

Optimierung transienter Vorgänge mit AVL-GCA an einem Otto-Motor hoher Flexibilität

Dr.-Ing. Thomas Leifert, AVL List GmbH, Graz
Fernando Moreno Nevado, AVL List GmbH, Graz
Dr. Robert Fairbrother, AVL List GmbH, Graz
Ing. Kurt Prevedel, AVL List GmbH, Graz

Abstract

Optimizing the dynamic operation of a gasoline engine with high flexibility by means of AVL-GCA

Downsizing and Downspeaking are considered being the most promising approaches to significantly reduce CO₂ emission. Because of synergy effects between its technologies, downsized Turbocharged Gasoline Direct Injection (TGDI) engines have the highest potential for fuel economy. The key for high market penetration of such concepts requires customer acceptance and this is closely linked to driver satisfaction. For the drivability rating of vehicles fitted with turbocharged engines, tip-in behavior is of paramount importance.

A combined combustion analysis and gas-exchange analysis was performed with AVL GCA (**G**as exchange and **C**ombustion **A**nalysis) on a „beyond-state-of-the-art” TGDI engine, namely a variable compression ratio engine featuring MCE-5 VCRI technology. With variable compression ratio and 2-stage boosting this engine features an unusually high level of flexibility. Therefore the analysis is used to examine the thermodynamic processes taking place in the cylinders not only in steady state operation but also under highly transient boundary conditions and on a „cycle-by-cycle” basis in order to examine hints for optimizing transient response.

An established numerical approach for analysis was applied to measurement data acquired on an engine dynamometer thanks to a dedicated measurement chain that will be described in detail.

Kurzfassung

Downsizing und Downspeaking sind vielversprechende Maßnahmen zur wirkungsvollen Reduktion von CO₂. Hier haben Turboaufgeladene Direkteinspritzer wegen der Synergieeffekte ihrer Technologien das größte Potential zur Kraftstoffeinsparung.

Eine hohe Marktdurchdringung solcher stark ausgeprägter DS-Konzepte ist im Wesentlichen von der Kundenakzeptanz abhängig, diese wiederum wird nur bei entsprechend positiver Fahrbarkeit erzielt. Bei der Bemessung von Fahrbarkeit Turboaufgeladener Aggregate spielt „Tip-In“ eine wesentliche Rolle, dies umso mehr, je ausgeprägter DS angewandt und je höher das Niveau von Aufladegrad bzw. Mitteldruck gehoben wird.

Die AVL-GCA – eine Analyse von Verbrennungsprozesses und Ladungswechsel – wurde auf einen „beyond-state-of-the-art“ TGDI Motor mit variablem Verdichtungsverhältnis und 2-stufiger Hochaufladung angewandt. Diese Maschine basiert auf der MCE-5 VCRI technology. Der Motor weist ein außergewöhnlich hohes Maß an Flexibilität auf. Bei den Untersuchungen galt es, neben stationärem Betrieb auch hochdynamisch die thermodynamischen Vorgänge im Zylinder „Zyklus zu Zyklus“ zu analysieren, um dann daraus Hinweise zur Optimierung der Kalibrierung zu erhalten.

Der etablierte GCA-Rechenalgorithmus wird mit den entsprechenden Messdaten des TGDI-Motors verknüpft und die Ergebnisse vorgestellt.

1. Einleitung

Downsizing und Downspeeding (DS) werden in zunehmendem Maße zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen geringeren Schadstoffemission, insbesondere der Komponente CO₂, eingesetzt.

Vereinfacht gesagt bedeutet Downsizing, dass der Hubraum des Motors reduziert wird, und gleichzeitig über ein bestimmtes Verfahren der Betriebspunkt im Kennfeld auf ein Niveau mit höherem Wirkungsgrad gehoben wird. Der Motor wird effektiver betrieben, zu dem trägt auch die verkleinerte Oberfläche des Brennraums bei, die einen geringeren Wandwärmeverlust nach sich zieht. Ein kleinerer Hubraum bedeutet höhere Leistungsdichte bei geringerem Gewicht, was einen weiteren Vorteil in der Gesamtbilanz ausmacht.

Neue Technologien kommen mehr und mehr zum Einsatz. Neben Direkteinspritzung, variablen Steuerzeiten, hohen Aufladegraden, Zylinderabschaltung und Getrieben mit hohem Übersetzungsverhältnis tragen auch unkonventionelle Maßnahmen wie veränderliches Verdichtungsverhältnis (VCR) zur Steigerung des Wirkungsgrads bei.

Es kommt derartigen Konzepten zugute, dass heutzutage Mitteldrücke erreicht werden, die vor einigen Jahren unter Serienbedingungen bei weitem noch nicht realisierbar waren [Bild 1]. Wesentlichen Anteil an dieser Steigerung haben neue Brennverfahren und hohe Aufladung, die inzwischen sicher und wirtschaftlich beherrscht werden.

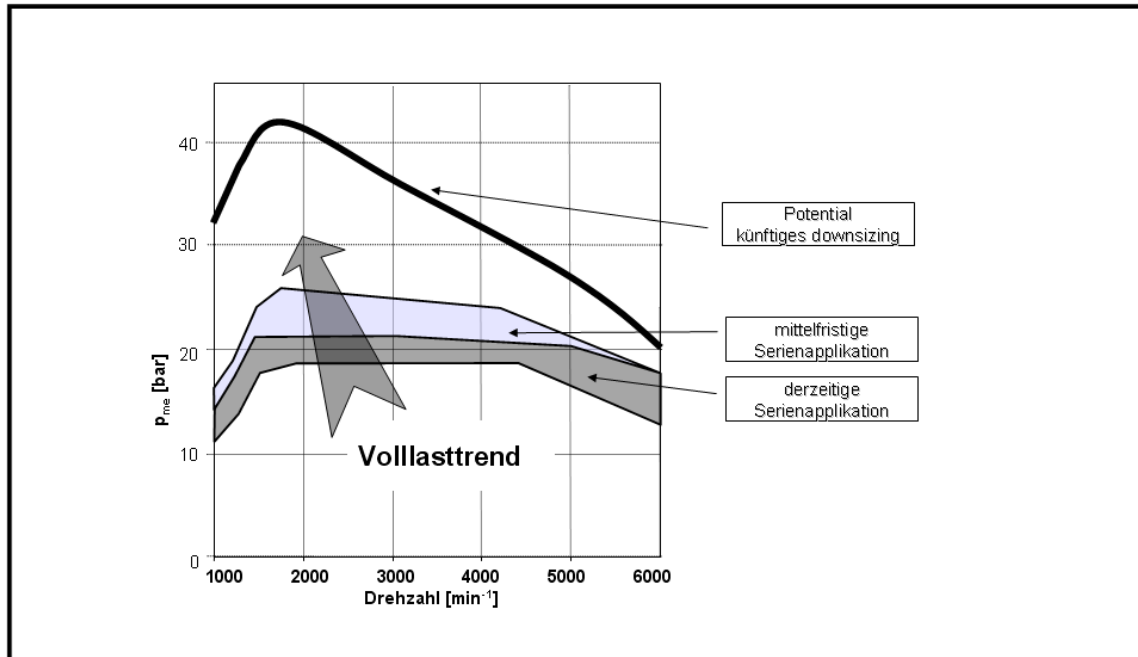


Bild 1: Volllasttrend bei aufgeladenen Ottomotoren

2. Problemstellung

Alle Maßnahmen, die ergriffen werden, um den Motor mittels Downsizing zu höherer Effizienz und somit zu geringerer CO_2 -Emission zu bringen, bedeuten jedoch auch, dass hinsichtlich der Fahrbarkeit Probleme auftreten können, die bestimmte Betriebspunkte oder Änderung der Fahrzustände gar nicht erst zulassen würden, da dies vom Fahrer nicht akzeptiert würde. Hierzu gehören überhöhte Schwankung des Mitteldrucks im stationären Betrieb oder unstete oder auch verzögerte Dynamik bei Beschleunigung. Ein Beispiel hierfür ist „Tip-In“ – die plötzliche Momentanforderung. Auch sind hier Unterschiede im Motorverhalten festzustellen, je nachdem, wo der Startpunkt einer solchen Beschleunigung im Kennfeld liegt.

