

Vorentflammung

Oder warum der Druck auf die Konstruktion steigt

7. März 2019



*Wie vorzeitige Entzündungen des Kraftstoffgemischs
die Weiterentwicklung von Ottomotoren limitieren*

Einleitung

Auch wenn aktuelle Diskussionen um Schadstoff-Emissionen einen anderen Eindruck vermitteln – in den letzten 20 Jahren hat die Entwicklung von Verbrennungsmotoren enorme Fortschritte etwa bei Verbrauch und Schadstoffausstoß gebracht. Verbunden sind diese Erfolge mit technischen Lösungen wie Direkteinspritzung, Aufladung und Downsizing. Entstanden sind kleine, extrem leistungsstarke Motoren mit deutlich geringeren Verbrauchs- und Emissionswerten. Um nicht nur aktuelle sondern auch künftige Vorgaben weiter erfüllen zu können, müsste die Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Minderung der Umweltbelastung konsequent weiter vorangetrieben werden. Als limitierender Faktor zeigt sich dabei jedoch ein Phänomen, dass im Zusammenspiel der genannten Innovationen, einer fortdauernden Optimierung sowie weiterer äußerer und innermotorischer Einflüsse in größerer Intensität auftritt: Vorentflammung. Vor dem eigentlichen Zündvorgang entflammt das Kraftstoffgemisch, was zu extremen Drücken im Motor führt. Je nach Konstruktion kann das bereits bei einmaligen Auftreten zu starken Schäden bis hin zum Totalverlust der Maschine führen. Noch sind nicht alle Einflussfaktoren der Vorentflammung abschließend geklärt, klar ist aber: Lassen sich die Ursachen nicht beheben, so wird es unmöglich, die Verbrauchs- und Leistungswerte von Ottomotoren weiter zu verbessern. Um das zu erreichen, wären noch höhere Lasten und Drücke in den Motoren erforderlich, die bei Auftreten des Phänomens dann das Risiko des Totalschades zusätzlich erhöhen würden.

Ausgangslage

Der Weg für die Autohersteller ist vorgezeichnet: Bis 2030 setzt die Europäische Union voraus, dass Neuwagen im Schnitt 37,5 Prozent weniger Kohlendioxid ausstoßen als 2021. Bis 2025 sollen es bereits 15 Prozent weniger sein¹. Was scheinbar naturgemäß rasch zu Ablehnung durch die Automobilindustrie geführt hat, setzt die Hersteller enorm unter Druck. Da auch nach bisher optimistischsten Prognosen davon auszugehen ist, dass alternative Antriebsarten bis zum gesetzten Zeitpunkt den erforderlichen Beitrag zu diesem Ziel nicht erbringen können, braucht es Lösungen auf Seiten von Otto- und Dieselmotor. In seiner Stellungnahme wies der Verband der Automobilindustrie (VDA) darauf hin: „Niemand weiß heute, wie die beschlossenen Grenzwerte in der vorgegebenen Zeit erreicht werden können.“ Der Europäische Herstellerverband Acea ergänzt: "Eine CO₂-Minderung um 37,5 Prozent zu liefern, mag sich plausibel anhören, aber gemessen am heutigen Stand ist es völlig unrealistisch." Was in den Aussagen der Industrieorganisationen zum Ausdruck

¹ Europäische Kommission Pressemitteilung: Saubere Mobilität. Parlament und EU-Staaten einig über neue CO₂-Grenzwerte für Autos, 18.12.2018, https://ec.europa.eu/germany/news/20181218-co2-grenzwerte-autos_de am 10.01.2019.



kommt: Es gibt neben der Flottenaufteilung und Kundennachfrage auch ungelöste technische Hindernisse, die eine Weiterentwicklung insbesondere auch im Bereich der Ottomotoren erheblich erschweren.

