Der Opel Formel 3 Rennmotor - Entwicklung zu höchsten Mitteldrücken

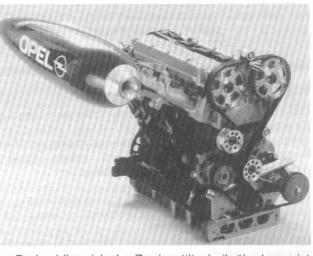
The Opel formula 3 racing engine - development for highest brake mean effective pressure

Prof. Dr. techn. **F. Indra**, Dipl.-Ing. **U. Grebe** Adam Opel AG, Rüsselsheim

Kurzfassung

Bei Formel 3 Rennmotoren bewirkt ein Drosselflansch im Ansaugtrakt mit einem Durchmesser von 24 mm eine Begrenzung des Luftaufwandes bei hohen Motordrehzahlen. Somit kann der klassische Vorteil der Mehrventiltechnik /1/, nämlich die Entdrosselung des Ladungswechsels vor allem bei hohen Drehzahlen, nicht zum Tragen kommen.

Die Tatsache, daß es Opel ab 1992 trotzdem gelang, mit einem Vierventilnahezu Aggregat alle wichtigen natio-Meisternalen schaften und internationale Rennen in dieser zuvor von Zweiventil-Aggregaten beherrschten Rennklasse zu gewinnen, ist ein Indiz dafür, daß bei entsprechender Ausdie Vierlegung auch ventiltechnik



im unteren und mittleren Drehzahlbereich der Zweiventiltechnik überlegen ist. Dies ist auf die kompakte Brennraumform und die günstige Zündkerzenlage zurückzuführen.

Infolge des optimierten indizierten und mechanischen Wirkungsgrades erreicht der Opel Formel 3 Motor einen effektiven Mitteldruck von 16,1 bar. Damit markiert er die höchste spezifische Arbeit aller bekannten freisaugenden Motoren.

Effektive Mitteldrücke, die noch höher als die des Opel Formel 3 Rennmotors sind, lassen sich nach dem Stand der Technik nur mit Hilfe der Aufladung /3/ erzielen.

Eine Betrachtung von Hochleistungsmotoren, Bild 1, zeigt, daß Motoren, wie

sie in Renn-Tourenwagen /5/ eingesetzt werden, etwa 15 bar Nutzmitteldruck aufweisen, Formel 1 Motoren /2/ überschreiten 14 bar nur geringfügig. Die Triebwerke der Formel 1 erzielen ihre hohe spezifische Leistung durch extrem hohe Drehzahlen. Die nutzbaren Drehzahlbänder der gezeigten Rennmotoren unterscheiden sich signifikant. Der Formel 3 Motor weist als Drosselmotor das schmalste Drehzahlspektrum auf.

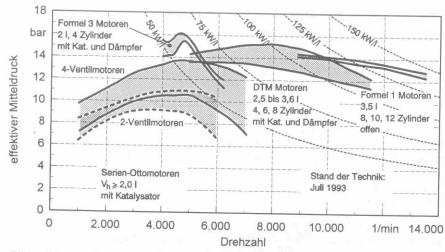


Bild 1: Effektiver Mitteldruck heutiger Motorenkonzepte

1 Einleitung

Die Formel 3 ist neben der Formel 1 die wichtigste internationale Rennformel für einsitzige Rennfahrzeuge.

Aufgrund der langjähigen Stabilität des Reglements /4/ beteiligen sich mehrere Automobilfirmen (Alfa Romeo, Fiat, Honda, Opel, Toyota, VW) an den nationalen und internationalen Wettbewerben.

In der deutschen Meisterschaft ist handelsüblicher, bleifreier Kraftstoff der Qualität SuperPlus sowie die Verwendung eines Schalldämpfers und eines Katalysators vorgeschrieben.

Das Reglement schreibt ferner Motoren mit maximal 2 Liter Hubraum und maximal 4 Zylindern vor. Der Motorblock und der Zylinderkopf müssen von einem Basismotor stammen, der in einer Serienproduktion von mindestens 2500 Exemplaren pro Jahr hergestellt wird. Kopf und Block dürfen durch Wegnahme von Material modifiziert werden, während das Hinzufügen von Material verboten ist. Alle weiteren Bauteile dürfen konstruktiv verändert werden, wobei lediglich die Art der Kurbelwellenlagerung beizubehalten ist.

Die wesentlichste Vorschrift bezieht sich auf das Einlaßsystem, das einschließlich der Einspritzdüsen in einem Quader von 1000 mm Länge sowie 500 mm Breite und Höhe passen muß. Die gesamte dem Motor zugeführte Verbrennungsluft muß durch einen metallischen Drosselflansch, den sogenannten Air-Restriktor, angesaugt werden. Dieser ist zylindrisch mit einem Durchmesser von 24 mm auf einer Länge von 3 mm auszuführen.

Die Begrenzung des Luftaufwandes hat zur Folge, daß alle Formel 3 Rennmotoren hinsichtlich ihrer Nennleistung in einem engen Streuband um den Wert 125 kW zusammenzufassen sind. Weiter wird durch die Ansaugluftdrosselung die Maximaldrehzahl mit der Intention, die Lebensdauer zu erhöhen und dadurch die Kosten für die Nachwuchsrennserie Formel 3 in akzeptablen Grenzen zu halten, limitiert.

Da in den gleichen Chassis die Motoren der verschiedenen Herstellern eingesetzt werden, ist ein guter Quervergleich der Motorentechnik möglich, obwohl bei Rennfahrzeugen nicht alleine der Motor sondern die Harmonie des Gesamtsystems Auto über Sieg oder Niederlage entscheidet. Betrachtet man z. B. das Motorgewicht und die Einbauverhältnisse, stellt man fest, daß kleine kurze Motoren zusammen mit Zweiventil-Zylinderköpfen einen Gewichtsvorteil und einen Vorteil in der Schwerpunkthöhe haben. So weist ein Konkurrenzmotor mit Zweiventil-Zvlinderkopf und dem kleinen Zvlinderabstand von 88 mm ein Gewicht von 88 kg auf, während der Opel Formel 3 Rennmotor bei höherem Schwerpunkt 96 kg wiegt. Schwerere Motoren führen zwar nicht zwangsläufig zur Überschreitung des vorgeschriebenen Minimalgewichts des Rennfahrzeuges (455 kg); die Möglichkeit die Balance des Fahrzeuges durch die Positionierung von Bleiplatten zu beeinflussen, wird jedoch eingeschränkt. Um dennoch mit einem schwereren Vierventilkonzept erfolgreich zu sein, muß die Charakteristik der Drehmomentkennlinie die Vorteile des leichteren Zweiventilers überkompensieren.