Je kleiner der Motor ist, umso höher wird er in der Regel aufgeladen, aber umso kritischer wird auch sein Ansprechverhalten. Ein Saugmotor spricht praktisch sofort bei einem Lastwechsel an. Wird durch „Fuß-aufs-Gas“ spontan die Drosselklappe geöffnet, ist diese Momentanforderung nur wenige Arbeitsspiele später erfüllt. Die Luftsäule hinter der Drosselklappe ist schnell transportiert, Saugvolllast ist schnell erreicht, der Gradient ist fast senkrecht [Bild 2, links oben]. Das entspricht auch dem Wunsch des Fahrers.

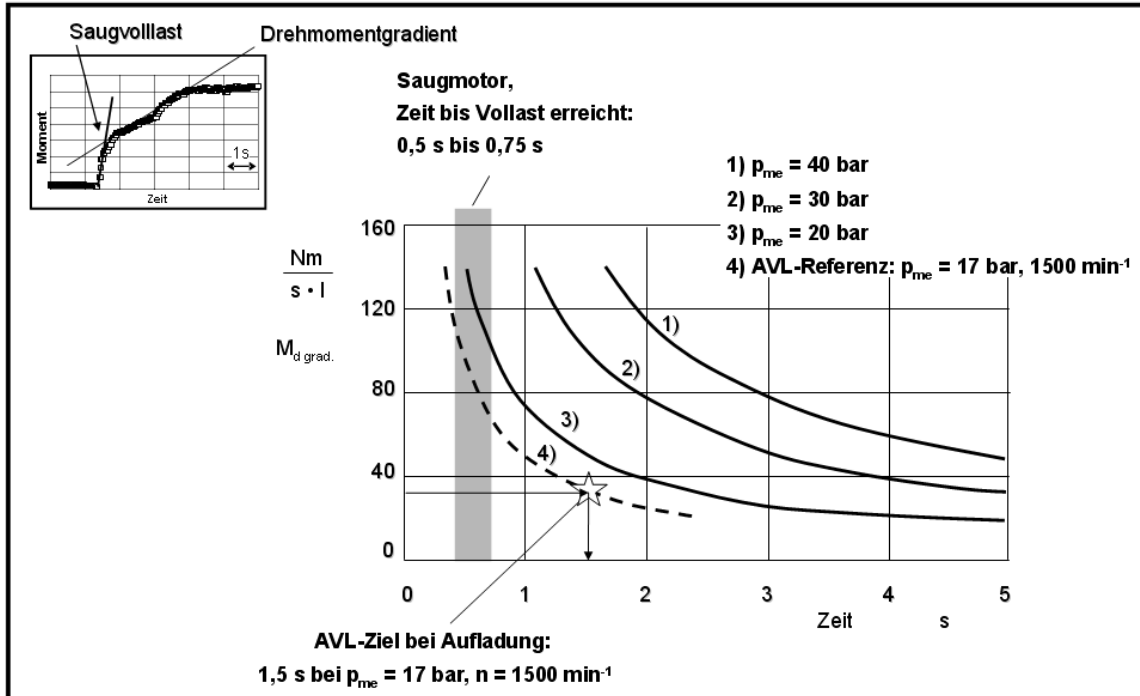


Bild 2: Antwort auf Momentanforderung

Ist der Motor jedoch aufgeladen, so gilt es, die Laderdrehzahl und somit den Ladedruck möglichst schnell zu erhöhen, aber dies braucht Zeit. Das Volllastmoment ist zwar deutlich höher als jenes eines Saugmotors, es bedarf jedoch aufgrund der Trägheit des Laders mehr Zeit, dieses auch zu erreichen. Liegt diese Zeitspanne über 2 Sekunden, so wird das nicht mehr akzeptiert. In Bild 2 ist die Dauer bis zum Erreichen eines bestimmten Momentes in Abhängigkeit von effektivem Mitteldruck aufgetragen. Man sieht, dass bei $p_{me} = 40 \text{ bar}$ und einer vorgegebenen Maximalzeit ein bestimmter Gradient im Drehmoment gefordert ist. Um in diesem Beispiel unter der 2 Sekunden Marke zu bleiben, ist ein sehr hoher Gradient des Drehmoments von nahezu $120 \text{ Nm} / (\text{s} \cdot \text{l})$ erforderlich.

Je größer das geforderte Moment, umso länger ist die Zeitspanne bis der erforderliche Ladedruck erreicht ist. Insbesondere die Verbrennungsstabilität ist bei hoher Last und niedriger Drehzahl von besonderer Bedeutung, weil hier der Zündzeitpunkt (ZZP) deutlich später als optimal liegt. Neben dem System Aufladung sind Gaswechsel und somit Steuerzeiten verantwortlich, wenn es zu negativem Druckgefälle kommt, was wiederum erhöhtes Restgas bedeutet. Restgas und der daraus notwendigerweise resultierende spätere ZZP führen zu Schwankungen der Stabilität. Hier ist eine entsprechende Ladungswechselstrategie gefragt.

Um nun diesen transienten Betrieb nach Vorgabe zu bewerkstelligen, gilt es, Massenströme, Restgasgehalt, Ventilsteuerzeiten, Zündzeitpunkt Ladedruck sowie Abgasgegendruck, Brennparameter und selbstverständlich auch den Mit-

teldruck dynamisch und ganzheitlich zu „beobachten“ und dann entsprechend anzupassen. Deutlichen Einfluss auf den Drehmomentgradienten haben beispielsweise Restgas und Spülmasse; diese beiden Parameter lassen sich durch Ventilüberschneidung, also durch Phasenverstellung der Nockenwellen wie erforderlich einstellen.

3. Der Motor

Bei dem Versuchsträger handelt es sich um den Prototyp eines 4-Zylinder-TGDI Hochleistungsaggregates der Fa. MCE-5 DEVELOPMENT SA. Die Besonderheit hierbei ist das Zylinderselektiv arbeitende variable Verdichtungsverhältnis ϵ (MCE-5 VCRI technology), das es in Kombination mit 2-stufiger Aufladung überhaupt erst ermöglicht, Mitteldrücke $p_{me} > 40$ bar mit Kraftstoffqualität RON = 95 zu erzielen.

