



Aufladung von Verbrennungsmotoren

von Heinz Koblitschek Dipl. Ing.

Aufladung gehört zu den effektivsten Maßnahmen zur Steigerung von Leistung und Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors.

In der Erstausrüstung werden vorwiegend Abgas – Turbolader und mechanisch angetriebene Verdichter eingesetzt.

Dabei hat der Entwicklungstrend zum so genannten „Downsizing“ von Motoren zu einer Art Renaissance der mechanisch angetriebenen Verdichter oder „Kompressoren“ geführt.

Beide Konzepte haben ihre systemimmanenten Vor – und Nachteile, sodass es nahe lag ein System zu entwickeln, das deren Vorteile zu verbinden versucht.

Der mechanisch angetriebene Radialverdichter (*ROTREX*) besteht prinzipiell aus der – frischgasseitigen - Hälfte eines Abgas - Turboladers und einem Planetengetriebe das die Drehzahl der Kurbelwelle auf die erforderliche Drehzahl der Turbine übersetzt.

Gerade für den Motortuner bietet dieses Konzept eine Reihe von Vorteilen:

- **Vorteile gegenüber dem mechanisch angetriebenen Verdichter nach dem „Roots“ – oder „Lysholm“ Prinzip**
 - geringere Verlustleistung (besserer Wirkungsgrad)
 - kontinuierlicher Massenstrom
 - Ladeverhalten mit hochdrehenden Motoren kompatibel
 - geringere Erwärmung der Ladeluft
 - geringere Geräuschemission
 - niedrigeres Gewicht
 - besseres „Packaging“

- **Vorteile gegenüber dem Abgas – Turbolader**
 - geringerer Adaptionen- und Installationsaufwand
 - keine aufwendigen Modifikationen des Abgassystems
 - keine oder nur geringe Eingriffe in die Motormechanik
 - besseres Ansprechverhalten
 - geringere thermische Belastung der Motorperipherie
 - einfachere Regelung des Ladedrucks

Das Potential eines frei ansaugenden Otto – Motors zur Steigerung von Leistung und Drehmoment durch Aufladung hängt von mehreren Faktoren ab.

Dazu zählen:

- **mechanische Robustheit von Motorblock und Kurbeltrieb**
- **thermische Belastbarkeit von Kolben („Kolbenspritze“) und Ventilen**
- **Verdichtungsverhältnis**

Der erfahrene Motorentuner wird bei seinen Überlegungen zur Leistungssteigerung diese Einflussfaktoren ebenso wie die Erwartungshaltung seines Kunden angemessen berücksichtigen.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass bei modernen Motoren mit Literleistungen im Bereich von 100 PS/Liter eine Erhöhung der Leistung von etwa 30% zu keinem signifikanten Verlust von Alltagstauglichkeit und Lebensdauer führt.

Voraussetzung ist jedoch eine sorgfältige Anpassung des gesamten Zünd- und Einspritzkennfelds auf die veränderten Bedingungen.

Die Leistung eines Verbrennungsmotors ist proportional zu dessen Luftdurchsatz. Moderne Hochleistungstriebwerke erreichen im Bereich ihres maximalen Drehmoments Füllungsgrade von über 100%.

Diese dynamische Aufladung wird durch Schwingsaugrohre oder Resonanzsysteme erreicht.

Durch einen abgasseitig oder mechanisch angetriebenen Lader lässt sich die Füllung weiter steigern.

Die Auswahl des „richtigen“ Laders ist dabei von besonderer Bedeutung.

Auswahl des geeigneten *ROTREX* – Radialverdichters

In der Regel verfügt der Motortuner nicht über alle erforderlichen Kenngrößen des Motors die für eine exakte Definition der Parameter des Laders erforderlich sind.

Da auch der Berechnungsaufwand in einem überschaubaren Rahmen gehalten werden soll muss dessen Ergebnis als Richtwert betrachtet werden.

Einige mathematisch/physikalische Vereinfachungen werden dabei bewusst in Kauf genommen.

1.Schritt:

- **Geplante Motorleistung**

(Beispiel: 200PS des Saugmotors sollen auf 300 PS gesteigert werden)

2.Schritt:

- **Berechnung des Luftdurchsatzes A_F**

Moderne Hochleistungsmotoren „schlucken“

etwa **0,0009 kg Luft pro PS und pro Sekunde**

Damit gilt für den Luftmassendurchsatz A_F :

$$A_F = \text{Geplante Motorleistung} \times \text{Luftdurchsatz pro Sekunde}$$

(*Beispiel* $300 \text{ PS} \times 0,0009 \text{ kg/PS/sec.} = 0,27 \text{ kg/sec.}$)

3. Schritt:

- **Berechnung des Druckverhältnisses P_R**

Da die Leistung eines Verbrennungsmotors proportional zu dessen Luftdurchsatz ansteigt, muss jetzt das erforderliche Druckverhältnis ermittelt werden.

