

Effizienz versus Leistung

Ein bemerkenswerter Artikel von James L. Norton aus dem Jahre 1917

Es ist nicht meine Absicht, hier detailliert auf Probleme beim Bau von Verbrennungsmotoren einzugehen, es soll lediglich ein Versuch sein - so einfach wie möglich - die Bedeutung von Effizienz im Bezug auf Maschinen und Fahrzeuge und den Unterschied zwischen Effizienz und Leistung darzulegen. Die beiden Begriffe werden häufig verwechselt, doch während die eine Maschine leistungsfähig, aber ineffizient, bzw. verschwenderisch ist, kann eine andere sehr wirtschaftlich arbeiten (denn Effizienz könnte man auch als Wirtschaftlichkeit bezeichnen) ohne hingegen die größtmögliche Leistung abzugeben.

Oft wird der Begriff der Effizienz wahllos eingesetzt, um Leistung, Geschwindigkeit oder andere erstrebenswerte Eigenschaften eines Fahrzeugs zu beschreiben. Dies ist aber nicht seine wahre Bedeutung. Ich erinnere mich an eine Gruppe von Motorradfahrern bei einem TT-Rennen, die sich darüber unterhielten, wie effizient doch eine bestimmte Maschine wäre. Einer der Anwesenden, der früher als Konstrukteur bei einer bedeutenden Automobilfabrik beschäftigt war, wollte daraufhin wissen, welche Art von Effizienz gemeint sei und stürzte die Herrschaften mit seiner Frage in tiefe Ratlosigkeit. „Nun, sie läuft eben fantastisch“, antwortete man ihm nach einer Weile und das tat sie ja auch in Bezug auf ihre Leistungsentwicklung. Als sich im weiteren Gespräch aber herausstellte, dass ihr Motor Benzin und Öl in Mengen verschlang, die für den Betrieb zweier gewöhnlicher Motoren gereicht hätten, ohne jedoch deren vereinte Leistung zu erzielen, wurde schnell klar, dass diese Maschine alles andere als effizient war. Sie leistete sozusagen halbe Arbeit für ganzes Geld.

Die effizienteste Maschine ist jene, welche bei der Umwandlung von Treibstoff in Arbeit in einer vorgegebenen Zeit die größte Menge an Arbeitsleistung „herausholen“ kann. Wir werden sehen, dass Leistung nicht zwangsläufig Effizienz bedeutet, und, obwohl Effizienz immer leistungssteigernd wirkt, die größtmögliche Leistung doch stets ineffizient erzielt wird.

Es gibt mehrere Faktoren, durch welche die Effizienz einer Maschine bestimmt wird, einer davon ist die „volumetrische Effizienz“. Sie hat vermutlich eine größere Auswirkung auf die Leistung als jeder andere Faktor und beruht auf demselben Prinzip, das man sich zur Steuerung des Motors über den Vergaserschieber (Drosselung der Gaszufuhr) zunutze macht. Das Volumensverhältnis des Benzin-Luftgemisches, das bei jedem Ansaugtakt in den Zylinder gelangt gegenüber dem nominellen Hubraum stellt diese volumetrische Effizienz (volumetrischer Wirkungsgrad) dar. Dieses Ansaugvolumen möglichst zu vergrößern ist eine der Hauptaufgaben jedes Konstrukteurs, denn, egal wie effizient ein Motor auch in anderer Hinsicht sein mag, wenn sein Brennraum nicht mit einer ausreichenden „Ladung“ beschickt werden kann, wird seine Leistung immer nur der eines Motors mit kleinerem Hubraum aber größerer volumetrischer Effizienz gleichkommen. Die Steuerzeiten und die Gestaltung der Kanäle spielen hier eine entscheidende Rolle.