Grundlage Viertaktmotor

Eine der Barrieren für effektivere Konstruktionen stellt das Phänomen der Vorentflammung des Kraftstoffgemischs im Brennraum dar. Ein Blick in die Abläufe innerhalb des Ottomotors macht die Dimensionen der Herausforderungen für die Entwickler deutlich: Im Viertakter² findet im ersten Schritt zunächst das Ansaugen statt. Der Kolben steht dabei im Zylinder am oberen Totpunkt, das Auslassventil wird geschlossen und das Einlassventil geöffnet. Der Kolben bewegt sich in Richtung Kurbelwelle, durch die Abwärtsbewegung wird Luft in den Zylinder gesaugt. Während dieser Phase liegt die Temperatur etwa bei 100 Grad Celsius, der Druck beträgt etwa 0,1 bis 0,3 bar. Erreicht der Kolben den unteren Totpunkt, schließt sich das Einlassventil. Im nächsten Takt finden Verdichtung, Kraftstoffeinspritzung und Zündung statt. Dafür bewegt sich der Kolben zurück in Richtung oberer Totpunkt. Die in der Brennkammer gespeicherte Luft wird in dem geschlossenen Raum durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens nun stark verdichtet – je nach Motorkonstruktion im Verhältnis 8:1 oder sogar höher. Der Kraftstoff wird über das Einspritzventil in die Kammer direkt eingespritzt und vermischt sich mit der verdichteten Luft. Der Druck liegt in der Brennkammer nun zwischen 10 bis 18 bar, die Temperatur steigt durch die Kompression auf 450 Grad Celsius und mehr. Kurz bevor der Kolben den oberen Totpunkt wieder erreicht, erfolgt die Zündung durch die Zündkerze. Im dritten, dem Arbeitstakt, verbrennt nun das Kraftstoffgemisch. Es entstehen Temperaturen bis zu 2.500 Grad Celsius und der Druck steigt je nach Motor auf bis zu 120 bar. Durch die Ausdehnung bei der Verbrennung verrichtet das Brenngas mechanische Arbeit, der Kolben saust vom oberen Totpunkt nun zum unteren Totpunkt. Im vierten Takt fährt der Kolben erneut zum oberen Totpunkt und schiebt die verbrannten Abgase aus dem Zylinder.

Auftreten von Vorentflammung

Bei einer Vorentflammung zündet das Kraftstoff-Luftgemisch vorzeitig ohne die Auslösung durch die Zündkerze. Diese irreguläre Verbrennung entsteht im Übergang zwischen Takt zwei und drei. Der Kolben befindet sich dabei im Fortlauf des zweiten Taktes noch auf dem Weg zum oberen Totpunkt. Bevor der Kolben den Totpunkt erreichen kann, entzündet sich das Kraftstoff-Luftgemisch vorzeitig. Das entflammte Brenngas erzeugt nun einen Gegendruck zum nach oben fahrenden Kolben, der

² Siehe Reif, Konrad: Grundlagen des Ottomotors, S. 20-25.

leicht bei 200 bis 300 bar liegen kann. Viele Motoren sind für diese Drücke – auch kurzzeitig – nicht ausgelegt. Nicht selten liegt die vorgesehene Dauerlast bei 90 bar, die Spitzenlast um die 120 bar. Akut ist das Thema nun für die Entwickler, da noch höherer Druck in den Zylindern erforderlich wäre, um die Effektivität und Effizienz der Motoren weiter zu steigern. Dafür müssen die Autobauer nun nicht nur Konstruktionen finden, die entsprechend höhere Dauer- und Spitzenlasten verkraften. Gleichfalls müssen sie in zweifacher Form Lösungen zur Vermeidung von Vorentflammung finden: Tritt das Phänomen auf, braucht es passende Motoreigenschaften, um etwa den entstehenden Druck zu verkraften. Um das Entstehen zu verhindern werden zudem clevere konstruktive Lösungen benötigt. Sie müssen auch bei höherem Druck und höheren Temperaturen die Vorentflammung zuverlässig ausschließen können. Zahlreiche Untersuchungen widmen sich in den letzten zehn Jahren diesem Thema. Entscheidend für eine Antwort, ist zunächst das Verständnis der Ursachen.