2 Luftbegrenzer

Im Unterschied zu Rennmotoren mit freiem Ansaugsystem /5/ wird der Luftaufwand der Formel 3 Motoren bei hohen Drehzahlen durch den Air-Restriktor begrenzt.

Es ist bekannt, daß die Leistung, die ein Motor abgibt, proportional der pro Zeiteinheit umgesetzten Kraftstoffmasse, Gleichung (1), und damit dem vom Motor geförderten Luftmassenstrom ist.

Die Strömungsverhältnisse in der Drosselstelle lassen sich mit guter Näherung durch die adiabat isentrope Entspannung einer kompressiblen Strömung betrachten. Die Ansaugung von Frischluft aus der Umgebung in den Luftsammler des Verbrennungsmotors kann näherungsweise wie das Ausströmen aus einem unendlich großen Behälter angesehen werden. Die Zuständsgrößen der Umgebung ändern sich durch das Ansaugen des Motors nicht. Die Luft wird dabei als kalorisch ideales Gas betrachtet.

Aus dem Erhaltungssatz der Energie sowie der allgemeinen Gasgleichung folgt die bekannte Gleichung von Saint-Venant und Wantzel für die Strömungsgeschwindigkeit im engsten Querschnitt. Unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung) erhält man die Gleichung (2) für den theoretischen, verlustfreien Luftmassenstrom. Dieser ist in *Bild* 2 bezogen auf die Fläche des Drosselquerschnittes über dem Druckverhältnis aufgetragen.



$$\dot{m}_{th} = A_D \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_u \cdot p_u} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{\overline{p}_D}{p_u} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{\overline{p}_D}{p_u} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right]}$$

$$= A_D \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_u \cdot p_u} \cdot \Psi$$

$$(2)$$

$$= A_D \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_u \cdot p_u} \cdot \Psi$$

$$(3)$$

$$=A_D \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_u \cdot p_u} \cdot \Psi \tag{3}$$

$$E = \frac{n_{P_{max}}}{n_{M_{max}}} \cdot \frac{M_{max}}{M_{P_{max}}} \tag{4}$$

$P_e \\ \eta_e$	effektive Leistung effektiver Wirkungsgrad	\dot{m}_B	pro Zeiteinheit umgesetzte Kraftstoffmasse
H_{u}	spezifischer Heizwert	\dot{m}_{th}	theoretischer Massenstrom
A_D	Drosselquerschnitt	K	Adiabatenexponent
$\frac{\rho_u}{\overline{p}_D}$	Dichte der Luft vor der Drossel	p_{μ}	Druck vor der Drossel
\overline{p}_D	Druck im Drosselquerschnitt,	Ψ	Ausflußfunktion
	gemittelt	\boldsymbol{E}	Elastizität
M	Drehmoment	n	Drehzahl

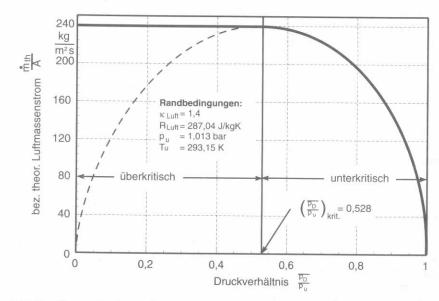


Bild 2: Theoretischer Luftmassenstrom durch eine Drosselstelle, bezogen auf den Drosselguerschnitt

Der kompressible Massenstrom durch eine Drosselstelle läßt sich nur bis zu einem Maximalwert steigern, der dann erreicht wird, wenn im engsten Querschnitt Schallgeschwindigkeit entsprechend den dort herrschenden thermodynamischen Zuständen auftritt. Bei weiterer Verringerung des Druckverhältnisses unter dieses kritische Druckverhältnis bleibt der Massenstrom konstant. Die Gleichung (2), die hier fallende Werte zeigt, gilt im überkritischen Bereich nicht.

Der maximal mögliche Luftmassenstrom durch eine Drosselstelle ist somit bei den gegebenen Randbedingungen Umgebungsdruck, Dichte der Umgebungsluft und Ausflußfunktion w. Gleichung (3), proportional der Fläche des engsten Querschnittes.

Bei einem Air-Restriktors mit 24 mm Durchmesser läßt sich mit den in Bild 2 angegebenen Randbedingungen theoretisch ein Luftmassenstrom von 389,3 kg/h erreichen.

In der Praxis vermindert sich der maximale Luftmassenstrom infolge von Strahleinschnürung und Reibung auf etwa 95% des theoretischen Wertes.

Die Drosselung einer kompressiblen Strömung ist bei Verwendung einer Lavaldüse mit den geringsten Verlusten möglich.

Die konstruktive Gestaltung der Lavaldüse, Bild 3, gliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten, konvergenten Abschnitt, der beim Opel Formel 3 Motor elliptisch ausgeführt ist, sinkt der Druck im Auslegungspunkt der Lavaldüse auf den kritischen Druck, die Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich auf Schallgeschwindigkeit. Hinter dem engsten Querschnitt schließt sich der divergente Teil an. Der Diffusor ist kegelförmig mit Kreisquerschnitten ausgeführt. Im Hinblick auf ablösungsfreie Strömung wird ein Erweiterungswinkel von etwa 3,5° (einseitig) gewählt. Das Öffnungsverhältnis, definiert als das Verhältnis des Austrittsguerschnittes zum engsten Querschnitt, beträgt ca. 7:1.

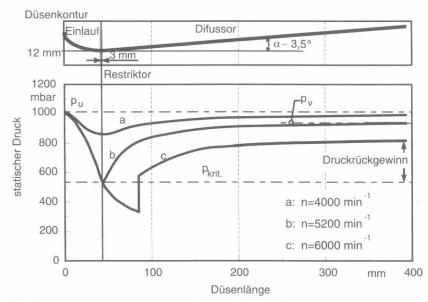


Bild 3: Kontur der Lavaldüse und Verlauf des statischen Druckes

Im Anwendungsfall Formel 3 wird der Luftmassenstrom durch die Lavaldüse auf einen Druck oberhalb des kritischen Druckes expandiert, die Lavaldüse arbeitet als Venturirohr. Solange der vom Motor geförderte Massenstrom noch unter dem kritischen liegt, ändert sich der Druck entsprechend Kurve (a). Stellt sich in dem als Airbox bezeichneten Luftsammler ein Druck ein, der kleiner ist als p_v, so findet im Diffusor ein Verdichtungsstoß statt, Kurve (c).

