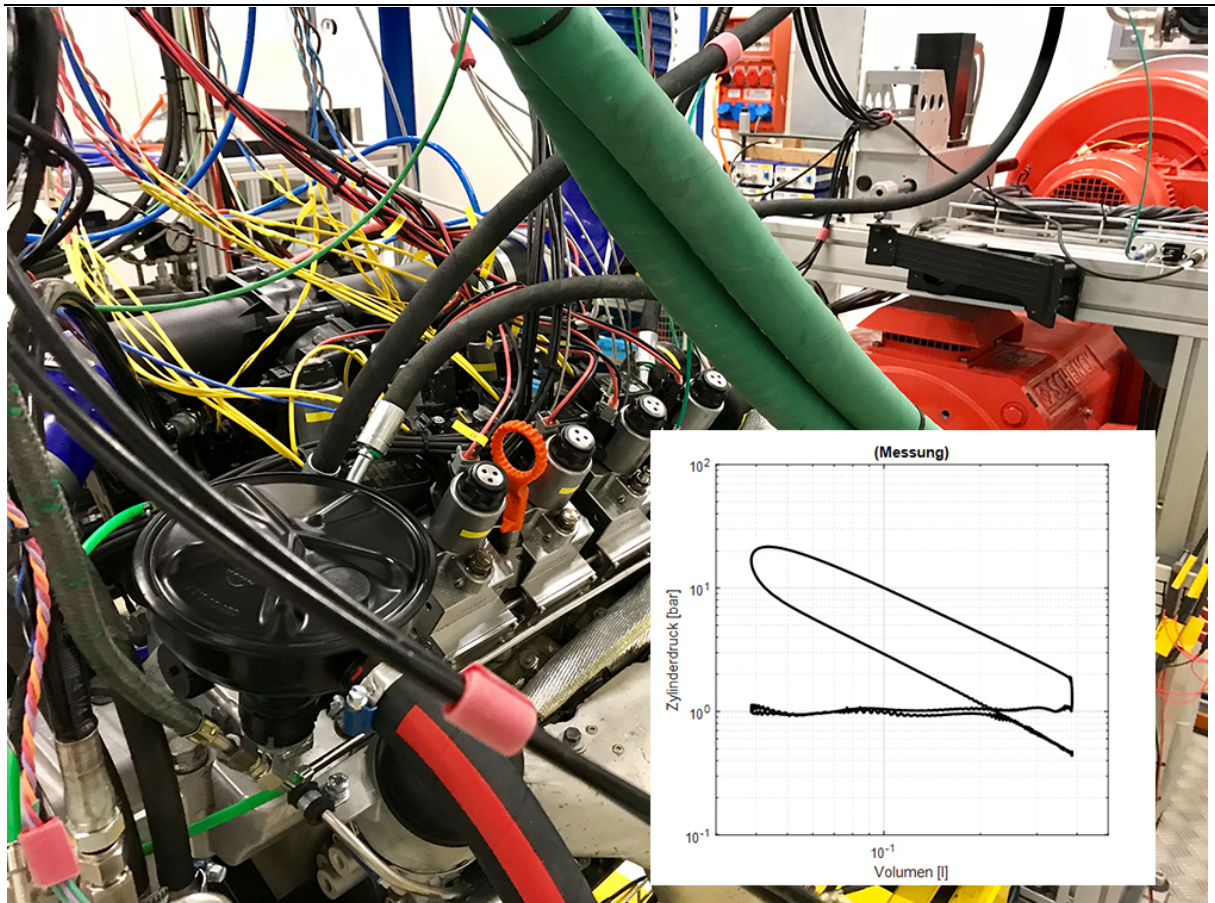




Schlussbericht vom 22. Dezember 2020

FlexWork

Arbeits- und Brennverfahren mit einer neuartigen, vollvariablen Ventilsteuerung



Quelle: © Empa 2018



Materials Science and Technology

Datum: 22. Dezember 2020

Ort: Dübendorf

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Verbrennung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Empa
Abteilung Fahrzeugantriebssysteme
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
www.empa.ch/abt504

Autor/in:

Patrik Soltic, Empa, patrik.soltic@empa.ch
Norbert Zsiga, Empa, norbert.zsiga@empa.ch
Andyn Omanovic, Empa, andyn.omanovic@empa.ch

BFE-Bereichsleitung: Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501619-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Verbrennungsmotoren wurden im Verlauf der letzten Jahrzehnte zunehmend komplex. Direkteinspritzung, Turboaufladung, Zylinderanzahl-Reduktion sowie aufwändige Abgasnachbehandlung sind nun breit etabliert. Neben der absehbaren Verbreitung der Hybridisierung fehlen Verbrennungsmotoren noch zwei wesentliche Innovationen zur weiteren Effizienzsteigerung: variable Verdichtung sowie vollvariable Ventilsteuerungen. Diese zwei Bausteine würden dazu beitragen, einerseits die Effizienz des Motors zu verbessern und andererseits würden sie ermöglichen, dass der Motor ideal auf alternative Treibstoffe reagieren könnte.

Das FlexWork Projekt beschäftigt sich mit der Verwirklichung einer vollvariablen Ventilsteuerung. Um volle Flexibilität zu haben verfolgte das Projektteam eine elektrohydraulische Lösung, mit welcher auf eine Nockenwelle komplett verzichtet werden kann. Neben dem Wegfall der Nockenwelle ist bei diesem Ventiltriebssystem die Wahl des Hydraulikfluids sehr speziell: anstatt einem Öl wurde eine Wasser-Glykol Mischung verwendet. Typischerweise wird in der Hydraulik Öl verwendet, bei anderen Ventiltriebssystemen das Motoröl. Da das Motoröl aber, durch Verbrennungsrückstände und Treibstoffeintrag, schnell altert, ist Motoröl aber eigentlich ein denkbar ungünstiges Fluid für diese Aufgabe. Zudem ist ein elektrohydraulischer Ventiltrieb dadurch gekennzeichnet, dass das Arbeitsfluid bei jeder Ventilbetätigung einen Druckzyklus durchläuft. Diese Kompression / Entspannung ist verlustärmer, je steifer das Hydraulikfluid ist. Hier bringt Wasserglykol Vorteile, denn es ist deutlich steifer als Öl und es ist, in Form von Kühlwasser, bereits im Motor vorhanden. Durch eine korrekte Auslegung der Materialien und Toleranzen eignet sich Wasserglykol für diese Hydraulikfluidaufgabe bestens, wie im Rahmen des Projektes gezeigt werden konnte.

Im Rahmen des FlexWork Projektes wurde also ein neuartiges Ventiltriebssystem mit einem ungewöhnlichen Hydraulikfluid auf einem PW-Ottomotor aufgebaut, auf dem Motorprüfstand zum Laufen gebracht sowie in verschiedenen Lastregel- bzw. Arbeitsverfahren getestet. Ziel war es, die grundlegenden Vorteile des neuen Systems zu erarbeiten und aufzuzeigen, damit das System später in die Industrie transferiert werden kann. In einem ersten Schritt wurde am Aufbau des Systems gearbeitet. Dies umfasste die Simulation, Auslegung, Konstruktion und Fertigung der mechanischen und hydraulischen Komponenten. Anschliessend wurde das System zusammengestellt und, noch ohne auf einem Motor zu sein, ausgiebig getestet. Dann wurde das System auf einem Vierzylindermotor aufgebaut und erfolgreich im befeuerten Motor in Betrieb genommen und das System hat bis zum Projektabschluss über 6 Millionen Ventilbetätigungen problemlos überstanden.

In der untersuchten Konfiguration, d.h. auf einem 1.4 Liter Vierzylinder Ottomotor, konnte durch den Ventiltrieb, je nach Anwendungsfall, eine Treibstoffeinsparung zwischen 5 und 20% realisiert werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass Lastanpassungen tatsächlich von einem Verbrennungszyklus zum Nächsten realisiert werden können. Ebenso konnte Schubabschaltung ohne Luftdurchspülung, sowie 8- und 12-Takt Betrieb umgesetzt werden.

Ziel von Nachfolgeprojekten ist, das System in passenden Anwendungen in Richtung Industrialisierung zu bringen.



Summary

Internal combustion engines have become increasingly complex over the last decades. Direct injection, turbocharging, reduction of the number of cylinders as well as sophisticated exhaust gas after treatment systems have been established. Besides the predictable propagation of hybridization, internal combustion engines lack two major innovations to further increase the efficiency: a variable compression ratio and a fully variable valve train. These two modules would contribute to increase the efficiency of the engine on one hand and on the other hand, they would enable engines to cope with and be adjusted to alternative fuels in the best possible way.

The FlexWork project is about the realization of a fully variable valve train. In order to have full flexibility the project team focused on an electrohydraulic solution, with which camshafts could be omitted completely. In the developed system, the choice of the hydraulic fluid is very special: instead of an oil, a mixture of water and glycol was used. Typically, oils are used in hydraulic applications and engine oil is used in other valve train systems. Since engine oil ages rather quickly due to residuals from the combustion and entry of fuel, engine oil is an unfavorable candidate for this task. In addition to that, in an electrohydraulic valve train, the working fluid runs through a pressure cycle each actuation. This compression and pressure relief is more efficient; to lower the compressibility of the hydraulic fluid. In this regard, there is an advantage for water glycol, as it has a much lower compressibility than oil and it is already present in every internal combustion engine – the engine's cooling fluid.

Within the scope of the FlexWork project, a new valve train was developed with an unconventional hydraulic fluid on a passenger car Otto engine. This engine and valve train were taken into operation and different operating modes and load control strategies were tested. The goal was to demonstrate the fundamental advantages of this new system so that this system can be transferred to industry in a later stage. In the first stage, the system was designed. This included simulation, mechanical design and production of the hydraulic components. In succession, the system was assembled and tested exhaustively. Thereafter, the system was assembled on an internal combustion engine and taken into fired operation. To date, the system has performed more than 6 million valve actuations without problem.

In the analyzed configuration, i.e. using a 1.4-liter passenger car Otto engine, a reduction in the fuel consumption of 5 to 20% could be achieved, depending on the details of the vehicle and driving cycle. In addition, it could be shown that load changes can indeed be realized from one combustion event to the next. Fuel cut-off without scavenging of air as well as 8- and 12-stroke operation could be also realized.

It is the goal of succeeding projects to bring the system closer to industrialization in suitable applications.



Résumé

Les moteurs à combustion interne sont devenus de plus en plus complexes au cours des dernières décennies. L'injection directe, la turbocompression, la réduction du nombre de cylindres et le post-traitement complexe des gaz d'échappement sont désormais largement répandus. Outre l'extension prévisible de l'hybridation, les moteurs à combustion interne manquent encore de deux innovations essentielles pour accroître encore leur efficacité : la compression variable et la commande entièrement variable des soupapes. Ces deux éléments contribueraient à améliorer l'efficacité du moteur d'une part et, d'autre part, ils permettraient au moteur de réagir de manière idéale aux carburants de substitution.

Le projet FlexWork porte sur la réalisation d'une commande de vanne entièrement variable. Afin d'avoir une flexibilité totale, l'équipe du projet a recherché une solution électro-hydraulique, avec laquelle on peut se passer complètement d'un arbre à cames. Outre l'élimination de l'arbre à cames, le choix du fluide hydraulique pour ce système de commande des soupapes est très particulier : au lieu d'une huile, on a utilisé un mélange eau-glycol. En général, l'huile est utilisée dans l'hydraulique, tandis que l'huile moteur est utilisée dans d'autres systèmes de commande des soupapes. Cependant, comme l'huile moteur vieillit rapidement en raison des résidus de combustion et de l'apport de carburant, l'huile moteur est en fait un fluide extrêmement défavorable pour cette tâche. En outre, une commande de soupapes électrohydrauliques se caractérise par le fait que le fluide de travail passe par un cycle de pression chaque fois que la soupape est actionnée. Plus le fluide hydraulique est rigide, plus la perte de cette compression/relâchement est faible. Ici, le glycol d'eau apporte des avantages, car il est beaucoup plus rigide que l'huile et il est, sous forme d'eau de refroidissement, déjà présent dans le moteur. Grâce à une conception correcte des matériaux et des tolérances, l'eau glycolée est parfaitement adaptée à cette tâche de fluide hydraulique, comme cela a pu être démontré dans le cadre du projet.

Dans le cadre du projet FlexWork, un nouveau type de système de commande de soupapes avec un fluide hydraulique inhabituel a été construit sur un moteur à essence voiture particulière, fait pour fonctionner sur le banc d'essai du moteur et testé dans diverses procédures de contrôle de charge et d'exploitation. L'objectif était d'élaborer et de démontrer les avantages fondamentaux du nouveau système afin que celui-ci puisse ensuite être transféré à l'industrie. Dans un premier temps, des travaux ont été menés pour mettre en place le système. Cela comprenait la simulation, la conception, la construction et la fabrication des composants mécaniques et hydrauliques. Par la suite, le système a été assemblé et, sans être encore sur un moteur, il a fait l'objet d'essais approfondis. Le système a ensuite été monté sur un moteur à quatre cylindres et mis en service avec succès dans le moteur allumé. À la fin du projet, le système avait survécu sans problème à plus de 6 millions d'actionnements de soupapes.

Dans la configuration étudiée, c'est-à-dire sur un moteur à essence quatre cylindres de 1,4 litre, une économie de carburant de 5 à 20% pourrait être réalisée par la commande des soupapes, selon l'application. En outre, il a pu être démontré que des ajustements de charge peuvent effectivement être réalisés d'un cycle de combustion à l'autre. Il a également été possible de mettre en œuvre un arrêt de poussée sans balayage d'air, ainsi qu'un fonctionnement à 8 et 12 temps.

L'objectif des projets de suivi est d'amener le système vers l'industrialisation dans des applications appropriées.



