

# Durch Messung unterstützte thermodynamische Analyse von Zylinder internen Vorgängen unter transienten Bedingungen

(Verbrennungs- und Ladungswechselanalyse von transientem Motorbetrieb am Prüfstand)

Measurement supported thermodynamic analysis of cylinder internal processes under transient conditions (Combustion and Gas Exchange Analysis of Transient Engine Cycles at the Test Bed)

> Dr. T. Leifert, Dr. R. Fairbrother, F. Moreno Nevado AVL List GmbH, Graz, Österreich

<u>Hinweis:</u> Alle Berechnung in diesem Paper sind mit AVL-CONCERTO V4.0 und AVL- BOOST V5.1. durchgeführt <u>Note:</u> All calculations shown in this paper have been performed with AVL CONCERTO V4.0 and AVL-BOOST V5.1.



# 1 Einleitung

Mit der Kombination von Messung und Simulation gelingt der Zugang zu wichtigen Parameter höchst genau. Verbrennungsund Ladungswechselanalyse mit AVL-GCA hat sich für detaillierte Analyse von thermodynamischen Prozessen im Zylinder bei Stationärem Betrieb als bewährtes Tool erwiesen. Solch eine Analyse bietet eine Vielzahl von Anwendungsgebieten im Bereich thermodynamischer Entwicklung oder für ECU Kalibrieraufgaben, die in [1] und [2] ausführlich beschrieben sind.

Bei PKW-Anwendungen - Diesel und Otto heben aktuelle Entwicklungstrends die Bedeutung von instationärem Betrieb hervor, da hier einige wichtige Parameter (Drehzahl, Last, Ventilsteuerzeit, Luftverhältnis, u.s.w.) betroffen und von großem Einfluß sind. Der wachsende Marktanteil von Motoren mit variablen Ventiltrieb, bei denen die Zusammensetzung des Arbeitsgases signifikant variieren kann, die Einführung von Hybridsystemen mit "Start/Stop"-Strategie, der Erfolg des Downsizing-Konzeptes, bei dem die Kundenakzeptanz sehr eng mit dem Drehmomentverhalten verbunden ist und das Wiederaufleben von geschichteten GDI-Verbrennungssystemen mit breiterem Luftverhältnisbereich sind nur einige Beispiele, die diesen Trend bestätigen. Weiterhin sind aktuelle state-of-the-art ECU-Kalibriermethoden (in [3] beschrieben), die für die Bewältigung der immer größer werdenden Komplexität der ECU-Funktionen benötigt werden, nicht mehr auf diskrete (Schritt-für-Schritt) Anpassungen der Kontrollvariablen sondern auf kontinuierliche Variation angewiesen.

Um dieser Situation zu entsprechen wurde die AVL-GCA weiterentwickelt, um zyklusgelöste (Zyklus für Zyklus) eine erweiterte Analyse der Prozesse im Zylinder bei transientem Betrieb zu ermöglichen. Nach einer kurzen Vorstellung von AVL-GCA behandelt dieses Paper zuerst die Vorgehensweise, um Ladungswechsel- und Verbrennungsanalyse bei hochdynamischen Prozessen anzuwenden. Dies wird anschließend durch Kontrolle der Übereinstimmung zwischen AVL-GCA und der erweiterten Software für 1D-Motorzyklus- und Ladungswechselsimulation AVL-BOOST überprüft.

Ein Applikationsbeispiel, basierend auf "Tip-In" Messungen, die am Prüfstand an einem turboaufgeladenen Direkteinspritzer durchgeführt wurden, bietet Einblick in die Analyse transienter Motorprozesse, die durch diese neue Herangehensweise ermöglicht wird.

# 2 Das Werkzeug AVL-GCA

Die zahlreichen physikalischen Prozesse, die in Verbrennungsmotoren stattfinden, stehen in enger Wechselwirkung zueinander, was das Verstehen und Kontrollieren dieser Prozesse erschwert. Indem Rechen-Werkzeuge die Entkoppelung dieser wechselseitigen Abhängigkeit ermöglichen, unterstützen sie den Ingenieur beim Verständnis des Einflusses einzelner Parameter und helfen das Motorverhalten zu verstehen, was folglich zur Verkürzung von Testzeiten führt. Dieser Vorteil motivierte die Entwicklung von AVL-GCA (Ladungswechsel- und Verbrennungsanalyse). AVL-GCA ist das erweiterte thermodynamische Analysemodul und wird sowohl in IndiCom am Prüfstand als auch mit CONCERTO als flexible Software zur Datenerfassung und Datennachverarbeitung betrieben. AVL-GCA basiert auf dem selben Berechnungsprinzip wie die Advanced Software für eindimensionale Motorzyklus- und Ladungswechselsimulation AVL-BOOST und verwendet ein reduziertes Simulationsmodel mit internen Systemgrenzen. Diese Grenzen (Elemente aus AVL-BOOST) ermöglichen Randbedingungen für das Berechnungs-

# 1 Introduction

By combining measurements and simulation, it is known that highly relevant engine parameters can be accurately assessed. As a matter of fact, combustion and gas exchange analysis as performed with AVL-GCA is nowadays considered as an established tool to perform in-depth analysis of cylinder internal thermodynamic processes under steady state operation. Such an analysis offers a variety of applications in the field of thermodynamic development or ECU calibration tasks that have been exhaustively reported in [1] and [2].