Durch die Querschnittserweiterung der Lavaldüse wird der Unterdruck zum Teil wieder abgebaut; es verbleibt jedoch bei niedrigen Druckverhältnissen, also hohen Motordrehzahlen, ein Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck von etwa 200 mbar in der Airbox, dem Pulsationen überlagert sind.

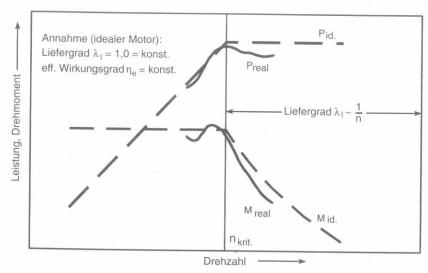


Bild 4: Drehmoment und Leistung eines idealen Formel 3 Motors im Vergleich zu einem ausgeführten Rennmotor

Aus der Grundsatzüberlegung zum Luftmassenstrom folgt, daß ein idealer Formel 3 Motor mit konstantem Wirkungsgrad und konstantem Liefergrad im ungedrosselten Betrieb bis zu einer "kritischen" Drehzahl, bei der die pro Zeiteinheit geförderte Zylinderfüllung (Schluckvolumen) gerade dem maximalen Massenstrom entspricht, ein konstantes Drehmoment abgeben würde. Oberhalb der "kritischen" Drehzahl wird der Motor durch den Air-Restriktor gedrosselt; er gibt bei weiter steigender Drehzahl konstante Leistung ab, Bild 4.

Im realen Formel 3 Motor sinkt der effektive Wirkungsgrad mit steigender Drehzahl infolge der steigenden Reibleistung und dem oberhalb der "kritischen" Motordrehzahl zunehmenden Leistungsbedarf für den gedrosselten Ladungswechsel. Der in Bild 4 gezeigte, gemessene Verlauf der Motorleistung fällt deshalb oberhalb der "kritischen" Drehzahl stark ab. Die Nennleistung eines korrekt abgestimmten Formel 3 Aggregates mit 2 Liter Hubraum liegt somit unter 5200 min-1.

Die Beschränkung der Motorleistung wirkt sich auf die Fahrdynamik des Formel 3 Rennfahrzeuges aus. Da die Überschußleistung als ein Maß für die maximal mögliche Beschleunigung in den einzelnen Betriebspunkten limitiert ist, kommt der Minimierung des Leistungsbedarfs für die Bewegungszustands-

änderung aller Fahrzeug- und Motorbauteile eine besondere Bedeutung zu. Deshalb müssen die translatorisch und rotatorisch zu beschleunigenden Massen, die den Beschleunigungswiderstand bestimmen, minimiert werden. Insbesondere gehen bekanntermaßen die Massenträgheiten der mit Motordrehzahl umlaufenden Teile mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses in den Beschleunigungswiderstand ein.

Im Gegensatz zu hochdrehenden Rennmotoren, bei denen geringe Bauteilmassen zur Beherrschung der auftretenden Kräfte angewandt werden, dient der Leichtbau in der Formel 3 demzufolge der bestmöglichen Nutzung des Leistungsangebotes im dynamischen Betrieb.

3 Modifikationen am Basismotor

Als Basis für die Entwicklung des Formel 3 Aggregates wurde der bekannte Opel 2 Liter Vierventilmotor /6/ gewählt. Dieser Serienmotor zeichnet sich durch einen Bestwert im Kennfeld des Gesamtwirkungsgrades von 37% aus, der von keinem anderen Motor seiner Klasse bisher übertroffen wurde.

	Formel 3	2,0 I - 4V		
Hubraum	1998 cm ³			
Bohrung	86 mm			
Hub	86 mm			
Hub-Bohrungs-Verhältnis	1,0			
Zylinderabstand	93 mm			
Blockhöhe	216 mm			
Pleuellänge	148 mm	143 mm		
Schubstangenverhältnis	0,29	0,3		
Verdichtungsverhältnis	12,8	10,5		
Ø Einlaßventil	33 mm			
Ø Auslaßventil	29	mm		
Ventilhub E/A	11,15 mm	9,5 mm		
Einlaß öffnet 33 °KW v		20 °KW v.OT		
Einlaß schließt	53 °KW n.UT	72 °KW n.UT		
Auslaß öffnet	58 °KW v.UT	60 °KW v.UT		
Auslaß schließt	28 °KW n.OT	32 °KW n.OT		
Gemischaufbereitung	Bosch Motronic			
und Zündung	MS 2.2.1	M 2.8		
Kraftstoff, unverbleit	ROZ 98	ROZ 95		
Nennleistung	129 kW	110 kW		
bei Drehzahl	5000 min-1	6000 min-1		
max. Drehmoment	256 Nm	196 Nm		
bei Drehzahl	4600 min-1	4800 min-1		

Tafel 1: Hauptdaten des Motors

Die geometrischen Grundabmessungen des Grauguß-Zylinderblockes stellen mit einem Zylinderabstand von 93 mm sowie Bohrung und Hub von jeweils 86 mm eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung zum Rennmotor dar.

Besondere Bedeutung kommt dabei dem Zylinderkopf zu. Der Opel Vierzylinder DOHC-Vierventil-Zylinderkopf hat einen Ventilwinkel von 46°, wobei Ein- und Auslaßventil symmetrisch zur Zylinderachse angeordnet sind. Die relativ engen Ladungswechselkanäle sind strömungstechnisch für die Formel 3 Anwendung besonders günstig. Ein nachträgliches Verkleinern von zu großen Kanälen ist wegen des Verbotes von Materialzufügungen durch das Reglement nicht möglich.

In einer Zusammenarbeit zwischen der Vorausentwicklung des Technischen Entwicklungszentrums der Adam Opel AG und der Firma S. Spiess KG wurde und wird die Konzeption und Konstruktion des Rennmotors durchgeführt. Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Hochschule in Darmstadt unterstützt die Entwicklungsarbeiten als gleichwertiger Partner.

Der Querschnitt des Rennmotors ist in *Bild 5* gezeigt. Die Bauteile des Motors sind speziell auf die Erfordernisse des Formel 3 Einsatzes abgestimmt. Hierbei wurden wesentlich die Massen und Massenträgheitsmomente aller Komponenten reduziert, *Tafel 2*.