Take-Home Messages

- Ein vollvariabler Ventiltrieb ermöglicht deutliche Effizienzsteigerung in Fahrzeuganwendungen
- Das Potenzial ist um die 20% in urbanem Betrieb und klassischen Antriebssträngen und um die 5% in Hybridantrieben
- Neben der Effizienzsteigerung lassen sich weitere Vorteile realisieren, z.B. eine Verbesserung der Dynamik und ein besseres Thermomanagement der Abgasnachbehandlung
- Wasserglykol eignet sich hervorragend als Arbeitsfluid für diese Anwendung



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	4
Résumé	5
Take-Home Messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	8
2 Anlagenbeschrieb	10
3 Vorgehen und Methode	14
4 Ergebnisse und Diskussion	18
4.1 Optimierung im stationären Motorbetrieb [11]	18
4.2 Reduktion von Drosselverlusten [11].....	19
4.3 Lastregelung im transienten Motorbetrieb [11].....	20
4.4 Zylinder Ab- und Zuschaltung [12]	22
4.5 Optimierung der Steuerzeiten im X-Takt Betrieb.....	24
4.6 Vorteile in der Hybridisierung [9]	26
5 Schlussfolgerungen und Fazit	28
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	28
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	29
8 Kommunikation	30
9 Publikationen	34
10 Literaturverzeichnis	35



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die CO₂-Vorschriften für Personenwagen werden weltweit immer strenger, wobei sich Europa (neben Japan) die ambitioniertesten Ziele gesetzt hat. Der momentane CO₂ Flottenmittel-Zielwert von 95 g/km gilt für den Massen-Flottenmittelwert einer Emissionsgemeinschaft (in der EU: 1393 kg, in der Schweiz aktuell 1601 kg) schwerer Fahrzeugflotten dürfen mehr, leichtere weniger ausstossen ohne Strafzahlungen bezahlen zu müssen. Die in der Schweiz deutlich strengeren CO₂ Vorschriften als in der EU führen dazu, dass die Flottengrenzwerte hierzulande aktuell bei Weitem nicht eingehalten und von den Importeuren hohe Strafen bezahlt werden. Doch nicht nur Personenwagen stehen im Druck ihre CO₂ Emissionen zu senken, auch für Lieferwagen wurden entsprechende Grenzwerte eingeführt und für schwere Nutzfahrzeuge steht eine solche Einführung in Europa ebenfalls bevor. Dies verdeutlicht den Innovationsdruck in Richtung CO₂ Absenkung, den die Automobilindustrie aktuell hat.

Solch starke CO₂ Absenkungen sind extrem anspruchsvoll. Die technisch einfachste Möglichkeit um die aktuellen gesetzlichen und stark sanktionierten CO₂ Vorgaben zu erfüllen ist es, die durch den Fahrzeugbetrieb erzeugte CO₂ Emissionen vom Fahrzeugsektor in einen schwächer sanktionierten Sektor zu verschieben. Es lassen sich aber aus technischen und ökonomischen Gründen nicht alle mobilen Anwendungen von der Primärenergiewandlung befreien, insbesondere Langstrecken- und Hochlastanwendungen sind auf sehr hohe Energiespeicherdichten angewiesen, wie sie im Fahrzeugbereich nur von chemischen Energieträgern zur Verfügung gestellt werden können [1]. Möchte man in diesen Anwendungen fossile Treibhausgase reduzieren, ist man auf kohlenstoffarme fossile Treibstoffe und idealerweise auf komplett erneuerbare Treibstoffe angewiesen [2]. In beiden Fällen ist eine möglichst effiziente Energiewandlung, auch aus ökonomischen Gründen, oberstes Ziel.

1.2 Motivation des Projektes

In der Entwicklung der Verbrennungsmotoren wurden in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte erzielt. Einerseits wurden Effizienzen verbessert, andererseits wurden Schadstoffemissionen massiv reduziert. Die Effizienzfortschritte gründeten v.a. auf Reibungsminimierung (Materialentwicklung, Zylinderzahlreduktion) sowie auf der Flexibilisierung diverser Funktionen (Einspritzung, Aufladung). Es fehlen dem Serienmotor aber noch zwei wesentliche Innovationen zur weiteren Effizienzsteigerung: die variable Verdichtung sowie vollvariable Ventilsteuerung. Im Rahmen des FlexWork Projektes sollte nun aufgezeigt werden, wie eine solche vollvariable Ventilsteuerung aussehen könnte und welche Vorteile resultieren. Das Projekt fokussierte auf einen Treibstoff (Methan). Ein weiterer Vorteil einer vollvariablen Ventilsteuerung, welcher im Rahmen dieses Projektes nicht behandelt wurde sondern in einem Nachfolgeprojekt angeschaut wird, ist allerdings auch die Adaption des Brennverfahrens auf andere Treibstoffe.

1.3 Projektziele

Die beste Effizienzmassnahme für treibstoffbetriebene Personenwagen ist die Hybridisierung. Das höchste Potenzial haben sogenannte Vollhybride (d.h. mechanische Kopplung des Verbrennungsmotors mit den Antriebsrädern plus Möglichkeit, phasenweise rein elektrisch zu fahren und maximal zu



rekuperieren) [3]. Die Kombination der Hybridisierung mit „low-carbon-fuels“ bietet dabei bezüglich CO₂ Emissionen eine sehr attraktive Option für die Zukunft [4][5]. Effizienzsteigerungsmassnahmen im ganzen Kennfeldbereich von Verbrennungsmotoren werden dafür immer wichtiger werden, sowohl bei klassischen, wie auch bei hybriden Antriebssträngen. Das Projekt FlexWork setzte sich darum zum Ziel, die Effizienz von Verbrennungsmotoren zu steigern. Hauptfokus lag auf dem Ausloten des Potentials einer neuartigen vollvariablen Ventilsteuerung [6][7].

Vollvariable Ventilsteuerungen sind schon lange ein Fokus der Motorenforschung und –Entwicklung denn sie eröffnen völlig neue Effizienz- und Emissionsstrategien wie zum Beispiel drosselfreie Laststeuerung, flexible Realisierung von Miller/Atkinson Zyklen, flexible Steuerung interner Abgasrückführung, flexible Nutzung von Scavenging, usw. Vollvariable Ventilsteuerungen haben sich aber aus Kostengründen bis jetzt nie durchgesetzt, lediglich vereinfachte Systeme haben den Weg in die Serienfertigung gefunden. Das erfundene System hat die Eigenschaft Flexibilität mit tiefen Kosten und tiefem Eigenenergiebedarf zu verbinden. Der im FlexWork Projekt verwendete bzw. weiterentwickelte Ventiltrieb zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Hydraulische Rekuperation durch Verwendung zweier hydraulischer Druckniveaus. Die Hydraulikpumpe muss lediglich die Verluste des Systems decken, d.h. Hydraulikfluid von tieferen zum höheren Druckniveau fördern.
- Verzicht auf die Nutzung von Motorenöl. Als Hydraulikfluid wird ein Wasser/Glykol Gemisch (=Kühlflüssigkeit) verwendet. Dadurch können für die Motorschmierung tiefer additivierte Öle verwendet werden, was sich positiv auf die Lebensdauer der Abgasnachbehandlung auswirkt. Zudem ist Wasserglykol deutlich steifer als Öl, was einen tieferen Eigenenergiebedarf des Ventiltriebssystems mit sich bringt.
- Einfache hydraulische Schaltung, welche trotz vergleichsweise einfacher/kostengünstiger Magnetventile effizient funktioniert da im Gegensatz zu vielen anderen Systemen, das Magnetventil nur betätigt wird um die Bewegung einzuleiten (d.h. keine stark verlustbehaftete Ventilschaltung bei hohen Volumenströmen). Der Bewegungsablauf wird kostengünstig durch sinnvoll verschaltete Rückschlagventile ermöglicht.
- Keine Notwendigkeit, den Ventilhubverlauf messtechnisch zu erfassen und elektronisch durch schnelle Regeleingriffe zu regeln, die Ventilbewegung läuft – trotz voller Flexibilität der Phasenlage und des Ventilhubes – aufgrund ihrer hydraulischen Schaltung selbständig ab.
- Sicherer Betrieb, selbst wenn aufgrund unvorhergesehener Umstände (z.B. Fehlzündung, falsch eingestellter Aktivierungsdruck) das System zu stark beschleunigt wird und somit den Maximalhub übertreffen würde, durch eine spezielle hydraulische, verstellbare und rekuperierende Maximalhubbegrenzung.

Im Rahmen des FlexWork Projektes wurde der Ventiltrieb optimiert, in Betrieb genommen und das Potenzial für wirkungsgradsteigernde Brennverfahren im Ottomotor aufgezeigt.



2 Anlagenbeschrieb

Der eingesetzte Motor ist ein 1.4 Liter TSI Vierzylinder-Verbrennungsmotor des Typs EA111 von Volkswagen. Dieser zeichnet sich durch ein flaches Interface für den Ventiltrieb aus. Nach Entfernen des serienmässigen mechanischen Ventiltriebs findet sich eine plane Fläche, welche die Montage des FlexWork Ventiltriebs erleichtert. Sämtliche zu den Nockenwellen führenden Ölkanäle wurden verschlossen, wodurch der Zylinderkopf komplett ölfrei gehalten wird. In Serie wird dieser Motor durch einen mechanischen Kompressor und einen Turbolader doppelt aufgeladen. Für die Untersuchungen von verschiedenen Brennverfahren im Rahmen des FlexWork Projektes ist eine Aufladung durch den zuschaltbaren Kompressor genügend. Der Turbolader wurde bislang nicht montiert da einerseits vor allem Teillastbereiche im Interesse der Untersuchungen liegen und andererseits der Regelaufwand dadurch reduziert wird. Es ist jedoch möglich den Turbolader im weiteren Verlauf des Projektes für Experimente im Volllastbereich einzubauen und zu verwenden.

Das hydraulische Versorgungssystem wurde getrennt vom Ventiltrieb aufgebaut und gehört nicht zum Forschungsschwerpunkt dieses Projektes. Es wurden in der Hydraulik gängig verfügbare Komponenten verbaut, sowie zwei Hochdruckpumpen und Druckregelventile für die unabhängige Bereitstellung von zwei unterschiedlichen Druckniveaus für Ein- und Auslassseite.

Der mit dem FlexWork Ventiltrieb ausgestattete Motor ist über eine Drehmomentmesswelle mit der elektrischen Maschine des Prüfstandes verbunden. Diese wird dazu verwendet, den Verbrennungsmotor unabhängig der Last bei einer konstanten Drehzahl zu halten. Prüfstandseitig erfolgt des Weiteren die Messung diverser Betriebsgrössen, wie beispielsweise diverse Drücke und Temperaturen oder der Massenstrom von Luft, Brennstoff und Hydraulikfluid. Die erforderlichen Betriebsgrössen werden per CAN an die Motorsteuerung übermittelt. Dort werden daraus weitere Betriebsgrössen wie beispielsweise der Energiebedarf der Hydraulik berechnet. Alle veröffentlichten Ergebnisse beziehen den hydraulischen Energiebedarf mit ein.

Als offen programmierbare Motorsteuerung wird die MicroAutoBoxII von dSPACE eingesetzt. Die Steuer- und Regelsoftware wurde komplett intern entwickelt, um den motorischen Betrieb mit dem FlexWork Ventiltrieb zu ermöglichen. Die Motorsteuerung beinhaltet ebenfalls ein Sicherheitskonzept, welches Warnungen ausgibt, falls gewisse Betriebsgrössen sich den zulässigen Grenzwerten nähert und ggf. auch eine Sicherheitsabschaltung von Motor und Ventiltrieb vornehmen kann. Zur Kontrolle werden alle Ventilhuber durch Linearencoder der Firma Elgo Electronics, welche im Zylinderkopf verbaut wurden, überwacht und aufgezeichnet.

Für die geplanten Untersuchungen während des Projektes sind folgende Eigenschaften des Ventiltriebs von besonderer Wichtigkeit:

1. Die Steuerzeiten können für jedes Ventilpaar einzeln vorgegeben werden.
2. Der Ventilhub kann einlass- und auslassseitig unabhängig voneinander variiert werden.
3. Jedes Ventilpaar kann individuell angesteuert werden und ist stromlos natürlich geschlossen.

Diese Eigenschaften erlauben es neuartige Strategien wie zum Beispiel ein drehmomentneutrales Zu- und Abschalten von Zylindern oder den Wechsel in andere Taktarten zu untersuchen. Durch die individuelle Ansteuerung der Einlassventile kann die Last auf jedem Zylinder einzeln geregelt werden.

Die wichtigsten Kenngrössen des Prüfstandaufbaus sind in Tabelle 1 aufgelistet.



Tabelle 1: Informationen zum verwendeten Grundmotor sowie zur Prüfstandsinstrumentierung

Grundmotor	Volkswagen EA111
Hubraum	1.4 Liter, 4 Zylinder
Bohrung / Hub	76.5 mm / 75.6 mm
Kompressionsverhältnis	10
Pleuellänge	144 mm
Treibstoff	CNG, Saugrohreinblasung mit NGI2 Injektoren (Bosch)
Ventiltrieb	FlexWork
Ventilhub Messtechnik	Linearencoder (Elgo Electronics)
Ventilhub Variabilität	1-9 mm, Einlass und Auslass individuell
Steuerzeiten Variabilität	Alle Ventilaare individuell
Steuergerät	MicroAutoBoxII (dSPACE)
Lambdasensoren	Breitband LSU 4.9 (Bosch)
Kraftstoffmengensensor	Coriolis Sensor, RHM015 (Rheonik)
Luftmassenmengensensor	Sensyflow P (ABB)
Drehmomentmessung	HBM T40
Schwungrad / Getriebe	Seriendoppelmassenschwungrad / kein Getriebe

Die genaue Funktionsweise des FlexWork Ventiltriebs ist in [8]–[10] detailliert beschrieben. An dieser Stelle sind die wichtigsten Punkte aus den erwähnten Quellen zusammengetragen um ein Verständnis des Ventiltriebs zu ermöglichen.

