

Anwendung von neuen Entwicklungswerkzeugen zur Lokalisierung von Klopfzentren an Motorradmotoren

Utilization of new Development Tools for the Localization of Knock Centers within Motorcycle Engines

Heidelinde Holzer, Jörg Reissing, Franz-Xaver Biermeier, Wolfgang Nehse, Markus Braunsperger, Harald Philipp, Erich Kelz

1. Einleitung

Die Entwicklung eines Motorrads wird heute von zahlreichen Faktoren wie dem Leichtbau, der Ergonomie, dem Komfort, der Sicherheit, der Akustik, der Optik und natürlich dem Image des Fahrzeuges geprägt. Gleichzeitig nimmt die Verbesserung der Fahrleistungen und der Charakteristik der Leistungsentfaltung eine zentrale Rolle ein.

Da sich das Leistungsgewicht allmählich asymptotisch Werten nähert, die zukünftig nur mit sehr hohem Aufwand optimiert werden können, wird das Ausschöpfen der letzten Verbesserungspotenziale immer zeit- und kostenintensiver, vor allem dann, wenn die Forderung nach einer Verbrauchs- und Emissionssenkung aufrecht erhalten bleiben soll [1].

Die klassischen Methoden der Leistungssteigerung sind die Erhöhung des Hubvolumens, der Nenndrehzahl oder des Verdichtungsverhältnis. Mit einer oder der Kombinationen dieser Maßnahmen soll eine kennfeldweite Steigerung des inneren Wirkungsgrades erzielt werden. Dem entgegen wirken aber die maximal zulässige mechanische Belastbarkeit der Bauteile und die Tatsache, dass durch eine zu hoch gewählte Verdichtung die klopfende Verbrennung dem Motorbetrieb Grenzen setzt.

Der abnormale Verbrennungsablauf „Klopfen“ wird von hochfrequenten Druckschwankungen im Zylinder charakterisiert. Ein länger andauerndes Klopfen mit kleinen Druckspitzen führt zur kavitations- und erosivähnlichen Schädigungen an der Zylinderkopfoberfläche, am Kolbenbodenrand und am Feuersteg. Tritt Klopfen mit sehr hohen Druckspitzen auf, sind meistens Brüche des ersten Ring- oder des Feuersteiges die Schadensursache. Im Extremfall kommt es aufgrund von lokalen Überhitzungen zu Selbst- bzw. Glühzündungen. Das Gemisch wird unkontrolliert in Brennraumbereichen entzündet, die Temperaturen aufweisen, die oberhalb der Selbstentzündungstemperatur des verwendeten Kraftstoff-Luftgemisches liegen. Treten während mehrerer Zyklen sogenannte Glühzündungen auf, so wird der Brennraum soweit aufgeheizt, dass es zu einem selbsterhaltenden Prozess kommt. Aufgrund seiner Heftigkeit hat er einen stetigen Abfall des indizierten Mitteldrucks und somit des inneren Wirkungsgrads zur Folge. Die Wärmezufuhr in den Brennraum wird soweit gesteigert, dass ein Motorschaden aufgrund der hohen thermischen Belastung nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Verbrannte Ventile, abgeschmolzene Zündkerzenelektroden, durchgebrannte Kolbenböden und Verschmelzungen an den Quetschkanten des Zylinderkopfes sind die häufigsten Schadensbilder [2, 3, 4, 5].

Mit Hilfe der neuen Visioskopie Messtechnik der Firma AVL List GmbH können gemeinsam mit der Zylinderdruckindizierung detaillierte Kenntnisse über das Verbrenungsverhalten erhalten werden. Erst die Identifikation der Klopforte bei hoch verdichteten Motoren lässt eine Detailoptimierung der Brennraumgeometrie, der Flammenausbreitung und der Strömungsführung im Brennraum und in den Einlasskanälen zu. So kann der innere Wirkungsgrad gesteigert und die noch vorhandenen, wertvollen Potenziale der Leistungssteigerung von modernen Motorradmotoren ausgenutzt werden.

2. Vorgehen bei der Lokalisierung von Klopfzentren im Ottomotor

Zur Entstehung und dem Ablauf von klopfender Verbrennung in Ottomotoren existieren bereits zahlreiche Veröffentlichungen und Theorien. Ein Beispiel des Zylinderdruckverlaufes während einer klopfenden Verbrennung ist exemplarisch in Bild 1 dargestellt.