For passenger car applications and both compression and spark ignition engines, current development trends tend to increase the relevance of instationary operation as far as some of the main engine parameters (speed, load, valve timings, A/F ratio, etc...) are concerned. The increasing market share of variable valve train engines which can significantly vary the composition of the trapped mixture, the introduction of hybrid systems that features "start/stop" functionality, the success of downsized engine concepts whose customer acceptance is closely linked to torque build-up behavior and the resurgence of GDI stratified combustion system that extend the range of variation of A/F ratio are only a few examples evidencing this trend. Moreover state of the art ECU calibration methods as described in [3] that are required when intending to efficiently manage the growing complexity of ECU functions no longer relies on discrete (step-by-step) adjustments of the control variables but in their continuous variation.

To respond to this situation, AVL-GCA has been further developed in order to allow for a cycle resolved (cycle-by-cycle) advanced thermodynamic analysis of cylinder internal processes under transient operation. After briefly introducing AVL-GCA, the present paper will first aim at describing the approach selected to apply gas exchange and combustion analysis to highly dynamic processes. Subsequently, this approach is validated by checking the consistency between AVL-GCA and the AVL advanced software for one dimensional engine cycle and gas exchange simulation BOOST.

An application example based on "tip-in" measurements performed at the engine test bed on a turbocharged direct injection engine will be used in a coming paper to illustrate the degree of insight in the analysis of transient engine processes made available through this new approach.

# 2 The Tool AVL-GCA

The numerous physical processes taking place in internal combustion engines are highly interrelated. These interrelations make it harder to understand and control these processes. Because they enable these mutual relationships to be decoupled, calculation tools efficiently support engineers in assessing the influence of the main engine parameters and in better understanding of the engine behaviour: this consequently helps to reduce testing time. This asset was one of the motivations for the development of AVL-GCA (Gas exchange and Combustion Analysis). AVL-GCA is the advanced thermodynamic analysis module available in IndiCom and CONCERTO - respectively AVL flexible data acquisition and data post-processing software. AVL-GCA is based on the same calculation kernel as AVL advanced software for one dimensional engine cycle and gas exchange simulation BOOST and uses a reduced simulation model featuring internal boundary elements. These elements allow boundary conditions for the calculation model to be specified directly in the last cross section of a pipe where a model begins or ends. It is



model direkt im Querschnitt des Kanals zu spezifizieren, wo das Model beginnt bzw. aufhört. Hierbei soll erwähnt werden, dass diese Grenzen Rückströmung berücksichtigen können, indem sie ein "Reservoir" verwenden, das die Eigenschaften des Gases (Masse und Zusammensetzung), das in das Element strömt, speichert. Dieses Reservoir wird verwendet für die Ermittlung der

Eigenschaften des Gases, das in den Kanal zurückfließt sobald die Strömung umdreht. Sobald das Reservoir leer ist, werden die definierten Eigenschaften für das Element verwendet. Daher sollte das generierte Model als vereinfachtes Sub-Model des Motors angesehen werden, dass sein Augenmerk auf die Simulation der Phänomene zwischen den Niederdruck-Indiziersensoren (sowohl am Ein- als auch Auslass eines Zylinders) legt, siehe <u>Abbildung 1</u>.

Diese Vorgehensweise reduziert signifikant die Berechnungsdauer und den Kalibrierungsaufwand und erhöht zugleich die Genauigkeit der Beschreibung der zylinderinternen Vorgänge. Zusätzlich ermöglicht die verkürzte Rechnendauer eine direkte Einbindung in die Prüfstandsautomatisierung. Die Annäherung von Simulation und Messung unterstützt die Reduktion von Motorentwicklungszeiten und Kalibrierung und wurde daher in AVL Motorentwicklungsprozesse integriert.

Auf Grund des kürzlich ergänzten Moduls Energieverlustanalyse kann AVL-GCA für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet werden. <u>Abbildung 2</u> zeigt einen Überblick der Hauptanwendungen der AVL-GCA.

Hauptziel der Verbrennungsana-

lyse ist die Ermittlung des Brennverlaufs (rate of heat release ROHR) aus der gemessenen Zylinderdruckkurve. Dies wird durch die Einbeziehung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik mit einem 1- oder 2-Zonen- Models erreicht. Niederdruckkurven werden für diese Analyse nicht benötigt. Das "General Species Feature" von BOOST ermöglicht dem Benutzer die willkürliche Definition der Zusammensetzung anhand einer Komponentenliste (O2, N2, CO, H2O, Kraftstoff\_1, Kraftstoff \_2, u.s.w.). Die Gemischbildung basiert auf der Berechnung des kinetischen Gleichgewichts und deren Eigenschaften werden vom NASA Polynom abgeleitet. Der neue "Multikomponenten Kraftstoff" ermöglicht ähnlich dem "general species transport" Modell ermöglicht dem Benutzer die Verwendung von Kraftstoffen, die aus einer willkürlichen Anzahl und Typen von chemischen Arten besteht. Diese Eigenschaften lösen das Problem der Wahl der richtigen Gemischeigenschaften, werden alternative oder synthetische Kraftstoffe [4] verwendet. Die Analyse von Ethanolworth mentioning that these elements can handle backflow as it uses a "reservoir" to store the details of the gases that flow back into the boundary. This reservoir is then used to determine the properties of the gases that flow back into the pipe once the flow reverses. As soon as the reservoir is empty the defined properties for the boundary are used. The model thus generated should



<u>Abbildung 1:</u> Arbeitsprinzip AVL-GCA <u>Figure 1:</u> Working principle of AVL-GCA.

