

# Zündkurven

Copyright © 2009 Frits Overmars

Was bringt eine Zündanlage mit variablem Zündzeitpunkt? Die kurze Antwort lautet: eine vollere Leistungskurve. Wenn man am Motor sonst nichts ändert, bleibt die Höchstleistung so wie sie war, aber bei Überdrehzahlen fällt mit der Zündverstellung die Leistung weniger stark ab, und vor allem kann man das Drehmomentloch, das jeder Hochleistungs Zweitakter bei zweidrittel Drehmoment-drehzahl zeigt, einigermaßen ausfüllen.

Jetzt kommt die lange Antwort. Ich möchte nicht nur erklären welche Vorteile so eine Zündung einbringt, sondern auch die Gründe verdeutlichen, so dass der Leser mit diesem Wissen selbst weiter forschen kann. Zuerst werde ich aber gar nicht von der Zündung reden; die kommt erst später dran. Zuerst möchte ich klarstellen was während der Spülung vor sich geht.

## Alles muss passen

Was macht aus einem Zweitakter einen Hochleistungsmotor? Der Auspuff.

Der saugt ab Aö erstmal den Zylinder leer. Wenn die Abgase heraus sind, öffnen die Überströmer und es strömt Frischgas aus dem Kurbelgehäuse über die Spülkanäle in dem Zylinder. Der Auspuff saugt dann aber immer noch, und ein Teil dieses Frischgases wird quer durch den Zylinder bis im Auspuffkrümmer herein gesaugt.

Wenn Drehzahl, Auspufflänge und Schallgeschwindigkeit alle zueinander passen, werden jetzt die Überströmer vom Kolben wieder verschlossen und gleichzeitig wechselt die Strömung im Auspuffkrümmer ihre Richtung und wird das entwischte Frischgas zurück im Zylinder geschoben. Schliesslich macht der Kolben dann auch den Auslassschlitz wieder zu, so dass das zurückgedrückte Frischgas im Zylinder gefangen ist.

Es gibt zwei Fälle wobei Drehzahl, Auspufflänge und Schallgeschwindigkeit **nicht** alle zueinander passen:

Wenn die Drehzahl zu hoch ist (oder der Auspuff zu lang, oder die Schallgeschwindigkeit zu niedrig), wird zwar noch Frischgas bis im Krümmer gesaugt, aber die Rückströmung beginnt für diese Drehzahl zu spät: der Auslassschlitz schliesst schon wieder bevor all dieses Frischgas zurückgeschoben ist. Darum fällt bei Überdrehzahlen die Leistung ab.

## Loch

Wenn andererseits die Drehzahl zu niedrig ist (oder der Auspuff zu kurz, oder die Schallgeschwindigkeit zu hoch), benimmt sich der Motor noch mürrischer. Zwar wird der Zylinder leergesaugt und gespült, und kommt genügend Frischgas im Krümmer um den Zylinder anschliessend aufladen zu können, aber die Rückströmung fängt für diese Drehzahl viel zu früh an, wenn die Überströmer noch geöffnet sind. Der Überdruck der von der Rückströmung erzeugt wird im Zylinder, entwischt sofort wieder über die Spülkanäle bis ins Kurbelgehäuse. Wenn dann die Spüler endlich schliessen, herrscht im Zylinder kein Überdruck. Den Überdruck gibt es im Kurbelgehäuse, was nicht gerade erforderlich ist für den nächsten Ansaugvorgang. Und die Rückströmung hat nicht nur zu früh angefangen, sondern kommt auch viel zu früh zum stillstand und wechselt anschliessend erneut die Strömungsrichtung (Helmholtz-hinundher). Das bisschen Frischgas das noch im Zylinder verblieb, wird also nachträglich wieder heraus gesaugt. Und dann macht endlich, aber viel zu spät, der Kolben den Auslass zu. Kein Wunder das es dann ein riesiges Drehmomentloch gibt.

Außerdem säuft der Motor nun: pro PS verbraucht er viel mehr Benzin und ein erheblicher Teil davon verschwindet unverbrannt durch das Endrohr.

## Brenngeschwindigkeit und Expansion

Es gibt zwei Möglichkeiten um das Auspuffgeschehen an zu hohe oder zu niedrige Drehzahlen anzupassen: die Auspufflänge ändern oder die Schallgeschwindigkeit ändern.

Auspüffe mit verschiebbaren Krümmer wie eine Posaune hat es schon gegeben, und auch Auspüffe wobei der Endkonus verschiebbar angeordnet war. Das kann zwar funktionieren, aber es erfordert eine menge Aufwand. Die Schallgeschwindigkeit beeinflussen ist einfacher; das funktioniert über der Abgastemperatur.

Die Höchsttemperatur im Brennraum kann bis 2400°C betragen. Aber wegen der Expansion beim abwärts bewegenden Kolben kühlt sich das Abgas größtenteils wieder ab bevor der Auslass öffnet. Und diese Expansion können wir variieren.