Um mit etabliertennockenwellen-basierten Systemen konkurrieren zu können, muss ein vollvariabler Ventiltrieb nebst größtmöglicher Flexibilität mit dem Ziel minimaler Komplexität und geringen Eigenenergiebedarfs entwickelt werden.

Der hier vorgestellte Ventiltrieb FlexWork erfüllt diese hohen Anforderungen unter anderem dank einer seriellen Anordnung von Rückschlagventilen, welche eine automatisierte Rekuperation des Arbeitsmediums in den Hochdruckspeicher ermöglichen. Daraus resultieren eine geringe Anzahl Aktuatoren und ein geringer Eigenenergiebedarf. Eine externe Überwachung und Regelung der Fluidströmung oder des Ventilhubes ist nicht nötig. Die Bauhöhe des Zylinderkopfes kann verringert werden, da durch die hydraulische Kraftübertragung konstruktive Freiheitsgrade entstehen. Der gesamte Ventiltrieb wurde aus gewöhnlichen korrosionsbeständigen Werkstoffen mit konventionellen Methoden gefertigt. Als Arbeitsmedium wird eine 1:1 Wasser-Ethylenglykol Mischung verwendet. Diese besondere Wahl bringt die Vorteile einer gegenüber Ölen höheren Steifigkeit und einer komplett ölfreien Auslegung des Zylinderkopfes. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, das Motorenöl weniger stark mit Additiven zu versetzen, da die großen Flächenpressungen an den Nocken ausbleiben. Somit gelangen weniger Katalysatorgifte oder filterblockierende Asche über die Verbrennung ins Abgas, was die Lebensdauer der Abgasnachbehandlungseinrichtung verlängert.

Das Grundprinzip des Ventiltriebs – für Ein- und Auslassseite gleich – ist ein asymmetrisches hydraulisches Pendel, welches als Feder-Masse-Schwinger beschrieben werden kann. Folglich hängt die Zeit für das Öffnen (Zeit von geschlossener Position bis Endhub) der Gaswechselventile $T_{\text{Öffnen}}$ von der Steifigkeit k der Gaswechselventilfedern und der Masse M_{System} aller bewegten Komponenten ab,



$$T_{\text{öffnen}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{system}}}{k}}$$

Aus dieser Gleichung folgt, dass die Öffnungszeit unabhängig vom gewünschten Ventilhub und für alle Drehzahlen konstant ist. Um bei einer Drehzahl von 5000U/min eine minimale Öffnungsdauer (Öffnen und Schließen) von 210°KW zu erreichen, ergibt sich bei $M_{\text{system}} = 100g$ eine Federsteifigkeit von 45N/mm. Die Eigenheit des FlexWork Ventiltriebs besteht darin, dass das Hubprofil bei hohen Drehzahlen ähnlich zum Hubprofil vonnockengetriebenen Gaswechselventilen ist. Bei tiefen Drehzahlen hingegen ergeben sich über dem Kurbelwinkel äußerst steile Öffnungs- und Schließflanken.

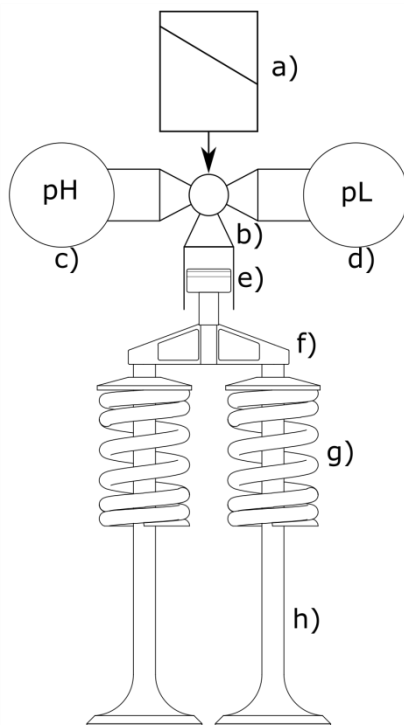


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Ventiltriebs

Der FlexWork Ventiltrieb besteht grundsätzlich aus den in Abbildung 1 gezeigten Komponenten. Die Steuerung der Ventilöffnung erfolgt durch die Bestromung einer Magnetspule a). Dabei wird ein hydraulisches Schaltventil b) betätigt, wodurch Medium aus dem Hochdruckspeicher c) in den Arbeitsraum strömt. Der dort ansteigende Druck wirkt auf den Arbeitskolben e), welcher dadurch in Bewegung versetzt wird und über eine Ventilbrücke f) zwei Gaswechselventile h) öffnet.

Einlassseitig wird der Ventilhub über das Hochdruckniveau gesteuert; dabei wird hydraulische Energie in potenzielle Federenergie umgewandelt. In der Endposition versperrt ein Rückschlagventil das Zurückschwingen, solange die Magnetspule bestromt ist. Wird die Spule stromlos geschaltet, initiieren die Gaswechselventilfedern g) den Schließvorgang. Dabei wird in einem ersten Schritt mechanisch automatisiert Medium in den Hochdruckspeicher rekuperiert und nach Abschluss der Rekuperation schließlich in den Niederdruckspeicher d) abgelassen.

Auslassseitig wird das Hochdruckniveau konstant gehalten um gegen einen erhöhten Brennraumdruck sicher öffnen zu können. Um den gewünschten Ventilhub in jedem Betriebszustand einzustellen, ist ein drehbarer Arbeitskolben mit Schrägkantensteuerung verbaut, wodurch der Zufluss ab einem gewissen Ventilhub unterbrochen wird. Sobald die Spule stromlos geschaltet wird, kommt es



während der Schließbewegung nach einer kurzen Beschleunigungsphase zur Rekuperation. Anschließend wird der Ablass gänzlich geöffnet, das restliche Medium in den Niederdruckspeicher abgelassen, und die Gaswechselventile schließen. Dieser Vorgang ist ebenfalls mechanisch automatisiert.

Um Verschleiß und Geräuschentwicklung zu minimieren, muss das Gaswechselventil sanft aufsetzen. Dafür kommt es ein- und auslassseitig zu einer hydraulischen Querschnittsverengung, sobald ein gewisser Ventilhub unterschritten wird.

Alle Vorgänge – Öffnen, Offenhalten, Rekuperieren, Ablassen und sanft Aufsetzen – sind einlass- und auslassseitig dank der konstanten Periodizität eines Feder-Massen-Schwingers komplett mechanisch automatisiert. Daher sind während des Bewegungsvorgangs weder Steuereingriffe noch eine Ventilhubüberwachung notwendig. Pro Ventilpaar ist nur ein Magnetaktuator erforderlich, welcher bei ruhendem Medium geschaltet wird. Eine Einzelventilbetätigung ist prinzipiell ebenfalls möglich.

Der Energiebedarf eines elektrohydraulischen Ventiltriebs lässt sich in einen mechanischen (hydraulischen) und einen elektrischen Anteil auftrennen. Aus dem Funktionsprinzip des FlexWork Ventiltriebs geht hervor, dass der hydraulische Energiebedarf mit dem Gaswechselventilhub und der elektrische Energiebedarf mit der Öffnungsdauer zunehmen.

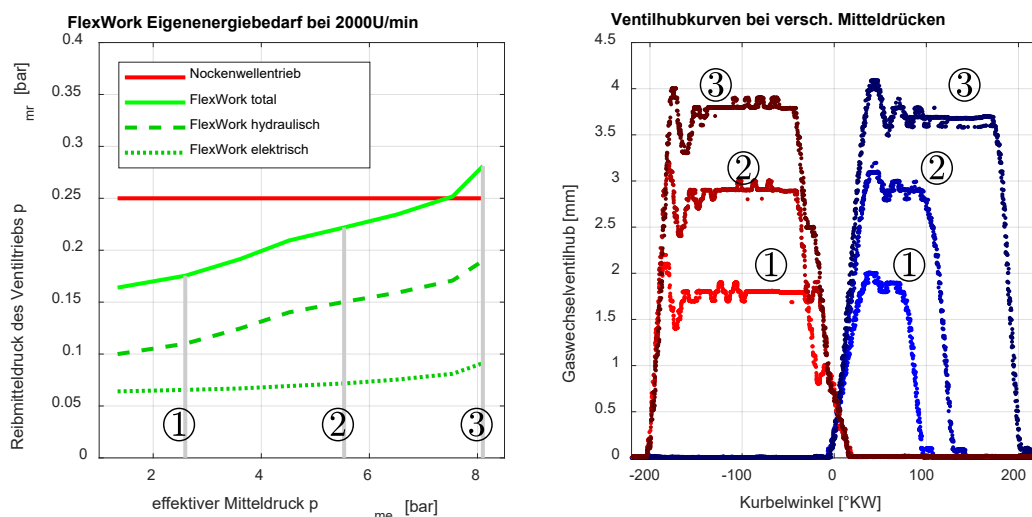


Abbildung 2: Reibmitteldruck des Ventiltriebs und Ventilhubkurven

In Abbildung 2 sind Messwerte des Reibmitteldrucks über dem effektiven Mitteldruck p_{me} für eine Drehzahl von 2000U/min aufgetragen. Bei tiefen und mittleren Lasten reichen 2-4mm Ventilhub aus, um sehr geringe Ladungswechselverluste zu erreichen. Im aufgeladenen Betrieb können Öffnungsdauer und Hub konstant gehalten werden. Zum Vergleich ist ein Reibmitteldruck von 0,25bar für den Nockenwellentrieb aufgetragen. Hierbei wird das Öffnen der Auslassventile gegen Zylinderdruck als relevanter Anteil berücksichtigt, der Energiebedarf von Steuerkette/Riementrieb und Phasenschiebern allerdings nicht. Für genauere Vergleiche ist immer zu berücksichtigen, dass die im realen Betrieb auftretenden Gasdrücke in Einlass, Zylinder und Auslass die Reibarbeit beeinflussen.

Es ist hervorzuheben, dass der FlexWork Ventiltrieb fast im gesamten saugmotorischen Lastbereich einen ähnlichen oder niedrigeren Eigenenergiebedarf als ein Nockenwellentrieb hat. Beim FlexWork Ventiltrieb kommt demnach zusätzlich zur Effizienzsteigerung durch die Entdrosselung der geringere Eigenenergiebedarf des Ventiltriebs zum Tragen.



Anschliessend erfolgte der Aufbau des Systems wie folgt:

1. Aufbau FlexWork Zylinderkopf am Komponentenprüfstand (Abbildung 5).
2. Aufbau Hydraulikversorgung mit zwei regelbaren Druckniveaus.
3. Verkabelung und Programmierung des Rapid-Prototyping Steuergerätes.

Dieser modulare Aufbau ermöglicht das Testen einzelner Funktionen, ohne eine Beschädigung des Gesamtsystem bei Fehlfunktion zu riskieren. Nach der Sicherstellung einer stabilen hydraulischen Druckversorgung wurde der Ventiltrieb und die eingesetzte Messtechnik auf ihre Funktionalität getestet. Erfreulicherweise war keine mechanische Nacharbeit an den Ventiltriebmodulen notwendig. Dies spricht für eine grosse Stimmigkeit zwischen Simulation, Konstruktion und Fertigung,

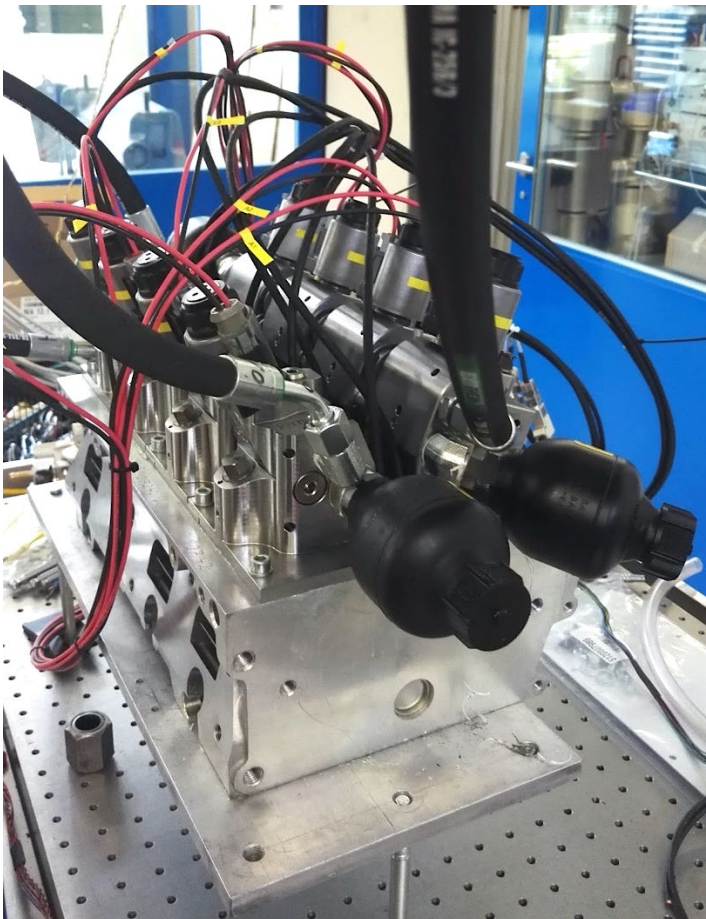


Abbildung 5: Zylinderkopf mit Ventiltriebssystem auf dem Komponentenprüfstand

Anschliessend wurde das System am EA111 Rumpfmotor verbaut. Dazu mussten gewisse Anpassungen am Rumpfmotor gemacht werden, beispielsweise der Abbau und das Verschliessen des nun nicht mehr benötigten Nockenwellenantriebes. Abbildung 6 zeigt den Aufbau in der Versuchswerkstatt. Nach komplettem Aufbau, wurde der Versuchsträger am Motorenprüfstand aufgebaut (Abbildung 7).