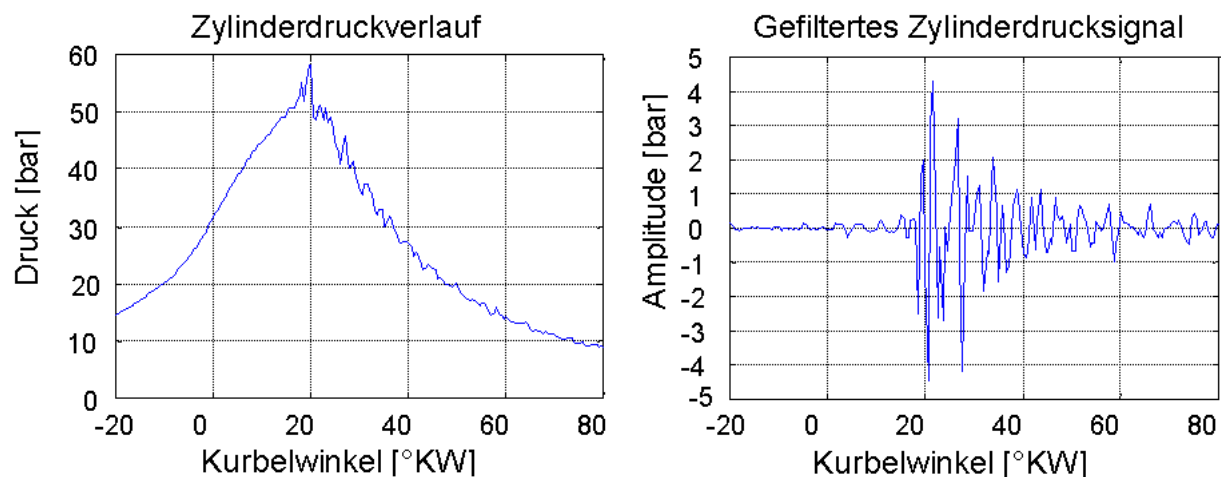


Bild 1: Klopfbrennung beim Ottomotor, Vollast, 4000 min^{-1} , $\lambda = 1.0$

Als Ursache der Klopferscheinung werden hauptsächlich Selbstzündungen im Endgasbereich einer sich regulär ausbreitenden Flammenfront gesehen. Das im Brennraum vorherrschende Druckniveau, die Temperatur, die Gemischzusammensetzung und die Kraftstoffqualität gelten als die wichtigsten Größen, die das Klopfen beeinflussen. Zusätzlich lassen sich zahlreiche Zusammenhänge zwischen Betriebsparametern, Konstruktionsmerkmalen und dem Auftreten klopfender Verbrennung erklären. Es konnte nachgewiesen werden, dass Verbrennungszyklen, die im weiteren Verlauf klopfend ablaufen, sich bereits unmittelbar nach der Zündung des Gemisches, somit lange vor dem eigentlichen Auftreten des Klopfens, von einem normalen Arbeitsspiel im Druckniveau, Gemischzustand und Temperatur unterscheiden. Die Annahme ist berechtigt, dass die Entscheidung, ob ein Zyklus im weiteren eine klopfende Verbrennung aufweist, bereits lange vor dem Selbstzündungsprozess getroffen wird [2, 3, 4, 5].

Somit wird die Kenntnis der Ausgangsorte klopfender Verbrennung zur wesentlichen Voraussetzung für die Optimierung von Ladungsbewegung und Brennraumgeometrie hinsichtlich hoher Klopfestigkeit.

2.1 Entwicklungswerkzeuge für den Einsatz am Vollmotor

Der für den Gleichraumprozess gültige Zusammenhang zwischen innerem Wirkungsgrad und Verdichtungsverhältnis verspricht bei Anhebung der Verdichtung für nicht aufgeladenen Motoren, deren Verdichtungsverhältnis zwischen 9 und 12 liegt, noch ein deutliches Potenzial zur Wirkungsgrad- und somit zur Leistungssteigerung [2].

Die Praxis zeigte aber, dass während der Leistungsentwicklung eines luft-/ölkühlten Zweizylinder-Boxermotors mit hoher Verdichtung die Vollast-Zündwinkel nicht über das gesamte Drehzahlband wirkungsgradoptimal ausgelegt werden konnten. Durch den hohen Füllungsgrad im Bereich um das Nennmoment stieg die Klopfneigung und somit die Forderung nach deutlich späteren Zündwinkel. Die Korrelation zwischen Spitzendrucklage und Luftaufwandsverlauf war eindeutig zu erkennen. Somit verminderten sich die theoretischen Vorteile des höheren Verdichtungsverhältnisses durch die ungünstige Schwerpunktslage der Verbrennung.

Da die Erkenntnisse aus der Zylinderdruckindizierung zur Klärung der Ursache dieser Klopfproblematik nicht mehr ausreichend waren, wurde nach alternativen Messverfahren gesucht. Dazu eigneten sich vor allem optische Verfahren, die sowohl eine Visualisierung der Flammenausbreitung im Brennraum ermöglichen als auch den Einfluss der Brennrauminnenströmung auf den Flammenfortschritt erfassen und Klopfzentren lokalisieren. Dabei besteht die Forderung, dass durch den optischen Zugang weder die Betriebssicherheit noch das thermodynamische Verhalten des Motors signifikant beeinflusst werden.

In Forschungsaggregaten wird dieser optische Zugang zur Visualisierung über Glasringe oder -fenster im Zylinderkopf realisiert. Mit Hilfe von laserunterstützten Messverfahren, wie die „Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)“ oder die „Particle Image Velocimetry (PIV)“ sind detaillierte Analysen der strömungstechnischen Gegebenheiten und der Kraftstoffumsetzung im Brennraum möglich [2]. Da diese Messverfahren aufgrund ihrer Systemkomplexität für eine Applikation am Vollmotor ungeeignet sind, hat sich die Lichtleitertechnik durchgesetzt.

