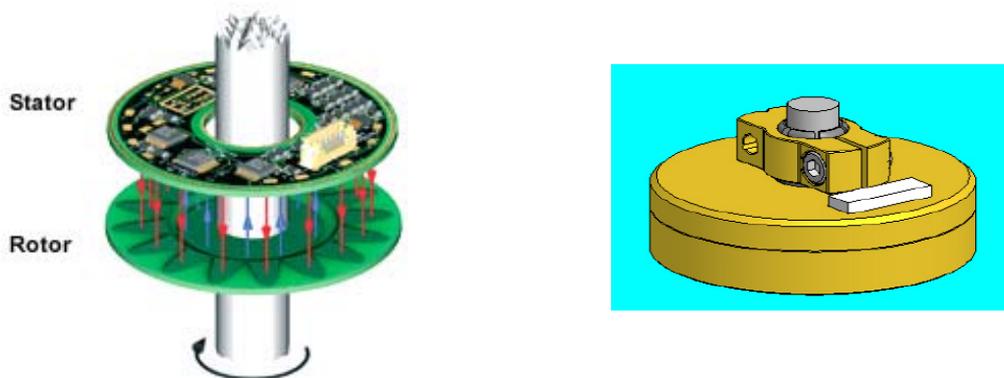
Abbildung 45: Timken-Prinzip: Konzeption für Serieneinsatz

## 2.4.2 Messung des elektrostatischen Feldes – Netzer Prinzip

Die Produkte der Firma *Netzer Precision Motion Sensors Ltd.*, siehe Abbildung 46 basieren auf ihrer revolutionären „elektrischen“ Positionserfassung. Die zur Messung ausgewertete physikalische Größe ist das elektrische Feld, das abhängig ist von der zu messenden Positionsänderung; maßgeblich ist dabei ein einzigartiges Schirmungskonzept gegen externe Einflüsse. Dies und andere in diesem System vorhandenen Effekte ermöglichen eine rotatorische und lineare Positionsmessung mit diesen Sensoren, die gegenüber traditionellen optischen Enkodern und magnetischen Resolvieren einige wesentliche Vorteile bieten:

- Hohe Genauigkeit und Auflösung
- Niedriger Energieverbrauch
- Immunität gegenüber magnetischen und elektrischen Feldern
- Große Toleranz gegenüber mechanischen Montagefehlern
- Großer Geschwindigkeitsbereich
- Flache Ausführung
- Hohe Lebensdauer
- Keine inhärenten Fehlermodi
- Weiter Temperaturbereich
- Überzeugendes Preis/Leistungsverhältnis
- Einfach zu modifizieren

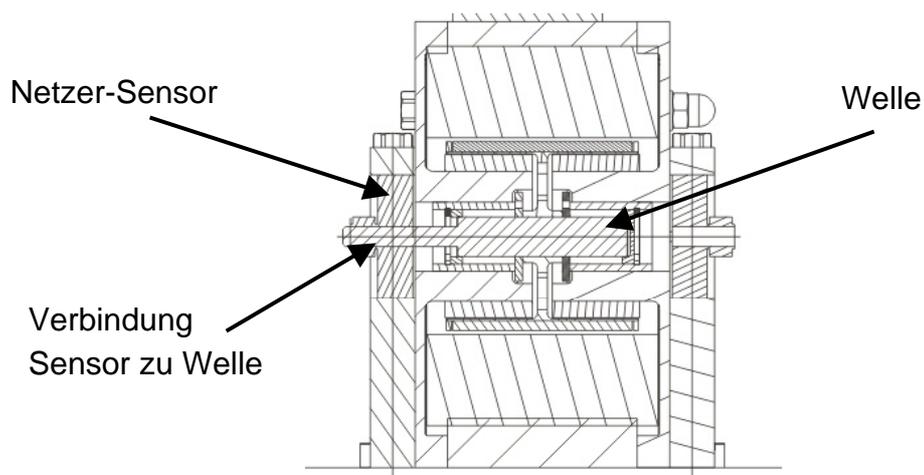
(Textquelle: Homepage des Herstellers)



**Abbildung 46: Sensor nach Netzer-Prinzip (Bildquelle: Homepage des Herstellers)**

Der prinzipielle Aufbau des Aktuators zusammen mit dem Netzer-Sensor lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Sensor und Target befinden sich in einem kompakten Gehäuse und das Target wird an der Rotorwelle angekoppelt
- Sensor generiert Cosinus- und Sinusspannung sowie eine Referenzspannung
- Das Messprinzip liefert 16 elektrische Umdrehungen pro mechanischer Umdrehung. Es ergeben sich somit ca. 1.5 elektrische Umdrehungen für 30° Schwenkwinkel des Rotors
- Sensorprinzip ist für Drehfeldmaschinen entwickelt worden, und ist in rauen und gestörten Umgebungen erprobt
- Sensorprinzip ist unempfindlich gegen axiales und radiales Spiel der Rotorwelle (laut Hersteller)
- Sensor kann für 30° optimiert werden



**Abbildung 47: Sensor nach Netzer-Prinzip (Bildquelle: Homepage des Herstellers)**

### **2.4.3 Messung der Lichtintensität – Elektrooptische Verfahren**

Alle Verfahren, welche nach einem optischen Verfahren den Drehwinkel bestimmen (abbildend und interferentiell), wurden schon im Vorfeld verworfen, da ein einwandfreier Dauerbetrieb in der ölnebelhaltigen und aggressiven Umgebung nahe des Verbrennungsmotors für chancenlos erachtet wird.

### **2.4.4 Messung des elektrischen Widerstands – Potentiometer**

Ebenso wurden alle Sensorprinzipien verworfen, welche einen reibungsbehafteten Schleifkontakt verwenden. Es wird angenommen, dass beim Verbrennungsmotor im Dauerbetrieb entstehenden Vibrationen zu einer nicht tolerierbaren Beeinflussung des Messsignals führen

### **2.4.5 Bewertung der verschiedenen Messprinzipien**

Wie im vorangegangenen Kapitel 2.4 erwähnt, wurden die beschriebenen Messprinzipien entsprechend der verschiedenen Kriterien bewertet. Abbildung 48 zeigt die Übersicht.

Aufgrund folgender Gründe wurde das Valeo-Prinzip als tragfähigstes und zielführendstes Konzept bewertet:

- Targetgestaltung für jeden Chip anpassbar (maximale Auflösung erreichbar)
- Implementierung einfach
- Kostengünstiges Serienkonzept

Aus der großen Anzahl von Herstellern von Hallelementen wurde die Firma *Allegro* ausgewählt, da diese die größte Bandbreite an unterschiedlichen Chips besitzt. In Zusammenarbeit mit dieser Firma und nach eingehenden Untersuchung der verschiedenen in Betracht gezogenen Chips wurde die Variante Allegro 1321 ausgewählt. Mit dieser Chipvariante wurden noch abschließend statistische Untersuchungen im Messaufbau vorgenommen.

### **2.4.6 Statistische Untersuchungen mit der verwendeten Sensorvariante**

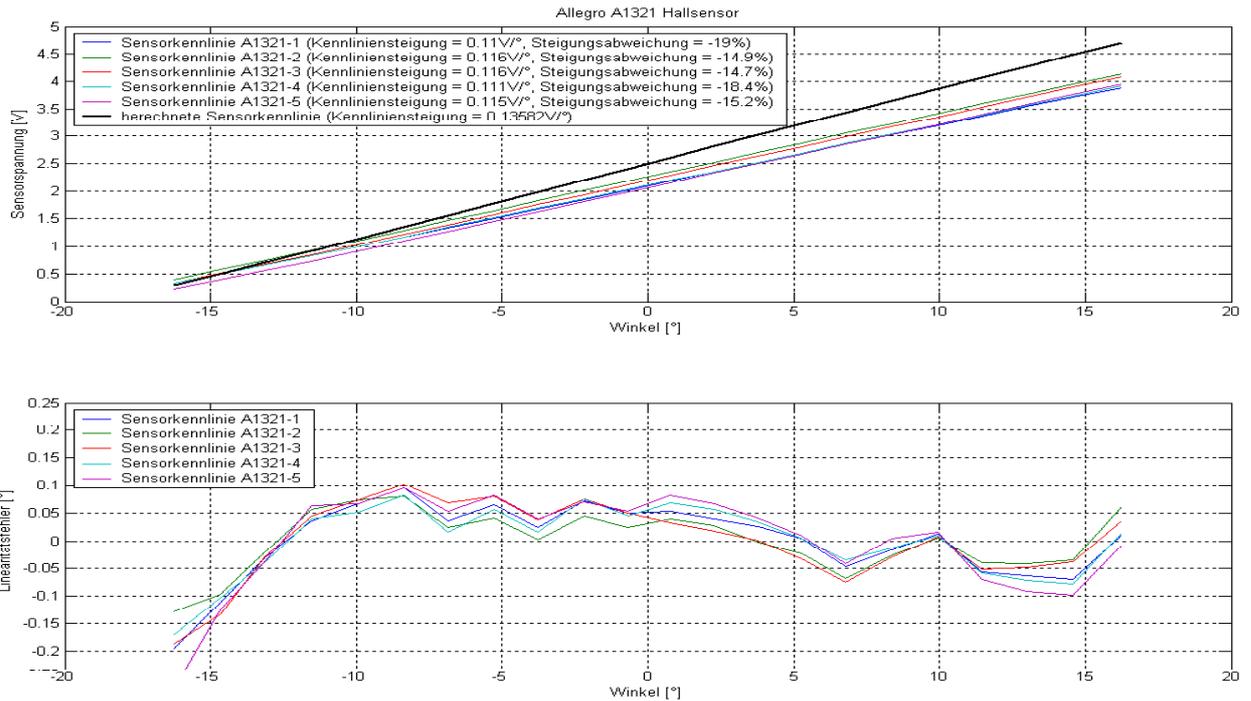
Um die Chipvariante abschließend beurteilen zu können wurden statistische Untersuchungen vorgenommen hinsichtlich Streuung verschiedener Exemplare eines Typs sowie Wiederholgenauigkeit der Regelung. Abbildung 49 zeigt die Kennlinien verschiedener Sensoren in Abhängigkeit des Drehwinkels bzw. der Stärke des mag-

netischen Felds. Die Streuung liegt bei ca. 4% der Sensorsteigung und ist somit kleiner als  $\pm 5\%$  laut Datenblatt. Die Streuung der Offsetspannung, d.h. ohne magnetisches Feld ( $B = 0T$ ) liegt im Bereich von 2.460 V bis 2.510 V und ist ebenso kleiner als laut Datenblatt. Als Fazit lässt sich trotzdem treffen, dass eine Vermessung der jeweiligen Sensorkennlinien unvermeidbar ist, da deren Streuung zu groß ist.