GCA		
Combustion	Gas exchange	Energy losses
analysis	analysis	analysis
Calculation of	Calculation of	Calculation of
ROHR	Mass flows at the valves	• Real charge eff.loss
Vibe parameters	Internal EGR rate	• Combustion position eff. loss
Energy balance	Internal EGR sources	• Unburned eff. loss
Constant volume efficiency	Volumetric efficiency	• Real ROHR eff. loss
Combustion noise	Trapping efficiency	• Mixture properties eff. loss
Wall heat losses	In-cylinder turbulence	• Wall heat eff. loss
etc	etc	• etc

Abbildung 2: AVL-GCA Anwendungsübersicht Figure 2: AVL-GCA Application overview

be considered as a simplified sub-model of the engine focusing on the simulation of the phenomena taking place between the low pressure indicating sensors (located at both the intake and exhaust of one cylinder). This is schematically shown in Figure 1.

The overall approach significantly reduces the calculation time and the calibration effort by simultaneously increasing the accuracy in the description of the in-cylinder processes. Moreover the reduced calculation time allows a direct implementation at the test bed. By bringing simulation and measurement closer together, AVL-GCA helps reduce engine development time and calibration and has been therefore integrated into AVL engine development process.

With the recent addition of the energy losses analysis module, AVL-GCA can now be considered as a tool for a large variety of applications. An overview of AVL-GCA main applications is shown in Figure 2.

The combustion analysis mainly aims at extracting the Rate of Heat Release (ROHR) curve from the measured in-cylinder pressure curve. This is done by integrating the first law of thermodynamics thanks to a 1 zone or 2 zone model. For this analysis the

low pressure indicating curves are not required. The "General Species Transport" feature of BOOST allows the user to arbitrarily define the gas composition among a given list of components  $(O_2, N_2, CO, H_2O, fuel_1, fuel_2, etc...)$ . The mixture composition is based on kinetic calculation of equilibrium and its properties are then derived from NASA polynomials. The new "Multi Component Fuel" related to the general species transport model enables the user to use fuels that are consisting of an arbitrary number and type of chemical species. These features inherently solve the problem of using the correct mixture properties when working with alternative or synthetic fuels [4]. The analysis of ethanol blends, such as E85, is therefore easier as the appropriate mixture properties are calculated "online" and no longer based on pre-calculated tables.



mischungen, wie E85, ist daher einfacher, da Gemischeigenschaften online berechnet werden und nicht mehr auf vorkalkulierten Tabellen beruhen.

Die Ergebnisse aus der Verbrennungsanalyse (Brennverlauf) werden der Ladungswechselanalyse zugeführt, um die Zylinderdruckkurve über den gesamten Zyklus zu berechnen (s. <u>Abbildung 12</u>). Einer der besonderen Effekte der Berechnung der Zylinderdruckkurve ist das erhöhte Vertrauen in die Indiziermessung. Dies ist mit Plausibilitätskontrollen durch den Vergleich der gemessenen zur berechneten Kurve möglich.

Die Strömung in den Kanälen zwischen den Positionen der Niederdruckaufnehmer und den Ventilen wird durch Lösung von nicht-linearen Differentialgleichungen ermittelt, die von der Kontinuitätsgleichung, der Impulserhaltung und der Energiegleichung unter Verwendung von numerischen Schemata [5], [6] abgeleitet sind. Die Bedingungen während der Verbrennung werden mittels Brennverlauf aus der Verbrennungsanalyse berechnet. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Analyse normalerweise Niederdruckindizierung (am Ein- und am Auslass) verlangt. Diese Analyse ist allerdings auch mit einem einzelnen Druckwert möglich. In diesem Fall werden die Ein- und Auslassdruckindizierkurven entsprechend durch die Mittelwerte des Drucks im Ein- und Auslass ersetzt. Es ist bekannt [7], dass diese Methode keine solch hohe Genauigkeits erreicht, wie iene, die bei ungünstigen Bedingungen (z.B große Ventilüberschneidung mit hohen Druckamplituden) Niederdruckindizierkurven verwendet.

Die Energieverlustanalyse wird zur Ermittlung einzelner Wirkungsgradverluste eines Motors herangezogen – der reale Zyklus wird mit dem idealen verglichen. Dies bedingt eine Anzahl von Simulationen, bei denen die aktuellen Betriebsbedingung und Verluste Schritt für Schritt aufgezeigt werden und die Ergebnisse mit dem jeweils vorigen Schritt verglichen werden. In [1] wurde solch eine Energieverlustanalyse angewandt, um bei einem turbogeladenen Ottomotor mit Direkteinspritzung und Einlassphasensteller den Grund für die Kraftstoffeinsparung bei Teillast mit interner AGR zu ermitteln.