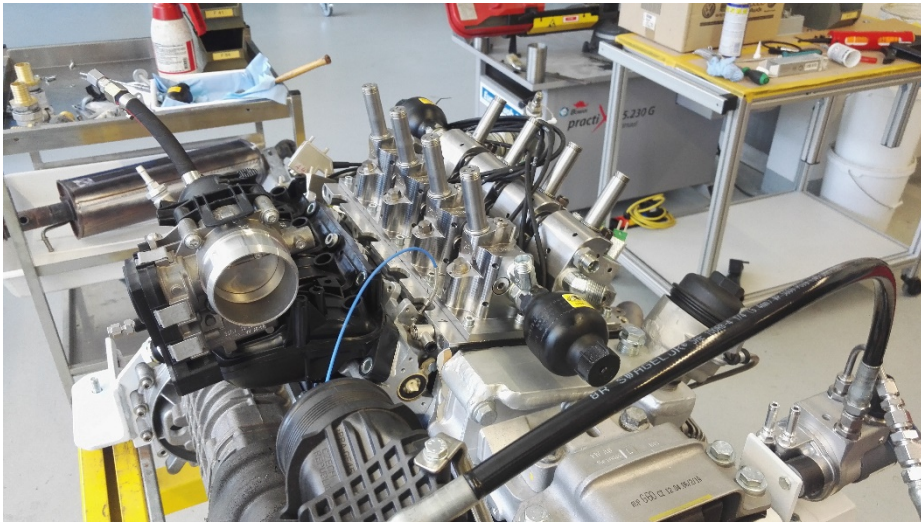


Abbildung 6: Aufbau am Motor

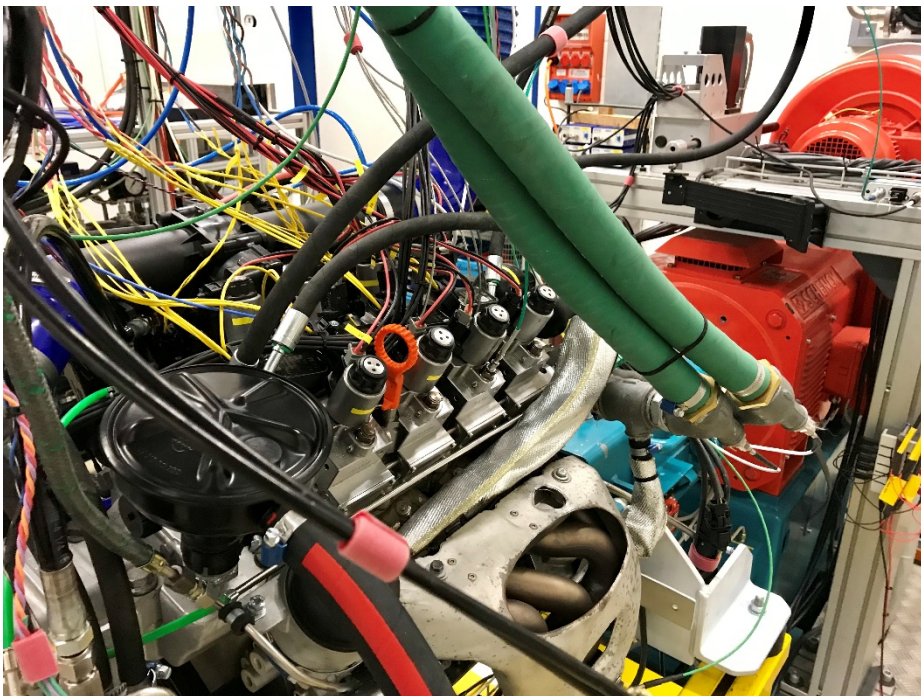


Abbildung 7: Fertig aufgebauter Motor im Motorprüfstand

Darauf folgte die Funktionskontrolle aller Aktuatoren, welche für den motorischen Betrieb benötigt wurden (Drosselklappe, Injektoren, Magnetkupplung des Kompressors, etc.). Vor dem Aufbau in den vorgesehenen Motorenprüfstand wurde überprüft, ob das Steuergerät auf erkannte Fehler richtig reagierte und entsprechend des Fehlergrades eine Warnung ausgab oder einen Not-Aus auslöste.

Beim Einbau eines Verbrennungsmotors in einen Prüfstand wird gewöhnlicherweise das Motorsteuergerät mit dem Prüfstand gekoppelt. Der Prüfstandsoperator sendet dann eine Lastvorgabe (oder eine Gaspedalstellung) und das Motorsteuergerät regelt alle für einen optimalen Betrieb notwendigen Komponenten entsprechend. Da es für dieses Projekt notwendig war, die Motorsteuerung selbst zu pro-



grammieren, ist ein solch autonomer Entwicklungsstand des Motorsteuergeräts nicht möglich. Die Lösung besteht darin, die beiden Systeme – den Verbrennungsmotor und die Bremse des Prüfstandes – einzeln zu betreiben. Mit der Bremse wird die Drehzahl vorgegeben und gehalten (sowohl im Schlepp- als auch im Schubbetrieb), alles andere wird über die MicroAutoBoxII gesteuert. Per CAN wird die Kommunikation der wichtigsten Informationen wie Messdaten und Sicherheitsalarme sichergestellt.

Bevor Messungen mit Verbrennung durchgeführt wurden, wurden alle Sensoren wie Luft- und Kraftstoffmassenmesser kalibriert. Ein wichtiger Aspekt zur korrekten Messung der Luftmasse ist die Beruhigung der Messlinie. Im Saugrohr entstehen durch die diskrete Arbeitsweise eines jeden Zylinders Druckwellen. Diese Druckwellen können bis hin zum Heissfilmluftmassenmesser gelangen und damit die Messung verfälschen. Insbesondere wenn vom gewöhnlich 4-Takt Betrieb abgewichen wird, kann sich der Effekt der Druckwellen verstärken. Um dies soweit wie möglich zu reduzieren, musste zwischen Saugrohr und Messlinie ein Beruhigungsgefäß installiert werden, welches in der Lage ist, Druckwellen zu dämpfen.

Mit dem eigentlichen Beginn verschiedener Messkampagnen (im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert) ging auch die Verbesserung und Erweiterung der verschiedenen Regler mit ein. So wurde beispielsweise die Vorsteuerung für die Gaseinblasung verbessert um ein Abweichen von der stöchiometrischen Verbrennung zu minimieren, die Kennfelder für die Vorsteuerung der Ventilsteuerzeiten wurden verfeinert um die gewünschte Steuerzeit schneller und präziser zu erreichen und die Druckregler wurden so eingestellt, dass der gewünschte Hydraulikdruck (respektive Ventilhub) schnellst möglichst ohne Überschiessen erreicht werden kann. Mit neuen Messkampagnen wurde auch die Motorsteuerung an die neuen Bedürfnisse angepasst. So ist es zum Beispiel möglich während eines 8- oder 12-Takt Brennverfahrens die Auslassventile mehrmals zu betätigen. Dies hat zur Folge, dass man die Restgasmenge im Zylinder während den leeren Takten genau steuern kann und so verschiedene Ziele wie Effizienzmaximierung oder Emissionsminimierung erreichen kann.

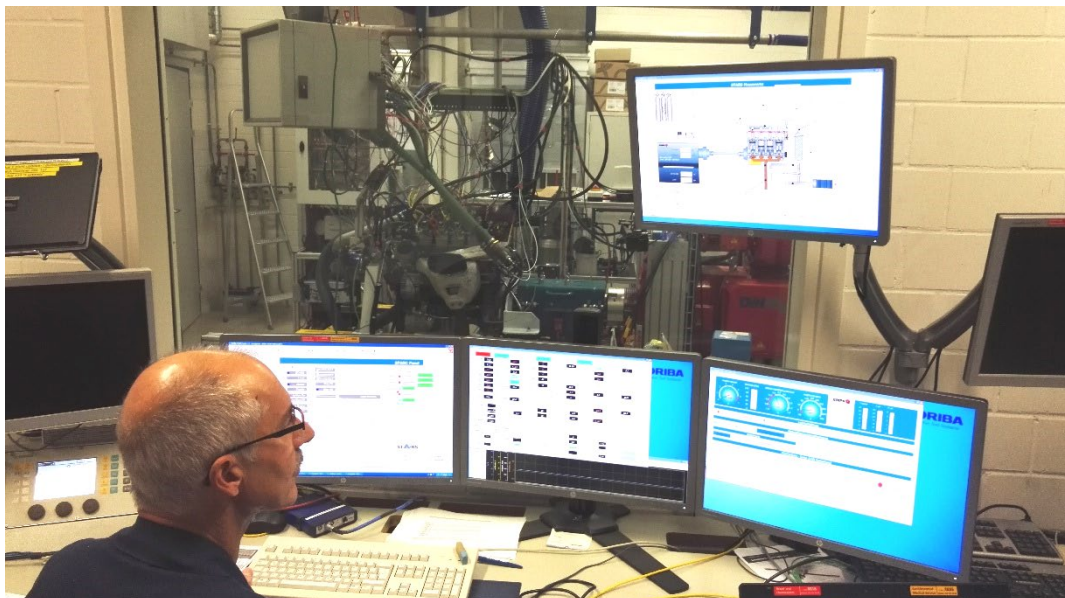


Abbildung 8: Erste Versuche am Motorprüfstand



4 Ergebnisse und Diskussion

Zum Zeitpunkt dieses Schlussberichtes hat der FlexWork Ventiltrieb seit seiner Inbetriebnahme im Herbst 2018 über 6 Millionen Zyklen im befeuerten Betrieb durchlaufen, was ungefähr 150 Motorbetriebsstunden entspricht. Die Auslegung der Komponenten in der Simulationsumgebung Simcenter Amesim sowie die Konstruktionserfahrung des externen Partners W. Schneider Ingenieurbüro erwiesen sich als sehr gut. Bis heute konnten wir keine Schäden an Ventiltrieb, Zylinderkopf oder sonstigen bewegten Komponenten feststellen und dies trotz des sehr ungewöhnlichen Hydraulikfluides Wasserglykol. Im Nachfolgenden werden die Hauptergebnisse der vergangenen Messkampagnen zusammengefasst.

4.1 Optimierung im stationären Motorbetrieb [11]

Mit dem FlexWork Ventiltrieb stehen sechs Parameter für die Optimierung des Motorbetriebs zur Verfügung: Der Ventilhub (einlass- und auslassseitig getrennt) und die Öffnungs- und Schliesszeitpunkte der Gaswechselventile (zylinderindividuell). Diese sechs Parameter sind unabhängig voneinander wählbar. In allen Betriebsarten mit Miller- oder Atkinson-Laststeuerung bleibt die Drosselklappe voll geöffnet und die Last wird lediglich durch Variabilitäten der Ventilsteuerung eingestellt.

Um erste Optimierungen des Wirkungsgrades in einigen Betriebspunkten vornehmen zu können, wurde eine Optimierungsprozedur angewendet, die im Folgenden beschrieben wird. Aus Simulationen ist bekannt, dass ein gewisser, Betriebspunktabhängiger Einlassventilhub nötig ist, um eine bestimmte Motorlast mit geringen Ladungswechselverlusten und möglichst gutem Wirkungsgrad darzustellen. Die Wahl des Zeitpunktes Einlass schliesst wirkt sich sehr stark auf die Motorlast aus und wird verwendet, um den effektiven Mitteldruck auf den gewünschten Wert zu regeln. Dies beiden Parameter Einlassventilhub und Einlass schließt werden also nicht optimiert, sie stellen Randbedingungen dar. Die Optimierungsparameter sind

1. Hub der Auslassventile,
2. Zeitpunkt Auslass öffnet,
3. Ventilüberschneidung.

Vereinfachend werden nur Ventilüberschneidung symmetrisch zum Gaswechsel-OT (GOT) untersucht, d.h. Auslass schließt und Einlass öffnet sind jeweils gleich viele °KW nach/vor GOT. Diese beiden Parameter werden also in einem Schritt optimiert.

Um den Wirkungsgrad direkt vergleichen zu können, ist es absolut notwendig, dass stets die gleiche Motorlast erreicht wird. Der verwendete Regler passt den Zeitpunkt Einlass schließt so an, dass unter Berücksichtigung des Energiebedarfs des Ventiltriebs stets der gewünschte effektive Mitteldruck resultiert. Die Motorlast berechnet sich zu:

$$p_{me} = p_{mi,HD} - p_{mi,GW} - p_{mr,GM} - p_{mr,Hydr} - p_{mr,Elek}$$

Wobei p_{me} der effektive Mitteldruck des Motors ist, $p_{mi,HD}$ die Hochdruckschleife und $p_{mi,GW}$ die Ladungswechselschleife des Zylinderdruckverlaufs darstellen. Die Reibung setzt sich zusammen aus dem Reibmitteldruck des Grundmotors $p_{mr,GM}$, spricht der mechanischen Reibung ohne den Ventiltrieb, und den Reibmitteldrücken, die sich aus der hydraulisch und elektrisch benötigten Energie $p_{mr,Hydr}$ und $p_{mr,Elek}$ zur Ventilbetätigung ergeben.

Die drei Optimierungsschritte werden nacheinander durchgeführt. Zunächst wird der Auslassventilhub optimiert, danach der Zeitpunkt Auslass öffnet und anschließend die Ventilüberschneidung. Der nachfolgende Optimierungsschritt wird mit den zuvor als optimal befundenen Parametern durchgeführt.

