

ATZ live

SYSTEMOPTIMIERUNG

Gasaustausch und
Gemischbildung

ANSAUG- UND ABGASSYSTEME

Auslegung und Variabilitäten

AUFLADUNG

Effizienz und Dynamik

/// KEYNOTE-VORTRÄGE

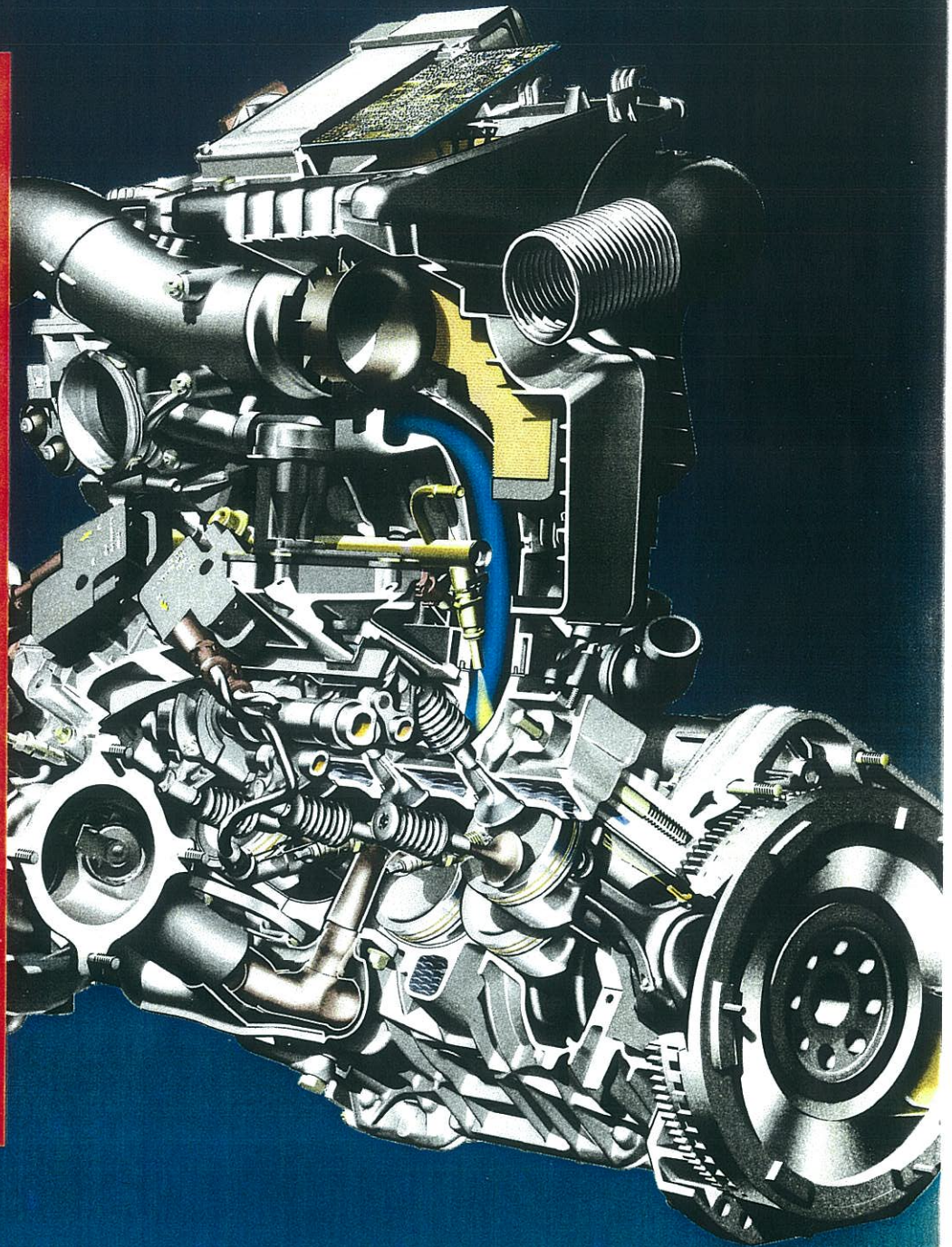
Dr. Joachim Schommers

Daimler AG

Dr. Martin Scheidt

Schaeffler

Technologies AG & Co. KG



Ladungswechsel im Verbrennungsmotor

Aufladung – Ventiltrieb – Gemischbildung

6. MTZ-Fachtagung

22. und 23. Oktober 2013 | Stuttgart

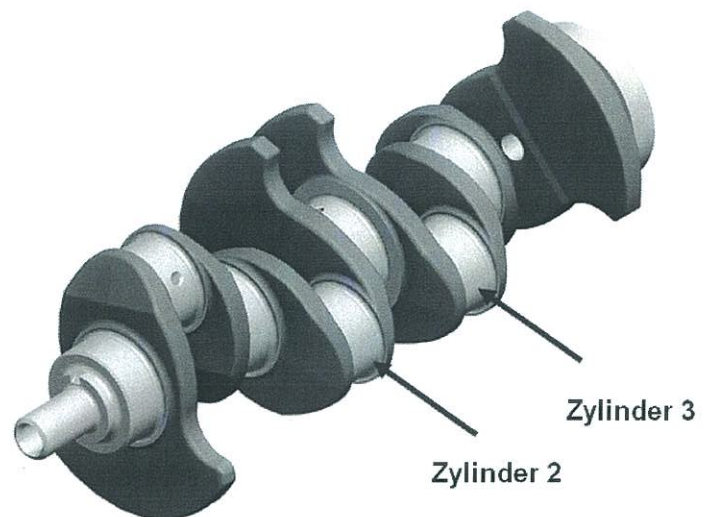
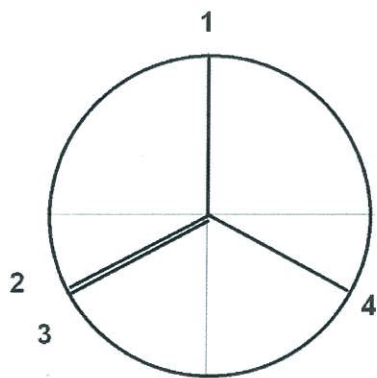
Book of Abstracts

MAHLE

Three-Up: Innovatives Ladungswechselkonzept eines Vierzylinder-Turbomotors mit Zylinderabschaltung eines Zylinders

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl, Dipl.-Ing. Anton Schurr, Dipl.-Ing. Christoph Werth
Technische Universität Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Hannibal
enTec CONSULTING GmbH, Hirschau



1 Einführung

Der Verbrennungsmotor wird wohl das Hauptantriebsaggregat von Fahrzeugen bleiben, auch wenn die Diskussion von rein elektrischen oder hybriden Antrieben an Bedeutung gewinnt. Zu weiteren Effizienzsteigerung werden Otto- und Dieselmotoren hochaufgeladen und im Hubraum reduziert. Dieses Downsizing hat zu einem vermehrten Einsatz von Dreizylindermotoren im Pkw-Antrieb geführt. Insbesondere der exzellente Ladungswechsel des Dreizylindermotors ist gegenüber einem konventionellen Vierzylindermotor von Vorteil, da durch die längeren Zündabstände Pulsationen im Abgasstrom benachbarte Zylinder nicht so stark wie bei einem Vierzylindermotor beeinflussen und somit der Restgasgehalt der Zylinder über die Wahl geeigneter Steuerzeiten gut eingestellt werden kann.

Eine weitere Effizienzsteigerung an Verbrennungsmotoren ist durch die Veränderung der Steuerzeiten mit der Variation von Ventilhub und Ventilöffnungsdauer mittels teil- oder vollvariable Ventiltriebe möglich. Zur Erreichung dieser Zielsetzung haben sich auch vollvariable Ventiltriebe mit Turboaufladung und Direkteinspritzung etabliert. Eine weitere Option zur Umsetzung variabler Steuerzeiten ist die Zylinderabschaltung durch Stilllegung der Gaswechselventile der betreffenden Zylinder. An modernen Vier- und Achtzylindermotoren ist so z.B. die Zylinderdeaktivierung mittels der Ventilabschaltung in Großserie umgesetzt, [1], [2]. Dabei wird jeweils die Hälfte der Zylinder abgeschaltet, um den gewünschten Kraftstoffverbrauchsvorteil zu erzielen. Auf der Strecke bleiben jedoch im abgeschalteten Modus die Fahrdynamik und das Ansprechverhalten der Fahrzeuge bei spontaner Vollastanforderung. Auch mit einem mechanisch vollvariablen Ventiltrieb ist eine Zylinderabschaltung umsetzbar und zeigt deutliches Potenzial zur CO₂ Reduktion, [3].