## **3 AVL-GCA unter transienten Bedingungen**

#### 3.1 Das "Diskontinuitätsproblem"

Die Einbindung der Gleichungen, die aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik abgeleitet wurden, basieren auf numerischen Schemata [5, 6]. Dies trifft auch für die Modelle Wandwärmeübergang, Verbrennungsprozesse und Gasdynamik in den Kanälen zu. Diese numerische Methoden verlangen eine Anzahl von Schleifen, um ausreichende Konvergenz zu erreichen. Dies bedingt für AVL-GCA, dass die Berechnung mehrer Motorzyklen nötig ist. In BOOST wird Konvergenzskontrolle angewandt. Die Rechnung wird beendet, wenn das vorgegebene Kriterium erreicht ist. Konvergenz ist erreicht, wenn die Schwankung der Zyklus gemittelten Werte einiger Parameter in BOOST bei den letzten drei aufeinanderfolgenden Zyklen unter einen vorgeschriebene Schwellwert gesunken ist. Für AVL-GCA Berechnungen gilt, dass Konvegenz erreicht ist, wenn der pi-Unterschied der letzten Zyklen kleiner als 0,01 bar ist. Dieses Konvergenzkriterium garantiert, dass nur diejenigen erforderlichen Motorzyklen berechnet werden, die zur Erlangung der vorgeschriebenen Konvergenz nötig sind. Um die Berechnungen über mehrere Zyklen durchführen zu können, werden die Ein- und Auslassdruckkurven sooft zyklisch wiederholt, bis erwünschte Konvergenz erreicht ist. Bei transienten Bedingungen ist diese Methode nicht mehr brauchbar, da ein Diskontinuitätsproblem auftritt.

The results of the combustion analysis (ROHR) are feed to the Gas Exchange Analysis to perform the calculation of the in-cylinder pressure trace over the whole engine cycle (see figure 12). One of the most valuable "add-on" effects of this recalculation of the in-cylinder pressure curve is an increased reliability of the indicating measurements. This is possible by comparing the measured to the calculated pressure curve for plausibility checks. The flow in the ports between the low pressure transducer location and the valve is determined by solving the set of non-linear differential equations derived from the continuity equation, the conservation of the momentum and the energy equation using numerical schemes [5], [6]. The in-cylinder conditions during combustion are calculated by means of the rate of heat release delivered by the combustion analysis. It is worth mentioning that this analysis normally requires low pressure indicating (at the intake and at the exhaust). Nevertheless, this analysis is also possible with a single pressure value . In this case, the intake and exhaust pressure indicating curves are respectively replaced by the average value of the pressure in the intake or exhaust port. It is known [7] that this method does not reach a comparable level of accuracy as the one using the low pressure indicating curves when given adverse conditions (large valve overlap and high amplitudes in low pressure indicating curves for instance) are present.

The energy loss analysis is used to assess the various losses in efficiency for an engine in comparison to an ideal cycle. This involves a number of simulations where the actual operating conditions and losses are introduced step-by-step and the results compared to the previous step. In [1] such an energy loss analysis has been applied to the analysis of a turbocharged direct injection engine fitted with an intake camshaft phaser in order to investigate the reasons for the fuel economy improvements obtained by recirculating internal EGR at part load.

# 3 AVL-GCA under transient conditions

## 3.1 The "discontinuity" problem

The integration of the equations derived from the first law of thermodynamics for the cylinder element are based on numerical schemes [5], [6]. This is also true for the models for the wall heat transfer, the combustion process and for the gas dynamics in the pipes. These numerical approaches require a number of iterations in order to reach a sufficient level of convergence. This implies for a AVL-GCA analysis that the computation of several engine cycles is necessary. In BOOST, a convergence control can be performed in order to stop the calculation if a prescribed convergence criterion is fulfilled. The convergence criterion is that the variation of the cycle averaged values of some parameters in BOOST elements over the last three consecutive cycles is less than a prescribed threshold. For AVL-GCA computations, it has been decided that the calculations can be reasonably considered as converged when the IMEP difference over the last simulated cycles is lower than 0,01 bar. This convergence criterion ensures that only the number of engine cycles required to reach the required convergence is performed. To perform the calculations over several engine cycles, the intake and exhaust pressure curves are cyclically repeated over the number of cycles required to reach the desired convergence. Under transient conditions this method is no longer feasible as a disconti-



Abbildung 3 zeigt den Druckverlauf einer Reihe von Zyklen im Einlasskanal eines Ottomotors während der Startphase. Es fällt auf, dass die Änderung des Einlassdruckes von Beginn bis Ende des Zykluses in der Größenordnung von 100 mbar liegen kann.

Diese Druckschwankungen innerhalb eines Motorzykluses zeigen, dass die vorher beschriebene Methode zu einer Diskontinuität führen würde, wenn die Einlassdruckkurve über mehrere Zyklen wiederholt werden würde (<u>Abbildung 4</u>). Diese Diskontinuität würde nicht zur Konvergenz der Rechnung führen.

#### 3.2. Die gewählte Methode "Transientbetrieb"

Damit die Berechnungen ausreichend konvergieren und das Diskontinuitätsproblem bewältigt werden kann, werden Druck und Temperatur an den Grenzen Einlass und Auslass des reduzierten BOOST- Models für 10 Zyklen auf konstante Werte gesetzt bevor die gemessenen Verläufe auf die letzten zwei Zyklen angewandt werden. Dies ist in <u>Abbildung 5</u> dargestellt.

Kurve "1" zeigt schematisch die Druckverläufe von Zvlinder und Einlaß über einige Zyklen. Die Kurven "2": rot / blau / grün 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 10 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. Mit Hilfe dieser Methode werden Konvergenzkriterien für die Ladungswechselanalysen nicht weiter benötigt.



<u>Abbildung 3:</u> Einlassdruckverlauf im transienten Betrieb <u>Figure 3:</u> Intake pressure under transient operation



Figure 4: Discontinuity problem

<u>Abbildung 5:</u> Randbedingungen für transiente Berechnungen in AVL-GCA – Druckverläufe im Einlass und im Auslass <u>Figure 5:</u>

CRANKANGLE

Boundary conditions for transient calculations in AVL-GCA – pressure traces

nuity problem appears. Figure 3 shows the pressure in the intake manifold of a spark ignition engine during a number of cycles of a starting phase. It is noticeable that the variation of the intake pressure between the beginning and the end of a single engine cycle can be in the order of magnitude of 100 mbar.