## Bewertung der Sensortypen (ohne Induktives Prinzip)

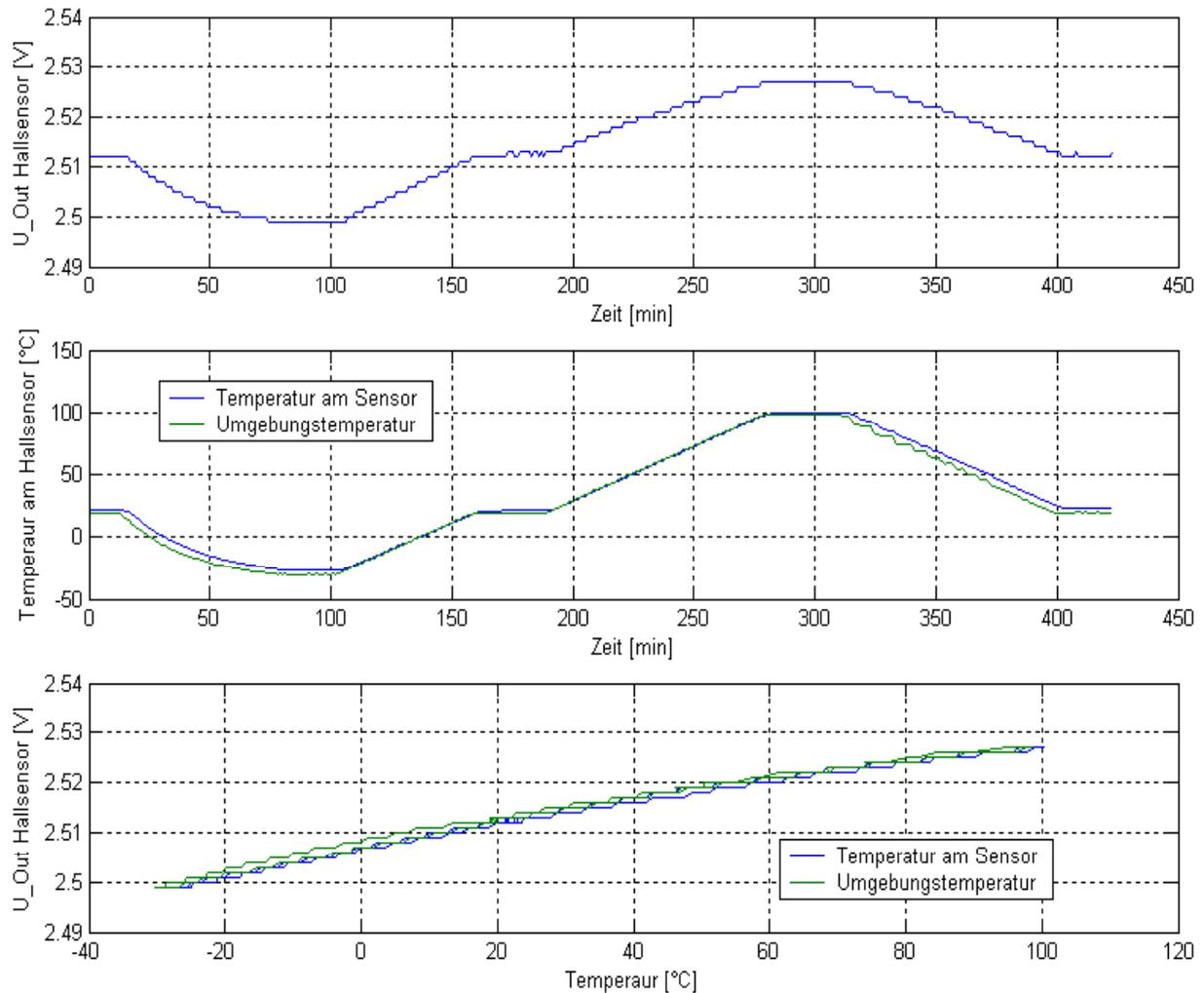
	Valeo-Prinzip 	Sentron-Prinzip 	Timken-Prinzip	Netzer-Prinzip 
<b>Zeitverzug</b>	+ abhängig vom Ausgangsfilter des Hall-Elements (10kHz- <u>Microgas</u> )	+ abhängig vom Ausgangsfilter des Hall-Elements (15kHz- <u>Sentron</u> )	Keine Aussage	- 8kHz-Filter des Ausgangssignal
<b>Störverhalten</b>	+ <b>sehr gute Abschirmung</b> + <b>unempfindlich auf Einbautoleranzen</b>	+/- empfindlicher auf Streufelder, jedoch gute Abschirmung durch Innenjoch + Unempfindlich auf axiales Spiel	+/- <b>störungsempfindlich</b> durch differenzielles Messprinzip; Störungsempfindlichkeit bei Überlagerung von Magnetfeldern und Einbautoleranzen unklar	+ <b>störungsempfindlich</b> gegen magnetische Streufelder + unempfindlich auf Einbautoleranzen und Lagerspiel
<b>Auflösung, Genauigkeit</b>	+ starkes Primärsignal - nur <u>Cos</u> -Signal - Kein differenzielles Verfahren (erweiterbar durch Einsatz mehrerer Hall-Elemente))	- Beschränkte Auflösung bei einfacherem N/S-Magnet (kann durch spezielle <u>Target-gestaltung</u> ggfs. verbessert werden) + <u>Cos</u> - und <u>Sin</u> -Signal	<b>++ sehr genaue Auflösung und Genauigkeit (auch bei erstem Prototyp zu erwarten)</b> + <u>Cos</u> - und <u>Sin</u> -Signal	- schwaches Primärsignal (prinzipbedingt durch kapazitives Verfahren) + <b>starkes Ausgangssignal (1-3V)</b> + <b>sehr genaue Auflösung und Genauigkeit lt. Herstellerangaben</b>
<b>Stabilität</b>	? abhängig von Eigenschaften des Hall-Chips			
<b>Temperaturverhalten</b>	+/- abhängig von Temperaturkompensation im Hall-Chip, Einsatzbereich bis 150°C unkritisch für Hall			
<b>Einbaumöglichkeit</b>	<b>++ sehr gut in Aktuator integrierbar</b>	<b>++ sehr gut in Aktuator integrierbar</b>		+/- Integration mit <u>Sensorredesign</u> möglich lt. Herstellerangaben
<b>Kosten</b>	+ einfacher Aufbau	<b>++ sehr einfacher Aufbau</b>	- Aufwändiger als <u>Valeo</u> und <u>Sentron</u> -Prinzip	+ lt. Herstellerangaben sehr kostengünstiges Prinzip (muss hinterfragt werden!)

Abbildung 48: Bewertungsmatrix zur Auswahl des Sensorprinzips



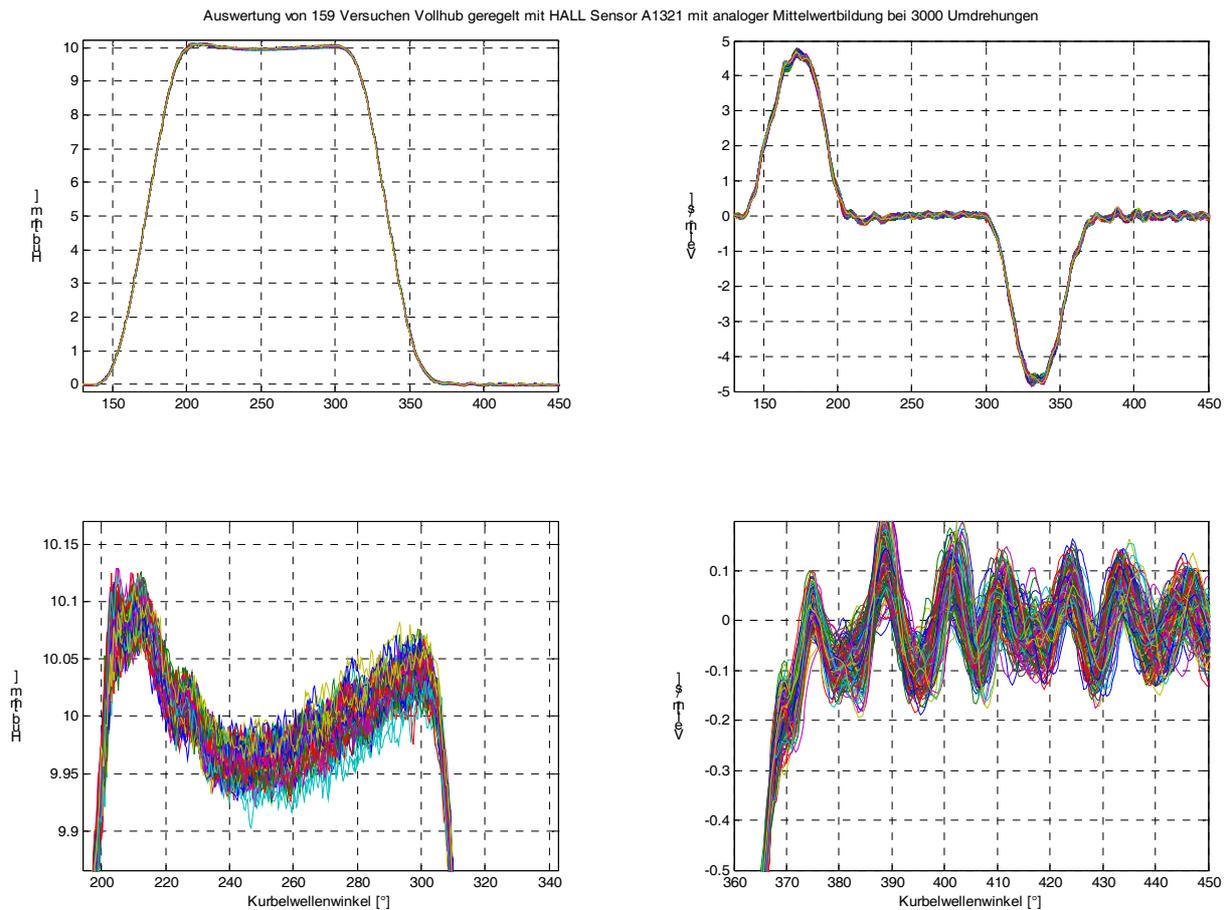
**Abbildung 49: Statische Vermessung: Streuung der Sensoren im Sm-Co-Target**

Weiterhin wurden Untersuchung vorgenommen, um eine zeitliche Drift des Sensor-signals festzustellen. Hierbei wurde über eine Dauer von ca. eine Referenzspannung am Sensor angelegt und die Sensorausgangsspannung zusammen mit der Referenzspannung gemessen. Die zeitliche Drift liegt bei ca.  $U_{\text{Drift}} = 0.03\text{V}$ . Bei einem nutzbaren Bereich der Sensorausgangsspannung von ca. 4 V liegt somit die Drift bei <1%. Die Drift der Sensorausgangsspannung über der Umgebungstemperatur liegt ebenso bei <1%. Da die Regelgüte jedoch um den Faktor 4 kleiner sein soll, bedeutet dies, dass das Temperaturverhalten des Sensors exemplarisch vermessen werden muss und in der Sensorkennlinie berücksichtigt werden muss.



