

Aus Motorradtechnik (Jürgen Stoffregen), S.72

Irreguläre Verbrennungsabläufe

Unter bestimmten Betriebsbedingungen treten im Motorbetrieb Abweichungen vom geordneten Verbrennungsablauf auf. Bei diesen irregulären Verbrennungen kommt es zu erheblichen Druck- und Temperaturüberhöhungen, die zu schweren Schädigungen von Bauteilen bis hin zum Motortotalschaden führen können. Typische Schäden sind z.B. verbrannte Auslassventile und Zylinderkopfdichtungen, Kolbenfresser und/oder an- bzw. durchgeschmolzene Kolben. Bei weitgehend ähnlichen Schadensbildern muss jedoch bezüglich der Mechanismen der irregulären Verbrennungen, der Ursachen und deren Verhütung sorgfältig unterschieden werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von irregulären Verbrennungen, das so genannte Klopfen (oft auch als „Klingeln“ bezeichnet) und die Glühzündungen.

Beim **Klopfen** verbrennt ein Teil des Gasgemisches praktisch schlagartig, nachdem zuvor eine normale Verbrennung durch den Zündfunken eingeleitet wurde. Die Entflammungs- und Umsetzungsphasen verlaufen dabei zunächst vollkommen regulär und der Verbrennungsdruck und die Gastemperaturen steigen entsprechend dem Flammenfortschritt kontinuierlich an. In dem noch nicht von der Flammenfront erfassten Gemischrest fördern der Temperatur- und Druckanstieg die chemischen Vorreaktionen und die Radikalbildung. Laufen diese Prozesse zu schnell ab oder steht bis zur Ankunft der Flammenfront übermäßig Zeit zur Verfügung, nehmen die Vorreaktionen ein solches Ausmaß an, dass es in diesem Gemischrest zu einer spontanen Selbstentflammung kommt, bevor die Flammenfront dieses unverbrannte Gemisch erreicht hat. Der Gemischrest verbrennt dann nicht mehr geordnet, sondern explosionsartig mit einer vielfach höheren Verbrennungsgeschwindigkeit, Bild 3.39.

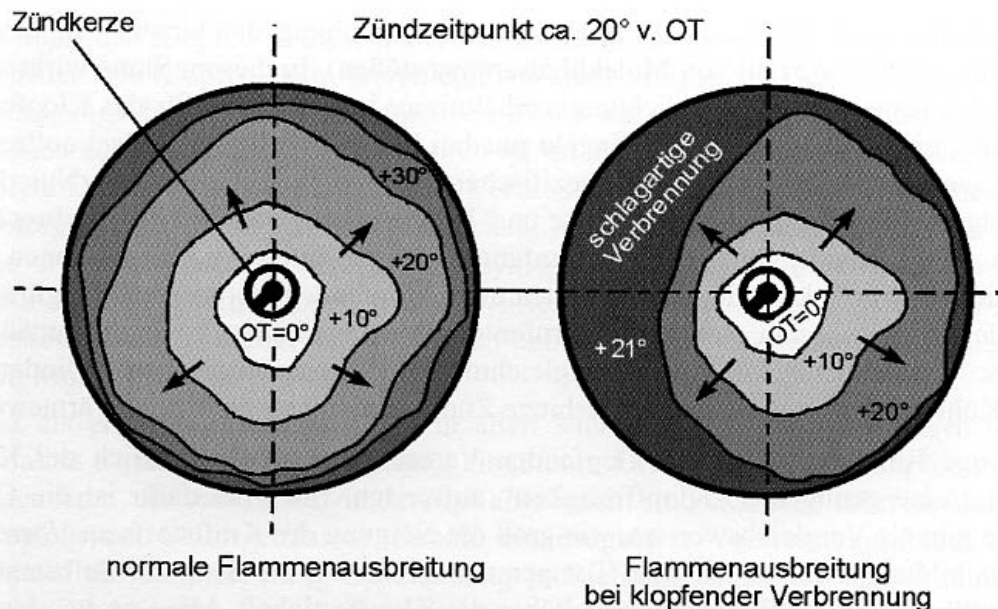


Bild 3.39 Schematischer Ablauf und Flammenfortschritt bei regulärer und klopfender Verbrennung