This variation of the pressure within one single engine cycle implies that the approach described previously would lead to the appearance of a discontinuity when repeating the intake pressure curve from one cycle over several cycles (<u>Figure 4</u>). This discontinuity would prevent or impede the convergence of the calculation.

#### 3.2 Approach selected (transient operation)

To allow the calculations to reach a sufficient level of convergence and to solve this discontinuity problem, the pressure and temperature at both the intake and exhaust internal boundaries of the reduced BOOST model are set to constant values for 10 cycles before applying the measured profiles for the last two cycles. This is summarized in Figure 5. The curve "1" shows schematically the cylinder and intake pressure curves over a few engine cvcles at it has been measured. The set of curves "2" red / blue / green that features a length of two engine cycles have been obtained by splitting the intake pressure curve "1" and by adding on fictitious offset whose only goal is to ease the understanding. Finally the set of curves "3" shows the boundary conditions actually applied at one end of the model to perform the calculations of the three engine cycles under scope. Moreover the angle range used to postprocess the results of each of these cycles is shown at the right side. The 10 engine cycles with constant pressure and temperature are intended to settle the model before applying the transient boundary. With this



Eine Einschränkung bei dieser transienten Berechnungen ist, dass für einen gegebenen zu berechnenden Motorzyklus die Drehzahl konstant auf die mittlere Drehzahl dieses Zvklus gesetzt wird. Dank der Flexibilität von AVL-GCA bei der Handhabung der Ventilerhebungskurven kann die Öffnungsdauer der Ventile während eines Zykluses über Nockenwellensteller mittels einer "Streckfunktion" anpasst werden. Dieser Effekt ist proportional zur "phasing rate". Messungen der phasing rate an einer Einlassnockenwelle eines auf-



<u>Abbildung 6:</u> Phasenrate des Einlassphasensteller eines TGDI Motors bei einem NEDC Abgastest <u>Figure 6:</u> Phasing rate of the intake camshaft phaser of a TGDI engine on the NEDC emission test

geladenen Direkteinspritzers beim NEDC-Abgaszyklus (siehe <u>Abbildung 6</u>) zeigen, dass Werte über 150 °KW/s erreicht werden können. Diese Messungen wurden mit einer Abtastrate von 10 Hz durchgeführt. Bei einer Drehzahl von 1500 min<sup>-1</sup> würden solche hohe Werte einer phasing rate schon einen Offset bedeuten zwischen der Position, an der das Ventil schließen würde, wenn das Ventil sich öffnet und der Position, an der es sich effektiv bei 3 °KW schließt: dies bedeutet, dass innerhalb eines einzelnen Einlasstaktes die Nockenwelle um diesen Wert verschoben werden kann. Hinsichtlich hoher Phasingraten sind Gangwechsel und Lastwechsel im NEDC-Abgaszyklus besonders kritisch.

# 4 Gültigkeitprüfung von AVL-GCA bei transienten Bedingungen mit synthetischen Daten

Der erste Schritt für die Gültigkeitsprüfung der Methode Transientbetrieb ist der Gebrauch von Daten eines AVL-BOOST Modells. Hierfür wurde ein komplettes Motormodel verwendet und transient ausgeführt. Das Ergebnis dieser Modellrechnung wurde dann als Eingabesatz für AVL-GCA eingesetzt. Das verwendete BOOST- Motormodell stellt einen virtuellen Motor dar, die Verwendung synthetischer Daten hat folgende Vorteile:

- Die Daten sind ohne Messfehler und Rauschen
- Die Daten enthalten diejenigen Parameter, die normalerweise AVL-GCA liefert, wodurch die hohe Genauigkeit dieser Methode überprüft werden kann
- Die Übereinstimmung beider Tools unter transienten Bedingungen wird überprüft. Für stationären Betrieb wurde die Übereinstimmung bereits in [1] dargestellt.

Hierbei muss bedacht werden, dass es manchmal nicht zur perfekten Konsistenz kommt, da die Berechnungsprozesse von AVL-GCA (siehe Teil 4) und AVL-BOOST nicht komplett identisch sind. Ziel ist jedoch, dass der Grad an Übereinstimmung bei der Bestimmung der Hauptmotoparameter möglichst hoch ist.

#### 4.1 Transiente Berechnung in AVL-BOOST

Die Simulation transienter Prozesse in AVL-BOOST wie die des NECD-Abgaszyklus oder die einer Volllastbeschleunigung erfordern die Berücksichtigung dynamischen Verhaltens eines Zwei-Körper-Systems "Fahrzeug-Motor", die mit einer offenen- oder mit einer Rutschkupplung (<u>Abbildung 7</u>) abgekoppelt werden können. method the convergence criteria are no longer used in the gas exchange model.

One limitation to these transient calculations is that for a given engine cycle the engine speed is set constant and equal to the mean engine speed during this cycle. Thanks to the flexibility of AVL-GCA in the handling of the valve lift curves it is already feasible to account within one engine cycle for the shifting of the camshafts via a "stretching" function modifying the opening duration whose effect is propor-

tional to the phasing rate. Measurements of the phasing rate of the intake camshaft of direct injection turbocharged engine on the NEDC emission cycle as shown in <u>Figure 6</u> reveals that values over 150°/s can be reached. The measurements were performed with a sampling rate of 10 Hz. At an engine speed of 1500 rpm, such values of the phasing rate would already account for an offset between the position at which the valve would close when the valve opens and the position at which it effectively closes of 3°CA: That is to say that within a single intake stroke the camshaft can be shifted by this value. As far as high phasing rate is concerned, gear change phases on the NEDC emission cycle are the most critical.

