



Hans-Peter Böhm, BSc.

Entwicklung eines elektrisch angesteuerten und hydraulisch betätigten Teleskop-Pleuels

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/in
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick
Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Graz, April 2017

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit bildet den Abschluss meines Maschinenbau Studiums an der TU Graz mit den Schwerpunkten Motor- und Antriebstechnik, sowie Fahrzeugtechnik und –sicherheit. Da meine Affinität für Fahrzeuge, im speziellen der Antriebstechnik, während meines Studiums weiter anstieg, war für mich bald klar, zu welchem Themengebiet ich meine Abschlussarbeit verfassen möchte.

Am Motorensymposium im April 2016 weckte ein neuartiger Pleuel der Firma AVL List GmbH, welcher seine Länge verändern konnte, mein Interesse. Ich fand heraus, dass die Firma AVL List GmbH Prüfstände für die Testläufe dieses Pleuels am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik aufbaute. Dr. Siegfried Lösch unterstützte mich im Verfassen des interessanten Themas, welches mich sehr ansprach und gleichzeitig einen großen Nutzen für die Firma AVL List GmbH darstellte.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich besonders bei Dr. Siegfried Lösch für seine Betreuung seitens der AVL List GmbH bedanken. Er nahm sich meiner Fragen und Probleme immer mit vollster Unterstützung an. Natürlich gilt mein Dank auch allen anderen Mitarbeitern, im speziellen Dipl. Ing. Daniel Machold, die mich seitens des Unternehmens unterstützten.

Angesichts dessen möchte ich mich auch besonders bei Prof. Hannes Hick bedanken, der sich bereit erklärt hat, diese Diplomarbeit zu betreuen. Prof. Hick prägte mich sehr positiv hinsichtlich meiner Zukunft.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Studienkollegen, die mich nicht nur während des Studiums unterstützt haben, mit denen ich auch viel Freizeit verbracht habe und die so zu guten Freunden geworden sind. Meine Freunde in Kundl, die egal wie lange ich nicht nach Tirol gekommen bin, mich stets so aufgenommen haben als ob ich gar nicht weggewesen wäre.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie, besonders bei meinen Eltern für den Rückhalt und die finanzielle Unterstützung bedanken. Ohne euch hätte ich das nicht geschafft.

Vielen Dank!

Hans-Peter Böhm

Graz, 20.03.2017

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	III
Eidesstattliche Erklärung	VII
Kurzfassung	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	1
2 Grundlagen	3
2.1 Warum variables Kompressionsverhältnis?.....	3
2.2 Schaltstrategie 2-stufiger VCR	5
2.3 CO ₂ Reduktion.....	7
2.4 Systeme zur Veränderung der Verdichtung	8
2.4.1 Vertreter der einzelnen Systeme.....	8
2.4.2 Teleskoppleuel – Variantenübersicht.....	10
2.4.2.1 Elektrisch aktuiertes Pleuel – V2P-E.....	11
3 Test RIG	13
3.1 Aufbau.....	14
3.1.1 Prüfstand	14
3.1.2 Elektrische Messkette.....	14
3.1.2.1 Beschreibung.....	15
3.2 Ablauf.....	18
3.2.1 Messprogramm	18
3.2.1.1 Aufbau 1	18
3.2.1.2 Aufbau 2	18
3.2.1.3 Aufbau 3	19
3.3 Ergebnisse.....	19
3.4 Zusammenfassung	23
4 Entwicklung einer elektrischen Verbindung	25
4.1 Zielsuche	26
4.2 Lösungssuche	27
4.2.1 Gliederung der Übertragung.....	27
4.2.2 Möglichkeiten der Verbindung der Teilgebiete.....	28
4.2.2.1 Ankerspule – Anschlussvarianten.....	28
4.2.2.2 Gecrackte Trennebene – Anschlussvarianten	29
4.2.2.3 Rotorspule – Anschlussvarianten	30
4.2.3 Konzepte der elektrischen Verbindung.....	31
4.2.3.1 Konzept 1.....	32
4.2.3.2 Konzept 2.....	33

4.2.3.3	Konzept 3	34
4.2.3.4	Konzept 4	35
4.2.3.5	Konzept 5	36
4.3	Auswahl	38
4.3.1	Bewertung - Intern	38
4.3.2	Bewertung nach VDI 2225.....	39
4.3.3	Entscheidung	40
4.4	Zusammenfassung.....	40
5	Angewandte Strömungssimulation	41
5.1	Beschreibung	41
5.2	Simulation	42
5.2.1	Vorbereitung.....	42
5.2.2	Vernetzung	44
5.2.3	Berechnung.....	49
5.2.4	Auswertung.....	51
5.3	Zusammenfassung.....	53
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	55
	Literaturverzeichnis.....	57
	Abbildungsverzeichnis	58

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
b_e	g/kWh	effektiver spezifischer Kraftstoffverbrauch
$c_p ; c_v$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische isobare; isochore Wärmekapazität
C	C/V	Kapazität
d	m	Durchmesser
E	J	Energie; Exergie
E	V	Zellspannung, elektrisches Potential, elektromotorische Kraft
f	s^{-1}	Frequenz
F	N	Kraft
g	m/s^2	örtliche Fallbeschleunigung
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
H_G	MJ/m^3	Gemischheizwert
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (früher: unterer Heizwert)
I	A	Stromstärke
k	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m	Länge
L	kmol L/kmol B oder kg L/kg B	Luftmenge
L_{\min}	kmol L/kmol B oder kg L/kg B	Mindestluftbedarf
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M_d	$\text{N} \cdot \text{m}$	Drehmoment
n		Laufvariable; Polytropenexponent
p	bar , Pa	Druck
p^0		Standarddruck / $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ häufig auch $p^0 = 1 \text{ bar}$
p_i	bar	indizierter Mitteldruck
P	$(\text{k})\text{W}$	Leistung
Q	C	elektrische Ladung
R		elektrischer Widerstand

s	m	Weg
t	°C	Celsius-Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
U	V	elektrische Spannung
V	m ³	Volumen
W	J	Arbeit
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Konstanten

$g_n = 9,8067$	m/s ²	Normfallbeschleunigung
$R_m = N_A \cdot k_B$ = 8,3145	J/(mol · K)	allgemeine (molare) Gaskonstante

Griechische Formelzeichen

ε		Geometrisches Verdichtungsverhältnis
ε'		Effektives Verdichtungsverhältnis
η		Wirkungsgrad
$\eta_{\text{eff}} ; \eta_i$		effektiver; innerer Wirkungsgrad
η_m		mechanischer Wirkungsgrad
η_{th}		thermodynamischer Wirkungsgrad
η_v		Wirkungsgrad des vollkommenen Motors
κ		Isentropenexponent
λ		Luftverhältnis, Luftzahl
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	N/m ²	Spannung
τ	N/m ²	Schubspannung
φ	° KW	Kurbelwinkel
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Weitere Indices und Abkürzungen

:=	Definition
⁰	Standardzustand (z. B. $p^0 = 1$ bar Standarddruck)
₁	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 1
₂	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 2
1D	eindimensional
3D	dreidimensional

a	aus, außen, äußere
ab	abgeführt(e Wärme)
abs	absolut
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
bzw.	beziehungsweise
c	Kompression
chem	chemisch
CFD	Computational Fluid Dynamics
D	Diffusion
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
e	ein, (Behälter-) Eintritt; eingebracht
eff	effektiv
el	elektrisch, Elektron
engl	englisch
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)
EN	Europäische Norm
ges	gesamt
ggf	gegebenenfalls
h	Hubraum (des Zylinders)
h´	Effektiver Hubraum (des Zylinders)
H	Hochdruck(phase), Hubraum (des Motors), Heizung
i	Laufvariable (1, 2, ..., k), Konzept-Nr.
j	Laufvariable (1, 2, ..., k), Kriterien-Nr.
ISO	International Organization for Standardization
k	Kilo (10^3); Anzahl der Komponenten
kin	kinetisch
konst	konstant
L	Luft
m	mittel
max	maximal
min	minimal
M	Mega (10^6)
MFB	Mass Fraction Burnt
MZ	Methanzahl
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
o	obere
OT	oberer Totpunkt
ÖNORM	Österreichische Norm

pot	potentiell
P	Peta (10^{15})
$Pr = \nu/a$	Prandtl-Zahl
$Re = cl/\nu$	Reynolds-Zahl
R	Reibung
real	real
rel	relativ
rev	reversibel
ROZ	Research Oktanzahl
s	fest (solid)
S	System, Sublimation, Siede-
sog	sogenannt
t	transportiert, turbulent, technisch
T	Tera (10^{12})
TL	Turbolader
TU	Turbine
Test-RIG	Komponentenprüfstand
u	untere, Umgebung
V	Verdampfung, Verlust
VCR	Variable Compression Ration
V2P-E	Teleskop-Pleuel elektrische Variante
VVA	“Variable Valve Actuation” (vollvariabler Ventiltrieb)
VVL	“Variable Valve Lift“ (Variabler Ventilhub)
VVT	“Variable Valve Timing” (Variable Ventilzeit)
zu	zugeführt(e) (Wärme)
zul	zulässig

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.



Hans-Peter Böhm

Graz, 20.03.2017

Kurzfassung

„Variables Kompressionsverhältnis ist der Heilige Gral des Motorenbaus“[1]

Mit diesem Zitat wird die Bedeutung dieses Systems sehr deutlich beschrieben. Die Idee dieser Variabilität ist jedoch schon mindestens so alt, wie der Motor selbst.

Die AVL List GmbH stellte sich mit ihrem Teleskop-Pleuel noch zusätzlicher, nicht erforschter Bereiche und steht mitten in der Serienentwicklung. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine elektrisch angesteuerte und hydraulisch betätigte Pleuelvariante weiterentwickelt.

Im ersten Teil ist eine Teilfunktion des Pleuels zur Verstellung der Länge an einem Komponentenprüfstand verifiziert worden. Der Test entschied darüber, ob dieses Konzept weiterverfolgt wird. Die Funktion war gegeben und die Fertigung eines Prototyps der nächste Schritt. Der noch offene Punkt bezüglich einer Lösung zur Übertragung eines elektrischen Signals vom Pleueldeckel über die Trennebene zum Oberteil des Pleuels wurde im zweiten Teil dieser Arbeit behandelt. Aufgrund der Umgebungsbedingungen im Kurbelraum wurde besonders eine robuste Lösung angestrebt. Für dieses Problem konnten fünf potentielle Konzepte ausgearbeitet werden. Durch interne Gespräche und einer systematischen Bewertung wurden die Lösungsvorschläge nach ihren Vor- und Nachteilen klassifiziert.

Der letzte Teil der Arbeit befasste sich mit einer CFD-Strömungssimulation. Dabei sollte für ein Kugel-Rückschlag Ventil der Durchfluss dem Kugelhub gegenübergestellt werden. Diese Erkenntnis diente weiterer Entwicklungsschritte und half das Gesamtsystem des Ölkreislaufes besser zu verstehen.

Durch die Weiterentwicklung und den daraus resultierenden Lösungsansätzen konnte eine Prototypenlösung erarbeitet werden.

Abstract

„Variable compression ratio is the holy grail of engine construction“[1]

With this quote, the meaning of these systems is very clearly described. However, the idea of this variability is at least as old as the engine itself.

With its telescopic-conrod, AVL List GmbH set up additional, unknown tasks but is in the middle of the series development process. In this work, an electrically controlled and hydraulically actuated conrod variant was further developed.

In the first part, a partial function of the conrod for adjusting the length has been verified at a component test bed. The test decided on the future of this concept. The function was given and the production of a prototype was only one step away. The still open point with regard to a solution for transmitting an electrical signal from the conrod cover over the separating plane to the upper part of the conrod was dealt with in the second part of this work. Due to the ambient conditions in the crankcase, a robust solution has been developed. Five potential concepts could be prepared for this problem. Through internal discussions and a systematic evaluation, the proposed solutions were classified according to their advantages and disadvantages.

The last part of the thesis focused on CFD flow simulation. For a ball check valve, the mass flow should be faced to the ball stroke. This realization served further development steps and helped to better understand the overall system of the oil cycle.

As a result of this development, a prototype was the logical next step.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die schrittweise Senkung der Emissions- und Verbrauchswerte kommt der Verbrennungsmotor zunehmend an seine Grenzen. Aufgrund des extrem hohen Entwicklungsstandes der Verbrennungskraftmaschine steigt der Aufwand für weitere Verbesserungen fast exponentiell an und Diskussionen, ob Mittel nicht besser in die Elektromobilität investiert werden sollen, verdichten sich. Die weitere Motorentwicklung verlangt nach einem Quantensprung, wie schon zuvor mit der Direkteinspritzung oder der vollvariablen Ventilsteuerung. Dieser letzte große Schritt des Motorbaus könnte durch eine variable Verdichtung ermöglicht werden.

Schon in den 1920er entwickelte Harry Ricardo einen einzigartigen Motor mit variablem Verdichtungsverhältnis. Bis heute sind über 100 Patente [2] angemeldet, die durch verschiedene Konzepte diese Variabilität verwirklichen möchten. Nur sehr wenige schafften es vom Papier zu einem Prototyp, und noch weniger sind heute soweit, dass sie in Serie gehen können. Infiniti, Tochterunternehmen von Nissan, brachte als erster Konzern einen Motor mit vollvariablem Verdichtungsverhältnis auf den Markt. Aufgrund der immensen Änderung der Motorarchitektur und der ungewissen Frage bezüglich elektrischer Antriebe sind jedoch nur wenige Autohersteller daran interessiert, ihre bestehenden Fertigungs- und Montagebänder maßgeblich zu modifizieren. Der Erfolg der variablen Verdichtung steht und fällt somit durch die Möglichkeit einer einfachen Integration in bestehende Motorkonzepte. Dieser Trend wird von zwei führenden Unternehmen wie FEV GmbH und AVL List GmbH verfolgt. AVL List GmbH tritt mit ihrem Konzept des hydraulisch verstellbaren Teleskop-Pleuels in Gebiete, die bis dahin nur unzureichend erforscht waren. Die dadurch aufgetretenen Fragen sind schon seit geraumer Zeit Thema zahlreicher Arbeiten. So wurde für diese Abschlussarbeit eine Vielzahl von Aufgaben gefunden, die das Konzept wieder einen Schritt nach vorne in Richtung Serienreife brachten.

1.2 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist in drei Hauptkapitel aufgeteilt. In Kapitel 2 wird kurz auf den theoretischen Hintergrund eingegangen und erklärt, was das Ziel der Arbeit darstellt. Die praktischen Arbeiten werden in Kapitel 3 bis 5 beschrieben.

- Kapitel 3: hier wird der Komponententest für ein Ventil der elektrisch angesteuerten und hydraulisch betätigten Pleuelvariante erklärt. Der Prüfstand wurde aufgebaut, die Funktion überprüft, sowie Messungen durchgeführt. Zuletzt fand eine Auswertung mit einer Entscheidung über die weitere Vorgehensweise statt.

- Kapitel 4: dieser Teil der Arbeit stellte den größten Aufwand dar. Einschlägiges Fachwissen, sowie neue Lösungsansätze waren hier gefragt. Es wurde eine seriennahe Lösung zur Übertragung eines elektrischen Signals entwickelt. Fünf verschiedene Konzepte wurden konstruktiv ausgearbeitet und anschließend bewertet.
- Kapitel 5: in diesem Kapitel wurde eine CFD-Strömungssimulation eines Kugel-Rückschlagventils beschrieben. Als Hauptziel wurde definiert, den Zusammenhang von Durchfluss zu Hub der Kugel herauszufinden. Des Weiteren wurden Druck- und Geschwindigkeitsfelder berechnet, die dabei halfen das System des Ölkreislaufes besser zu verstehen.

2 Grundlagen

2.1 Warum variables Kompressionsverhältnis?

Für die Analyse einer Verbrennungskraftmaschine ist der vereinfachte Vergleichsprozess aufgrund der weit komplexeren Vorgänge zu ungenau. Um dem wirklichen Motor näherzukommen, wird der „vollkommene Motor“ definiert. Der „vollkommene Motor“ ist nach DIN 1940 definiert als „ein dem wirklichen Motor geometrisch gleicher Motor“ mit einer Reihe von vereinfachten Eigenschaften. Der Wirkungsgrad des vollkommenen Motors η_v berechnet sich aus der abgegebenen Volumenänderungsarbeit W_v zur zugeführten Brennstoffenergie Q_{Bv} .

$$\eta_v = \frac{W_v}{Q_{Bv}}$$

Diesem Wirkungsgrad des vollkommenen Motors werden prozesstechnische Einzelverluste (Wandwärmeverluste, Ladungswechselverluste,...) abgezogen, die zum inneren (indizierten) Wirkungsgrad η_i führen.

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_B} = \frac{\int p_i \cdot dV}{m_B \cdot H_u}$$

Durch einer Druckindizierung am Prüfstand kann der innere indizierte Druck p_i gemessen und über das Volumen integriert werden.

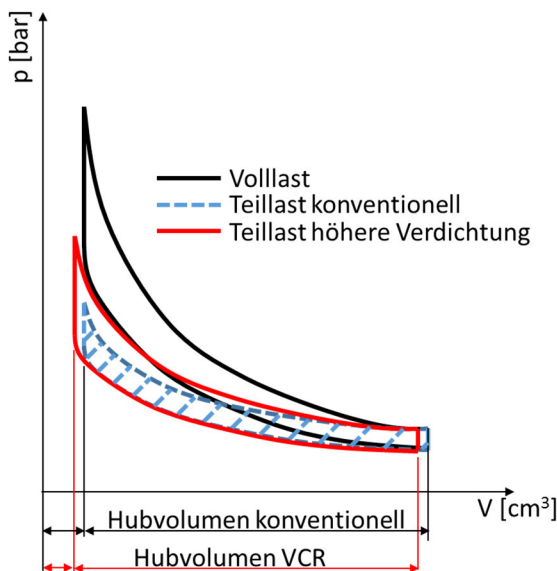


Abbildung 2-1: p-V Diagramm [2]

Aus Abbildung 2-1 ist ersichtlich, dass durch eine variable Verdichtung mit verstellbarem Pleuel eine horizontale Verschiebung des Hubvolumens eintritt. Dadurch wird das Kompressionsvolumen verkleinert und die Fläche der inneren (indizierten) Arbeit vergrößert sich. Der Verdichtungsdruck erhöht sich, was zu einer Erhöhung des Verbrennungsdruckes führt. Dadurch kann die Expansion auf einem höheren Druckniveau stattfinden. Hier ist zur Vereinfachung nur die Hochdruckkomponente des Idealprozesses dargestellt, da das Verdichtungsverhältnis nur geringen Einfluss auf den Ladungswechsel hat.

Aus der Drehmomentmessung an der Kurbelwelle erhält man schlussendlich den effektiven Wirkungsgrad η_{eff} .

Der Unterschied zwischen dem inneren (indizierten) Wirkungsgrad η_i und dem effektiven Wirkungsgrad η_{eff} wird durch die mechanischen Verluste hervorgerufen. Wird vereinfacht definiert, dass sich die mechanischen Verluste nicht verändern, zeigt Abbildung 2-2 das Potential eines Motors mit veränderbarem Verdichtungsverhältnis. (vor allem im Teillastbereich)

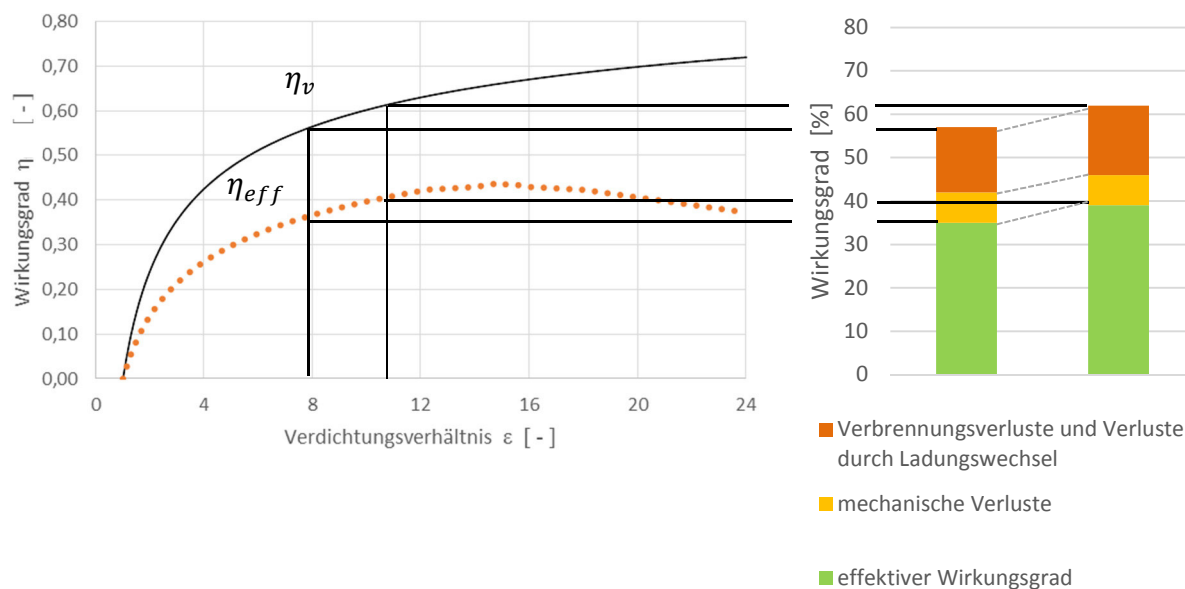


Abbildung 2-2: Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis [3]

Wie eben gezeigt, ist durch eine variable Verdichtung eine signifikante Wirkungsgradsteigerung möglich. Schon immer unterlag die Festlegung der geometrischen Verdichtung einer konventionellen Verbrennungskraftmaschine, insbesondere beim quantitativ geregelten Ottomotor, einem Kompromiss von Teillast und Vollast. Das Bestreben nach einem möglichst hohen geometrischen Verdichtungsverhältnis in der Teillast steht der Klopfbegrenzung bei Vollast im Ottomotor gegenüber. Dieser Auslegungs-Trade-Off verstärkt sich vermehrt mit dem Trend zum Downsizing.

Schafft man es nun im Teil- und Vollastbereich die jeweils ideale Verdichtung zu erzeugen, sind signifikante spezifische Leistungen möglich. Seit Jahrzehnten versuchen Entwickler diese Variabilität standfest und vor allem kostengünstig in der Serie zu integrieren.

Haupttreiber des jetzt vielseitig entwickelten variablen Verdichtungsverhältnisses (Variable Compression Ratio – VCR) ist jedoch nicht die höhere spezifische Leistung, sondern die immer schärfer werdende CO₂ Anforderung, kombiniert mit der Schadstoffreduzierung in den neuen Prüfverfahren. Die vollvariable Ventilsteuerung VVA (Variable Valve Actuation) mit dem Miller/Atkinson Prinzip stellt beim Ottomotor zurzeit die kostengünstigste Reform zum Erreichen dieser Ziele dar. Die

folgende Grafik zeigt jedoch die Veränderung im Motorkennfeld, die dieses Verfahren mit sich bringt. Gut zu sehen ist, dass sich das optimale Verdichtungsverhältnis in der Teillast im Vergleich zu Motoren mit fixem Ventiltrieb signifikant nach oben verschiebt.