**Abbildung 50: Statische Vermessung: Temperaturverhalten ohne Feld ( $B=0T$ )**

Weiterhin wurde eine statistische Auswertung über eine große Anzahl von Hubereignissen durchgeführt, siehe Abbildung 51. Hierbei wurde das Verhalten verglichen mit dem bislang verwendeten Wirbelstromsensor. Die statistischen Untersuchungen zeigen, dass sich mit dem Wirbelstromsensor das beste Regelergebnis erzielen lässt, wie Abbildung 52 zeigt. Die Ergebnisse mit dem Hallsensor sind aufgrund des Sensorrauschens schlechter, jedoch noch immer im Rahmen. Der Hallsensor hat keinen Zeitverzug gegenüber den Wirbelstromsensor ist somit Istzeit-getreu. Auch zeigt sich, dass in der derzeitigen Einbauposition der Hallsensor unempfindlich ist gegenüber externen Störungen. vertretbar



**Abbildung 51: Statische Vermessung: Untersuchungen zum Regelverhalten**

	Regelabweichung (Peak-Peak) bei Maximalhub [ $\mu\text{m}$ ]	Auftreffgeschwindigkeit [ m/s ]	Öffnungswinkel, gemessen bei 0.5mm [ $^{\circ}$ ]	Schließwinkel gemessen bei 0.5mm [ $^{\circ}$ ]
Wirbelstromsensor (Micro-Epsilon)	125	MW: -0.211 $\sigma$ : 0.073	MW: 149.42 $\sigma$ : 0.03	MW 378.90 $\sigma$ : 0.07
Hallsensor Allegro A1321	200	MW: -0.089 $\sigma$ : 0.044	MW: 149.7 $\sigma$ : 0.112	MW: 358.76 $\sigma$ : 0.168

**Abbildung 52: Statische Vermessung: Vergleich Hallsensor zu Wirbelstromsensor**

**Fazit:**

Die Verwendung eines Hallsensors ist ein kostengünstiges und zielführendes Konzept zur Detektierung des Drehwinkels. Durch die selbstabschirmende Konstruktion des Targets ist die Sensorausgangsspannung unabhängig von äußeren Einflüssen. Die Bauvolumen und die resultierende bewegte Masse ist gering. Vorteilhaft ist die vorzügliche Anpassbarkeit des Sensors an die jeweiligen Randbedingungen durch Auslegung des zugehörigen Targets. Die statistischen Auswertungen zeigen ein akzeptables Ergebnis. Allerdings sind die statistischen Streuungen innerhalb der Baureihe so groß, dass empfohlen wird, die jeweilige Sensorkennlinie zu vermessen.

## **2.5 AP 5: Systemidentifikation**

Zur Erhöhung der Güte der Lageregelung sowie zur Verringerung der mechanischen Verluste wurde versucht die exakte Identifikation der zu regelnden Strecke voranzutreiben. Die Resultat sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

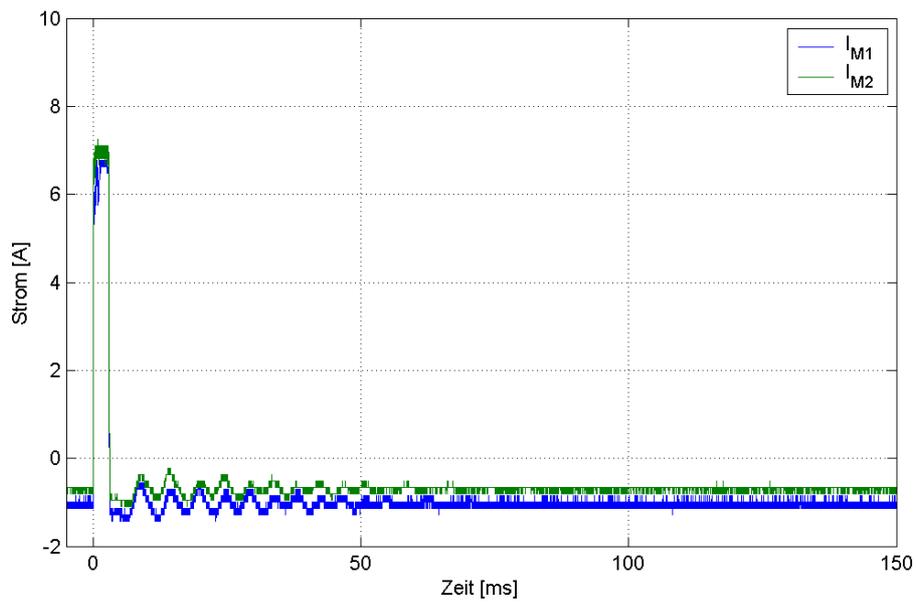
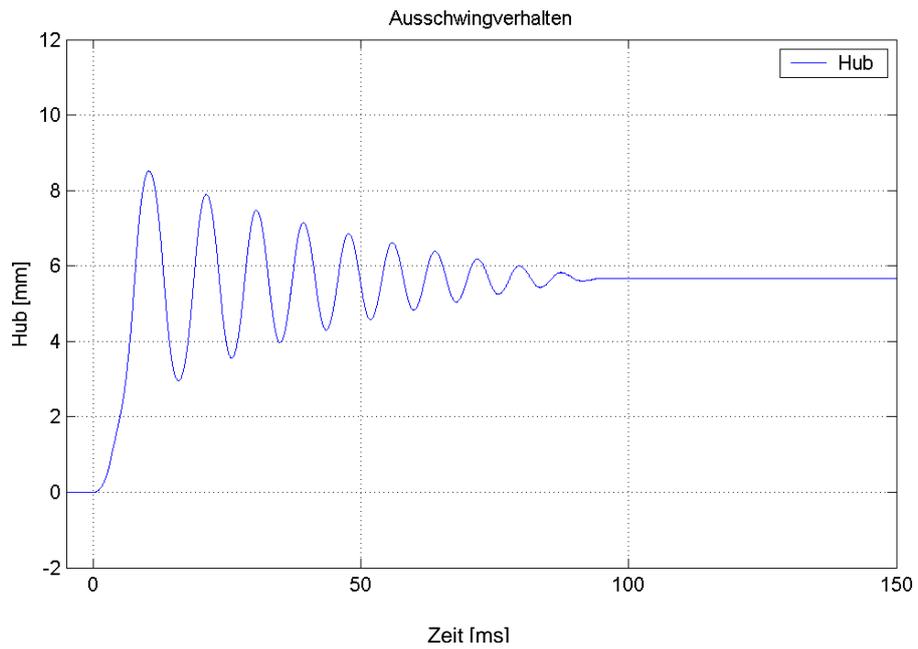
### **2.5.1 Verminderung der Wirbelstromverluste**

Um die Wirbelstromverluste zu minimieren, welche zum Teil durch die Schaltmodulation der Leistungselektronik verursacht werden, wurde das Schaltkonzept verändert. In den Vorgängerbaureihen wurden die H-Brücken der Leistungselektronik so getaktet, dass während eines Duty-Cycles das gesamte positive Strompotential mit der induktiven Last verbunden wurde. Die restliche Zeit der Schaltperiodendauer wurde die Last umgepolt und wieder mit dem gesamten positiven Potential verbunden. Das neue Schaltkonzept hingegen sieht vor, den Rest der Schaltperiodendauer nach Ablauf des Duty-Cycles zum Freilauf der Induktivität zu nutzen. So kann die Stromschwankungen der Leistungselektronik verringert werden, was dazu führt, dass sich die Eisenverluste und somit Gesamtleistungsverluste ebenfalls verringern.

### **2.5.2 Identifikation der Strecke**

Um den Reibkoeffizienten besser bestimmen zu können, wurde ein Ausschwingversuch durchgeführt. Hierbei wurde der Rotor vom oberen Anschlag aus (Ventil-Geschlossen-Stellung) mit einem kurzen Stromimpuls auf beide Magnetkreise in Richtung der stabilen Mittelstellung (Hub ungefähr 5mm) beschleunigt, so dass das Ventil in die Mittelstellung einschwingt. Das Ergebnis ist in Abbildung 53 dargestellt.

Aus den Versuchsergebnissen konnte anhand der Schwingungsdämpfung der Reibkoeffizienten bestimmt werden. Es konnte festgehalten werden, dass die Resultierende Dämpfung verursacht durch die Rollreibung der 4 Wälzlager und der Gleitreibung zwischen Ventilschaft und -führung im Rahmen der vorangegangenen Abschätzungen liegt und die verursachten Verluste durchaus vertretbar sind. Außerdem konnte mittels des Ausschwingversuchs die Periodendauer der Schwingung ermittelt werden, welche in Verbindung mit der tatsächlich bewegten Masse zur repräsentativen Federkonstante der Strecke führte. Durch die Bestimmung der genannten Systemgrößen konnte der Störgrößenbeobachter, welcher zur Abschätzung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Ventils aus der momentanen Ventillage verwendet wird, besser angepasst werden, was zu genaueren Messresultaten führte.



**Abbildung 53: Ausschwingversuch zur Bestimmung der Systemkoeffizienten**

### **2.5.3 Erhöhung der Güte der Lageregelung**

Um die Güte der Lageregelung zu erhöhen, wurden die nachfolgenden Maßnahmen umgesetzt:

- Stromregelung wurde digital ausgeführt
- Der Lageregler wurde um eine Beschleunigungskomponente ergänzt
- Der integrale Anteil des Positionsreglers wurde aufgesplittet in Hub-Intervalle

In der vorangegangenen Baureihe wurde die Stromregelung noch analog ausgeführt. Um die Flexibilität des Stromreglers zu erhöhen, schwenkte man nun um auf einen digitalen PI-Regler. Dem digitalen Stromregler wurde außerdem eine digital realisierte I<sup>2</sup>T-Abschaltung hinzugefügt, welche aufgrund der Integration des Stromquadrats über die Zeit weniger anfällig war auf Spannungsspitzen der Shuntmessung, verursacht durch parasitäre Impedanzen im Signalweg, wie bei seiner analogen Vorgängervariante.

Um die Lageregelung zu verbessern wurde ferner eine proportional ausgeführte Beschleunigungsregelung unterlagert, deren Zeitkonstante im Vergleich zur Lageregelung erheblich kleiner ist. So kann schneller auf Regelabweichungen bezüglich der Position reagiert werden.

Erfahrungen aus Messungen mit früheren RPA-Baureihen haben weiterhin gezeigt, dass die Strecke erheblich viele Nichtlinearitäten aufweist. Um diesen Nichtlinearitäten entgegenzuwirken wurde der integrale Anteil der Positionsregelung aufgesplittet in verschiedene Hubintervalle. So kann positionsabhängig immer mit dem maximalen integralen Anteil gearbeitet werden ohne ein Aufschwingen des Systems zu riskieren. Mittels diesem integralen Anteil wurde auch die Adaption umgesetzt.

### **2.5.4 Vergleich zwischen Simulation und Messung**

Nachfolgend soll ein detaillierter Vergleich zwischen der entworfenen Simulation und dem realen Aktuator angestellt werden, da so sichergestellt werden kann, dass alle relevanten Parameter des Aktuators im Modell berücksichtigt wurden, was für spätere RPA-Entwürfe von entscheidender Wichtigkeit ist.

