

Klopfende Verbrennung und deren Betrachtung im Ottomotor

Max Rahner

1 Was ist Klopfen?	2
1.1. Genauere Betrachtung	2
2. Auswirkungen	3
2.1 Erosive Schädigungen.....	4
2.2 Abschmelzungen durch Klopfen.....	4
2.3 Andersartige Schädigungen.....	5
3. Entstehung von klopfender Verbrennung (Detonationen)	5
3.1 Einfluss von Squish Band, Squish Velocity und Squish Clearance	5
3.2 Wie kommt es zur Detonation?.....	7
3.3 Detonationsspuren auf der Einlassseite.....	9
3.4 Dinge, die Detonationen begünstigen	9
3.5 Dinge, die die SV und damit die Turbulenzintensität vergrößern	9
4. Bauformen von Zylinderköpfen	10
4.1 Offset Zylinderköpfe	10
4.2 Zentralköpfe	10

In den Internetforen wird häufig von „Quetschkante“ und „Quetschspalte“ gesprochen, gemeint wird ein und dasselbe, trotz der grundlegend komplett unterschiedlichen Bedeutung der beiden Begriffe, auch wenn diese beiden Begriffe im Deutschen nicht exakt definiert sind.

Um Irritationen vorzubeugen, werde ich im Folgenden die englischen Bezeichnungen verwenden.

- Squish Clearance (SC): Geringster Abstand des sich im OT befindlichen Kolbens zur Brennraumdecke
- Squish Band (SB): Die „Quetschfläche“ im Brennraum, genauer die Fläche am Rande des Brennraums.
- Squish Area Ratio (SAR): Verhältnis von Squish Band Radius zum gesamten Radius des Brennraums.
- Squish Velocity (SV): Beschleunigung des Gemischs durch den sich auf die SB zu bewegenden Kolben.

1 Was ist Klopfen?

Als Klopfen bezeichnet man eine ungewollte und unkontrollierte Selbstentzündung des Frischgases im Brennraum.

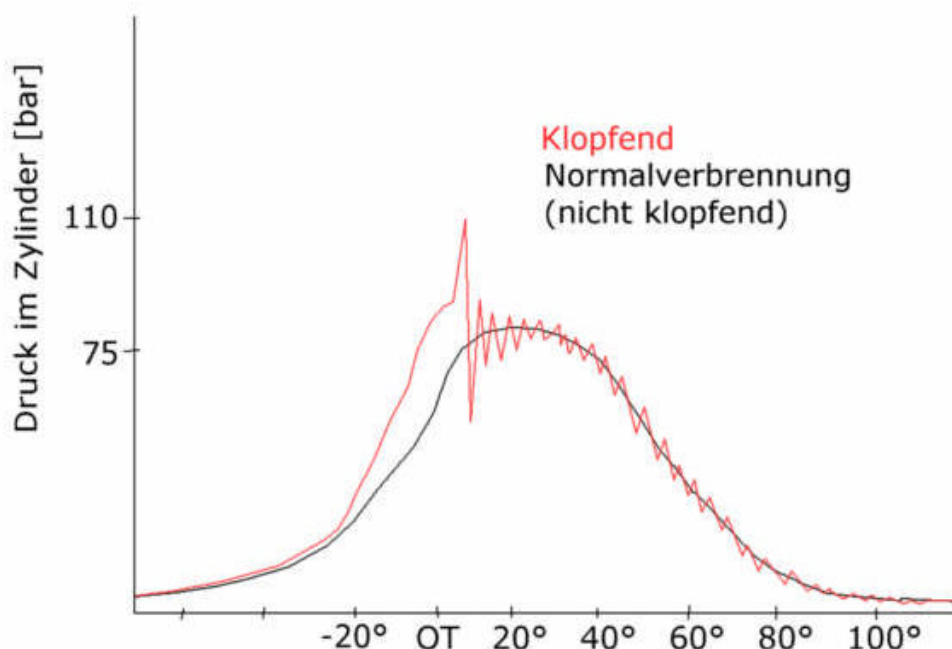
Einfacher: Noch nicht verbranntes Gemisch im Brennraum entzündet sich durch starke Druck- und Temperaturzufuhr selbst zu einem ungewollten Zeitpunkt, zu dem es noch nicht von der von der Kerze kommenden Flamme erreicht ist.