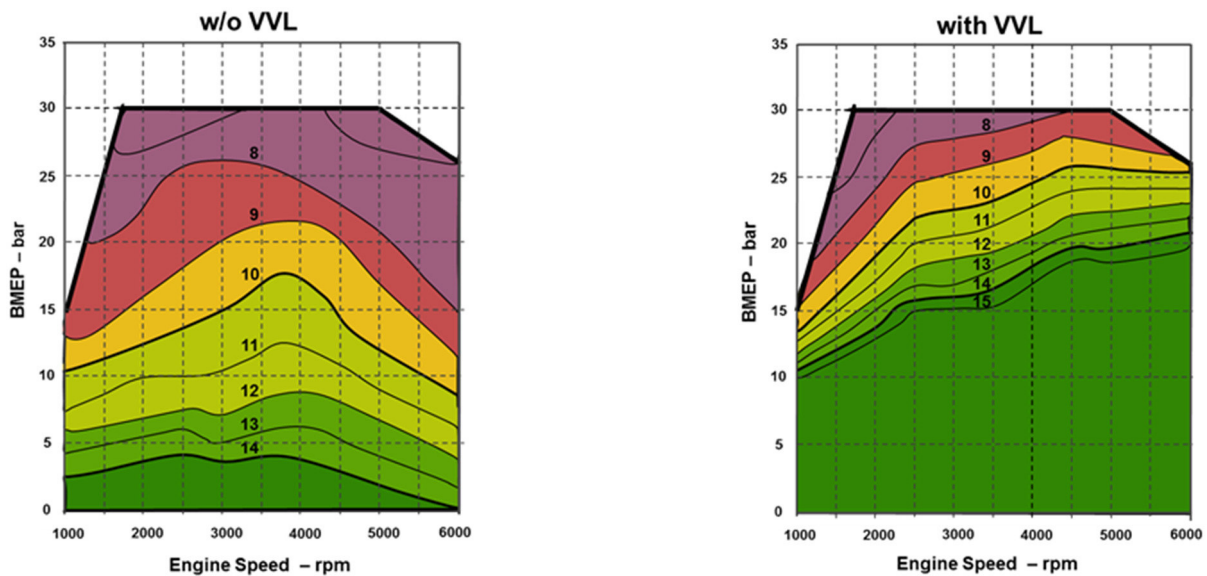


Abbildung 2-3: optimales Verdichtungsverhältnis ohne und mit VVL [4]

Es liegt auf der Hand, dass kontinuierliche VCR-Systeme das höchste Verbrauchs- und Mitteldruckpotential aufweisen. Außerdem haben sie den zurzeit weitest fortgeschrittenen Entwicklungsstand und sind auch schon im Einsatz (Nissan-Tochter Infiniti mit dem VC-T Motor). Nach heutigem Stand bringen stufenlose VCR-Systeme jedoch große Veränderungen des Kurbeltriebs und dadurch hohe Kosten bei der Umstellung der Produktionsanlagen mit sich. Angesichts der Fragestellung, ob in Zukunft große Investitionen nicht besser in die Entwicklung elektrischer Antriebe fließen sollen, wird das Thema der Notwendigkeit aufwendiger VCR-Systeme nachhaltig beeinflusst. Bessere Integrierbarkeit in bestehende Motorfamilien und höhere Modularität überwiegen dem Nachteil des geringeren Gesamtpotentials 2-stufiger VCR-Systeme und sind folglich attraktiver für Autohersteller.

2.2 Schaltstrategie 2-stufiger VCR

Diesen Ansatz der einfachen Integration und Modularität verfolgen einige Entwicklungsunternehmen. Als vielversprechendste Lösungen stellt die Firma FEV GmbH und AVL List GmbH ein Pleuel, welches seine Länge (lange oder kurze Stellung) den jeweiligen Lastpunkten anpasst bzw. angepasst werden kann.

Die Faktoren Nennleistung, Kraftstoffverbrauch, Motorschutz und Abgasemissionsverfahren entscheiden über die Schaltstrategie des Pleuels. Ab September 2017 wird die „Euro 6d-Temp“ eingeführt. Dieses neue Prüfverfahren beinhaltet die Fahrzyklen WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) und RDE (Real Driving Emissions).

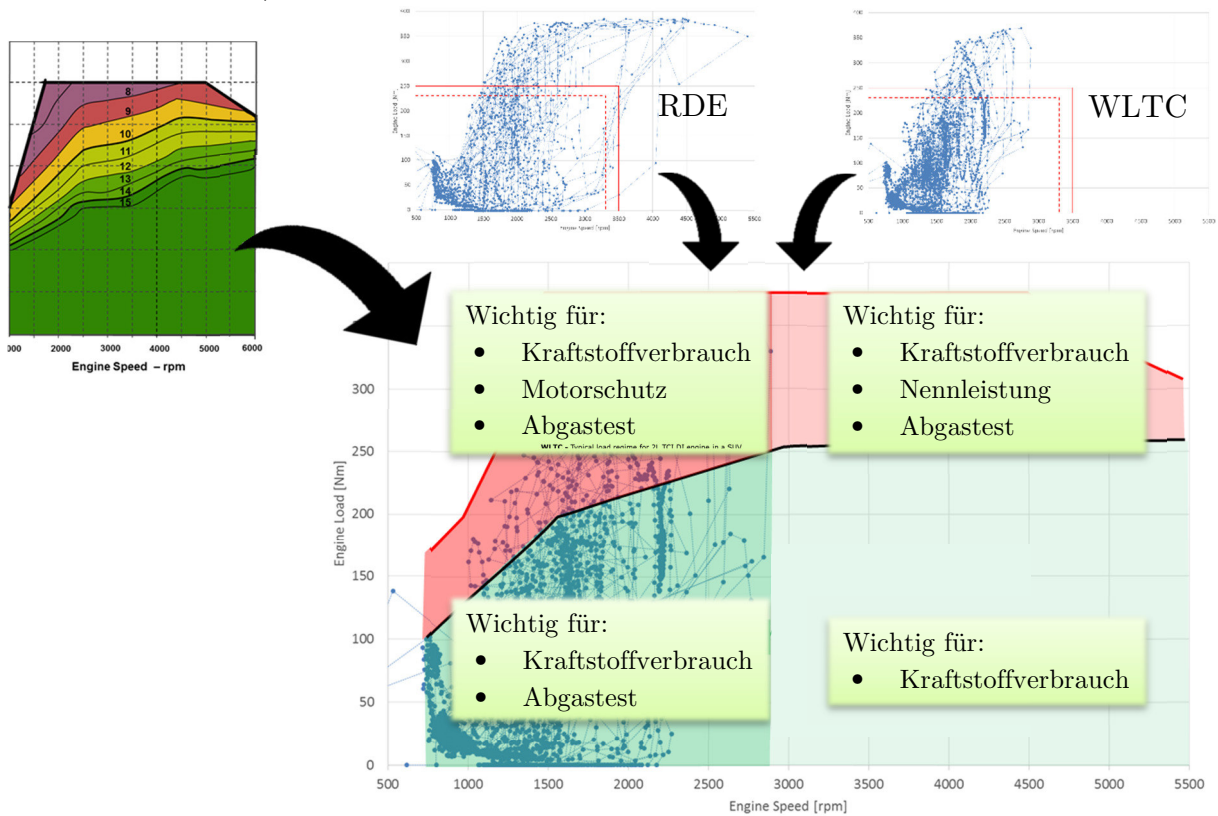


Abbildung 2-4: Einflussfaktoren der Schaltstrategie 2-stufiger VCR-Systeme [5]

Aus den Bedingungen der Grafik ergibt sich folgende Strategie für die lange (High CR - Compression Ratio) bzw. die kurze (Low CR - Compression Ratio) Stellung des Pleuels.

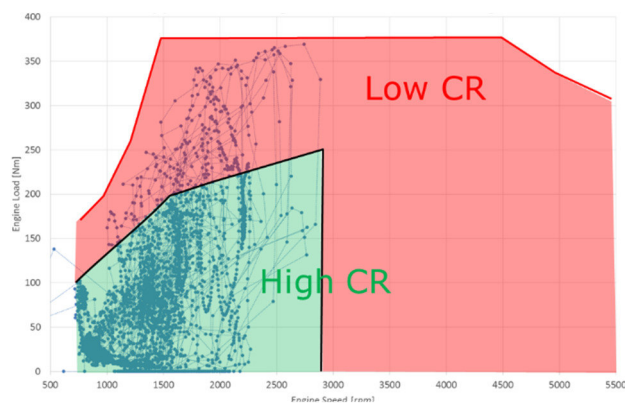


Abbildung 2-5: Schaltstrategie 2-stufiger VCR-Systeme [5]

2.3 CO₂ Reduktion

Ein rein durch den Miller/Atkinson Zyklus betriebener Motor (ohne Aufladung) weist eine erhebliche Verbrauchsminimierung auf. Jedoch sinkt die Leistung durch das verkleinerte effektive Verdichtungsverhältnis. Durch das 2-stufige VCR-System kann dieser Verlust wieder aufgehoben und gleichzeitig der Vorteil des Verbrauches genutzt werden. [5]

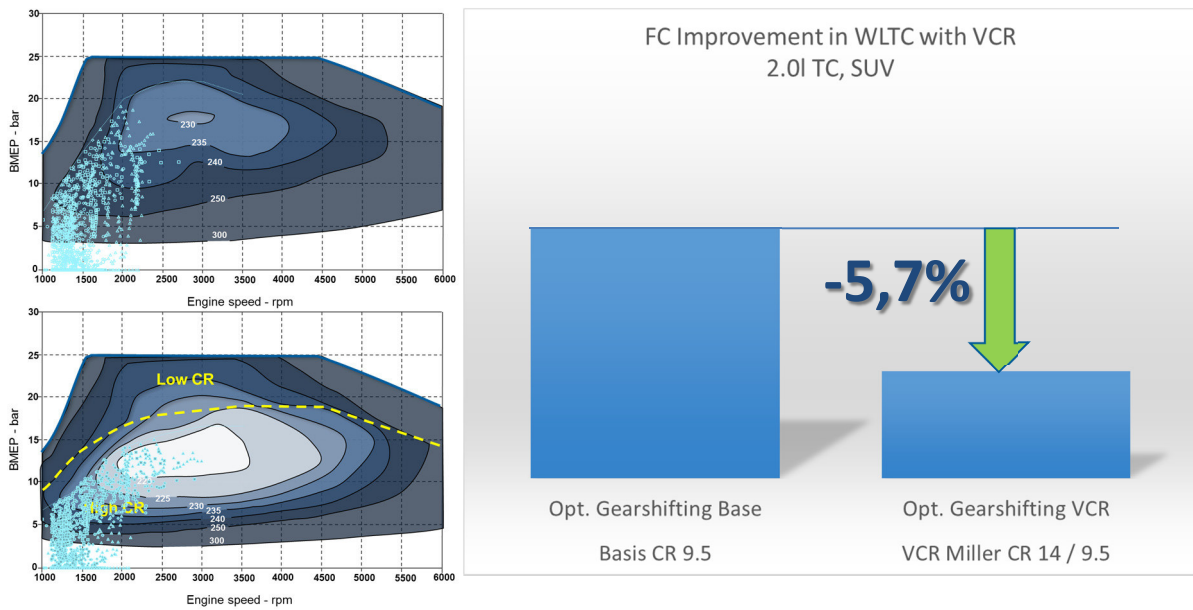


Abbildung 2-6: Potential der CO₂ Reduktion [5]

2.4 Systeme zur Veränderung der Verdichtung

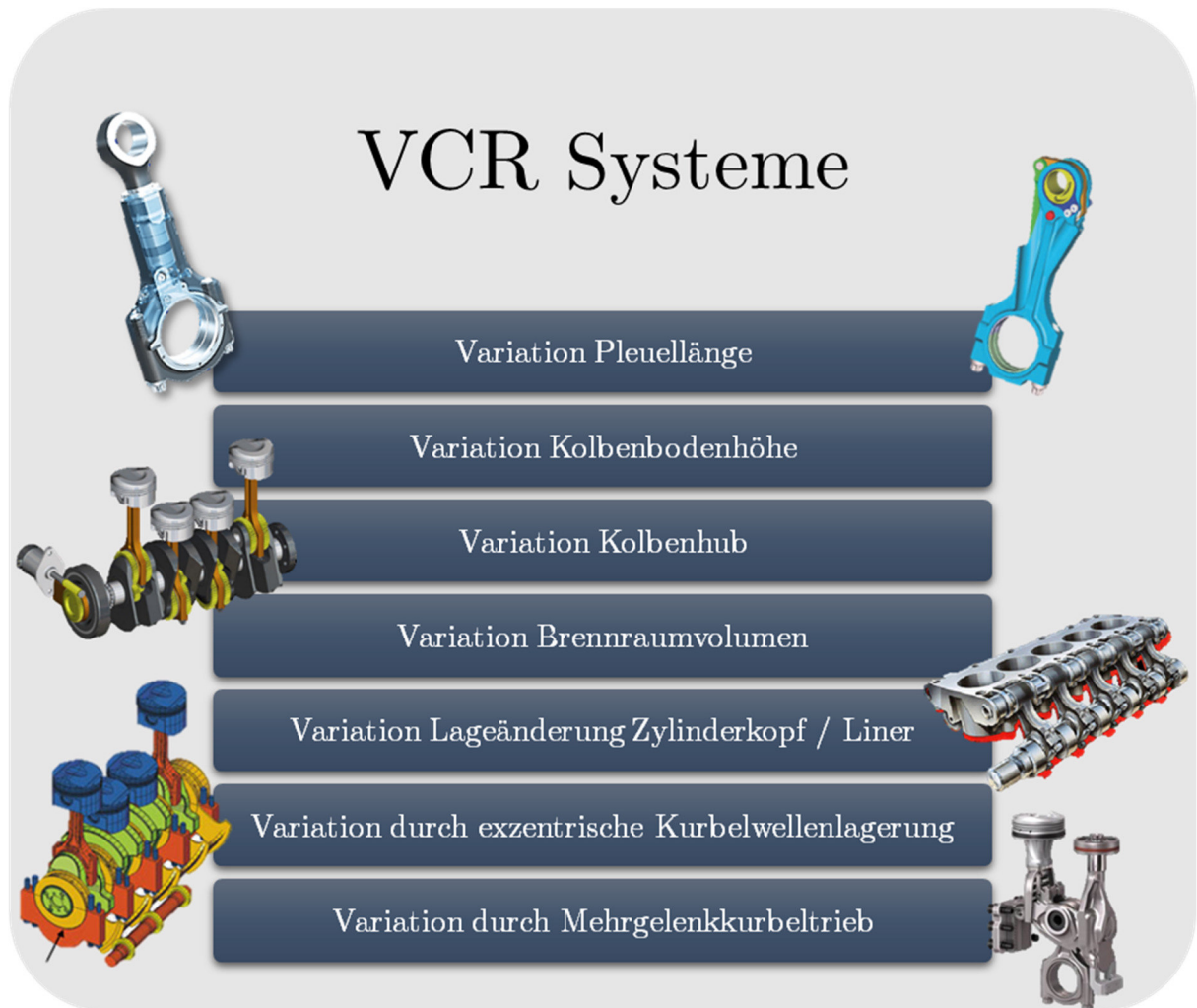


Abbildung 2-7: VCR Systeme [5]

2.4.1 Vertreter der einzelnen Systeme

Variation Pleuellänge: Diese Systeme weisen durch ihren geringen Integrationsaufwand, der vergleichsweise kostengünstigen Fertigung und der Umsetzung in R-&V-Motoren ein hohes Zukunftspotential auf. Diese Vorteile überwiegen den Nachteilen der höheren Verstellzeit und dem Anstieg der bewegten Massen. Sie werden zurzeit 2-stufig ausgeführt.

- AVL List GmbH - Teleskop-Prinzip
- FEV GmbH – Exzenter-Prinzip

Variation Kolbenbodenhöhe: Durch eine Verschiebung des Kolbenbodens mittels unterschiedlicher Öldrücke kann eine Variation des Verdichtungsverhältnisses erreicht werden.

- Daimler Benz AG – VKH-Kolben

Variation Kolbenhub: Durch verdrehen eines Exzenters im „Großen Auge“ des Pleuels wird der Hub und dadurch das Verdichtungsverhältnis verändert.

- Gomecsys VCR Technology

Variation Brennraumvolumen: Durch einen Stellkolben im Kompressionsvolumen kann die Verdichtung stufenlos verändert werden.

- Volkswagen AG

Variation Lageänderung Zylinderkopf / Liner: Das Volumen des Brennraums wird durch einen Scharniermechanismus, der den Zylinderblock (Kopf und Zylinder) vom Kurbelgehäuse kippt, verändert.

- Saab SVC

Variation durch exzentrische Kurbelwellenlagerung: Die Kurbelwelle ist exzentrisch gelagert und verändert durch ihre Verdrehung die Position von OT und UT, wobei der Kolbenhub unverändert bleibt.

- FEV GmbH

Variation durch Mehrgelenkkurbeltrieb: über einen Hebelmechanismus wird mit einem zweiten Kolben oder einem Gelenk der Hub verändert.

- MCE-5 DEVELOPMENT S.A.
- Infiniti VC-T Motor

Im Laufe der Jahre sammelten sich eine Vielzahl von Patente [2], die sich mit dem Thema der variablen Verdichtung beschäftigen. Diese Zahl verdeutlicht das Potential, das in dieser Technologie steckt. Jedoch kamen viele nicht über eine Konzeptphase hinaus. Durch die verstärkte Notwendigkeit effizienter und emissionsarmer Motoren verdichtete sich die Weiterentwicklung jener Konzepte mit der besten Aussicht auf die Serienreife. Da die Kosten immer über den Erfolg einer Technologie mitentscheiden, erwies sich die „Variation Pleuellänge“ als sehr zielführend. Die FEV GmbH und die AVL List GmbH bestreiten diesen Weg als Unternehmen mit dem weitesten Entwicklungsstand.

Im Weiteren dieser Arbeit wird aufgrund der Zusammenarbeit mit der AVL List GmbH nur mehr auf deren entwickelten Teleskoppleuel eingegangen. AVL bestreitet mit diesem VCR-System einen Weg mit Fragestellungen, die bislang noch nicht behandelt wurden. Allerdings sind viele kritische Problempunkte bereits gelöst und die Entwicklung vorangeschritten.

Im Laufe der Konzeptphase haben sich aus der Vielzahl an Ideen drei Varianten zur Aktuierung der Verstellung der Pleuellänge für eine weiterführende Entwicklung herausgestellt.

2.4.2 Teleskoppleuel – Variantenübersicht

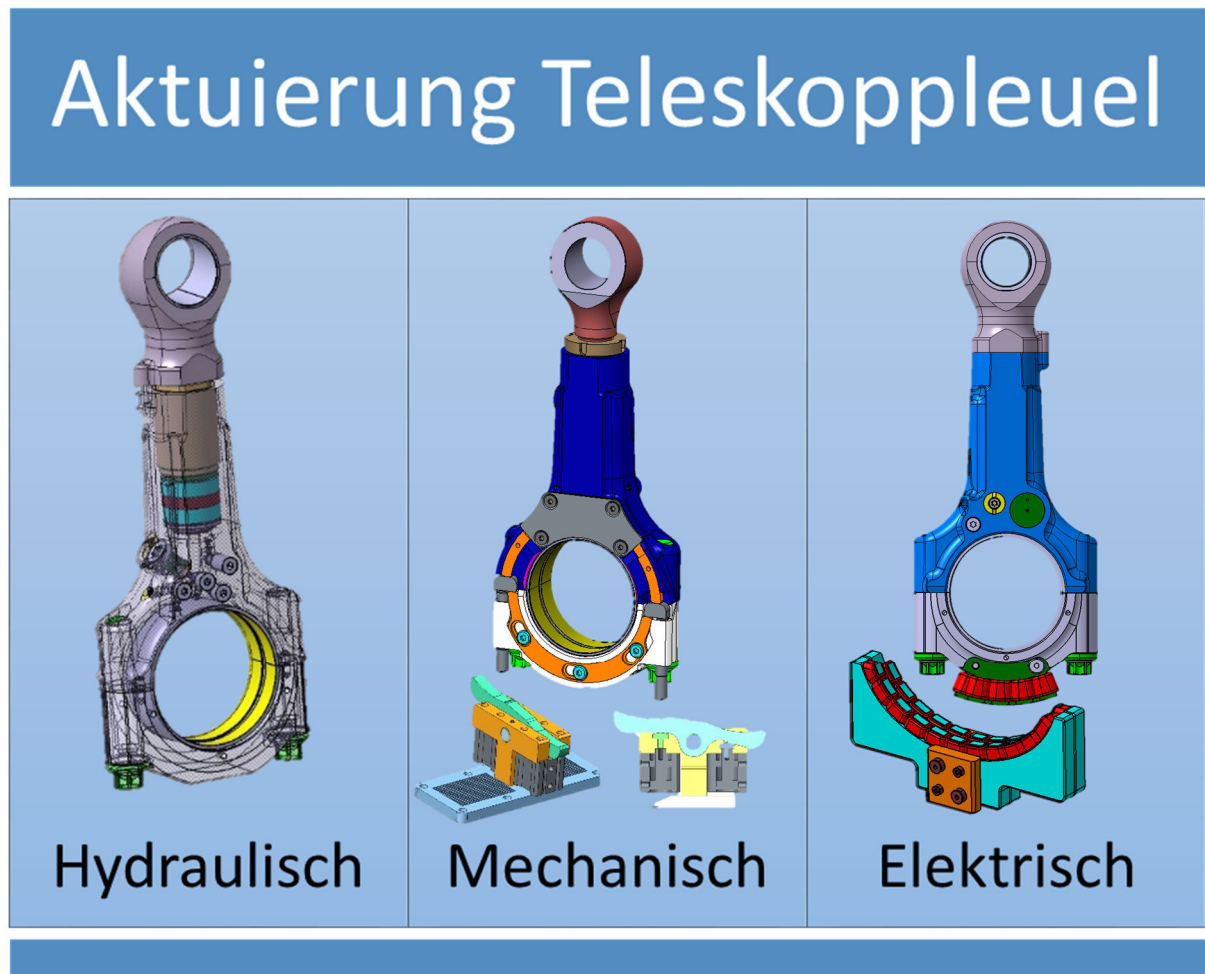


Abbildung 2-2: Möglichkeiten der Aktuierung des Teleskoppleuels

Hydraulische Aktuierung: Über zwei Öldruckniveaus wird ein Schieber verstellt, der die Ölleitung für die kurze bzw. die lange Stellung freigibt. Die Ölversorgung geschieht über die Kurbelwelle. Es wird eine zusätzliche Ölpumpe benötigt.

Mechanische Aktuierung: Durch betätigen eines der beiden Stifte wird ein Schieber verstellt, der die Ölleitung für die kurze bzw. die lange Stellung freigibt. Die Ölversorgung geschieht über die Kurbelwelle. Zur Betätigung der Stifte wird eine zusätzliche Verschiebevorrichtung im Ölwannebereich benötigt.

Elektrische Aktuierung: Über zwei Spulen, die einen Schieber verstellen, wird die Ölleitung für die kurze bzw. die lange Stellung freigegeben. Die Ölversorgung geschieht wiederum über die Kurbelwelle. Hier wird ein zusätzlicher Stator im Ölwannebereich benötigt, der über Induktion eine der beiden Spulen bestromt. Die firmeninterne Bezeichnung dieses Konzeptes lautet V2P-E (V2- zweite Version, P- Anfangsbuchstabe des Dichtungslieferanten, E- elektrisch betätigt)

Die hydraulische Variante war die erste, die im Hause AVL soweit entwickelt wurde, dass sie auch für die Fertigung freigegeben wurde und Funktionstests damit gemacht werden konnten. Ihr Entwicklungsstand ist am weitesten der drei Konzepte. Nun galt es, die mechanische und elektrische Lösung auf diesen Stand zu bringen. Diese Arbeit befasst sich mit der elektrischen Aktuierung, wo es darum ging, den Entwicklungsstand soweit zu bringen, dass ein Pleuel gefertigt und im Versuch getestet werden kann.