AVL hat das Brennverfahren dieses Motors entwickelt.

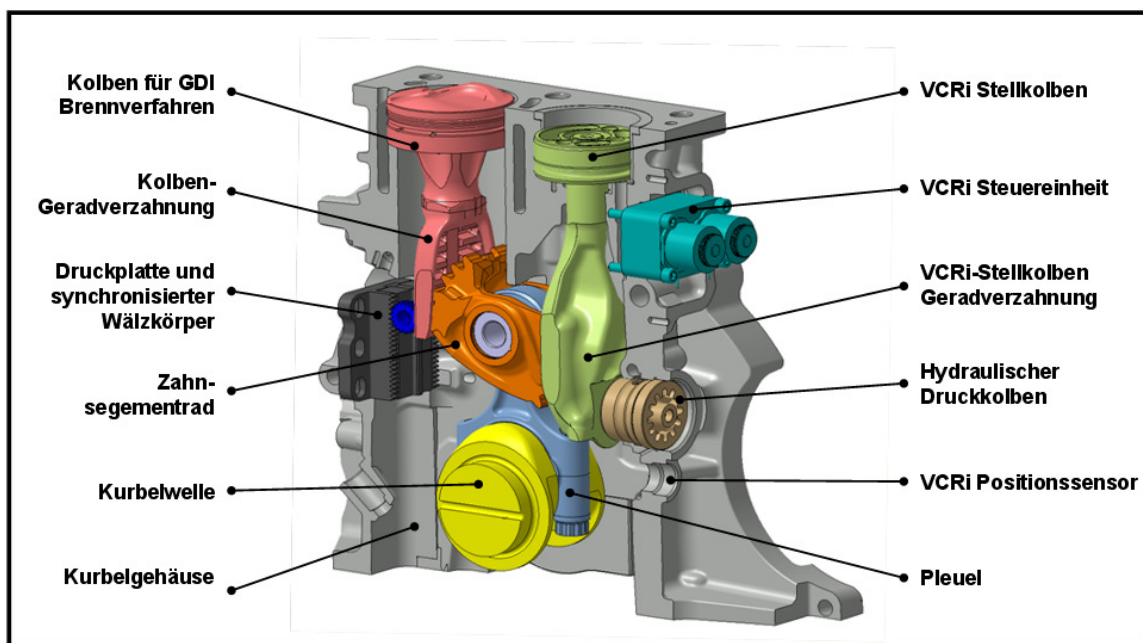


Bild 3: MCE-5 VCRI Motor mit variablem Verdichtungsverhältnis

Kolben und Mechanik des Kurbeltriebs sind hinsichtlich der Reibungsverluste optimiert. MCE-5 VCRI technology wird über einen veränderten Kurbeltrieb erreicht, bei dem mittels Stellkolben die Verdichtung innerlich von drei Arbeitspielen zylinderselektiv über den gesamten Stellbereich zwischen $\epsilon = 6$ und $\epsilon = 15$ eingestellt werden kann, die Stelltoleranz beträgt dabei nur $\pm 0,1$.

Die Linearführung des Kolbens und die Verzahnungsprofile des Zahnsegmentrades halten die Verluste im System der Kraftübertragung sehr gering. Das VCRI-System arbeitet bezüglich der Gas- und Massenkräfte ohne zusätzlichen Energiebedarf. Das Verdichtungsverhältnis wird durch die veränderliche Höhenposition des VCRI-Stellers eingestellt, die sich dem Arbeitskolben über das Zahnsegmentrad mitteilt. Ein Positionssensor liefert dabei kontinuierlich Rückmeldung an die Motorsteuerung. Im Arbeitsraum des Kolbens des VCRI-Stellers befindet sich auf beiden Seiten des Kolbens Drucköl. Durch Öffnen der Verbindungsquerschnitte kann der Steuerkolben seine Position und damit das Verdichtungsverhältnis des Arbeitskolbens ändern. Ein hydraulischer Druckkolben stellt mit proportionaler Kraftwirkung die Spielfreiheit und damit akustische Unauffälligkeit der Kraftübertragung sicher.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Technischen Daten und Parameter aufgeführt.

Tab 1: Technische Daten des MCE-5 VCRI Versuchsmotors

Technische Daten	Wert	Einheit
Hubraum V_H	1,484	l
Bohrung D	75	mm
Hub H	84	mm
Zylinderzahl	4	-
Ventile pro Zylinder	4	-
Leistung P_{max}	170	kW
Nenn Drehzahl n_{nenn}	5000	min ⁻¹
Mitteldruck $p_{mi,max}$ / Drehmom. M_d	> 40 / 480	bar / Nm
Verdichtungsverhältnis ϵ	VCRI: 6 bis 15	-
Verbrennungsverfahren	AVL-GDI, EU6 fähig	-
Ein- und Auslassnockenwelle	VCP	-
2-stufige Aufladung	R2S (®BWTS)	-

Schon 1875 stellt Nikolaus Otto den Einfluss der Vorverdichtung [Bild 4] auf den Wirkungsgrad des Gleichraum-Prozesses fest. In diesem idealen Prozess ist das Verdichtungsverhältnis neben dem Polytropenkoeffizienten die einzige Motor-kenngröße mit Einfluss auf den Wirkungsgrad. Dieser steigt mit steigendem Verdichtungsverhältnis ϵ .