Der Volksmund spricht von „klopfen“, weil dieses Phänomen ein markerschütterndes und für den Erbauer des Motors (für den Motor selbst auch...) äußerst unangenehmes Geräusch produziert, das sog. „Klopfen“ oder „Klingeln“.

Besonders tritt eine klopfende Verbrennung im oberen Lastbereich auf und setzt der unendlichen Leistungssteigerung die Grenzen: Eine klopfende Verbrennung entsteht durch ein zu hohes Verdichtungsverhältnis.

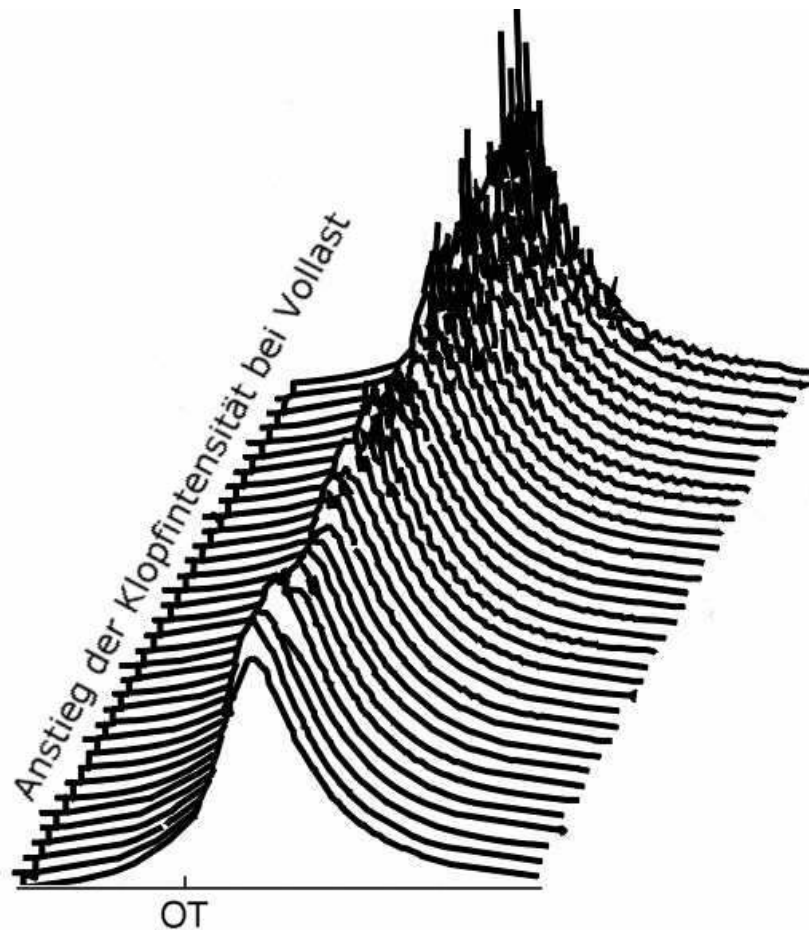
1.1. Genauere Betrachtung

Klopfen ist keine normale, sondern eine abnormale Verbrennung, deren Kennzeichen hochfrequente Druckschwankungen im Brennraum und Schädigungen oder Abschmelzungen der Kolbenoberfläche und der Brennraumdecke ist. Dauerresultat einer klopfenden Verbrennung ist ein kapitaler Motorschaden. Außerhalb des Motors sind diese Kennzeichen nicht wahrnehmbar, würde durch die hochfrequenten Druckschwankungen nicht ein sehr eigenes Geräusch entstehen: Das „Klingeln“ oder „Klopfen“, ein metallisches Geräusch, das schnell von jedem wahrgenommen wird.