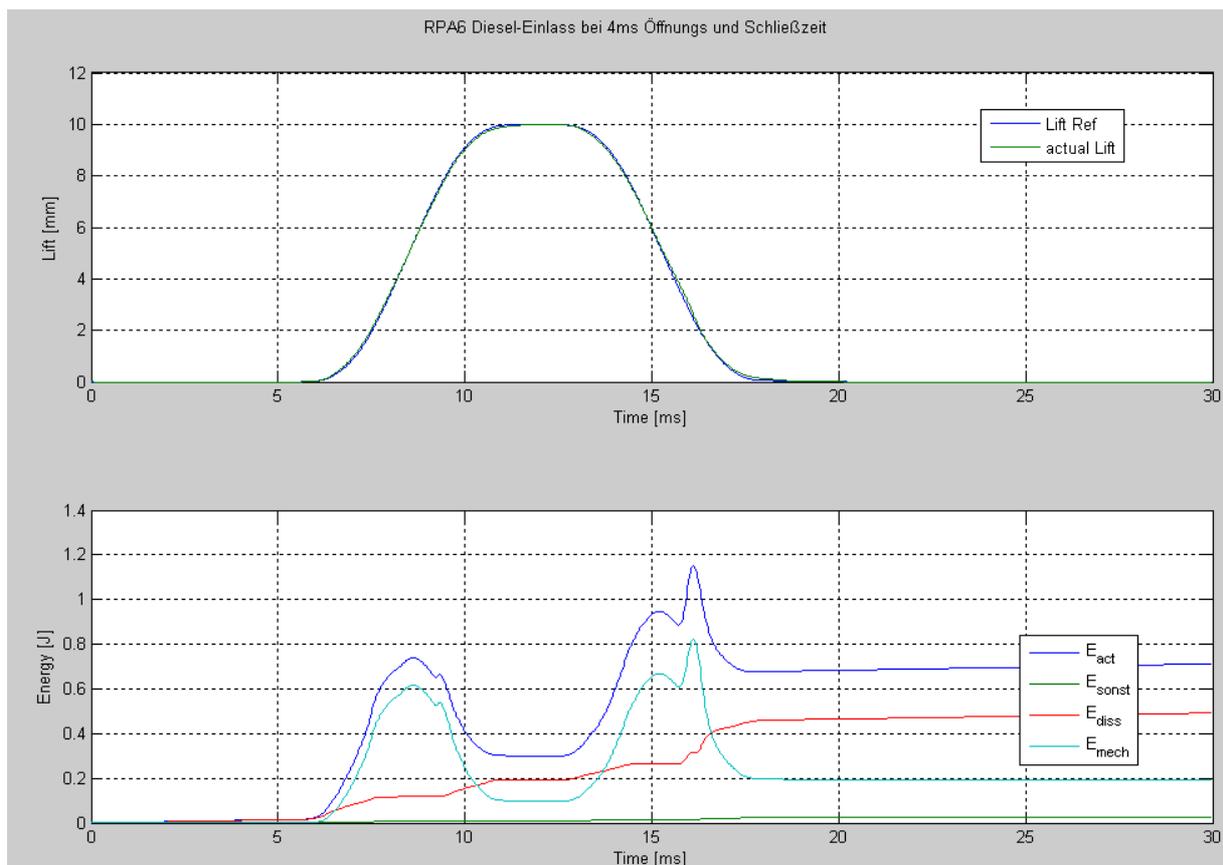
#### ***2.5.4.1 Vergleich der dissipierten Leistungen im Aktuator***

In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind das simulierte und real gemessene Betriebsverhalten des Aktuators für eine Öffnungs- und Schließzeit von 4 ms abgebildet. Das simulierte Betriebsverhalten wurde für eine Kurbelwellendrehzahl von 4000 U/min

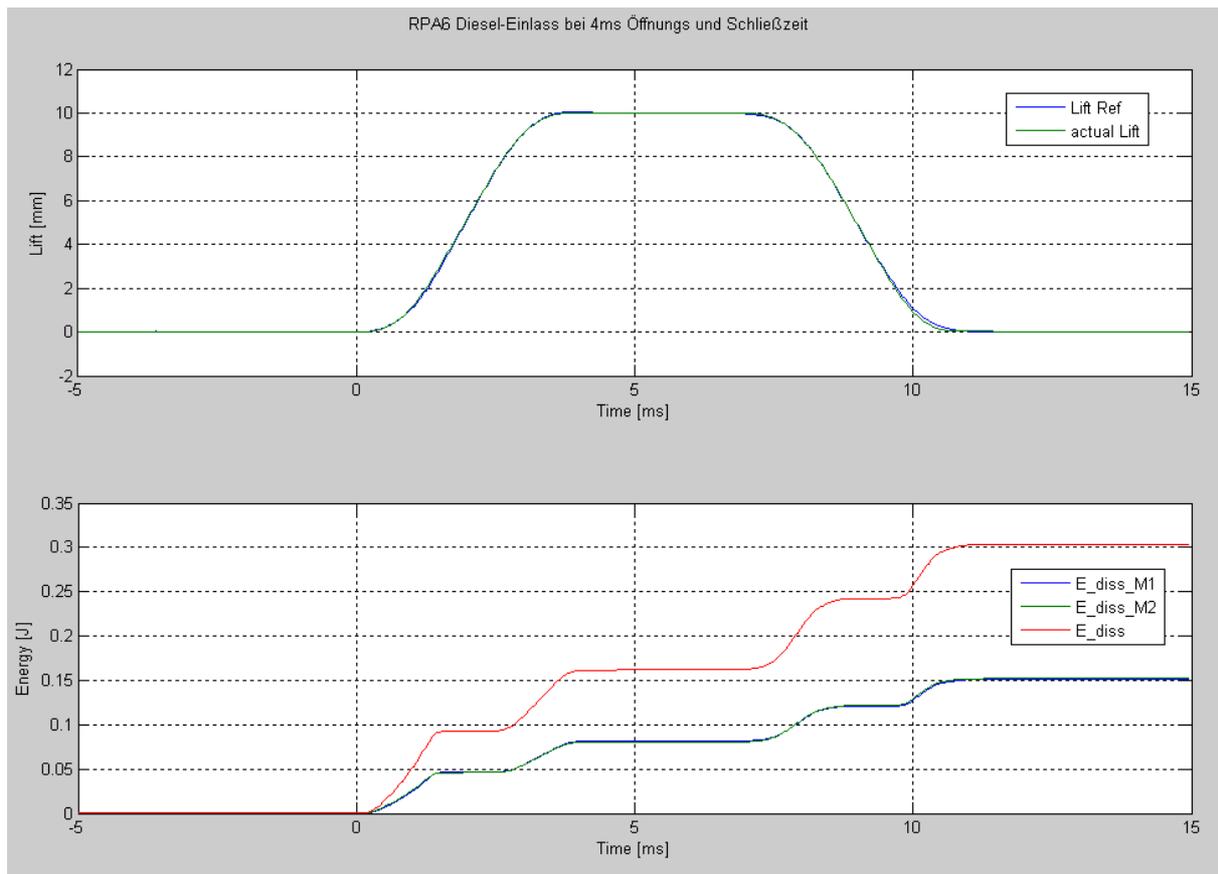
aufgenommen, das gemessene für 5000 U/min. Da jedoch die gleiche Trajektorie als Positionssollwertvorgabe dient, hat die unterschiedliche Drehzahl keinen Einfluss auf den Energie-Zeit-Verlauf, sondern lediglich auf die aufgenommene Leistung, siehe Abbildung 61. Der Vergleich zeigt, dass die simulierte Regelgüte bezüglich der Position sehr gut erreicht wurde. Den Energieverläufen kann man entnehmen, dass die Signalform gut nachgebildet wird. Der Betrag der Energien unterscheidet sich stark, da die weiterentwickelte Leistungselektronik nicht im Simulink-Modell erfasst wurde. Auf eine Implementierung der veränderten Schaltmodulation in der Leistungselektronik wurden aus folgenden Gründen verzichtet:

- Die in Kapitel 2.7 beschriebene weiterentwickelte Leistungselektronik stellt einen Zwischenschritt dar. Das Ziel ist nach wie vor eine integrierte Elektronik
- Die weiterentwickelte Leistungselektronik befindet sich momentan noch in der Erprobungsphase und muss noch weiter bezüglich Funktion verifiziert werden.

Dies ist jedoch ein weiterer Beweis für die Verbesserungen, welche die variierte Leistungselektronik mit sich bringt.



**Abbildung 54: Simuliertes Ventiltriebverhalten**



**Abbildung 55: Gemessenes Ventiltriebverhalten**

#### **2.5.4.2 Vergleich der simulierten und gemessenen Kraftverläufe**

In Abbildung 56 und Abbildung 58 sind die simulierten und gemessenen Magnetkraftverläufe entlang des Hubs mit repräsentativen Spulenstromwerten als Parameter dargestellt. Es kann abgeleitet werden, dass die Simulation und die gemessenen Werte sich beim RPA-V erstaunlich gut decken. Beim RPA-VI ist eine gewisse Abweichung zu erkennen. Ursache der Diskrepanz ist ein neu eingeführtes Magnetmaterial, dessen Eigenschaften hinsichtlich Streuverhalten im wesentlichen noch nicht durch eigenen Messungen verifiziert waren, so dass die FEM-Simulation noch nicht entsprechend angepasst werden konnte. Hauptgrund für den Einsatz des neuen Magnetmaterials war die entscheidend höhere Sättigungspolarisation und somit die höhere Kraftausbeute bei gleicher Bestromung des Aktuators, welche in Abbildung 57 (RPA-V) und Abbildung 59 (RPA-VI) verglichen werden kann.

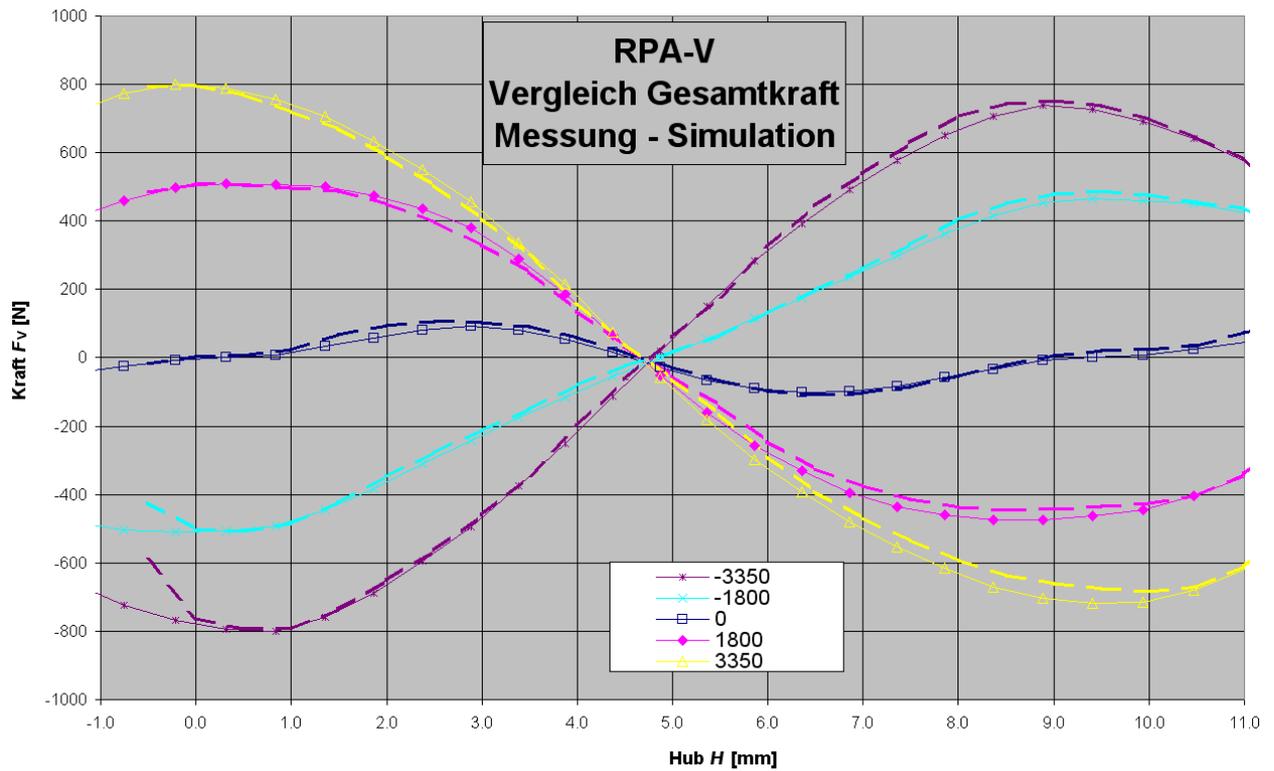


Abbildung 56: RPA-V: Vergleich Simulation – Messung der Ventilkraft (Simulation)