Hintergründe

Die Vorentflammung hat vielfältige und noch nicht abschließend geklärte Gründe die eng mit der Optimierung von Motoren, Schmierstoffen und Kraftstoffe zusammenhängen. Die bisher erfolgte Entwicklung der Motoren³ hat ein erhöhtes Auftreten von Faktoren gezeigt, die Vorentflammungen begünstigen. Neben Turbolader und Direkteinspritzung wurde insbesondere das Downsizing bei Ottomotoren in den letzten Jahren vorangetrieben. Den Konstrukteuren der verschiedenen Hersteller ist es dabei auch bei Ottomotoren gelungen, das Hubvolumen zu reduzieren und gleichzeitig die spezifische Leistung durch entsprechende hohe Aufladung anzuheben. Ein Weg dorthin führte über kleinere Brennräume mit Folgen für die Gemischbildung, ein anderer über die dauerhafte oder zeitliche Verringerung der Zylinderzahl. Letztlich liegen die Betriebspunkte aufgrund der geringeren Volumina im Motorkennfeld im Bereich höherer spezifischer Lasten⁴. Via Kompressor oder Abgas-turboaufladung erfolgt dabei eine gezielte Aufladung, die eine Steigerung des effektiven Mitteldrucks und entsprechende Hochlasten zur Folge hat. Für die Direkteinspritzung spricht dabei, dass der Verbrauch spürbar sinkt, wenn das zündfähige Kraftstoff-Luftgemisch erst im Zylinder gebildet und sehr genau gesteuert wird⁵. Kraftstoffverluste durch Leitungen, Kanäle und Vorräume wer-

³ Reif, Konrad: Grundlagen des Dieselmotors, in: Reif, Konrad (Hrsg.): Dieselmotor-Management im Überblick einschließlich Abgastechnik, S. 14-31, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2014; derselbe: Grundlagen des Ottomotors, in: derselbe (Hrsg.): Ottomotor-Management im Überblick, S. 2-23, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015.

⁴ Rüden, Klaus von: Beitrag zum Downsizing von Fahrzeug-Ottomotoren, Dissertation an der Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, Berlin 2004.

⁵ Basshysen, Richard van (Hrsg.): Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2017.

den vermieden, gleichzeitig kann die erforderliche Kraftstoffmenge viel präziser bestimmt und entsprechend zugeführt werden. Die, via Turbolader vorverdichtete Luft, die zum Brennraum geführt wird, sorgt durch einen höheren Sauerstoffgehalt für eine effektivere Verbrennung. Im Ergebnis konnte so eine Verringerung des Hubraums gelingen, die half auch bei Ottomotoren die strenger werdenden CO₂-Grenzwerte einzuhalten. Die Optimierung brachte hochaufgeladene, kleine Motoren mit geringen Hubräumen und großen Drücken mit sich, die bei weniger Verbrauch mehr Leistung erbringen können. Für eine Weiterentwicklung stellen diese Punkte nun jedoch einzeln und im Zusammenspiel eine Herausforderung dar, da sie das Umfeld für das verstärkte Auftreten vor Vorentflammungen schaffen.