Sie beginnt nämlich wenn die Verbrennung gerade vollendet ist und der Zylinderdruck maximal ist, und sie dauert bis Aö. Je früher nach OT die Verbrennung beendet ist, umso grösser ist die nachfolgende Expansion und desto kühler ist das Abgas wenn es im Auspuff hineinströmt.

Wann die Verbrennung vollendet ist, hängt von zwei Faktoren ab: der Zündzeitpunkt und die Brenngeschwindigkeit. Letztere wiederum ist abhängig von der Quantität (viel oder wenig Frischgas), der Qualität (sauberes Frischgas oder viel Vermischung mit Abgas), das Mischungsverhältnis Luft / Benzin (Fett, Mager oder genau richtig), und der Verwirbelung der verursacht wird durch die Quetschkante.

Wer unbedingt heisses Abgas haben will, stellt also den Zündzeitpunkt auf spät so daß die Verbrennung erst spät anfängt, montiert eine kleine Hauptdüse weil mageres Gemisch langsamer und somit länger brennt, und verbaut eine handvoll Kopfdichtungen so daß die Quetschkante kaum noch quetscht.

Das Umgekehrte habt ihr vielleicht auch schon erlebt: Frühzündung, fettes Gemisch und hohe Verdichtung nehmen dem Motor seine Drehfreudigkeit.

Man sollte aber nicht mit allen obengenannte Faktoren spielen. Um Leistung und einen gesunden Motor zu bekommen ist es wichtig dass die Verbrennung so schnell wie möglich abläuft. Also richtig bedüsen, einen kompakten Brennraum benutzen und effektiv quetschen. Zum beeinflussen der Abgastemperatur bleibt uns dann der Zündzeitpunkt.

Jetzt sind wir beim Kern der Sache: bei niedrigen Drehzahlen ist entweder der Auspuff zu lang oder der Schallgeschwindigkeit zu hoch. Variable Auspufflängen erfordern zuviel Aufwand, also muss die Schallgeschwindigkeit und damit die Abgastemperatur runter. Das erreichen wir mit Frühzündung. Und für hohe Drehzahlen ist der Auspuff eigentlich zu lang, also kompensieren wir das mit Spätzündung.

## Schnittpunkte

Jeder auch nur annähernd gesunder Motor verkräftet 16° Vorzündung. Mit diesem fixen Wert machen wir eine Prüfstandmessung und dabei kommt irgendeine Leistungskurve heraus. Dann stellen wir die Zündung auf 12° fix und messen wieder. Nehmen wir mal an dass die 16°-Leistungskurve die beste ist bis 10.000 U/min, und die 12°-Kurve ab 10.000 U/min. Bei 10.000 U/min schneiden sich die beide Kurven, haben also dort die gleiche Leistung. Man könnte dann sagen: bei 10.000 U/min sind die 16° genausoviel zu früh wie die 12° zu spät sind. 14° könnte also der optimale Wert sein für 10.000 U/min. Anschließend stellen wir die Zündung auf 14° fix und machen wieder eine Leistungskurve. Beispielsweise schneidet diese 14°-Kurve die 16°-Kurve bei 8000 U/min und die 12°-Kurve bei 11000 U/min. Dann können wir schlussfolgern dass 15° optimal ist bei 8000 U/min, 14° bei 10.000 U/min, und 13° bei 11000 U/min.

## Entsorgen

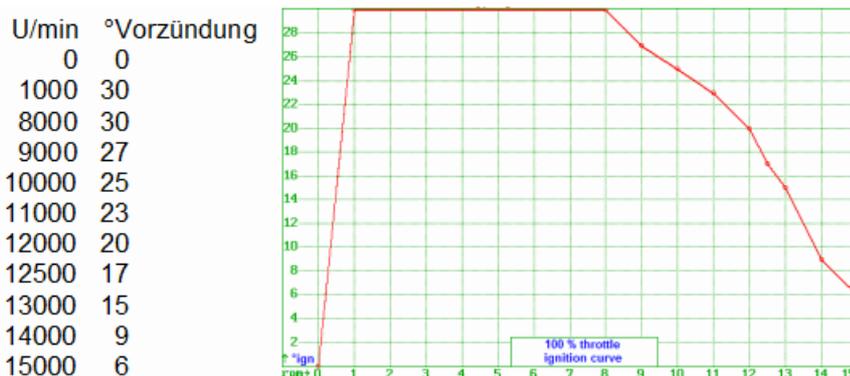
Ganz oben kann man unbesorgt experimentieren. Vorbei an der Leistungsdrehzahl gibt es kaum ein Detonationsrisiko, und es macht sowieso keinen Sinn dort extrem viel Vorzündung zu geben. Aber in der Nähe von der Drehmoment-drehzahl muss man vorsichtig sein; dort kann zuviel Vorzündung teuer werden. Noch weiter unten, wo der Motor wenig Drehmoment, also wenig Füllung hat, ist die Gefahr wieder kleiner. Sogar GP-Motoren verkräften dort locker 30° Vorzündung, und das geht auch bis 8000 U/min noch gut. Wer aber mit dieser 30° Vorzündung versucht eine komplette Leistungskurve bis zur Höchstdrehzahl zu messen, kann sich eigentlich die Mühe ersparen und den Motor gleich entsorgen.