Dies führt dazu, dass der Druck im Brennraum übermäßig ansteigt und sich hochfrequente Druckwellen ausbilden. Die Druckschwingungen, Bild 3.40, wirken über den Kolben auf das ganze Triebwerk und führen zu mechanischen Geräuschen, die dieser Verbrennungsform ihren Namen (Klingeln, Klopfen) gegeben haben. Auch die Gastemperatur steigt wegen der sehr raschen und intensiven Energieumsetzung stark an und zudem bewirken die Druckwellen einen erhöhten Wärmeübergang vom Gas auf die umgebenden Bauteile. Örtlich steigen dadurch die Temperaturen von Kolben und Zylinderkopf, teilweise bis über den Schmelzpunkt der verwendeten Leichtmetalle, so dass es zum Schaden und Ausfall dieser Bauteile kommt („Loch im Kolben“).

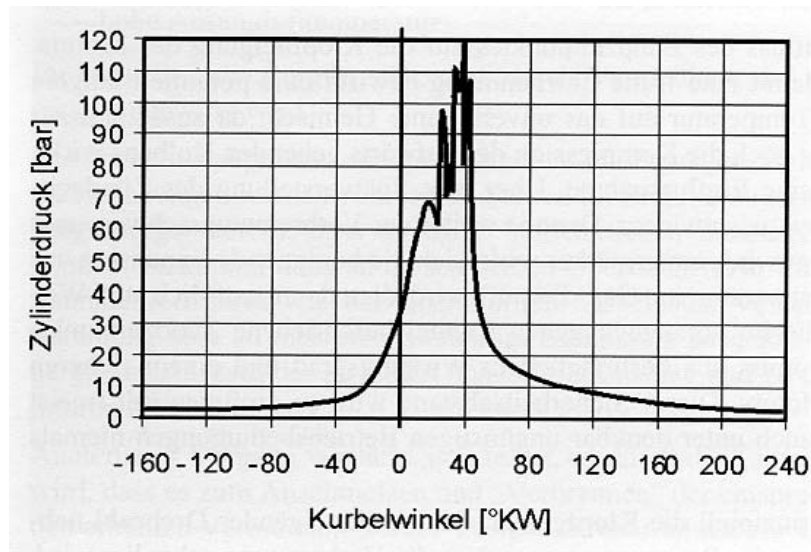


Bild 3.40
Druckverlauf bei klopfender Verbrennung

Die Ursachen für den beschleunigten Ablauf der Vorreaktionen im unverbrannten Gemischrest können vielfältig sein. Haupteinflussgröße ist die Ansauglufttemperatur, die die Temperatur des Gasgemisches bei der Verdichtung mitbestimmt. Je höher die Temperatur im Gas, umso rascher und intensiver laufen die Vorreaktionen ab (Erhöhung der kinetischen Energie der Gasmoleküle, größere Anzahl von Molekülzusammenstößen). In diesem Sinne wirkt auch eine Anhebung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses begünstigend für das Klopfen. Damit leuchtet auch unmittelbar ein, dass Klingeln nur bei hoher Last bzw. Volllast auftreten kann (von ganz wenigen Ausnahmen unter spezifischen Bedingungen abgesehen). Nur dann sind die Verdichtungstemperatur und die Drücke und Temperaturen während des Verbrennungsablaufs hoch genug, dass in Gemischresten umfangreiche und intensive Vorreaktionen ablaufen können. Ein weiterer Faktor, der das Auftreten einer klopfenden Verbrennung begünstigt, sind heiße Stellen im Brennraum, z.B. hervorgerufen durch mangelhafte und ungleichmäßige Kühlung (stark verschmutzte Kühlrippen, ungleichmäßige Wasserführung im Zylinderkopf, zu niedriger Kühlwasserstand) oder eine überhitzte Zündkerze mit zu geringem Wärmewert.

Eine wichtige Rolle bezüglich der klopfenden Verbrennung spielt natürlich der Kraftstoff. Dieser muss eine genügende „Klopffestigkeit“ aufweisen. Ein Maß dafür ist die Oktanzahl (ROZ). Sie gibt als Vergleichswert an, wie groß die Neigung des Kraftstoffs zu Vorreaktionen und Radikalbildung unter Druck- und Temperatureinfluss ist, die dann zur Selbstentzündung führt. Je größer der ROZ-Wert ist, desto höher die Klopffestigkeit. Motoren werden für eine bestimmte Oktanzahl abgestimmt, so dass klopfende Verbrennung im Normalfall nicht auftritt. Wenn aufgrund irgendwelcher äußerer Einflüsse der Motor dennoch zum Klopfen neigt, kann dies durch die Verwendung eines klopffesteren Kraftstoffs (Super bzw. Super Plus statt Nor-

malbenzin) verhindert werden. Auf die Kraftstoffspezifikationen und die Mechanismen der Klopfverhinderung durch den Kraftstoff wird im Kapitel 7 eingegangen.