Wie im Diagramm zu sehen, zeichnet sich die klopfende Verbrennung durch einen stark beschleunigten Druckanstieg aus. Die eigentliche klopfende Verbrennung beginnt erst etwas später und setzt sich in den genannten typischen Druckschwankungen, welche in einem Korridor um den Idealverlauf liegen, fort.

Klopfen ist ein stochastischer Vorgang (d.h. vom Zufall abhängig), so können bei einem Motor mit konstantem Setup und konstanten Umgebungsbedingungen im klopfenden Betrieb Zyklen mit stark variierender Klopfstärke auftreten.



So kann nicht klar gesagt werden, wann ein Motor wie stark klopft. Er tut es, oder er tut es nicht. Mal tut er es, mal nicht.

Woher kommt aber das Geräusch?

Das Geräusch ist ein Resultat der starken Druckschwankungen. Die Druckspitzen prallen im inneren gegen die Brennraumwand und erzeugen ein hochfrequentes Geräusch (10.000-30.000 Hz). Diese entstehende Frequenz macht man sich bei Klopfensoren im Automobilbau oder auch bei den Detonation Counter aus dem Motorradsport zu nutze. Hier wird durch Beschleunigungssensoren am Motorblock ein Zusammenhang zwischen Brennraumschwingung und Körperschallanregung hergestellt und so eine klopfende Verbrennung erkannt.

2. Auswirkungen

Die Auswirkungen der klopfenden Verbrennung sind erosive Schädigungen des Kolbens und des Brennraums, Überhitzung des Kolbens und damit die Gefahr von Glühzündungen mit den damit verbundenen Abschmelzungen im Auslassbereich und der Gefahr von Kolbenklemmern.

2.1 Erosive Schädigungen



Erstes beim Zerlegen des Motors erkennbares Anzeichen für eine klopfende Verbrennung ist die im oberen Bild rechts dargestellte Anrauhung des Kolbenbodens, als wäre der Kolbenboden teilweise mit Sand gestrahlt worden.

Diese makroskopisch betrachtete raue Oberfläche besteht mikroskopisch betrachtet aus unzähligen kleinen Kratern und Furchen, die sich bei jeder kleinen ungewollten Explosion von unverbranntem Frischgas (diese ungewollte Explosion ist das Klopfen) bilden. Mit steigender Klopfintensität werden Krater und Furchen immer größer, bis sie auch mit bloßem Auge auf dem Kolbenboden erkennbar sind.

2.2 Abschmelzungen durch Klopfen

Da ein Anstieg des Drucks auch immer einen Anstieg der Temperatur bedeutet, erhöht sich die Temperatur bei der klopfenden Verbrennung stark gegenüber der Normalverbrennung.

Im Extremfall kann die Temperatur derart hoch werden, dass Teile des Brennraums oder des Kolbens einfach weg schmelzen. Achten sollte man daher auf eine eigenartig verrundete Kolbenoberkante im Auslassbereich, denn hier beginnt durch die eh schon hohen Temperaturen die Abschmelzung zu erst.

Mir sind schon Kolben zu Gesicht gekommen, die im Auslassbereich gut 25% ihres Kolbenbodens Durch Abschmelzung verloren haben. Ein Kolbenring stand noch da (das Gas konnte sozusagen zwischen Kolbenring und Kolben durchfließen, da das Stück des Kolbens, das das normalerweise verhindert, einfach weg geschmolzen war), der andere war sogar auch abgeschmolzen, was bei einem Stahlring deutlich schwerer ist, als bei dem aus Alu bestehendem Kolben.

Auch wenn ehemals scharfe Kanten im Zylinderkopf plötzlich rund werden, ist Vorsicht geboten!

Auch der Steg zwischen zwei Kolbenringen kann durch diese hohen Temperaturen verformt werden oder durch klopfende Verbrennung sogar zum Bruch gebracht werden.