2.4.2.1 Elektrisch aktuiertes Pleuel – V2P-E

2.4.2.1.1 Funktion

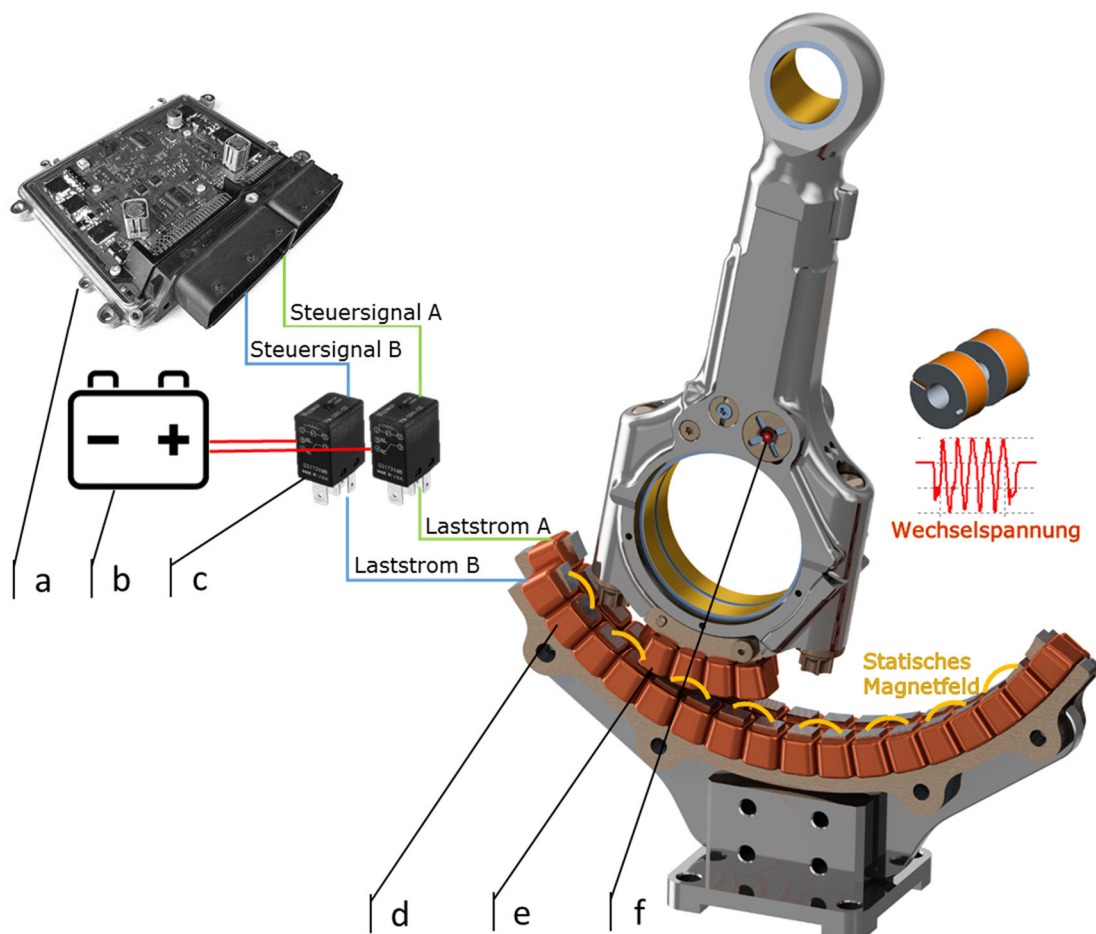


Abbildung 2-8: Signalkette des elektrisch angesteuerten Pleuels

- | | |
|-----------------------------|---------------|
| a) Steuersignal von der ECU | d) Stator |
| b) Spannungsversorgung 12V | e) Rotorspule |
| c) Relais | f) Ankerspule |

Je nach Betriebspunktanforderung entscheidet die ECU (a) über die kurze bzw. lange Stellung des Pleuels. Über ein Relais (c), das einerseits ein Signal von der ECU und andererseits die Spannung von der Batterie (b) bekommt, wird eines der beiden Segmente des Stators (d) mit 12V Gleichspannung versorgt. Der Gleichstrom erzeugt

in den Spulen des Stators ein statisches Magnetfeld. Durch das Vorbeifahren des Pleuels wird eine Wechselspannung durch die Bewegungsinduktion in der Rotorspule (e) induziert. Durch eine elektrische Leitung, deren Entwicklung einen Großteil dieser Abschlussarbeit einnimmt und später weiter erklärt wird, wird der Wechselstrom zu einer der beiden Ankerspulen, die einen Teil des Magnetventiles darstellen, geleitet. Dort wird wiederum ein Magnetfeld erzeugt, welches einen Schieber (Anker) anzieht. So wird die Leitung für die kurze bzw. die lange Stellung freigegeben. Erreicht der Schieber (Anker) eine Endposition, halten kleine Magnete ihn dort an seinem Platz (Bistabiles Magnetventil). Es wird also keine weitere Bestromung benötigt. Ein Vorteil dieser Variante ist auch die berührungslose Aktuierung.

2.4.2.1.2 Schaltbild Ölkreislauf V2P-E

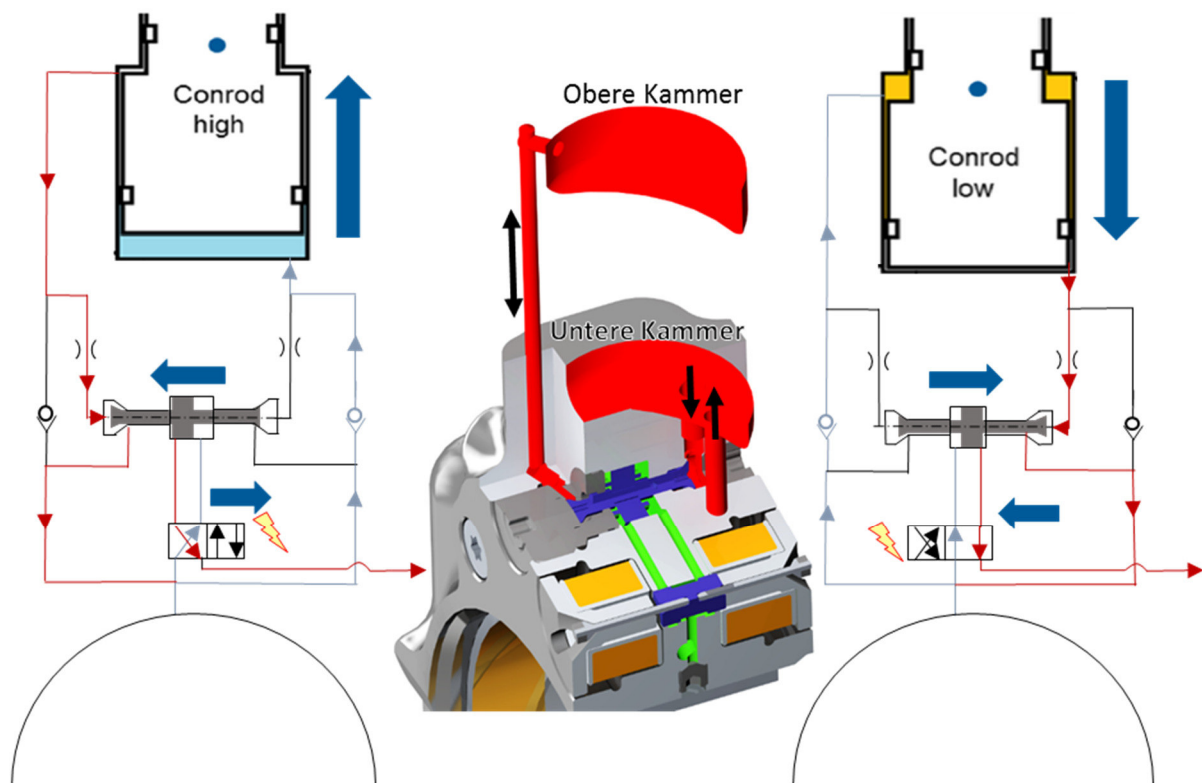


Abbildung 2-9: Schaltbild Ölkreislauf V2P-E

Je nach Bestromung (hier mit einem Blitz dargestellt) des Magnetventiles wird der Pfad für die obere bzw. die untere Kammer freigegeben. Unterteilt wird der Kreislauf in Hoch- und Niederdruckbereich (Abbildung 2-9: Rot=Hochdruck, Grün=Niederdruck). Stator, Ankerspulen, die Konstruktion mit Dimensionen und Toleranzen wurden theoretisch ausgelegt. Jetzt galt es die Funktion des Magnetventiles in einem Komponententest zu überprüfen.

3 Test RIG

Der Test-RIG war ein Komponentenprüfstand zur Überprüfung einer Teilfunktion im V2P-E Pleuel. Hier wurde das Einzelsystem, elektromagnetisches Ventil (3-Wege Ventil bzw. Bistabiles Ventil), betrachtet und versuchstechnisch untersucht. Der Aufbau mit all seinen Dimensionen ist dem des Pleuels, welches in weiterer Linie untersucht werden soll, gleich. Nur so können aussagekräftige Schlüsse bezüglich der Funktion getroffen werden.

Die Konstruktion und Fertigung der Einzelteile wurde bereits vor Beginn dieser Arbeit veranlasst. Gegenstand der Arbeit war der Aufbau des Prüfstandes, die Vorbereitung der Messvorrichtung, die Messung selbst und schlussendlich die Auswertung.

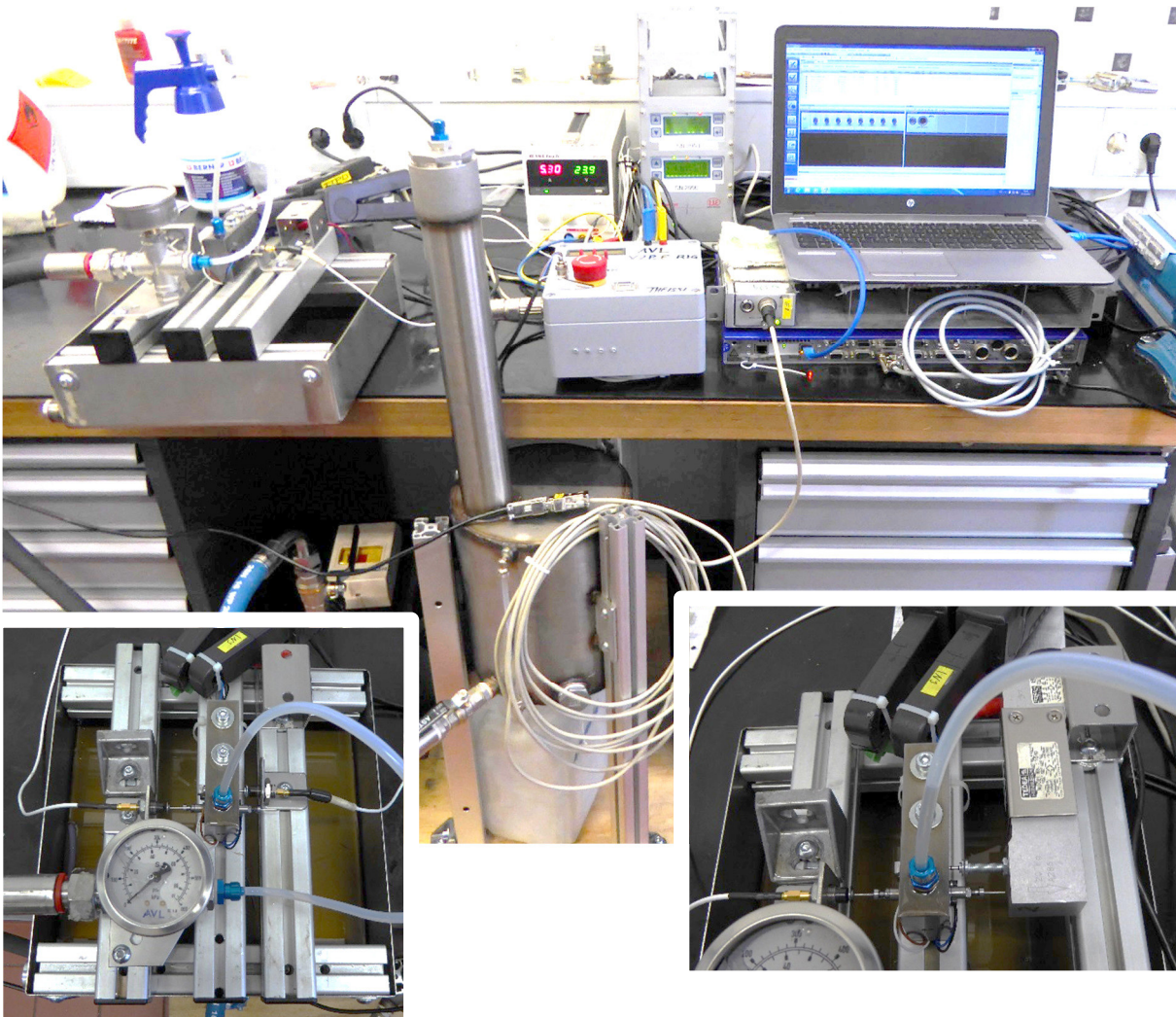


Abbildung 3-1: Test-RIG Aufbau

3.1 Aufbau

3.1.1 Prüfstand

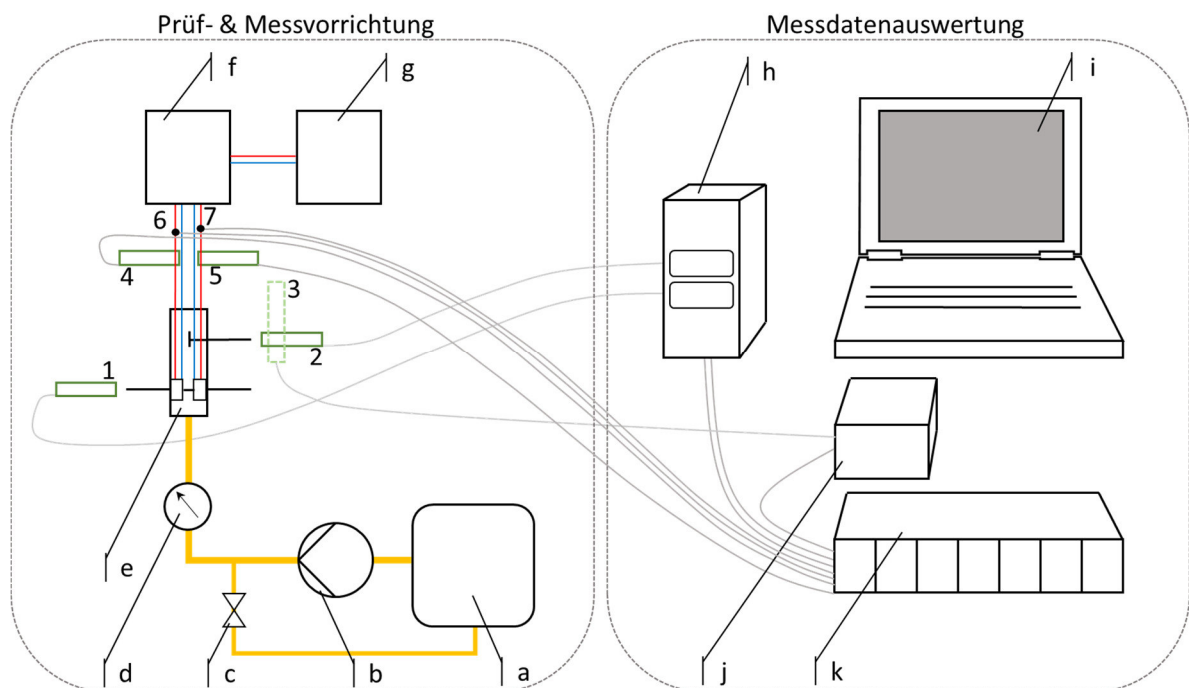


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung Test-RIG

- | | |
|--|-----------------------------|
| a) Öltank | 1. Wirbelstromsensor |
| b) Ölpumpe | 2. Wirbelstromsensor |
| c) Kugelhahn | 3. Wägezelle |
| d) Manometer | 4. Strommesszange Spule A |
| e) Test-RIG | 5. Strommesszange Spule B |
| f) Generatorsimulator | 6. Spannungsmessung Spule A |
| g) Labor-Netzteil BT-305 | 7. Spannungsmessung Spule B |
| h) Multifunktions-Controller eddyNCDT 3300 | |
| i) Rechner/Messdatenerfassung | |
| j) AVL Amplifier | |
| k) AVL IndiModul | |

3.1.2 Elektrische Messkette



Bei diesem Aufbau wurden die physikalischen Größen Weg und Kraft gemessen. Der Weg wurde mit Wirbelstromsensoren und die Kraft mit einer Wägezelle erfasst. Die Aufnehmer hatten die Aufgabe, das mechanische Eingangssignal in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Das Signal wurde mit Hilfe der Signalkonditionierung verstärkt und der Datenerfassung zur Darstellung und Speicherung weitergegeben.

3.1.2.1 Beschreibung

a) bis d)

Die Ölpumpe stellte den Systemdruck von 2 bis 5 bar. Dieser Druckbereich würde im realen Betrieb von der Motorölpumpe geliefert werden. Über einen Kugelhahn wurde der jeweilige Druck eingestellt. Das Manometer diente zur Kontrolle des jeweiligen Druckes.

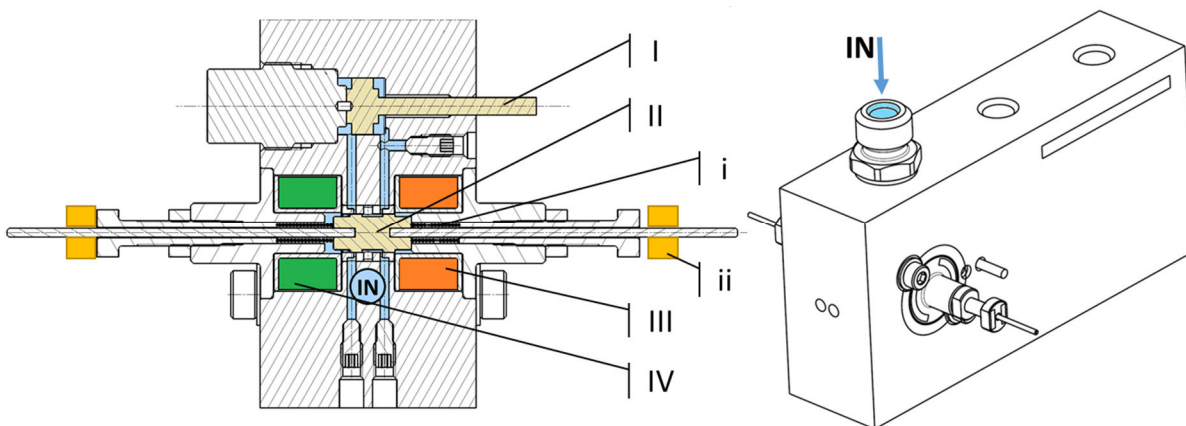


Abbildung 3-2: Schnittdarstellung Test-RIG

e) Test-RIG

Der Test-RIG war ein Aufbau um ein Ventil im Pleuel nachzustellen. Die Dimensionen, Toleranzen und Abmessungen waren analog dem zukünftigen Pleuel. Die wesentlichen Bestandteile waren der Steuerschieber (I), der Ankerschieber (II) und die beiden Ankerspulen (III, IV). Aufgrund des ferromagnetischen Materials des Ankerschiebers (16MnCr5) wurde dieser von der Ankerspule A (IV) oder der Ankerspule B (III) angezogen und gab jeweils einen Öl-Kanal frei. Dadurch wurde der Steuerschieber (I) in eine Richtung gedrückt. Im realen Pleuel schaltet der Steuerschieber wiederum den Hochdruckkreislauf. Der Aufbau wurde als 3-Wege Magnetventil konstruiert. Zwei Federn (i, links und rechts) mussten den Ankerschieber genau in Position halten, was aufgrund der Toleranzen der einzelnen Bauteile schwierig einzustellen war. Außerdem mussten die Ankerspulen ständig bestromt werden um den Ankerschieber zu halten. Diese Tatsachen führten dazu, dass das 3-Wege Ventil zu einem bistabilen Ventil erweitert wurde. Hierfür mussten lediglich die Federn (i) entfernt und zwei Magneten (ii, links und rechts) angeklebt werden. Der Ankerschieber blieb nun aufgrund der Magnete in einer Position ohne Bestromung stehen.

f) Generatorsimulator

Der Generatorsimulator war ein Ersatz für den Stator, der später im Motor im Bereich der Ölwanne eingebaut werden würde, und gab das Signal für die Ankerspulen. Je nach Drehzahl veränderte sich die Frequenz der Spannung bzw. des Stroms, die das Vorbeilaufen des Pleuels am Generator simulierte.

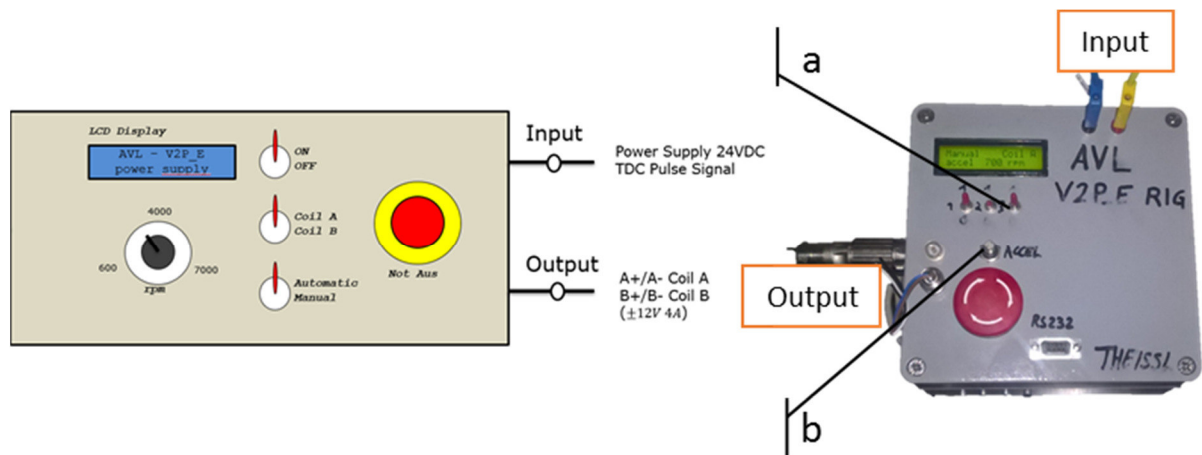


Abbildung 3-3: Generatorsimulator [6]

In einem früheren Testaufbau wurde die Signalübertragung vom Stator auf den Pleuel (Rotorspule) untersucht. In Zusammenarbeit mit einem Hersteller konnte so ein Signalverlauf (Spannungsverlauf) ermittelt werden, der nun durch den Generatorsimulator nachgestellt wurde. Dieser wurde in der AVL [6] entwickelt und gefertigt. Mit dem Schalter a) konnte zwischen den beiden Ankerspulen geschaltet werden. Der Drehknopf b) regelte die Frequenz, indem eine Drehzahl eingestellt wurde. In der folgenden Abbildung ist das ausgegebene Signal ersichtlich.