2 Ladungswechsel des Vierzylindermotors

Bei der Entwicklung von 4-Zylinder Turbomotoren zeigte sich, dass der Restgasgehalt an der Vollast durch die Länge der Auslasssteuerzeit beeinflusst wird, Abbildung 1. Die Auslassventile von in der Zündfolge benachbarten Zylindern stehen bei diesem Motor gleichzeitig offen, wenn die Auslasssteuerzeit größer als 180°KW ist, gemeint ist eine Ventilöffnungsdauer bei 0 mm Ventilhub mit mehr als 180°KW. Dadurch kann Abgas von dem öffnenden Auslassventil des 3. Zylinders durch das schließende Auslassventil des 1. Zylinders in den 1. Zylinder überströmen. Abbildung 1 zeigt exemplarisch für die Drehzahl von $n = 2.000$ 1/min und eine Auslasssteuerzeit von 240°KW die negativen Massenströme auf, die zum Rückströmen des Restgases in die entsprechenden Zylinder führen.

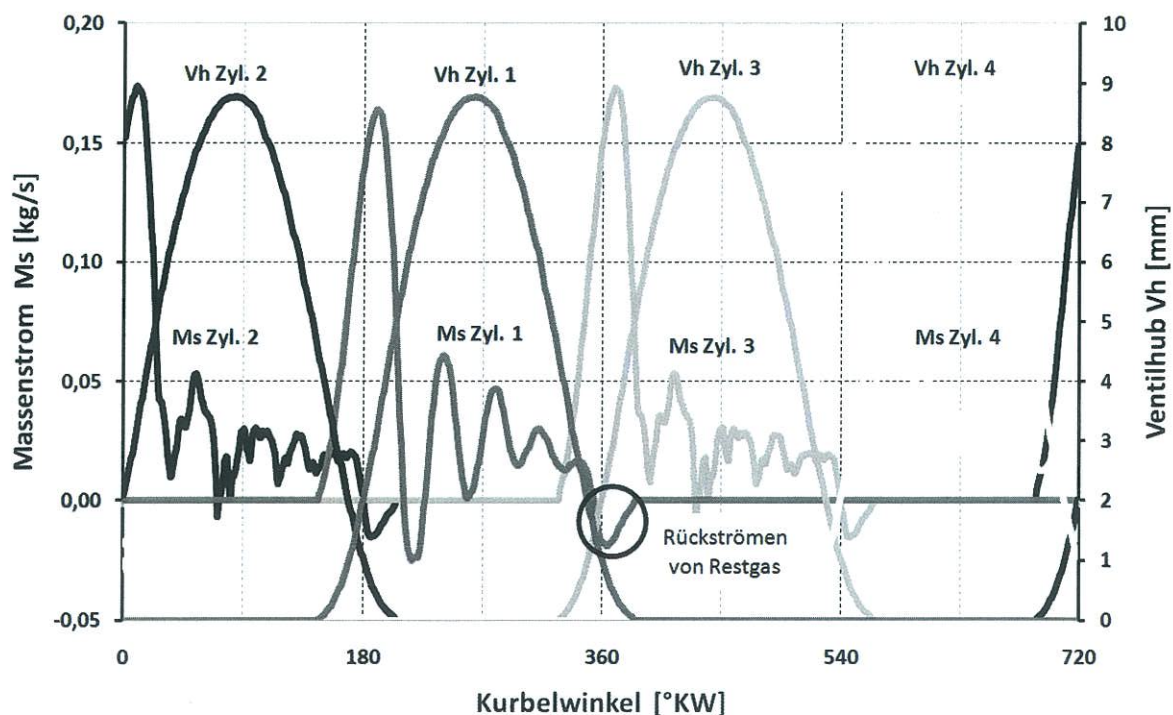


Abbildung 1: Berechnete Auslassmassenströme eines 4-Zylindermotors mit Turboaufladung

Die überströmende Abgasmenge ist von der Motorlast, von dem Abgasgedruck und von der Länge der Überschneidungsphase der Auslassventile und damit von der Länge der Auslasssteuerzeit abhängig, Abbildung 2.

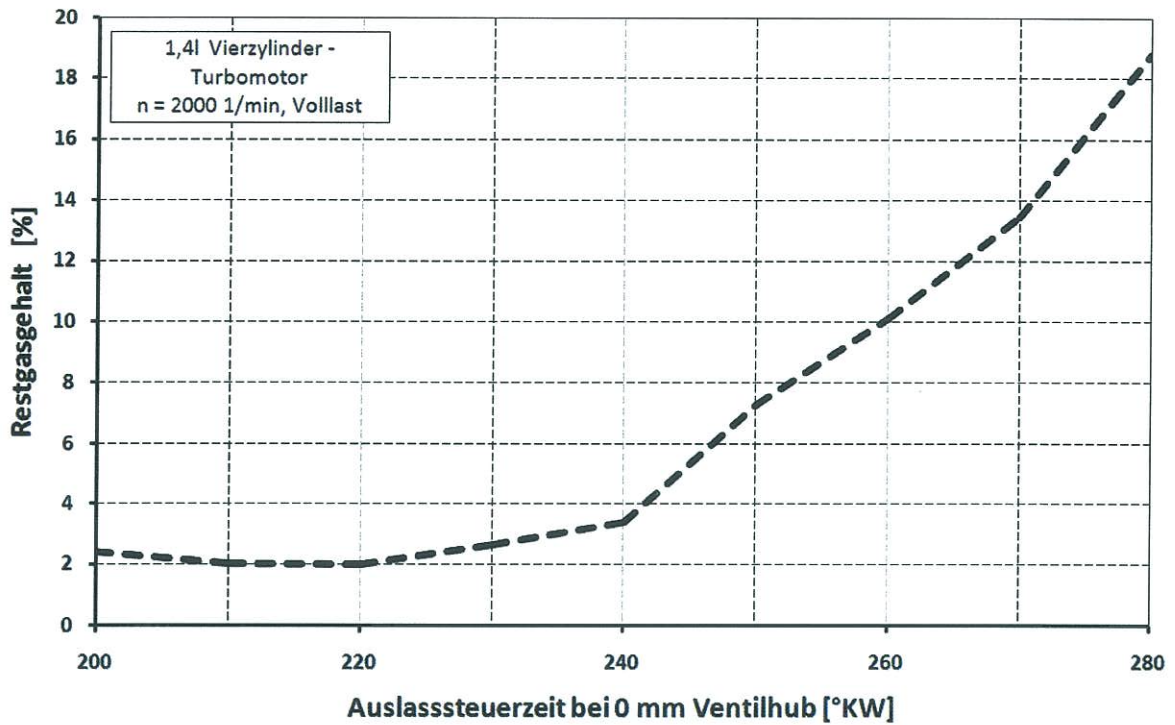


Abbildung 2: Berechnete Restgasgehalte an der Vollast eines Vierzylinder Turbo-Ottomotors in Abhängigkeit von der Auslasssteuerzeit bei einer Drehzahl von $n = 2000$ 1/min

Durch den Restgasgehalt wird durch eine Verlagerung des Spitzendrucks der Verbrennung und durch eine reduzierte Füllung das Volllastmoment vermindert.