Auch die Zeit für den Flammenfortschritt entscheidet über die Auslösung einer klopfenden Verbrennung. Je länger Druck und Temperatur auf die unverbrannten Gemischanteile im Brennraum einwirken, desto umfangreichere Vorreaktionen können ablaufen. Daraus ergibt sich, dass große Brennräume (große Bohrung, großvolumige Ein- und Zweizylindermotoren) das Klopfen begünstigen, denn hier verstreicht entsprechend längere Zeit, bis die Flamme ausgehend von der Zündkerze den Brennraumrand erreicht. In gleichem Maße ungünstig ist eine unsymmetrische, dezentrale Zündkerzenposition im Brennraum, wie sie bei Zwei- und Dreiventil-Brennräumen häufig unvermeidbar ist.

Damit erklärt sich auch der Einfluss des Zündzeitpunktes auf die Klopfneigung des Motors. Ein früher Zündzeitpunkt und damit eine frühe Entflammung bewirkt eine potentiell längere Einwirkdauer von Druck- und Temperatur auf das unverbrannte Gemisch, da zusätzlich zur sich entwickelnden Verbrennung noch die Kompression des aufwärts gehenden Kolbens wirkt. Dies ermöglicht aber zugleich eine Einflussnahme. Über eine Spätverstellung des Zündzeitpunktes lässt sich dem Klopfen entgegenwirken. Denn je weiter der Verbrennungsschwerpunkt hinter den oberen Totpunkt gelegt wird, umso stärker wirkt sich die beginnende Expansion aus und senkt Spitzendruck und -temperatur im Gas. Erkauft wird dies dann natürlich mit Wirkungsgradverlusten. Somit ist die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Zündzeitpunkt-Optimierung immer ein Kompromiss aus bestmöglichem Wirkungsgrad und einem sicheren Abstand zur Klopfgrenze des Motors. Dieser Sicherheitsabstand wird so groß gewählt (meist 3° bis 5° Kurbelwinkel), dass auch unter denkbar ungünstigen Betriebsbedingungen niemals Klingeln auftreten kann.

Niedrige Drehzahlen erhöhen prinzipiell die Klopfgefahr, denn mit steigender Drehzahl nehmen auch die Ladungsbewegungen im Brennraum zu, so dass die Verbrennung schneller wird. Ein gegenläufiger, das Klopfen begünstigender Effekt ergibt sich aber dadurch, dass mit der Drehzahl auch die umgesetzte Leistung und damit die Brennraumtemperatur steigen. Da niedrige Drehzahlen gepaart mit hoher Last meist nur kurzzeitig, z.B. beim Anfahren am Berg, auftreten, führt das Klopfen in diesem Bereich in der Regel zu keinen Bauteilschäden. Ebenso wenig schadet das Klopfen beim Beschleunigen (hell klingendes Geräusch beim Gasgeben, „Beschleunigungsklingeln“) dem Motor, weil es nur kurz andauert und damit keine Überhitzungsschäden zu befürchten sind. Gefährlich ist im Wesentlichen nur das Hochgeschwindigkeitsklopfen. Das Geräusch der klopfenden Verbrennung wird hier verdeckt von den mechanischen Motorgeräuschen und den Fahrgeräuschen, so dass es vom Fahrer nicht wahrgenommen wird. Die ersten klopfenden Verbrennungszyklen beschleunigen infolge der resultierenden Temperatur- und Druckerhöhungen weitere Vorreaktionen und setzen damit einen sich selbst verstärkenden Ablauf in Gang, der schließlich unbemerkt zur Überhitzung von Bauteilen und damit zum Motortotalschaden führt.