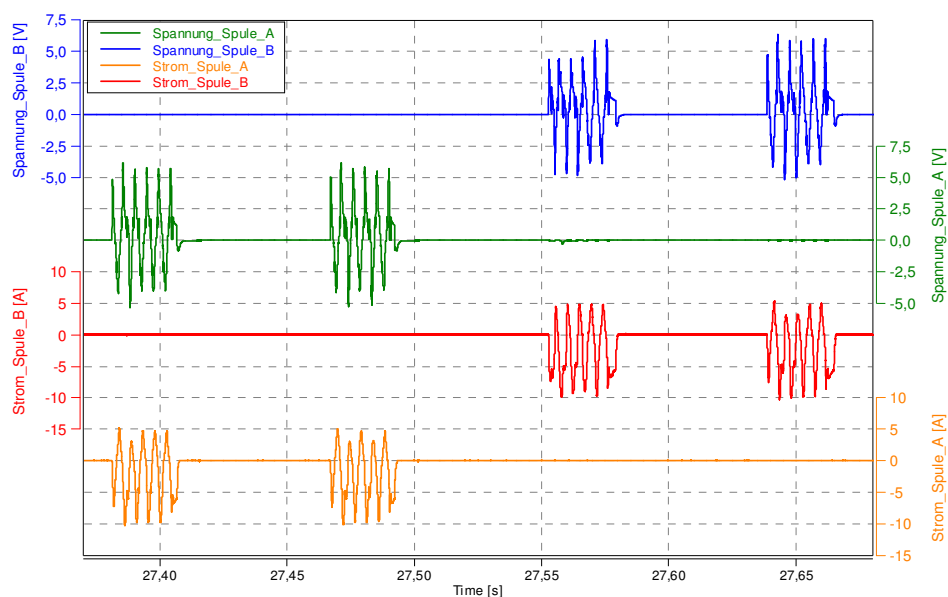


Abbildung 3-4: Signal von Generatorsimulator [6]

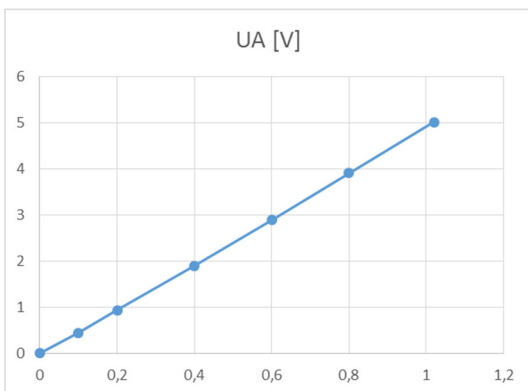
g) Labor-Netzteil BT-305

Das stufenlos einstellbare Netzgerät lieferte die 24V/8A für den Generatorsimulator.

h) Multifunktions-Controller mit Grafik-Display

Hochleistungs-Prozessor zur Signalaufbereitung und Weiterverarbeitung. Dieser Verstärker ist speziell für Wirbelstromsensoren konzipiert. Zur Kalibrierung wurden bekannte Positionen angefahren und die jeweilige Spannung festgehalten. Dadurch ergab sich ein Wert ($\frac{mm}{Volt}$) für die Datenerfassungs-Software IndiCom, die den Verstellweg in Millimeter ausgab.

$$\frac{mm}{Volt} = 0.20318$$



s [mm]	UA [V]
0	0,006
0,1	0,454
0,2	0,943
0,4	1,908
0,6	2,893
0,8	3,915
1,02	5,02

Abbildung 3-5: Kalibrierkurve des Multifunktions-Controller

i) Messdatenerfassung

Mit der Mess- und Datenerfassungs-Software AVL IndiCom wurden die Signale grafisch dargestellt und aufgezeichnet. In dieser Software konnten Einstellungen für das AVL IndiModul sowie für den AVL Amplifier vorgenommen werden.

Die Messdaten wurden mit dem Auswertetool AVL Concerto V4.8 für die weitere Diskussion und zum Vergleich aufbereitet.

j) AVL Amplifier

Zur Verstärkung des Signales wurde der AVL Amplifier verwendet. Er wurde so eingestellt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Spannung herrschte. Das verstärkte analoge Signal wurde dem AVL IndiModul zur Digitalisierung weitergegeben.

k) AVL IndiModul

Hier fand die Umwandlung Analog zu Digital statt. Als Schnittstelle zwischen Signalkonditionierung und Datenerfassungsgerät (Laptop) erfasste das AVL IndiModul alle analogen Signale (Ankerhub, Steuerschieberhub,...) und gab sie über eine Ethernet-Schnittstelle weiter.

3.2 Ablauf

Als erstes wurde das 3-Wege-Magnetventil (in Abbildung 3-2 ohne die gelben Magnete) zur Überprüfung aufgebaut. Wie schon zuvor erwähnt, musste der Ankerschieber durch die richtige Vorspannung der Federn in die mittlere Stellung gebracht werden. Nachdem der Test-RIG mit allen Anschlüssen aufgebaut wurde, ging es darum die Messvorrichtung ordnungsgemäß zu montieren. Im Anschluss wurden die beiden Wirbelstromsensoren und die Wägezelle kalibriert, um genaue Messergebnisse zu erhalten.

Zwischen den beiden Ankerspulen musste per Hand am Generatorsimulator umgeschaltet werden.

Als Prüfdauer wurden 60 Sekunden festgelegt. Alle 5 Sekunden wurde von Ankerspule A zu Ankerspule B von Hand geschaltet. Der Drehzahlbereich, in dem das Ventil auch später schalten muss, liegt zwischen 700 min^{-1} & 4500 min^{-1} . Bei diesen Drehzahlen herrscht ein Ölkreislaufdruck von 2 bis 5 bar (drehzahlabhängig). Die gesamte Prüfdauer wurde für die spätere Auswertung aufgezeichnet.

3.2.1 Messprogramm

3.2.1.1 Aufbau 1

3-Wege-Magnetventil

messtechnische Erfassung:

- Spannung Ankerspule A/Ankerspule B [V]
- Strom Ankerspule A/Ankerspule B [A]
- Ankerhub [mm]
- **Steuerschieberhub [mm]**

Betriebspunkte: 2 unterschiedliche Drücke

- 2,2 bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500
- 4,4 bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500

3.2.1.2 Aufbau 2

3-Wege-Magnetventil

messtechnische Erfassung:

- Spannung Ankerspule A/Ankerspule B [V]
- Strom Ankerspule A/Ankerspule B [A]
- Ankerhub [mm]
- **Steuerschieberkraft [N]**

Betriebspunkte: 2 unterschiedliche Drücke

- 2 bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 4500
- 5 bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 4500

Nachdem die wichtigsten Größen des 3-Wege-Magnetventils erfasst wurden, wurde auf ein bistabiles Ventil umgebaut. Hierfür mussten lediglich die Federn entfernt und Magnete angeklebt werden (Abbildung 3-2).

3.2.1.3 Aufbau 3

Bistabiles Ventil

messtechnische Erfassung:

- Spannung Ankerspule A/Ankerspule B [V]
- Strom Ankerspule A/Ankerspule B [A]
- Ankerhub [mm]
- **Steuerschieberhub [mm]**

Betriebspunkte: 2 unterschiedliche Drücke

- 2,2bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500
- 4,4 bar:
 - Drehzahlen [min^{-1}]: 700, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500

3.3 Ergebnisse

Hauptaufgabe war die Funktion des Schaltens zu überprüfen. Das Interesse galt auch dem Verhalten des Steuerschiebers beim Bewegen des Ankerschiebers (Zyklen bis der vollständige Weg zurückgelegt war, Kraftentwicklung,...). Schon mit den ersten Tests wurde die Funktion bestätigt und es konnte mit den Prüfläufen begonnen werden. Da es sich um einen recht einfachen Messaufbau handelte, waren die Ergebnisse auch wie erwartet. Aus den vielen Prüfläufen wurden die für den realen Motorbetrieb interessantesten Kombinationen ausgewertet.

In den folgenden Diagrammen ist die Charakteristik bei der Verstellung der Schieber, die vorhandenen Spannungen und Ströme und die Kraftentwicklung dargestellt. Je nach Drehzahl bzw. Öldruck veränderte sich hauptsächlich die Zeit der Schieber, die sie benötigten, um in ihre Endlage zu gelangen.

Für die Auswertung wurde das Auswertetool AVL Concerto verwendet. Damit konnten Funktionen angelegt werden, um z.B. die Arbeit zu berechnen.

Aufbau 1: 3-Wege-Ventil

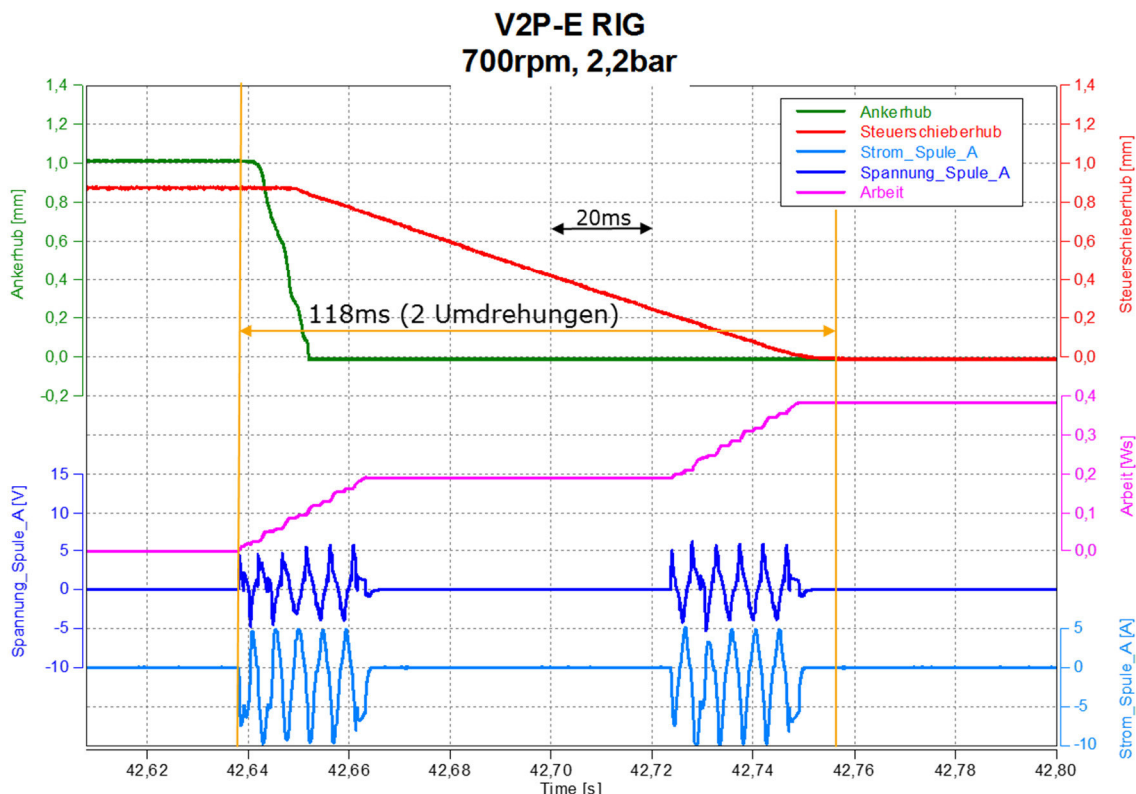


Abbildung 3-7: Signalauswertung bei 700min⁻¹ und 2.2bar

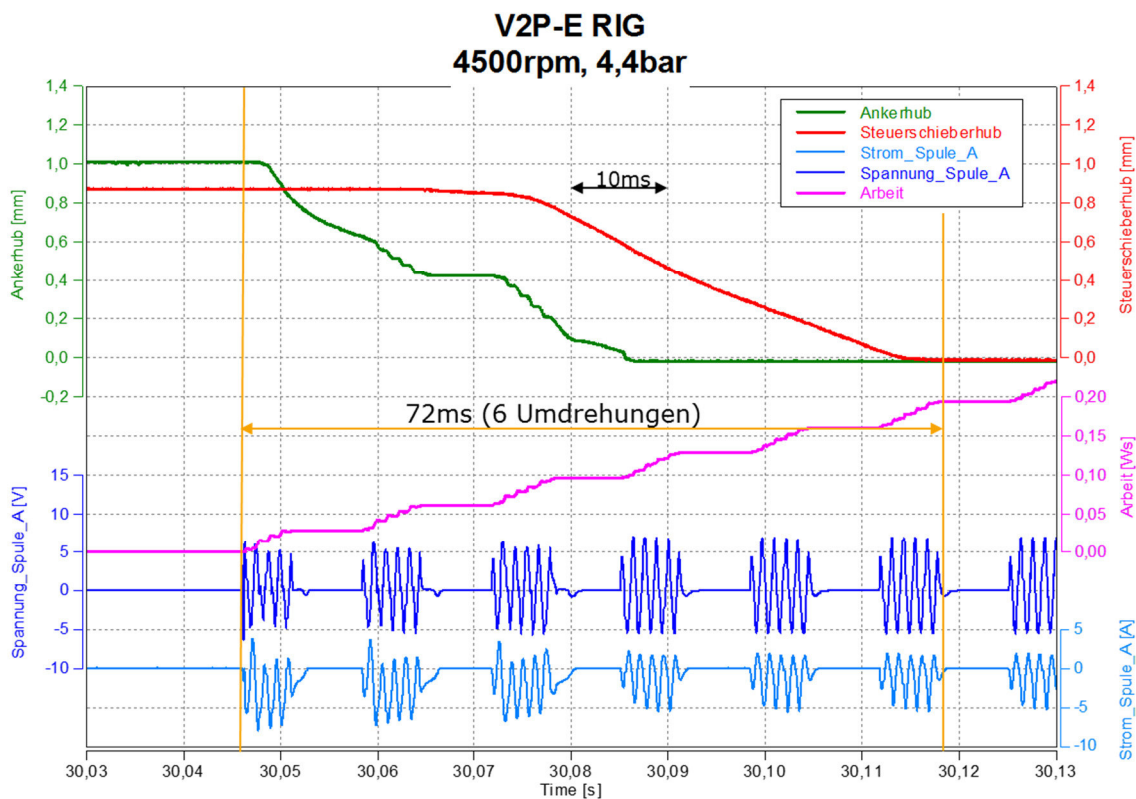


Abbildung 3-6: Signalauswertung bei 4500min⁻¹ und 4.4bar

Aus den beiden Diagrammen ist ersichtlich dass die Zeit, die für die Endposition des Steuerschiebers nötig ist, mit höherem Druck abnimmt. Jedoch verlangt der Schaltvorgang bei steigender Drehzahl mehr Umdrehungen des Pleuels um die nötige Energie, die der Ankerschieber zum Verstellen braucht, bereitzustellen. Die „Arbeit“ ist auch ein sehr wichtiger Wert der Auswertung welche hier direkt abgelesen werden kann. Ausschlaggebend für die nötige Arbeit eines Schaltvorganges ist der Ankerschieber. Sobald er seine Anfangs- oder Endposition erreicht hat, steht der Öldruck in einer der beiden Leitungen für die Positionierung des Steuerschiebers, und der Pleuel kann in kurze oder lange Stellung gehen. Die Arbeit ist Drehzahl- und Druck-unabhängig. Wie in den Diagrammen ersichtlich, liegt sie stets bei ca. 0.10 Ws . Dieser Wert ist einerseits zum Vergleich der Konzepte von großer Bedeutung, andererseits muss er im Gesamtwirkungsgrad berücksichtigt werden. Wird mehr Arbeit zum Schalten des Pleuels benötigt als durch das System erzielt wird, ist eine Umsetzung dieses Konzeptes unnötig.

Aufbau 2: 3-Wege-Ventil

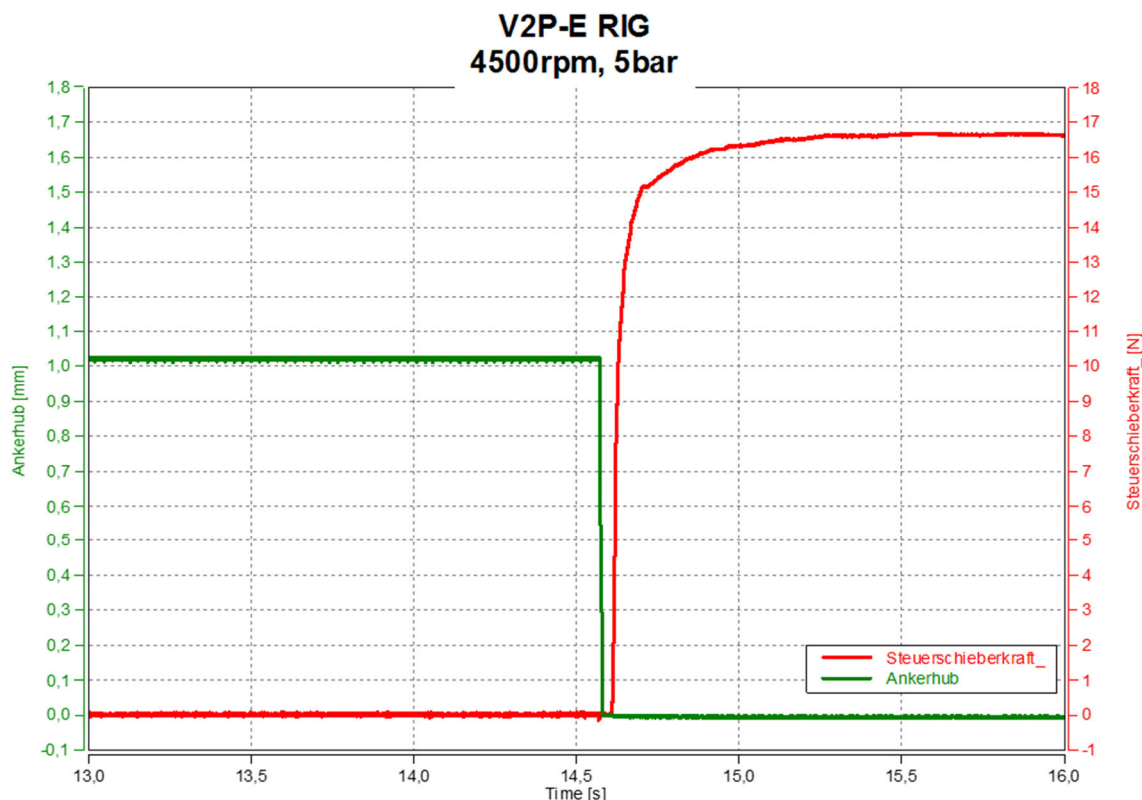


Abbildung 3-8: Steuerschieberkraft bei 4500 min^{-1} und 5bar

Abbildung 3-8 zeigt die Kraftentwicklung beim Schaltvorgang. Da die Kraft und der Weg des Steuerschiebers nicht gleichzeitig gemessen werden konnten, gibt es kein gemeinsames Diagramm dieser Werte. Ist der Steuerschieber an seiner Position

angelangt, stellte sich die theoretisch berechnete Kraft, die aus dem Druck abgeleitet wurde, ein. Anders als beim Steuerschieber, dessen Hubposition keinen Einfluss auf die Kraft ausübt, da Druck und Fläche sich während der Verschiebung nicht ändern, ist die Kraft, die auf den Ankerschieber wirkt, positionsabhängig. Die Stellung des Ankers ist ausschlaggebend für die magnetische Anziehung, die die Ankerspulen auf ihn auswirken kann. Diese Kraft-Ankerhub-Abhängigkeit wie in Abbildung 3-9, machte den Abschluss der Messungen. Durch den Spannungsverlauf des Stators entstand eine analoge Kraft, die als „nagelndes“ Signal wiedergegeben wurde. Durch Mittelung dieser Werte zu den jeweiligen Positionen entstand das folgende Diagramm. Durch eine Überschlagsrechnung wurde eine Reibkraft im Betrieb berechnet, die es beim Verschieben zum Überwinden gilt. Diese Kraft limitiert den maximal möglichen Hub des Ankerschiebers.

$$F_R = F_N \cdot \mu = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \mu$$

$$F_R = 0.0017kg \cdot \left(\frac{6000 \text{ min}^{-1}}{60} \cdot 2\pi \right)^2 \cdot 0.04m \cdot 0.1$$

$$F_R = 2.7N$$

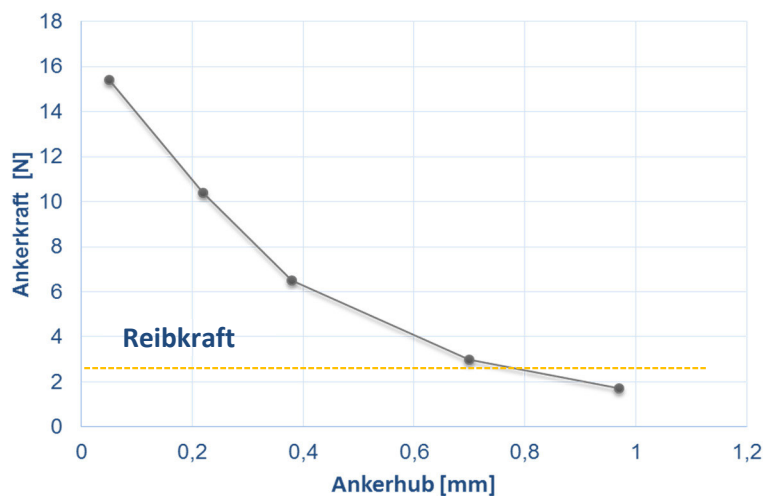


Abbildung 3-9: Ankerkraft in Abhängigkeit des Ankerhubs

Die Ergebnisse des bistabilen Ventiles, wie sie in Aufbau 3 gemessen wurden, sind dem 3-Wege-Ventil gleich. Als Hauptkenntnis wurde überprüft, ob die kleinen Magneten links und rechts den Anker in Position halten können.

3.4 Zusammenfassung

Komponententests sind ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung und erlauben eine kostengünstige Überprüfung einzelner Teilfunktionen.

Der Test-Aufbau hier, der zur Untersuchung eines neu entwickelten Ventils diente, war erfolgreich und brachte die gewünschten ersten Ergebnisse. Nun konnte die Entwicklung fortgeführt werden.

Jedoch ist anzuführen, dass es sich hier um einen rein statischen Funktionstest gehandelt hat. Der Einfluss unterschiedlicher Öltemperaturen, weiterer wirkender Beschleunigungskräfte im Betrieb oder der Vibrationen, müsste in weiteren Tests untersucht werden. Der Aufwand solcher Teilversuche im Einzelnen ist jedoch nicht vertretbar. Somit wurde beschlossen, im Zuge der Funktionstests des gesamten Pleuelprototyps diese mit aufzunehmen.

Bevor ein Prototyp des V2P-E zur Fertigung freigegeben werden konnte, fehlte noch ein letzter Entwicklungsschritt. Die Übertragung des Signales von der Rotor- zur Ankerspule wurde für die Komponententests an der Oberfläche fixiert. Mit dieser einfachen Lösung könnten jedoch nur eingeschränkt Tests durchgeführt werden und sie ist für die Serie nicht umsetzbar. Dieser Fragestellung wurde im vierten Teil der Arbeit nachgegangen.

4 Entwicklung einer elektrischen Verbindung

Nachdem die Funktion am Test-Aufbau überprüft wurde, konnte die Weiterentwicklung fortgeführt werden. Nun musste ein Konzept für eine seriennahe Lösung der Verbindung von Ankerspule zu Rotorspule gefunden werden. Aufgrund der extremen Belastungen, die auf diese Leitung wirken, war dies keine triviale Aufgabe. Um möglichst effektiv zu einem Resultat zu gelangen, musste methodisch vorgegangen werden. Hierfür gibt es eine Vielzahl an Modellen, die je nach Anwendungsgebiet verwendet werden. Für diese Problematik bedienten wir uns dem „Problemlösungszyklus des Systems“ nach Daenzer & Huber. Diese Methodik stützt sich auf die Darstellung der Grundmuster wie Zielsuche, Lösungssuche und der Auswahl.