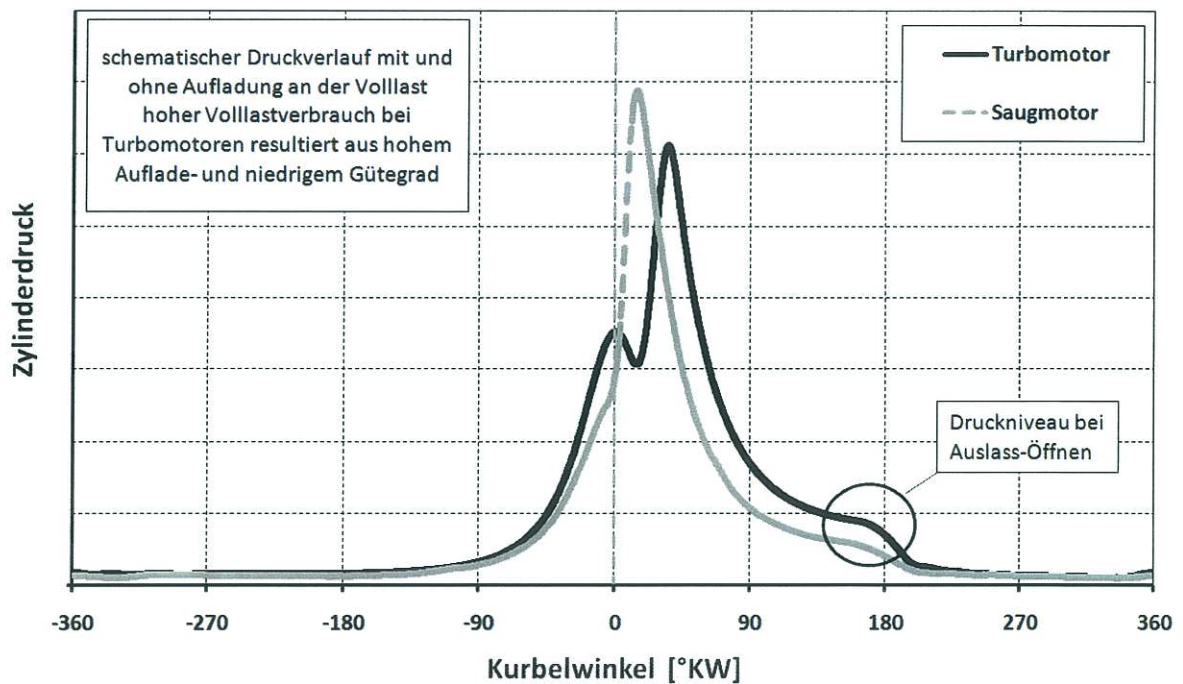


Abbildung 3: Zylinderdruckverlauf an der Vollast bei einem 4-Zylinder Turbo- und Saugmotor

Die Länge der Auslasssteuerzeit beeinflusst auch den Expansionsverlust in der Ladungswechselphase und damit den Kraftstoffverbrauch in der Teillast, in der der Restgasgehalt zur Steuerung der Rohemissionen benutzt wird, Abbildung 4. Nach [4] wird der Kraftstoffverbrauch durch eine längere Auslasssteuerzeit um bis zu 5 % bei einer Last von 3 bar reduziert.

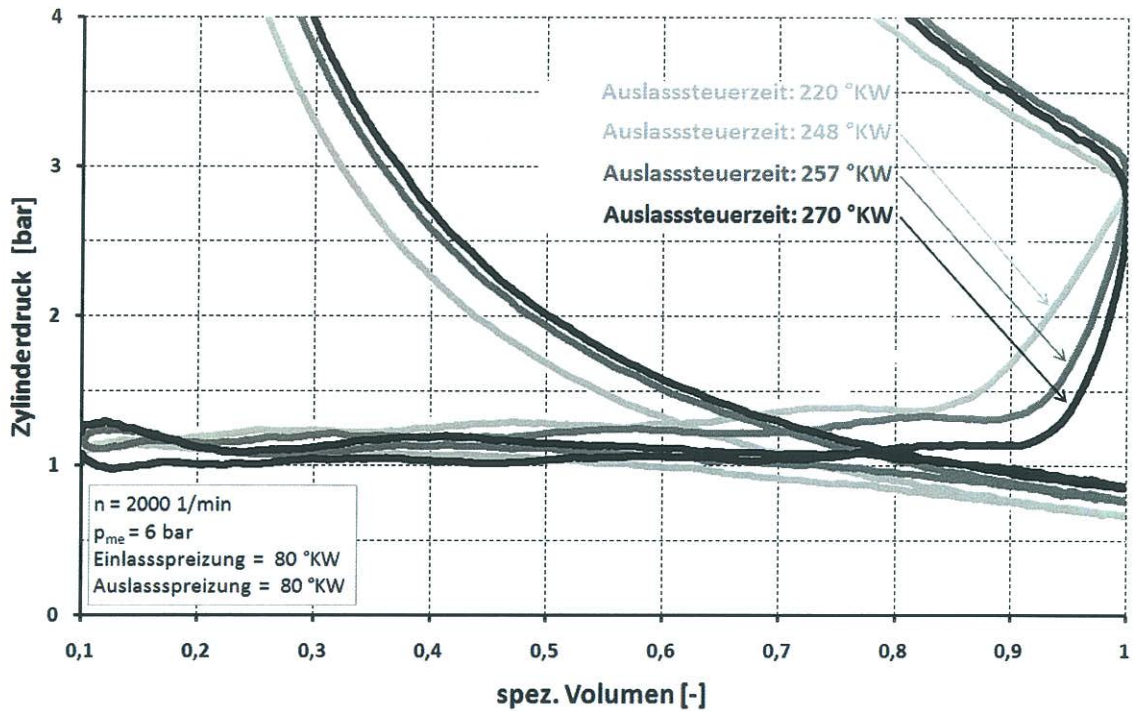


Abbildung 4: Ladungswechselschleifen für die Auslasssteuerzeiten 220, 248, 257 und 270 °KW

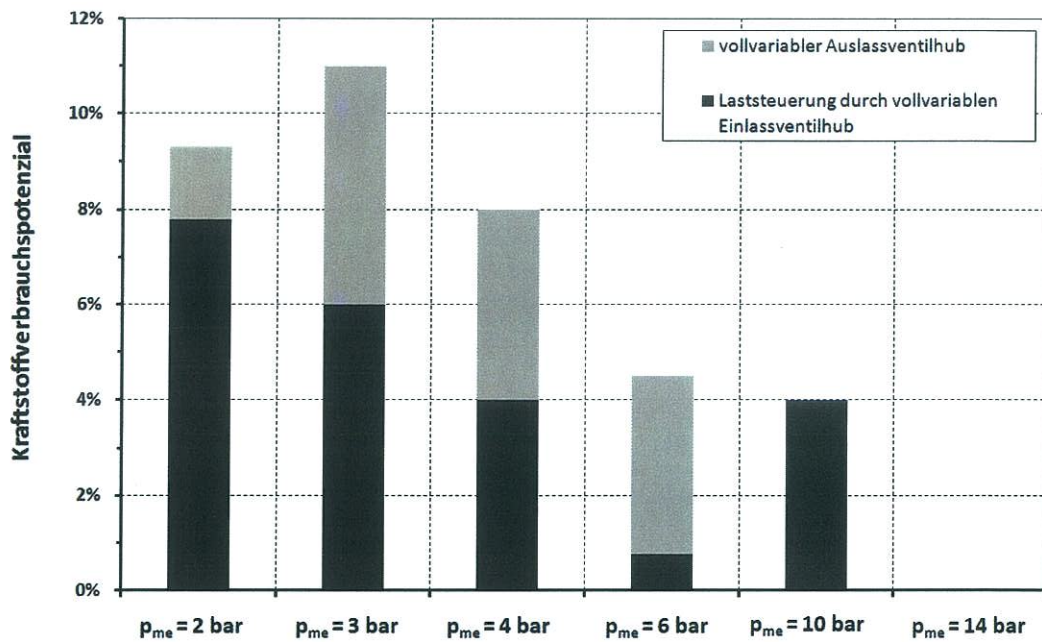


Abbildung 5: Kraftstoffverbrauchsvorteile durch voll variable Ein- und Auslassventilsteuerzeiten

3 Ladungswechsel des Dreizylindermotors

Bei einer 3-Zylinder-Zündfolge kann die Auslasssteuerzeit deutlich verlängert werden, ohne dass der Restgasgehalt an der Vollast erhöht wird. In Abbildung 6 ist der berechnete Restgasgehalt für einen Dreizylindermotor gegenüber einem Vierzylinderbetrieb aufgetragen.