Die Leistung des frei ansaugenden Basismotors und die geplante Leistung des aufgeladenen Motors verhalten sich also in der ersten Näherung wie der Luftdurchsatz der beiden Varianten.

$$\text{Druckverhältnis } P_R = \frac{\text{Leistung mit Aufladung}}{\text{Leistung Saugmotor}}$$

Die zum Antrieb des ROTREX – Laders erforderliche Leistung, Strömungsverluste im Ansaugsystem und dem Ladeluftkühler und der Anstieg der Temperatur der Ladeluft addieren sich zu einem „Verlustfaktor“ von etwa 15%.

Damit wird das effektive Druckverhältnis:

$$\text{Druckverhältnis } P_{R \text{ eff}} = \frac{\text{Leistung mit Aufladung}}{\text{Leistung Saugmotor}} \times 1,15$$

$$\text{(Beispiel: } \frac{300 \text{ PS}}{200 \text{ PS}} \times 1,15 = 1,725 \text{ Druckverhältnis } P_{R \text{ eff}} \text{)}$$

4. Schritt:

- **Übertragung der ermittelten Werte in das Druck – Volumenstromkennfeld (Flow chart)**

Die „Flow Charts“ der verschiedenen Ladermodelle zeigen:

- die „Inseln“ für den Wirkungsgrad des Laders.
- die zugehörige Drehzahl des Laders
- die so genannte „Pumpgrenze“ des Laders (linke Linie)

Vom im Schritt 2 ermittelten

Luftmassendurchsatz A_F (Airflow)

wird eine vertikale Linie gezogen. (*Beispiel: $A_F = 0,27 \text{ kg/sec}$*)

Vom im Schritt 3 ermittelten Wert des

Druckverhältnisses P_R (Pressure Ratio)

wird eine horizontale Linie gezogen. (*Beispiel: $P_R = 1,725$*)

Jetzt muss ein Druck – Volumenstromkennfeld (Flow Chart) gesucht werden, bei dem der Schnittpunkt der Linien möglichst in einer „Insel“ mit dem höchsten Wirkungsgrad liegt.

(Beispiel: $A_F = 0,27 \text{ kg/sec}$ und $P_R = 1,725$ schneiden sich im Diagramm des Laders C30-94 in der „Insel“ des maximalen Wirkungsgrads von 80% und bei einer moderaten Drehzahl des Laders von ca. 80.000 U/min)

Einbau Empfehlungen

1. Position und Befestigung des *ROTREX* – Laders

- Der *Rotrex* – Lader kann prinzipiell vor – oder hinter einem Luftmassenmesser liegen.
Da Luftmassenmesser je nach Konstruktionsprinzip mehr oder weniger stark auf „Rückströmung“ und Turbulenzen reagieren ist es empfehlenswert einen ausreichenden Abstand (ca. 150 mm) zwischen Luftmassenmesser und *ROTREX* – Lader vorzusehen.
- Das Gewicht des Laders, die Kräfte durch dessen Antrieb und die Vibrationen des Triebwerks erfordern eine stabile Befestigung des Laders.
Mit den 4 Befestigungsschrauben die das Ladergehäuse und das Getriebegehäuse verbinden kann eine Platte (z.B. aus hochfestem Aluminium oder „Edelstahl“) befestigt werden über die sämtliche Kräfte übertragen werden. (siehe auch Abbildung 1)
- Die Position des druckseitigen Ausgangs kann nach Öffnen von 2 Schrauben (in Abbildung 1 – rot markiert) durch Verdrehen des Ladergehäuses relativ zum Getriebegehäuse den jeweiligen Einbaubedingungen angepasst werden.
- Sowohl beim Verdrehen des Ladergehäuses als auch beim Öffnen der 4 Befestigungsschrauben ist darauf zu achten, dass das Riemenrad nicht beschädigt wird.
- Die zentrale Schraube mit der das Riemenrad befestigt ist darf nicht geöffnet werden. (Verlust des Garantieanspruchs)
- **Das Riemenrad darf nicht gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden, da das Planetengetriebe irreparabel zerstört werden kann.**
(Verlust des Garantieanspruchs)
- Um eine kontinuierliche Ölversorgung des Planetengetriebes sicherzustellen, soll der *ROTREX* – Lader so eingebaut werden, dass die Unterseite des Gehäuses (in Abbildung 1 – rot markiert) horizontal liegt.
Eine Abweichung von max. +/- 15° ist jedoch erlaubt.



Abbildung 1

2. Antrieb des *ROTREX* – Laders

Die korrekte Auslegung des Antriebs beeinflusst in erheblichem Umfang

- die Funktion
- den Wirkungsgrad
- die Lebensdauer
- die Servicefreundlichkeit

des Gesamtsystems.