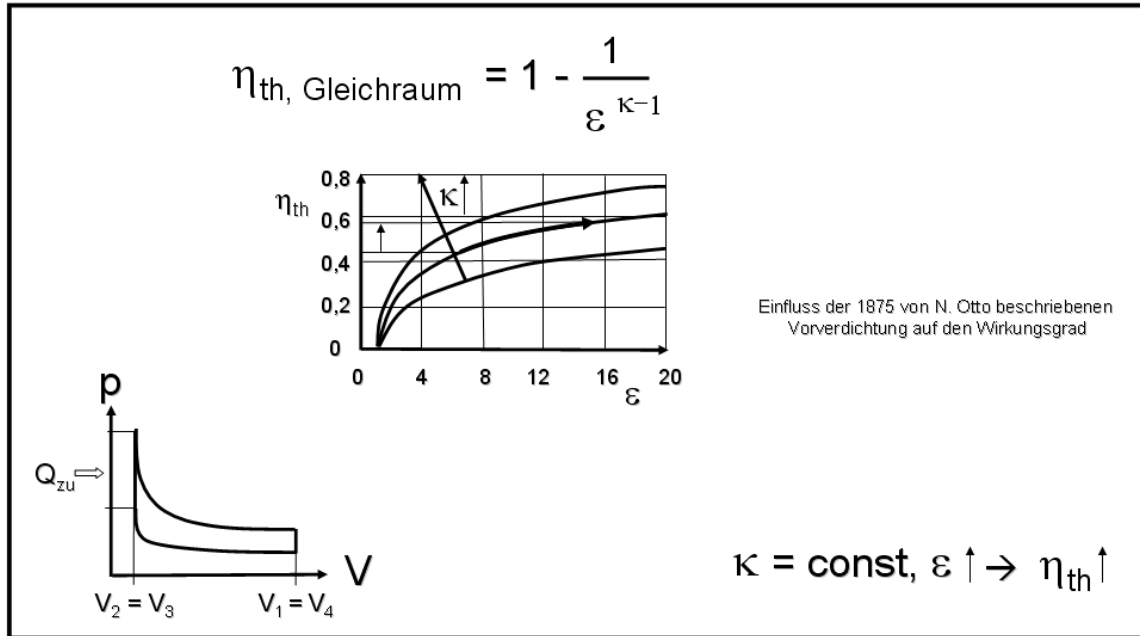


Bild 4: Einfluss des Verdichtungsverhältnisses beim Gleichraumprozess

4. Messtechnik und Datenerfassung am Prüfstand

4.1 GCA

4.1.1 Stationärer Betrieb

Vom Verbrennungsprozess ist vieles verstanden, dennoch müssen unterschiedliche messtechnische Methoden auch in Kombination miteinander eingesetzt werden, um ungeklärten Phänomenen auf die Spur zu kommen. Darüber hinaus gibt es Größen, die sich messtechnisch nur mit viel Aufwand oder eben gar nicht erfassen lassen. Hier sind vor allem Restgasgehalt, die Füllung des Zylinders und die Wandwärme zu nennen. Es besteht aber die Möglichkeit, solche Größen rechnerisch zu ermitteln, indem verschiedene Messwerte einer Rechnung zugeführt werden. Das AVL-Rechenprogramm hierzu lautet AVL-GCA (**G**as exchange and **C**ombustion **A**nalysis). Als verlängerte Werkbank zur Indiziermesstechnik und Bindeglied zwischen Prüfstand und Simulation analysiert AVL-GCA die Verbrennung und den Ladungswechsel, es werden damit z.B. derartige Größen bestimmt. AVL-GCA basiert auf dem Simulationstool AVL-BOOST für den kompletten Motor.

Das Programm betrachtet das System Einlass – Brennraum – Auslass im Detail [Bild 4] und ist ein hochentwickeltes Werkzeug zur thermodynamischen Prozessanalyse von Verbrennungsmotoren aller Art (Otto, Otto-DI, Diesel, HCCI, alternative Verfahren). Hierbei werden dem Indiziergerät (AVL-Indimodul mit AVL-

IndiCom) Messdaten, also insbesondere die Druckkurven, vom Motor zugeführt und mit Hilfe der bekannten Motorgeometrie, der Kraftstoffeigenschaften und den Größen des Ladungswechsels (Ventilhub, Steuerzeiten, Kanalgeometrie, Durchflussbeiwerte) analysiert. Als Ergebnis liegen Restgas, Massenströme, Wandwärmern, Energiebilanz und weitere wichtige Kennwerte, die aus einer 1D-Simulation resultieren vor.

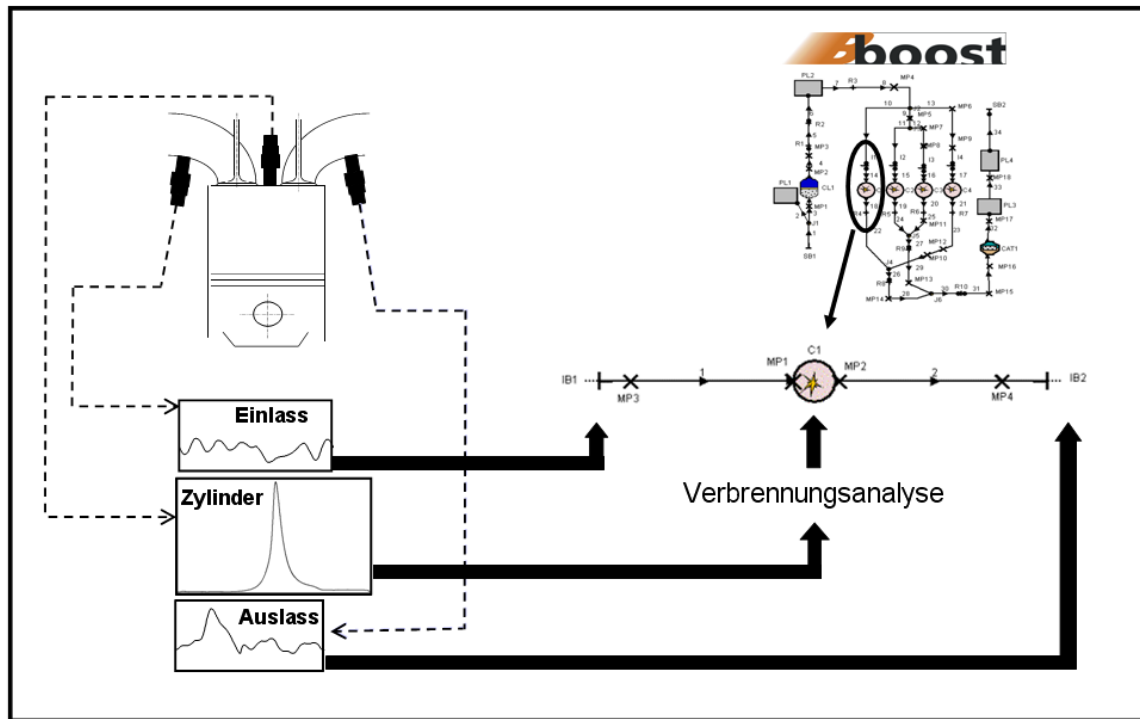


Bild 4: Arbeitsweise GCA

AVL-GCA kann als „virtueller Sensor“ und auch als Auslegungswerkzeug zur Optimierung des gesamtmotorischen Prozesses betrachtet werden. AVL-GCA besteht aus zwei Rechenteilen. Zuerst wird eine Verbrennungsanalyse durchgeführt und anschließend findet die Ladungswechselanalyse statt, dieses Ergebnis wiederum wird erneut der Verbrennungsanalyse zugeführt. Nun können Messung und Rechnung miteinander verglichen werden, und bei hinreichender Übereinstimmung liegen eine detaillierte Analyse und eine Energiebilanz des kompletten Prozesses vor.

AVL-GCA wird mit AVL IndiCom eingesetzt und liefert am Prüfstand die Information online. Die offline-Version mit AVL CONCERTO wird verwendet, um auch im Nachhinein erweiterte Analysen durchführen zu können.

4.1.2 Transienter Betrieb

Während im stationären Betrieb die Druckkurven zu Beginn und am Ende des Zyklus weitgehend übereinstimmen und mehrere Schleifen zum Zweck der Konvergenz unter dieser Randbedingung gerechnet werden, kann dieses Verfahren im dynamischen Betrieb nicht angewendet werden.

Damit die Berechnungen ausreichend konvergieren und die Unstetigkeit bewältigt werden kann, werden Druck und Temperatur an den Grenzen Einlass und Auslass für mehrere Zyklen auf konstante Werte gesetzt bevor dann die gemessenen Verläufe analysiert werden. Dies ist in Bild 5 dargestellt.