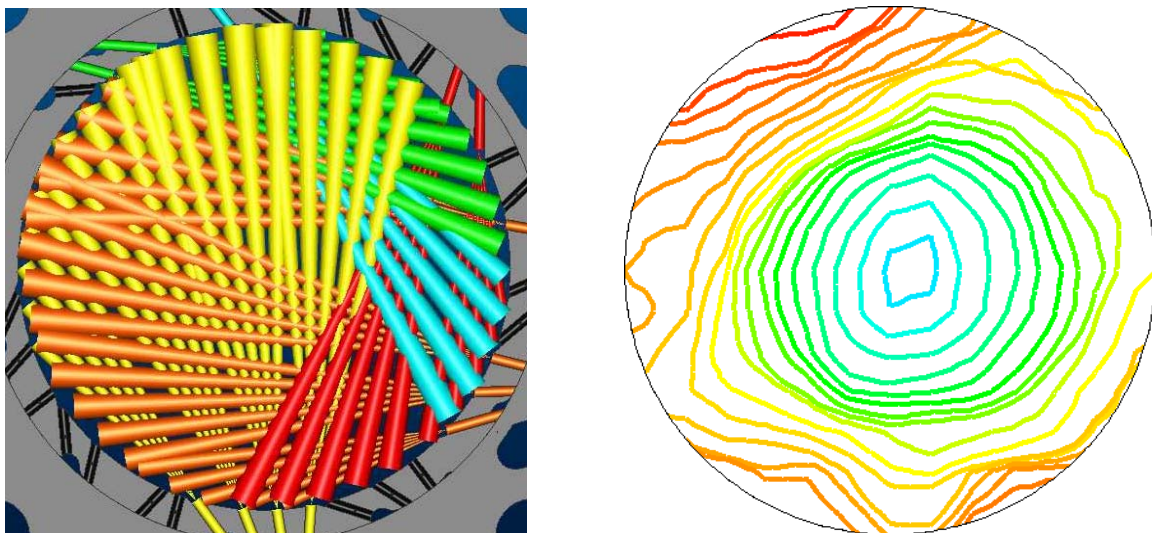


Bild 2: Visiolution Technik „Visio Tomo“ [10]

Lichtleiter, die in einer speziell präparierten Zylinderkopfdichtung integriert sind, erfassen einen Brennraumquerschnitt, in dem nahezu der gesamte Verbrennungsab-

lauf detektiert werden kann. Dieses von der Firma AVL List GmbH angebotene Diagnosewerkzeug ist bekannt unter „Tomographic Combustion Analysis (TCA)“ oder „Visio Tomo“. Dabei wird die Beobachtung auf die von einem optischen Gitternetz vorgegebenen Messebene begrenzt, deren Lage im Brennraum eindeutig bekannt ist (Bild 2) [6, 10].

Zusammen mit dem synchron gemessenen Zylinderdruckverlauf, den 160 Kanälen für die in der Zylinderkopfdichtung integrierten Lichtleiter und der kontinuierliche Mehrkanalaufzeichnung der Flammenstrahlung wird es möglich über den gesamten Kurbelwinkelbereich die notwendige Information zu erhalten, um Rückschlüsse auf die Ausbildung der Flammenfront, der Flammenintensitäts- und Klopfverteilung geben zu können (Bild 3).

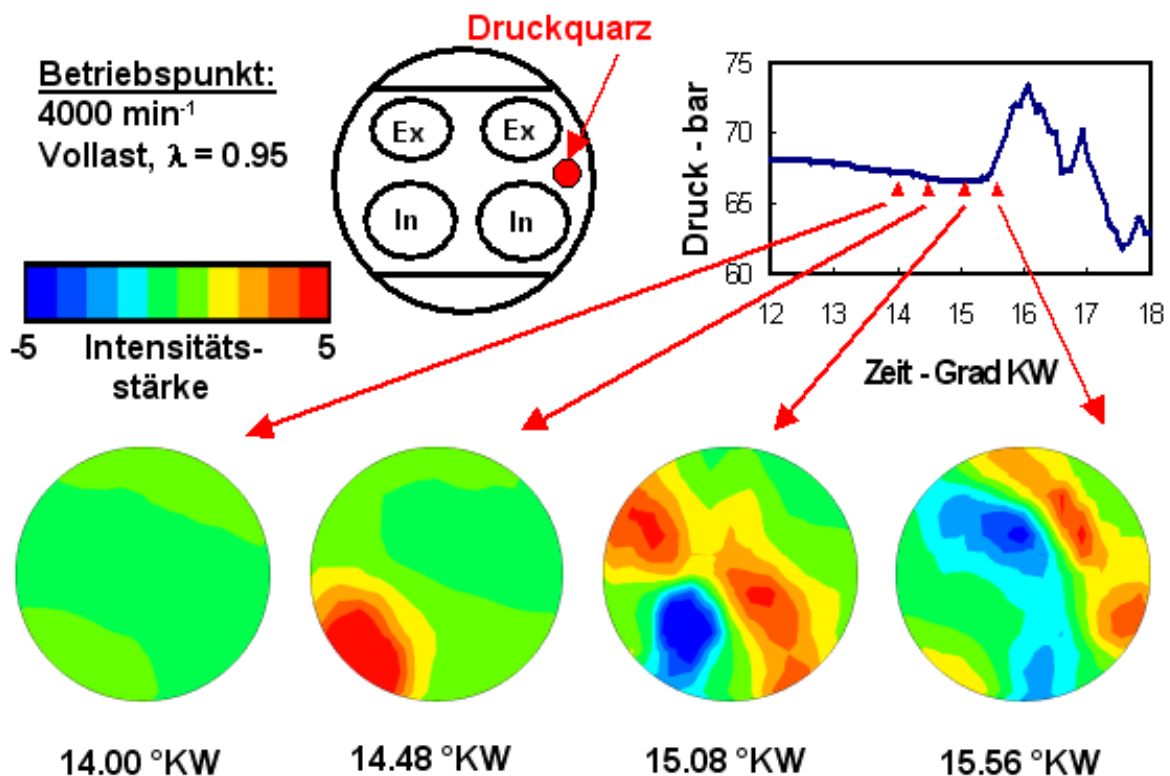


Bild 3: Funktionsweise des „Visio Tomo“-Zylinderkopfdichtung – Korrelation zwischen Lichtemission und Zylinderdruckverlauf