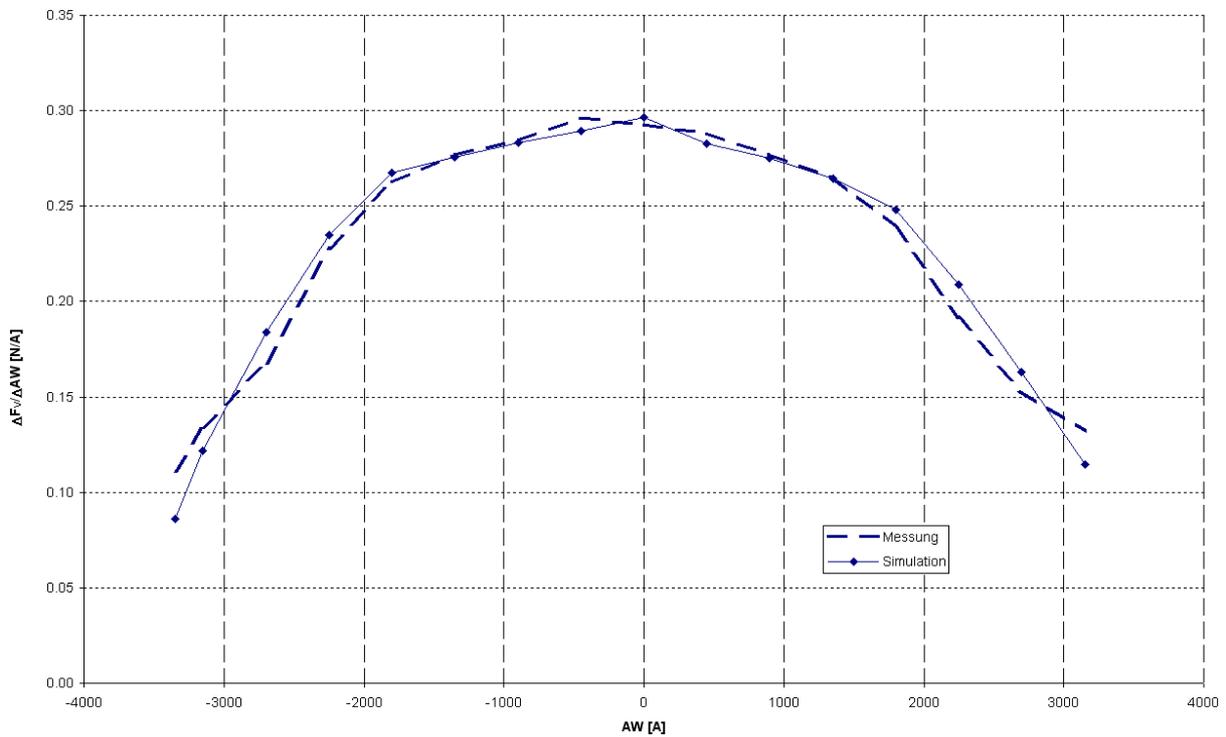
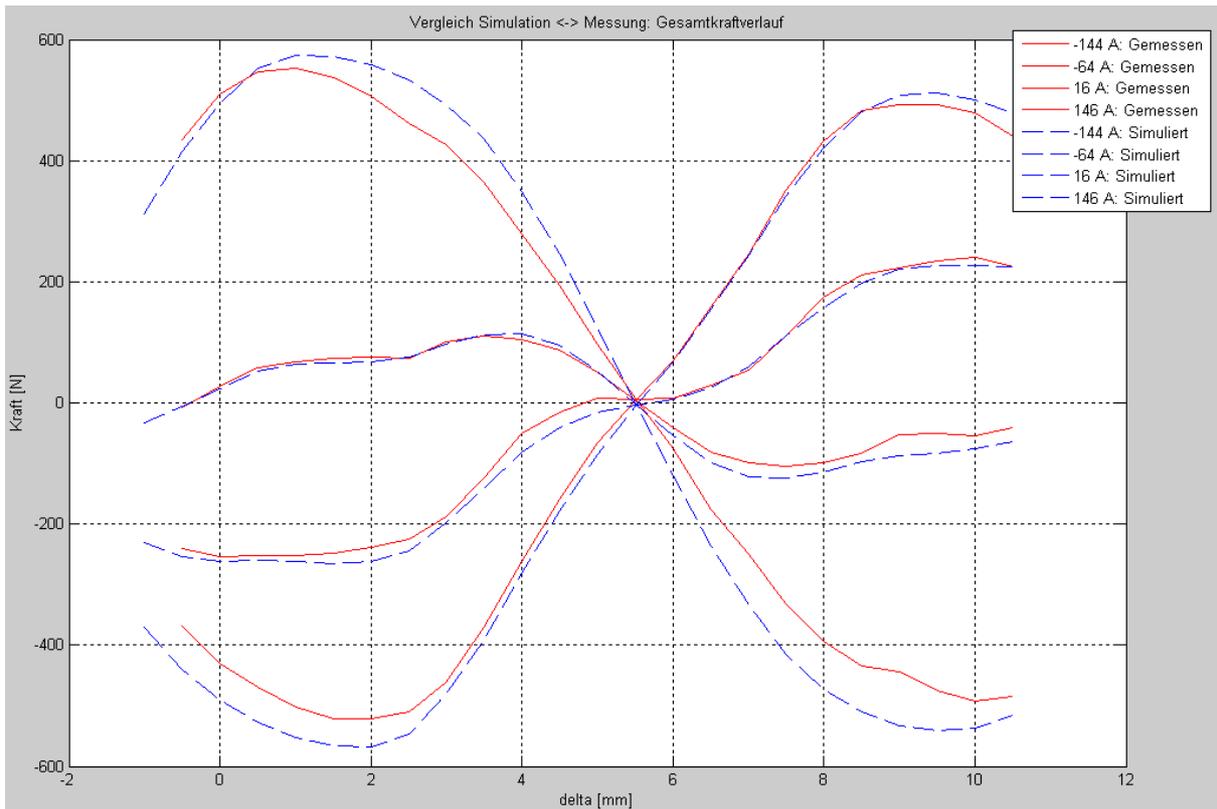
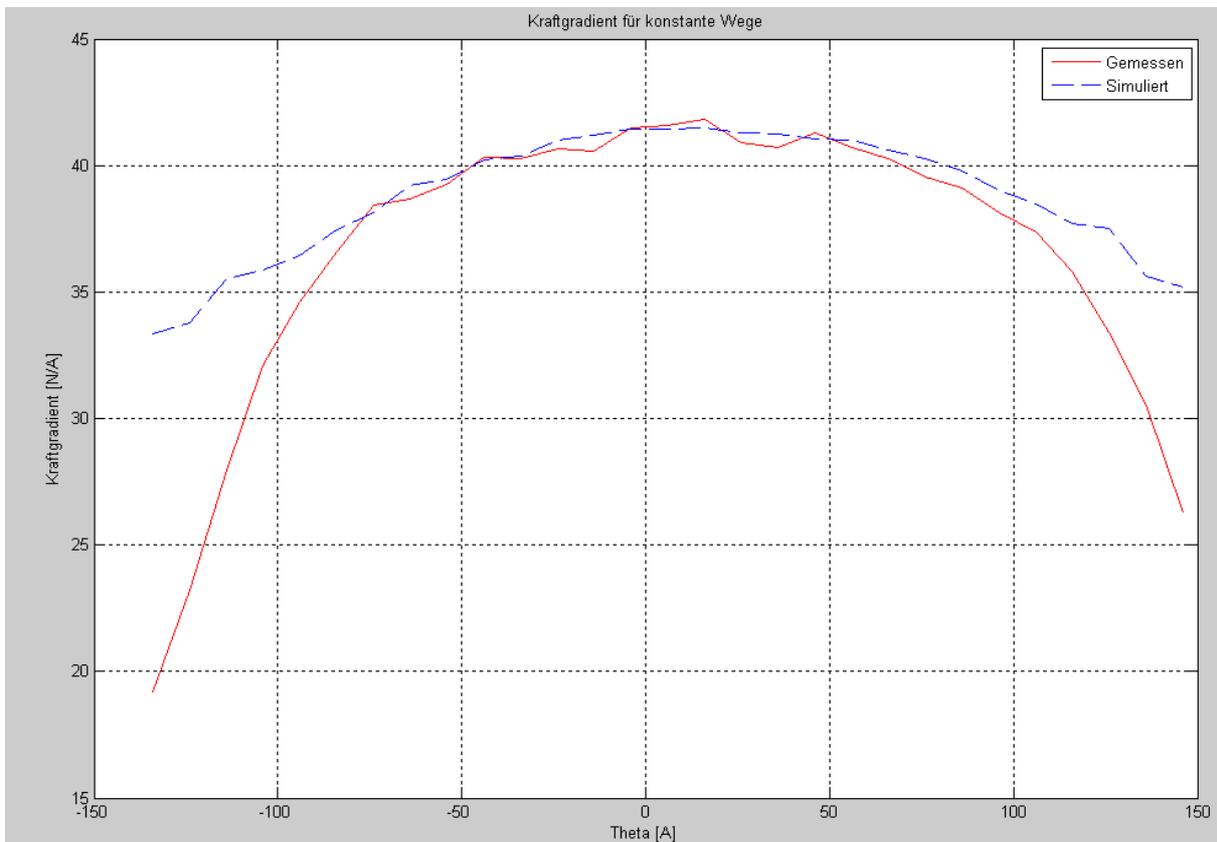


Abbildung 57: RPA-V: Vergleich Simulation – Messung der Sättigung (Simulation)



**Abbildung 58: RPA-VI: Vergleich Simulation – Messung der Ventilkraft (Messung)**



**Abbildung 59: RPA-VI: Vergleich Simulation – Messung der Sättigung (Messung)**

### 2.5.4.3 Gemessene Leistungsaufnahme

In Abbildung 60 und Abbildung 61 sind die aufgenommenen Leistung exemplarisch für die RPA-VI-Variante Diesel-Einlass und Otto-Auslass dargestellt. Die Kurven lassen sich linear verlängern. Der Einlassaktuator benötigt beispielsweise bei einer Drehzahl von  $n = 600$  U/min weniger Leistung als 8 W (Meilenstein 1). Es kann als Ergebnis festgehalten werden, dass ein Batteriebetrieb im Fahrzeug keine weitere Bordnetzentwicklung voraus gehen muss, da die aufgenommenen Leistungen stets kleiner als 50 W pro Ventil sind. Man könnte die Aktoren also bedenkenlos mit dem momentanen Design in ein Serienfahrzeug integrieren.