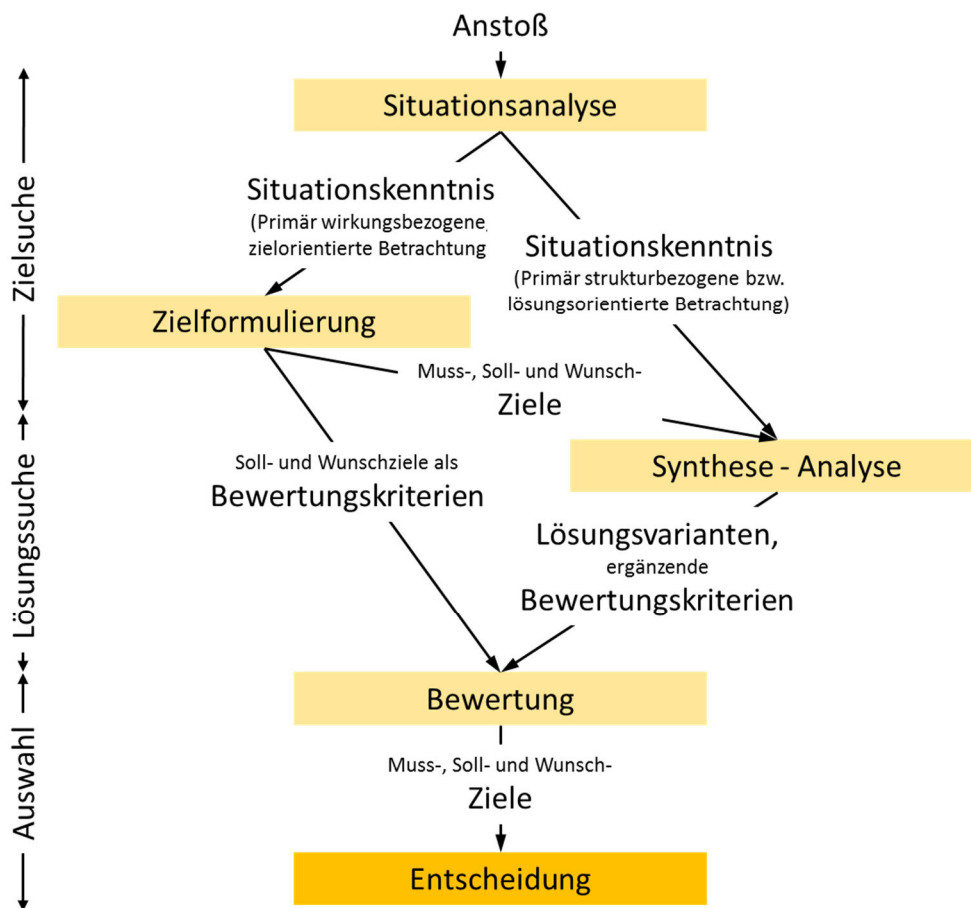


Abbildung 4-1: Problemlösungszyklus [7]

Ein Modell zur Vorgehensweise soll die Produktentwicklung unterstützen und schneller ans Ziel führen. Durch systematisches Abarbeiten einzelner Punkte, jedoch auch mancher Iterationsschleifen, werden stets die Rahmenbedingungen eingehalten und so der Fokus auf das Wesentliche nicht verloren.

4.1 Zielsuche

Als Ziel wird eine Übertragungsmöglichkeit einer max. Spannung von 12V und einem Strom von 8A zwischen der Rotorspule am Deckel und der Ankerspule im Oberteil des Pleuels gesucht. In Abbildung 4-2 ist eine Anforderungsliste erstellt worden, die Kriterien in Muss-, Soll- und Wunschziele kategorisiert. Im Weiteren wurden die Soll- und Wunschziele zur Bewertung verwendet. Die Mussziele sind ein absolutes „Knock out“ Kriterium für das Konzept. Diese Liste musste im Denkprozess immer miteinbezogen werden.

Anforderungsliste			VCR-Pleuel: elektrische Verbindung V2P-E		
			Muss	Soll	Wunsch
Nr.	Bezeichnung	Werte, Daten	Kriterium		
Allgemein					
1	Kostengünstig			x	
2	kein Patentkonflikt		x		
3	keine zusätzlichen Ventilationsverluste			x	
4	keine beweglichen Teile		x		
5	Integration hoch				x
6	verwendung von Gleich- bzw Normteilen				x
7	absolute Zuverlässigkeit		x		
8	Lebensdauer	300 000km bzw. 15Jahre	x		
Elektrische Randbedingungen					
9	elektromagnetische Verträglichkeit		x		
10	Verlustleistung gering			x	
11	Verträglichkeit der Werkstoffpaarung		x		
12	übliche Leitermaterialien			x	
Belastung (Randbedingungen)					
13	Sicherheit bei max. Beschleunigung	ca. 1800 g	x		
14	geringe Masse aufgrund der Beschleunigungen			x	
15	Betriebstemperaturbereich	-40 bis 130 °C	x		
16	Chemische Beständigkeit (Öl, Additive)		x		
17	Resistent gegen Verschmutzung			x	
18	keine Festigkeitsminderung des Pleuels unter Grenze		x		
Montierbarkeit					
19	kein löten im Motor				x
20	Platzbedarf		x		
21	einfache Montage			x	
22	zerlegbar				x

Abbildung 4-2: Anforderungsliste der elektrischen Verbindung

Aufgrund der Neuentwicklung gab es keinen IST-Zustand. Lediglich der Pleuel ohne Leitung war verfügbar. In Abbildung 4-3 ist die Pleuelgeige in ein Motorgehäuse gelegt worden, um den aktuellen Stand des Pleuels mit seinen minimalen Abständen zu zeigen. Neben der einfachen Integrierbarkeit in bestehende Motorkonzepte gilt die Montierbarkeit in der Serie als ein sehr wichtiger Punkt.

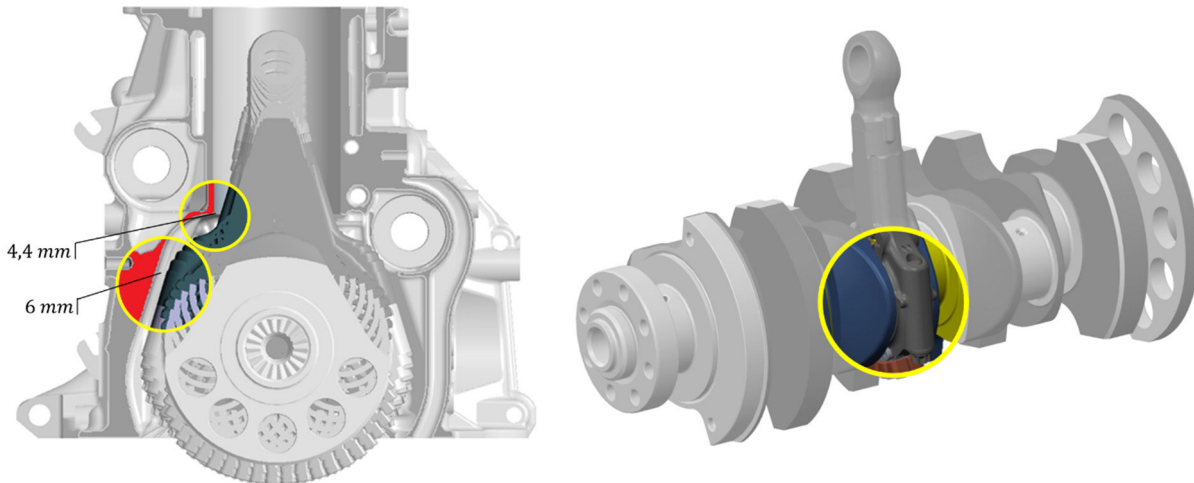


Abbildung 4-3: Platzbedarf und Montierbarkeit im Detail

4.2 Lösungssuche

4.2.1 Gliederung der Übertragung

Da es nicht möglich war mit einem durchgehenden Draht den kompletten Stromkreislauf zu verlegen, wurde er in drei Teilgebiete unterteilt. Die Herausforderung lag nun darin, diese so zu verbinden, dass sie der Anforderungsliste und den

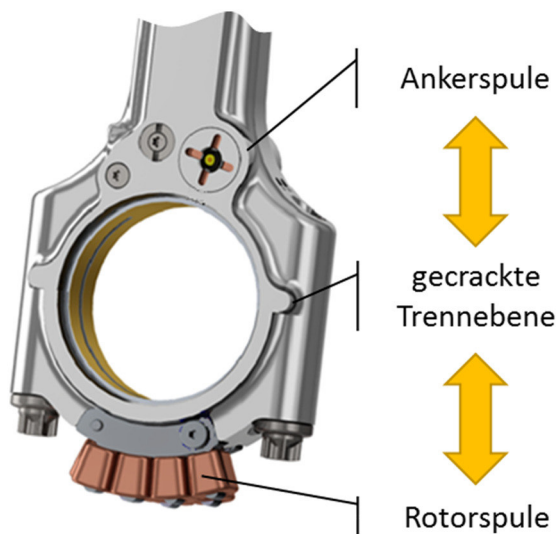


Abbildung 4-4: Glieder der Übertragung

Rahmenbedingungen genügen. Hauptsächlich werden in dieser Arbeit die Möglichkeiten der Führung der Leitung behandelt. Basis waren die zuvor ausgelegten Bauteile:

Vorgabe für die Ankerspule:

- 84 Windungen
- Drahtdurchmesser 0,45mm

Vorgabe für die Rotorspule:

- 12 Bleche (Eisenlänge 6 mm)
- 4 Zähne mit jeweils 72 Windungen
- Drahtdurchmesser 0,45mm

Für die Leitung über die *gecrackte Trennebene* wird in der DIN VDE 0298-4 der nötige Querschnitt abgeleitet. Die Norm beschreibt für einen Leiterquerschnitt von 0.75mm^2 eine maximale Belastung von 15A [8]. Hinzu kommt ein Faktor, der den Einfluss der Betriebstemperatur miteinbezieht. In unserem Fall bei ca. 80°C liegt dieser Faktor bei 0.5 [9]. So kommt man auf eine maximale Belastung von 7.5A . Bei Durchsicht der Signale des Test-Aufbaus erkennt man eine ausreichende mechanische Sicherheit.

Aufgrund dieser Auslegung wird für den Leitungsquerschnitt ein Durchmesser von 0.5mm bestimmt. Benötigt wird pro Spule nur eine Leitung, da als Masse der Pleuel zum Einsatz kommt.

4.2.2 Möglichkeiten der Verbindung der Teilgebiete

Im ersten Teil der Lösungsfindung wurden Überlegungen darüber getroffen, wie man von der Anker- bzw. Rotorspule, deren jetziger Stand eine einfache aufgewickelte Spule darstellt, den Draht weiterführen kann. Da es eine seriennahe Lösung werden soll, musste jegliche Fehlerquelle wie z.B.: eine Bewegung der dünnen Drähte der Spulen, verhindert werden. Es musste eine stabile Verbindungslösung zwischen den Wicklungen und der Leitung über die *gecrackte Trennebene* gefunden werden. Um einen grundsätzlichen Überblick über die möglichen Anschluss- oder Kontaktvarianten zu bekommen, wurden einige Lösungsvorschläge erarbeitet und im Anschluss zu verschiedenen Konzepten verknüpft.

4.2.2.1 Ankerspule – Anschlussvarianten

Nach einer Recherchephase mit SpulenhHersteller ergaben sich nur wenige konkrete Lösungsmöglichkeiten. Aufgrund der dringlichsten Geheimhaltung dieses Konzeptes konnte auch nicht mit allen Informationen an den Lieferanten herangetreten werden. Aufgrund der hohen Stückzahlen in der Serie standen jedoch alle Möglichkeiten offen. Bereits in Serie hergestellt werden Spulen mit einem „Anwickelstift“. Die Enden des Wickeldrahtes sind direkt mit den Zapfen verbunden und ermöglichen so eine Weiterführung der Leitung mittels einer einfachen Steckverbindung (Abbildung 4-6). Nach Rücksprache mit einem Hersteller können diese Zapfen in jeder Form ausgeführt werden. Somit bleibt nur mehr die Überlegung einer geeigneten Kontaktstelle.



Abbildung 4-6: Spule mit „Anwickelstift“ [10]

Eine weitere Möglichkeit war den Spulenträger individuell zu gestalten und ihn dann dem Spulenhersteller zum Aufwickeln zu geben. Hiermit liegen die Grenzen nur mehr in der Fertigungsmöglichkeit des Trägers.

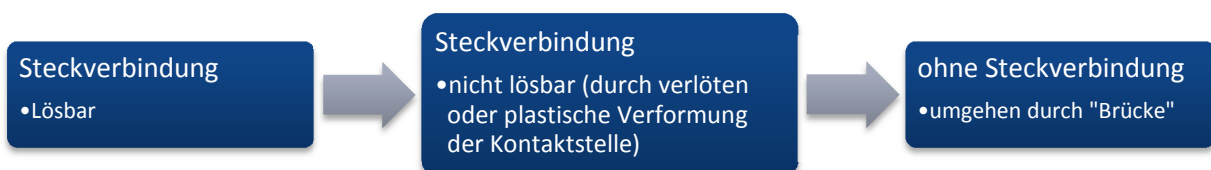


Abbildung 4-5: Spulenträger [11]

4.2.2.2 Gecrackte Trennebene – Anschlussvarianten

Um eine Verbindung zwischen dem oberen Teil des Pleuels und seinem Deckel über die Trennebene herzustellen, gibt es grundsätzlich die Möglichkeit einer einfachen Steckverbindung. Diese könnte lösbar ausgeführt werden, ist aber nicht zwingend erforderlich, da der Pleuel nur einmal zusammengebaut wird.

Außerdem gäbe es die Möglichkeit diese Schnittstelle mit einer „Brücke“ zu umgehen.



4.2.2.3 Rotorspule – Anschlussvarianten

Da die Rotorspule im Prinzip ähnlich der Ankerspule ist, gelten für diese die gleichen Möglichkeiten für einen Kontakt. Außerdem kann ein zusätzliches Blech oder ein zusätzliches Bauteil dazu verwendet werden (ähnlich dem Spulenträger) mit üblichen Anschlüssen weiterzuarbeiten.

Die Schwierigkeit liegt darin, einen freien Draht, wie es hier bei der Anker- und Rotorspule vorherrscht, zu einer robusten Einheit zu bringen. Für eine bessere Übersicht wurden die einzelnen Ideen in einem morphologischen Kasten zusammengetragen.

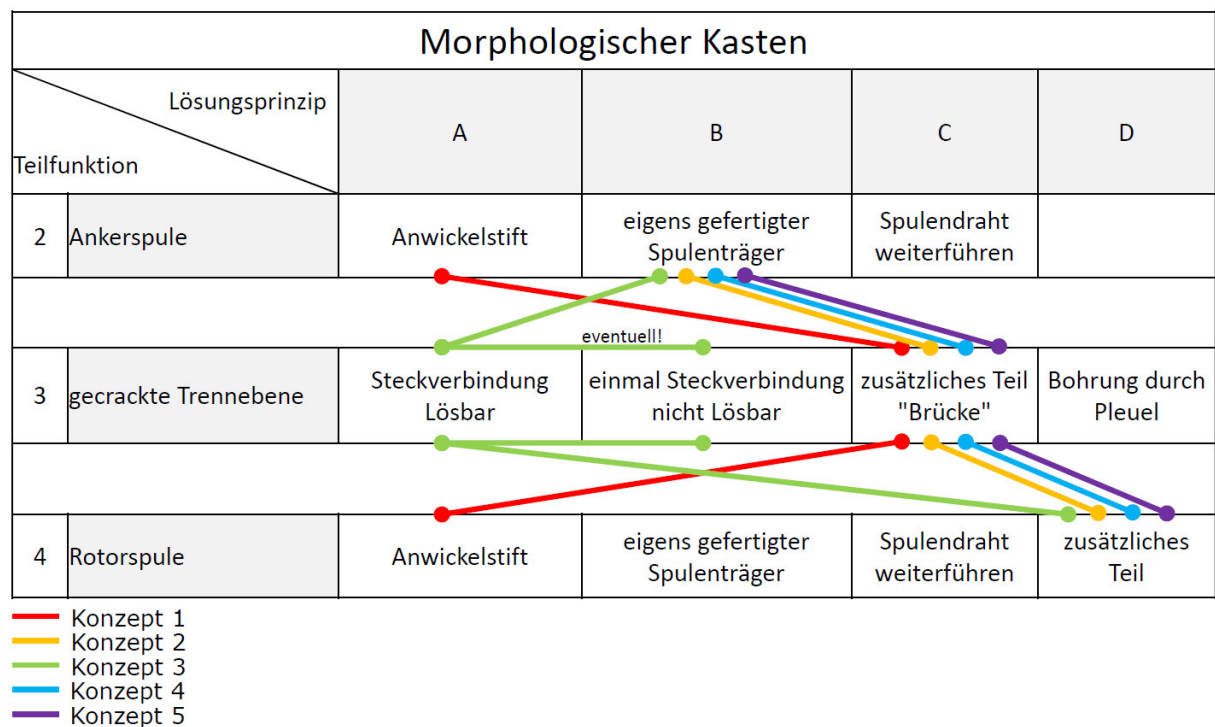


Abbildung 4-7: Morphologischer Kasten

Indem die verschiedenen Lösungsprinzipien der Teilfunktionen miteinander verbunden wurden, entstanden so fünf mögliche Konzepte. In dieser Konzeptfindung waren auch über weitere Verbindungen Überlegungen getroffen worden, jedoch schieden diese aufgrund einer Verletzung der Mussziele schon im Vorhinein aus und kamen nicht in die Konstruktionsphase.

4.2.3 Konzepte der elektrischen Verbindung

Bei diesen Konzepten ging es vorrangig um die Leitungsführung, als um die Kontaktstelle im Detail. Aufgrund der Suche einer „seriennahen“ Lösung, wurde besonders auf den Zusammenbau am Montageband geachtet. In Abbildung 4-8 sind die entwickelten Konzepte dargestellt.



Konzept 1



Konzept 2



Konzept 3



Konzept 4



Konzept 5

Abbildung 4-8: Übersicht Konzepte

Im Weiteren werden die Details der Konzepte noch näher erklärt und die Montagesituation kurz beschrieben.

4.2.3.1 Konzept 1

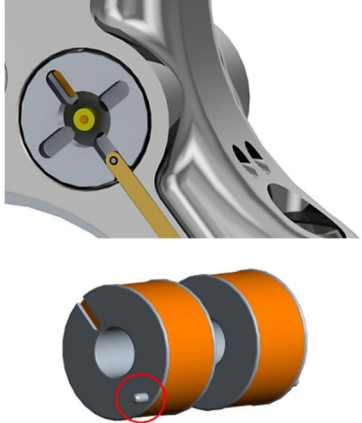

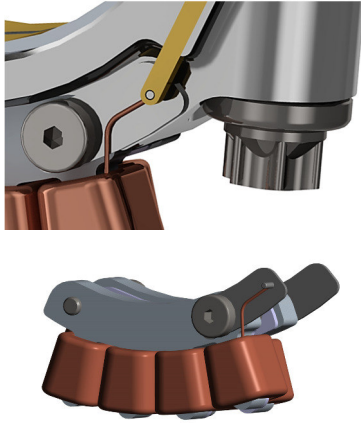

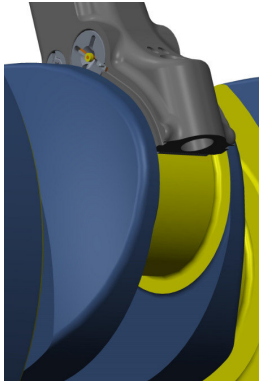

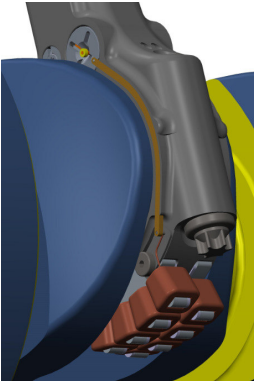
Ankerspule	gecrackte Trennebene	Rotorspule
Anwickelstift	zusätzliche „Brücke“	Anwickelstift
		
<p>Beschreibung</p>  <p>Dieses Konzept zeichnet sich durch seine Einfachheit aus. Es wurde das Lösungsprinzip der Anwickelstift für die Ankerspule und einem kleinen Blech mit Anwickelstift für die Rotorspule verwendet. Als „Brücke“ diente ein Spritzgussteil aus Kunststoff mit eingossener Kupferseele.</p> <p>Bei der Montage wurde wie üblich das Oberteil des Pleuels auf die Kurbelwelle gelegt. Danach wurde der Deckel angeschraubt. Für eine elektrische Verbindung musste die „Brücke“ links und rechts in die dafür gefertigte Nut reingedrückt werden. Um die kleinen Pins zu treffen würde hierfür eine Montagevorrichtung notwendig sein.</p>		
Montage		
		

Abbildung 4-9: Übersicht Konzept 1

4.2.3.2 Konzept 2

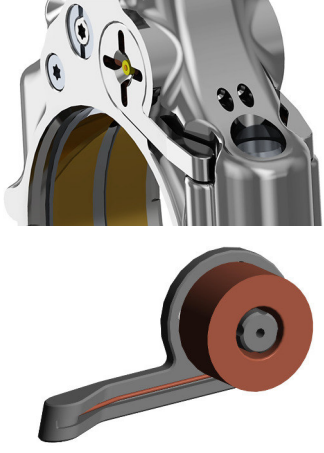
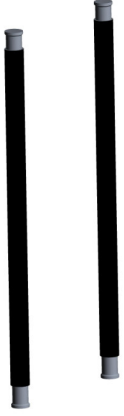
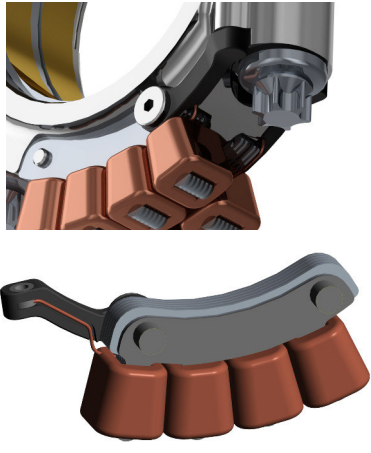

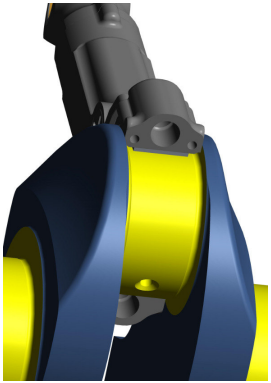
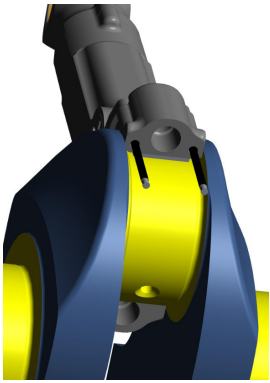

Ankerspule	gecrackte Trennebene	Rotorspule
erweiterter Spulenträger	zusätzliche „Brücke“	zusätzliches Teil
		
<p>Beschreibung</p> 	<p>Hier wurde das erste Mal der Spulenträger erweitert. Mit dieser Möglichkeit ließen sich mehrere Konzepte ableiten. Der Draht der Ankerspule wurde weitergeführt und mit einer Verbindungsbuchse verbunden. Für die Rotorspule wurde ein zusätzliches Teil benötigt, in dem auch der Draht weitergeführt und mit einer Buchse verbunden wurde. Zur Überwindung der Trennfläche dienten zwei einfache Verbindungsstifte.</p> <p>Die Montage verlangte einen Zwischenschritt, in dem die Stifte links und rechts eingesteckt wurden. Dieser könnte jedoch durch eine Vormontage der Stifte am Oberteil des Pleuels vermieden werden.</p>	
Montage		
		

Abbildung 4-10: Übersicht Konzept 2

4.2.3.3 Konzept 3


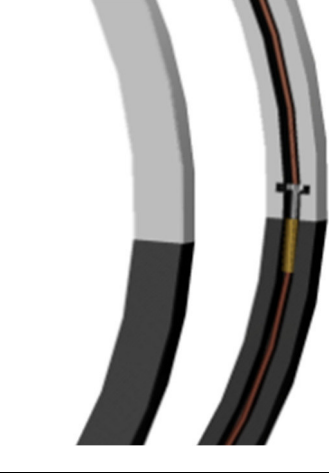
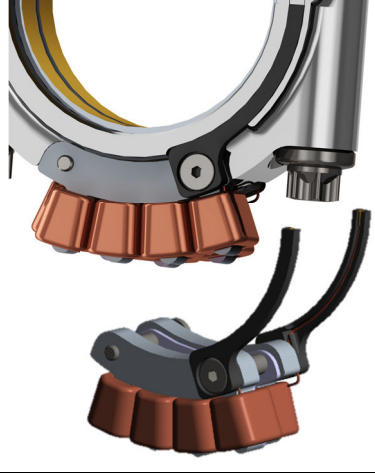



Ankerspule	gecrackte Trennebene	Rotorspule
erweiterter Spulenträger	Steckverbindung	zusätzliches Teil
		