Durch die Beschränkung der Optikeinbauten und des nicht unerheblichen Applikations- und Kostenaufwandes, den „Visio Tomo“ mit sich bringt, ist die Integration der Lichtleiter in einen Zündkerzenkörper als Diagnosewerkzeug in der Serienentwicklung eindeutig zu bevorzugen.

Die Firma AVL List GmbH realisierte die Forderung nach der Integration der Lichtleiter in die Zündkerze in den Messverfahren „Visio Flame“ und „Visio Knock“ (Bild 4). Die Grundlage für die Auswertung aller drei optischen Diagnosewerkzeuge sind die in den einzelnen Kanälen erfassten Lichtintensitäten und die nach der Messung anschließende Rekonstruktion der Flammenverteilung. Da die Intensität des Flammenleuchtens proportional zum Druck im Zylinder ist, besteht eine Korrelation zwischen dem Verbrennungsleuchten im Brennraum und der Zeit. In Verbindung mit der hohen Zeitauflösung des Systems ist es möglich, das Flammenwachstum und das Ausbrennen von Brennraumnischen zu verfolgen sowie die Orte der Selbstzündung bei klopfender Verbrennung zu identifizieren. Die Flammenkerngeschwindigkeit wird an-

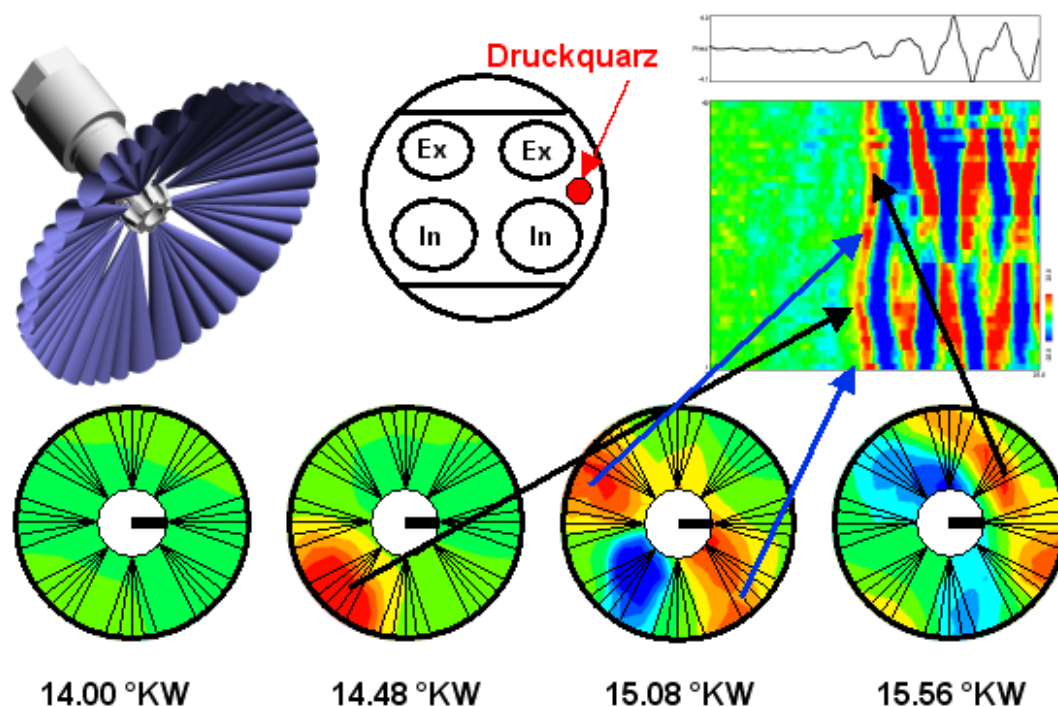
hand der Ankunftszeiten der Flammenhelligkeit am Sensor ermittelt. Für eine Flammenbeobachtung ist entscheidend, dass die frühe Verbrennungsphase mit hoher Empfindlichkeit und die während der Verbrennung auftretenden extrem hohen Helligkeitsänderungen der Flamme von Sensoren hoher Signaldynamik erfasst werden. Mit dieser Visioskopie kann durch eine weitgehend automatisierte Auswertung relativ schnell Auskunft über bevorzugte Klopforte im Brennraum und die Flammenausbreitung an der Zündkerze gegeben werden [7].