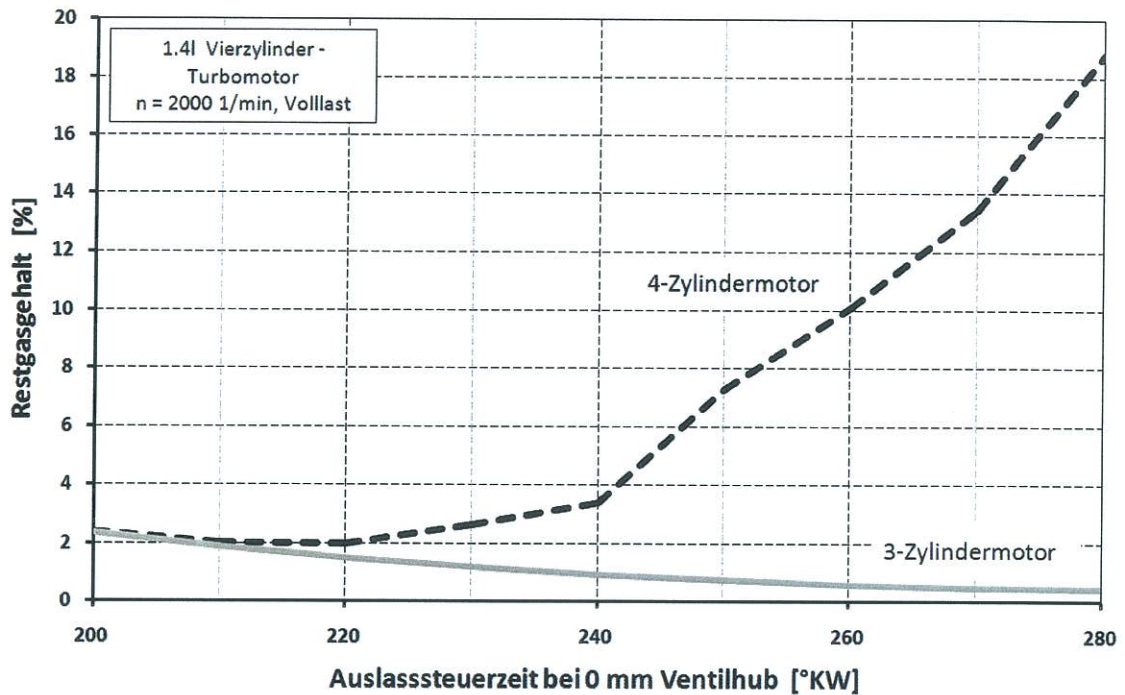


Abbildung 6: Vergleich des Restgasgehaltes an der Vollast bei einem 4- und 3-Zylindermotor

Im Vergleich zum Vierzylinderbetrieb weisen die berechneten Massenströme für den Dreizylinderbetrieb über die Auslassventile nur sehr geringe Rückströmungen von Restgas auf.

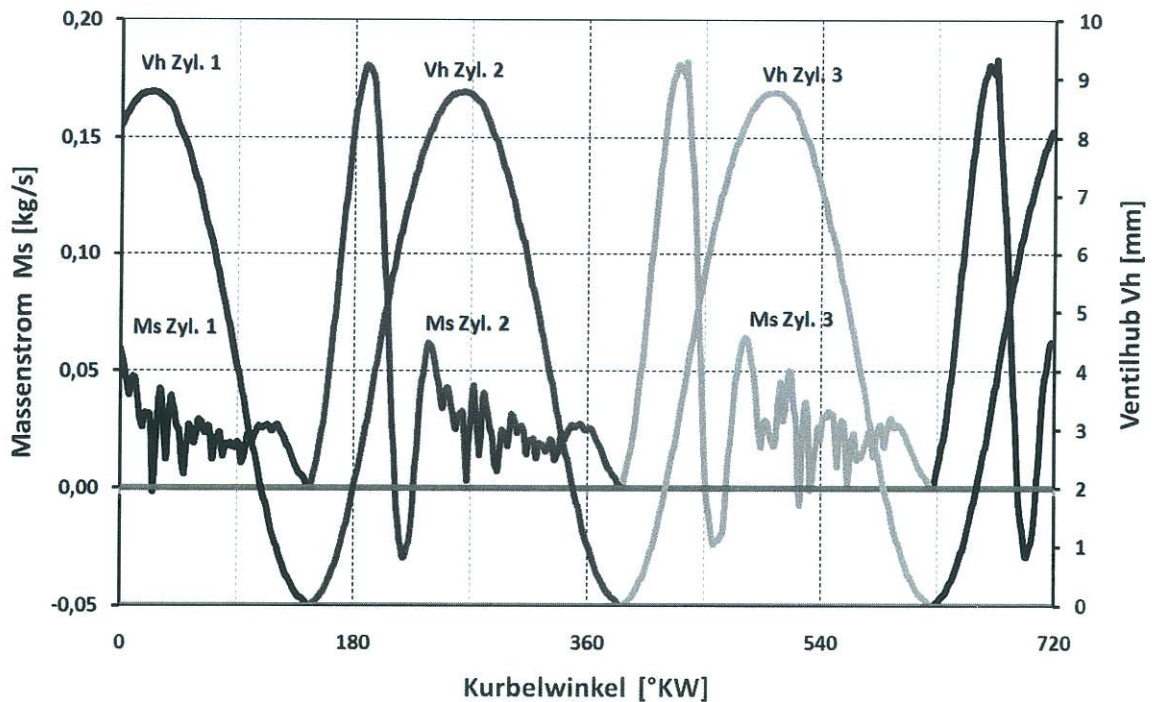


Abbildung 7: Berechnete Massenströme sowie Auslassventilhub bei einem Dreizylinderbetrieb über einen Arbeitszyklus

Aufgrund des geringeren Restgasgehaltes steigt der Liefergrad, d.h. die Füllung, was zu einem höheren spezifischen Drehmoment führt, verglichen zu hubraumkonstanten Zylindereinheiten zum Vierzylindermotor.

Allerdings reicht die Drehmomentverbesserung mit der 3-Zylinderzündfolge nicht aus um an das Drehmoment eines 4-Zylindermotors mit gleichem Einzelzylinderhubraum heranzukommen. Um diesen Drehmoment- und Leistungsachteil des 3-Zylinder Motors zu kompensieren, könnte man einen vierten Zylinder hinzufügen, den man parallel zu einem der drei Zylinder anordnet.

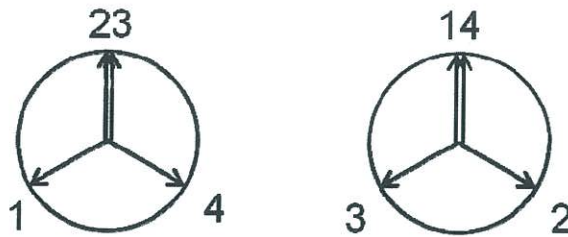


Abbildung 8: Kurbelsterne eines 4-Zylinder-Motors mit einer 3-Zylinder Zündfolge von 120 Grad

Der Kraftstoffverbrauch eines derartigen 4-Zylindermotors mit einer 3-Zylinderzündfolge kann durch eine innere Lastpunktverschiebung noch deutlich verbessert werden, wenn dieser vierte Zylinder durch Stilllegung der Ladungswechselventile „abgeschaltet“ werden kann, Abbildung 9. Bei dieser Betrachtung ist es insbesondere interessant, wie nahe der Kraftstoffverbrauch dieses speziellen Motors durch seine optimale Auslasssteuerzeit und innere Lastpunktverschiebung an den Kraftstoffverbrauch eines 4-Zylindermotors mit 2 abgeschalteten Zylindern, wie er heute bereits in Serie ist, herankommt.

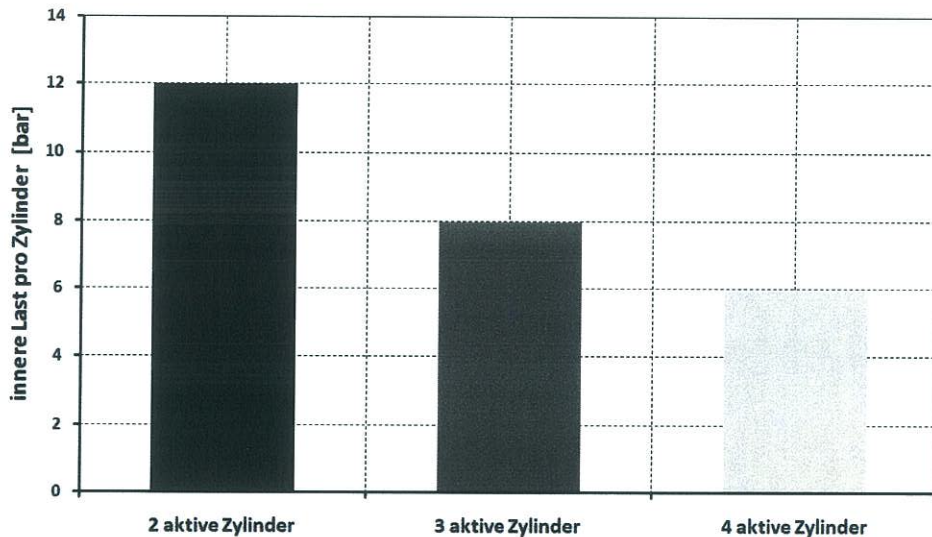


Abbildung 9: Erhöhung der inneren Last im 2- und 3-Zylinder Betrieb gegenüber 4-Zylinder Betrieb bei $p_{me} = 5$ bar