Nachdem wir eine ausreichende Ladung unseres Motors sichergestellt haben, müssen wir dafür sorgen, dass die Hitze, die durch ihre Verbrennung entsteht, nicht verlorengeht, denn von ihr ist die Ausdehnung der Ladung und damit der Arbeitsdruck im Brennraum abhängig. Das Verhältnis der Energiemenge, die dem Motor als Ladung zugeführt wird gegenüber der Arbeit, die tatsächlich auf den Kolben wirkt, stellt die thermische Effizienz (thermischer Wirkungsgrad) dar. Je höher die thermische Effizienz eines Motors, um so wirtschaftlicher ist er und um so höher ist die Leistungsausbeute im Verhältnis zur verbrauchten Treibstoffmenge.

Die thermische Effizienz wird durch die Größe der Oberfläche von Kolben und Zylinderkopf, die den brennenden Gasen ausgesetzt sind, sowie von deren Temperaturunterschied bestimmt. Je größer die Flächen und der Temperaturunterschied, um so schneller wird die Hitze abgeleitet und geht verloren. Je größer der Hitzeverlust aber ist, desto geringer ist die Ausdehnung und damit der Arbeitsdruck. Es ist also ratsam, der abbrennenden Ladung so wenig Oberfläche als möglich gegenüberzustellen, was am besten durch eine Konstruktion mit hängenden Ventilen (ohv, ohc) zu erreichen ist. Einer Verbrennungstemperatur von bis zu 1600°C (bei welcher Eisen flüssig wie Wasser wird) steht auf der anderen Seite die Notwendigkeit der Zylinderschmierung gegenüber, sowie das unerwünschte Aufheizen bzw. die vorzeitige Entzündung des einströmenden Gases (Klopfen), auch wenn dies bei hohen Drehzahlen keine große Rolle spielen würde.

Trotz aller Anstrengungen, die Effizienz zu steigern, sind wir dazu verdammt, mehr als ein Drittel der bei der Verbrennung entstehenden Hitze durch die Zylinderwände, bzw. den Auspuff zu verlieren, so dass also auch die effizienteste Maschine zu guter Letzt nur sehr ineffizient arbeitet.

Wenden wir uns nach Betrachtung der volumetrischen und thermischen Effizienz nun den mechanischen Verlusten in der Maschine zu. Nachdem Wärmeverluste den brauchbaren Druck auf den Kolben beträchtlich verringert haben, müssen wir versuchen, die verbleibende Kraft so

wirkungsvoll wie möglich auf die Antriebswelle der Maschine zu übertragen. Das Verhältnis der Leistung, die letztendlich an der Antriebswelle anliegt gegenüber der Arbeit, die auf den Kolben wirkt, stellt die mechanische Effizienz (mechanischer Wirkungsgrad) dar. Diese ist generell bei einer größeren Maschine höher als bei einer kleinen und bei einem Langhuber größer als bei einem Kurzhuber. Die mechanischen Verluste ergeben sich durch die Reibung des Kolbens und der Kolbenringe an der Zylinderwand und durch die Arbeit, die zur Ventilbetätigung und für die Pumparbeit beim Gaswechsel nötig sind.

Es scheint also klar, dass eine Maschine mit hoher volumetrischer, thermischer und mechanischer Effizienz mehr Leistung abgibt als eine mit gleichem Hubraum aber allgemein geringerer Effizienz. Tatsache ist aber, dass wir dort, wo es rein um Leistung geht, die Effizienz in den Wind schreiben können. Freilich wäre es schön, könnten wir bei größter Wirtschaftlichkeit auch die höchste Leistung erzielen, aber das ist derzeit leider nicht möglich. Labortests haben gezeigt, dass die perfekteste Treibstoff-Luftmischung, diejenige, welche die schnellste und gründlichste Verbrennung ermöglicht, nicht zwingend den höchsten Arbeitsdruck ergibt.

Das Gewichtsverhältnis von Benzin zu Luft, welches eine optimale Verbrennung ermöglicht, beträgt 1:17, aber die Mischung, mit der man die größte Leistung erzielen kann ist 1:14, also deutlich „fetter“ und daher auch wesentlich unwirtschaftlicher. Dabei wird selten das gesamte Benzin verbraucht, aber es hat den Vorteil, länger zu brennen und so während des Arbeitshubs den Druck aufrecht zu erhalten. Wir verbrauchen zwar mehr Treibstoff, aber die zusätzliche Menge wird auch genutzt und auf die genutzte Menge - nicht zu verwechseln mit der zugeführten Menge - kommt es bei der Leistung an.