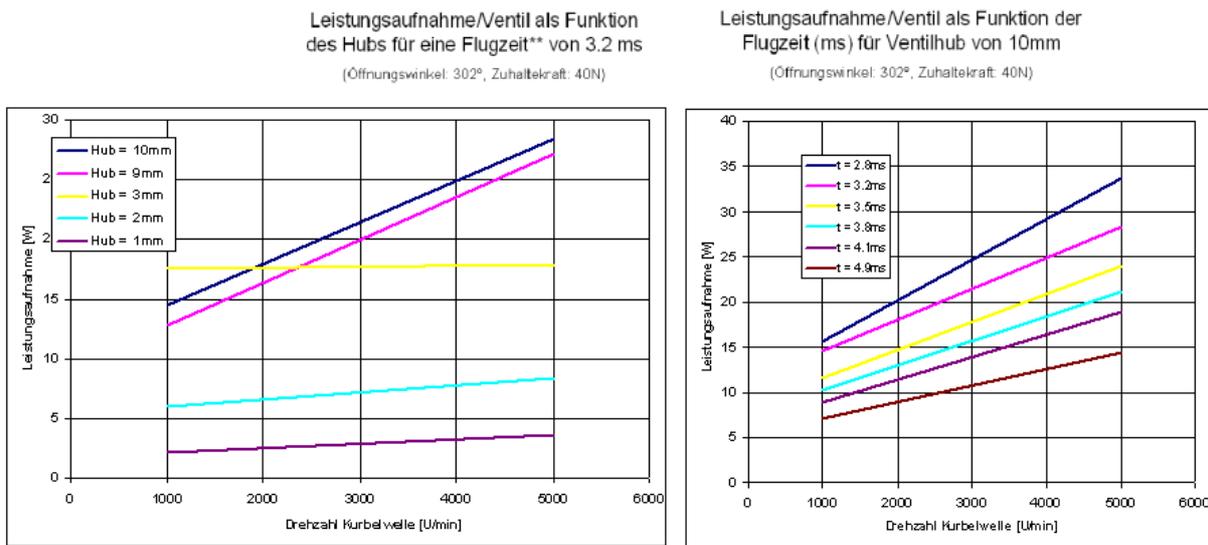
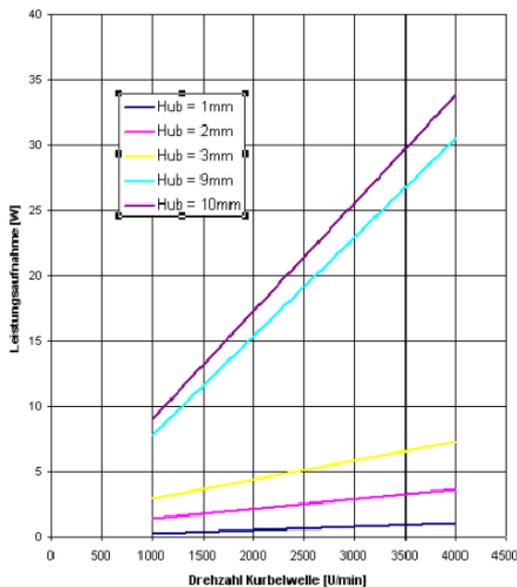


Abbildung 60: Gemessene Leistungsaufnahme RPA-VI (Otto-Auslass)

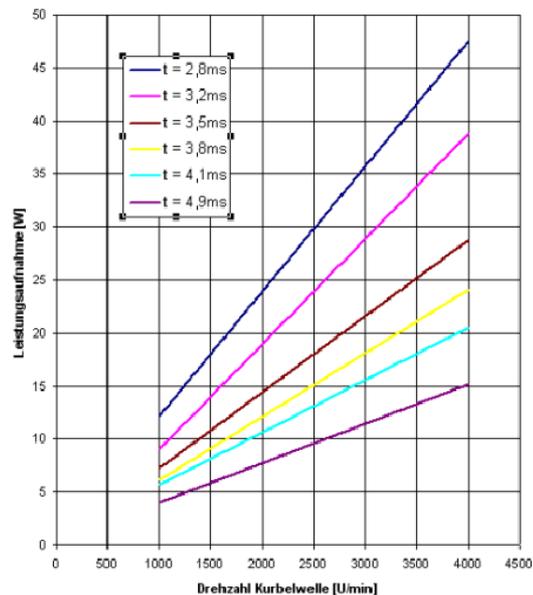
Leistungsaufnahme/Ventil als Funktion des Hubs für eine Flugzeit\*\* von 3.2 ms

(Öffnungswinkel: 302°, Zuhaltkraft: 40N)



Leistungsaufnahme/Ventil als Funktion der Flugzeit (ms) für Ventilhub von 10mm

(Öffnungswinkel: 302°, Zuhaltkraft: 40N)



\* Umgebungstemperatur: 20°C

\*\* Flugzeit wird definiert als Zeit zwischen 3% and 97% des Hubs, Maximalhub: 10mm

Abbildung 61: Gemessene Leistungsaufnahme RPA-VI (Diesel-Einlass)

## 2.6 AP6: Entwicklung thermisches Modell

Die hohen Verlusteinträge beim Betrieb der Aktuatoren im hohen Drehzahlbereich und gegen hohen Zylinderinnendruck und die hieraus entstehende Erwärmung der Aktuatoren führen zu dem Schluss, dass eine aktive Kühlung zum Schutz des Systems gegen Überhitzung unerlässlich ist. Zu diesem Zweck wurde ein thermisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe die Verlustbilanzierung und die thermischen Leitwerte und somit die Maximaltemperaturen bestimmt werden können.

Um die Temperaturverteilung in der betrachteten Maschine bestimmen zu können wurde sie in ein Netzwerk aus mehreren thermischen Massen aufgeteilt. Diese Massen repräsentieren verschiedene Motorkomponenten und werden, um eine diskrete Vernetzung zu ermöglichen, auf Punkte reduziert. Aus Volumen, Dichte und spezifischer Wärmekapazität kann für jeden Massepunkt eine zugehörige absolute Wärmekapazität berechnet werden, die letztendlich beschreibt, um wie viel Grad sich das Bauteil erwärmt, wenn man eine bestimmte Energiemenge zuführt. Die verschiedenen Volumina sind meist durch geometrische Grundkörper abstrahiert und angenähert. Da weiterhin bei diesem diskreten Aufbau die räumliche Anordnung der einzelnen Massepunkte zueinander keine sinnvolle Information mehr darstellt, muss auch die thermische Verkopplung der einzelnen Wärmekapazitäten abstrahiert werden. Verbunden werden die thermischen Massen deshalb über Wärmeleitwerte, die sich

aus Kontaktfläche, Wärmeleitfähigkeit und mittlerer Weglänge bestimmen. Abbildung 62 zeigt das dem RPA zugrundeliegende thermische Netzwerk.

### **2.6.1 Thermische Massen**

Der erste Schritt bei der Erstellung des thermischen Netzwerks ist die Festlegung der einzelnen Punktmassen. Um das Modell übersichtlich zu gestalten, und um Redundanz zu vermeiden, sollte die Zahl der Punktmassen eher gering gehalten werden. Dazu können Symmetrien ausgenutzt werden und auch Bereiche die etwa gleiche Temperatur aufweisen zusammen gefasst werden. Die unterschiedlichen Verlusteinträge werden anhand theoretischer Ansätze modelliert und als ebenso skalare Größen in die einzelnen Punktmassen eingespeist. Der hier betrachtete Glockenläufer-Motor wird der Übersicht halber zunächst in die drei übergeordneten Bereiche Außenstator, Rotor und Innenstator aufgeteilt. Diese Vorunterteilung wurde entlang der beiden Luftspalte vorgenommen, wobei jeder dieser Bereiche als eine Baugruppe betrachtet werden kann, während alle darin enthaltenen Punktmassen als rotations-symmetrisch betrachtet werden. Der Außenstator umfasst Gehäuse, Außenjoch, Zähne und Wicklung. Alle hier genannten Wärmekapazitäten sind thermisch relativ eng miteinander gekoppelt. Das Gehäuse wurde für das thermische Modell auf ein Aluminiumhalbzylinder reduziert, der die Aufnahme des Außenjochs bildet.