Mit soviel Vorzündung darf man nur dort messen, wo der Motor wenig Füllung hat. Also aufhören bevor das Drehmoment steil ansteigt. Von da an bis zur Leistungsdrehzahl muss man sehr vorsichtig vorgehen und nach jeder Teilmessung Zündkerze und Kolben kontrollieren auf Detonationsspuren.

Eine Warnung: schau nicht auf Viertaktwerte; die Falschtakter fahren mit viel mehr Vorzündung. Formel 1-Motoren z.B. haben mit ihrer Riesenbohrung und Ultrakurzhub einen Brennraum wie ein Pfannkuchen. Quetschkanten gibt es kaum, denn überall sind Ventile. Die Dinger laufen darum auch bei Vollgas noch mit über 50° Vorzündung weil sonst die Flamme nicht rechtzeitig alle Ecken erreicht.

## GP-Kurve

Ich zeige hier beispielsweise die Vollgas-zündkurve eines 125er GP-Motors der bei 12750 U/min sein maximales Drehmoment und bei 13000 U/min seine Höchstleistung hat:



## Dynamisch

Die ganze Zündgeschichte ist ein Temperaturspiel. Sie dient nur dazu, die Abgastemperatur für jede Situation zu optimieren. Wichtig dabei ist, dass die Umstände am Prüfstand genau die gleichen sind wie auf der Rennstrecke. Die Beschleunigungszeit, also die Zeit in der der Auspuff aufgeheizt wird, muss praxisgemäss sein. Darum kann man nur auf einem dynamischen Prüfstand diese Zündkurven bestimmen; bei einer statischen Leistungsmessung wird der Auspuff viel zu heiss.

Das gilt übrigens auch für das konzipieren von Auspuffanlagen: wenn man die auf einem statischen Prüfstand entwickelt, geraten sie viel zu lang. Um dann nachher auf der Strecke den Motor das hochdrehen beizubringen muss man entweder zu spät zünden (kostet Leistung) oder zu mager bedüsen (kostet Kolben, Zylinder und u.U. auch Fahrer).

Noch ein Vorteil eines dynamischen Prüfstandes: weil der Motor während eine Messung nur etwa zehn Sekunden statt fünf Minuten voll belastet wird, überlebt er auch mal etwas zuviel Vorzündung, was bei einer statischen Messung in Tränen enden würde.

Übrigens wird auch mit einem optimalen Auspuff und eine dazu passende Zündkurve der Motor nicht unbeschränkt hochdrehen, denn die Zeitquerschnitte geraten bei Überdrehzahlen zu klein. Wegen des zu kleinen Vorauslass-zeitquerschnittes liegt dann bei Üö der Zylinderdruck noch über der Spüldruck und strömt Abgas in die Spülkanäle. Wenn dann die Spülung anfängt, wird erstmal mit Abgas gespült. Danach kommt verschmutztes Frischgas nach oben, und wenn schliesslich sauberes Spülgas sich auf dem Weg zum Zylinder macht, schliessen die Überströmer schon wieder. Darum fällt bei Überdrehzahlen die Leistung so stéil ab.

## Gleichgewicht und Restenergie

Daß 'unten' die Leistung stark abfällt, erklärte ich schon: die Resonanzen passen nicht mehr zur Drehzahl und stören die Spülung statt sie zu fördern.

Zum Glück ist bei niedriger Zylinderfüllung die Verbrennungstemperatur und somit auch die Abgastemperatur niedrig, so dass die Schallgeschwindigkeit sinkt. Beim nächsten Arbeitshub gibt es dann etwas weniger Spülstörung und etwas mehr Füllung. So stellt sich ein Gleichgewicht ein. Das funktioniert auch ohne Zündverstellung.

Mit Zündverstellung kommt noch ein positiver Effekt dazu. Bei Frühzündung ist die Expansion von Verbrennungsende bis Aö grösser. Dadurch sinkt nicht nur die Abgastemperatur sondern auch die Restenergie die der Auspuffresonanz zur Verfügung steht. Bei ganz niedrigen Drehzahlen kommen dann die Resonanzen zwar total im falschen Augenblick, aber wenigstens sind sie dann nicht so kräftig und können weniger versauen.

## Terminal

Zum Schluss eine Praxisbemerkung: wenn man es mit einem unbekanntem Motor zu tun hat, soll man immer erst eine **viel** grössere Hauptdüse einbauen, und die dann verkleinern bis das Gemisch stimmt. Lediglich eine **etwas** grössere Hauptdüse einbauen kann gefährlich sein, nämlich wenn der Motor ursprünglich viel zu mager bedüst war. Viel zu mager heisst: total keine Leistung und somit auch keine Wärmeentwicklung. Wenn man diesem Motor aber eine etwas grössere Düse gibt, ist er nur noch ein kleines bisschen zu mager; dann kommt die Leistung schon, und damit auch die Hitze, was dann terminal sein kann. Übrigens kann auch hier der Unterschied zwischen dynamisch und statisch messen entscheiden über Leben oder Tod für den Motor.