Ich habe schon von so mancher Maschine gehört, sie sei sehr kraftvoll, aber trotzdem nicht schnell. Nun, man kann Geschwindigkeit nur durch Leistung erzielen und vorausgesetzt, die angesprochene Maschine ist nicht überladen und richtig übersetzt, so müsste sie doch auch schnell sein. Man wird aber schnell dahinter kommen, dass die hier als „kraftvoll“ bezeichnete Maschine eine ist, die ihre Höchstleistung bereits bei niedriger Drehzahl abgibt und dass diese Höchstleistung im Verhältnis zum Hubraum recht dürftig ausfällt. Die Ursache dafür ist stets unzureichende Gestaltung der Ventile und Kanäle, sowie zu geringe Verdichtung. Höhere Drehzahlen und die damit verbundene Leistungssteigerung sind nur durch ausreichend groß dimensionierte Ventile und Kanäle und ein angemessenes Verdichtungsverhältnis als Voraussetzung für schnelle Verbrennung zu erzielen. Daneben sollen geringe oszillierende Massen und leichte rotierende Teile ein Minimum an mechanischen Verlusten sicherstellen.

James Lansdowne Norton, 1917

Anmerkungen des Übersetzers:

Die Bedeutung des Begriffs „efficiency“ ist im Englischen wesentlich breiter gefasst als jene, der in die deutsche Sprache übernommenen „Effizienz“ und wird zur Bezeichnung von so verschiedenen Dingen wie Kraft, Geschwindigkeit, Leistung, Wirtschaftlichkeit oder Wirkungsgrad verwendet. In der Übersetzung wurde dies bewußt so beibehalten, sonst wäre der eigentliche Sinn von Nortons Artikel verlorengegangen, der ja im Auseinanderhalten der verschiedenen Effizienzen liegt.

Aus heutiger Sicht ist der Artikel aber vor allem deshalb interessant, weil er zeigt, wie gut die Verbrennungsabläufe im Motor damals schon erforscht waren und wie genau man - zumindest theoretisch - wusste, welcher Weg beim Bau schneller Motoren zu beschreiten ist. Ein Blick auf den damaligen Fuhrpark zeigt, dass seiten- und wechselgesteuerte Motoren die Straßen und größtenteils auch die Rennstrecken beherrschten. Der Grund dafür lag in der höheren Zuverlässigkeit dieser einfach aufgebauten Triebwerke, die meist eine größere Rolle spielte als die erreichbare Höchstgeschwindigkeit. Obengesteuerte Motoren belasten z.B. Ventile, Ventillfedern, Pleuellager, Antriebsketten wesentlich mehr, haben größere oszillierende Massen und setzen wegen der gesteigerten Drehfreudigkeit eine bessere Schmierung und Kühlung voraus. Es dauerte daher noch bis in die frühen Zwanzigerjahre bis sich der ohv-Motor im Rennsport durchsetzen konnte. Mitte des Jahrzehnts wurde der Einfluss der Ventilüberschneidung auf die Zylinderfüllung entdeckt, blieb aber noch jahrelang wohlgehütetes Insiderwissen. Zusammen mit einer entsprechenden Gestaltung des Auspuffs konnte dadurch der volumetrischen Wirkungsgrad entscheidend verbessert werden. Durch halbkugelförmige Brennräume steigerte sich der thermische Wirkungsgrad, Leichtmetallkolben hatten sich durchgesetzt und ab der zweiten Hälfte der Zwanzigerjahre stellten eigentlich alle Hersteller ihre Rennmotoren auf Umlaufschmierung sowie auf wälzgelagerte Kurbelwellen, Nockenwellen, Kipphebel, etc. um, womit auch noch einer Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades Rechnung getragen wurde.

Gernot Schuh