BMW hat als erster Motorradhersteller in allen Vierzylindermotoren der neuen Generation sowie bei allen Boxern eine Klopfregelung eingeführt. Diese erkennt das Klopfen mittels Körperschallsensoren, die nahe am Zylinderkopf angebracht sind (Klopfen führt zu einer Schwingungsanregung des Motorgehäuses). Sobald ein irregulärer Verbrennungsablauf festgestellt wird, verstellt die Klopfregelung die Zündung in Richtung „spät“, bis das Klopfen aufhört. Schrittweise wird danach der Zündzeitpunkt wieder an das Optimum herangeführt. Mit der Klopfregelung kann das Zündkennfeld auch in kritischen Betriebspunkten für höchsten Wirkungsgrad optimiert werden. Die Klopferschutzfunktion erlaubt es, den Sicherheitsabstand der Zündzeitpunkte von der Klopfgrenze kleiner zu wählen, da das System auf kritische Betriebszustände selbsttätig reagiert.

Fassen wir noch einmal die wichtigsten Faktoren zusammen; klopfende Verbrennung tritt nur im oberen Lastbereich auf und erst nachdem eine normale Verbrennung eingeleitet wurde und diese anfangs auch normal abgelaufen ist. **Klopfen wird begünstigt durch:**

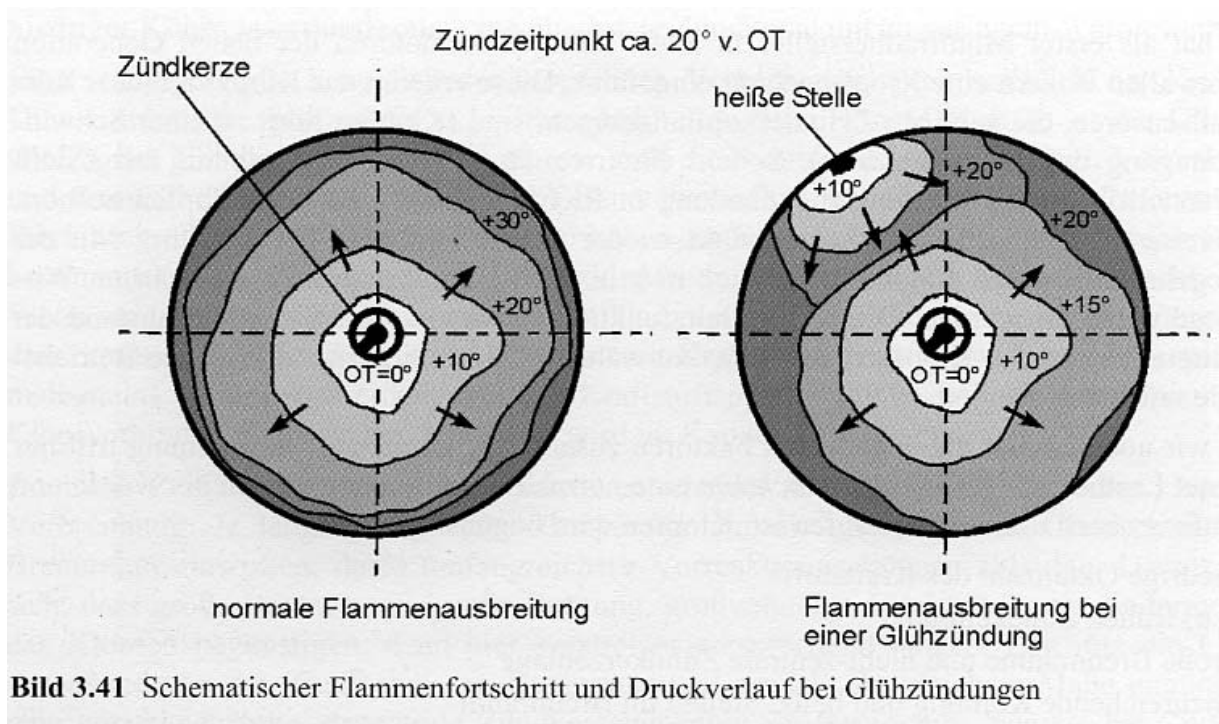
- niedrige Oktanzahl des Kraftstoffs
- (zu) frühen Zündzeitpunkt
- große Brennräume und nicht-zentrale Zündkerzenlage
- unzureichende Kühlung und heiße Stellen im Brennraum
- hohe Verdichtung
- hohe Ansauglufttemperatur

Im Umkehrschluss ergibt sich, dass durch Vermeidung der o.a. Faktoren der Klopfneigung entgegengewirkt wird.