4 Innovation des Three-Up Konzeptes

Um sowohl die oben beschriebenen Vorteile des Drei- und Vierzylindermotors in einem Verbrennungsmotor umzusetzen, müsste man lediglich einen Zylinder wahlweise deaktivieren. Nutzt man die Vorteile der Variabilitäten im Ventiltrieb auf einfache Weise wie zum Beispiel die Zylinderstilllegung, so könnte man diese Idee verfolgen, einen kleinen kompakten Vierzylindermotor teils als Drei- oder Vierzylindermotor zu betreiben. Diese Innovation wird an dieser Stelle erstmalig anhand des neuen ausgeführten Konzeptes „Three-Up“ vorgestellt. Mit Three-Up ist gemeint, dass ein Vierzylindermotor hauptsächlich im Dreizylinderbetrieb betrieben wird und bei Inanspruchnahme der maximalen Leistung der vierte Zylinder durch Zuschaltung an der Verbrennung teilnimmt. An dem Motor wird dann eine Pleuellagerachse eingesetzt, die den Pleuellagerstern eines üblichen Dreizylindermotors mit 120 Grad Kröpfnungswinkel an drei Zylindern aufweist und konstruktiv so ausgeführt ist, dass zwei Zylinder mit einer nahezu gleichen Kröpfnungslage zueinander ausgeführt sind, Abbildung 10. Die beiden mit gleicher Kröpfnung versehenen Zylinder zünden gleichzeitig oder mit einer versetzten Zündfolge von 360°KW. Einer der parallel angeordneten Zylinder des Vierzylindermotors wird für den Dreizylinderbetrieb mittels Stilllegung der Ein- und Auslassventile deaktiviert.

Idealerweise müssten vom Prinzip her innerhalb einer Motorenfamilie mit diesem Konzept lediglich die Pleuellager- und Pleuellagerachse neu erstellt werden und die sonstigen Bauteile sowie die gesamten Randbedingungen des Package könnten unverändert bleiben.

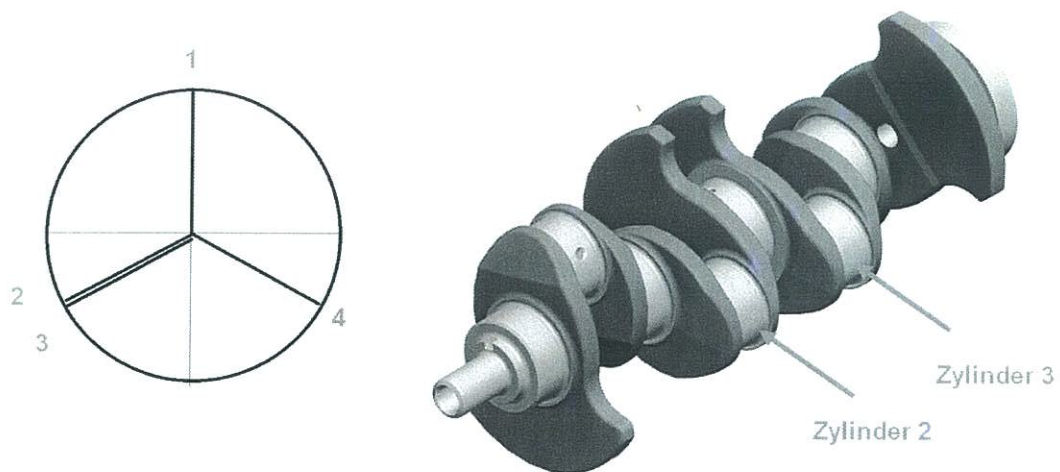


Abbildung 10: Beispiel einer Three-Up Kurbelwelle mit gleicher Kurbelwellenkröpfung an Zylinder 2 und 3, [5]

5 Auslegung und Aufbau eines Versuchsträgers für das Three-Up Konzept

Am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern wurde im Auftrag der enTec CONSULTING GmbH ein 1,4 l 4-Zylinder-Turbo-Ottomotor mit dieser 3-Zylinder Zündfolge aufgebaut. Die Kurbelwelle ist nach dem Kurbelstern der linken Variante aus Abbildung 8 aus den Abschnitten einer 4-Zylinder Kurbelwelle hergestellt worden. In die Grundlager sind kegelige Polygonprofile eingearbeitet, die nach dem Fügen zusätzlich mit hochfestem Klebstoff und einer zentralen Schraube in der neuen Position gehalten werden, Abbildung 11. Dieser Ansatz ist Kostengründen gewählt worden; selbstverständlich ist eine einteilig konventionell hergestellte Kurbelwelle von Vorteil für die Erprobung. Der Motor ist mit gefügten Nockenwellen ausgerüstet, bei denen die Nocken relativ einfach in einer neuen Position angeordnet werden.

Der Motor ist zudem mit dem mechanischen vollvariablen Ventiltrieb UniValve auf der Ein- und Auslassseite und mit einer Drosselkappe ausgerüstet, so dass alle Laststeuerverfahren untersucht werden können, [4]. Über entsprechende Maßnahmen am Ventiltrieb kann ein Zwei- Drei- oder Vierzylinderbetrieb dargestellt werden.

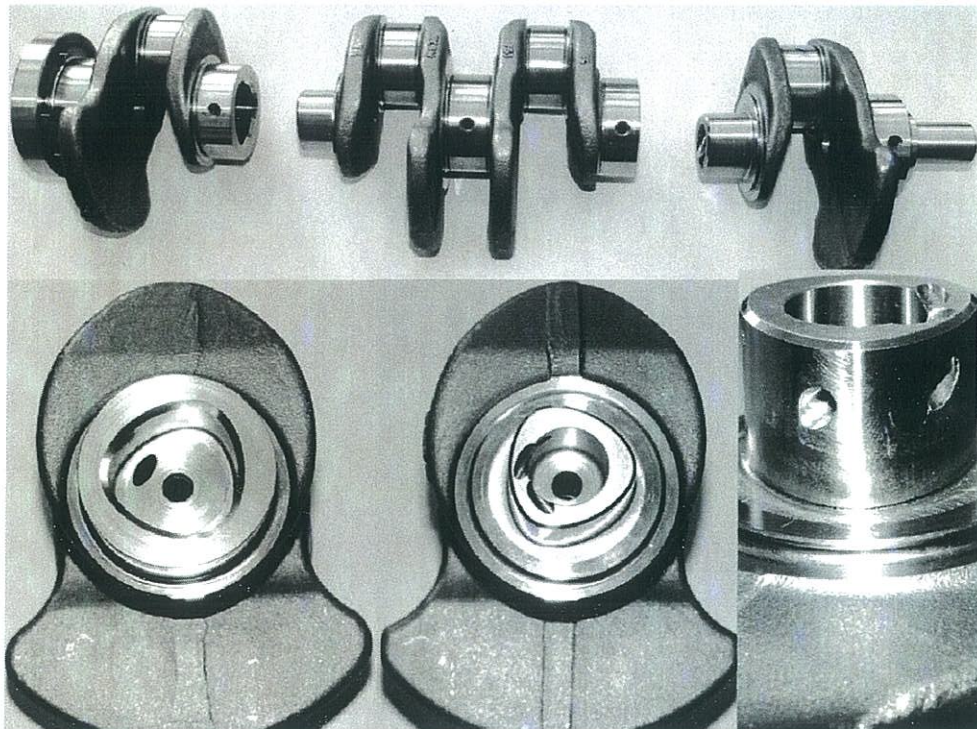


Abbildung 11: gebaute Three-Up Kurbelwelle

6 Erste Versuchsergebnisse am Prototypenmotor

Die gebaute Kurbelwelle hat sich aufgrund der fehlenden Präzision ungünstig auf die Reibung ausgewirkt; der Reibmitteldruck des Versuchsträgers beträgt 0,90 bar beim Lastpunkt $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar. Dieser mit der gebauten Kurbelwelle versehene Motor wurde im 2-, 3- und 4-Zylinderbetrieb gefahren.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die am Prüfstand ermittelten Kraftstoffverbräuche für 6 verschiedene gefahrene Varianten für die Drehzahl $n = 2000$ 1/min und den Mitteldruck $p_{me} = 2, 3$ und 5 bar dargestellt.