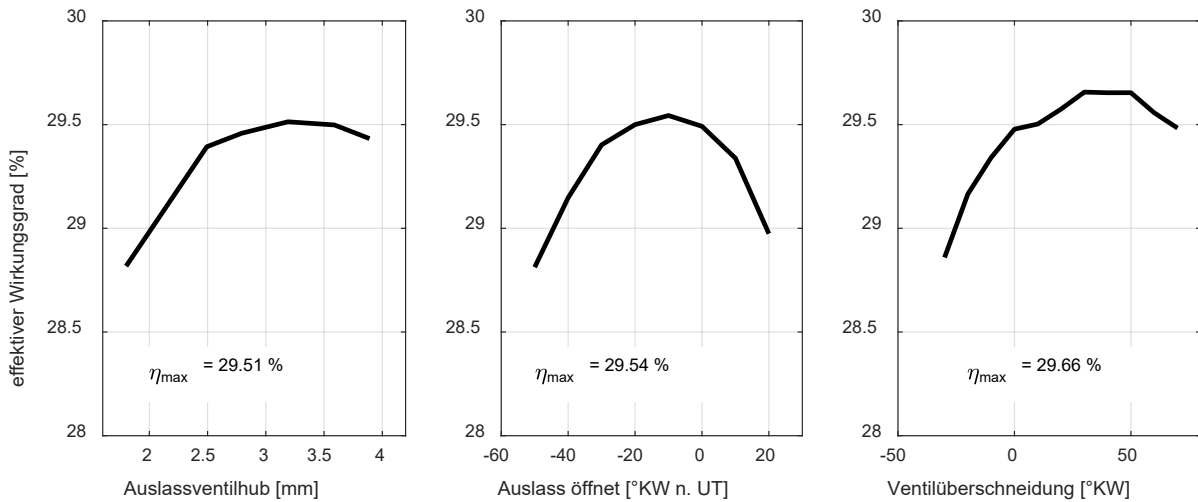


Abbildung 9: Parametervariation bei der Optimierungsprozedur

In Abbildung 9 wird die Optimierungsprozedur im Betriebspunkt 3000U/min, $p_{me} = 4.5\text{bar}$ mit Miller Steuerzeiten gezeigt. Alle Messungen werden mit $\lambda = 1$ und einer wirkungsgradoptimalen Schwerpunktlage von 8°KW nach Zünd-OT (ZOT) durchgeführt. Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Änderungen im Ventilhub einen relevanten Einfluss auf den Energiebedarf des Ventiltriebs haben, während Änderungen in den Steuerzeiten eine untergeordnete Rolle spielen. Die hier gezeigten Ergebnisse sollen vor allem beispielhaft aufzeigen, welche Optimierungsmöglichkeiten mit diesem Ventiltrieb zur Verfügung stehen.

Anmerkungen: Eine Änderung des Einlassventilhubs führt ebenfalls – wie auch eine Änderung des Auslassventilhubs – zu einer relevanten Änderung des hydraulischen Energiebedarfs. Es ist daher nicht a priori klar, welcher optimale Einlassventilhub für einen bestimmten effektiven Mitteldruck zu wählen ist. Darüber hinaus müssten streng genommen diese Optimierungsschritte mehrmals hintereinander durchgeführt werden, da nicht von Vorneherein klar ist, ob/wie sich eine Änderung eines Parameters auf die Lage des Optimums der anderen Parameter auswirkt. Auf weitere Durchläufe wurde bei diesen Untersuchungen aus Zeitgründen verzichtet.

4.2 Reduktion von Drosselverlusten [11]

Zunächst wird am Betriebspunkt 2000U/min, 4.5bar p_{me} der Miller- und Atkinson-Betrieb mit dem gedrosselten Betrieb verglichen. Im gedrosselten Betrieb wird der Saugrohrdruck, in den anderen beiden Betriebsarten der Zeitpunkt Einlass schliesst geregelt, um genau die gewünschte Last zu erreichen. Abbildung 10 zeigt die doppellogarithmischen pV-Diagramme dieser drei Betriebsarten.

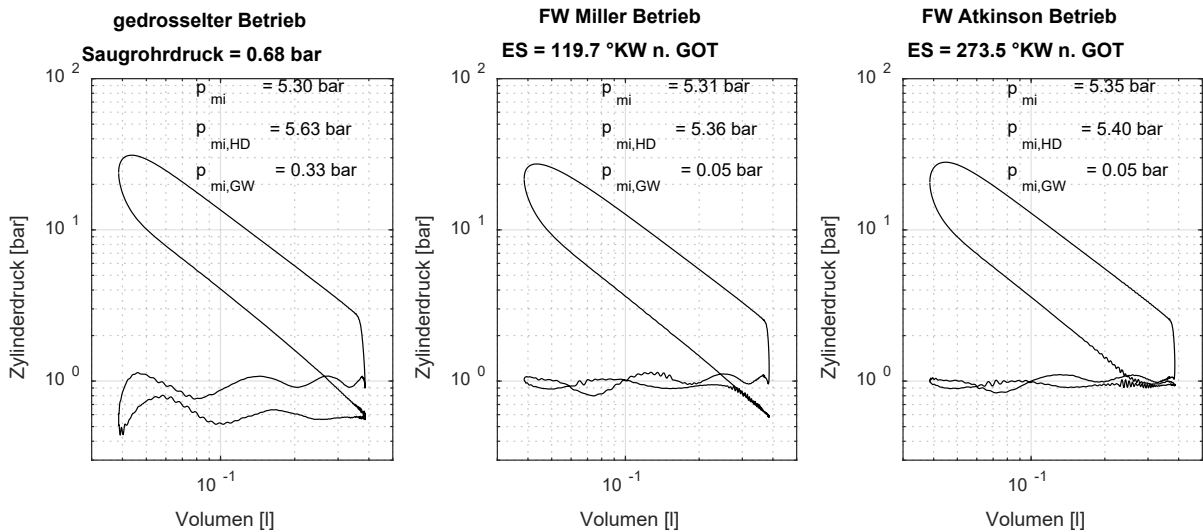


Abbildung 10: pV-Diagramme verschiedener Betriebsarten.

Der linke Subplot zeigt den gedrosselten Betrieb, bei welchem die Ladungswechselschleife klar erkennbar ist. Der Saugrohrdruck für diesen Betriebspunkt beträgt 0.68bar woraus Ladungswechselverluste $p_{mi,GW}$ von 0.33bar resultieren. Die beiden anderen pV-Diagramme zeigen den Miller-Betrieb und den Atkinson-Betrieb. Bei beiden ist die Drosselklappe komplett geöffnet und die Lastregelung erfolgt über den Zeitpunkt Einlass schliesst. In beiden Fällen betragen die Ladungswechselverluste lediglich 0.05bar. Beim Vergleich von Miller- und Atkinson-Betrieb fällt auf, dass im Atkinson-Fall ein leicht höheres p_{mi} erforderlich ist für das gleiche p_{me} . Grund dafür ist, dass hier die Einlassventile deutlich länger offen gehalten werden (mehr als doppelt so lang) und daher einen etwas höheren elektrischen Energiebedarf haben. Die Verbrauchsreduktion beträgt in diesem Betriebspunkt 6.4%.

Im Betriebspunkt 2000U/min, 2.0bar p_{me} beträgt die Verbrauchsreduktion 13.1%.

4.3 Lastregelung im transienten Motorbetrieb [11]

Die Motorlast wird hauptsächlich durch die beiden Parameter Einlassventilhub (Hydraulikdruck Einlass) und Einlass schliesst bestimmt [9]. Jede Motorlast kann durch eine entsprechende Wahl dieser beiden Parameter (sowie optimal gewählter Werte für Auslassventilhub, Auslass öffnet und Ventilüberschneidung) dargestellt werden. Der Farbverlauf in Subplot a) von Abbildung 11 zeigt welche indizierte Motorlast p_{mi} sich in Abhängigkeit von Hydraulikdruck Einlass (Einlassventilhub) und Einlass schliesst bei einer Motordrehzahl von 2000 U/min einstellt. Gestrichelt ist in diesem Subplot der optimale Lastschnitt (OLS) eingetragen. Mit dieser Kombination an Hub und Einlass schliesst kann die entsprechende Motorlast mit bestem Wirkungsgrad bereitgestellt werden. Im stationären Betrieb werden Hub und Dauer also stets so gewählt, dass der Betriebspunkt auf dieser Linie liegt. Im hochtransienten Betrieb muss, aufgrund der für Druckniveaueinstellungen benötigten Zeit, diese Betriebslinie für eine schnelle Lastanpassung kurzzeitig verlassen werden.

Subplot a) zeigt in schwarz und in grau zwei verschiedene transiente Vorgänge. In grau dargestellt sind Sprünge in der Solllast von 4.5-8.5 und 8.5-4.5bar p_{mi} . In schwarz dargestellt sind gefilterte Änderungen der Solllast von 3-7-8-9 und 9-5-4-3bar p_{mi} . Subplots b) und d) zeigen jeweils Sollwert und gemessenen Istwert für Hydraulikdruck und Einlass schliesst Zeitpunkt für die Lastsprünge. Der Hydraulikdruck kann nicht beliebig schnell erhöht werden, vor allem, wenn Hydrospeicher zur Abdämpfung von Druckwellen eingesetzt werden. Die beim Demonstrator verwendeten Hydrospeicher sind mit 75ccm tendenziell zu gross, waren aber die kleinsten kurzzeitig verfügbaren Speicher. Der kurzzeitige Mangel an Ventilhub kann mit einem entsprechend gewählten Einlass schliesst Zeitpunkt kompensiert



werden (transiente Kompensation). Subplot d) zeigt deutlich, wie der Zeitpunkt Einlass schließt zunächst später ist als stationär erforderlich und dann – während der Hydraulikdruck (Einlassventilhub) ansteigt – entsprechend wieder reduziert wird. Zum besseren Verständnis: Subplots b) und d) zeigen jeweils über der Zeit wie Einlass schließt und Hydraulikdruck sich verändern, in Subplot a) ist lediglich die Änderung von Hydraulikdruck über dem Einlass schließt Zeitpunkt aufgetragen und nicht über der Zeit. Die grauen Marker zeigen jeweils wann eine Verbrennung stattfindet. In diesem Subplot ist deutlich zu sehen, dass für die ungefilterte Laständerung ausschließlich Verbrennungen mit 4.5bar p_{mi} oder mit 8.5bar p_{mi} stattfinden, keine dazwischen.

Subplot c) zeigt die Dauer von der Sollwertänderung bis zur erreichten Erhöhung des indizierten Mitteldrucks. Es ist deutlich zu sehen, wie das p_{mi} jedes einzelnen Zylinders von einer Verbrennung auf die nächste von 4.5bar auf 8.5bar springt. Welcher Zylinder als erster die Last erhöht, ergibt sich zufällig aus dem Zeitpunkt der Sollwertänderung. Die Totzeit zwischen der Änderung des Sollwerts und dem Anstieg im p_{mi} resultiert aus der diskreten Arbeitsweise des Motors. Eine Umdrehung ist nötig vom Ansaugtakt mit späterem Einlass schließt und Einblasung der erhöhten Kraftstoffmasse bis zum Arbeitstakt. Eine halbe Umdrehung früher muss das neue Signal verarbeitet werden. Die Totzeit der Laständerung beträgt also insgesamt 1.5 Umdrehungen (45ms bei 2000U/min).

Ein Lastabwurf funktioniert analog dazu. Dieses Vorgehen ist prinzipiell auf gleiche Weise auch für den Atkinson Betrieb möglich.

Mit dem FlexWork Ventiltrieb sind also extrem schnelle Lastwechsel möglich. Falls solch schnelle Änderungen nicht erwünscht sind, kann die Laständerung beliebig verlangsamt werden, was in Subplot e) beispielhaft dargestellt ist. Eine Sollwertänderung wird hier tiefpassgefiltert, die Istwerte folgen dem Sollwert problemlos. In Subplot a) ist dies auch dargestellt, die schwarzen Punkte zeigen jede einzelne Verbrennung während der Laständerung. Es ist deutlich zu sehen, dass hier die Last nicht sprunghaft ändert, sondern einige Verbrennungen geschehen, bis die geforderte Last erreicht ist. Andere Arten der Filterung wie beispielsweise Drehmomentrampen sind ebenfalls möglich, es muss lediglich der Sollwertverlauf softwareseitig angepasst werden, alles Weitere wird automatisch umgesetzt.

Alle erforderlichen Messungen für die Bedatung der Vorsteuerung beschränken sich auf stationär gemessene Kennfelder. Hier gezeigte Messergebnisse wurden ohne weiteren Applikationsaufwand erreicht. Bei den Lastsprüngen blieben trotz einer einfachen Regelstrategie kurzzeitige Abweichungen im λ kleiner als 10%, bei den gefilterten Sollwertänderungen kleiner als 5%.