Abschmelzung im Auslassbereich (eingeschmolzenes Loch etwa 4mm tief, bis fast auf den Kolbenring)

2.3 Andersartige Schädigungen

- Durch die erhöhte Temperatur dehnen sich der Kolben und der Zylinder stärker aus. Leider sind dem die Stehbolzen im Weg, so dass der Zylinder keine exakt runde Bohrung mehr hat. Ergebnis ist der typische Hitzefresser auf Höhe der Stehbolzen.
- Durch den stark erhöhten Spitzendruck wird eine größere Belastung auf Kolbenringe und Pleuellager ausgeübt, ihr Verschleiß steigt stark an.

3. Entstehung von klopfender Verbrennung (Detonationen)

Jetzt wird es böseartig: Detonationen hinterlassen ihren Schaden nie dort, wo sie entstehen.

3.1 Einfluss von Squish Band, Squish Velocity und Squish Clearance

Die Aufgabe der SB ist es, Frischgas unterhalb der Kerze zu konzentrieren und das Gemisch zu beschleunigen, um eine turbulenteren Verbrennung zu erreichen.

Die Oktanzahl beschreibt nichts anderes, als die Eigendündhemmung des Treibstoffs. Einen niederoktanigen Treibstoff muß ich weniger Energie zuführen, bis er sich selbst entzündet, als einem hochoktanigen Treibstoff.

Von vielen erlebtes Beispiel ist der Versuch, Normalbenzin in einem hoch verdichtenden Motor zu fahren. Resultat ist eine klopfende Verbrennung, da die durch die Verdichtung zugeführte Energie bereits ausreicht, um das Gemisch zu zünden.

Kleiner Formelhintergrund:

Verdichtung im Ottomotor kann man als adiabat betrachten, das heißt, dass sich beim Verdichten sowohl Temperatur als auch Druck und Volumen ändern, aber keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht wird.

$$P \cdot V^k = \text{const.}, k > 1 \quad (\text{k ist der Adiabatenexponent})$$

Änderung von Entropie und Wärme ist Null:

$$\Delta Q = 0, \Delta S = 0$$

Und weiter:

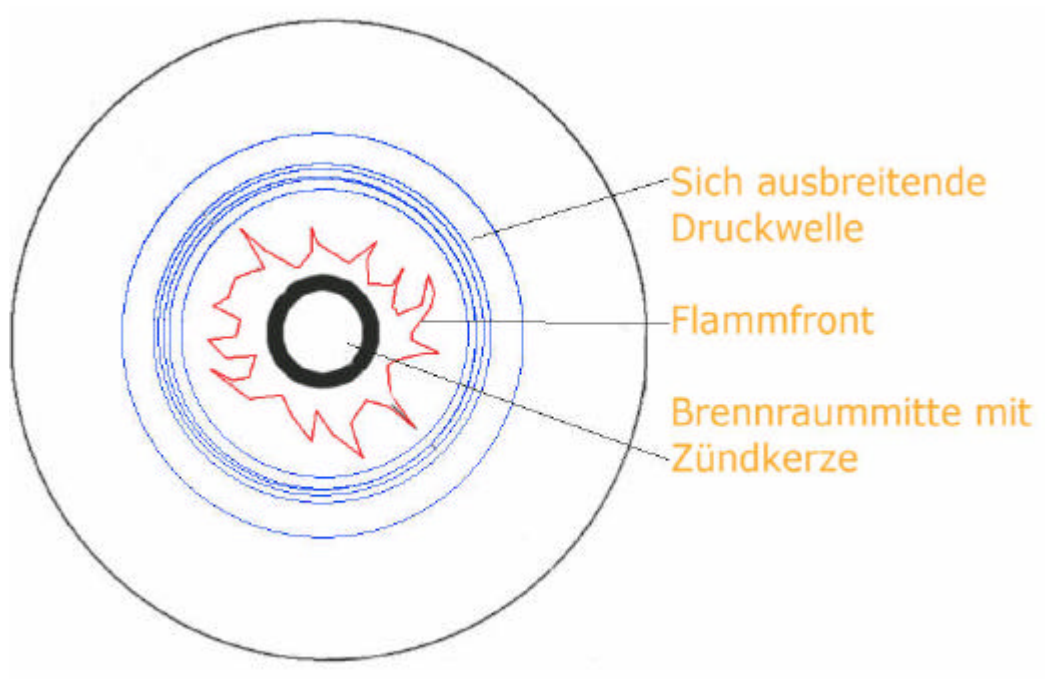
$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{((k-1)/k)} = (V_2/V_1)^{(k-1)}$$

