

Klopfen beim Ottomotor

Definition: Folge einer unkontrollierten Verbrennung

Englisch: low speed pre-ignition in Otto engines

Kategorien: Fahrzeuge, Kraftmaschinen und Kraftwerke

Autor: Dr. Rüdiger Paschotta

Wie man zitiert; zusätzliche Literatur vorschlagen

Ursprüngliche Erstellung: 27.04.2015; letzte Änderung: 20.08.2023

URL: https://www.energie-lexikon.info/klopfen_beim_ottomotor.html

Das Klopfen in einem Benzinmotor ist ein Phänomen, welches zu starkem Verschleiß führt und deswegen weitestgehend vermieden werden muss

Das Klopfen ist bei Ottomotoren ein sehr unerwünschtes Phänomen, welches vor allem bei hoher Last (am meisten bei mittleren Drehzahlen) und bei Verwendung von Kraftstoffen mit zu geringer Klopfestigkeit auftreten kann, aber weitestgehend vermieden werden sollte. Eine unkontrollierte, buchstäblich schlagartige Verbrennung führt hier zu starken Ausschlägen des Drucks im Verbrennungsraum. Es kann eine Detonationswelle mit scharfer Druckspitze und schnellen Schwingungen des Drucks entstehen, die sich mit Überschallgeschwindigkeit im Brennraum ausbreitet. Auch die Temperatur im Brennraum wird dadurch höher als normal. Beides führt zu extremen Belastungen vieler Teile des Motors, die auf die Dauer zur totalen und nicht reparierbaren Zerstörung führen können. Betroffen sind insbesondere der Kolben (z. B. durch Erosion der Oberfläche), der Kurbeltrieb (Pleuelstangen, Lager), die Ventile und der gesamte Zylinderkopf. Die Druckwelle belastet die verschiedenen Bereiche des Kolbenbodens unter Umständen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander, sodass auch schräg gerichtete Kräfte auftreten können. Außerhalb des Motors entsteht ein mehr oder weniger deutlich wahrnehmbares metallisch schlagendes Geräusch, welches zu der Bezeichnung *Klopfen* geführt hat. Ein verwandtes Phänomen ist das **Klingeln, das am ehesten bei hohen Drehzahlen und voller Last auftreten kann.**

Bei Dieselmotoren gibt es das Phänomen des Nagelns, welches ebenfalls auf einer zu schnellen Verbrennung basiert, jedoch in vieler Hinsicht anders ist als das Klopfen beim Ottomotor.

Physikalisch-chemische Mechanismen des Klopfens

Der Druck im Brennraum soll durchaus stark ansteigen – aber nicht explosionsartig. Man will eben keinen *Explosionsmotor*!

Die erwünschte Art der Verbrennung des Kraftstoffs in einem Ottomotor ist eine *Deflagration*: Ausgehend von der Umgebung der Zündkerze soll sich eine Flammenfront mit moderater Geschwindigkeit (z. B. 25 m/s) durch den gesamten Brennraum bewegen, sodass das Kraftstoff-Luft-Gemisch allmählich und kontrolliert innerhalb weniger Millisekunden abbrennt. Dabei steigt der Druck im Verbrennungsraum erheblich, aber nicht explosionsartig an.

Was genau ist mit Selbstentzündung gemeint?

Das unerwünschte Klopfen kann durch unterschiedliche physikalische Mechanismen entstehen, die zu einem erheblich beschleunigten Abbrand des Gemischs führen. Hierzu gehört in der Regel eine Selbstentzündung des Gemischs, die an vielen Stellen etwa gleichzeitig auftritt. Ein wichtiger Mechanismus (der aber keineswegs der einzig mögliche ist) lässt sich folgendermaßen verstehen. Die Kompression des Kraftstoff-Luft-Gemischs allein würde ohne die Zündkerzen meist nicht ausreichen, um eine Selbstentzündung wie in einem Dieselmotor auszulösen. Wenn jedoch die

Zündkerze feuert, löst sie zunächst eine Verbrennung in ihrer näheren Umgebung aus – mit einer nach außen fortschreitenden Flammenfront. Hierdurch steigt dann der Druck im Brennraum weiter an und damit auch die Temperatur. Nun kann die Temperatur auch innerhalb der Bereiche, wo sich noch unverbranntes Gemisch befindet, auf einen so hohen Wert ansteigen, dass dort eine Selbstentzündung auftritt, bevor sich die Flammenfront dorthin vorgearbeitet hat. Obwohl also die Wirkung der Zündkerzen sehr wohl eine Rolle spielt, handelt es sich um eine Selbstentzündung in dem Sinne, dass die Zündung nicht direkt von der Zündkerze ausgelöst wird, sondern indirekt über den steigenden Druck und die steigende Temperatur.