Folgende Bezeichnungen für die einzelnen Laststeuerungskonzepte werden, wie in Tabelle 1 dargestellt, gewählt.

DK	Motor mit Drosselklappe betrieben	
df	Motor drosselfrei über vollvariable Steuerzeiten betrieben	
UniValve	mechanisch vollvariable Ventilsteuerung	
Anzahl der aktiven (gefeuerten) Zylinder und Zündfolgen		
Konzept 1	2/4-4ZF	Vierzylindermotor mit zwei aktiven Zylindern und normaler 4-Zylinderzündfolge
Konzept 2	3/4-3ZF	Vierzylindermotor mit drei aktiven Zylindern und 3-Zylinderzündfolge
Konzept 3	4/4-3ZF	Vierzylindermotor mit vier aktiven Zylindern und 3-Zylinderzündfolge
Konzept 4	4/4-4ZF	Grundmotor mit vier aktiven Zylindern und normaler 4-Zylinderzündfolge

Tabelle 1: Bezeichnungen für die unterschiedlichen Laststeuerungskonzepte mit den entsprechenden Zündfolgen

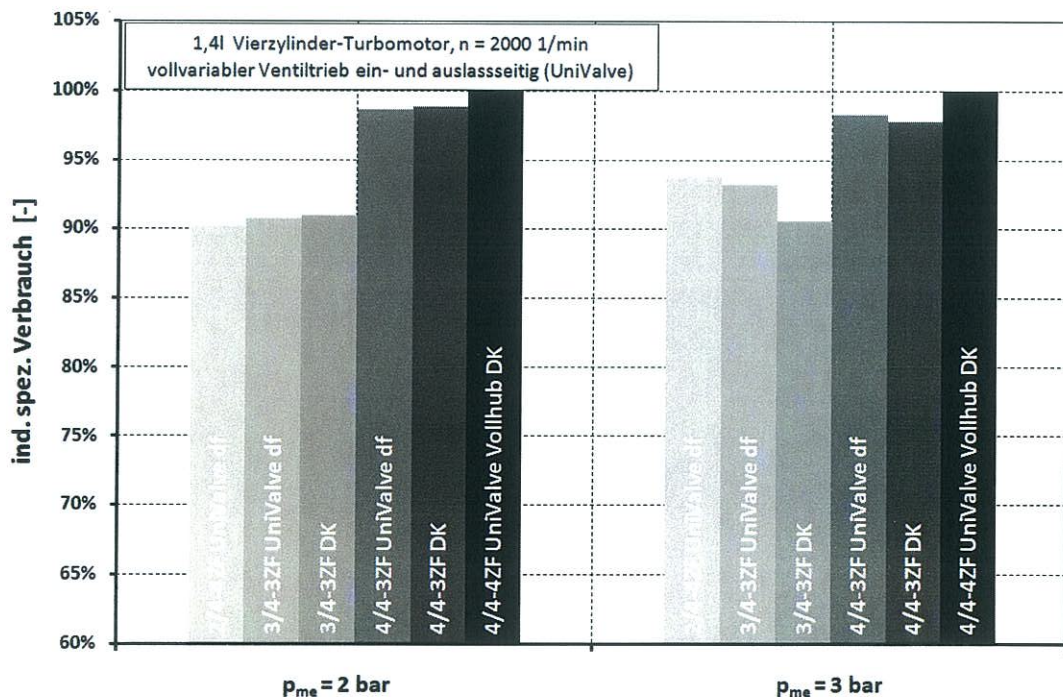


Abbildung 12: Vergleich des indizierten spezifischen Kraftstoffverbrauch bei $p_{me} = 2$ und 3 bar für 6 Varianten

Beim Lastpunkt $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar weist der Dreizylinderbetrieb des Three-Up Konzeptes mit der neuen Zündfolge gegenüber dem Grundmotor mit vier gefeuerten Zylindern und der normalen Vierzylinderzündfolge einen Verbrauchsvorteil von 9 % auf. Für diesen Betrieb kommt der Motor bis auf 1 % an das Konzept Vierzylindermotor mit zwei abgeschalteten Zylindern heran. Bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 3$ bar hat das Three-Up Konzept einen günstigeren Kraftstoffverbrauch als das Konzept Vierzylindermotor mit Abschaltung von zwei Zylindern.

Bei einer Last von 5 bar, bei der der 2-Zylinderbetrieb bereits einen höheren Kraftstoffverbrauch aufweist als der Motor mit der 4-Zylinder Zündfolge, zeigt das Three-Up Konzept mit drei gefeuerten Zylindern immer noch einen Verbrauchsvorteil von 6 % auf.

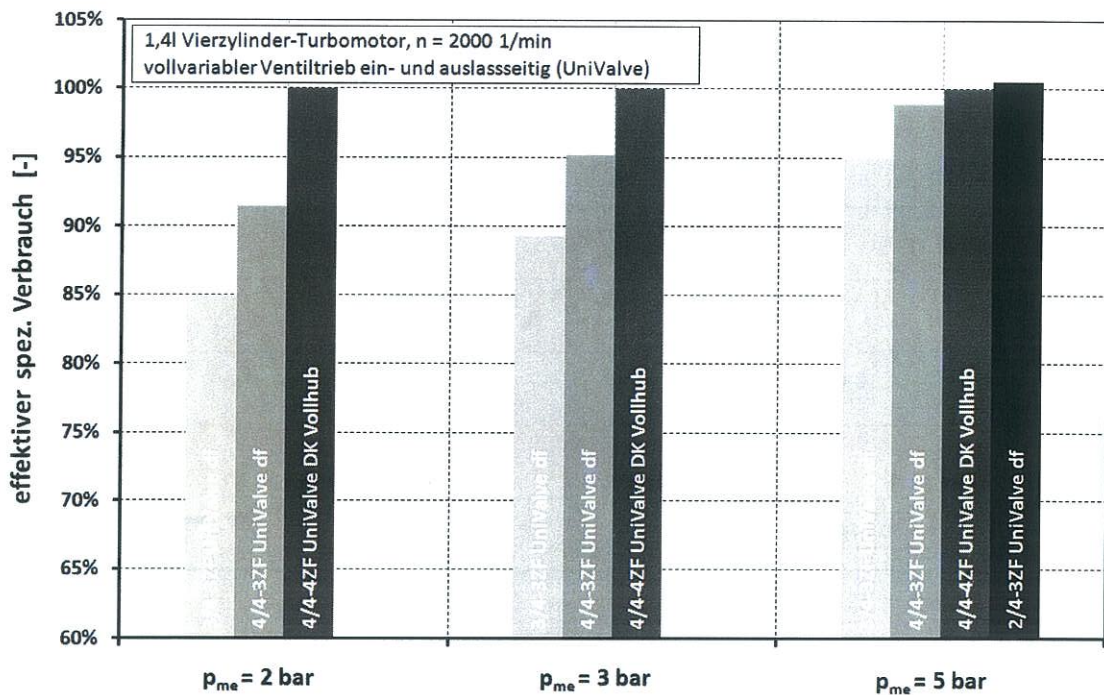


Abbildung 13: Kraftstoffverbrauchsvorteil mit einem und mit zwei abgeschalteten Zylindern

Der Three-Up Motor kann im gesamten Lastbereich des NEFZ mit drei Zylindern gefahren werden. Auch der Start erfolgt mit drei Zylindern. Ein Hochschalten auf den Vierzylinderbetrieb ist erst ab einer Last von 10 bis 11 bar Mitteldruck notwendig, wenn die innere Last der Zylinder an die Klopfgrenze kommt bzw. die Zündwinkel den Kraftstoffverbrauch verschlechtern. Da bei jedem Umschalten zur Vermeidung eines Schaltstoßes der Kraftstoffverbrauch steigt, werden die CO₂-Emissionen des Motors mit der 3-Zylinder Zündfolge zusätzlich reduziert, was sich im Zyklus mit etwa 3 bis 5 gCO₂ bemerkbar macht. Die innere Lastpunktverschiebung führt auch dazu, dass der Abgasmassenstrom pro Zylinder im Dreizylinderbetrieb steigt. Dieser höhere Abgasmassenstrom führt zu einer gegenüber dem normalen Vierzylindermotor höheren Turboladerdrehzahl bei niederen Motordrehzahlen und der Ladedruck steigt.