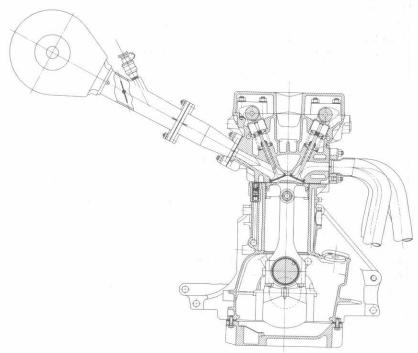


Bild 5: Querschnitt des Opel Formel 3 Motors

Massen	Formel 3	Serie 2,0 I - 4V	
Gesamtmotor	96 kg	130 kg (ohne Generator)	
Zylinderblock	36,0 kg	38,2 kg	
Schwungrad	2,43 kg	9,96 kg	
Kurbelwelle	10,8 kg	15,03 kg	
Pleuelstange	0,482 kg	0,623 kg	
Kolben mit Ringen	0,255 kg	0,327 kg	
Kolbenbolzen	0,056 kg	0,102 kg	
Zylinderkopfdeckel	1,88 kg	4,40 kg	
Zylinderkopf	14,4 kg	14,54 kg	
Ventil-Einlaß, incl. Teller+Keile	0,063 kg	0,072 kg	
Ventil-Auslaß, incl. Teller+Keile	0,053 kg	0,064 kg	
Tassenstößel	0,034 kg	0,070 kg	
Massenträgheitsmomente			
Schwungrad	0,012 kgm ²	0,126 kgm ²	
Kurbelwelle	0,011 kgm ²	0,027 kgm ²	

Tafel 2: Massen und Massenträgheitsmomente

3.1 Zylinderblock

Vom Serienblock werden alle nicht benötigten Butzen, Rippen und Versteifungen entfernt.

Zur Verbesserung der Brennraumkühlung wird das Deck des Zylinderblockes an den in *Bild* 6 gekennzeichneten Stellen durchbohrt. Entsprechende Änderungen wurden an der Zylinderkopfdichtung und am Zylinderkopf vorgenommen.

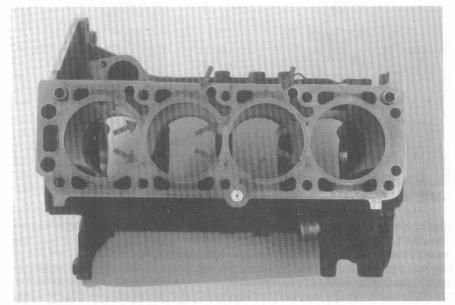


Bild 6: Zylinderblock, Kühlwasserführung

Die Zylinderbohrungen werden mit einer Rauhtiefe kleiner 3 μ m besonders sorgfältig gehont. Versuche mit einer Nikasilbeschichtung auf der Grauguß-Lauffläche ergaben nur sehr geringe Reibleistungsvorteile, die den großen Aufwand in Frage stellen.

3.2 Kurbeltrieb

Im Gegensatz zu anderen Formel 3 Motoren, die meist langhubig ausgelegt sind, wurde frühzeitig in der Entwicklungsphase des Opel Rennmotors entschieden, beim quadratischen Hub-Bohrungsverhältnis des Basismotors zu bleiben.

Die rotierenden Teile des Kurbeltriebes wurden jedoch im Hinblick auf kleine Massenträgheitsmomente geändert.

Das Schwungrad, *Bild* 7 ist so konstruiert, daß es eine Zweischeiben-Kohlefaserkupplung aufnehmen kann. Der Zahnkranz für den Anlasser ist direkt am Umfang des Bauteils aufgebracht. An der dem Motor zugewandten Seite befinden sich zwei Segmente für den induktiven Kurbelwinkelgeber des Motormanagements.

Besonders bemerkenswert ist die Reduzierung des Massenträgheitsmomentes um 90 % gegenüber der Serienkonstruktion.

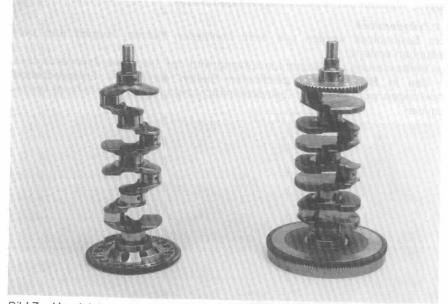


Bild 7: Vergleich der Kurbelwellen und Schwungräder

Im Sinne möglichst kleiner rotierender Massen ist auch die Kurbelwelle extrem erleichtert. Hierzu werden vier Gegengewichte vollständig entfernt und die verbleibenden durch eine Drehbearbeitung erleichtert.

Die Abmessungen der Hauptlager mit 58 mm Durchmesser und der Hublager mit 49 mm Durchmesser bleiben erhalten.

Die Kurbelwelle in der gezeigten Form wird im Opel Familie II Motorenwerk Kaiserslautern gefertigt.

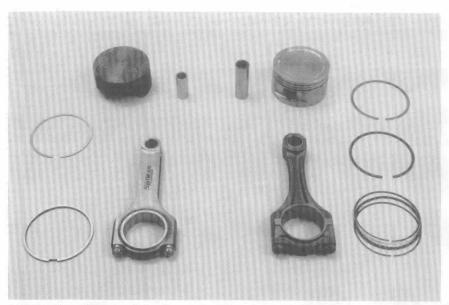


Bild 8: Vergleich der Kolben und der Pleuel

Die in der Serie eingebauten, gegossenen Pleuel werden durch leichtere und um 5 mm verlängerte Pleuel aus hochfestem Stahl ersetzt, *Bild 8*. Bei unverändertem Durchmesser des großen Pleuellagers von 49 mm ist das kleine Auge von 21 mm auf 18 mm Durchmesser reduziert. Im Hinblick auf eine minimale Reibleistung sind die Pleuel im Kolben geführt.

Die serienmäßigen 3-Ring-Kolben werden durch 2-Ring-Kolben ersetzt, **Bild 8**. Zur Reduzierung der oszillierenden Massen trägt auch der Kolbenbolzen bei, der aufgrund der geänderten Geometrie (D_a =18 mm, D_i =10 mm, L=40 mm) rund 50% weniger Masse aufweist als der Serienbolzen.

Der Kolbenbodenaufbau ist beim Rennmotor deutlich höher, um das notwendige Verdichtungsverhältnis von etwa 12,8 zu erhalten. In Abhängigkeit von der Oktanzahl des in den verschiedenen Ländern verwendeten Kraftstoffes (ROZ 98 bis ROZ 104) wird eine Anpassung des Verdichtungsverhältnisses über die Kolbenbodengeometrie vorgenommen.

Der Kompressionsring ist 1,5 mm, der Ölabstreifring 3,0 mm hoch. Die Kompressionshöhe ist mit 25,7 mm sehr gering.