Bild 4: Visioskopie Technik „Visio Flame“ und „Visio Knock“

2.1 Am Motorradmotor eingesetzte Entwicklungswerkzeuge

Ein Brennverfahren mit zentraler Zündkerzenposition ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass sich in den meisten Fällen der Endgasbereich in dem Klopfen entsteht am Brennraumrand befindet. Von dort breitet sich eine Stosswelle näherungsweise kugelförmig in den gesamten Brennraum aus und durchläuft das brennende Gasgemisch. An den Orten maximaler Dichte resultiert eine erhöhte Lichtemission. Der zeitliche Verlauf dieser Lichtemission wird von einem optischen Zündkerzensensor, der mit 40 gleichmäßig über den Umfang verteilten Lichtleitern bestückt ist, detektiert. Die Beobachtungskegel des Sensors sind auf den Brennraumrand ausgerichtet. Sie erfassen nur einen definierten Bereich. Der Sektor, dessen Intensität zuerst über das reguläre Flammenleuchten hinaus ansteigt, enthält den Klopfort. In den benachbarten Sektoren werden die Signale von der Klopffront etwas später erfasst. Der dem Klopfort gegenüberliegende Lichtleiter detektiert die Stoßwelle zuletzt. Die Messtechnik liefert eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klopforte im Brennraumumfang. Die Anordnung der Beobachtungskegel sowie ein Beispiel einer Flammenstrahlung ist in Bild 5 dargestellt [8, 9, 10].



*Bild 5: Funktionsweise der „Visio Knock“-Zündkerze –
Korrelation zwischen Brennraumort und Lichtemission*

Erwartungsgemäß hängt die erzielte Ergebnisqualität stark von der Intensität des auftretenden Klopfens ab. So können aus einer leichten Klopferscheinung nur wenig Informationen über die Klopffverteilung im Brennraum gewonnen werden. Erst ab Klopffamplituden von 0.8 bar kann, wie Bild 6 zeigt, eine sinnvolle Auswertung der erfassten Brennraumstrahlung durchgeführt werden.

Um die Aussagequalität während der Messungen am Zweizylinder-Boxermotor zu erhöhen, wurde dieser mit mindestens 1.5 bis 2.25 °KW Abstand von der Klopffgrenze in Richtung früh betrieben.