<p>Beschreibung</p> 	<p>Hier wurde der Spulenträger bzw. das zusätzliche Teil der Rotorspule bis zur Trennebene erweitert. Der Draht der beiden Spulen musste zur gecrackten Fläche geführt und mit einem Stift oder einer Hülse verbunden werden. Damit konnte eine lösbare Steckverbindung ermöglicht werden. Allerdings wäre auch eine nicht-lösbare Verbindung möglich, indem der Stift und die Hülse derart dimensioniert werden, sodass sie sich bei der Montage gemeinsam plastisch verformen.</p> <p>Die Montage veränderte sich nicht zu einem herkömmlichen Pleuel.</p>	
Montage		
		

Abbildung 4-11: Übersicht Konzept 3

4.2.3.4 Konzept 4

Ankerspule	gecrackte Trennebene	Rotorspule
erweiterter Spulenträger	zusätzliche „Brücke“	zusätzliches Teil
		
<p>Beschreibung</p>  <p>Bei diesem Lösungsvorschlag wurde die Leitung neben der Lagerschale geführt. Der Träger der Ankerspule und das zusätzliche Teil der Rotorspule wurden so ausgeführt, dass eine Flachsteckverbindung verwendet werden konnte. Als „Brücke“ wurde eine Schiene mit eingelegter Leitung und Gegenstück der Flachstecker verwendet. Der Anschlag des Verbindungselementes diente gleichzeitig als radiale Zentrierung.</p> <p>Bei der Montage wurde wie gewohnt das Oberteil des Pleuels auf die Kurbelwelle gelegt. Im nächsten Schritt musste links und rechts die „Brücken“ bis zum Anschlag geschoben werden. Danach wurde der Pleueldeckel aufgesetzt und verschraubt.</p>		
Montage		
		

Abbildung 4-12: Übersicht Konzept 4

4.2.3.5 Konzept 5

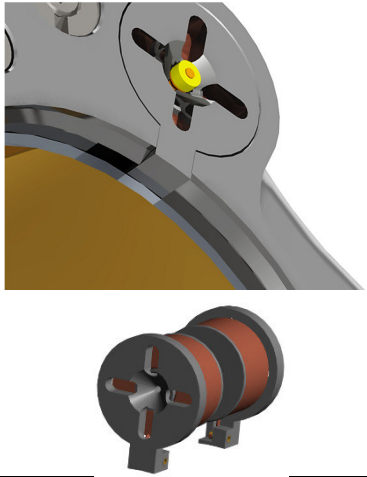

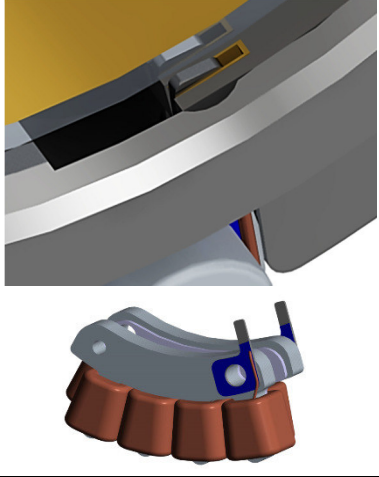
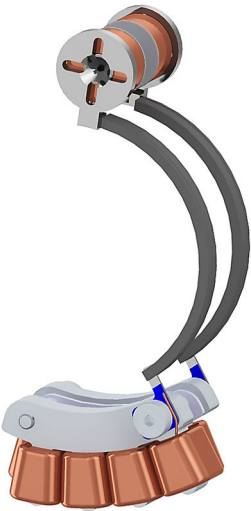
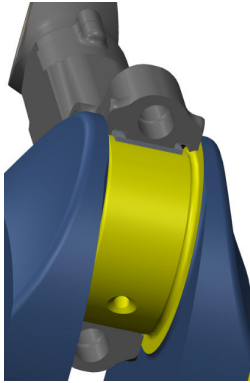


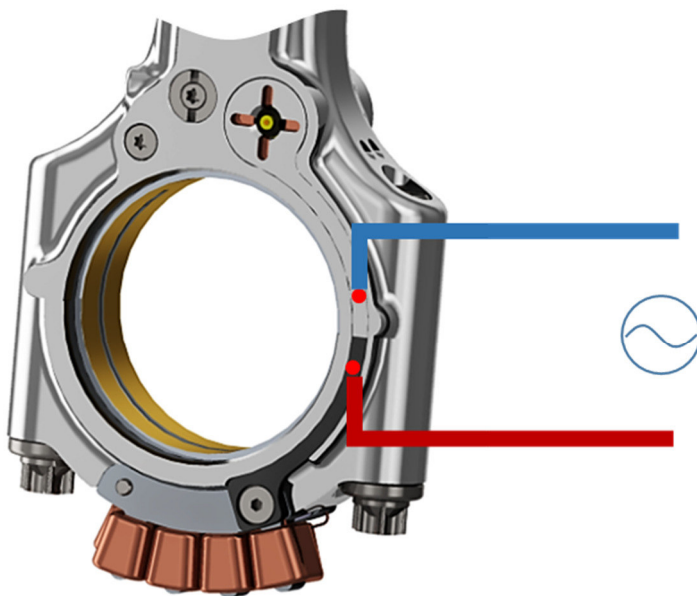
Ankerspule	gecrackte Trennebene	Rotorspule
erweiterter Spulenträger	zusätzliche „Brücke“	zusätzliches Teil
		
<p>Beschreibung</p>  <p>Dieses Konzept ist eine Erweiterung von Konzept 4. Die Führung der Schiene am Pleuel wurde vereinfacht, indem sie unter die Lagerschale gelegt wurde. Um eine weitere Möglichkeit, außer der Flachsteckverbindung zu zeigen wurde hier bei der Ankerspule eine Buchse-Stift Verbindung gewählt. Ansonsten ist sie dem Konzept 4 sehr ähnlich.</p> <p>Für die Montage wurde das Oberteil des Pleuels wiederum auf die Kurbelwelle gesteckt. Als nächstes musste die Lagerschale des Pleueldeckels auf die Lauffläche gelegt und die beiden Schienen bis zum Anschlag geschoben werden. Zuletzt wurde der Deckel montiert und festgeschraubt.</p>		
Montage		
		

Abbildung 4-13: Übersicht Konzept 5

Wie zuvor erwähnt, ging es bei dieser Konzeptstudie primär um die Leitungsführung. Eine Lösung für die Kontaktstelle stand nicht im Fokus. Da der Anwendungsbereich für Steckverbindungen keine übliche Umgebung darstellt, wurde versucht einen Partner miteinzubeziehen. Hierfür musste zuerst ein Unternehmen gefunden werden, das über ein erweitertes Know-how hinsichtlich Spezialverbindungen verfügt. Außerdem musste eine Bereitschaft zu einer Neuentwicklung mit entsprechender Testphase gegeben sein. Schlussendlich sahen sich keine Partner in der Lage, eine Kontaktstelle unter den besagten Rahmen- und Umgebungsbedingungen zu entwickeln. Diese neue Problemstellung würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen und es wird daher nicht weiter darauf eingegangen.

Prof. Faber vom Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik wirkte unterstützend, um eine mögliche Lösung zu finden und somit einen Abschluss der Konzepte zu ermöglichen. Aus Diskussionen über lösbare Steckverbindungen und den damit verbundenen Problemen (z.B. keine Dauerfestigkeit bei ständiger Vibrationen) ging schlussendlich hervor, dass die einzig schlüssige Antwort in einer nicht-lösbaren Verbindung zu finden ist. Durch Löt- oder Schweißstellen könnte so ein dauerhafter und zuverlässiger Verbund entstehen. In der Anforderungsliste war allerdings explizit der Wunsch „kein Löt- oder Schweißen im Motor“ aufgeführt. Durch eine gezielte und kontrollierte Löt- bzw. Schweißstelle würde kein Problem im Motor entstehen. Es stellte sich für Konzept 3 eine recht einfache Umsetzung einer kontrollierten stoffschlüssigen Verbindung heraus.



Der Pleuel wird wie zuvor beschrieben montiert. Durch das Verschrauben entsteht ein für das Widerstandsschweißen nötiger Anpressdruck der Leitung vom oberen Pleuel zum Deckel. Über zwei Löcher, die direkt zu den Leitungen führen, könnten die Elektroden einen Kontakt herstellen und die nötige Spannung zum Verschweißen liefern.

Abbildung 4-14: Verschweißen der Kontaktstelle






Um für die Serie eine finale Lösung zu finden, müsste dieser Vorschlag in die anderen Konzepte überführt bzw. ein neuer Ansatz gefunden werden.

4.3 Auswahl

Nachdem die Konzeptphase abgeschlossen war, wurde eine Bewertung durchgeführt. Hierfür gab es zu Beginn eine interne Diskussion, durch die eine recht subjektive Bewertung entstand, und anschließend eine weitere ausführliche Beurteilung nach VDI-2225.

4.3.1 Bewertung - Intern

Durch interne Gespräche mit Mitarbeitern verschiedener Sparten, wurden die Konzepte auf ihre Tauglichkeit hin geprüft. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die in Abbildung 4-15 gelisteten Kriterien geworfen.

Konzept Kriterium					
Fertigung (Bearbeitung Pleuel, Leitung)	●	●	●	●	●
Montage	●	●	●	●	●
Kosten	●	●	●	●	●
Festigkeit (aufgrund Bearbeitung Pleuel)	●	●	●	●	●
Funktion (Steckeranzahl)	●	●	●	●	●
Funktion (Steckerposition)	●	●	●	●	●
Ranking	5	2	1	3	4

kritisch	Funktionalität / Langlebigkeit nicht erfüllt / hohe Verschlechterung - weitere Maßnahmen zwingend erforderlich
Mäßig	Die Komponente ist noch funktional / haltbar, aber weitere Maßnahmen sind z.B. <ul style="list-style-type: none"> • Weitere Überwachung • Messung • Lieferantinformationen • Mikroskopische Untersuchung • Materialanalyse • Entwurfsänderung
OK	Funktionalität / Langlebigkeit erfüllt - keine weiteren Maßnahmen

Abbildung 4-15: Interne Bewertung der Konzepte

Es handelte sich hier um individuelle Sichtweisen, da die Schwerpunkte der Serienfertigung andere waren, als die des Einkaufs oder der Serienmontage. Die Bewertungen wurden in einem Diagramm zusammengetragen und ermöglichten eine erste Rangliste.

4.3.2 Bewertung nach VDI 2225

Um eine objektive Sicht der Konzepte zu generieren, musste eine gewichtete Bewertung gemacht werden. Auch hier gibt es eine Reihe von Verfahren, um zu einem Vergleich zu gelangen. In dieser Arbeit wurde die Punktbewertung nach der VDI-Richtlinie umgesetzt. Diese besagt, dass der Gesamtnutzen eines Konzeptes umso größer ist, je höher die Summe der Teilnutzen ausfällt.

Die Teilnutzen stammten aus der Anforderungsliste. Verwendet wurden die Soll- und Wunschkriterien, denn erfüllte ein Konzept ein Musskriterium nicht, wurde es vorzeitig verworfen.

Für die Ermittlung des Gewichtungsfaktors wurde der Paarvergleich verwendet. Vereinfacht könnte er auch im Team abgeschätzt werden.

Paarweiser Vergleich

als wichtiger	kostengünstig	keine zusätzlichen Ventilationsverluste	Integration hoch	verwendung von Gleich- bzw Normteilen	übliche Leitermaterialien	geringe Masse aufgrund der Beschleunigungen	Resistent gegen Verschmutzung	kein Löten im Motor	einfache Montage	zerlegbar	Summe	%
kostengünstig	1	0,5	0	1	1	0	0	1	0	1	4,5	10,00%
keine zusätzlichen Ventilationsverluste	0,5	1	0	1	1	0,5	0,5	1	0	1	5,5	12,22%
Integration hoch	1	1	1	1	1	0,5	0	1	0,5	1	7	15,56%
verwendung von Gleich- bzw Normteilen	0	0	0	1	0,5	0	0	0,5	0	0,5	1,5	3,33%
übliche Leitermaterialien	0	0	0	0,5	1	0	0	1	1	0	3,5	7,78%
geringe Masse aufgrund der Beschleunigungen	1	0,5	0,5	1	0	1	1	1	0,5	1	6,5	14,44%
Resistent gegen Verschmutzung	1	0,5	1	1	1	0	1	0,5	0	1	6	13,33%
kein Löten im Motor	0	0	0	0,5	0	0	0,5	1	0	1	2	4,44%
einfache Montage	1	1	0,5	1	0	0,5	1	1	1	1	7	15,56%
zerlegbar	0	0	0	0,5	1	0	0	0	0	1,5	3,33%	
Prüfsumme											100,00%	

Bewertungsrichtlinie

- 0 = weniger wichtig als das andere Kriterium
- 0,5 = gleich wichtig wie das andere Kriterium
- 1 = wichtiger als das andere Kriterium

Abbildung 4-16: Paarweiser Vergleich der Konzepte

Diese Gewichtungsfaktoren wurden in die Beurteilung nach der VDI-Richtlinie 2225 übertragen.

Für die Berechnung der Gesamtwerte dienten folgende Formeln:

	Gesamtwert	Wertigkeit	j = Konzept-Nr.
Ungewichtet	$GW_j = \sum_i P_{ij}$	$W_j = \frac{GW_j}{n \cdot P_{max}}$	i = Kriterien-Nr.
Gewichtet	$gGW_j = \sum_i (g_i \cdot P_{ij})$	$gW_j = \frac{gGW_j}{P_{max} \cdot \sum_i g_i}$	g_i = Gewichtungsfaktor
			n = Anzahl der Kriterien
			P_{ij} = Teilwert

Daraus ergab sich eine Bewertungsliste, die einen Vergleich der Konzepte ermöglichte.

4.3.3 Entscheidung

		Bewertungsliste nach VDI- Richtlinie 2225										Blatt Nr. 1/1	
		VCR-Pleuel: elektrische Verbindung am V2P-E											
		Werteskala: 0... unbefriedigend, 1...gerade noch tragbar, 2...ausreichend, 3... gut, 4... sehr gut (ideal)											
Bewertungskriterien			Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3		Konzept 4		Konzept 5		
Nr.	g_i		ungew. P_{i1}	gew. $g_i \cdot P_{i1}$	ungew. P_{i2}	gew. $g_i \cdot P_{i2}$	ungew. P_{i3}	gew. $g_i \cdot P_{i3}$	ungew. P_{i4}	gew. $g_i \cdot P_{i4}$	ungew. P_{i5}	gew. $g_i \cdot P_{i5}$	
1	Kostengünstig	0,10	2	0,2	3	0,3	3	0,3	1	0,1	2	0,2	
2	keine zusätzlichen Ventilationsverluste	0,12	3	0,3666	1	0,1222	3	0,3666	3	0,3666	3	0,3666	
3	Integration hoch	0,16	3	0,4668	2	0,3112	3	0,4668	2	0,3112	2	0,3112	
4	verwendung von Gleich- bzw Normteilen	0,03	1	0,0333	1	0,0333	1	0,0333	1	0,0333	1	0,0333	
5	übliche Leitermaterialien	0,08	3	0,2334	3	0,2334	3	0,2334	3	0,2334	3	0,2334	
6	geringe Masse aufgrund der Beschleunigungen	0,14	2	0,2888	1	0,1444	2	0,2888	3	0,4332	3	0,4332	
7	Resistent gegen Verschmutzung	0,13	1	0,1333	1	0,1333	2	0,2666	2	0,2666	2	0,2666	
8	kein löten im Motor	0,04	2	0,0888	1	0,0444	3	0,1332	1	0,0444	1	0,0444	
9	einfache Montage	0,16	1	0,1556	1	0,1556	4	0,6224	1	0,1556	0	0	
10	zerlegbar	0,03	3	0,0999	3	0,0999	3	0,0999	2	0,0666	2	0,0666	
Gesamtwert		$GW_j gW_j$	1	21	2,0665	17	1,5777	27	2,811	19	2,0109	19	1,9553
Technische Wertigkeit		W_j		0,875		0,708333		0,84375		0,791667		0,791667	
Technische Wertigkeit (mit Gewichtung)		gW_j		0,688833		0,5259		0,70275		0,6703		0,651767	
Rangfolge			2		5		1		3		4		

Abbildung 4-17: Bewertungsliste nach VDI-Richtlinie 2225

Auch durch die objektivere Bewertung anhand der Richtlinie mit den Gewichtungsfaktoren stellte sich Konzept 3 als beste Lösung heraus. Durch den zuvor erwähnten Vorschlag der Kontaktstelle gewinnt dieses Konzept noch weiter an Attraktivität. Beide Bewertungsmethoden kamen zu derselben „besten“ Lösung, die weitere Rangfolge war jedoch unterschiedlich. So wurde Konzept 2, das auf Basis der subjektiv gewählten Kriterien als zweitbeste Lösung erschien, auf den letzten Platz verwiesen. Die Montage und die Größe waren sehr ausschlaggebend für dieses Ergebnis. Mit diesen Erkenntnissen war nun eine geeignete Lösung gefunden und der nächste Schritt war die Fertigung eines Prototyps.

4.4 Zusammenfassung

Durch eine methodische Herangehensweise an das Problem konnte systematisch eine Lösung gefunden werden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass durch neue Erkenntnisse oder Ideen wieder am Anfang der Bewertung gestartet werden muss, jedoch bleibt der Gesamtüberblick erhalten und es gehen keine Informationen verloren.

5 Angewandte Strömungssimulation

Durch die Entwicklung des Teleskop-Pleuels mit hydraulischer Verstellung ergaben sich Fragestellungen, die bisher nur ungenügend untersucht worden sind. Das Verhalten des Ölkreislaufs bei verschiedenen Betriebszuständen ist die zentrale Unbekannte in diesem System. Um die Vorgänge in den Leitungen besser zu verstehen, werden CFD Berechnungen gemacht. So können schon in einer frühen Phase Probleme erkannt und behoben werden.

Um den komplexen Ölkreislauf zu simulieren, wurde er zuerst in kleine Subsysteme aufgeteilt. Hier galt es die Charakteristik der Ventile und Drosseln unter den definierten Betriebszuständen herauszufinden. Erst zum Schluss wurden diese Erkenntnisse zu einem gesamten Konstrukt verbunden. Für die folgende Aufgabe war als Teilsystem ein Kugel-Rückschlagventil zu untersuchen.

5.1 Beschreibung

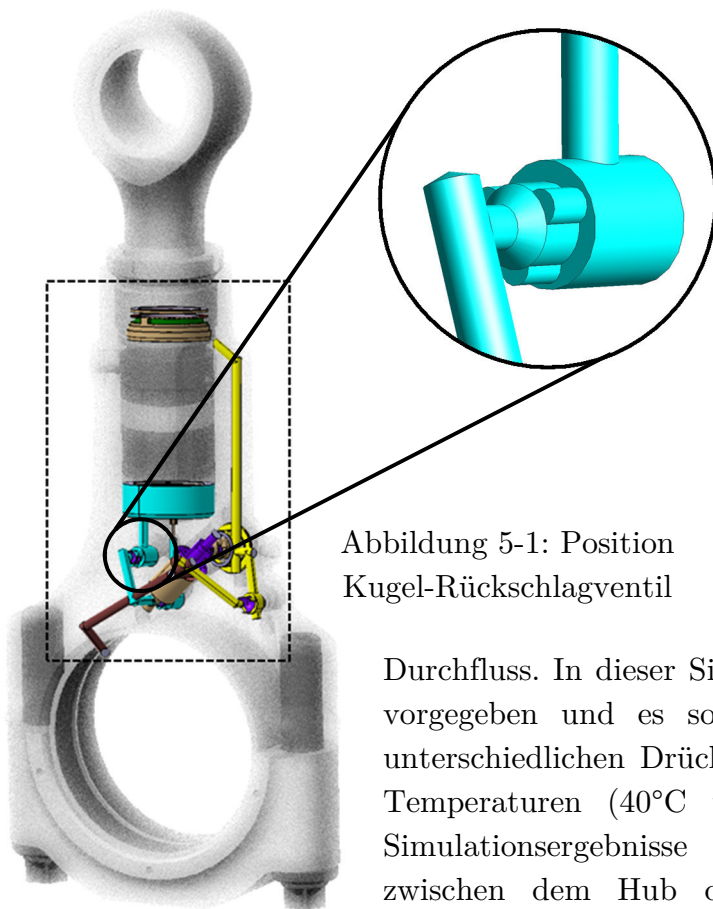


Abbildung 5-1: Position Kugel-Rückschlagventil

Aufgrund einer früherer Simulation und der besseren Vergleichbarkeit der Resultate wurde das Ventil des hydraulisch gesteuerten Pleuels verwendet. Es ist jedoch in jedem der drei Pleuelvarianten verbaut. Somit konnten die Ergebnisse für alle drei herangezogen werden. Für die Befüllung der oberen bzw. unteren Kammer muss das Öl ein Kugel-Rückschlagventil passieren. Je nach anliegendem Druck verändert sich die Stellung der Kugel und somit der

Durchfluss. In dieser Simulation wurde die Kugelposition vorgegeben und es sollte die Durchflussrate bei zwei unterschiedlichen Drücken (1.8bar und 6.4bar) und zwei Temperaturen (40°C und 80°C) gezeigt werden. Die Simulationsergebnisse sollten den Zusammenhang zwischen dem Hub der Kugel und dem Durchfluss darstellen. Auf Basis dieser Berechnung konnte der maximale Verschiebungsweg des Kugel-Rückschlagventils dimensioniert werden.

Als Ausgangspunkt diente eine Simulation einer Vorversion des Ventils. Dieses wurde bei einer einzigen Kugelposition einphasig (kein Phasenübergang des Öles von flüssig zu gasförmig) gerechnet.

Für die neue Simulation wurden einige Erweiterungen vorgenommen.

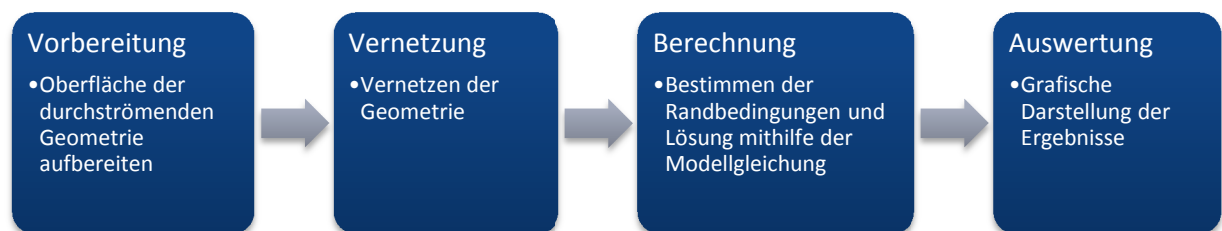
- Darstellung der Kugel in verschiedenen Ventilpositionen
- Mehrphasige Berechnung
- Turbulentes Berechnungsmodell anstatt dem Laminaren

Die numerische Berechnung wurde mit dem CFD-Simulations-Programm AVL-Fire durchgeführt. Für die Betrachtung des gesamten Weges der Kugel bediente man sich einer Funktion, die normalerweise die Kolbenbewegung im Motor darstellt. Hierfür ist AVL-Fire hauptsächlich konzipiert worden und stellt vereinfachte Vorgehensweisen bereit. Mit dieser Methode konnte viel Zeit gespart werden, da nur eine Oberfläche für alle Netze aufbereitet werden musste.

Mit der mehrphasigen Berechnung wurde der Einfluss der Verdampfung des Öles und der damit verbundenen Durchfluss- und Druckänderung berücksichtigt. Dadurch veränderten sich die Ergebnisse zum Teil sehr stark.

Da in der vorigen laminar berechneten Simulation Zonen mit sehr geringem Druck evaluiert wurden, entschloss man sich bei dieser zu einem Turbulenzmodell zu wechseln. Bei diesem Modell wurde sowohl der laminare als auch turbulente Bereich besser abgedeckt und dadurch das Modell genauer.

5.2 Simulation



5.2.1 Vorbereitung

Eine geeignete Simulation zeichnet sich mitunter dadurch aus, dass die erforderliche Genauigkeit der Ergebnisse mit dem geringsten Zeitaufwand erstellt wird. Die Rechenzeit kann durch eine zu hoch aufgelöste Geometrie um ein vielfaches erhöht

werden. Deshalb ist die Vorbereitung der gewählten Geometrie ein wesentlicher Bestandteil der Simulation.