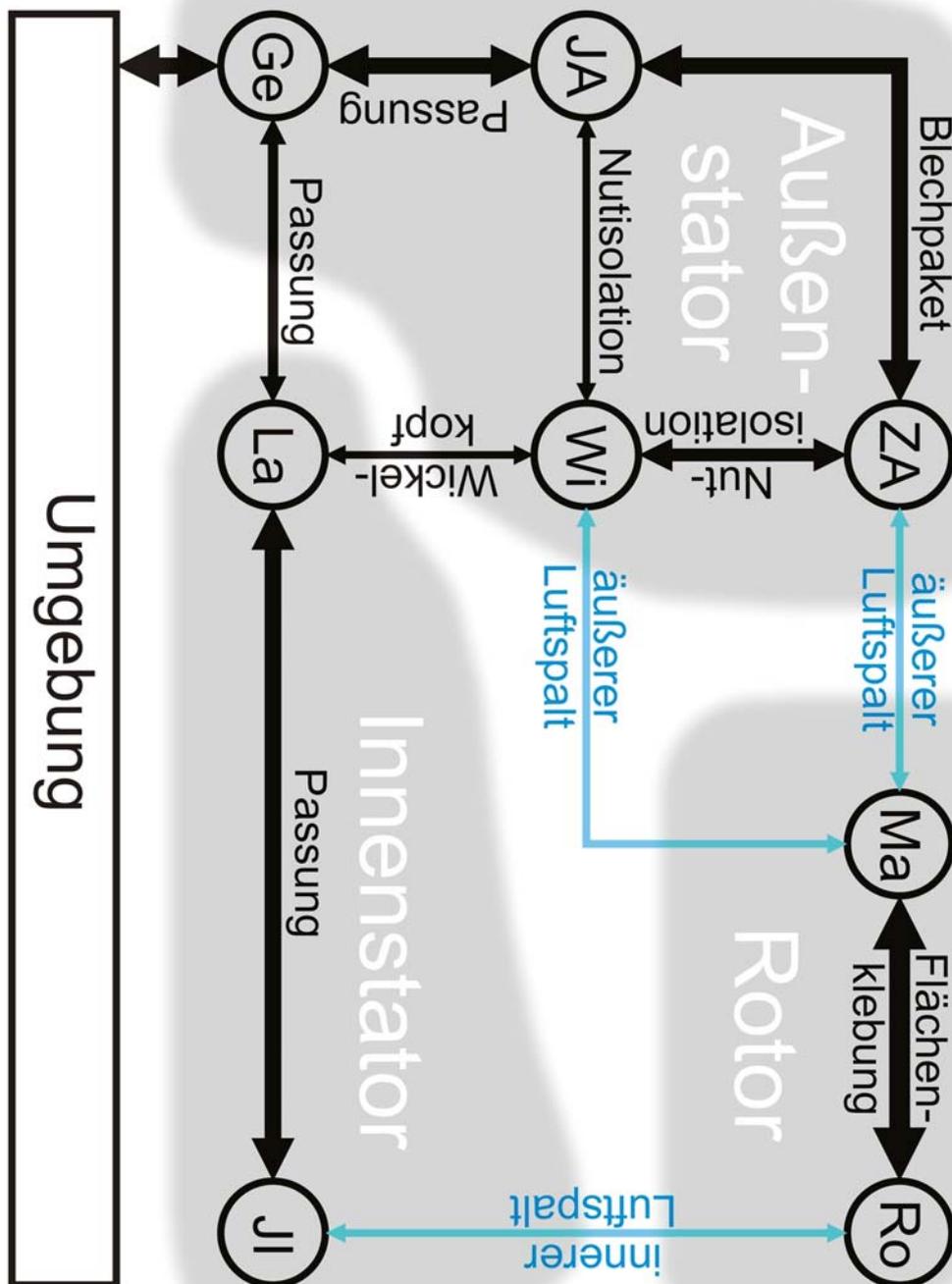


Abbildung 62: Aufbau des thermischen Modells

## 2.6.2 Thermische Leitwerte

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten thermischen Massen sind miteinander über Wärmeleitwerte verbunden. Die Wärmeleitwerte sind eine abstrakte Modellierung der geometrischen Anordnung der einzelnen Punktmassen zueinander und der Wärmeleitfähigkeit der darin vorliegenden Materialien. Bei der Berechnung fließen die Kontaktflächen, die mittlere Wegstrecke und die spezifische Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials mit ein. Bei vielen Leitwerten liegt die serielle Verschaltung

mehrerer thermischer Widerstände vor, da auf dem modellierten Pfad mehrere Materialübergänge auftreten. Abbildung 63 zeigt am Beispiel des Außenstators die Verknüpfung der thermischen Leitwerte.

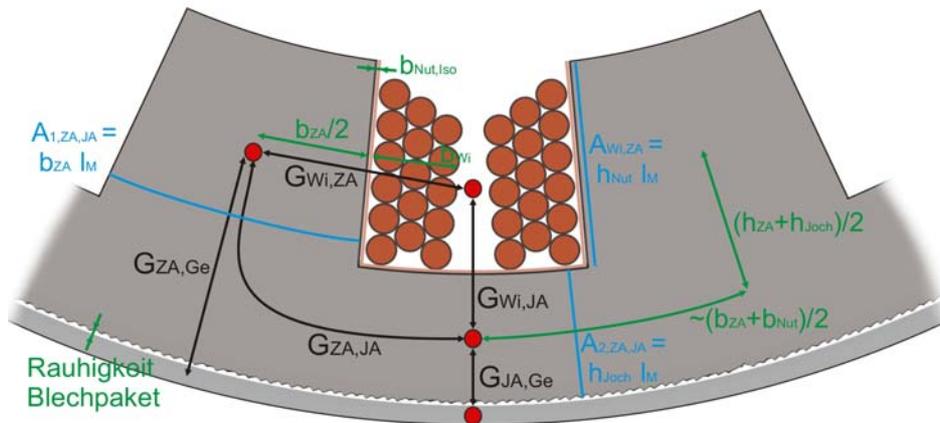


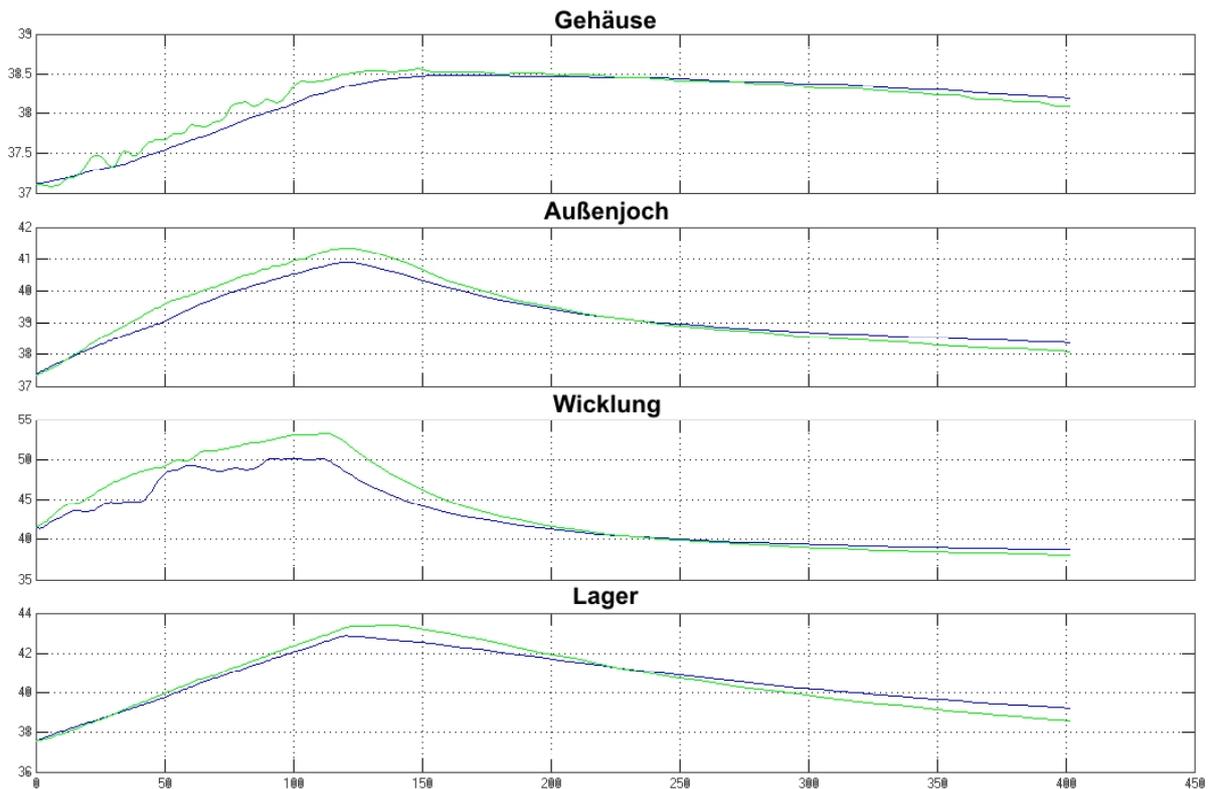
Abbildung 63: Darstellung der Leitwerte am Beispiel des Außenstators

### 2.6.3 Vergleich der thermischen Simulation mit Messungen

Zur Validierung des thermischen Modells ist der Abgleich mit dem realen Aktuator notwendig. Hierbei ist zu beachten, dass Messungen, die von wenigen Modellparameter abhängen, zu bevorzugen sind, da Abweichungen auf diese Parameter eingegrenzt werden können.

Die Messung mit den verwendeten Thermoelementen ist mit folgenden Problemen und Eigenheiten behaftet:

- Die Messungen zeigen ein starkes Messrauschen mit hohen Spikes. Diese sind ideal mit einer Median-Filterung zu entfernen.
- Eine Tiefpassfilterung kann die Signalqualität weiter verbessern. Eine Tiefpassfilterung kann jedoch den Temperaturverlauf an Anfang und Ende der Messung verfälschen.



**Abbildung 64: Vergleich thermische Simulation mit Messung**

Der Simulationsabgleich lässt sich folgendermaßen bewerten:

- Die Übereinstimmung von Messung und Rechnung ist im Rahmen der Messgenauigkeit gut
- Die zum Abgleich notwendigen Korrekturfaktoren sind in vertretbarem Rahmen
- Als Hauptverlustquellen sind Wicklung, Außenstator und die Rotorglocke anzusehen
- Der größte Unsicherheitsfaktor in der Verlustbestimmung bleibt der Rotor, da dieser rotiert und somit keine Vergleichsmessung durchgeführt werden konnte.

## 2.6.4 Entwicklung eines Kühlkonzepts

Da angenommen wird, dass die Verlustleistungen des Aktuators bei Vollast und im höchsten Drehzahlbereich durch Wärmeleitung und Konvektion unter keinen Umständen soweit in Griff zu bekommen sind, dass die Betriebstemperaturen der mechanischen Komponenten nicht überschritten wird, wurde beschlossen, eine aktive Kühlung in das Gehäuse zu integrieren, siehe auch Kapitel 2.1.6.1.

Die günstigste Möglichkeit zur Kühlung der wärmeerzeugenden Spulen ist die Integrierung eines Wassermantels in das Aluminium-Gehäuse, welcher sich im Gussver-

fahren mit einem sogenannten „verlorenen Kern“ gießen lässt. Zur Zu- und Ableitung des Kühlwasser dienen zwei Zuführungen im Boden des Gehäuses, welche an den Kühlwasserkreislauf im Automobil angeschlossen wird. Jedes Gehäuse wird somit separat gekühlt.

Da eine realitätsgetreue Berechnung des Wärmeübergangs enorm aufwändig und von schwer abschätzbaren Parametern wie beispielsweise Gussqualität, Kühlwasserzusammensetzung oder Strömungszustände im Gehäuse abhängt, wurde beschlossen, den Wassermantel so voluminös wie möglich zu gestalten, um eine ausreichende Kühlung in jedem Betriebszustand zu gewährleisten.

Abbildung 65 zeigt am Beispiel des Gehäuses für den Diesel-Aktuator das integrierte Kühlkonzept.