Geht man als von Luft als zu verdichtendem Gas aus (Adiabatenexponent $k=1,4$) und einer Temperatur von $40^\circ\text{C} / 313^\circ\text{K}$ beim Ansaugen (T_1), ergibt sich bei einem Brennraumvolumen von $7,5\text{cm}^3$ (was nur etwa einer Verdichtung von 10:1 entspricht) und einem Hubraum von 68cm^3 eine Temperatur von stolzen 483°C und einen Verdichtungsdruck von 22,183 bar.

Bei dem deutlich höheren Verbrennungsdruck von etwa 80 bis 90 bar in einem solchen Motor entstehen auch noch deutlich höhere Temperaturen (genauer gesagt entsteht der hohe Verbrennungsdruck erst durch die hohen Temperaturen, aber dieses Spiel lässt sich glücklicherweise auch umdrehen).

Nun kommt etwas namens Durchbrenngeschwindigkeit ins Spiel. Das ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Flammfront im Brennraum vorwärts bewegt. Ohne Turbulenzen betrachtet liegt diese Geschwindigkeit bei gerade mal 0,4 bis 0,5 m/s. Verglichen mit der Schallgeschwindigkeit, die bei Raumtemperatur schon bei runden 340m/s liegt, ist die Flammfront also sehr langsam. Glücklicherweise gibt es aber die SV, die das Gemisch zur Brennraummitte hin derart stark beschleunigt, dass durch diese turbulente Strömung die Durchbrenngeschwindigkeit stark gesteigert werden kann („The Eddy Burning Modell“, Blizzard & Keck, 1974). Zusätzlich ist die Flamme nie Rund, sondern stark verwinkelt, um sich eine möglichst große Oberfläche und damit mehr Fläche, an der verbrannt werden kann, zu schaffen („The Fractal Burning Modell“; Goudin, F.C. et al. 1987, Abraham et al. 1985). Dummerweise ist die Durchbrenngeschwindigkeit auch dann nicht mal annähernd so groß wie die Schallgeschwindigkeit (welche bei diesen Temperaturen sehr sehr hoch ist), mit der sich die Druckwelle ausbreitet.

Übrigens: Die SV kann auch so hoch sein, dass so starke Turbulenzen entstehen, dass die Flamme gelöscht wird!!



Wie wir nun wissen, ist die Flamme deutlich langsamer, als die Druckwelle, die von der Flamme selbst ausgelöst wird, aber durch die SB und die damit einkehrende SV nähern wir uns mit der Flammgeschwindigkeit der Druckgeschwindigkeit etwas an.

Was für einen Vorteil habe ich durch eine kleine SC?

Eine kleine SC hat einen unglaublichen Vorteil: In engen Spalten kommt es zu einer Gemischlöschung, d.h. ich kann im Bereich zwischen Kolben und SB keine (bzw. nur sehr wenige; Detonationslosigkeit ist praktisch unmöglich) Detonationen bekommen, wenn ich die SC richtig wähle.

Dazu kommt der Vorteil einer durch eine kleine SC gesteigerten SV, was ja, wie oben erwähnt, eine schnelle Durchbrennung begünstigt.

Warum sollte ich mein Gemisch unter der Kerze konzentrieren? Die Antwort ist recht einfach: Kurze Flammwege, daher kann man besser mit der langsamen Verbrennung arbeiten.