3.3 Zylinderkopf

Der Zylinderkopf wird im Brennraum, in den Kanälen und im Bereich des Ventilsitzes mit großer Sorgfalt nachgearbeitet und poliert, *Bild 9*. Als Material für die Ventilsitzringe wird eine Kupfer-Beryllium-Legierung verwendet, um eine möglichst effiziente Wärmeableitung vom Ventilteller sicher zu stellen. Die vier Brennräume sind auf gleiches Volumen bearbeitet, damit die Gleichmäßigkeit der Zylinder gewährleistet ist. Die Stößelbohrungen werden für die Verwendung von Tassenstößeln mit 34 mm Durchmesser nachgearbeitet. Die

Bohrungen der Ventilschaftführungen sind auf der Auslaß- und der Einlaßseite jeweils von 7 mm auf 6 mm reduziert.

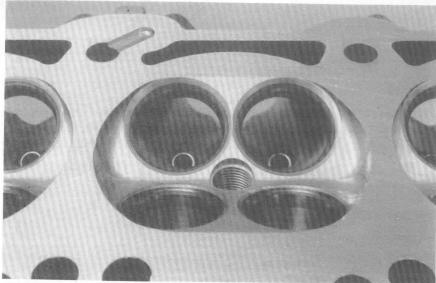


Bild 9: Brennraum und Kanäle, Blick in Richtung der Einlaßkanäle

Der Luftmassenstrom auf dem stationären Blasprüfstand in Abhängigkeit vom Ventilhub ist in *Bild 10* gezeigt.

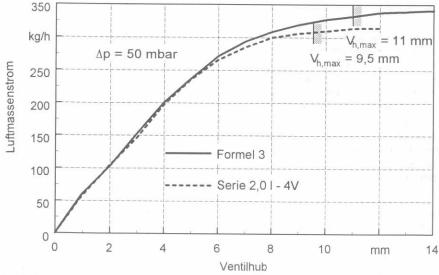


Bild 10: Durchflußeigenschaften der Zylinderköpfe, Vergleich zwischen Serie und Formel 3

Im oberen Ventilhubbereich zeigt der Formel 3 Zylinderkopf eine geringere Drosselwirkung als der Serien-Zylinderkopf, was auf die geänderten Ventilschaftdurchmesser und die Glättung der Kanalrauhigkeit zurückzuführen ist.

3.4 Ventiltrieb

Im Ventiltrieb, *Bild 11*, wird ebenfalls deutlich Massen reduziert. Dies dient dem Zweck der Minimierung der Kräfte im Ventiltrieb und damit der Optimierung des Reibleistungsbedarfs.

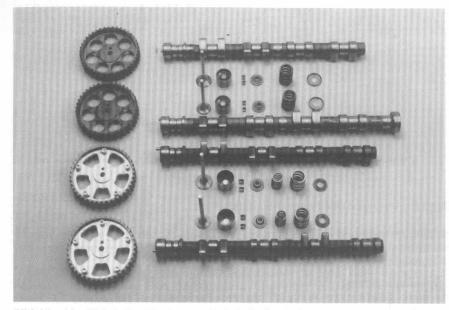


Bild 11: Ventiltrieb. Im Vordergrund sind die Bauteile des Rennmotors gezeigt.

Der Nockenwellengrundkreis ist von 34 mm auf 30 mm verkleinert, um die gewünschte Ventilerhebung unter Einhaltung der maximalen Flächenpressung zu realisieren, und die Auswanderung des Nockens über den Stößelrand zu minimieren.

Die hydraulischen Ventilspielausgleichselemente werden durch mechanische Tassenstößel ersetzt.

Durch den Wegfall des hydraulischen Ausgleichselementes müssen die Ventilschäfte entsprechend verlängert werden. Das Ventilspiel wird mit Hilfe von Ventilkappen verschiedener Dicke, die auf den Ventilschaft aufgesteckt werden, eingestellt.

Die Ventilfedern des Serienmotors werden durch Doppelfedern ersetzt.

Ventilhub und Steuerzeiten sind für den Formel 3 Motor deutlich geändert. Bei etwa identischem Öffnungszeitpunkt des Auslaßventils und Schließzeitpunkt des Einlaßventils ist die Überschneidung beim Formel 3 Motor wesentlich größer als beim Serienmotor, *Bild* 12.

Eine Vergrößerung der Ventiltellerdurchmesser war nicht notwendig, da die sich ergebenden Zeitquerschnitte bei Verwendung der Serienabmessungen bereits ausreichend sind.

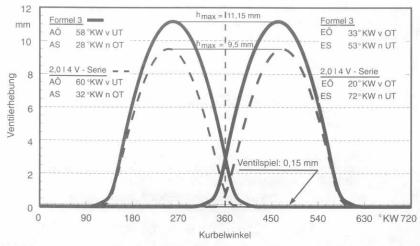


Bild 12: Vergleich der Ventilerhebungskurven

Im Zylinderkopf und hier besonders im Steuerungsbereich werden ständig Weiterentwicklungen auch mit alternativen Materialien unternommen, um den Wettbewerbsvorteil abzusichern.

3.5 Ansaugsystem

Die stark gekrümmten Ansaugrohre des Serienmotors mit einem Registerdrosselklappenstutzen werden beim Rennmotor durch ein besonders strömungsgünstiges gerades System mit vier weit außen liegenden Drosselklappen ersetzt, *Bild 13*. Auf äußerste Dichtheit ist zu achten, weil das System vor und nach jedem Rennen kontrolliert wird, um das Ansaugen von Frischluft um den Air-Restriktor herum zu unterbinden.

Die Länge der Ansaugrohre ist gasdynamisch so abgestimmt, daß zusammen mit den anderen Maßnahmen ein Vollast-Drehmoment von über 250 Nm im mittleren Drehzahlbereich erreicht werden konnte.

Um den maximal möglichen Luftmassenstrom im engsten Querschnitt zu erreichen, ist besonderes Augenmerk auf die Gestaltung der Airbox und der Lavaldüse zu legen. Beide Bauteile haben Einfluß auf die Pulsationen im Airbox-Volumen, bzw. auf deren Wirkung auf die Durchströmung des Drosselquerschnittes.