Das zentrale Problem ist das gleichzeitige Abbrennen des Kraftstoffs in einem größeren Volumen.

Das eigentliche Problem ist, dass die Zündbedingung an vielen Stellen im noch unverbrannten Gemisch etwa gleichzeitig erfüllt werden kann, sodass die auftretende Momentanleistung der Verbrennung viel höher wird als gewünscht. Dagegen wäre eine gleichzeitige Zündung an nur zwei Stellen (beispielsweise durch Verwendung von zwei Zündkerzen pro Zylinder) unproblematisch; dies kann sogar hilfreich sein (siehe unten).

Das Klopfen kann auf unterschiedlichen Mechanismen beruhen, und ein umfassendes Verständnis der relevanten Vorgänge ist sehr schwer zu erreichen.

Ein anderer möglicher Mechanismus basiert auf einer massiven Beschleunigung der Ausbreitung der Flammenfront mit Ausbildung einer Schockwelle, die sich mit Überschallgeschwindigkeit ausbreiten kann. Es gibt eine Vielzahl physikalisch-chemischer Theorien, die Mechanismen solcher Art beschreiben, sich aber in wichtigen Details unterscheiden. Man muss davon ausgehen, dass je nach der genauen Situation (etwa in Abhängigkeit vom Kraftstoff, seiner genauen Verteilung, dem Druck und der Temperatur im Gas und an den Brennraumwänden) unterschiedliche Prozesse ablaufen können, die letztendlich zu starken Druckstößen führen, also zum Phänomen des Klopfens. Aufgrund der enormen Komplexität der relevanten Vorgänge ist trotz umfangreicher Forschungsarbeiten bis heute nicht abschließend geklärt, wie genau das Klopfen in unterschiedlichen Fällen zustande kommt.

Eine unerwünschte Entflammung kann unter Umständen sogar schon vor der Zündung auftreten, etwa als Folge glühender Ablagerungen im Motor. Dieses Phänomen ist kein eigentliches Klopfen, kann dieses jedoch wiederum fördern. Besonders ungünstig ist natürlich eine Entflammung, die deutlich vor dem Erreichen des oberen Totpunkts des Kolbens auftritt, so dass dieser während seiner Aufwärtsbewegung stark gebremst wird. Dies kann auch die Leistung und den Wirkungsgrad stark beeinträchtigen, während das gewöhnliche Klopfen den Wirkungsgrad kaum schadet, nur eben einen hohen Verschleiß verursacht.

Selbstzündungen beispielsweise an glühenden Ablagerungen können auch zum Phänomen des *Dieseln* führen: ein Motor kann selbst nach dem Abstellen der Zündung noch weiterlaufen, solange die Kraftstoffzufuhr gewährleistet ist. Bei modernen Fahrzeugen mit elektronisch geregeltem Einspritzsystem wird die Kraftstoffzufuhr freilich beim Abschalten des Antriebs unterbrochen, sodass kein Dieseln mehr möglich ist.

Risikofaktoren und Gegenmaßnahmen

Ein **grundlegender Risikofaktor für das Auftreten des Klopfens ist eine zu hohe Temperatur im Brennraum.** Eine solche kann durch verschiedene Faktoren gefördert werden:

Da das Klopfen zu vermeiden ist, muss das Verdichtungsverhältnis beim Ottomotor begrenzt werden – was leider den Wirkungsgrad reduziert.