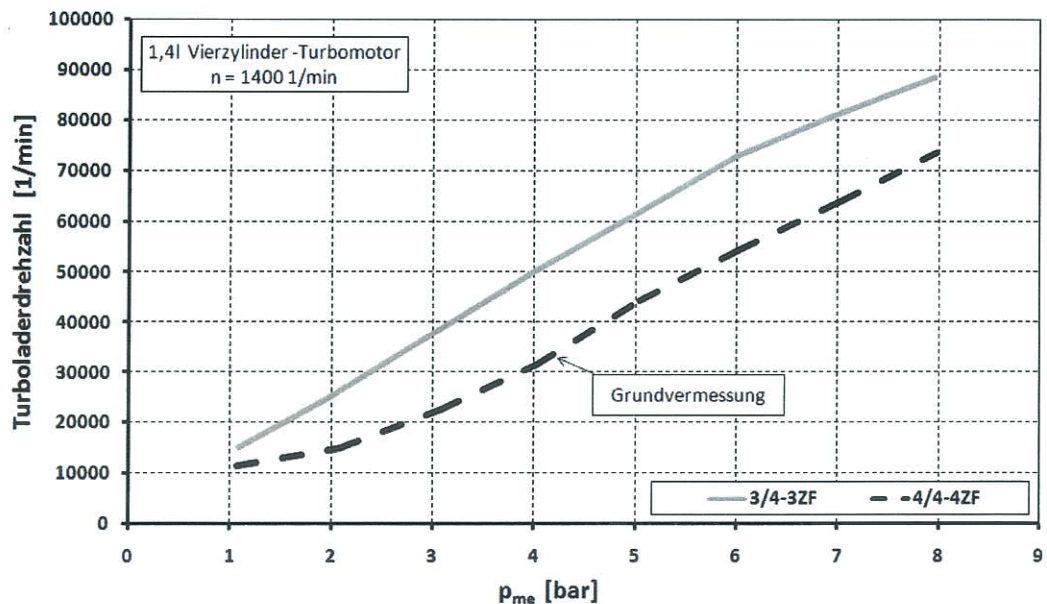


Abbildung 14: gemessene Turboladerdrehzahl über der Motordrehzahl

Durch die Dreizylinder-Zündfolge und den Gleichlaufbetrieb von zwei Zylindern im Vierzylinderbetrieb kommt eine Anregung der Kurbelwellendrehungleichförmigkeit in der 0,5 Ordnung zustande. Diese Drehungleichförmigkeit kann zu Getrieberasseln und zu Geräuschabstrahlungen der Karosserie führen, die durch Tilgermaßnahmen am Schwungrad reduziert werden können. Die Drehungleichförmigkeit kann allerdings auch deutlich reduziert werden, in dem die beiden gleichlaufenden Zylinder gegeneinander geschränkt werden.

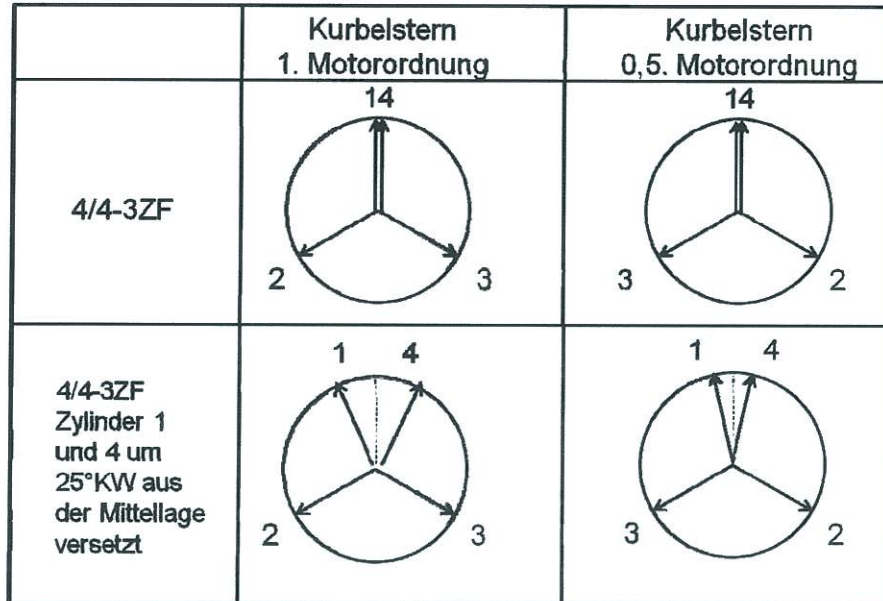


Abbildung 17: Kurbelstern von „geschränkten“ Gleichlaufzylindern

Diese Schränkung der beiden Gleichlaufzylinder erhöht nicht den Kraftstoffverbrauch und beeinflusst das Low End Torque Verhalten des Motors nur gering, was zum Beispiel in der Kurve mit dem zweit höchsten Drehmomentaufbau und der Schränkung von 15 °KW in Abbildung 18 dargestellt ist.

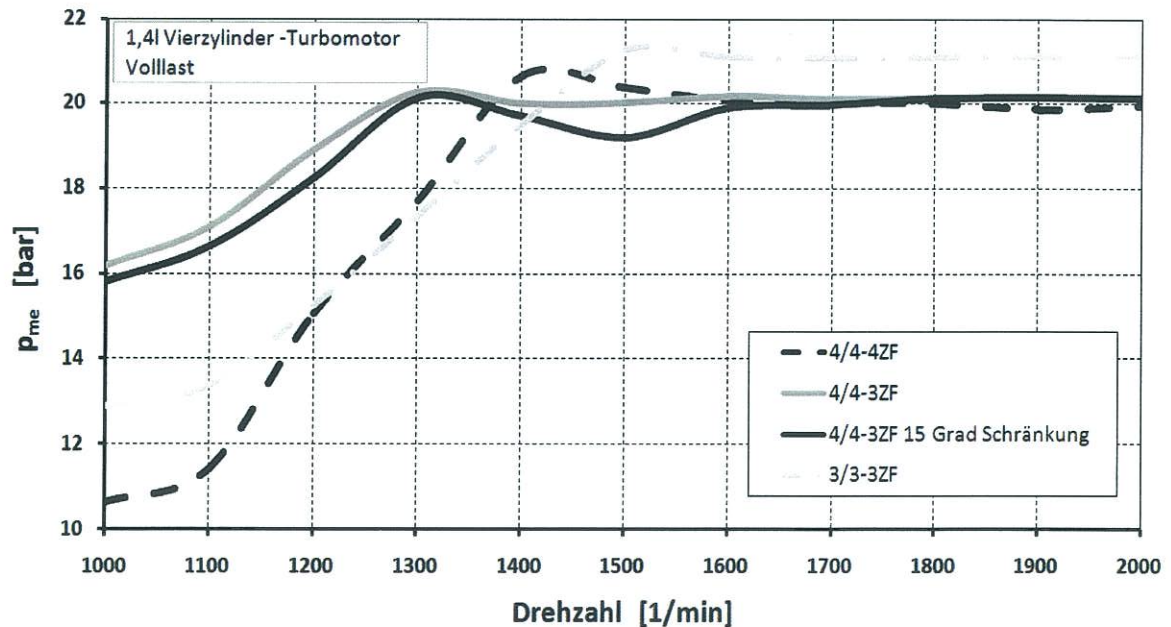


Abbildung 18: Vergleich des Aufbaus des effektiven Mitteldruck mit Einfluss einer Schränkung der Gleichlaufzylinder

Auch der Einfluss der Schränkung mit 15 °KW Versatz auf den Restgasgehalt ist relativ gering, Abbildung 19.