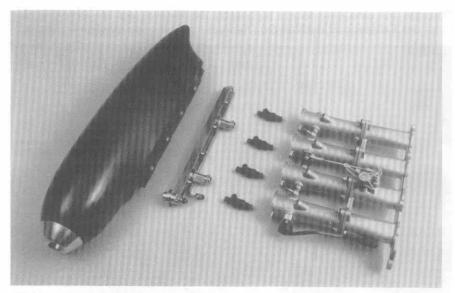


Bild 13: Ansaugsystem

3.6 Abgasanlage

Die in der Serie verwendete Edelstahl-Rohrkonstruktion des Auspuffkrümmers weist eine vier-in-zwei-in-eins Zusammenführung auf. Am Formel 3 Triebwerk wird demgegenüber eine vier-in-eins Ausführung verwendet. Hinter der Zusammenführung sind eine lineare Lambdasonde und eine Temperaturmeßstelle angeordnet. Das gemeinsame Abgasrohr mündet in den Schalldämpfer, der zur Erfüllung der Geräuschsvorschriften (ONS-Nahfeldmeßmethode /7/, 106 dB (A) bei 4000 min-1) notwendig ist. Den Abschluß der Anlage bildet ein Katalysator.

3.7 Zusatzaggregate

Formel 3 Rennmotoren werden ohne Generator betrieben. Der Energieinhalt der mitgeführten Batterie reicht zur Deckung des Bedarfes über eine Renndistanz aus.

Die in der Serie verwendete Druckumlaufschmierung mit einer am vorderen Kurbelwellenende angeordneten Sichelpumpe wird für die Formel 3 Konstruktion durch eine Trockensumpfpumpe mit 2 Stufen ersetzt. Saug- und Druckstufe sind hintereinander angeordnet, *Bild 14*, wobei die durchlaufende Antriebswelle mittels eines Zahnriemens von der Kurbelwelle im Verhältnis 1:1,67 angetrieben wird. Die Saugstufe befindet sich auf der Antriebsseite der Pumpe. Durch eine, im unteren Bildteil zu erkennende, Leitung wird das Öl aus dem Motor abgesaugt und gelangt über den an der Oberseite der Pumpe sichtbaren Anschluß in einen Sammelbehälter. Aus diesem Behälter gelangt das Öl durch den Anschluß unterhalb des Filterelementes in die Druckstufe und wird über das Hauptstromfilter in den Motor gedrückt.

Statt der tiefen Serien-Ölwanne wird eine flache Ölwanne aus Magnesium mit integriertem Ölhobel verwendet. Der Motor wird beim Fahrzeugeinbau mit der

Ölwanne auf eine Grundplatte aufgesetzt. Im Hinblick auf die Schwerpunkthöhe des Fahrzeug ist deshlab die Ölwanne so niedrig wie möglich konstruiert.

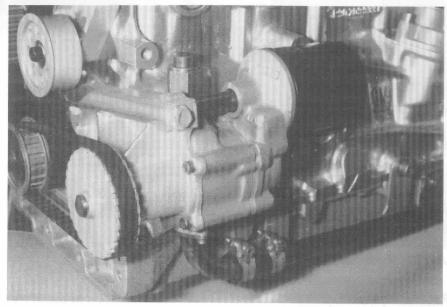


Bild 14: Trockensumpfschmierung

Die Serienwasserpumpe wird im Rennmotor in einer optimierten Form verbaut. Weiter konnte durch Reduzierung der Wasserpumpendrehzahl etwa 0,75 kW Verlustleistung bei einer Motordrehzahl von 6000 min⁻¹ eingespart werden. Die Modifikation des Übersetzungsverhältnisses ist aufgrund der geänderten Anforderungsprofile möglich. Während die Serienlösung eine ausreichende Fördermenge bei Leerlaufdrehzahl zur Aufrechterhaltung der Innenraum-Heizung bei niedrigsten Außentemperaturen erbringen muß, kann die Dimensionierung beim Rennmotor ausschließlich entsprechend der notwendigen Kühlleistung bei Vollast und hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten erfolgen.

3.8 Motormanagement

Bis einschließlich 1992 kam eine zylinderselektiv arbeitende Bosch Motronic (M 1.2 später M 2.2.1, jeweils α -n-Steuerung) ohne Klopfregelung zum Einsatz. Zeitraubende, aufwendige Einstellmaßnahmen und Kontrollen von Kolben, Brennraum und Metalleinfassung der Zylinderkopfdichtung durch die offene Zündkerzenbohrung waren bei eingebautem Motor notwendig, um ohne Motorschädigungen so nahe wie möglich an der Klopfgrenze fahren zu können.

Für die Saison 1993 wurde eine zylinderselektive Klopfregelung mit je einem Körperschallsensor pro Zylinder entwickelt, um jederzeit und unabhängig von Luftdruck, Temperatur und Kraftstoffqualität den leistungsoptimalen Betrieb des Motors sicherzustellen.

Die Klopfsensoren sind an der höchst möglichen Stelle im Deckbereich des Zylinderblockes angeordnet, *Bild 15*. Infolge der closed-deck-Konstruktion besteht eine direkte Verbindung zwischen Sensor und Laufbuchse für die

Übertragung der Körperschallschwingungen. Die Signale bei klopfender Verbrennung werden dadurch sehr sicher erkannt, wie Versuche zeigten, bei denen parallel zur Erfassung der Körperschallschwingungen der Zylinderinnendruck indiziert wurde.

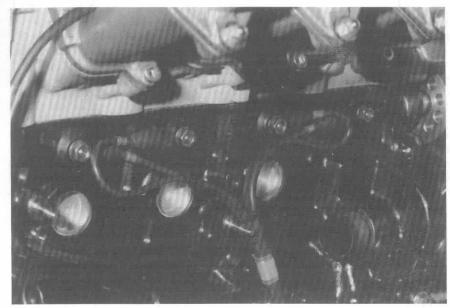


Bild 15: Befestigung der Klopfsensoren

4 Mitteldrücke

Neben der Anhebung der Motor-Nennleistung des Formel 3 Aggregates um 17,2% gegenüber dem mit einer Literleistung von 55 kW/l spezifische sehr guten Serienmotor, ist die Steigerung des maximalen effektiven Mitteldruckes besonders bemerkenswert. Das Maximum von 16,1 bar liegt 30% über dem Wert des frei saugenden Serienmotors. Die zum maximalen effektiven Mitteldruck gehörende Drehzahl steht zudem beim Formel 3 Motor mit 4600 min-1 um 200 min-1 früher zur Verfügung als beim Serienmotor.

Zum Erreichen des genannten Wertes trägt zunächst die Anhebung des Luftaufwandes bei. Die Abstimmung des Ladungswechseltraktes ergibt durch Ausnutzung der Effekte der Schwingsaugrohraufladung ein Maximum des Luftaufwandes von 1.06.