- Wenn die Zylinder durch ein hohes Verdichtungsverhältnis und/oder die Anwendung einer Turboaufladung sehr stark gefüllt werden, steigt der Druck stark an. Dies führt auch zu einer entsprechenden Temperaturerhöhung. Leider wird hierdurch das bei Ottomotoren

anwendbare Verdichtungsverhältnis limitiert, und dies vermindert deren Wirkungsgrad, erhöht also den Kraftstoffverbrauch. Die modifizierte Bauform des Atkinson-Motors zielt darauf ab, dieses Problem durch die Entkopplung von Verdichtung und Expansion zu lösen.

- Das Klopfen wird auch durch eine erhöhte Temperatur des zugeführten Kraftstoff-Luft-Gemischs gefördert – insbesondere bei Turboaufladung ohne Ladeluftkühlung. Dagegen ist eine Direkteinspritzung günstig, weil sie eine Verdunstungskühlung direkt im Brennraum bewirkt.

Verbrennungsrückstände im Motor können das Klopfen begünstigen.

- Wenn an manchen Stellen im Brennraum besonders hohe Temperaturen auftreten, begünstigt dies eine Selbstentzündung. Beispielsweise können sich Verbrennungs- und Ölrückstände, die sich an den Oberflächen des Brennraums abgelagert haben, entsprechend auswirken; sie können nicht nur durch die heißen Gase, sondern vor allem auch durch die Wärmestrahlung der Flamme zum Glühen gebracht werden. Hilfreich ist dagegen ein Brennraum mit möglichst einfacher Form und das Auftreten schneller Strömungen des Gemischs, die gegen lokale Wärmenester wirken.

Der Zündzeitpunkt ist ein wichtiger Parameter, der zudem einfach beeinflussbar ist – leider mit negativen Wirkungen auf Leistung und Kraftstoffverbrauch.

- Ungünstig ist außerdem ein früher Zündzeitpunkt. Für einen hohen Wirkungsgrad des Motors wäre es eigentlich optimal, die Zündung schon etwas vor Erreichen des oberen Totpunkts vorzunehmen. (Der maximale Druck im Zylinder entsteht dann trotzdem erst nach Erreichen des oberen Totpunkts, weil die Flammenfront keine allzu große Geschwindigkeit hat.) Dann steigt allerdings der Druck deutlich schärfer an als bei einem späteren Zündzeitpunkt. Also ist die **Wahl eines späteren Zündzeitpunkts ein einfach realisierbares Mittel** gegen das Klopfen; eine Verbrennung erst während der Expansion des Gemischs führt zu geringeren Spitzendrücken und -temperaturen. Leider hat dies aber **negative Auswirkungen auf die Leistung und den Kraftstoffverbrauch des Motors.**

Auch die Vollastanreicherung hilft gegen das Klopfen, hat aber auch sehr negative Auswirkungen.

- Die Verwendung eines stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemischs, wie es für die optimale Funktion eines geregelten Abgaskatalysators nötig ist, führt leider zu hohen Verbrennungstemperaturen, die das Klopfen fördern. Eine Vollastanreicherung, d. h. der Betrieb mit einem Kraftstoffüberschuss (fettem Gemisch) bei voller Leistung, kann daher gegen das Klopfen wirken und gleichzeitig die Leistung sogar noch ein wenig erhöhen. (Auch die dadurch erhöhte Flammengeschwindigkeit kann vorteilhaft sein, da dadurch weniger Zeit zur Selbstentzündung bleibt.) Leider führt dies aber zu einem massiven Verlust beim Wirkungsgrad und zu einem scharfen Anstieg von Schadstoffemissionen (v. a. Kohlenmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe).
- Im Prinzip spielt auch die Kühlung des Motors eine Rolle, da sie einen Einfluss auf die Oberflächentemperaturen im Brennraum hat. Dieser Einfluss ist jedoch nicht allzu stark.
- Die Verwendung von mehr als einer Zündkerze pro Zylinder kann hilfreich sein, wenn dadurch eine reguläre Verbrennung in Bereichen des Brennraums möglich wird, bei denen sonst etwas später das Klopfen beginnen könnte.

Die Verwendung eines sehr klopfesten Kraftstoffs ist die wohl einfachste Methode zur Vermeidung des Klopfens.