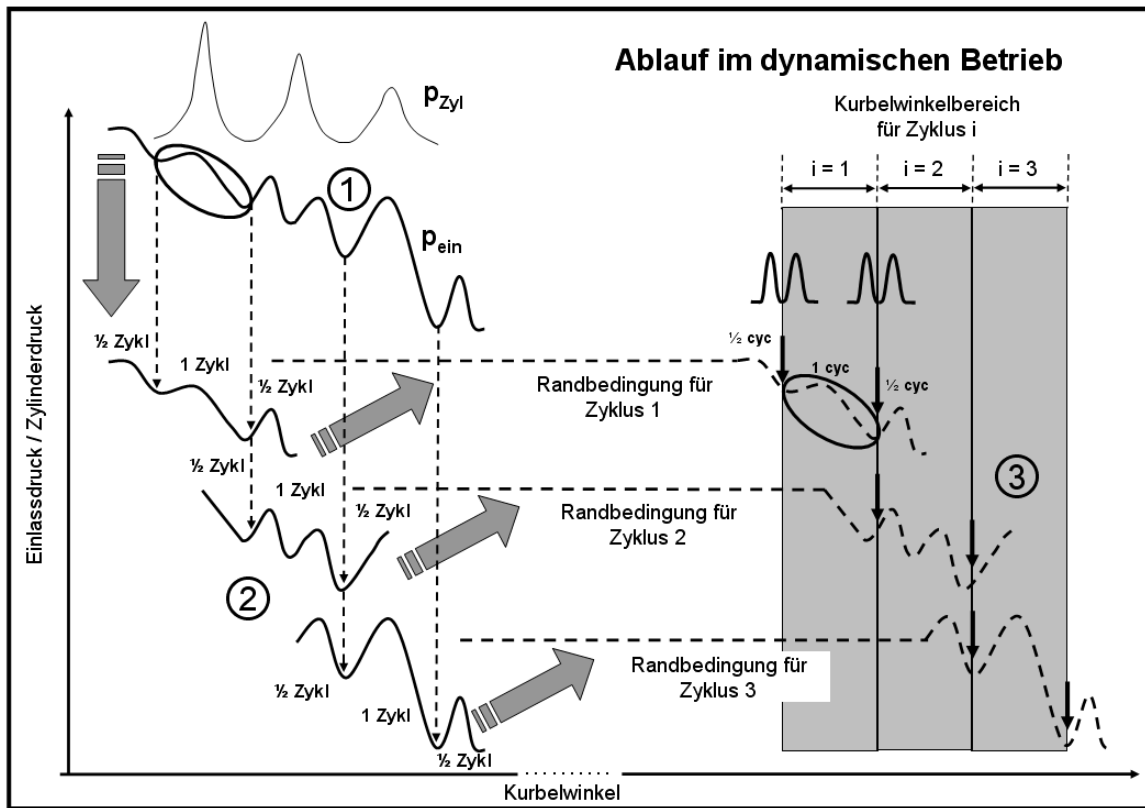


Bild 5: Randbedingungen für transiente Rechnungen in AVL-GCA, Druckverläufe im Einlass und im Auslass

Kurve „1“ zeigt schematisch die Druckverläufe von Zylinder und Einlass über einige Zyklen. Die Kurven „2“: oben / Mitte / unten bestehen aus jeweils 2 Zyklen, die aus dem gesamten Kurvenverlauf ausgeschnitten sind. Es sind dies die einzelnen Zyklen aus dem gesamten transienten Betrieb. Es werden nun entsprechend Motorzyklen mit konstantem Druck und konstanter Temperatur sowie ein halbes Arbeitsspiel aus dem Gesamtverlauf vorgeschaltet, um das Modell konstant einzuschwingen bevor die transiente Analyse „3“ angewandt wird. Auf diese

Weise wird der gesamte transiente Verlauf untersucht. Näheres zur Analyse im dynamischen Betrieb wurde bereits in [1] vorgestellt. Für den transienten Betrieb wurden hierin Ergebnisse aus AVL-BOOST Rechnungen (synthetische Daten) zugrunde gelegt.

4.2 Datenerfassung am Prüfstand

Die Erfassung aller benötigten Größen am Prüfstand erfordert eine gewisse Anzahl schneller Messkanäle im Indiziergerät. Im vorliegenden Fall werden drei miteinander gekoppelte AVL-Indimodule verwendet [Bild 6].

Die Messwerte im Einzelnen:

- die vier Zylinderdruckverläufe und die beiden dynamischen Drücke im Saugrohr und im Auslass werden über Ladungsverstärker (microIFEM) als Analogsignale zugeführt
- die vier Verdichtungsverhältnisse, die ja als Steuergrößen vorliegen, werden aus der ECU ausgelesen und über das Applikationssystem (INCA) der Datenerfassung übermittelt. Gleichmaßen werden statischer Einlassdruck und Kraftstoffdruck im Rail behandelt
- die Stellgrößen der Phasensteller für die beiden Nockenwellen liegen im Steuer-PC vor und werden wie das Zyklus aufgelöste Stromsignal „Kraftstoffmasse“ direkt zum Indiziergerät geführt

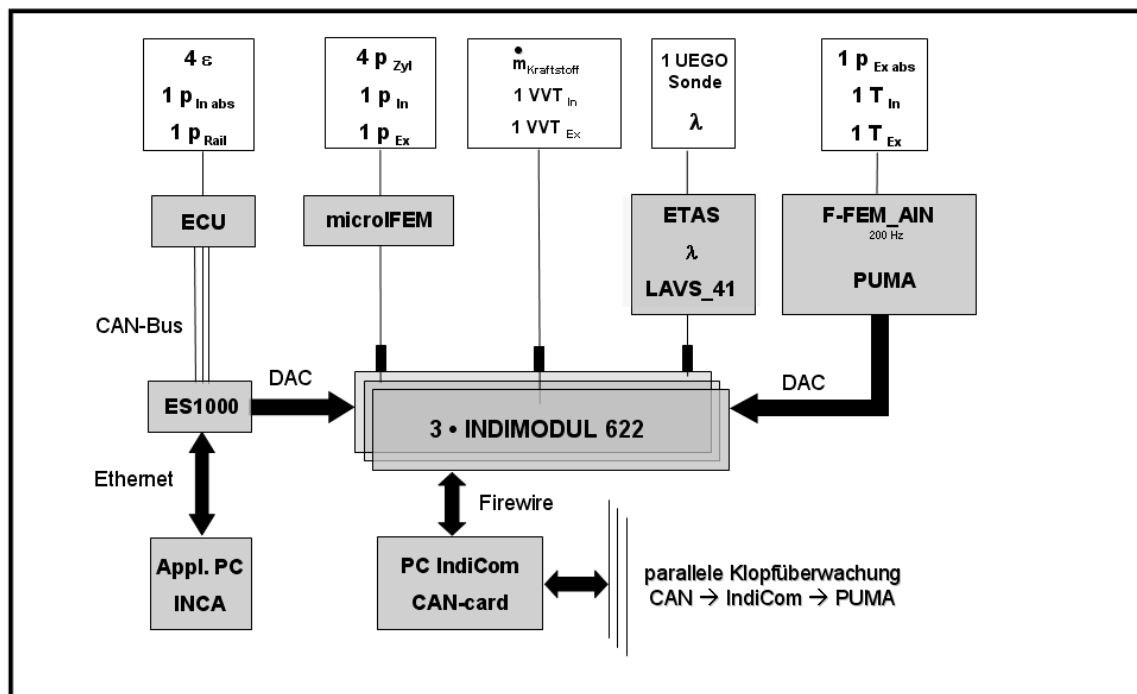


Bild 6: Messtechnik und Datentransfer am Prüfstand

- das Signal der schnellen Lambda-Sonde, die vor Turbineneintritt installiert ist, gelangt über ETAS zum Indiziergerät. Mit Kenntnis des Kraftstoffmassenstroms dient es der Berechnung des dynamischen Luftmassenstroms
- statischer Auslassdruck sowie die Einlass- und Auslasstemperatur werden im Prüfstandsmodul PUMA-F-FEM in Analogsignale gewandelt und dann zur Erfassung weitergeleitet

Die Nullpunktkorrektur des Zylinderdruckes wird dynamisch im Indiziergerät während des jeweiligen Zyklus korrigiert.