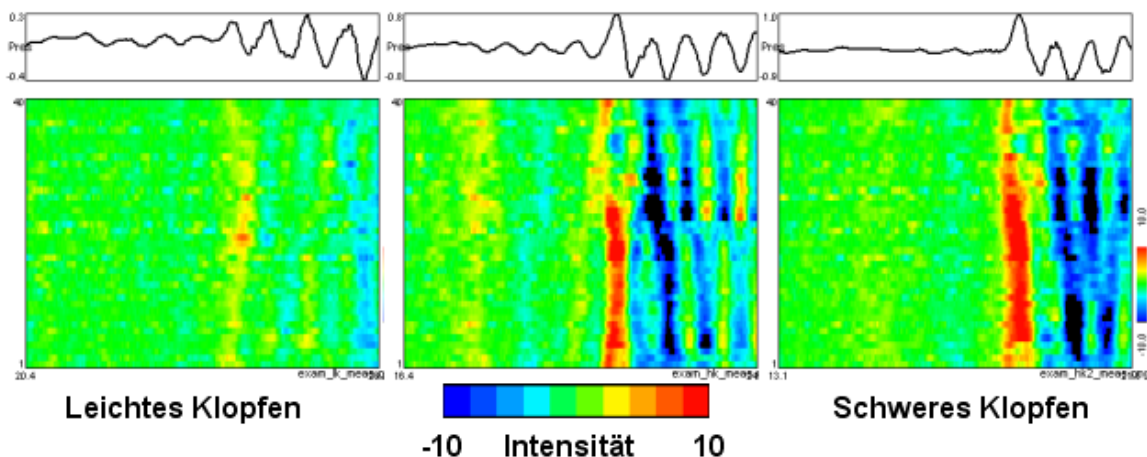


Bild 6: Lichtintensitäten in Abhängigkeit der Klopffstärke

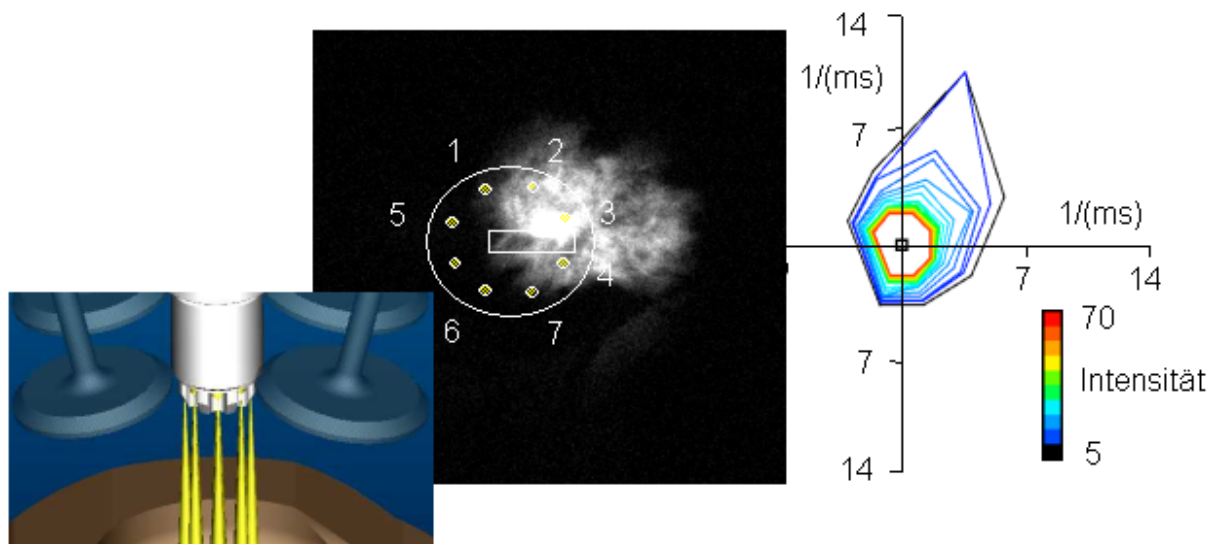


Bild 7: Funktionsweise der „Visio Flame“-Zündkerze – Korrelation zwischen Flammenkernausbreitung und Lichtemission

Da die Art und Weise des Verbrennungsablaufes schon in einer sehr frühen Phase des Verbrennungszyklus charakterisiert wird, kommt der Analyse der Entflammung des Kraftstoff-Luftgemisches an der Zündkerze eines Ottomotors große Bedeutung zu. Sowohl globale Strömungszustände im Brennraum, wie Tumble oder Drall, als auch mikroskopische Strömungsstrukturen, wie Turbulenzintensitäten, haben entscheidenden Einfluss auf die Flammenausbreitung. Als geeignete Messtechnik zur Erfassung der Entflammungsphase wurde das Entwicklungswerkzeug „Visio Flame“ eingesetzt, dessen Funktionsweise in Bild 7 dargestellt ist. Dazu werden 8 Lichtleiter verwendet, die senkrecht in Zündkerzeneinschraubrichtung die Flammenhelligkeit unmittelbar nach der Entflammung des Gemisches erfassen. So können die Flammenankunftszeiten in jede Brennraumrichtung detektiert werden.

2.1.1 Beschreibung des Versuchsträgers und des Messablaufes

Der Versuchsträger, der auf seine Klopfzentrenverteilung und Flammenkernausbreitung an der Vollast untersucht wurde, war ein Zweizylinder-Boxermotorradmotor mit einem Hubraum größer als 1100 ccm und einer Verdichtung kleiner als 12.0. Der Motor besaß eine zentrale und eine zwischen Ein- und Auslassventil angeordnete zweite Zündkerze pro Zylinder. Die Anordnung der Zündkerzen und des Zylinderdruckquarzes kann Bild 8 entnommen werden. Die geometrischen und technischen Spezifikationen des „Visio Knock“ Zündkerzensensors entsprachen denen der im Motor verbauten Zündkerzen.

Um Verschmutzung der optischen Zugänge während des Warmlaufes zu vermeiden, wurde erst bei betriebswarmem Motor die „Visio Knock“- Zündkerze unter Berücksichtigung der Einbaulage in den Boxermotor eingeschraubt. Um die Transmission der optischen Sensoren zu überprüfen und falls notwendig zu korrigieren, wurde in regelmäßigen Zeitabständen der Teillast-Referenzpunkt angefahren. Die auftretende Verschmutzung der Optik war unerwartet gering.