# 4 Validation of AVL-GCA under transient conditions thanks to synthetic data

The first step to validate this transient approach is to use data from an AVL BOOST model. Therefore, a full engine model was built and used to perform a transient calculation. The output from this model was then used as input to the AVL-GCA analysis. The BOOST engine model was effectively used considered as a virtual engine. The use of synthetic data features the following assets:

- The data are totally free of measurement errors and noise.
- The data includes the parameters that are normally delivered by the AVL-GCA analysis: this allows the accuracy of the approach to be assessed.
- The consistency between both tools under transient conditions is checked. Under steady state conditions this consistency has already been shown in [1].

It is important to bear in mind that a perfect consistency may not be attained as the calculations processes of AVL-GCA (see paragraph 3.1) and AVL BOOST are not exactly the same. It is nonetheless hoped, that the level of accuracy to be reached in the determination of the main engine parameters will still be satisfying.

#### 4.1 Transient calculation in AVL BOOST

The simulation in AVL BOOST of transient processes such as the NEDC emission cycle or full load acceleration requires the consideration of the dynamic behavior of the two-body system vehicle and engine which can be decoupled by an open or slipping clutch as shown in <u>Figure 7</u>.



Das 1D-Motorsimulations- und Ladungswechselmodel Δ\/Ι -BOOST [7] enthält eine umfangreiche Reihe einzelner Komponenten, die miteinander flexibel kombiniert werden können. Elemente wie z.B. Rohre, Luftspeicher, Luftkühler, Filter, Anschlüsse, Zylinder, Injektor, Turbolader und Katalysator können für ein komplettes Motormodell einschließlich der Beschreibung aller Zylinder wie auch die des Ein- und Auslasssystems zusammensetzt werden. Die Ladungswechselsimulation zielt typischweise auf die Voraussage und die Optimierung von Liefergrad, Leistung, Drehmoment, Kraftstoffverbrauch oder Ansaugbzw./ Auspuffgeräusch. Das im vorliegenden Fall verwendete Modell (Abbildung 8) zeigt einen Einzvlinder 4-Takt Motorradmotor mit einem Hubraum VH = 500 cm<sup>3</sup>. Das Fahrmodell versucht eine spezifizierte Geschwindigkeit des Fahrzeugs einzuhalten, indem es das Lastsignal erfasst und in Abhängigkeit der Differenz zwischen der tatsächlichen und der gewünschten Geschwindigkeit regelt. Hierbei wird der "Fahrer"durch einem einfachen PID-Regler simuliert. So verwendet das elektronische Steuergerät das Lastsignal, um die Stellung der Drosselklappe wie in Abbildung 7 einzustellen.

Mit diesem Model wurde eine Volllastbeschleunigung berechnet. Einige der Rechenergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Hierbei sei noch einmal betont, dass die Berechnung mit AVL-BOOST alle Ergebnisse liefert, die für AVL-GCA als Eingang benötigt werden. Einige dieser Größen (z.B. die vom Motor für einen gegebenen Zyklus angesaugte Luftmasse und der eingespritze Kraftstoff) sind unter transienten Bedingungen praktisch unmöglich bzw. sehr schwerig zu erfassen, weder am Prüfstand noch im Fahrzeug. Hierauf wird in Teil 4.3 näher eingegangen.



<u>Abbildung 7:</u> Schematische Darstellung des Zwei-Körper-Systems "Fahrzeug-Motor" <u>Figure 7:</u> Sketch of the two-body system engine/vehicle



<u>Abbildung 8:</u> AVL-BOOST Modell eines vollständigen Motors <u>Figure 8:</u> BOOST Model of the full engine



<u>Abbildung 9:</u> Ergebnisse des AVL-BOOST Vollmotormodells <u>Figure 9:</u> Results of the BOOST full engine model

The 1D engine simulation and gas exchange model AVL BOOST [7] comprises a list of individual components that can be combined in a flexible way. Elements such as cylinders. pipes, plenum, junctions, injectors, turbo chargers, catalytic converters, air coolers and filters can be assembled for a complete engine model comprising a description of all cylinders as well as the intake and exhaust systems. Typically, the aim of gas exchange simulation is to predict and optimize air delivery ratio, power, torque, fuel consumption or tail-pipe noise. The model used is shown in Figure 8. It is a single cylinder 4 stroke motorcycle engine with a displacement of 500 cm<sup>3</sup>. The driver model tries to follow a specified vehicle speed course by calculating the load signal depending of the deviation of the actual vehicle speed from the desired one. Here the driver is represented by a simple PID controller. Finally the ECU uses the load signal in order to set the throttle position for the engine model as sketched in Figure 7.