Eine weitere wichtige Rolle spielt die Qualität des Kraftstoffs. Je niedriger dessen Klopfestigkeit ist, die durch die sogenannte *Oktanzahl* ausgedrückt wird, desto stärker die Neigung zu einer unkontrollierten Selbstentzündung. Deswegen ist die Verwendung eines Kraftstoffs mit hoher Oktanzahl die einfachste Möglichkeit, das Klopfen zu unterdrücken. Dies kann jedoch die

Kraftstoffkosten erhöhen, da entsprechend mehr von bestimmten teuren Additiven (Anti-Klopff-Mitteln, Oktanzahlverbesserern) benötigt wird. Hilfreich sind übrigens auch Additive, die die Ablagerung von Rückständen im Brennraum verhindern.

Abgasrückführung hilft leider wenig, da sie bei Volllast kaum einsetzbar ist.

Auch die Zusammensetzung des Gemischs spielt für das Klopfen eine Rolle. Wenn der Sauerstoffgehalt infolge einer Abgasrückführung reduziert wird, verringert dies die Tendenz zur Selbstentzündung. Hierbei darf man freilich nicht so weit gehen, da die gewünschte Verbrennung ja immer noch stabil und schnell genug ablaufen soll. Ohnehin setzt man die Abgasrückführung bei Volllast kaum ein, da sie dann auf Kosten der Leistung ginge. Bei interner Abgasrückführung (durch starke Ventilüberschneidung) kommt dazu noch das Problem, dass das beigemischt Abgas die Temperatur des Gemischs erhöht.

Ungünstig sind übrigens auch Schmierölpartikel, die bei schlechter Abdichtung an den Kolbenringen vorbei in den Brennraum gelangen können. Insbesondere langkettige Paraffine weisen eine sehr niedrige Oktanzahl auf.

Eine im Prinzip hilfreiche Maßnahme wäre das zusätzliche Einspritzen von etwas Wasser, welches kühlend und detonationshemmend wirkend, in den Brennraum. Auch die Einspritzung von Ethanol würde helfen. Solche Methoden haben sich bisher allerdings nicht durchsetzen können.

Betrieb eines Motors nahe der Klopfgrenze

Wie kann man einen Motor nahe an der Klopfgrenze betreiben und doch sicher sein, dass es nie zu nennenswertem Klopfen kommt?

Da insbesondere die einfachsten Maßnahmen gegen das Klopfen (reduziertes Verdichtungsverhältnis, späterer Zündzeitpunkt, Volllastanreicherung) negative Auswirkungen auf die Leistung und den Kraftstoffverbrauch haben, versucht man Motoren häufig so nahe wie möglich an der Klopfgrenze zu betreiben. Da diese Grenze in der Praxis nur kurz überschritten werden darf, um den Motor nicht zu schädigen, benötigt man hierfür eine automatische Überwachung des Klopfens. Hierfür kann ein *Klopfsensor* dienen – eine Art am Motor angebrachtes Mikrofon, welches die schädlichen starken Schwingungen detektieren kann. (Es gibt auch Sensoren für den Zylinderinnendruck sowie Ionensensoren, die ebenfalls eine Überwachung des Klopfens zulassen.) Auf dieser Basis kann die Motorelektronik ggf. sofort Gegenmaßnahmen einleiten. Heute ist es üblich, dass Verdichtungsverhältnis des Motors so hoch zu wählen, dass der Motor mit oft optimalem (relativ frühem) Zündzeitpunkt zumindest bei hoher Last in den Bereich des Klopfens geraten würde, und der tatsächliche Zündzeitpunkt wird dann so weit nach hinten verschoben, wie es nötig ist, um das Klopfen gerade noch zu vermeiden. (Im Teillastbetrieb kann der Zündzeitpunkt energetisch optimal gewählt werden.) Auf diese Weise kann der Motor notfalls auch mit weniger klopfestem Kraftstoff betrieben werden, wenn auch mit reduzierter Leistung und erhöhtem Kraftstoffverbrauch. Umgekehrt kann ein Kraftstoff mit höherer Oktanzahl dann etwas mehr Leistung bei etwas weniger Verbrauch ermöglichen.

Automotoren werden häufig für einen möglichst hohen Wirkungsgrad im Teillastbetrieb optimiert – was bei Volllast dann oft Nachteile mit sich bringt.