Weiter wurde der indizierte Mitteldruck angehoben. *Bild* 16 zeigt einen Vergleich des indizierten Druckverlaufes beider Motoren bei Vollast und einer Motordrehzahl von 5000 min⁻¹, was der Nenndrehzahl des Rennmotors entspricht. In der Kompressionsphase liegt der Formel 3 Motor infolge des höheren Verdichtungsverhältnisses auf einem höheren Druckniveau. Nach Brennbeginn steigt der Druck im Zylinder des Rennmotor mit einem stärkeren Gradienten als im Serienmotor. Der Rennmotor weist einen maximalen Druckanstieg von 3,8 bar/°KW, der Serienmotor 2,7 bar/°KW auf. Bei Nenndrehzahl

wird im Rennmotor mit einem Zünddruck von knapp 90 bar ein um 28% höherer Wert erreicht als im Serienmotor.

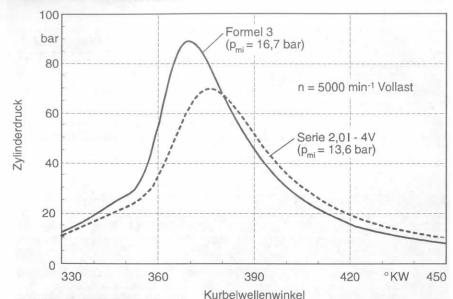


Bild 16: Indikatordiagramm

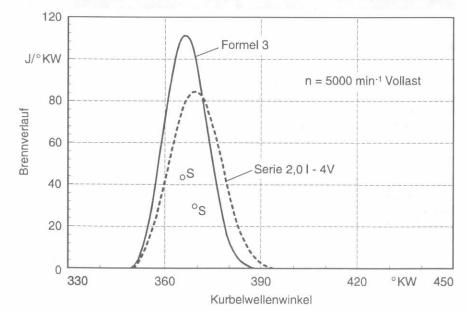


Bild 17: Brennverlauf

Der Brennverlauf, *Bild* 17, zeigt die schnellere Umsetzung einer höheren Gesamtenergie im Rennmotor. Die Brenndauer, definiert als die Zeit zwischen 5% und 95 % des Energieumsatzes, ist hier im Rennmotor etwa 30 °KW. Die Schwerpunktlage der Verbrennung definiert als Punkt der 50% Umsetzung ist mit 5 ° KWn.OT sehr günstig.

Im Punkt des maximalen Drehmomentes liegt ein Spitzendruck von etwa 100 bar im Formel 3 Aggregat vor, während der Serienmotor im gleichen Lastpunkt nur etwa 70 bar erreicht.

Infolge der sehr schnellen und OT-nahen Energieumsetzung sind die verfahrensbedingten Verluste im Vergleich zum idealen Kreisprozeß beim Rennmotor kleiner, der indizierte Wirkungsgrad ist höher.

In *Bild 18* werden die indizierten Druckverläufe der betrachteten Motoren bei der Drehzahl des maximalen Drehmomentes des Rennmotors in Form eines p-v-Diagrammes verglichen. Durch die dimensionslose Darstellung des Zylindervolumens auf der Abszissenachse erkennt man deutlich die Auswirkung der unterschiedlichen Verdichtung.

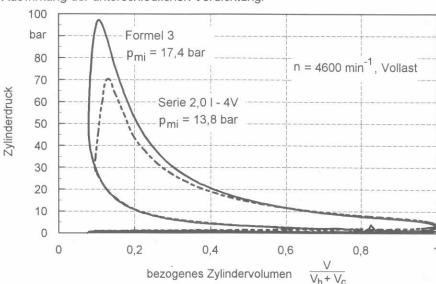


Bild 18: p-v-Diagramm,
Drehzahl des maximalen Mitteldruckes beim Rennmotor

Neben dem hohen indizierten Mitteldruck ist beim Formel 3 Motor die Verringerung des Reibmitteldruckes signifikant. *Bild 19*, stellt die im Schleppversuch gemessenen Reibmitteldrücke des Formel 3 Motors denen des Serienaggregates gegenüber. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ist beim Serienmotor der Generator nicht angetrieben.

Bei der Versuchsdurchführung wurden Wasser (90°C) und Öl (100°C) temperiert. Die Antriebsmomente der Nebenaggregate und des Zylinderkopfes wurden mit Drehmomentmeßwellen bestimmt.

Der Mitteldruckbedarf des Rennkurbeltriebes ist vornehmlich durch die Modifikationen an der Kolbengruppe, die Verwendung eines längeren Pleuels und dessen Führung im Kolben reduziert.

Im Ventiltrieb wirken sich die infolge kleinerer Massen verminderten Feder-kräfte positiv aus. Weitere Vorteile ergeben sich aus der reduzierten Nockenbreite und dem mechanischen Ventilspielausgleich, der im Gegensatz zur Serienausführung mit hydraulischen Ausgleichselementen keine Reibung auf dem Grundkreis aufweist. Der Verlauf des Reibmitteldruckbedarfes des Ventiltriebes läßt die bekannte, mit der Drehzahl fallende Tendenz erkennen. Dies ist auf den hydrodynamischen Aufbau des Schmierfilm zwischen Nocken und Stößel zurückzuführen.

Der Antriebsbedarf der Nebenaggregate des Rennmotors ist bei niedriger Drehzahl kleiner. Hier wirkt sich der in diesem Betriebspunkt wesentlich bessere Wirkungsgrad der Zahnrad-Ölpumpe positiv aus. Bei höheren Drehzahlen nähern sich die Antriebsmomente der Ölpumpen bei den verglichenen Motoren an. Dennoch verbleibt ein Vorteil für die Trockensumpfschmierung des Rennmotors, da hier die Ölpanschverluste im Kurbelgehäuse und damit wiederum der Verlust des Kurbeltriebs geringer ist.

Die Wasserpumpe des Rennmotors nimmt weniger Antriebsmoment infolge der gegenüber der Serie herabgesetzten Drehzahl auf.

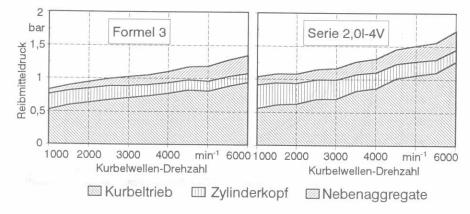


Bild 19: Vergleich der Reibungsverluste

Bild 20 zeigt den Verlauf der effektiven Mitteldrücke und der Motorleistung für den Serien- und den Rennmotor. Man erkennt beim Rennmotor deutlich die Charakteristik des Drosselmotors. Oberhalb von 5000 min-1 fällt die Leistung leicht infolge der zunehmenden Verluste, der Mitteldruck verläuft entsprechend unter der Hyperbel der maximalen Leistung.