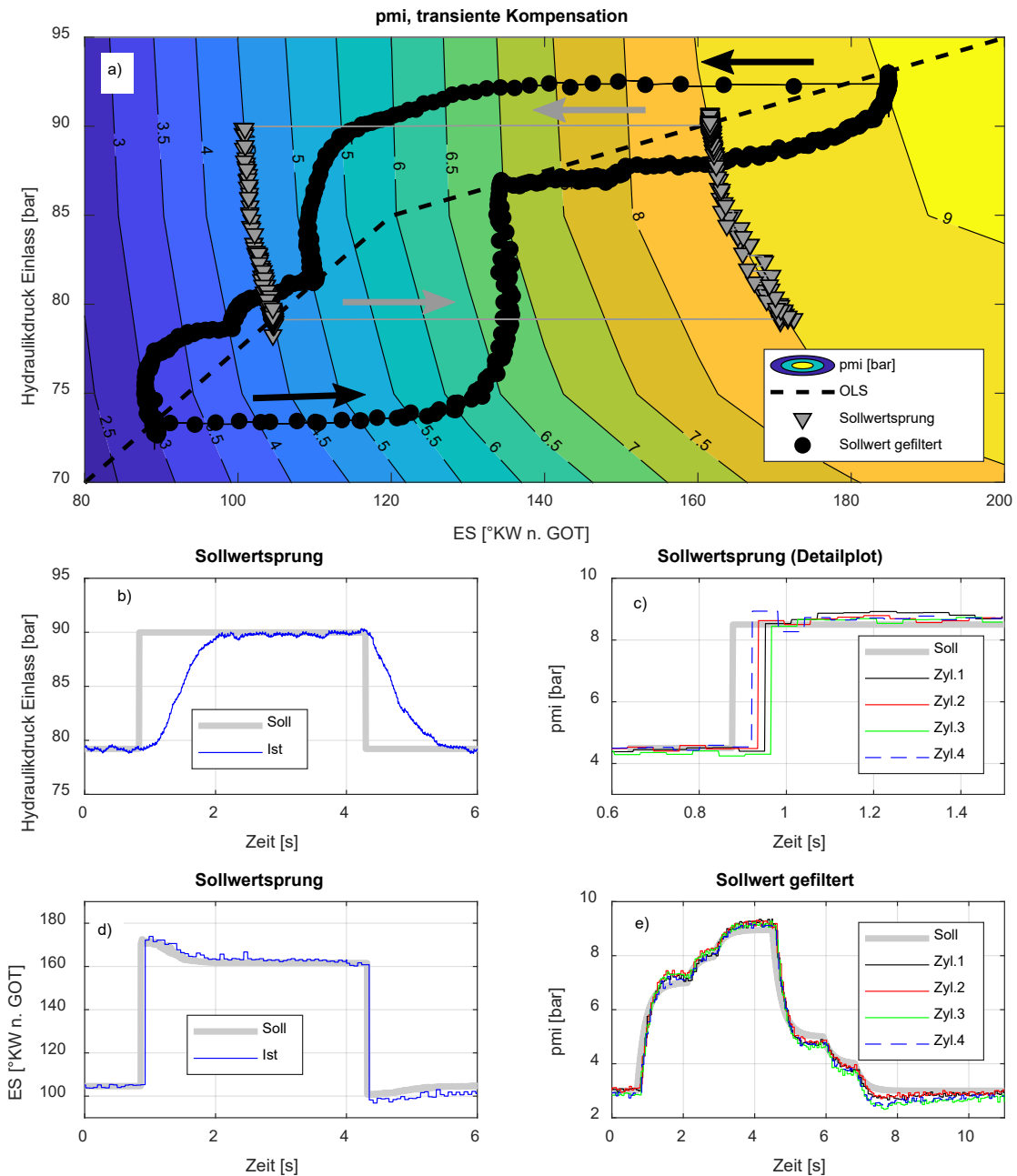


Abbildung 11: Transienter Motorbetrieb mit dem FlexWork Ventiltrieb

4.4 Zylinder Ab- und Zuschaltung [12]

Eine Methode um den Treibstoffverbrauch in Otto-Motoren zu senken ist die Zylinderabschaltung. Werden weniger Zylinder für die gleiche Lastbereitstellung verwendet, so werden parasitäre Verluste reduziert was die Effizienz erhöht. Treibstoffeinsparung bis zu 25% [13] [14] im stationären Betrieb und bis zu 15% in Fahrzyklen wurden gemessen.



Für die Zylinderabschaltung zeigen wir an dieser Stelle eine "harte" Umstellung. Da der FlexWork Ventiltrieb von Zyklus zu Zyklus die Steuerzeiten ändern kann, ist es möglich die Zylinder schnellstmöglich von Betrieb auf Nicht-Betrieb umzustellen.

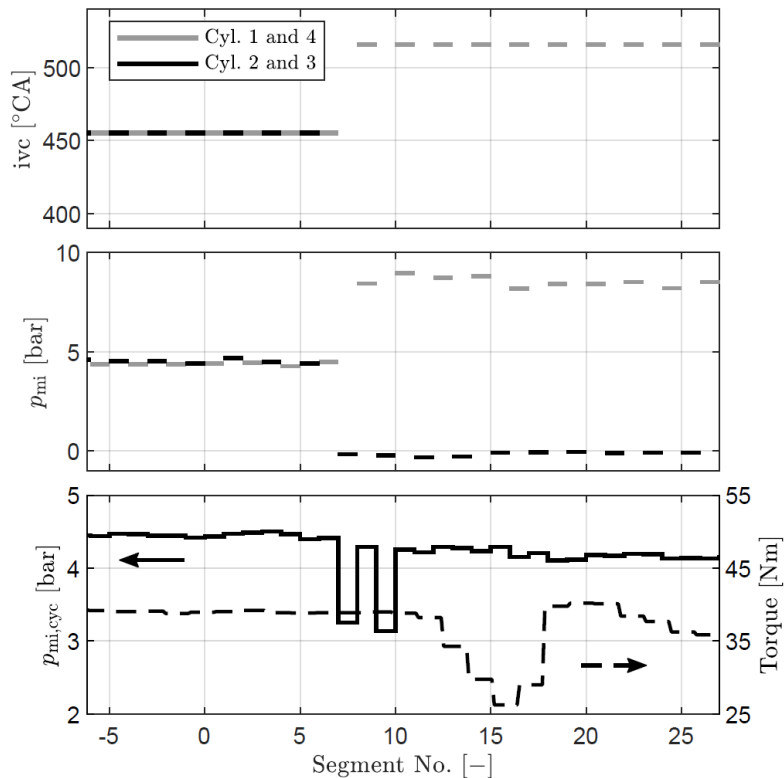


Abbildung 12: Messdaten einer "harten" Zylinderdeaktivierung.

In Abbildung 12 sind die Resultate einer "harten" Zylinderdeaktivierung abgebildet. Der obere Subplot zeigt den Zeitpunkt Einlass schliesst für beide Zylindergruppen, welcher entscheidend ist für die gewünschte Motorlast. Der mittlere Subplot zeigt das gemessene p_{mi} , welches aus der Verbrennung resultiert mit der Steuerzeit aus dem obersten Subplot. Der unterste Plot zeigt auf der linken y-Achse das gemittelte p_{mi} , wobei der Mittelwert gebildet wird aus dem aktuellen und den drei vorhergehenden Segmenten. Auf der rechten y-Achse ist das gemessene Drehmoment abgebildet. Diese Messung wird mit einer Tastfrequenz von 50 Hz durchgeführt und ist daher nicht Segment-synchron. Abbildung 12 zeigt, dass eine "harte" Zylinderabschaltung innerhalb eines Zyklus möglich ist. Die Drehmomentmessung zeigt, dass ein Drehmomenteinbruch (35% Reduktion) an der Kurbelwelle deutlich messbar ist und mit einer "harten" Zylinderabschaltung nicht vermieden werden kann.

Zum Vergleich wird im Folgenden eine "weiche" Zylinderaktivierung vorgestellt. Es sei angemerkt, dass die Zylinderaktivierung wie auch die -deaktivierung, sowohl "weich" wie auch "hart" implementiert werden können.

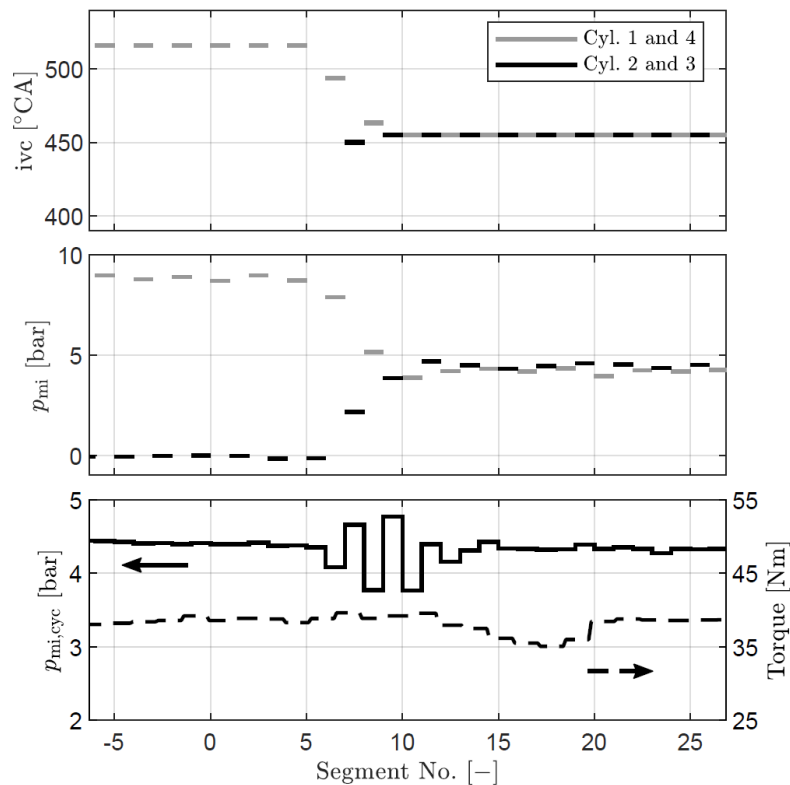


Abbildung 13: Messdaten einer "weichen" Zylinderaktivierung

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse einer "weichen" Zylinderaktivierung. Die Subplots sind analog zu Abbildung 12 aufgebaut. Anders als bei der "harten" Umstellung wird hier das p_{mi} graduell von der Zylindergruppe 1/4 gesenkt und von der Zylindergruppe 2/3 erhöht. Dieser Vorgang reduziert die Fluktuationen im gemittelten p_{mi} wie auch im Drehmoment.

4.5 Optimierung der Steuerzeiten im X-Takt Betrieb

Zum Erstellungszeitpunkt dieses Berichtes wird an einer Veröffentlichung gearbeitet, in welcher die Vorteile von 6-, 8-, oder mehr-Takt Betrieb untersucht werden [15]. Die Idee kommt von der Zylinderabschaltung, jedoch werden alle Zylinder weiterhin betrieben. Dabei hängt die Frequenz der Verbrennungen von der Taktzahl ab. Bei gleichbleibender Last an der Kurbelwelle kann durch Senkung der Verbrennungsfrequenz die Intensität einer einzelnen Verbrennung erhöht werden, was, wie bei der Zylinderabschaltung, zu einer Erhöhung der Effizienz führt. Der grösste Unterschied zur Zylinderabschaltung besteht darin, dass der X-Takt Betrieb thermisch ausgeglichener ist und somit die Beanspruchung des Motors reduziert und dass die Taktzahl beinahe beliebig an die gewünschte Last angepasst werden kann.

Gegenstand der geplanten Publikation ist die Optimierung der Auslasssteuerzeiten. Es ist nicht a priori klar, welche Zylinderfüllung optimal während den zusätzlichen "leeren" Takten ist. In Abbildung 14 ist eine Übersicht der möglichen Auslasssteuerzeiten gegeben, erstellt mit Daten aus einer Prozesssimulation. In ähnlichen Untersuchungen (sog. Skip-Fire oder Skip-Cycle [16]) wird meistens Option 1 angewendet, wobei alle Ventile geschlossen bleiben ausserhalb der regulären 4 Takte. Dies führt zwar zu einer relativ guten induzierten Effizienz, erzeugt aber ein Vakuum während der zusätzlichen Takte.



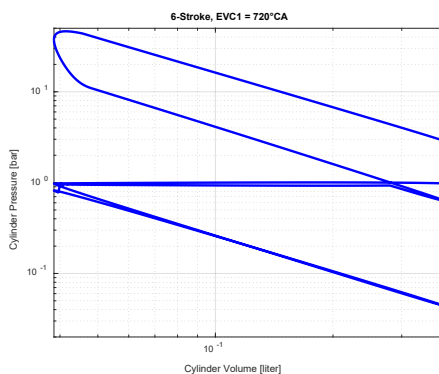
Falls ein längerer X-Takt wie z.B. der 12-Takt Betrieb angewendet wird, liegt während 2/3 der Motorbetriebszeit ein Vakuum im Brennraum vor. Dies hat zur Folge, dass Öl aus dem Kurbelwellengehäuse gezogen wird und bei der nächsten Verbrennung für erhöhte HC Emissionen sorgt.

Option 2 ist das Extrem an anderen Ende von Option 1. Hier bleiben die Gaswechselventile nach der Verbrennung geschlossen und öffnen erst für den "regulären" Gaswechsel 180°KW vor dem Gaswechsel-OT. Die hohen Wandwärmeverluste verschlechtern die induzierte Effizienz.

Bei Option 3 bleiben die Auslassventile während den zusätzlichen Takten geöffnet. In dieser Voruntersuchung führt dies zu der besten induzierten Effizienz, was darauf zurückführt, dass die Gaswechselventile vollständig geöffnet sind und daher kaum Drosselverluste entstehen. In Realität ist es aus Kollisionsgründen nicht möglich, die Gaswechselventile vollständig zu öffnen und daher werden beträchtlich grössere Drosselverluste induziert.

Option 4 ist ein Kompromiss zwischen Option 1 und Option 2. Hierbei wird der Ausschlebevorgang nach der Verbrennung unterbrochen und ein gewisser Anteil Restgas im Zylinder zurückgehalten. Sobald die Ventile geschlossen sind, befindet sich der Zylinder in der sogenannten Gasfeder. Je länger die Taktart, desto länger befindet sich der Zylinder in dieser Gasfeder. Der Vorteil gegenüber Option 1 ist, dass der Zylinder durch die zurückgehaltene Masse vorgespannt ist und dadurch deutlich weniger Blow-By über die Kolbenringe anfällt. Zudem ist die induzierte Effizienz ähnlich hoch wie bei der theoretisch besten Option 3.

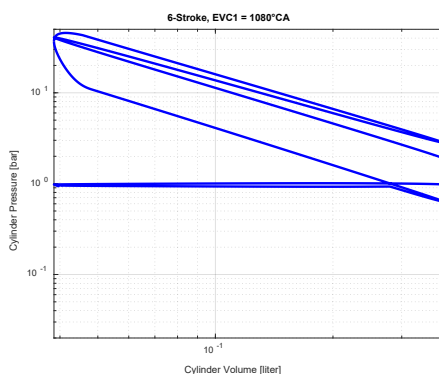
Inhalt der geplanten Veröffentlichung ist die Analyse der Option 4, sowohl experimentell als auch simulativ.



Option 1:

Auslassventile nach der Verbrennung für 180°KW öffnen.