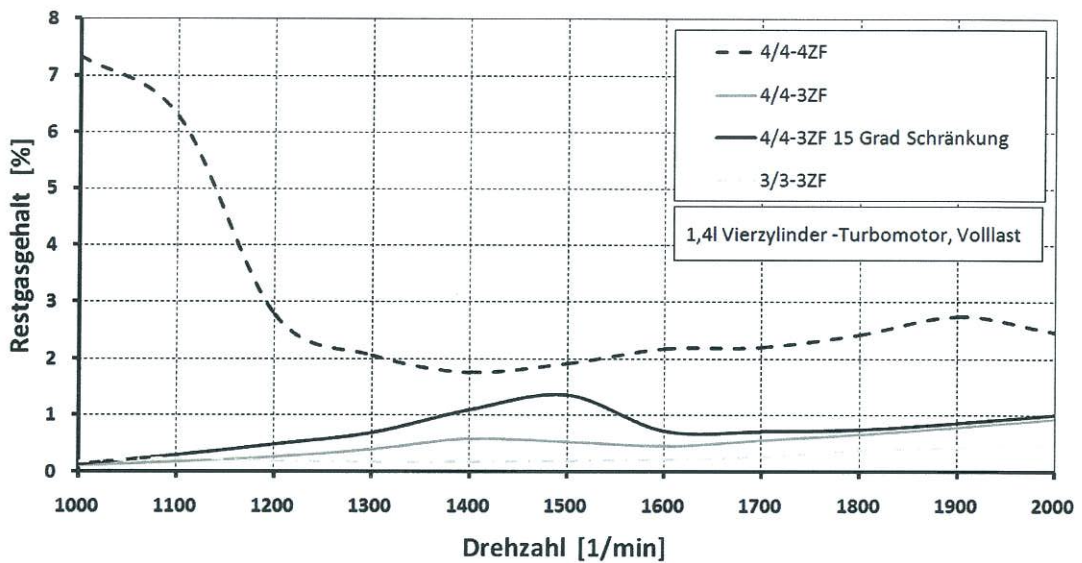


Abbildung 19: Restgasgehalt bei verschiedenen Zündfolgen und der Zylinderschränkung von 15 °KW

In Abbildung 20 wird verglichen, wie sich die Maschinendynamik bzw. die Massenkräfte des Three-Up Konzeptes gegenüber einem normalen Dreizylindermotor (3/3-3ZF) darstellen.

	Freie Massenkraft 1. Ordnung	Freie Massenkraft 2. Ordnung	Freies Massenmoment 1. Ordnung	Freies Massenmoment 2. Ordnung
3/3-3ZF ohne Normalausgleich	0	0	$\sqrt{3} \cdot F_{res,1} \cdot L = 1.73 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\sqrt{3} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.52 \cdot F_{res,1} \cdot L$
3/3-3ZF mit Normalausgleich	0	0	$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,1} \cdot L = 0.87 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\sqrt{3} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.52 \cdot F_{res,1} \cdot L$
3/4-3ZF ohne Normalausgleich	$F_{res,1}$	$F_{res,2} = 0.3 \cdot F_{res,1}$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,1} \cdot L = 2.60 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.78 \cdot F_{res,1} \cdot L$
3/4-3ZF mit Normalausgleich	$0.5 \cdot F_{res,1}$	$F_{res,2} = 0.15 \cdot F_{res,1}$	$\frac{3\sqrt{3}}{4} \cdot F_{res,1} \cdot L = 1.30 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.78 \cdot F_{res,1} \cdot L$
3/4-3ZF ohne Normalausgleich modifizierte Kurbelwelle	$F_{res,1}$	$F_{res,2} = 0.3 \cdot F_{res,1}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,1} \cdot L = 0.87 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.26 \cdot F_{res,1} \cdot L$
3/4-3ZF mit Normalausgleich modifizierte Kurbelwelle	$0.5 \cdot F_{res,1}$	$F_{res,2} = 0.15 \cdot F_{res,1}$	$\frac{\sqrt{3}}{4} \cdot F_{res,1} \cdot L = 0.43 \cdot F_{res,1} \cdot L$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot F_{res,2} \cdot L = 0.26 \cdot F_{res,1} \cdot L$

L = Zylinderabstand

Abbildung 20: Freie Massenkräfte und Massenmomente für die rechte Kurbelsternvariante

Dieser Vergleich zeigt, dass die freien Massenkräfte und Momente in der 1. Ordnung auf niedrigerem Niveau zunehmen und in der 2. Ordnung im Vergleich zur 4-Zylinderzündfolge deutlich reduziert sind, aber zusätzlich Anregungen durch freie Momente hinzukommen. Es bleibt also spannend, wie sich ein derartiger Motor im Fahrzeug verhält. Bemerkenswert ist, dass der Three-Up Motor aus auskonstruierten und erprobten Baugruppen zusammengesetzt werden kann. Es werden lediglich neue Nockenwellen und eine neue Kurbelwelle notwendig, die das Motorpackage im Fahrzeug nicht beeinflussen.

Allerdings darf nicht verschwiegen werden, dass für einen komfortablen Antriebsstrang ein Zweimassenschwungrad mit Pendel oder Leistungsverzweigung notwendig ist, [6]. Die Mehrkosten dafür können durch die Einsparungen im Zylinderkopf teilweise kompensiert werden, da gegenüber einem Motor zwei stillgelegten Zylindern nur ein Zylinderumschaltmechanismus nötig ist.

8 Zusammenfassung/Ausblick

Das an dieser Stelle erstmalig vorgestellte Konzept des Betriebs eines Vierzylindermotors mit Zylinderabschaltung eines Zylinders und der Zündfolge eines normalen Dreizylindermotors weist ein deutliches Verbrauchspotenzial auf. Insbesondere zu höheren Lasten hin überwiegt dieses so genannte Three-Up Konzept. Die Vorteile des sehr guten Ladungswechsels eines Dreizylindermotors werden genutzt und im gesamten Testzyklus kann der Verbrennungsmotor in Dreizylinderbetrieb gefahren werden, ohne dass eine Zylinderzuschaltung erfolgen muss. Mit einem früheren Ansprechen des Abgasturboladers steigt auch das Lowend Torque deutlich, wodurch die Fahrdynamik verbessert wird.

Das Three-Up Konzept ist auch auf Verbrennungsmotoren mit höherer Zylinderzahl übertragbar. Ein Sechszylindermotor kann so zum Beispiel prinzipiell im Vierzylinderbetrieb über einen weiten Kennfeldbereich betrieben werden und erst zu höheren Lasten hin wird der komplette Sechszylinderbetrieb zugeschaltet.

Auch für Dieselmotoren eignet sich dieses Laststeuerungsverfahren.

Innerhalb einer Motorenfamilie ist die Umsetzung einfach vorstellbar; lediglich Kurbel- und Nockenwellen werden neu benötigt. Das Fahrzeugpackage ändert sich nicht. Für die Erzielung einer exzellenten Laufruhe wird empfohlen, Maßnahmen am Schwungrad vorzunehmen, die ähnlich wie für die Zylinderabschaltung von zwei Zylindern an einem Vierzylindermotor getroffen werden können, [6].

Im Gegensatz zu den bekannten Verbrennungsmotoren Konzepten werden mit diesem neuen Ansatz zur Laststeuerung die Zielkriterien Verbrauch und Fahrdynamik gleichzeitig verbessert, was sonst nicht gelingt, da sich diese Zielkriterien in der Regel nicht ergänzen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Middendorf, H.; Theobald, J.; Lang, L.; Hartel, K.: Der 1,4-l-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung. aus MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2012-03)
- [2] Schäfer, M.; Schiedt, G.; Müller, R.; Jablonski, J.: Der neue V8 TFSI-Motor von Audi- Teil 1. aus MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2013-02)
- [3] Flierl, R.; Lauer, F.: Mechanisch vollvariabler Ventiltrieb und Zylinderabschaltung. aus MTZ - Motortechnische Zeitschrift (2012-04)
- [4] Schmitt, S.: Potenziale durch Ventiltriebsvariabilität auf der Auslassseite am drosselfrei betriebenen Ottomotor mit einstufiger Turboaufladung. Dissertation TU Kaiserslautern, VKM Schriftreihe, Band 8, 2012
- [5] n.n.: DE 10 2011 054 881 B3. Kurbelwelle für eine Vierzylinder Brennkraftmaschine. Patent Deutsches Patentamt München der Fa. enTec CONSULTING GmbH, Hirschau
- [6] Schick, A.; Orlamünder, A.; Fischer, M.; Lorenz, D.: Die Leistungsverzweigung zur DU Entkopplung- Die (R)Evolution geht weiter. Vortrag, Internationaler VDI-Kongress: Getriebe in Fahrzeugen, 18. und 19. Juni 2013, Friedrichshafen