Ursachen für Vorentflammung

Verschiedene Untersuchungen weisen darauf hin, dass diese Optimierung nicht ohne Folgen für das Auftreten irregulärer Verbrennungen sind⁶. Sie machen deutlich, dass weitere Steigerungen von Effektivität und Effizienz dadurch limitiert werden⁷. Demnach ist beim Downsizing bisher ein geringerer Wirkungsgrad als bei früheren Motoren zu beobachten, der sich aus dem Kompromiss zwischen Aufladegrad und möglichem Verdichtungsverhältnis ergibt. Wobei letzteres aufgrund einer erhöhten Klopf sensitivität gegenüber älteren Konstruktionen verringert werden muss. Denn „durch den höheren Ladedruck steigt das Risiko einer irregulären Verbrennung stark an“⁸. Zu den nicht erwünschten Zündvorgängen gehören neben Funkenklopfen und Oberflächenentzündungen die Bereiche der Selbstentflammung⁹, inklusive der angesprochenen und Entwicklungshemmenden Vorentflammung. Um dort Lösungen zu finden, beschäftigt sich ein Teil der Forschung mit Kraftstoffen und ihren Einflüssen auf diese Thematik¹⁰. Immer klarer scheint, dass Treibstoffe und ihre chemische Zusammensetzung erheblichen Auswirkungen haben. Einige Untersuchungen zeigen, dass beispielsweise die Neigung zur Vorentflammung abnimmt, je höher der Ethanolgehalt ist¹¹. Andere Studien legen nahe, dass es Zusammenhänge zwischen dem Selbstzündungsverhalten der Kraftstoffe mit Druck und Temperatur im Brennraum gibt¹².

⁶ Vgl. u.a. Zarcardi, Jean-Marc; Lecompte, Matthieu; Duval, Laurent: Vorentflammung an hoch aufgeladenen Ottomotoren. Visualisierung und Analyse, in: Motorentechnische Zeitschrift, 12/2009, S. 938-945.

⁷ Willand, Jürgen; Daniel, Marc; Montefrancesco, Emanuela; Geringer, Bernhard; Hofmann, Peter; Kieberger, Markus: Grenzen des Downsizing bei Ottomotoren durch Vorentflammung, in: Motorentechnische Zeitschrift, 05/2009, S. 423-429.

⁸ Dyckmans, Jan: Untersuchungen zum Einsatz von Alkoholen in modernen Ottomotoren, in: Berichte aus dem ivb, Band 12, Shaker Verlag, Aachen 2016, S. 12.

⁹ Ebenda.

¹⁰ Adomeit, Philipp; Dohmen, Jürgen; Thewes, Matthias; Matthias, Ewald; Günther, Marco; Morcinkowski, Bastian; Pischinger, Stefan: Einfluss von Kraftstoff und Brennverfahren auf die Vorentflammung beim aufgeladenen Ottomotor, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik ; 764; 34. Internationales Wiener Motorensymposium; Düsseldorf 2013; S. 235-259.

¹¹ Dyckmans, S. 44.

¹² Vgl. Dedl, Geringer, Budak, Pischinger, S. 78.



Als mögliche Auslöser für die vorzeitige Entzündung im Zylinder werden aktuell unter anderem benannt:

- Druck- und Temperaturbedingungen
- Hot Spots
- Restgas
- Temperaturfluktuationen im Arbeitsgas
- Ablösung von Schmierstofftröpfchen von der Zylinderwand
- Kritisch hohe Verdichtungstemperatur¹³
- sowie Partikel¹⁴
- und bestimmte Kraftstoffeigenschaften¹⁵.

Tröpfchen und Ablagerungen

Ein wesentlicher Ausgangspunkt für Vorentflammungen sind etwa Kraftstoff-Öl-Tröpfchen¹⁶. Beim Einspritzen des Kraftstoffs im Übergang zwischen Takt 2 und 3 benetzt dieser die mit Öl geschmierte Zylinderwand. Dadurch entsteht dort ein Gemisch aus Öl und Kraftstoff, aus dem sich während der Kompressionsphase kurz vor dem oberen Totpunkt der Kolbenbewegung Tröpfchen lösen können. Die Ursache liegen in einer geringeren Oberflächenspannung und Viskosität dieses Kraftstoff-Öl-Gemischs. Als weitere Eigenschaft besitzt diese Verbindung eine höhere Zündwilligkeit als der reine Ottokraftstoff¹⁷. Bei höherem Druck und steigenden Temperaturen kann es so zur Selbstentzündung der Tröpfchen kommen, die schließlich eine Vorentflammung des gesamten Kraftstoff-Luftgemischs im Brennraum auslösen kann.