Das führt auch zur SAR, diese sollte nämlich so gewählt werden, dass die Flammwege nicht zu groß werden, allerdings darf der Brennraum auch nicht zu tief werden. Es gilt, einen Kompromiss aus brauchbarer SAR und brauchbarem Verdichtungsverhältnis zu finden.

Dieser Kompromiss ist auch von der Auslegung des Motors abhängig. Ein großer Anteil an SB und der daraus entstehende tiefe Brennraum begünstigen eine drehmomentorientierte Leistungscharakteristik, ein kleiner Anteil mit flachem Brennraum das Gegenteil.

Zu klein darf der SB Anteil aber nicht werden, Gründe siehe oben.

3.2 Wie kommt es zur Detonation?

Die Durchbrenngeschwindigkeit ist auch von der Temperatur abhängig. Im Auslassbereich ist die Temperatur durch die Umströmung mit dem sehr heißen Abgas sehr hoch, im Bereich vor dem Boost Port ist die Temperatur dagegen wegen des einströmenden kalten Frischgases wesentlich geringer.

Die Flamme breitet sich nun in Richtung des Auslasskanals wesentlich schneller aus, als in Richtung des Boost Ports.

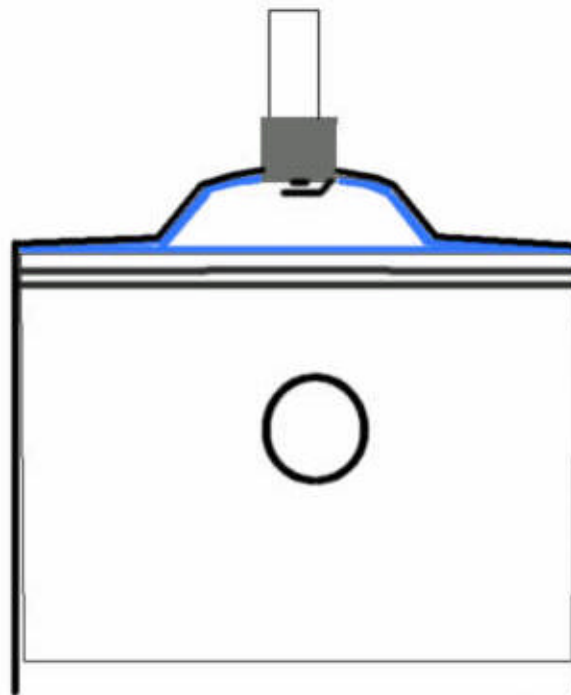
Logische Schlussfolgerung ist, dass im Bereich vor dem Boost Port deutlich mehr Zeit ist, das Gemisch durch Fremdeinwirkung (d.h. nicht durch die Flammfront ausgelöst durch die Zündkerze) zu entzünden.

Erreicht die sich ausbreitende Druckwelle das noch unverbrannte Gemisch, steigt bei diesem adiabaten Vorgang die Temperatur (und auch die molekulare Geschwindigkeit) lokal rasant an. Die hohe Temperatur kann dem noch nicht verbrannten Gemisch derart viel Energie zuführen, dass es sich selbst entzündet, noch bevor die Flammfront das Gemisch erreicht hat.

Nun haben wir zwei sich ausbreitende Druckwellen, einmal die der Initialzündung und die der ersten Detonation. Diese werden sich konstruktiv (oder auch destruktiv, je nachdem, aus wessen Sicht man es sieht) rekombinieren und für weitere Detonationen an anderen Stellen sorgen. Überall, wo sich diese Druckwellen treffen, wird eine den Motor zerstörende Kraft frei.

Interessant: Warum entsteht der Schaden in der Regel an der Auslassseite, wenn doch an der Einlassseite die Detonation entsteht?

Die Antwort auf diese Frage ist schon fast unglaublich.



Die im Bild blau markierte Fläche nennt sich im englischen Fachbegriff Boundary Layer, zu Deutsch Grenzschicht.