Die zweite Hauptform unregelmäßiger Verbrennungen ist die so genannte **Glühzündung**. Glühzündungen werden von heißen Stellen im Brennraum ausgelöst, die eine so hohe Aktivierungsenergie liefern, dass intensive Vorreaktionen im umgebenden Gasgemisch stattfinden können. Es kommt dann an diesen heißen Oberflächen zur Entflammung und einem regulären Flammenfortschritt wie bei einer normal ausgelösten Verbrennung. Dadurch dass die Entflammung aber an mehreren Stellen im Brennraum ausgelöst wird, findet ein sehr rascher Energieumsatz statt, der zu einem hohen Druckanstieg und zu überhöhten Verbrennungstemperaturen führt, Bild 3.41.

Auch dieser Vorgang verstärkt sich selbst, wodurch die Temperatur der heißen Stellen so groß wird, dass es zum Anschmelzen und „Verbrennen“ der entsprechenden Bauteile kommt. Durch den erhöhten Verbrennungsdruck kann es darüber hinaus zur Überlastung und längerfristig zur irreversiblen Schädigung der Gleitlager im Motor kommen.

Typische Auslöser von Glühzündungen sind heiße Auslassventile. Bei zu gering eingestelltem Ventilspiel schließen diese nicht mehr vollständig und heißes Abgas strömt mit hoher Geschwindigkeit während der Verbrennung durch den engen Restspalt zwischen Ventil und Sitzring. Dadurch kann das Ventil soweit aufgeheizt werden bis es glüht und dann zum Auslöser einer Verbrennung, d.h. einer Glühzündung, wird. Ebenso wie das Auslassventil kann auch eine überhitzte Zündkerze zum Glühzündungsauslöser werden. Zündkerzen werden generell sehr heiß bei der Verbrennung und bei zu geringem Wärmewert stellt sich schnell eine Überhitzung ein. Weitere Auslöser sind z.B. auch Ölkohleablagerungen im Brennraum. Durch ihre meist poröse Struktur fangen sie relativ leicht an zu glühen, was in Zusammenwirken mit katalytischen Effekten (besonders bei bleihaltigen Ablagerungen) die Verbrennungsreaktionen initiiert.



Das charakteristische Merkmal von Glühzündungen ist, dass sie vollkommen unabhängig von der Zündungsauslösung an der Zündkerze sind. Sie können also vor, während oder nach der Zündung an der Zündkerze entstehen, so dass die Verbrennung vollkommen unkoordiniert zur Kolbenstellung abläuft. Somit ist es auch möglich, dass ein Motor selbst nach Abstellen der Zündung einfach weiterläuft („nachdieseln“) und nur durch „Abwürgen“ zum Stillstand gebracht werden kann. Die heißen Stellen als Zündquelle können die mehrfachen Entflammungen gleichzeitig oder auch nacheinander auslösen.

Es sind auch Mischformen zwischen Glühzündungen und klopfender Verbrennung möglich. So kann eine Glühzündung zum Auslöser einer klopfenden Verbrennung werden oder umgekehrt eine klopfende Verbrennung Brennraumstellen soweit aufheizen, dass sie zum Ausgangspunkt einer Glühzündung werden. Anhand des Motorschadensbildes lässt sich dann auch für den Fachmann nachträglich nur sehr schwer zwischen Ursache und Folgewirkung unterscheiden.

Glühzündungen sind nur sehr schwer zu beeinflussen, dürften allerdings bei sorgfältig ausgelegten Motoren (Kühlung/Wärmehaushalt) und korrekter Motoreinstellung (Ventilspiel, Wärmewert der Zündkerze) gar nicht auftreten. Sind Ölkohleablagerungen der Auslöser, helfen letztlich nur deren Entfernung und eine Analyse, woher der Ölkohleaufbau kommt (z.B. hoher Ölverbrauch infolge von Bauteilverschleiß an Zylinder, Kolbenringen und Ventildführungen).

Der Kraftstoff spielt in der Regel keine Rolle, es sei denn, es bilden sich aus dem Kraftstoff (bleihaltiger oder auch minderwertiger Kraftstoff) zusammen mit Bestandteilen des Motoröls Ablagerungen. Dies kann auftreten, wenn der Motor über sehr lange Zeit unterkühlt betrieben wird, wie z.B. andauernder extremer Kurzstreckenbetrieb oder dauernder Einsatz des Motorrades als Begleitfahrzeug.