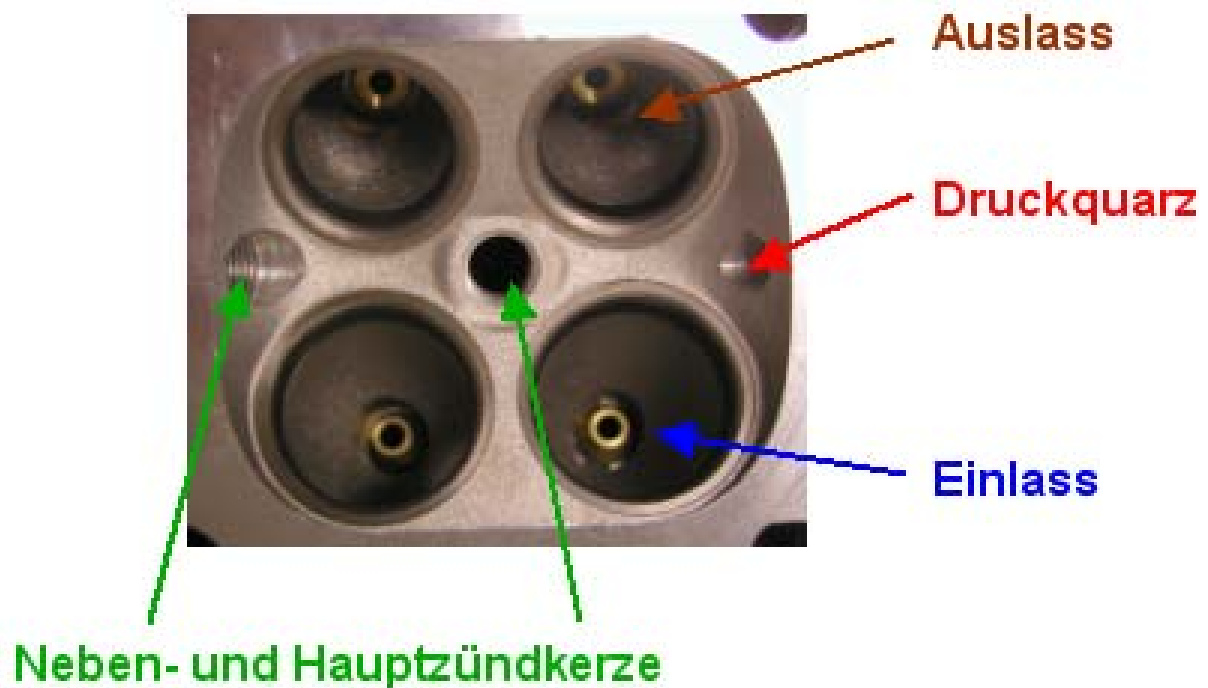


Bild 8: Brennraumanordnung Zylinder 1

Damit in der Vollast eine möglichst große Anzahl von Zyklen bei stark klopfender Verbrennung mit einer hohen Zeitauflösung verlässlich aufgezeichnet wurde, musste ein passendes Zeitfenster gewählt werden. Die Größe des Messfensters wurde zuerst bei der Messung an der Klopfgrenze festgelegt. Die letztendlich für die Bestimmung der Klopfhäufigkeit relevante Messung bei stark klopfenden Betriebsbedingungen in der Vollast wurde so oft wiederholt bis ca. 100 klopfende Arbeitsspiele für die Auswertung vorlagen. Begleitend zur „Visio Knock“-Messung wurden sowohl die Indizier- als auch die den Motorbetriebszustand charakterisierenden Größen, wie Motormoment, -drehzahlen, -temperaturen etc. aufgezeichnet. Da sich im Drehzahlbereich zwischen 4500 min^{-1} bis maximal 7000 min^{-1} die klopfempfindlichsten Betriebspunkte des Motors befanden, wurde der Drehzahlschnitt dementsprechend angepasst.

3. Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Um die im Zweizylinder-Boxermotor auftretenden Klopferscheinungen bewerten zu können, wird sowohl auf die Verteilung der Klopfhäufigkeit bei Einzel- als auch bei Doppelzündung eingegangen.

Für ein besseres Verständnis der Messergebnisse ist in Bild 9 an einem Beispiel die Zuordnung der Visioskopie-Bilder zu den realen geometrischen Bedingungen im Brennraum dargestellt. Sie entspricht dem Blick vom Zylinderkopf in Richtung Kolben mit der Einlassseite unten. Die Richtungen in den Visioskopie-Bilder werden im Uhrzeigersinn angegeben.

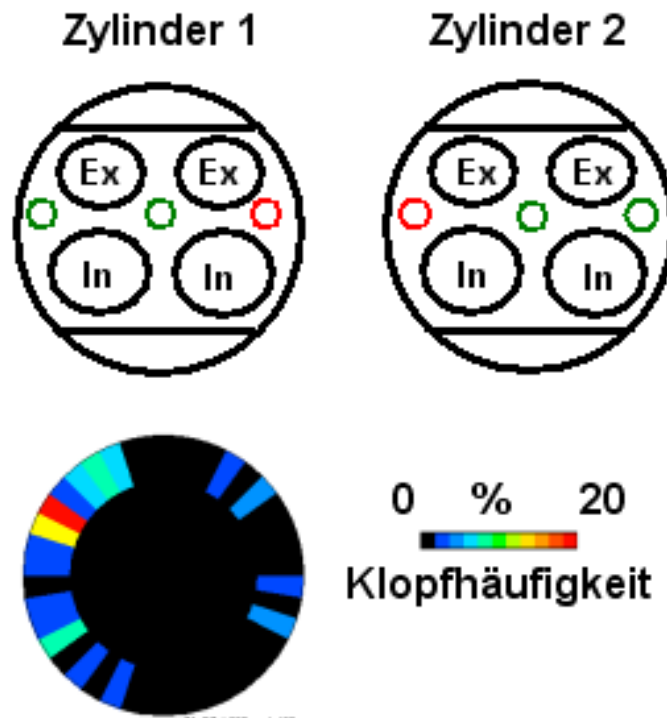


Bild 9: Darstellung der Visioskopie-Ergebnisse

3.1 Einzelzündung

In Bild 10 sind bei Einzelzündung durch die zentrale Zündkerze die Massenumsatzpunkte in der Vollast und an der Klopfgrenze dargestellt. Über den gesamten Drehzahlchnitt lag der Verbrennungsschwerpunkt (= 50 % Massenumsatzpunkt) leistungsoptimal zwischen 7 und 10 °KW nach OT.