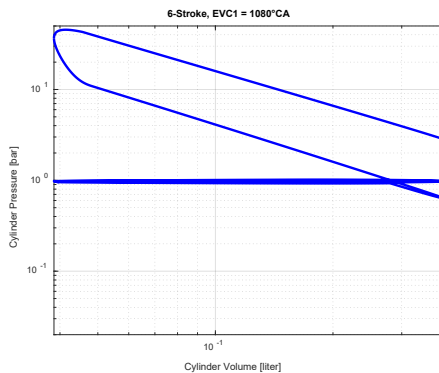
$$\eta_{ind} = 34.64\%$$



Option 2:

Auslassventile vor dem Gaswechsel für 180°KW öffnen.

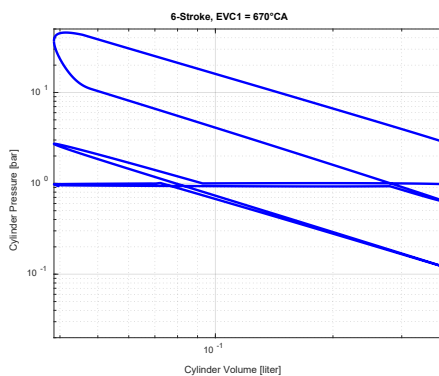
$$\eta_{ind} = 26.74\%$$



Option 3:

Auslassventile während 540KW öffnen.

$$\eta_{ind} = 35.10\%$$



Option 4:

In optimale Gasfeder rein und wieder rausfahren.

$$\eta_{ind} = 35.06\%$$

Abbildung 14: Übersicht der möglichen Auslasssteuerzeiten im 6-Takt Betrieb.

4.6 Vorteile in der Hybridisierung [9]

Die stetig weiter reduzierten CO₂-Grenzwerte führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer deutlich zunehmenden Verbreitung hybrider Antriebsstränge. Bei der Hybridisierung werden neben der Rekuperation verbrennungsmotorische Betriebspunkte mit schlechtem Wirkungsgrad durch eine Lastpunktverschiebung gemieden oder phasenweise gänzlich durch den elektrischen Betrieb substituiert. Um zu evaluieren, ob in einem Hybridfahrzeug noch Vorteile durch Entdrosselung und Zylinderabschaltung erzielt werden können, wurde ein mit Messdaten parametrisiertes Simulationsmodell erstellt.

Dieses beinhaltet zwei Motormodelle eines Gasmotors mit Saugrohrreinblasung und 1,4 l Hubraum: eines für den gedrosselten Betrieb und eines für den FlexWork-Betrieb. Bei letzterem ist bei niedrigen Motorlasten ein Wechsel auf Zweizylinderbetrieb möglich. Das Referenzfahrzeug aus der Kompaktklasse wiegt 1370 kg und ist mit einem Stopp-Start-System ausgestattet. Die Masse des Hybridfahrzeugs (1,5 kWh, 25 kW elektrisch) ist um 100 kg höher angesetzt, die optimale Betriebsstrategie wurde mittels Dynamic Programming [17] bestimmt. Abbildung 15 zeigt die simulierte Reduktion der CO₂-Emissionen in den Fahrzyklen NEFZ und WLTC für den gedrosselten Betrieb und den FlexWork-Betrieb ohne und mit Zylinderabschaltung.

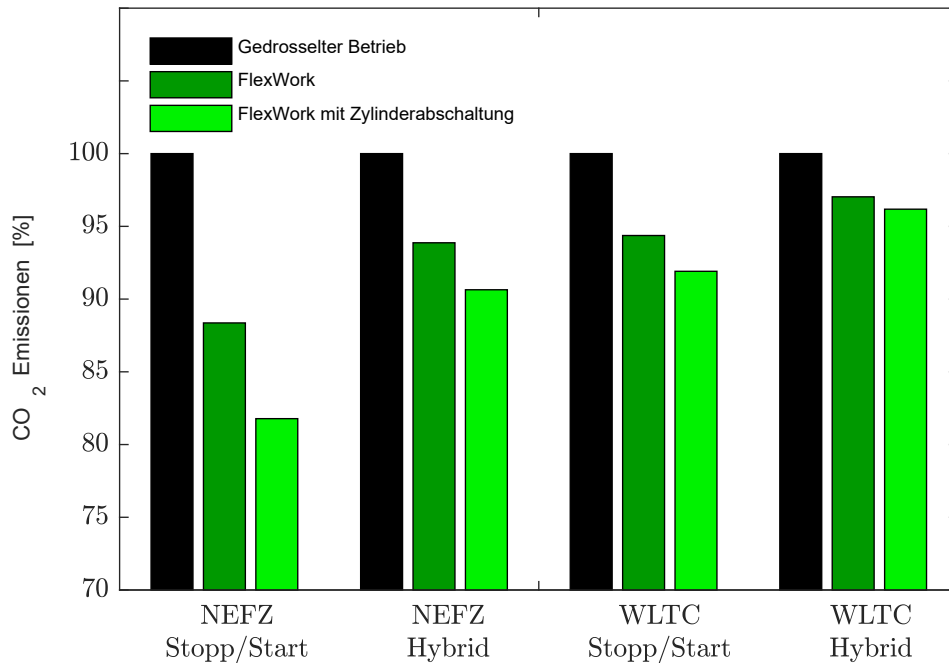


Abbildung 15: Relative CO₂ Emissionen der verschiedenen Betriebsarten und Fahrzeugkonfigurationen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass unter Verwendung des FlexWork-Ventiltriebs stets deutliche Einsparungen möglich sind. In allen Fällen ist es von Vorteil, wenn bei geringen Lasten der Zweizylinderbetrieb verwendet wird, was ohne zusätzlichen Aufwand realisierbar ist. Die CO₂-Emissionen bei Verwendung eines Hybridfahrzeugs sinken im NEFZ um 6,1 beziehungsweise 9,4 % mit Zylinderabschaltung, im WLTC betragen die Einsparungen 3,0 und 3,8 %. Die Gründe hierfür sind ein höherer mittlerer Motorwirkungsgrad und kleinere elektrische Verluste aufgrund geringerer Betriebspunktverschiebungen.

Dabei ist zu beachten: Wird in der Simulation ein höherer Spitzenwirkungsgrad verwendet, verringern sich zwar sämtliche CO₂-Emissionswerte, die Verhältnisse zueinander bleiben jedoch praktisch unverändert. Darüber hinaus zeigen Simulationen eines Mittelklassefahrzeugs mit einer Masse 1500 beziehungsweise 1600 kg und einem 2,0-l-Motor, dass sich hier für alle Szenarien noch grössere Ersparnisse erzielen lassen.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die gesamte Entwicklung von der Auslegung über die Konstruktion bis hin zur Herstellung des Ventiltriebs (Grossteils an der Empa) kann als grosser Erfolg bewertet werden, speziell in Anbetracht des doch sehr kleinen Teams an involvierten Forschern/Entwicklern. Denn selbst nach mehreren Millionen Betätigungen keine Verschleisserscheinungen zu erkennen sind und die Funktion des Ventiltriebs ist unverändert gegeben. Messungen zeigen, dass sowohl bei der Einlassseite als auch bei der Auslassseite eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulation besteht. Die Auslegung der hydraulischen Komponenten der Ventilsteuerung in der Simulation ist demnach gut möglich.

Im stationären Motorbetrieb konnte mit dem FlexWork Ventiltrieb gezeigt werden, dass es möglich ist, einen Verbrennungsmotor selbst bei sehr niedrigen Lasten (bis ca. 2bar p_{me}) mit extrem geringen Drosselverlusten zu betreiben. Die Wirkungsgradoptimierung durch anpassen des Ventilhubes und der Ventilsteuerzeiten samt Auswirkungen auf den Restgasgehalt und die Verbrennung konnten im Detail untersucht werden. Bei Lasten kleiner als 2bar p_{me} wird die Verbrennung zunehmend schlechter, hier können mit Zylinderabschaltung oder X-Takt Betrieb entgegen gewirkt werden. Durch die geringere Anzahl an Verbrennungen bei Zylinderabschaltung und X-Takt wird bei jeder einzelnen Verbrennung mehr Kraftstoff umgesetzt, was die Verbrennungen effizienter macht wodurch auch in diesem Lastbereich den Wirkungsgrad deutlich zu steigern. Es wurde also insgesamt gezeigt, dass mit dem FlexWork Ventiltrieb eine Vielzahl an Möglichkeiten besteht, den stationären Motorbetrieb zu optimieren.

Bezüglich des transienten Verhaltens wurde bei der Lastregelung gezeigt, dass es möglich ist die Motorlast von einer Verbrennung auf die nächste anzuheben oder zu verringern. Hierzu müssen die sowohl die Steuerzeiten als auch die Kraftstoffmenge schnell und koordiniert angepasst werden. Diese Art der Lastregelung ist auch erforderlich um die Zylinderabschaltung zu realisieren. Bau Ab- und Zugschaltvorgängen muss die Motorlast einer Zylindergruppe angehoben werden und gleichzeitig die Motorlast der anderen Zylindergruppe verringert werden. Es wurde gezeigt, dass mit dem FlexWork Ventiltrieb eine schnellstmögliche Lastregelung zuverlässig realisiert werden kann.

Neben diesen experimentellen Resultaten zeigen die Ergebnisse der Simulationen mit dem Hybridfahrzeug, dass selbst hier ein Vorteil besteht. Bereits eine geringe elektrische Leistung und eine kleine Batterie im Hybridfahrzeug sind dafür ausreichend.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Im Rahmen dieses Projektes wurde anfangs 2019 die Dissertation von Andyn Omanovic, er ist gemeinsamer Doktorand an der Empa und am IDSC ETH Zürich, gestartet. Seine Dissertation wird noch bis vermutlich 2022 andauern und wissenschaftliche Fragestellungen des FlexWork Ventiltriebs weiter vertiefen.

Zudem wurden im Rahmen des FlexWork Projektes diverse Kontakte mit der Fahrzeug-/ Motorenindustrie gepflegt bzw. neu aufgebaut. Mit einem Nutzfahrzeugmotorenhersteller sind wir übereingekommen, das Potenzial des FlexWork Ansatzes für künftige Nutzfahrzeugmotoren im Rahmen eines Nachfolgeprojektes auszuloten. Dies einerseits für klassische Dieselmotorenverfahren und andererseits für neuartige partiell vorgemischte Brennverfahren und alternative Treibstoffe.

Im Rahmen des Projektes sind diverse Kontakte mit Firmen aus dem nicht-verbrennungsmotorischen Kolbenmaschinenbereich geknüpft worden. Solche Kompressions- bzw. Expansionsanwendungen



können in einigen Bereichen von variabler Ventilsteuerung profitieren bzw. neue Anwendungsgebiete können damit erst erschlossen werden. Dies beispielsweise beim Aufbau von Kreisprozessen zur Abwärmenutzung oder zur neuen Verfahren zur dezentralen Speicherung von Strom. Ein konkretes Projekt auf dem Gebiet der Abwärmenutzung mit einer ausländischen Firma konnte dadurch gestartet werden.

Das Projekt wurde vom Hydraulikspezialisten Wolfgang Schneider im Rahmen eines Unterauftrages begleitet. Die Erfindungen auf dem Bereich des Ventiltriebs wurden gemeinsam geschützt. Wolfgang Schneider hat 2020 die Firma etavalve GmbH gegründet. Diese Firma hat das Ziel, den FlexWork Ventiltrieb für Industriekunden zu industrialisieren.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Andyn Omanovic führt im Rahmen des Projektes seine Dissertation an der Empa und am IDSC der ETH durch. Er hat das Projekt von Anfang an betreut, seine Dissertation begann formal am 1.1.2019 (Einschreibedatum an der ETH) und sie wird noch nach Abschluss des FlexWork Projektes fortgeführt.

Auch im Rahmen der Ausbildung/Lehre konnten einige Arbeiten durchgeführt werden, Tabelle 2 zeigt eine entsprechende Zusammenstellung.

Tabelle 2: Liste der studentischen Arbeiten (alles Studenten der ETH Zürich)

Jahr	Student	Arbeit	Titel
2017	Ormezzano Nicolo	SP	Load Control of a SI-Engine with a Fully Variable Valvetrain
2017	Balmelli Michelangelo	SP	Operating Modes of Engines with FVVT
2018	Omanovic Andyn	MT	Analysis and Optimization of an Electric Energy Storage System
2019	Balmelli Michelangelo	MT	Analysis and Optimization of an Engine equipped with an Electro Hydraulic Valve Train (FlexWork)
2020	Hochuli Nicolas	SoM	Variable valve train for PCCI Engines
2020	Tobuscht Philip	BT	Torque-Neutral Miller-Cycle Switching
2020	Tettamanti Filippo	SP	Air Intake Estimation with a Fully Variable Valve Train
2020	Studer Marc	SP	Exhaust Temperature Modelling under Different Combustion Operations

BT = Bachelor Thesis; MT = Master Thesis; SP = Semester Project; SoM = Studies on Mechatronics

Im Rahmen des Projektes unterstützte Wolfgang Schneider (Wolfgang Schneider Ingenieurbüro, Thun) die Arbeiten fachlich, er ist auch Miterfinder des Systems. Wolfgang Schneider hat sich entschieden eine Firma zu gründen, welche das System industrialisiert (<https://www.etavalve.com/>).

Seitens Industrie fanden Gespräche mit verschiedensten Zulieferfirmen statt. Einige dieser Firmen haben dann im Anschluss das Projekt mit der Lieferung von kostenlosen Bauteilen, teils sogar Prototypenbauteilen, unterstützt. Dies waren namentlich BASF (Austausch zu Eigenschaften und Lieferung



von Gylsantin), MUBEA (Anfertigung von passenden Ventildfedern), ELGO Elektronik (Hub-Messsystem), Hydac (Prototyp-Magnetspulen), Bieri Hydraulik (Ausleihen von Messtechnik). Zudem durften wir vom LAV der ETH Zürich Pumpen und Druckmesstechnik übernehmen bzw. ausleihen.