- Das Übersetzungsverhältnis des Laders muss so gewählt werden, dass bei maximaler Drehzahl des Motors die maximal zulässige Rotor-Drehzahl des ausgewählten Laders nicht überschritten wird.
- Der Durchmesser des Riemenrads D_{PL} am Lader errechnet sich aus:

$$D_{PL} = \frac{\max U_{Motor} \times D_{KW} \times I_{innere}}{\max U_{Rotor}}$$

Dabei sind:

- D_{PL} = Durchmesser des Riemenrads am Lader (mm)
- $\max U_{Motor}$ = maximale Drehzahl des Motors (U/min)
- D_{KW} = Durchmesser des Riemenrads auf der Kurbelwelle (mm)
- I_{innere} = Innere Übersetzung des Laders (Planetengetriebe)
1:9,49 oder 1:12,67 oder 1: 7,5 (siehe „Technical Data Sheet“)
- $\max U_{Rotor}$ = maximale Drehzahl des Rotors (siehe „Technical Data Sheet“)

(Beispiel: $\max U_{Motor}$ = 8.000 U/min
 D_{KW} = 130 mm
 I_{innere} = 9,49 (C30-94)
 $\max U_{Rotor}$ = 100.000 U/min (C30-94)

$$D_{PL} = \frac{8.000 \times 130 \times 9,49}{100.000} = 98,7 \text{ mm} \quad (\text{gewählter Durchmesser} = 100 \text{ mm})$$

Moderne Verbrennungsmotoren verwenden zum Antrieb der Zusatzaggregate (Lichtmaschine, Klimakompressor, Servolenkung etc.) überwiegend Keilrippenriemen.

Eine gängige Abmessung ist dabei der „6 PK“, ein Keilrippenriemen mit 6 Rippen.

Dieser Riementyp, der in einer großen Zahl von unterschiedlichen Längen zur Verfügung steht kann hohe Antriebsleistungen übertragen.

Bei korrekter Auslegung des Gesamtsystems ist dieser Riementyp für den Antrieb der gängigen „ROTREX“ Lader ausreichend.

Die übertragbare Leistung eines Keilrippenriemens hängt maßgebend vom Umschlingungswinkel der Riemenräder ab.

Beträgt bei einem Umschlingungswinkel von
180° die übertragbare Leistung 100%
so reduziert sich die maximal übertragbare Leistung bei beispielsweise
80° auf nur noch 64%

Neben dem „ROTREX“ – Lader ist vor allem der korrekte Antrieb der Lichtmaschine von einem großen Umschlingungswinkel des Riemenrads abhängig.

Moderne Lichtmaschinen erfordern besonders beim Einschaltvorgang hoher Verbraucher (Sitzheizung, Scheibenheizung etc.) hohe Antriebsleistungen.
(siehe auch www.contitech.de – Industrie)

3. Ladedruckregelung

Die Auswahl der „richtigen“ Ladergröße bestimmt den Verlauf des Ladedrucks über den gesamten Drehzahlbereich und dessen Maximum bei hohen Drehzahlen.

Erfahrungsgemäß reichen bei modernen Hochleistungsmotoren Ladedrücke zwischen 0,4 und 0,5 bar aus, um eine Leistungserhöhung von etwa 30% zu generieren.

Um den Anstieg des Ladedrucks bei hohen Drehzahlen zu kontrollieren, können mechanisch/pneumatisch oder elektrisch gesteuerte Umluftventile eingesetzt werden. Mit diesen Ventilen wird ein Teil des Volumenstroms hinter dem Lader über eine „Umluftleitung“ vor den Lader geleitet und damit der Druck reduziert.

In der Praxis haben sich aber auch „Drosseldüsen“ am Eingang des Laders ausgezeichnet bewährt.

Aerodynamisch richtig ausgelegt, beeinflussen diese Düsen den Aufbau des Ladedrucks bei mittleren Drehzahlen nur gering begrenzen bei hohen Drehzahlen den Maximaldruck aber sehr wirkungsvoll.

Diese Düsen reagieren sehr sensibel auf Veränderungen des Durchmessers im Bereich von wenigen Zehntelmillimetern. Sie stellen damit eine einfache, praxisnahe Methode zur Ladedruckregelung dar.

Ein Schließen der Drosselklappe bei hohen Drehzahlen führt zu einem starken Druckaufbau vor der Drosselklappe der verbunden mit einem geringen Volumenstrom den Lader an seine so genannte „Pumpgrenze“ bringt. Dabei reißt die Strömung an den Laderschaufeln partiell ab.

Auch wenn „ROTRX“ Lader dank ihrer konstruktiven Auslegung durch das „Pumpen“ nur in Ausnahmefällen beschädigt werden können, sind die entstehenden Geräusche und das Laufverhalten des Motors im Schiebetrieb und bei kleinen Drosselklappenwinkeln nicht akzeptabel. Ein so genanntes „Pop-off – Valve“, das den hohen Ladedruck vor den Lader leitet muss daher vorgesehen werden.