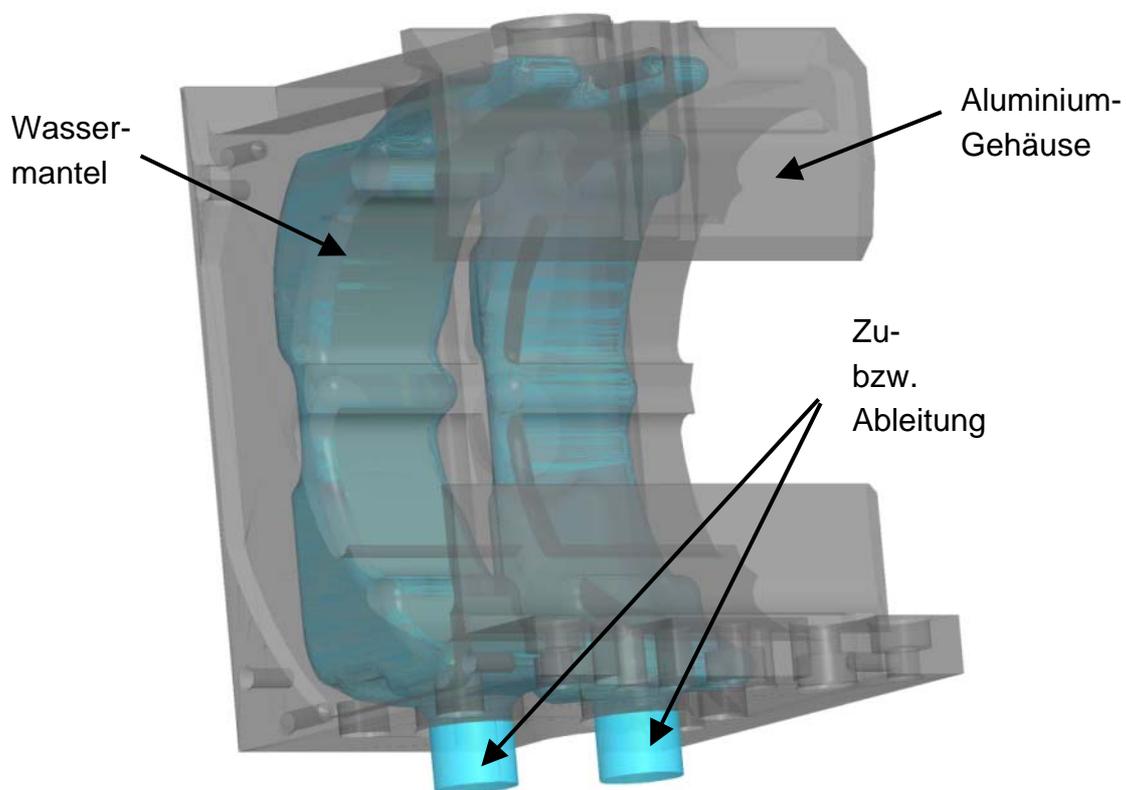


Abbildung 65: Gehäuse des RPA-VI mit integriertem Wassermantel

## 2.7 AP7: Entwicklung Ansteuerelektronik

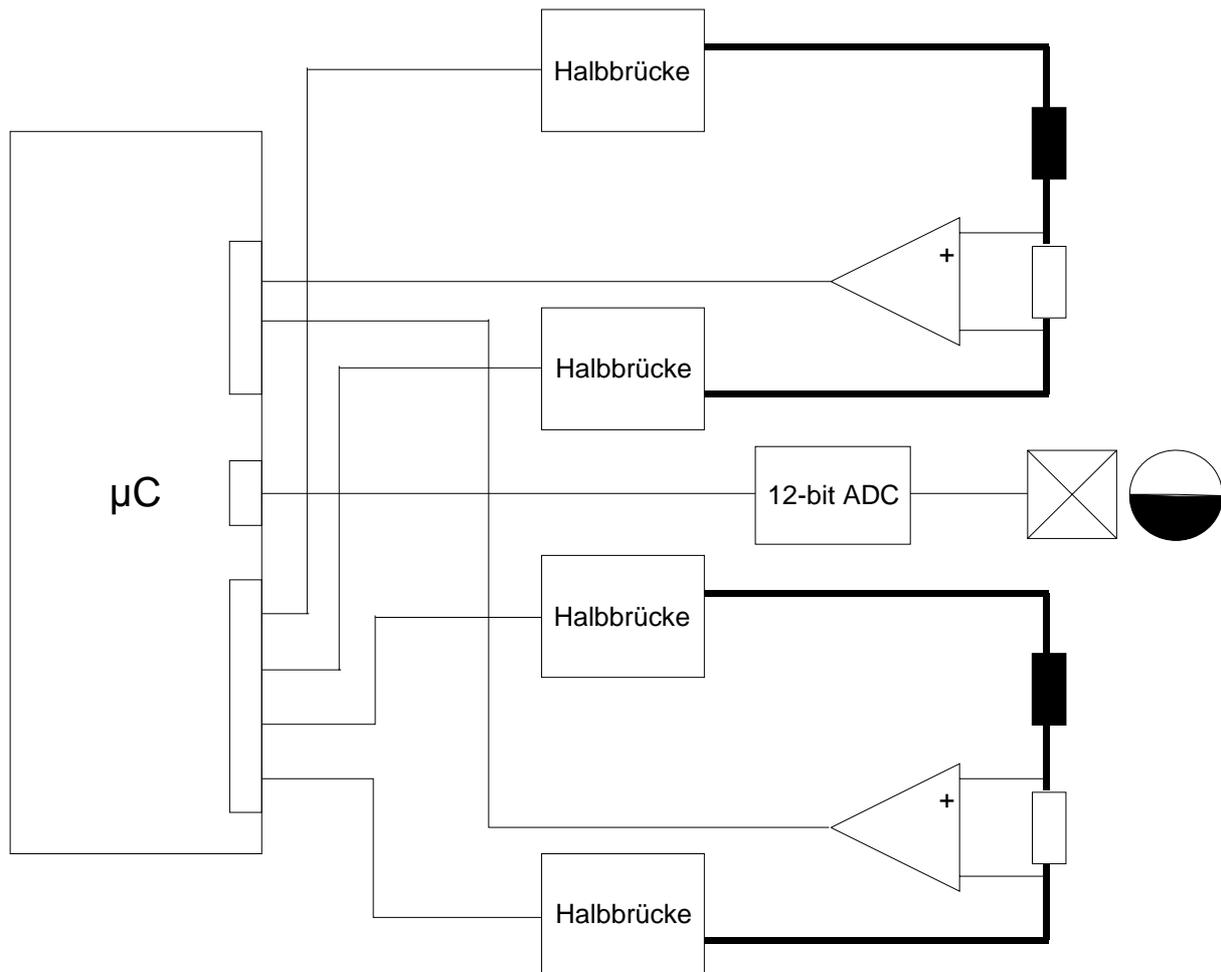
Im Abschlussbereich des Vorgängerprojektes (Az.: 22381-24/0) wurde eine serientaugliche integrierte Ansteuerelektronik beschrieben. Innerhalb des Nachfolgeprojekts sollte diese Elektronik gebaut werden. Die Umsetzung dieses Arbeitspunktes wurde aus folgenden Gründen zurückgestellt:

- Im Falle eines Elektronikschadens müsste die komplette Aktuatorbank, welche sich in einem Gehäuse über alle Aktuatoren erstreckt, für alle Ventile des Zylinderkopfes demontiert werden. Diese würde eine unverhältnismäßig hohe Montagezeit in Anspruch nehmen.
- Da sich die Schaltung der Leistungselektronik für die Aktuatoren des Dieselmotors und des Ottomotors nicht unterscheidet, jedoch die Abmaße und die Platzierung der Aktuatoren völlig unterschiedlich ist, müsste für beide Fälle dieselbe Schaltungstechnik auch unterschiedlich gelayoutet werden.

Da die früher benutzte, zugekaufte Elektronik die im Abschlussbericht des Vorgängerprojektes beschriebenen Nachteile hat, wurde zum Betrieb aller folgenden Prototypen eine nicht-integrierte Leistungselektronik vom Antragsteller konzipiert.

Die Leistungselektronik besteht aus einer Leistungsendstufe mit 8 Halbbrücken und aus einem Prozessorboard, mit dem die Halbbrücken individuell ansteuerbar sind. Die Regelung, die mit einer Frequenz von 50kHz durchgeführt wird, wird von einem 16-bit Mikrocontroller übernommen.

Die hierfür erforderlichen Messsignale - der Spulenstrom und die Ventilposition - werden alle gleichzeitig abgetastet und dem Mikrocontroller zur Verfügung gestellt. Die Ventilposition wird mittels einem linearen Hallsensor zu einem analogen Spannungssignal umgewandelt. Die Strommessung erfolgt mit Shuntwiderständen, welche direkt reihengeschaltet mit der Spulen sind. Das Blockschaltbild der Elektronik zeigt Abbildung 66.

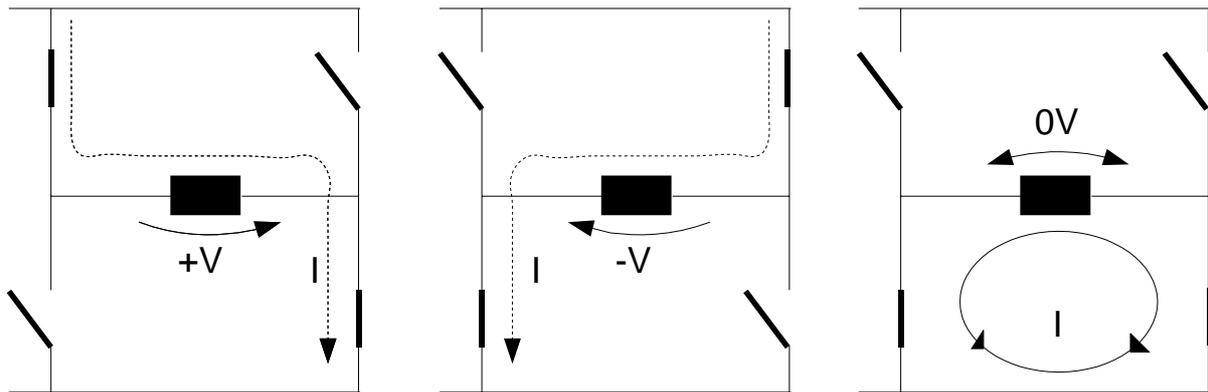


**Abbildung 66: Blockschaltbild digitale Ansteuer- und Leistungselektronik**

Die verwendete Elektronik ist keine aktuatornahe Baugruppe, beinhaltet aber genau die entsprechenden Funktionsblöcke, die auf einer solchen integrierten Platine benötigt werden. Die digitale Bauweise vereinfacht den Aufbau der Elektronik und ermöglicht eine leichtere und flexiblere Regleranpassung gegenüber dem analogen Regler. Die Zuschaltung mehrerer Aktuatoren wird damit ebenso erleichtert und eine genauere Fehlerdiagnose wird ebenfalls ermöglicht.

Dank der Reduzierung der Bauteilemenge wird die Auslegung der zahlreichen Hochstrompfade vereinfacht und die Platinenfläche kann effizienter ausgenutzt werden.

Da die Halbbrücken jeweils individuell anzusteuern sind, kann die Strom auf der Spule beliebig geregelt werden. Wie in der Abbildung 67 ersichtlich ist, wird die angelegte Spannung mit positiver Spannung, Nullspannung und negativer Spannung moduliert.



**Abbildung 67: Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten zur Spannungskreisgenerierung**

Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr genaue und bedarfsgerechte Regelung. Damit ist es leicht, sowohl einen Strom konstant zu halten als auch eine Stromrichtungsänderung bzw. eine Ventilbewegungsrichtungsänderung rasch durchzuführen.

Zur Optimierung der Ansteuerelektronik sind noch weitere Maßnahmen zu testen. Zum einen ist es mit den heutigen Mikrocontrollern möglich, komplementäre PWM-Signale zu erzeugen. So wird eine Halbbrücke zuverlässiger, da die Generierung der erforderlichen Totzeit der Mikrocontroller übernimmt.

Des weiteren sollte die Strommessung entweder im unteren oder im oberen Zweig der H-Brücke erfolgen, da das sonst vorhandene Gleichtaktsignal zur Ungenauigkeit bei der Strommessung führt.