Als Seitenast wurde ein kleines Projekt mit der Westsächsischen Hochschule Zwickau gemacht. Diese forscht an keramischen Ventilen, welche gegenüber dem aktuellen Stand der Technik (Stahl) leichter und temperaturfester sind. Leichtere Ventile helfen, den Eigenenergiebedarf des Ventiltriebs zu reduzieren. Die Westsächsische Hochschule Zwickau hat in Zusammenarbeit mit der Firma Huss Maschinenbau solche Ventile gefertigt und auf einem gleichen Zylinderkopf aufgebaut, wie wir ihn im Rahmen des FlexWork Projektes verwenden. Wir haben diese Ventile an der Empa erfolgreich betrieben und konnten den erwarteten reduzierten Energieaufwand bestätigen. Da diverse Fragen mit solchen Ventilen noch offen sind (Tribologie, Haltbarkeit, etc.) führen wir im FlexWork Projekt mit Serienventilen weiter.

8 Kommunikation

Im Rahmen des Projektes wurden diverse Veröffentlichungen erarbeiten und Vorträge gehalten. Seitens Empa wurden die Projektergebnisse aktiv mittels einer Medienmitteilung am 19. August 2019 gestreut¹. Die nationale und internationale Presse hat verschiedentlich in Print- und Onlinemedien über das Projekt berichtet, wir haben über 80 Artikel und Meldungen erfasst (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zusammenstellung der Medienmeldungen über das FlexWork Projekt (in chronologisch absteigender Reihenfolge)

Datum	Medium	Headline
07.06.2020	Strassenverkehr Schweiz 2020	Neuartiger Ventieltrieb spart 20 Prozent Treibstoff
29.12.2019	INCHbyinch.de	Digital Valve Train
16.12.2019	Auto & Wirtschaft	NOCKENWELLENLOS IN DIE ZUKUNFT
03.12.2019	Energie Rundschau	EIN MOTOR GEMACHT FÜR ERNEUERBARE TREIBSTOFFE
01.12.2019	NZZ am Sonntag	Im Sparprogramm
20.11.2019	MTZ	Functionality and Potential of a New Electrohydraulic Valve Train
20.11.2019	MTZ	Funktionsweise und Potenziale eines neuartigen elektrohydraulischen Ventiltriebs
07.11.2019	Auto-Testing.net	[Funktionsprinzip und Potenzial des neuen elektrohydraulischen Ventilmechanismus]
07.11.2019	eeworld.com.cn	[Funktionsprinzip und Potenzial eines neuen elektrohydraulischen vollvariablen Ventilmechanismus]

¹ <https://www.empa.ch/web/s604/flexwork> bzw. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76096.html>



28.10.2019	konstrukcjeinzynierskie.pl	[Flexible Ventilsteuerungen]
12.10.2019	factum-magazin.ch / Factum Magazin Online	Geht auch mit weniger
10.10.2019	Swiss Engineering RTS	Soupapes innovantes: quand le mélange s'enflamme et brûle quasi sans polluant
03.10.2019	Automobil Revue	Von geometrischen Zwängen befreit
03.10.2019	Revue Automobile	Libéré des contraintes géométriques
02.10.2019	revueautomobile.ch / Revue Automobile Online	Libéré des contraintes géométriques
20.09.2019	Der Organisator	Welcher Antrieb darf's denn sein?
16.09.2019	ChemieXtra	Verbrennungsmotoren
10.09.2019	Umweltdialog	Neuartiger Ventiltrieb spart 20 Prozent Treibstoff
10.09.2019	hannovermesse.de	Innovativer Ventiltrieb spart 20 % Treibstoff
07.09.2019	China Application Of Electronic Technique	[Elektrische Hydraulikventilanordnung spart bis zu 20% Kraftstoff]
02.09.2019	Aqua & Gas	NEUARTIGER VENTILTRIEB SPART 20% TREIBSTOFF
02.09.2019	Die Baustellen	Neuartiger Ventiltrieb spart 20 Prozent Treibstoff
31.08.2019	ee-news.ch / EE-News	Empa: Une commande de soupapes innovante permet d'économiser 20% de carburant
31.08.2019	ee-news.ch / EE-News	Empa: Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
28.08.2019	Internationales Verkehrswesen	Empa team invented innovative valve train saving 20% fuel
28.08.2019	Donbass	[20 Prozent weniger Treibstoff]
27.08.2019	Innovation Origins	Elektrohydraulische klepaandrijving voor verbrandingsmotoren bespaart 20% brandstof
27.08.2019	Innovation Origins	Electrohydraulic valve train for combustion engines saves 20% on fuel
27.08.2019	Innovation Origins	Elektrohydraulischer Ventiltrieb für Verbrennungsmotoren spart 20% Treibstoff
26.08.2019	Auto-Testing.net	[Elektrohydraulischer Ventiltrieb für Verbrennungsmotoren spart 20% Treibstoff]
26.08.2019	Engineering.com	New Valve Train Model Promises Increased Fuel Economy
26.08.2019	industriemagazin.at	Neue Schweizer Ventilsteuerung macht Verbrennungsmotoren sparsamer
25.08.2019	4PDA.ru	[Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff]
25.08.2019	grifonsoft.ru	[Motor ohne Nockenwelle entwickelt]



24.08.2019	businesslink.ch / Businesslink	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
23.08.2019	energie-cluster.ch / energie-cluster	Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
23.08.2019	WhatNext.pl	[Ventiltrieb spart 20% Treibstoff]
23.08.2019	energinyheter.se	Innovativt ventilstyrningsystem sparar 20 procent bränsle
23.08.2019	sicurauto.it	Valvole elettro-idrauliche: come cambiano i motori senza l'albero a camme
22.08.2019	Medianet.at	Neue Ventilsteuerung hilft Treibstoff sparen
22.08.2019	20 Minuten Zürich	Dieser Ventiltrieb spart 20 Prozent Treibstoff
21.08.2019	happytimes.ch / Happy Times Online	Automotor ohne Nockenwelle: Schweizer Forschende entwickeln elektrische Ventile - 20% weniger Verbrauch!
21.08.2019	ch-news.ch / CH-NEWS	Automotor ohne Nockenwelle: Schweizer Forschende entwickeln elektrische Ventile - 20% weniger Verbrauch!
21.08.2019	Fluid Power World	Electrohydraulic valves trim fuel consumption in cars by 20%
21.08.2019	Tiroler Tageszeitung	20 Prozent weniger Verbrauch: Neue Steuerung macht Motoren sparsamer
21.08.2019	SmarterWorld.de	Neuer Ventiltrieb spart 20 Prozent Treibstoff
21.08.2019	Ingenieur Karriere	Neue Ventilsteuerung könnte rund 20 % an Kraftstoff sparen
21.08.2019	waisch.ch	Motorentchnik: neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
20.08.2019	youtility.ch / Youtility	Empa entwickelt kraftstoffsparenden Ventiltrieb
20.08.2019	punkt4.info / punkt4.info	Empa entwickelt kraftstoffsparenden Ventiltrieb
20.08.2019	businessindustry.ch / businessindustry.ch	Empa-Technik spart 20 Prozent Sprit
20.08.2019	Green Car Congress	Empa team develops electrohydraulically actuated cam-less valve train; up to 20% fuel savings at low load
20.08.2019	Infohightech	Une commande de soupapes innovante permet d'économiser 20 % de carburant
20.08.2019	New Atlas	Empa's low-cost FlexWork digital valve train uses up to 20% less fuel in testing
20.08.2019	Markt & Technik	20 Prozent Treibstoff sparen
20.08.2019	fricktal24.ch / fricktal24	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
20.08.2019	Aargauer Zeitung / Gesamt Regio	Ein Fünftel weniger Treibstoff
20.08.2019	Aargauer Zeitung / Gesamt Regio	Ein Fünftel weniger Treibstoff
20.08.2019	autocad-magazin.de	Ventiltrieb: Elektrohydraulik hilft Sprit sparen



20.08.2019	bz Zeitung für die Region Basel	Ein Fünftel weniger Treibstoff
20.08.2019	fahrzeug	Empa: Elektrohydraulik statt Nockenwelle spart 20 Prozent Sprit
20.08.2019	Luzerner Zeitung	Ein Fünftel weniger Treibstoff
20.08.2019	scinexx.de	Neuartiger Ventiltrieb spart zwanzig Prozent Treibstoff
20.08.2019	Solothurner Zeitung	Ein Fünftel weniger Treibstoff
20.08.2019	St. Galler Tagblatt / St. Gallen-Gossau-Rorschach	Ein Fünftel weniger Treibstoff
19.08.2019	Innovations-Report.de	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	Science.apa.at	Neue Ventilsteuerung macht Verbrennungsmotoren sparsamer
19.08.2019	Automobil Produktion	Empa: Elektrohydraulik statt Nockenwelle spart 20% Sprit
19.08.2019	autoenergiecheck.ch/fr / Check Auto Energie	Une commande de soupapes innovante permet d'économiser 20 % de carburant
19.08.2019	autoenergiecheck.ch/de / Auto Energie Check	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	agvs-ups.ch/fr/ / Union professionnelle suisse de l'automobile	Une commande de soupapes innovante permet d'économiser 20 % de carburant
19.08.2019	agvs-ups.ch / Auto Gewerbe Verband Schweiz	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	Innovations Report	Innovative valve train saves 20% fuel
19.08.2019	Juraforum	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	myscience.ch / myScience Schweizer Forschung/Innovation	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	Pressebox	Neuartiger Ventiltrieb spart 20% Treibstoff
19.08.2019	automobil-produktion.de	Empa: Elektrohydraulik statt Nockenwelle spart 20% Sprit
19.08.2019	energategate-messenger.ch	Empa: Neuartiger Ventiltrieb spart Treibstoff
19.08.2019	Keystone SDA / Schweizerische Depe-schenagentur	Neue Ventilsteuerung macht Verbrennungsmotoren sparsamer
19.08.2019	techxplore.com	Innovative valve train saves 20% more fuel
16.05.2019	Swiss Engineering STZ	Ein Motor gemacht für erneuerbare Treibstoffe



9 Publikationen

Im Rahmen des FlexWork Projektes entstanden folgende wissenschaftliche Veröffentlichungen:

- N. Zsiga, A. Omanovic, P. Soltic, W. Schneider, FlexWork – Lastregelung bei einem Motor mit elektrohydraulischem, vollvariablem Ventiltrieb, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- N. Zsiga, A. Omanovic, P. Soltic, W. Schneider, Functionality and Potential of a New Electrohydraulic Valve Train, MTZ Worldwide (80) (2019) 18–27.
- N. Zsiga, A. Omanovic, P. Soltic, W. Schneider, Wirkungsgradvorteile beim Ottomotor unter Verwendung einernockenwellenlosen, vollvariablen Ventilsteuerung gegenüber gedrosseltem Betrieb, VDI, 2019 (inklusive Stand an der Ausstellung, s. Abbildung 3)
- M. Balmelli, N. Zsiga, L. Merotto, P. Soltic, Effect of the Intake Valve Lift and Closing Angle on Part Load Efficiency of a Spark Ignition Engine, Energies 1682 (13) (2020)
- N. Zsiga, J. Ritzmann, C. Onder, Practical Aspects of Cylinder Deactivation and Reactivation, Submitted to Control Engineering Practice
- Omanovic, N. Zsiga, P. Soltic, C. Onder, Increased Engine Efficiency with Optimized Valve Timings in Extended Stroke Operation, Submitted to Applied Energy
- W. Schneider, Fully Variable, Simple and Efficient Electrohydraulic Valve Train for Reciprocating Engines, Proceedings of the 12th International Fluid Power Conference, Dresden, 2020
- A. Omanovic, N. Zsiga, P. Soltic, and C. Onder, Increased Engine Efficiency with Optimized Valve Timings in Extended Stroke Operation, Energies, special Issue "Recent Advances in Internal Combustion Engines" (in submission process)



Abbildung 16: Ausstellungsstand an der VDI-Fachtagung "Ventiltrieb und Zylinderkopf" am 25.-26. Juni 2019 in Wiesbaden



10 Literaturverzeichnis

- Dogru, B., Lot, R., & Dinesh, K. R. (2018). *Valve timing optimisation of a spark ignition engine with skip cycle strategy*. Energy Conversion and Management.
- Kutlar, O. A., Arslan, H., & Calik, A. T. (2005). *Methods to improve efficiency of four stroke, spark ignition engines at part load*. Energy Conversion and Management.
- Leone, T. G., & Pozar, M. (2001). *Fuel economy benefit of cylinder deactivation - sensitivity to vehicle application and operating constraints*. SAE Transactions.
- Schechter, M. M., & Levin, M. B. (1996). *Camless Engine*. International: SAE.
- Schneider, W., Soltic, P., & Omanovic, A. (2017). *Patentnr. EP17172231*.
- Schneider, W., Soltic, P., & Omanovic, A. (2018). *Patentnr. EP18207848*.
- Sundström, O., Ambühl, D., & Guzzella, L. (2009). *On Implementation of Dynamic Programming for Optimal Control Problems with Final State Constraints*. Oil & Gas Science and Technology.
- Zsiga, N., Omanovic, A., Soltic, P., & Schneider, W. (2019). *FlexWork – Lastregelung bei einem Motor mit elektrohydraulischem, vollvariablem Ventiltrieb*. Wiesbaden: Springer.
- Zsiga, N., Omanovic, A., Soltic, P., & Schneider, W. (2019). *Funktionsweise und Potenziale eines neuartigen elektro-hydraulischen Ventiltriebs*. MTZ.
- Zsiga, N., Omanovic, A., Soltic, P., & Schneider, W. (2019). *Wirkungsgradvorteile beim Ottomotor unter Verwendung einer nockenwellenlosen, vollvariablen Ventilsteuerung gegenüber gedrosseltem Betrieb*. Würzburg: VDI-Fachtagung.
- Zsiga, N., Ritzmann, J., Soltic, P., & Onder, C. (2020). *The Gas Spring Operation and Experimental Results for the Cylinder Deactivation and Reactivation Process*. Control Engineering Practice.