Neben dem gasförmigen Kraftstoff-Luftgemisch können sich im Brennraum auch feste Stoffe wie Partikel oder Ablagerungen befinden, die bei ausreichender Temperatur gleichfalls eine vorzeitige Zündung verursachen können¹⁸. Obwohl Hersteller und Zulieferer enorme Kapazitäten in die Verhinderung von Ablagerungen im Brennraum stecken, lassen sich diese in Ottomotoren mit Direkteinspritzung kaum vermeiden¹⁹. Die Gründe dafür liegen unter anderem in höchst unterschiedlichen

¹³ Vgl. Kadunic, Samir: Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Ottomotor. Ein Potenzial zur Steigerung von Wirkungsgrad und Leistung aufgeladener Motoren, S. 23, Springer Vieweg, Berlin 2014.

¹⁴ Vgl. Graf, Philipp: Untersuchung von irregulären Verbrennungsphänomenen an aufgeladenen Ottomotoren mit Direkteinspritzung, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2015, S. 87-98.

¹⁵ Dedl, Jörg; Geringer, Bernhard; Budak, Oguz; Pischinger, Stefan: Kraftstoffkennzahlen zu Beschreibung von Vorentflammung in Ottomotoren, in: Motorentechnische Zeitschrift, 05/2018, S. 76-81.

¹⁶ Graf, S. 14.

¹⁷ Ebenda.

¹⁸ Derselbe, S. 13.

¹⁹ Derselbe, S. 73.

Nutzungsprofilen der Millionen Autofahrer, die sich über die Konstruktion nicht alle abdecken lassen. Auch die sehr uneinheitlichen Zusammensetzungen von Kraftstoffen und Motorölen tragen dazu bei²⁰. Im Kern können die genannten Einflussfaktoren zu rußender Verbrennung oder Öleintrag im Brennraum führen. Die entstehenden Ruß- oder Öl-Partikel lagern sich an den Wänden oder Bauteilen wie Kolben oder Ventilen ab. Durch Vibrationen oder auch die Einspritzung des Kraftstoffs können Partikel gelöst werden. Die frei sich bewegenden Partikel nehmen die Temperatur im Brennraum auf und können diese nicht mehr über Wände oder Bauteile abführen. Durch die Zündung werden die Kleinstteile zum Glühen gebracht. Sind die Partikel so groß, dass sie nicht rechtzeitig verlöschen, können sie im folgenden Zyklus beim Übergang von Takt 2 auf Takt 3 das Kraftstoff-Luftgemisch vorzeitig entflammen²¹ - mit den beschriebenen Folgen.

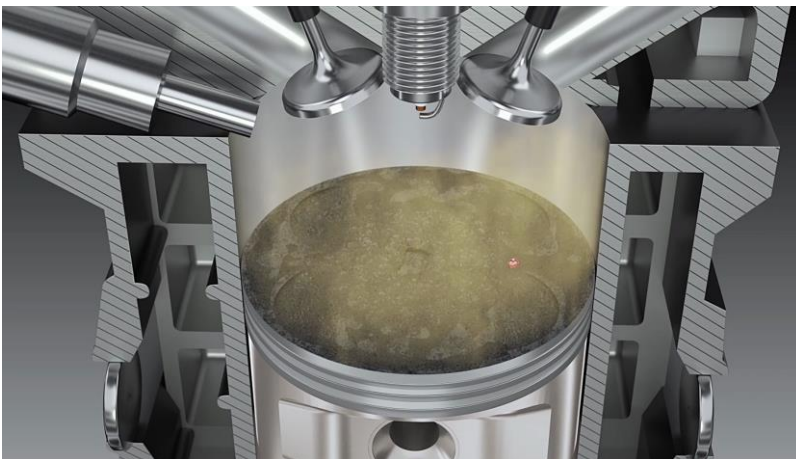


Abbildung 1: Ablösen eines Öltröpfchens von der Zylinderwand
Quelle: TUNAP Group



Abbildung 2: Explosion des Öltröpfchens vor der Zündung
Quelle: TUNAP Group

²⁰ Kalghatgi, Gautam T.: Combustion Chamber Deposits in Spark-Ignition Engines. A Literatur Review, Shell Research Ltd, Chester (UK), 1995.