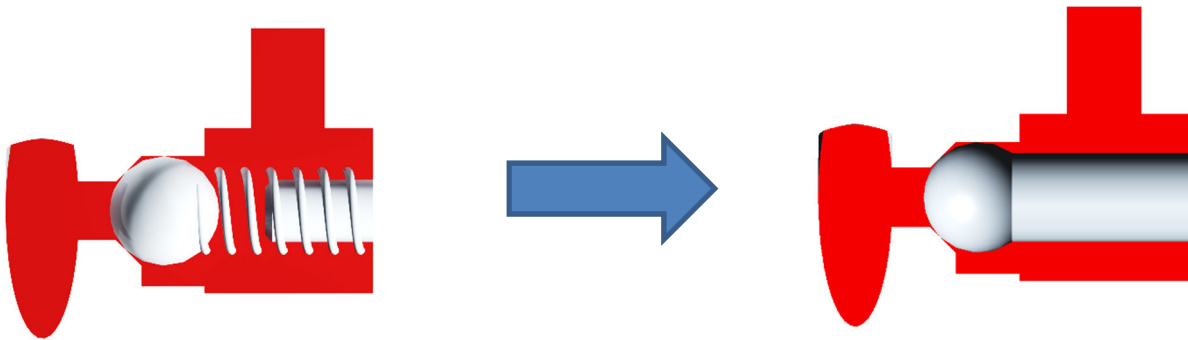


Abbildung 5-2: Vereinfachung Kugel-Rückschlagventil

Im Falle dieses Kugel-Rückschlagventils wurde die Feder durch einen einfachen Zylinder ersetzt. Auf diese Weise konnten einige Zellen gespart und die Rechenzeit erheblich gesenkt werden. Vereinfachungen können jedoch nur dort gemacht werden, wo sie keinen oder nur wenig Einfluss auf das Ergebnis haben. Dies verlangt eine Menge an Wissen und Erfahrung. Im Zuge dieser Arbeit wurden solche Vereinfachungen sowohl mit der Konstruktion als auch den Berechnungsingenieuren der CFD abgeklärt. Große Geometrieänderungen wurden in einem CAD Programm, wie z.B. CATIA oder Creo Parametric durchgeführt, da Simulationsprogramme diese Funktionen nur unzureichend zur Verfügung stellen. Für die weiteren Schritte im Programm AVL-Fire musste die Geometrie in ein stl-File konvertiert werden. Dabei wurde die Oberfläche des 3D-Körpers mit Hilfe von Dreiecken beschrieben. Die Eckpunkte und Flächen der Dreiecke waren für die weitere Vernetzung notwendig. Hier mussten schon erste Überlegungen über die Auflösung des Körpers gemacht werden. Bei einer zu groben Wahl der Dreiecke (zu geringe Auflösung), würden das spätere Netz und die erzielten Ergebnisse zu ungenau.

In Abbildung 5-3 ist links eine deutlich zu grobe Einstellung beim Konvertieren zu einem stl-File gewählt worden. Die Einstellungen mussten so bestimmt werden, dass wichtige Kanten und Flächen ausreichend genau als Dreiecksflächen abgebildet werden (Abbildung 5-3 – rechtes Bild).

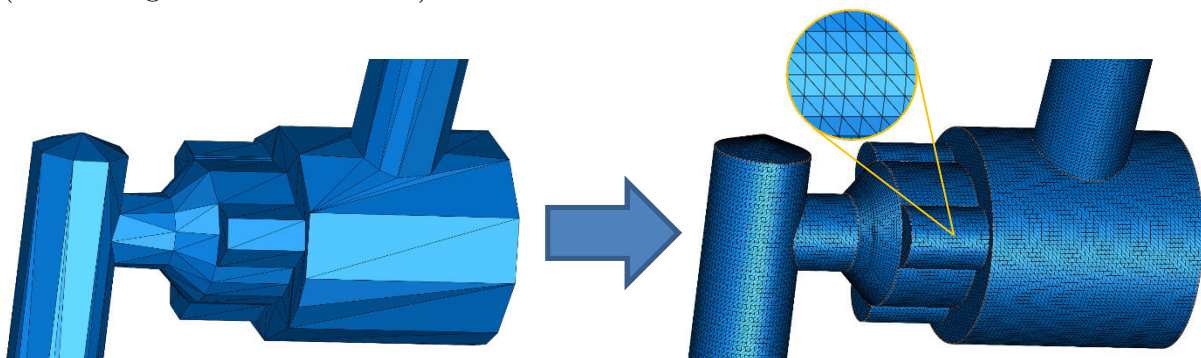


Abbildung 5-3: Darstellung der Auflösung der Flächengeometrie

Nach der Übertragung der Geometrie aus dem CAD Programm, wurde diese in AVL-Fire auf Fehler überprüft. Hierfür gibt es einen Befehl, über den kleine Facetten, kleine Ecken oder Fehler der Geometrie detektiert werden (Abbildung 5-4 zeigt links einen Geometriefehler der behoben werden musste). Dies tritt bei komplizierten Körpern sehr häufig auf, was teilweise zu sehr langwierigen Korrekturarbeiten führen kann. Jedoch ist ohne dieser Bereinigungen kein Vernetzen möglich.

Für ein gutes Netz ist auch die Auswahl der Kanten sehr wichtig. Die Zellen schmiegen sich den Kanten an (Abbildung 5-4 zeigt rechts einen Fehler der Kantenwahl). Diese können auch durch einen Befehl von AVL-Fire detektiert werden, unterliegen jedoch meist einer händischen Nachbesserung.

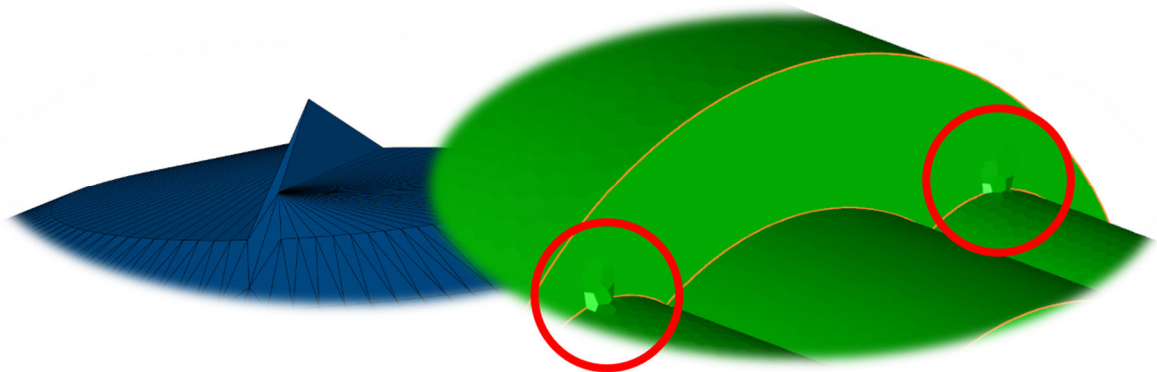


Abbildung 5-4: Geometriefehler beim Konvertieren bzw. Vernetzen

5.2.2 Vernetzung

Die Rechenzeit einer Simulation wird von der Qualität bzw. der Zellenanzahl eines Netzes bestimmt. Für relevante Bereiche werden lokale Verfeinerungen im Netz eingestellt und Bereiche, die für das Ergebnis irrelevant sind, werden eher grob gehalten. Damit kann die Zellenanzahl minimiert und die Rechenzeit verkürzt werden. Grundsätzlich gibt es drei Zelltypen für Volumenelemente:

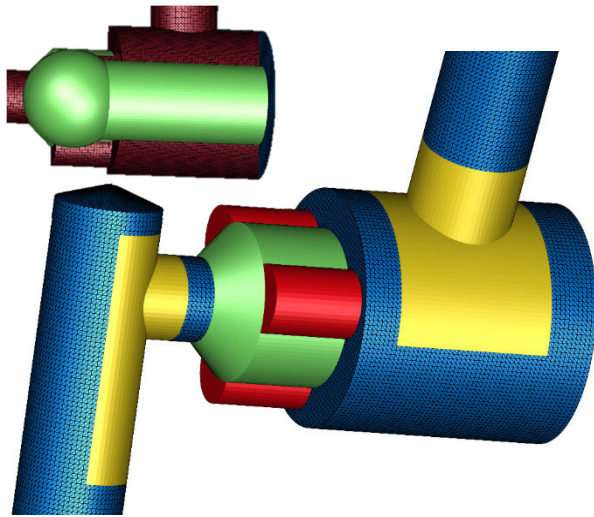
- Hexaeder
- Tetraeder
- Polyeder

Da als Vorgabe dieser Simulation beschlossen wurde, die Funktion des „bewegten Netzes“ auf ein Polyeder-Netz (honigwabenförmiges Netz) anzuwenden, wurde im Zuge dieser Arbeit nicht auf die beiden anderen Zelltypen eingegangen. Bislang wurde bei AVL List diese Methode nur mit einem hexagonalen Gitter angewandt.

Der Hauptvorteil eines polygonalen Gitters liegt in einer schnelleren und robusteren Konvergenz mit weniger Iterationen. Außerdem lassen sich polyedrische Volumenelemente leichter verformen, was für diese Aufgabe des „bewegten Netzes“ einen ausschlaggebenden Vorteil bietet.

AVL-Fire bietet nun die Möglichkeit, in einem vorgegebenen Bereich automatisch Netze zu generieren. Hierfür müssen lediglich einige Einstellungen getroffen werden.

Die bereinigte Geometrie mit den zugehörigen Kanten wurde für die weitere Vorgehensweise verwendet. Wie zuvor erwähnt, musste nun über die wichtigen Bereiche des Kugel-Rückschlagventils entschieden werden. Wie in Abbildung 5-5 ersichtlich, wurden einige Stellen gewählt, bei denen die globalen Einstellungen für die Erzeugung des Netzes nicht wirksam sind. Hierzu zählten die beiden Übergänge für den



Einlass und Auslass (gelb eingefärbt), die Überströmkanäle (rot eingefärbt) und der Bereich der Kugel (grün eingefärbt). Für die globalen Einstellungen der Vernetzung wurden folgende Werte gewählt:

<i>Oberflächenzellgröße:</i>	max. 0.04mm
<i>Volumenzellgröße:</i>	max. 0.08mm
<i>Anzahl Zellen der</i>	
<i>Grenzzellen:</i>	2
<i>Grenzzellendicke:</i>	0.02mm
<i>Verhältnis:</i>	1.2

Abbildung 5-5: Auswahl der Verfeinerungen

„Oberflächen- und Volumenzellgröße“ geben an, bis zu welchem Wert eine Zelle anwachsen darf, ehe eine nächste Zelle gebildet wird. Die „Anzahl der Grenzzellen“ und die „Grenzzellendicke“ sind besonders für Geometrien mit engen Spalten wichtig. Wird sie zu dick gewählt, können diese Bereiche nicht erreicht bzw. berechnet werden. Das „Verhältnis“ gibt die Relation der Größe der ersten Zellenreihe zu der Größe der Randzellen, an. Wird hier der Wert „2“ gewählt, darf die Größe der zweiten Zellenreihe doppelt so groß sein wie die der Randzellen. Für eine saubere Berechnung am Randbereich sollte sie nicht zu groß gewählt werden.

Für die Verfeinerung der gewählten Bereiche können die Zellgröße und die Tiefe eingestellt werden. Hier wurden folgende Werte gewählt:

Übergang Einlass/Auslass:	<i>Zellgröße:</i>	0.005mm
	<i>Tiefe:</i>	0.5mm
Überströmkanäle:	<i>Zellgröße:</i>	0.003mm
	<i>Tiefe:</i>	0.2mm
Bereich Kugel:	<i>Zellgröße:</i>	0.003mm
	<i>Tiefe:</i>	0.1mm

Die Werte scheinen sehr klein zu wirken, jedoch stehen sie im Verhältnis des ganzen Ventiles (Einlassdurchmesser 2mm).

Diese Ergebnisse der Verfeinerung unterlagen einigen Iterationsschleifen da erst durch beim Erstellen eines Netzes beurteilt werden kann, ob sie passen.

Nachdem dieser Schritt gemacht wurde konnte mit der Funktion „FamePoly“ das Basisnetz bewegt werden. Es handelte sich hierbei allerdings nicht um eine transiente Verschiebung der Kugel, sondern lediglich um eine automatische Erstellung eines statischen Netzes zu den definierten Positionen. Hier konnte jedoch sehr viel Zeit eingespart werden, da für die einzelnen Stellungen der Kugel die Geometrie nicht jedes Mal aufbereitet werden musste. AVL-Fire verlangte für die automatische Erstellung der Netze folgenden Input:

Bewegte Flächen (moving selection): Als bewegte Fläche wurde die Kugelfläche ausgewählt. Diese sollte insgesamt 0.7mm verschoben werden.

Puffer Flächen (buffer selection): Für diese Auswahl wurde jede Fläche gewählt, die sich bei der Bewegung der Kugel ändern durfte.

Nicht bewegte Flächen (non-moving selection): Hierzu zählte der Rest der Geometrie. Besonders aber die Außenhülle im Bereich der bewegten Flächen. Würden diese nicht gewählt werden, könnte es sein, dass beim Bewegen der Kugelgeometrie nichtgewollte Flächen mitgezogen bzw. deformiert werden.

In Abbildung 5-6 ist die Auswahl für das Kugelrückschlagventil gezeigt. Die Kugel wurde als „moving selection“ (grün) definiert und der Zylinder, welcher die Feder ersetzt, sollte sich verformen und galt daher als „buffer selection“ (gelb). Der Rest der Geometrie musste unverändert bleiben und wurde als „non-moving selection“ gewählt.

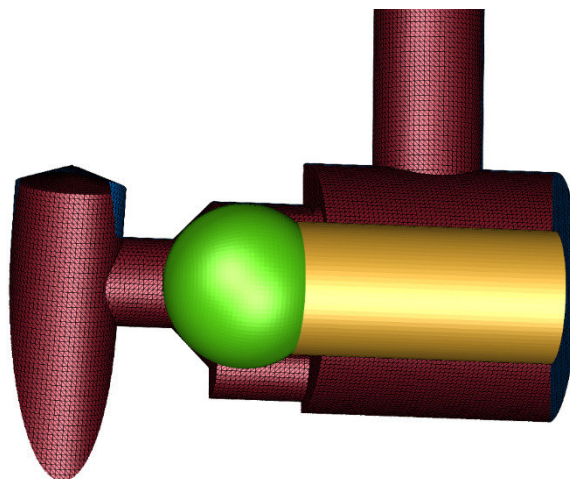


Abbildung 5-6: Ausgewählte Flächen für das „bewegte Netz“

Für die Art der Bewegung der Kugel können unter anderem Funktionen, Kurven (2D, 3D) bzw. Drehungen gewählt werden. Da als Hauptziel der Simulation der Kugelhub, ab dem sich keine Änderung des Durchflusses mehr einstellt, gefordert war, wurde die

Bewegungsdefinition so gewählt, dass sich die Kugel pro Netz um 0.1mm weiterbewegen soll. Im realen Ventil liegt ein Anschlag bei 0.7mm vor. Es ergaben sich somit sieben zu berechnende Stellungen. Rein geometrisch gesehen konnte man den Öffnungsquerschnitt der Überströmkanäle mit dem effektiv freigegebenen Querschnitt der Kugel vergleichen. Der Schnittpunkt lag bei 0.352mm Kugelhub.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass ab dem Zeitpunkt gleicher Öffnungsflächen keine Durchflusssteigerung generiert werden kann. Um dies herauszufinden, wurde mit Hilfe der CFD Berechnung, welche vor allem die 3D-Strömungseinflüsse, aber auch andere Effekte wie z.B. Kavitation realitätsnahe widerspiegelt, untersucht.

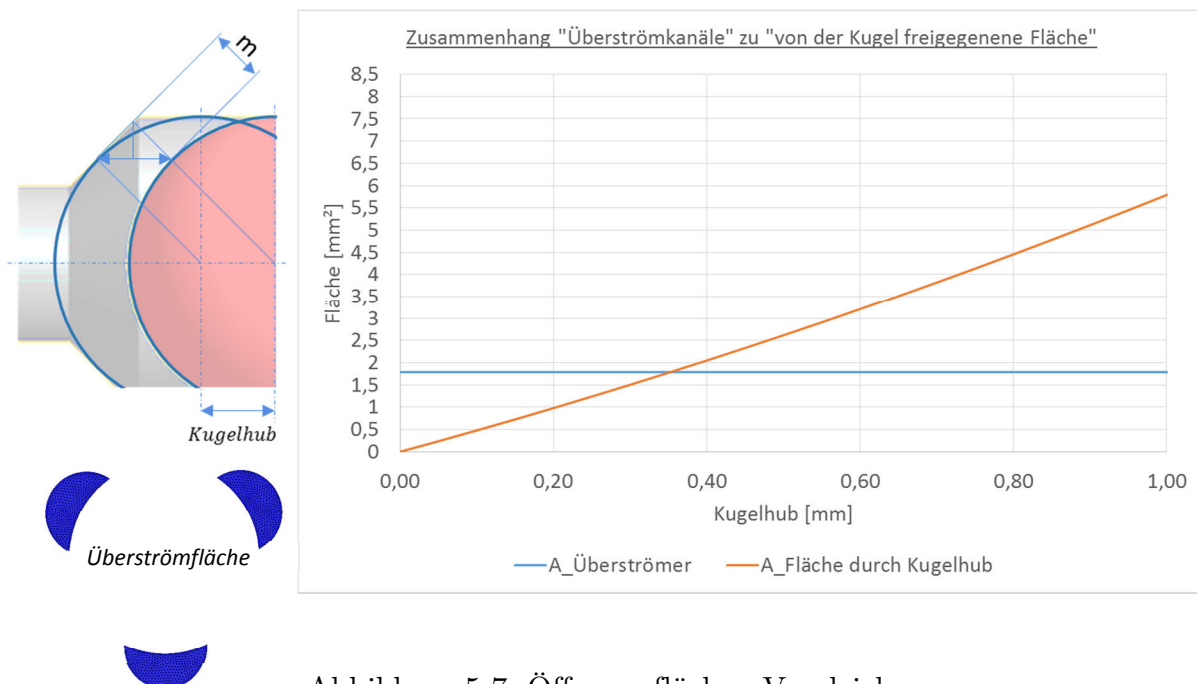


Abbildung 5-7: Öffnungsflächen-Vergleich

Simulationsfall	Kugelhub
10	0.116mm
20	0.216mm
30	0.316mm
40	0.416mm
50	0.516mm
60	0.616mm
70	0.716mm

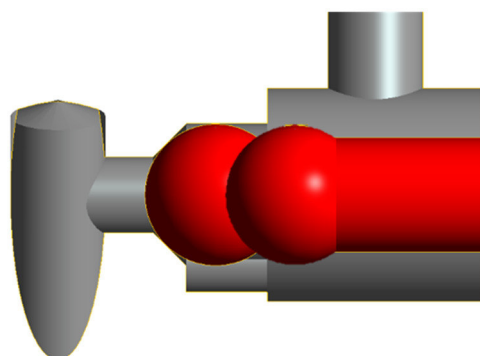


Abbildung 5-8: Berechnungsschritte

Die zusätzliche Verschiebung um 0.016mm ergab sich aus der Konvertierung zu einem stl-File. Bei Kontakt der Kugel mit der Kegel, wie es bei geschlossenem Ventil der Fall wäre, würden sich die Flächen ineinander überschneiden. Deshalb wurde dieser minimale Abstand als Startoffset gewählt da es keinen Unterschied für die Charakterisierung der Hubkurve über den Volumenstrom machte.

Nachdem alle Randbedingungen zur Erstellung der sieben Netze getroffen wurden, konnte die Berechnung gestartet werden. Abbildung 5-9 zeigt ein Ergebnis.

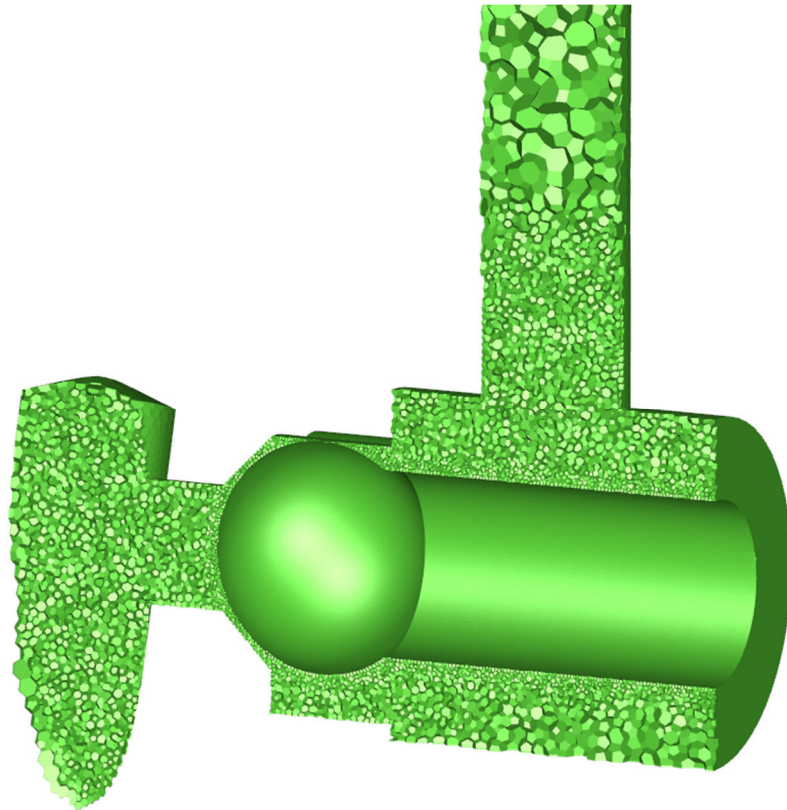


Abbildung 5-9: Vernetzte Geometrie mit Verfeinerungen

Deutlich zu sehen sind die lokalen Verfeinerungen, die in den zuvor beschriebenen Bereichen, gemacht wurden. Aufgrund der engen Spalte musste die Zellgröße sehr klein gewählt werden, was zu einer Zellenanzahl von ca. 1.800.000 pro Netz führte.

5.2.3 Berechnung

Für zwei unterschiedliche Temperaturen und Drücke, die bei sieben verschiedenen Kugelstellungen behandelt wurden, mussten insgesamt 28 Fälle (Berechnungen) simuliert werden. Für die Lösung wurde das k-zeta-f Turbulenzmodell verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung des k- ϵ Modells, das als Zweigleichungsmodell in der numerischen Strömungssimulation weit verbreitet ist.[12] Konvergenzkriterien dienten hier für ein Stoppen der Berechnung vor Erreichen der maximal gewählten Iterationsschritte und sind erfüllt wenn:

- die Abweichung vom gewünschten Ergebnis (Residuum) einen bestimmten Wert unterschreitet

Dieses Kriterium müsste für alle Zellen gelten um eine ausreichend genaue Lösung zu erreichen und die Berechnung zu stoppen. Da das System und somit die Lösung der Berechnung aufgrund der Geometrie zu kleinen Schwingungen neigte, wurde das Abbruchkriterium nicht erreicht und die volle Zahl der zuvor definierten 5000 Iterationen berechnet. Nun musste entschieden werden, ob das Ergebnis verwendbar ist. Für die Beurteilung wurde das Konvergenzverhalten vom Massenstrom und Druck geprüft. Wenn diese konstant waren, wurde dies als ausreichend genaues Ergebnis angenommen.

Für die ersten Berechnungen mussten noch kleine Anpassungen durchgeführt werden, da sie schon nach kurzer Zeit abstürzten. Kann das Programm für die Gleichungen keine Lösung berechnen, wird abgebrochen. Da das System, wie schon erwähnt, einen zum Schwingen neigenden Lösungsverlauf besaß, musste die Relaxation (Parameter zwischen 0 und 1 der die Konvergenzgeschwindigkeit beeinflusst und ein schwingungsfähiges System dämpft) verringert werden. Dadurch konnte das Aufschaukeln verhindert werden. Jedoch waren mehr Iterationen für ein konstantes Ergebnis nötig. Letztlich wurden für alle Berechnungen ausreichend genaue Lösungen erzielt. Abbildung 5-11 zeigt das Schwingverhältnis zwischen Einlass und Auslass.