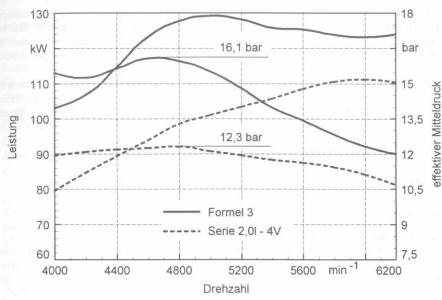


Bild 20: Effektiver Mitteldruck und Leistung

Der spezifische Verbrauch des Serienmotors wird im *Bild 21* mit dem des Rennmotors verglichen. Trotz der beim Rennmotor an der Vollast eingestellten leichten Anfettung ergeben sich gute spezifische Verbräuche, die auf dem Niveau der Serienwerte liegen.

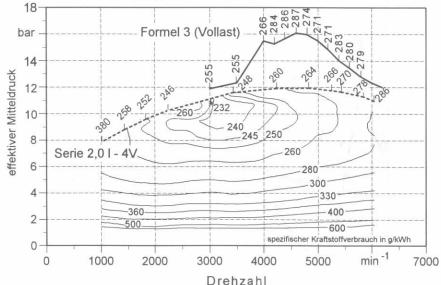


Bild 21: Kennfeld des spezifischen Verbrauches

Während aufgrund des Air-Restriktors alle Formel 3 Motoren nahezu gleiche Maximalleistung abgeben, übertrifft der Opel-Motor im übrigen relevanten Fahrbereich zwischen 4000 min-1 und 6000 min-1 seine Konkurrenten. Beim Vergleich der Motorelastizitäten E, Gleichung (4), liegt der Opel Formel 3 Motor mit 1,13 deutlich über den Zweiventilern, die bei etwa 1,08 angesiedelt sind.

Da eingesetzte Zweiventilmotoren mit dem Opel-Rennmotor vergleichbare Gaswechselanlagen aufweisen und ähnliche Kennfelder der mechanischen Verluste besitzen dürften, ist der Unterschied durch die vorteilhafte Kanalform im Zylinderkopf und den besseren Innenwirkungsgrad des Vierventilmotors zu erklären. Die zentrale Anordnung der Zündkerze im Giebeldach des Brennraums ermöglicht gleichmäßigere Flammwege und damit kürzere Brenndauern.

5 Variable Systeme

Zur weiteren Verbesserung der Mitteldruckcharakteristik des Formel 3 Motors wurden für die Saison 1993 variable Systeme im Ansaugtrakt /8/ getestet.

5.1 Variable Steuerzeiten

In Zusammenarbeit mit der Firma Kolbenschmidt AG wurde ein 2-Punkt Phasenversteller an der Einlaßnockenwelle des Rennmotors appliziert, der einen Stellbereich von 10°NW aufweist. Es ist günstig, im Drehzahlbereich, in dem der Motor durch den Air-Restriktor gedrosselt wird, eine Spätverstellung der Nockenwelle vorzunehmen, um die Überschneidung zu reduzieren und der längeren Laufzeit der Saugrohrschwingungen mit einem späten Einlaßschluß Rechnung zu tragen.

5.2 Variables Ansaugsystem

Um die Drehzahlabhängigkeit der Druckschwingungen im Einlaßsystem zu berücksichtigen, wurden kontinuierliche und diskontinuierliche Saugrohrlängenverstellungen konstruiert und im Versuch getestet.

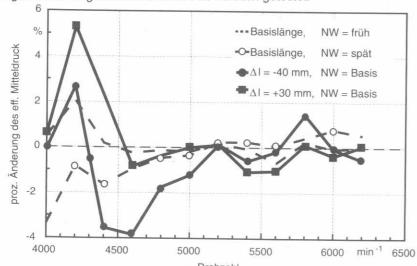


Bild 22 zeigt die Ergebnisse der zuvor genannten Schaltlösungen. Man erkennt, daß trotz großem Aufwand, nur noch geringe Erfolge zu erzielen sind, da das Motor-Grundkonzept bereits eine sehr gute Lösung darstellt. Die Nennleistung ist infolge der Drosselung durch den Air-Restriktor nicht weiter anzuheben.

Es wurde zunächst von einer Anwendung der variablen Systeme im Renneinsatz abgesehen.

6 Ausblick

Die Konstruktionsmerkmale und die spezifisch günstigen Werte des Opel 2,0 I - Vierventil-Serienmotors bieten eine besonders gute Basis für die Weiterentwicklung zum Formel 3 Rennmotor.

Die bei niedriger Drehzahl erreichten maximalen effektiven Mitteldrücke sind ein eindeutiger Hinweis auf die Überlegenheit des Vierventilkonzeptes und der damit verbundenen Zündkerzenlage auch in diesem Betriebsbereich. Die Modifikationen des Basistriebwerkes für Formel 3 Zwecke zeigen auch Möglichkeiten auf, wie der Wirkungsgrad von Serienmotoren weiter zu verbessern ist.

Literaturhinweise

- /1/ Hack, G. und F. Indra: Mehrventilmotoren, Motorbuch Verlag Stuttgart, ISBN 3-613-01375-4
- 121 Hack, G. und F. Indra: Formel 1 Motoren, Motorbuch Verlag Stuttgart, ISBN 3-613-01254-5 - 2. Auflage
- /3/ Indra, F. und I. Janthur: Der Opel Calibra Turbo, ATZ 93 (1991) 9
- 14/ FIA Handbuch 1992, 25. Auflage: Edition V.M., ISBN 2-86258-119-4, ISSN 1142-4478
- Indra, F. und M. Tholl: Der 3,0 I Opel Rennmotor f
 ür die internationale Deutsche Tourenwagenmeisterschaft, MTZ 52 (1991) 9
- /6/ Schwärzel, W.; O. Willenbockel und E. Zickwolff: Der neue Zweiliter-Vierventilmotor von Opel, MTZ 49 (1988) 4
- 171 Handbuch der ONS (Oberste Nationale Sportkommission 1993), Reglement der deutschen Formel 3 Meisterschaft 1993, Art. 275 des Anhang J zum Internationalen Automobil-Sportgesetz (IASG) der FIA
- /8/ Hohenberg, G. und Ch. Schmidt:
 Auslegung und instationäre Motorabstimmung eines Formel 3
 Rennmotors auf dem Prüfstand,
 in: 11. Wiener Motorensymposium 1990, Wien,

VDI-Verlag, ISBN 3-18-144112-0