Diese Grenzschicht besteht aus Luft/Benzin-Gemisch, welches selbst dann nicht verbrennt, wenn es der Flammfront ausgesetzt ist, da die Grenzschicht mit der kühlen Außenwand des Brennraums in Verbindung steht. Sogar Detonationen bis zu einem gewissen Maß hält die Grenzschicht stand.

Nur in extremen Fällen kann diese Schicht abgebrannt oder verdrängt werden.

Die Grenzschicht bildet ebenfalls eine Art Schutzfilm auf Metall. Sie füllt die SC komplett aus.

Jetzt das Unglaubliche: An den Wänden des Brennraums verebben die Druckwellen nicht etwa, sie werden reflektiert. Irgendwann sind die Druckwellen am Auslass angelangt und verstärken sich dort in oben genannter Weise. Aufgrund der am Auslass höheren Temperaturen gegenüber anderen Stellen der Bohrung kann hier die Grenzschicht

verdrängt, ja sogar gezündet und damit der Kolben und der Brennraum beschädigt werden.

3.3 Detonationsspuren auf der Einlassseite

Das Szenario ist folgendes: Ich zerlege einen Motor. Ungeachtet der vollkommenen Unerklärtheit in diesem Text liegen die Detonationsspuren nicht auf der Auslassseite, sondern auf der Einlassseite. Der Auslass sieht dagegen einwandfrei aus. Schon bei Spuren auf der Auslassseite war der Ursprung auf der Einlassseite zu suchen. Suchen wir ihn diesmal also beim Auslass.

Wie kann an dieser Stelle eine Detonation entstehen?

Die Durchbrenngeschwindigkeit ist stark temperaturabhängig (Radikal-Verzweigungsreaktionen brauchen viel Energie, Abbruchreaktionen wenig) jedoch haben wir im Motor eine turbulente Verbrennung. Bei dieser vergrößert sich die Brenngeschwindigkeit durch ansteigende Flammenoberfläche (Stichwort Gibsonlänge). Jetzt hängt die Brenngeschwindigkeit nicht nur von der Temperatur ab sondern ebenfalls von der Turbulenzintensität. Mit dieser steigt auch die Brenngeschwindigkeit. Wenn die Brenngeschwindigkeit erhöht wird, gibt es irgendwann einen Punkt an dem die Temperatur am Auslass nicht mehr entscheidend ist, weil sie durch Turbulenzparameter überkompensiert wird. Jetzt steigt aber dummerweise mit kleiner werdender SC nicht nur die Intensität, sondern auch die absolute Flammenfrontgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, auf der sich die die Flamme selbst fortbewegt. Dadurch wird meine Kompression des Restgases immer schneller und damit auch adiabater, bis wieder die Temperatur von Hotspots ausreicht, um selbst zu zünden. Diesmal aber eben Auslassseitig mit Schäden auf der Einlassseite. In diesem Fall wäre nicht die Zeit der determinierende Faktor, sondern die Turbulenzintensität und damit die Flammgeschwindigkeit.

3.4 Dinge, die Detonationen begünstigen

- Zu mageres Gemisch: Mit einem mageren Gemisch ist die Eigenzündtemperatur gegenüber einer korrekten Einstellung geringer, daher können sich so schneller selbstzündbare Hotspots bilden.
- Zu geringe SV: Die Folge ist eine sehr geringe Durchbrenngeschwindigkeit
- Zu hohe Verdichtung: Das Temperaturniveau am Ende der Verdichtung ist bereits sehr hoch, der Schritt zur Entstehung von Hotspots ist nur noch ein kleiner.
- Zu schlechte Kühlung: Siehe letzten Punkt
- Auspuffanlage: Falsche Dimensionierung kann einen Hitzestau verursachen
- Falscher Zündzeitpunkt: Bei einem zu späten Zündzeitpunkt bleibt zu wenig Zeit, das Gemisch abzubrennen.