Motoren für Kraftfahrzeuge arbeiten sehr viel im Teillastbetrieb, weswegen die Optimierung ihrer Energieeffizienz hauptsächlich für diese Betriebszustände wichtig ist. Aus diesem Grund wählt man wie oben dargestellt ein relativ hohes Verdichtungsverhältnis, welches bei Volllast schon nicht mehr optimal ist und u. U. auch eine Volllastanreicherung nötig macht. (Zu einer benzinsparenden Fahrweise gehört deswegen, dass man das Gaspedal möglichst nie ganz, sondern höchstens zu ca. 80 % durchdrückt.) Dagegen optimiert man stationäre Motoren eher für Volllast.

Einfluss der Kraftstoffqualität auf Motorwirkungsgrad und

Leistung

Eine häufig auftauchende Frage ist, ob die Kraftstoffqualität einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Leistung eines Motors hat. Dies ist im Einzelnen eine relativ komplizierte Angelegenheit:

- Wenn ein Ottomotor so konstruiert wird, dass er mit einem Kraftstoff mit niedriger Oktanzahl betrieben werden kann, so erfordert dies ein relativ niedriges Verdichtungsverhältnis und/oder einen späten Zündzeitpunkt, was für den Wirkungsgrad negativ ist. Man kann also auf jeden Fall einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch und mehr Leistung erzielen, wenn der Motor für hochwertigere Kraftstoffe optimiert wird.

Eine höhere Oktanzahl als für den Motor nötig hilft nicht unbedingt, aber in manchen Fällen.

- Es ist aber nicht unbedingt hilfreich, einen Kraftstoff mit höherer Oktanzahl in einem Motor zu verwenden, der dies nicht benötigt. Allenfalls kann bei Motoren, deren Motorelektronik mithilfe eines Klopfensors immer nahe an die Klopfgrenze geht, hochwertiger Kraftstoff helfen – vor allem bei Vollast. Die Motorelektronik kann dann nämlich beispielsweise einen früheren Zündzeitpunkt verwenden und damit den Kraftstoff effizienter nutzen; auch die Leistung steigt dann. Dagegen ist kein Nutzeffekt zu erwarten, wenn die Motorelektronik ohne Klopfensor arbeitet oder wenn der Motor ohnehin nur in der Teillast betrieben wird, wo ohnehin keine Klopfgefahr besteht.

Man beachte, dass gewisse Entscheidungen bereits bei der Entwicklung eines Motors getroffen werden müssen und im Betrieb kaum mehr korrigiert werden können. Beispielsweise hat es sich als ziemlich aufwendig erwiesen, Motoren mit einem einstellbaren Verdichtungsverhältnis zu bauen.

Die hohe Oktanzahl spezieller Kraftstoffe kann leider oft nicht richtig ausgenutzt werden, wenn ein Motor auch für einen anderen Kraftstoff geeignet sein muss.

Sehr günstig sind besondere Kraftstoffe wie Ethanol und Erdgas (auch Biogas), da sie besonders hohe Oktanzahlen haben. Leider sind solche Kraftstoffe aber vielerorts nur begrenzt verfügbar. Vor allem deswegen sind viele Motoren z. B. von Erdgasfahrzeugen für den bivalenten Betrieb ausgelegt, d. h. für den Betrieb mit Erdgas oder Benzin. Dies bedeutet aber leider, dass insbesondere das Verdichtungsverhältnis nicht so hoch gewählt werden kann, wie es für Erdgas eigentlich optimal wäre. Man kann als Kompromiss einen Wert wählen, der für Erdgas etwas zu tief ist, für Benzin dagegen relativ hoch, sodass im letzteren Fall bei Vollast ein später Zündzeitpunkt gewählt und/oder eine Vollastanreicherung vorgenommen werden muss. Mit beiden Kraftstoffen ist der Verbrauch dann leider etwas höher, als er mit Optimierung für den monovalenten Betrieb sein könnte. Hinzu kommt natürlich der Effekt des Mehrgewichts für eine Kombination zweier Kraftstofftanks.

Siehe auch: Verbrennung, Kraftstoff, Benzin, Klopfestigkeit, Atkinson-Motor, Erdgasfahrzeug, Vollastanreicherung