With this model a full load acceleration calculation has been performed. Some of the results obtained are shown in Figure 9. It is important to bear in mind that the BOOST calculations results provide all the results required for AVL-GCA analysis. Some of these parameters (e.g. the amount of air and fuel aspirated by the engine for a given cvcle) are under transient conditions and in practice are impossible to measure at the test bed or on a vehicle. This topic is tackled more in details in 43



AVL BOOST

calculations

Data export (ascii)

Crank angle

resolved data

n IFILEs containing

each 1 cycle

IFILE

conversion

Series GCA analysis and

results export (ascii)

## 4.2 Automatisierungstechnik

Die Analyse von transienten Prozessen mit AVL-GCA muss eine hohe Anzahl von Motorzyklen berücksichtigen. Eine solch große Datenmenge kann nur über Automatisierung mittels Nachbearbeitungwerkzeug bewältigt werden. Aufgrund der Skriptfähigkeit von AVL-CONCERTO kann solche Arbeit effizient abgearbeitet werden. Der Ablauf ist in Abbildung 10 dargestellt. Nachdem die Kurbelwinkel bezogenen Daten (Einlass-, Zylinder- und Auslassdruckkurven) und zyklusbasierte Daten (Luftmassenstrom, Kraftstoffmassenstrom, Drehzahl, und dergleichen) als ASCII-File

exportiert sind, wird ein erstes Skript verwendet, um die Daten automatisch in so viele IFILEs zu teilen, wie es Motorzyklen gibt. Anschliessend wird ein zweites Skript verwendet, um die zyklusbasierten Daten, die aus AVL-BOOST exportiert sind, automatisch als ASCII-File zu den entsprechenden IFILEs zu transferieren und als Betriebsparameters zu speichern. Die IFILEs enthalten alle Daten, die für AVL-GCA erforderlich sind. Schließlich wird eine serielle Analyse von den so generierten IFILEs gestartet und die Hauptresultate aus dieser AVL-GCA Berechnung werden wiederum in ein ASCII File exportiert.

#### 4.3 Ergebnisse

Um die Qualität der Übereinstimmung zwischen AVL-GCA und AVL-BOSST zu überprüfen, werden folgende Größen als Referenz herangezogen:

- Volumetrischer Wirkungsgrad
- Innere AGR-Rate

Abbildung 11 zeigt, dass die Übereinstimmung zwischen AVL-GCA und AVL-BOOST hinsichtlich des volumetrischen Wirkungsgrades und der inneren AGR-Rate zufriedenstellend ist. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die transiente Rechenmethode mit AVL-GCA zur richtigen Berechnung des vom Motor angesaugten Gemisches führt. So lassen sich wichtige Ladungswechselparameter mit



4.2 Automatisation

Cycle resolved

data

Operating

AVL-GCA analysis of transient processes must consider a large number of engine cycles. Such a large amount of data can only be managed thanks to the automatisation of the main post-processing tasks. The scripting capabilities of AVL CONCERTO can efficiently support such work. The overall approach used is described in Figure 10. After exporting the crank angle resolved data as ASCII-files (intake, in-cylinder and exhaust pressure curves) and the cycle based data (air mass flow, fuel mass flow, engine speed etc...), a first script was used to automatically split the

crankangle based data into as many IFILEs as there were engine cycles to be investigated. Consequently a second script was used to automatically transfer the cycle based data exported from BOOST as ASCII-file to the respective IFILEs and to save them as operating parameters. The IFILEs contain all the data required to perform the AVL-GCA analysis. Finally a separameters transfer rial analysis was started over the whole set of IFILEs created and the main results delivered by the AVL-GCA calculations were exported into an ASCII-file.

4.3 Results

To check the quality of the corre-

lation between AVL-GCA and

BOOST, two parameters have

As it can be seen in Figure 11,

the correlation between the

volumetric efficiency, the air

delivery ratio and the internal

EGR calculated by AVL-GCA and

BOOST is satisfying. The compa-

rison of the results show that the

transient approach in AVL-GCA

can be used to correctly estima-

te the mixture aspirated by the

engine. Therefore, it is feasible

to extract reliable gas exchange

parameters with the suggested

approach. However, there are

been taken as reference:

Volumetric efficiency

• Internal EGR rate



Abbildung 10:

Ablaufdiagramm Datennachbearbeitung

Figure 10: Work flow of the post processing tasks

> sowie AVL-GCA Figure 11.

Comparison of the air path characteristic number obtained by BOOST and AVL-GCA

der vorgeschlagenen Methode zu ermitteln. Jedoch gibt es einige Abweichungen im ersten Zykluses nach dem Ladungswechsel, insbesondere beim Vergleich der inneren AGR-Rate. Obwohl die aktuelle Methode Transientbetrieb einige annehmbare Ergebnisse liefert, bedeutet dies, dass die Gültigkeitsprüfung auch einige Bereiche aufzeigt, in denen die Technik noch verbessert werden kann. Weiterhin muss überprüft werden, ob die Parameter, die die Verbrennung beschreiben (Vibe), richtig wiedergegeben werden. Diese Prüfung kann dann auch absichern,

some deviations (esp. internal EGR rate) during the first cycle after the load change. This means that although the current transient approach has generated some reasonable results, the validation process has also indicated some areas where this technique could be improved. The validation can also be extended to insure that the parameters describing the combustion are correctly rendered. To do this the activation of a quasi-dimensional fractal combustion model could be used to create a variation of these parameters over engine speed, load and internal EGR rate.



dass diejenigen Parameter, die die Verbrennung beschreiben, richtig wiedergegebn werden. Hierfür könnte die Erstellung eines quasi-dimensional fraktalen Verbrennungsmodels verwendet werden, um diese Parameter über Drehzahl, Last und interne AGR Grad zu variieren. Dies würde dann auch eine verlässliche Gültigkeit sowohl der Verbrennungseigenschaften als auch der Ladungswechselparameter bestätigen.