²¹ Graf, S. 77 und S. 96.



Lösungsansätze

Im wesentlichen lassen sich zwei große Ausgangspunkte für die Entstehung von Vorentflammung ausmachen, die wiederum durch verschiedenen Faktoren beeinflusst sind: Kraftstoff-Öl-Tröpfchen und glühende Partikel²². Den Forschern und Entwicklern weltweit ist jedoch klar, dass Lösungen umfassender angreifen müssen. „Wir wissen, dass Vorentflammung in der Brennkammer auftritt. Die praktikabelste Lösung ist ein holistischer Ansatz, der sowohl das Motorendesign als auch die Ölformulierung sowie die Kraftstoffqualität in den Blick nimmt“, so Ian Bell, Research and Development Director von Afton Chemical in Richmond/Virginia (USA)²³. Während diese Punkte vor allem für eine weitere Optimierung der Ottomotoren – eben mit Blick auf die zu Beginn genannten Regularien – eine Rolle spielen, brauchen Besitzer von Fahrzeugen mit gefährdeten Ottomotoren bereits heute Antworten auf die Risiken von Vorentflammung. Während im Bereich Kraft- und Schmierstoffe bereits umfassende Entwicklungen stattfinden – die sich zwar eher auf künftige Motorengenerationen fokussieren, dennoch für aktuelle Modelle Verbesserungen bringen können – lässt sich das Design der bereits verbauten Motoren nachträglich nicht ändern. Dort sind andere Lösungen gefragt: Diese müssen bei den verwendeten Bauteilen ansetzen und dafür sorgen, dass Partikelbildung durch Ablagerungen sowie die Entstehung von Kraftstoff-Öl-Tröpfchen vermieden oder zumindest reduziert werden. Bereits seit vielen Jahren gibt es Kraftstoff-Additive für die Reinigung von Motoren. Bisher setzen viele dieser Zusätze jedoch vor den Entstehungsorten von Vorentflammungen an. Sie haben nachgewiesenermaßen eine gute Reinigungswirkung auf das Kraftstoffsystem etwa auf Leitungen, Filter oder Einspritzdüsen. In puncto Brennraum-Reinigung – also der Lösung von Ablagerungen an den Wänden oder am Kolben – liefern sie oft noch keine zufriedenstellende Wirkung. Durch ihre chemische Struktur wiederum begünstigen manche dieser Additive selbst die Partikelbildung im Brennraum und damit Vorentflammung. Erst neuere Ansätze rücken die Ablagerungen im Zylinder in den Mittelpunkt und sorgen für hinreichende Reinigung. Im Ergebnis leisten sie damit – wie Weiterentwicklungen im Kraftstoff- und Öl-Bereich – einen Beitrag zum zuvor genannten umfassenden Ansatz, um Vorentflammung in den Griff zu bekommen. Sie geben den Entwicklern im Zusammenwirken weiteren Spielraum, um Design und Konstruktion der Motoren voranzutreiben.

²² Derselbe, S. 101.

²³ Chabot, Bob: Resolving Low-Speed Pre-Ignition, in: Motor Magazin, Januar 2017, <https://www.motor.com/magazine-summary/resolving-low-speed-pre-ignition> am 10.01.2019.



Über den Autor



Dr. Christoph Hochstein
Leiter technische Entwicklung / Labor
TUNAP Group