Der dynamische Saugrohrdruck wird nicht über den langsamen statischen Druck $p_{\text{ein, abs}}$ angepasst. Vielmehr wird er auf das Niveau des Zylinderdrucks innerhalb der Phase „Einlass offen“ (EÖ→ES) verschoben, sodass sich hier beide Druckverläufe entsprechen. Die Korrektur wird nahe ES durchgeführt, weil die Druckdifferenz zwischen Einlasskanal und Brennraum hier typisch besonders klein ist.

Aufgrund möglicher Lastwechseldrift des Zylinderdruckaufnehmers kann dieses Verfahren zur Korrektur des Auslassdruckverlaufs $p_{\text{aus, abs}}$ nicht angewendet werden. Hier wird der Druckverlauf derart korrigiert, dass Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den gerechneten Werten bezüglich des indizierten Mitteldruckes p_{mi} vorliegt.

Es werden somit 19 Analogsignale im Indiziergerät erfasst. Neben der dynamischen Analyse des betrachteten Zylinders werden alle vier Verdichtungsverhältnisse und auch die Zylinderdruckverläufe aller vier Zylinder zur Motorüberwachung erfasst und an PUMA geschickt. Parallel dazu wird über das Indiziergerät mittels CAN-Bus auch Klopfen überwacht.

5. Motorbetrieb

5.1 Versuchsreihen

Für den Betrieb wurde im Motorkennfeld der hinsichtlich Stabilität und Fahrbarkeit kritische Bereich niedriger Drehzahl gewählt. Zunächst wurde im Leerlauf eine stationäre Messung gefahren, dann dynamisch erfasst während auf Volllast beschleunigt wurde und dort dann wieder eine stationäre Messung gefahren, siehe Bild 7. Es wurden drei Drehzahlschnitte gefahren.

Im Kennfeld ist zum Vergleich auch die Volllastkurve eines Turbo-Aufgeladenen Direkteinspritzenden Ottomotors mit Ladeluftkühlung (TGDI) eingetragen.

5.2 Ergebnisse im stationären Betrieb

Die Messungen, die im stationären Betrieb bei Leerlauf und bei Volllast gefahren wurden, sowie Ergebnisse, die nach der entsprechenden AVL-GCA Rechnung vorlagen, seien hier nicht vorgestellt. Ladungswechselanalyse im Stationärbetrieb mittels AVL-GCA wurde bereits auf mehreren Veranstaltungen [2, 3] präsentiert. Eine zwingende Voraussetzung für die Stimmigkeit der Ergebnisse im transienten Betrieb ist die sorgfältige Abstimmung der Parameter des Ladungswechsels und der Verbrennung.

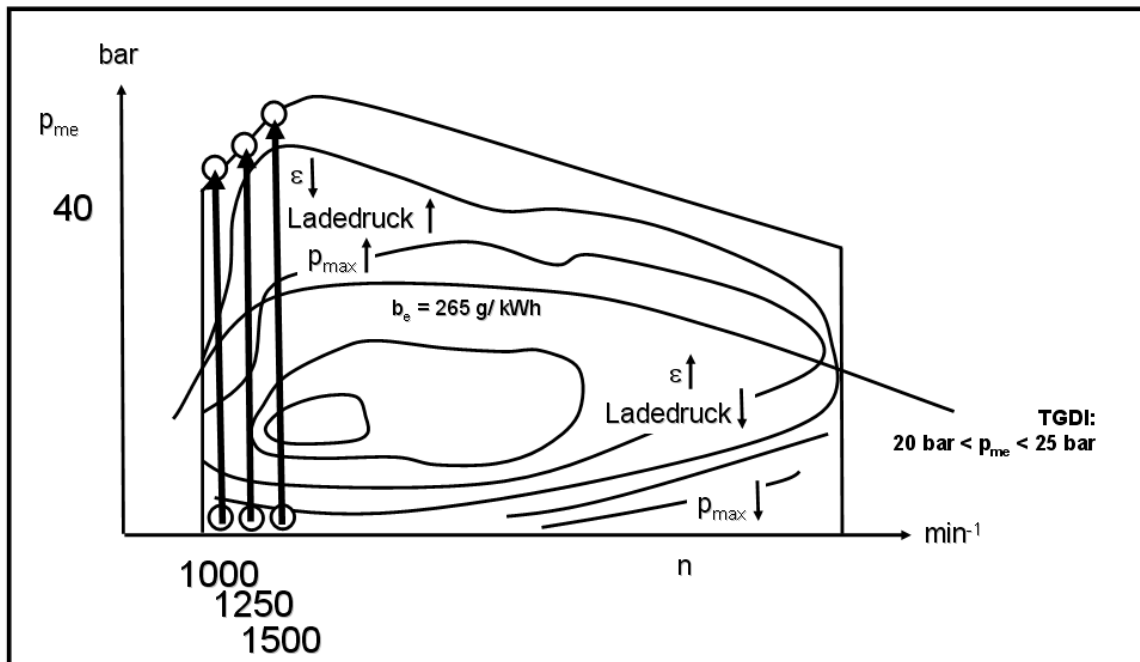


Bild 7: Versuchsreihen im Kennfeld

5.3 Ergebnisse im transienten Betrieb

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus laufender Entwicklungsarbeit und stellen einen mittels klassischer Kalibriermethodik erzielten Zwischenstand dar. Die Analyse mit AVL-GCA wurde angesetzt, um durch eine gesamthafte Betrachtung aller messbaren und modellierbaren Abläufe gezielte Hinweise für weitere Optimierungsschritte dieses komplexen Systems zu erhalten.

5.3.1 Hochdruckphase

Zum ersten Mal wird die transiente Analyse auf der Basis von Messungen am Prüfstand mit AVL-GCA vorgestellt. Von besonderer Bedeutung hierbei ist, dass die Brennverlaufanalyse *instationär* gerechnet ist. Es kommt dabei insbesondere

auf die genaue Bestimmung der Masse im Zylinder an, weil letztlich diese die wichtigste Größe für die Analyse des gesamten Prozesses ist. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (1)$$

kann der Temperaturverlauf gerechnet werden. Er hat erheblichen Einfluss auf die Stoffeigenschaften der beteiligten Partner. Auf diese Weise wird der Brennverlauf dynamisch ermittelt. Im Bild 8 sind Energieumsatz und Brenndauer gestrichelt aufgetragen.