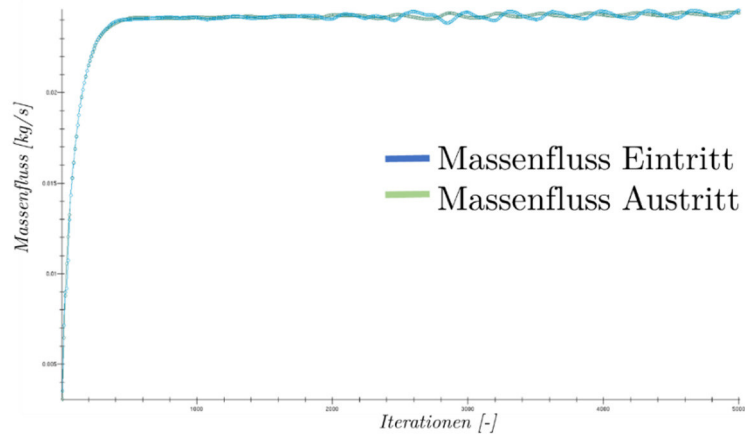


Abbildung 5-11: Schwingverhalten zwischen Ein- und Auslass

Abbildung 5-10 zeigt auch ein gültiges Ergebnis einer Berechnung da sich das System eingeschwungen hat. Für die Lösung wird der periodische Abschnitt gemittelt.

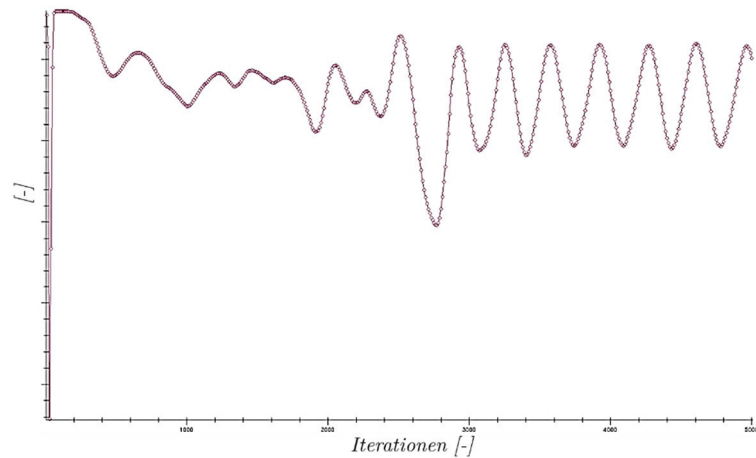


Abbildung 5-10: gültige Lösung trotz Schwingung

In Abbildung 5-12 ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Eintritt und Austritt erkennbar.

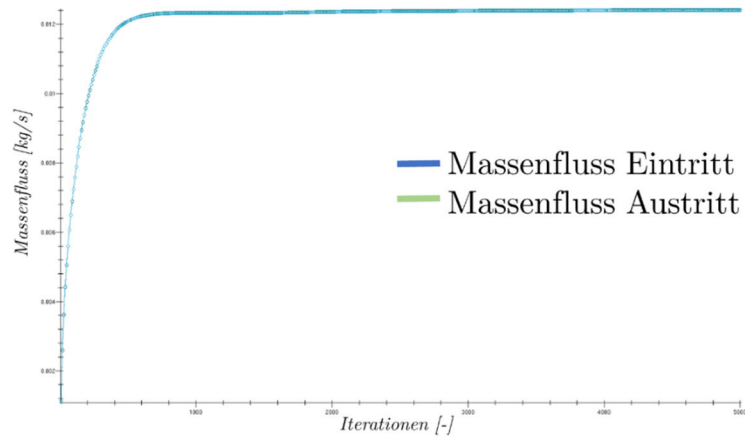


Abbildung 5-12: Eingeschwungenes System

Für die 28 Fälle rechnete der Computer insgesamt ca. 18 Stunden. Ein Fehler in der Eingabe, z.B.: einer falschen Dichte des Öles bei einer bestimmten Temperatur, kostete fast einen vollen Tag Rechenzeit.

5.2.4 Auswertung

Nach erfolgreicher Berechnung der verschiedenen Kugelstellungen wurden die Ergebnisse ausgewertet und zusammengetragen. Herausgekommen ist eine Charakteristik des Durchflusses in Abhängigkeit der Kugelposition.

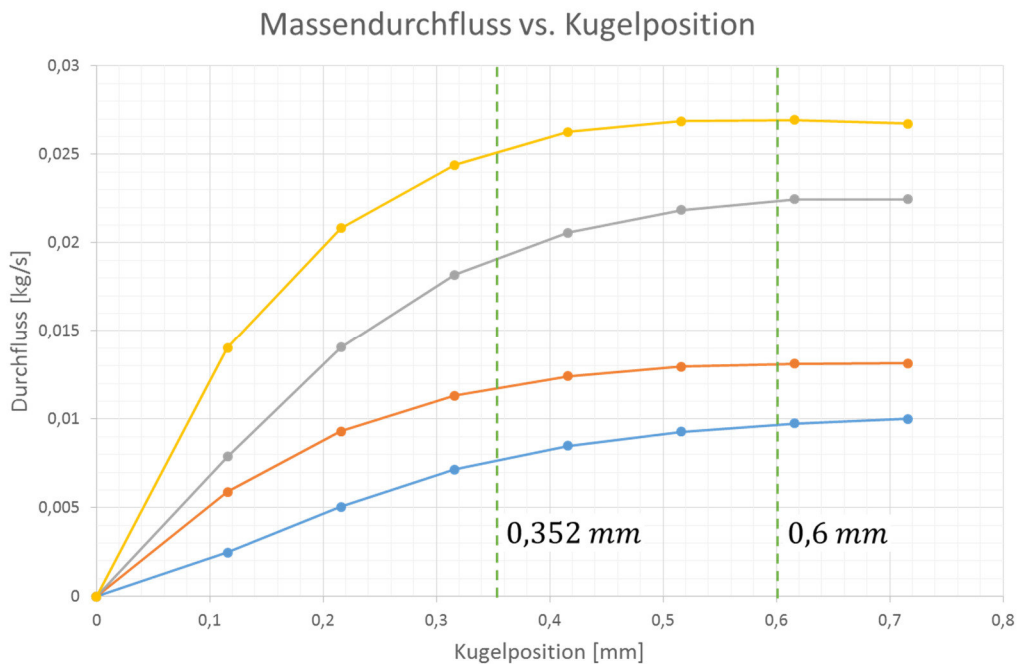


Abbildung 5-13: Zusammenhang Massendurchfluss mit Kugelposition

Wird Abbildung 5-7 mit Abbildung 5-13 kombiniert, ist zu sehen, dass die Durchflussrate bis zu dem Schnittpunkt der äquivalenten Flächen durch die Drossel der Kugel dominiert wurde, ab dann überwiegt der Einfluss der Überströmkanäle. Ferner änderte sich der Durchfluss ab einem Kugelhub von 0,6mm nur mehr marginal. Diese Ergebnisse waren für die Konstruktion des Ventiles sehr aufschlussreich und konnten direkt übernommen werden. Zudem wurden Druck und Geschwindigkeitsfelder ermittelt, die dabei halfen, kritische Ecken oder Kanten zu finden und wenn nötig konstruktiv umzugestalten. Ein Beispiel dafür lieferte die Änderung der Federführung, die als ein Problem durch die durch die frühere Simulation (Einphasenberechnung) erkannt und für diese Simulation behoben wurde. Durch die Änderung erhöhte sich die Durchflussrate, da diese „zweite Drossel“ entfernt wurde.

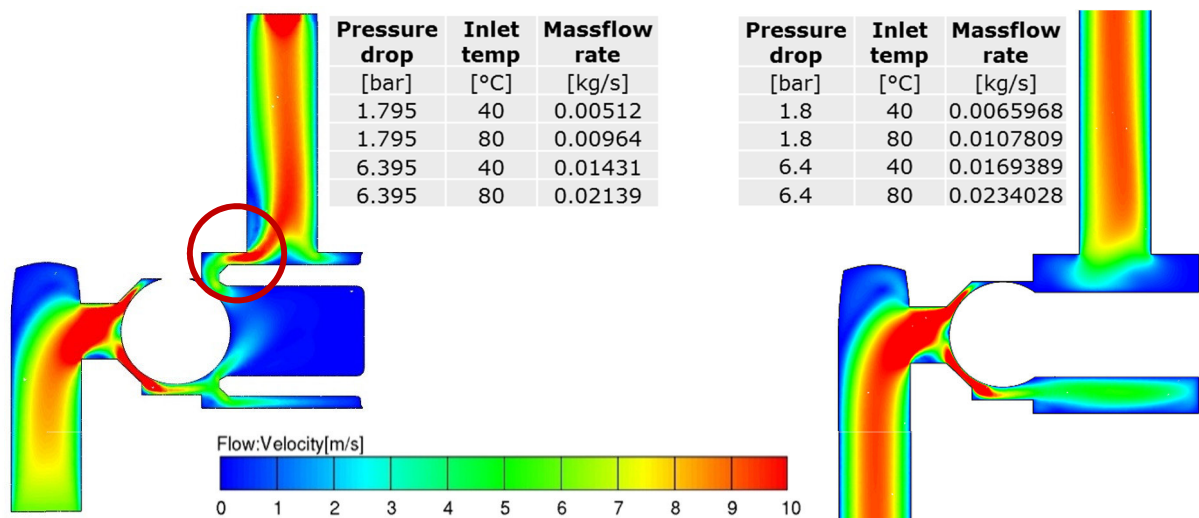


Abbildung 5-14: Geschwindigkeitsverteilung mit geänderter Geometrie

Durch die Berechnung von sieben unterschiedlicher Stellungen pro Druck- und Temperatur und in weiterer Folge in deren Kombinationen, konnte z.B. die Entstehung des Druckfeldes sehr gut analysiert werden.

In Abbildung 5-15 ist dieser Druckausbildung sehr gut ersichtlich. Da für die Simulation der Einlass verlängert worden ist (um die Schwingung zu verkleinern), zog sich der Druckabfall bei großer Öffnung in den Kanal hinein.

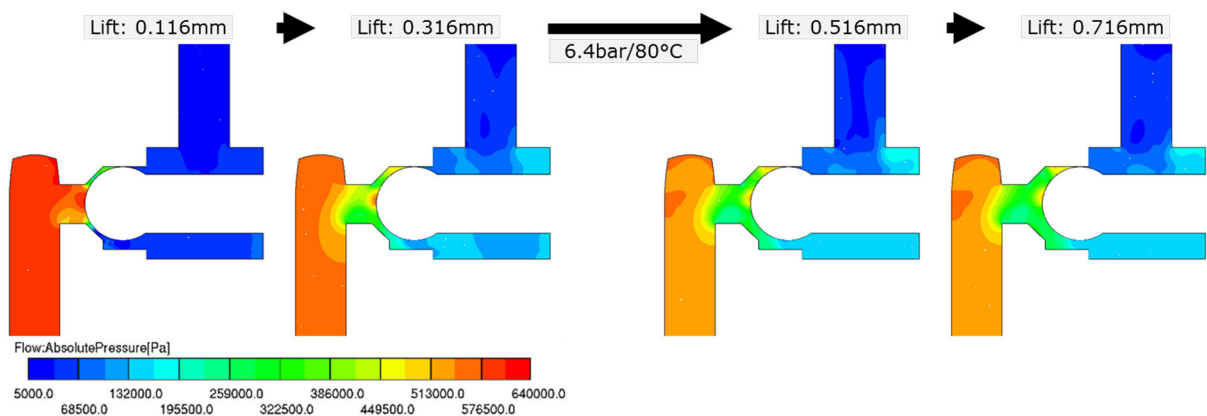


Abbildung 5-15: Druckentwicklung beim Öffnen des Ventils

Durch die Mehrphasenrechnung konnten auch Kavitationsbereiche ermittelt werden, die zu einem Herabsetzen des Durchflusses führten. Deshalb ist besonders darauf zu achten, diese durch eine geschickte Geometrie zu vermeiden.

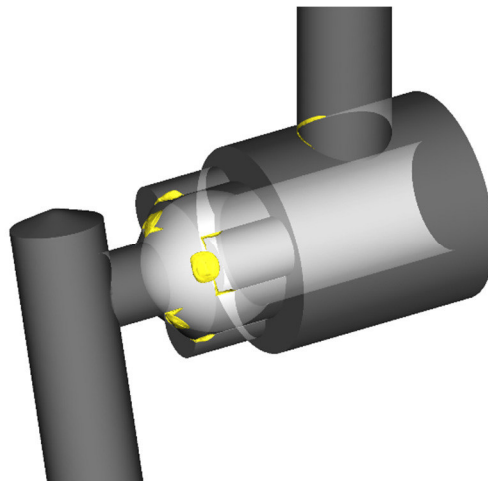


Abbildung 5-17: Kavitationsfelder bei fast geschlossenem Ventil

Diese Kavitationsbereiche erklären auch die Veränderung im Geschwindigkeitsprofil bei fast geschlossenem Ventil.

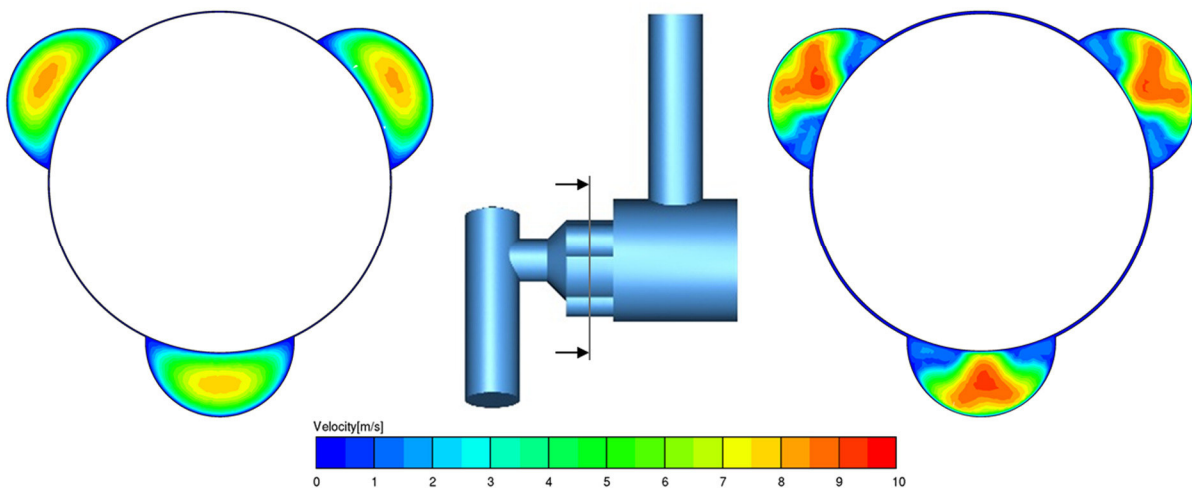


Abbildung 5-16: Geschwindigkeitsverteilung ohne und mit Einfluss der Kavitation

Mit diesen Ergebnissen können nun die Erweiterungen hinsichtlich Kombination des gesamten Ölkreislaufes getroffen werden. Außerdem kann überlegen werden, ob die aufgetretenen Unterdruckgebiete Probleme im Betrieb erzeugen und einen Umbau erfordern.

5.3 Zusammenfassung

Durch die numerische Simulation können Vorgänge besser verstanden und dadurch frühzeitig Probleme erkannt werden. Dem Berechnungsingenieur obliegt die schwierige Aufgabe, sein Modell solange zu verändern, bis ein verwertbares Ergebnis vorliegt.

Durch diese Simulation konnte eine klare Aussage über den maximal benötigten Hub der Kugel, ab dem sich der Durchfluss nur mehr geringfügig verändert, erarbeitet werden. Dies war aufgrund des begrenzten Bauraums am Pleuel eine sehr wichtige Erkenntnis. Zusätzlich konnten durch die Mehrphasenrechnung die Einflüsse der Phasenänderung auf das Druck- und Strömungsfeld dargestellt werden. Die Detektion von Kavitationsstellen zeigte sehr deutlich den Einfluss einer scharfen Kante bzw. eines kleinen Spaltes. Soweit möglich werden diese Stellen in einer weiteren Entwicklungsstufe behoben.

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Subsysteme des Ölkreislaufes zu einem Kollektiv verbunden, um die Einflüsse zueinander darzustellen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Variables Kompressionsverhältnis ist ein weiterer Ansatz zur Wirkungsgradsteigerung, der maximale Leistung mit einem geringen Verbrauch und geringen Emissionen verbindet. Das Verlangen der OEM's nach einer kostengünstigen und leicht in ihre Motorfamilien integrierbaren Lösung wächst ständig an. Die variable Verdichtung gilt als nächster logischer Schritt der Motorentwicklung.

Das gezeigte Konzept bestreitet hierbei einen sehr vielversprechenden Weg und steht mit dem 2-stufigen Teleskop-Pleuel kurz vor der serienmäßigen Umsetzung. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit konnten einige offene Punkte geklärt werden.

Die Entwicklung der elektrischen Pleuelvariante ist so weit fortgeschritten, dass die ersten Tests in einem Forschungsmotor absolviert werden können. Allerdings ist zu erwähnen, dass es noch ein gewisses Potential hinsichtlich der Spulenlösung gibt. Im Moment steht jedoch die grundlegende Frage der Funktion des Pleuels im gefeuerten Betrieb im Vordergrund.

Neben den behandelten Problemen in dieser Arbeit gilt die Abdichtung der Teleskop-Funktion als besondere Herausforderung und unterliegt fortlaufender Verbesserungen. Aktuell wird gerade an verschiedenen Varianten zur Ermöglichung des variablen Kompressionsverhältnisses gearbeitet. In zukünftigen Anwendungen wird eine Pleuellösung mit dem Optimum zwischen den geringsten Verlusten durch die Betätigung und der maximalen Verbesserung des Wirkungsgrades zu finden sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Christian Chapelle, Groupe PSA, 2015
- [2] U. Kehn: *“Variables Epsilon – Mittel zur Wirkungsgraderhöhung bei hochaufgeladenen Ottomotoren”*, Renningen, Expert Verlag, Band 35, 2007 ISBN 978-3-8169-2811-9
- [3] A. Wimmer: *„Thermodynamik des Verbrennungsmotors“*, Vorlesungsskriptum: Technische Universität Graz, 2012.
- [4] G. Fraidl, P. Kapus, H. Melde, S. Lösch, W. Schöffmann, H. Sorger, M. Weißbäck; J. Wolkerstorfer , AVL List GmbH, Graz: *“Variable Verdichtung – im Technologiewettbewerb?”*, 37. Internationales Wiener Motorensymposium (28.–29.4.2016) (siehe S. 9)
- [5] H. Sorger, AVL List GmbH, Graz: *“AVL Dual Mode VCS – modular and cost efficient CO₂ reduction”*, 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (10.-12.10.2016)
- [6] M. Theissl, *„Variantenstudie und Simulation der Übertragung elektrischer Energie zum berührungslosen Schalten eines Magnetventils am VCR-Pleuel“*, Graz, Bachelorarbeit, 2017
- [7] W. F. Daenzer, F. Huber, R. Haberfellner: *„Systems Engineering“*, Basel, Industrielle Organisation, 10. Auflage, 2002, ISBN 978-3-8574-3998-8
- [8] aus: DIN VDE 0298-4, 2003-08, Tabelle 11 Spalte 2
- [9] aus: DIN VDE 0298-4, 2003-08, Tabelle 18
- [10] Spule mit Anwickelstift, URL: <http://www.fastrongroup.com>, (Zugegriffen: 13.2.2017)
- [11] Spulenträger, URL: <http://gebr-pahlke.de>, (Zugegriffen: 14.2.2017)
- [12] R. Almbauer: *„Numerische Methoden in der angewandten Thermodynamik“*, Vorlesungsskriptum: Technische Universität Graz, 2015

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: p-V Diagramm [2]	3
Abbildung 2-2: Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis [3]	4
Abbildung 2-3: optimales Verdichtungsverhältnis ohne und mit VVL [4]	5
Abbildung 2-4: Einflussfaktoren der Schaltstrategie 2-stufiger VCR-Systeme [5]	6
Abbildung 2-5: Schaltstrategie 2-stufiger VCR-Systeme [5].....	6
Abbildung 2-6: Potential der CO ₂ Reduktion [5]	7
Abbildung 2-7: VCR Systeme [5].....	8
Abbildung 2-8: Signalkette des elektrisch angesteuerten Pleuels	11
Abbildung 2-9: Schaltbild Ölkreislauf V2P-E	12
Abbildung 3-1: Test-RIG Aufbau	13
Abbildung 3-2: Schnittdarstellung Test-RIG	15
Abbildung 3-3: Generatorsimulator [6]	16
Abbildung 3-4: Signal von Generatorsimulator [6].....	16
Abbildung 3-5: Kalibrierkurve des Multifunktions-Controller	17
Abbildung 3-6: Signalauswertung bei 4500min ⁻¹ und 4.4bar	20
Abbildung 3-7: Signalauswertung bei 700min ⁻¹ und 2.2bar	20
Abbildung 3-8: Steuerschieberkraft bei 4500min ⁻¹ und 5bar.....	21
Abbildung 3-9: Ankerkraft in Abhängigkeit des Ankerhubs	22
Abbildung 4-1: Problemlösungszyklus [7]	25
Abbildung 4-2: Anforderungsliste der elektrischen Verbindung.....	26
Abbildung 4-3: Platzbedarf und Montierbarkeit im Detail	27
Abbildung 4-4: Glieder der Übertragung	27
Abbildung 4-5: Spulenträger [11]	29
Abbildung 4-6: Spule mit „Anwickelstift“[10].....	29
Abbildung 4-7: Morphologischer Kasten.....	30
Abbildung 4-8: Übersicht Konzepte.....	31
Abbildung 4-9: Übersicht Konzept 1	32
Abbildung 4-10: Übersicht Konzept 2.....	33
Abbildung 4-11: Übersicht Konzept 3.....	34
Abbildung 4-12: Übersicht Konzept 4.....	35
Abbildung 4-13: Übersicht Konzept 5.....	36
Abbildung 4-14: Verschweißen der Kontaktstelle	37
Abbildung 4-15: Interne Bewertung der Konzepte.....	38
Abbildung 4-16: Paarweiser Vergleich der Konzepte	39
Abbildung 4-17: Bewertungsliste nach VDI-Richtlinie 2225	40
Abbildung 5-1: Position Kugel-Rückschlagventil.....	41
Abbildung 5-2: Vereinfachung Kugel-Rückschlagventil	43

Abbildung 5-3: Darstellung der Auflösung der Flächengeometrie	43
Abbildung 5-4: Geometriefehler beim Konvertieren bzw. Vernetzen	44
Abbildung 5-5: Auswahl der Verfeinerungen	45
Abbildung 5-6: Ausgewählte Flächen für das „bewegte Netz“	46
Abbildung 5-7: Öffnungsflächen-Vergleich	47
Abbildung 5-8: Berechnungsschritte.....	47
Abbildung 5-9: Vernetzte Geometrie mit Verfeinerungen	48
Abbildung 5-10: gültige Lösung trotz Schwingung.....	50
Abbildung 5-11: Schwingverhalten zwischen Ein- und Auslass	50
Abbildung 5-12: Eingeschwungenes System	50
Abbildung 5-13: Zusammenhang Massendurchfluss mit Kugelposition	51
Abbildung 5-14: Geschwindigkeitsverteilung mit geänderter Geomtrie.....	52
Abbildung 5-15: Druckentwicklung beim Öffnen des Ventils	52
Abbildung 5-16: Kavitationsfelder bei fast geschossenem Ventil.....	53
Abbildung 5-17: Geschwindigkeitsverteilung ohne und mit Einfluss der Kavitation..	53