Daraus ergibt sich auch, was zu tun ist, wenn man in seinem Motor Detonationen findet:

- Fetter Bedüsen
- Verdichtung zurücknehmen
- Squish Clearance verringern bei Detonationsspuren an der Auslassseite, bei Detonationsspuren an der Einlassseite Squish Clearance vergrößern.
- Kühlung verbessern
- Wahl der Auspuffanlage und des Zündzeitpunkts überprüfen

3.5 Dinge, die die SV und damit die Turbulenzintensität vergrößern

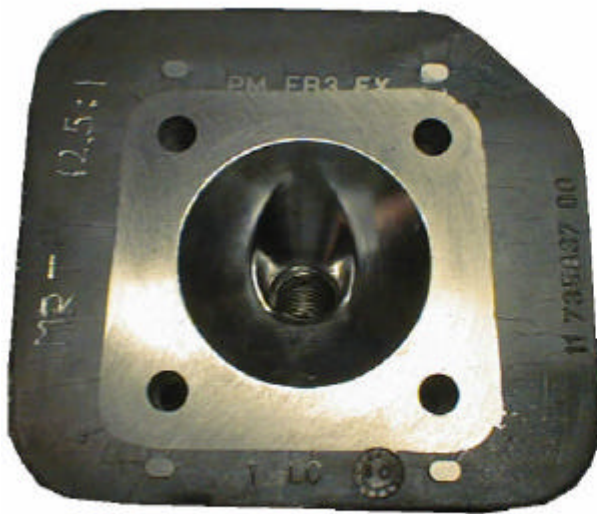
- Größere SB Fläche

- Kleinere SC
- Geringere Verdichtung
- Mehr Drehzahl ;)
- Winkel der SB verkleinern

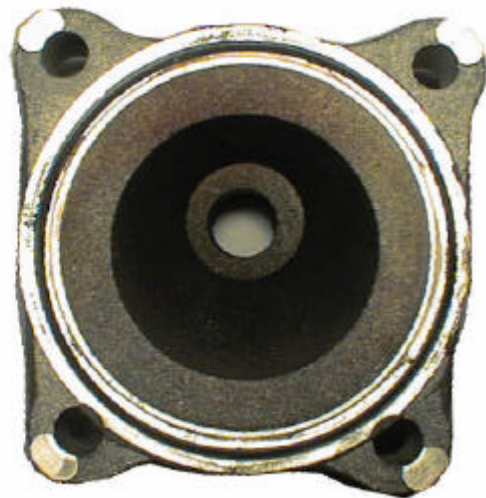
Die entscheidendsten Faktoren sind SC, SAR und die Drehzahl.

4. Bauformen von Zylinderköpfen

4.1 Offset Zylinderköpfe



Peugeot 100ccm AC Kopf



Malossi 172ccm LC Kopf

Jeder kennt die Brennräume wie die des Runner 180, dessen Zündkerze zum Einlass hin versetzt ist. Ziel einer solchen Brennraumkontur ist eine Veränderung des Flammwegs: Zur kalten Einlassseite hin wird der Weg so kürzer, zur warmen Auslassseite hin länger. Links ein (stark bearbeiteter) Peugeot 100ccm AC Kopf. Dieser geht nach dem gleichen weg vor, allerdings OHNE Squish Band.

Offsetköpfe waren leider nie so erfolgreich, wie man sich das gerne wünschte, da eben auch noch andere Eigenheiten mit einspielen können

4.2 Zentralköpfe



Hier ein Stage 6 Sport Pro Zylinderkopf.
Man erkennt als äußeren Ring im Brennraum die SB.
Die Zündkerze sitzt Zentral.

Um die Brücke zu dem vorhin gezeigten Runner 180 Zylinderkopf zu schlagen: Bei den großen Piaggio Motoren geht man inzwischen dazu über, einen Zylinderkopf mit zentralem Kerzensitz zu montieren, da so deutlich höhere Verdichtungen gefahren werden können, bis sich eine klopfende Verbrennung einstellt.