Weiterhin ist im Bild der Verlauf des indizierten Mitteldrucks p_{mi} dargestellt. Man erkennt den steilen Gradienten bis zur Saugvollast $p_{mi} \sim 10$ bar, dann ab Arbeitsspiel 20 aber (ASP 20) flacht die Kurve ab, und erst nach ASP 50 wird der Drehmomentaufbau wieder größer. Die Optimierungsaufgabe lautet nun, den M_d -Anstieg zu linearisieren und so die Zeit bis zum Erreichen des Ziel-Drehmoments zu reduzieren.

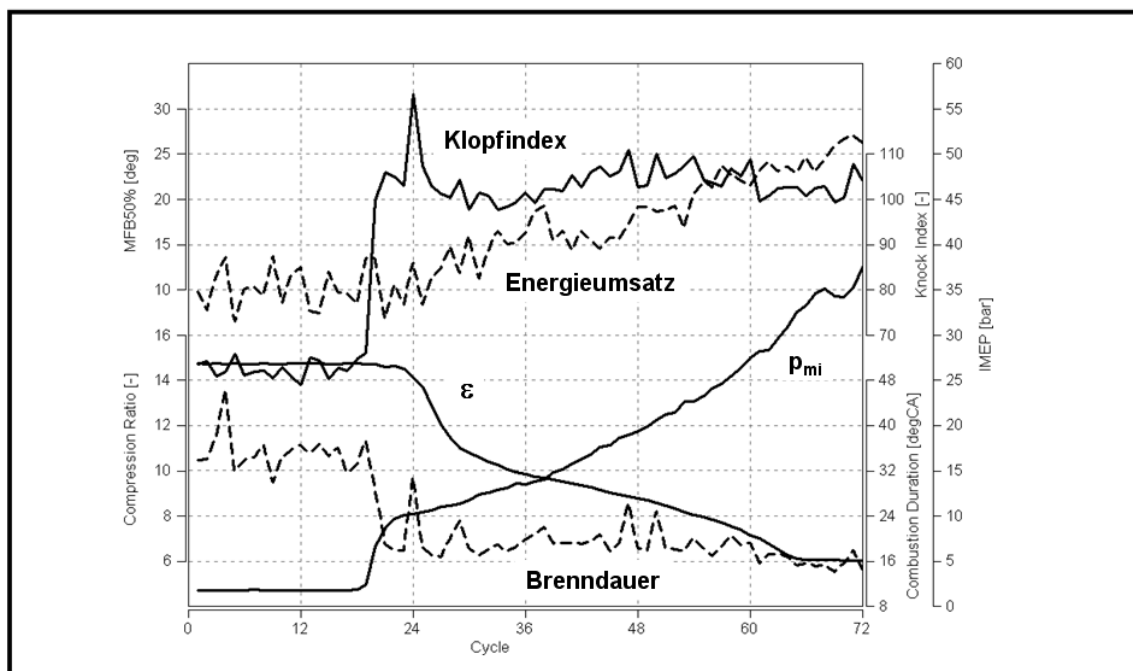


Bild 8: Hochdruckphase beim Lastsprung

Im Bild 8 ist auch der Verlauf des Verdichtungsverhältnisses ϵ_{th} dargestellt, dessen Einfluss bereits in Bild 4 erläutert ist. In AVL-GCA werden während der Verdichtungsphase gemessener und gerechneter Zylinderdruckverlauf für die Berechnung des thermodynamischen ϵ_{th} miteinander verglichen. Dies ist von Vorteil, weil zwar die Stellgröße für ϵ im Applikationssystem für die Verstellung von ϵ vorliegt, siehe Bild 6, diese Größe jedoch nicht zyklussynchron ist. Durch die Rechnung steht dieser Wert in jedem Zyklus zur Verfügung.

Grundsätzlich ermöglicht die Kalibrierung zwei Ansätze zur Beeinflussung des transienten Drehmoments:

- a) Spätstellen der Zündung zur Erhöhung der Abgasenthalpie. Die Turbine muss schneller beschleunigt werden, um mehr Luft vom Verdichter in den Brennraum durchzusetzen. Hierfür wird höhere Abgasenthalpie H_{Abgas} benötigt, dies geschieht aber auf Kosten des Drehmomentes, weil dazu die Zündung später gestellt werden muss. Eine derartige Steigerung des Aufladewirkungsgrades hat allerdings eine Reduktion des Hochdruckwirkungsgrades zur Folge und kann sich negativ auf das Motormoment auswirken. Wenn dann schließlich genügend Luftmasse im Zylinder zur Verfügung steht, kann der ZZP wieder in Richtung „früh“ gestellt werden, der Drehmomentgradient steigt wieder. Dies jedoch führt zu einem konkaven Verlauf p_{mi} , die Kurve „hängt durch“ und wird hinsichtlich Fahrbarkeit sehr deutlich wie ein „Turboloch“ empfunden. Diese Maßnahme kommt daher nicht für weitere Optimierungen in Betracht.
- b) Konsequenter Betrieb an der Klopfgrenze. Egal wie viel Luft im Zylinder ist, gilt es, immer unmittelbar an der Klopfgrenze zu fahren, so dass die umgesetzte Energie im Wesentlichen in Drehmoment und erst in zweiter Linie in Abgasenthalpie gewandelt wird. Diese Strategie wird auch beim Tip-In des MCE-5 VCRI-Motors angewandt. Hier liegt ein bestimmtes VCRI-Verstellschema vor, das aus den Optimalwerten der Stationärkalibrierung herrührt. Es wird also jeder Zyklus dicht an der Klopfgrenze betrieben, und das, obwohl es sehr viele Stellgrößen gibt. In Bild 8 ist der Klopfindex, berechnet in AVL-GCA, dargestellt, und man erkennt, dass von Beginn des Lastsprungs an konsequent an der Klopfgrenze gefahren wird. Ein Zyklus zeigt sogar deutliches Klopfen.

Der Stellparameter VCRI, also das variable Verdichtungsverhältnis ε des Motors MCE-5, ermöglicht nun, zusätzlich in die Balance von Auflade- und Hochdruckwirkungsgrad einzugreifen.

Je höher ε , umso empfindlicher reagiert der Motor auf Klopfen, dies zwingt zur Rücknahme der Zündung. Der Hochdruckwirkungsgrad reagiert jedoch stärker auf ε als auf die Verbrennungslage. Die Optimierung dieser Wechselwirkung wird Gegenstand der folgenden Entwicklungsschritte beim MCE-5 VCRI-Motor sein.

Die Zusammenführung und gesamthafte Verarbeitung aller Messgrößen und Betriebswerte in AVL-GCA ermöglichen gegenüber der klassischen Messwert-erfassung und -verarbeitung eine zeitsparende und zielgerichtete Analyse einer Vielzahl an Versuchsvarianten.

5.3.2 Ladungswechselphase

Bemerkenswert an Bild 9 ist, dass das Brennraumlambda λ_{Zyl} als Resultatwert je Zyklus vorliegt. Die Luftmasse m_L im Zylinder wird in der Ladungswechselphase aus den Druckverläufen der Einlass- und Auslasskanalsensoren, sowie aus dem

Zylinderdruckverlauf und entsprechender Korrektur, wie oben beschrieben, ermittelt. Der Brennverlauf (RoHR) aus der Hochdruckphase, liefert die freigesetzte Energie (MFB), die in Verbindung mit dem unteren Heizwert H_u letztlich die Kraftstoffmasse des Zyklus ausweist. Das dann aus dem Quotienten berechnete $\lambda_{\text{Abgas-GCA}}$ eilt zeitlich dem gemessenen λ_{vTurb} vor Turbine um einige ASP voraus. $\lambda_{\text{Abgas-GCA}}$ ist somit zyklussynchron und stimmt im Verlauf mit λ_{vTurb} überein.