Wie oben erwähnt, ist es wichtig, dass bei der Gültigkeitsprüfung der transienten Analyse bestimmte Größen vorliegen wie z.B. der Luftmassenstrom pro Zyklus, da sie am Prüfstand im transientem Betrieb nicht gemessen werden können. Daher

sollten die Randbedingungen bei der Überprüfungen als ideal angenommen werden. Es können die gefangenen Luft- und Kraftstoffmassenströme auch mit der in <u>Abbildung 12</u> dargestellten Methode errechnet werden.

# **5 Schlussfolgerung**

Eine Methode transiente Abläufe zu analysieren wurde entwickelt und mit simulierten Daten überprüft. Dies wurde eingesetzt, um die Funktionalität von AVL-GCA auf transienten Betrieb in Übereinstimmung mit AVL-BOOST zu erweitern. Solch eine Analyse kann für verschiedene Untersuchungen verwendet werden:

- Genaue Verbrennungsanalyse in der Startphase
- Durch Kombination der Ergebnisse einer FID-Analyse (Flammen Ionisations Detektor) im Abgas und der Ergebnisse aus AVL-GCA transient erhält man Zugriff auf kurbelwinkelaufgelöste massebasierte HC-Emission bei jedem Zyklus.
- Optimieren von Sp
  ülen f
  ür "Tip-In" bei Motoren mit Turboaufladung, Direkteinspritzung und Phasensteller.

Die Untersuchung und Validierung dieses Prozesses hat die Tür für weitere Entwicklung geöffnet. Dies trifft besonders auf die Ermittlung des Restgasgehaltes bei hohen Zyklenschwankungen zu. Das vorgestellte Modell jedoch arbeitet schon mit zufriedenstellender Genauigkeit.

#### 6 Danksagung

Die Autoren danken ihren AVL-Kollegen Dr. Josef Wolkerstorfer, D.I. (FH) Wilhem Gutschi und D.I. Franz Hirschmann für ihre Unterstützung.

#### 7 Literatur / References

 Fairbrother, Robert; Leifert, Thomas; Moreno Nevado, Fernando Erweiterte thermodynamische Analyse mittels AVL-GCA zur effektiven Unterstützung der Entwicklung und Kalibrierung von Verbrennungsmotoren
 IAV Tagung "Motorprozessimulation und Aufladung", 24.06.2007 - 25.06.2007, Berlin, Deutschland.



Abbildung 12: Ablaufdiagramm für AVL-GCA transient Figure 12: AVL-GCA workflow for transient calculation

This would validate reliable identification of the combustion characteristics as well as the gas exchange parameters.

As mentioned in the previous paragraph, it is important to bear in mind that in the validation of the transient analysis, some parameters were available (e.g. air mass flow per engine cycle) that cannot be measured at the test bed under transient operation. Therefore, the boundary conditions for these consistency checks should be considered as ideal. Nevertheless mass of air and fuel delivered can also be assessed thanks to the method in Figure 12.

# 5 Conclusions

A method of analyzing transient data has been developed and validated against simulated engine data. This has been used to extend the functionality of AVL-GCA to transient operation and its consistency to AVL BOOST. Such an analysis can be used to perform a variety of investigations.

- Accurate combustion analysis during start
- By combining the results of a FID probe at the exhaust and those of the AVL-GCA analysis, crank angle resolved mass based HC-emissions at each cycle can be assessed
- Optimisation of the scavenging for "tip-in" for turbocharged direct injection injection with camshaft phasers.

The investigation and validation of this process has highlighted some areas for further development and validation. This is especially true for the determination of the residual gas content when there is a large variation between cycles. However, in general, the gas exchange parameters are predicted with reasonable accuracy.

#### 6 Acknoledgments

The authors would like to thank their colleagues Dr. Josef Wolkerstorfer, D.I. (FH) Wilhem Gutschi and D.I. Franz Hirschmann for their support.



- Fairbrother, Robert; Leifert, Thomas; Moreno Nevado, Fernando Genaue Bestimmung wichtiger Ladungswechselparameter direkt am Prüfstand auf Basis vorhandener Messwerte MTZ-Konferenz "Ladungswechsel im Verbrennungsmotor", 07.11.2007 - 08.11.2007, Stuttgart, Germany.
- E. Martini; P. Schöggl; C. Beidl; A. Gallacher;
   AVL List GmbH, Austria; M. Wellers, AVL Powertrain Smart Calibration. The Key to successful Power Train Projects,
   UK Ltd., Basildon, Großbritannien, 2. Internationales
   AVL Symposium für Entwicklungsmethodik
   13.11.2007 -14.11.2007 Wiesbaden.
- [4] Grill, Michael; Chiodi, Marco; Berner, Hans-Juergen; Bargende, Michael
   Berechnung der thermodynamischen Stoffwerte von Rauchgas und Kraftstoffdampf beliebiger Kraftstoffe
   Berechnung und Simulation - FORSCHUNG - MTZ 5/07.
- [5] Giannattasio, P. et al., Applications of a High Resolution Shock Capturing Scheme to the Unsteady Flow Computation in Engine Ducts, Imech 1991, C430/055.
- [6] Harten, A. et al.,
   High Order Accurate Essentially Non-Oscillatory Schemes III Journal of Computational Physics, Volume 71, Number 2, August 1987.
- [7] Entwicklung eines allgemein gültigen Restgamodells für Verbrennungsmotoren, Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 674 (AIF-Nr. 12247).
- [8] AVL List GmbH. BOOST Users Guide. AVL List GmbH, Graz, V5.1, Edition 2008.