Man erkennt, dass unmittelbar vor Tip-In der Restgasgehalt ca. 15% beträgt. Bis zur Saugvolllast (ASP20) sinkt dieser Wert auf 5%, verharrt dann aber hier für einige Zyklen. Erst wenn der Spülgrad aufgrund Ventilüberschneidung (VÜ) (Bild 9, oben) ca. 10% übersteigt, sinkt der Restgasgehalt auf 0%. Ab diesem Zyklus (ASP 30) ist die VÜ maximal. Wenn sich in der weiteren Folge (ASP 50) ein spülendes Druckgefälle $p_{\text{aus}} - p_{\text{ein}} < 0$ einstellt, beginnen auch das Drehmoment M_d , bzw. der Mitteldruck p_{mi} stärker zu steigen, hier wird sogar positive Ladungswechselerarbeit geleistet.

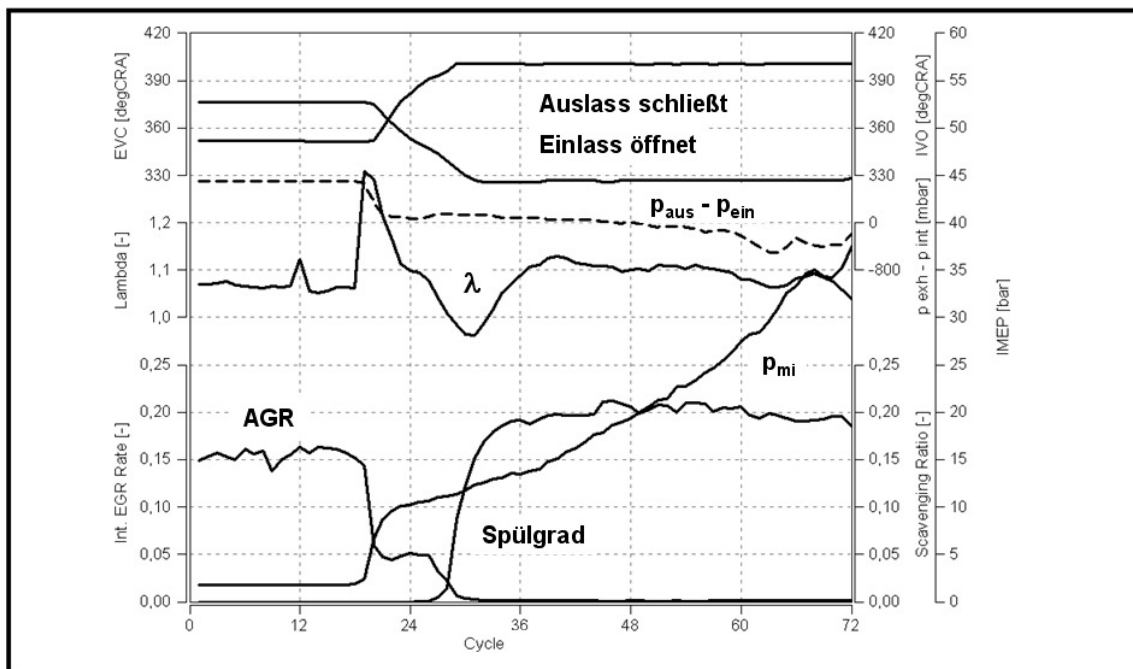


Bild 9: Ladungswechselphase beim Lastsprung

Der Lastsprung lässt sich durch verschiedene Maßnahmen verbessern. Zum einen dauert es einige Zyklen bis AGR auf 0% gefallen ist, hier kann entsprechende Veränderung der Steuerzeiten positiven Einfluss haben, zum anderen verhindert das Druckgefälle $p_{\text{aus}} - p_{\text{ein}} > 0$ sehr lange ein positives Spülgefälle; diese Druckdifferenz früher umzukehren, würde zusätzlichen Beitrag zur Steigerung von M_d liefern.

Auch ist zu überprüfen, ob nicht der bereits sehr hohe Spülgrad in der frühen Phase des Hochlaufes ein Senken der Abgasenthalpie H_{Abgas} aufgrund übermäßiger Abkühlung von T_{Abgas} verursacht, und in dieser Phase doch besser mit geringerer Ventilüberschneidung gefahren werden sollte. Im nächsten Entwicklungsschritt sind daher die genannten Einzelmaßnahmen hinsichtlich ihrer Effekte am Prüfstand unter Einsatz der beschriebenen Analysemöglichkeiten mit AVL-GCA zu verifizieren und für ein optimales Ergebnis hinsichtlich Linearität des M_d -Aufbaus zu kalibrieren.

6. Zusammenfassung

Die Analyse der laufenden Entwicklungsarbeiten mit AVL-GCA zeigt einerseits einen bereits brauchbaren Stand der Motorkalibrierung, andererseits weisen sie aber auch auf weiteres Verbesserungspotential für die transiente Kalibrierung hin. Das betrifft insbesondere die Restgasausspülung im Zeitbereich unmittelbar nach dem Erreichen der Saugvolllast, die Abstimmung des Kraftstoff-Luftverhältnisses in bestimmten Bereichen des Spülens, die Balance von Spülgrad und Abgastemperatur sowie die Steuerung des Zündwinkels.

Diese Hinweise werden im laufenden Entwicklungsprogramm mit dem Ziel verifiziert, den transienten Aufbau des Mitteldrucks noch harmonischer zu gestalten. Die hervorragenden Gradienten im Drehmoment wie sie besonders in der zweiten Hälfte des Tip-In erzielt wurden, gilt es dann auch in den ersten Abschnitt des Lastsprungs zu übertragen, der für sich allein gesehen bereits im oberen Bereich der besten einstufig aufgeladenen Entwicklungsmotoren liegt.

Literatur

- [1] Durch Messung unterstützte thermodynamische Analyse von Zylinder internen Vorgängen unter transienten Bedingungen, Dr.-Ing. Thomas Leifert, Fernando Moreno Nevado, Dr. Robert Fairbrother, alle AVL List GmbH, Graz, 8. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 2008.
- [2] Erweiterte Thermodynamische Analyse mittels AVL-GCA zur effektiven Unterstützung der Entwicklung und Kalibrierung von Verbrennungsmotoren, Dr.-Ing. Thomas Leifert, Fernando Moreno Nevado, Dr. Robert Fairbrother, alle AVL List GmbH, Graz, Tagung Motorprozesssimulation und Aufladung II, HdT, IAV & expert verlag, 2007.
- [3] Genaue Bestimmung wichtiger Ladungswechselfparameter direkt am Prüfstand auf Basis vorhandener Messwerte, Dr.-Ing. Thomas Leifert, Fernando Moreno Nevado, Dr. Robert Fairbrother, alle AVL List GmbH, Graz, Ladungswechsel im Verbrennungsmotor, MTZ-Konferenz, 2007.