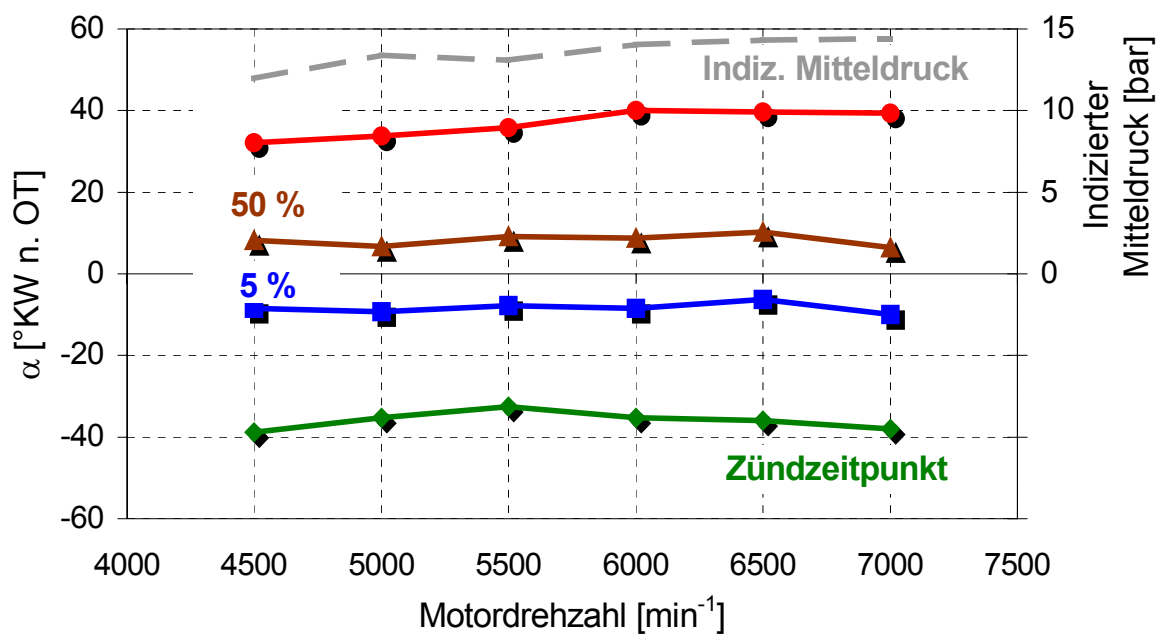


Bild 10: Ergebnisse der Indiziermessung an der Klopfgrenze, Vollast, Einzelzündung, Zylinder 1

Auffällig ist, dass 50 % des in den Brennraum eingebrachten Kraftstoff-Luftgemischs sehr schnell umgesetzt wurde, aber die restliche in diesem Zyklus noch im Brennraum vorhandenen Gemischmenge weitere 20 °KW zum entgültigen Durchbrennen benötigte.

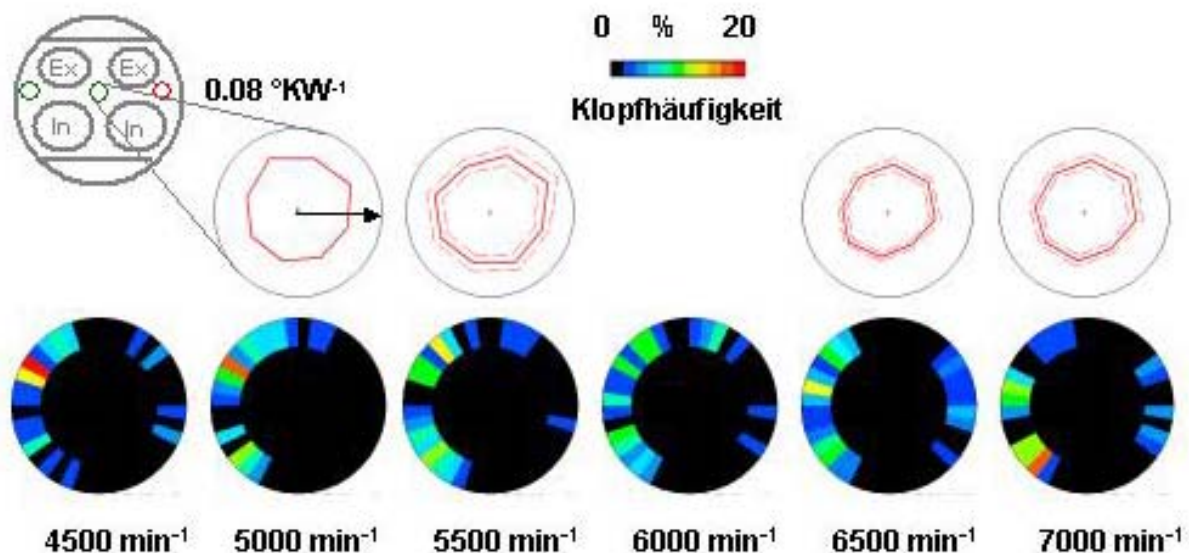


Bild 11: Verteilung der Klopfhäufigkeiten und der Flammenkernausbreitung
Vollast, Einzelzündung, Zylinder 1

Die Flammenkernbildung und die Verteilung der Klopforte in einem Drehzahlbereich von 4500 min^{-1} bis 7000 min^{-1} sind in Bild 11 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass sich der Flammenkern im Vergleich zu Motoren mit stärkeren Tumbleströmungen fast symmetrisch ausbreitete. Die Hauptklopforte befanden sich über den gesamten Drehzahlschnitt zwischen 7 und 11 Uhr. Bei niedrigen Drehzahlen lagen die Hauptklopforte auslassseitig, bei hohen Drehzahlen einlassseitig und im mittleren Drehzahlbereich war die Verteilung zwischen Einlass- und Auslassseite sehr ausgeglichen.

3.2 Doppelzündung

Bild 12 zeigt die Massenumsatzpunkte bei synchroner Zündung der Haupt- und der Nebenkerze.

Die bereits in der Diskussion der Ergebnisse der Messungen mit Einzelzündung getroffenen Aussagen gelten auch für die Doppelzündung mit der Ausnahme, dass der Vorzündungsbedarf bei Doppelzündung um maximal 8 °KW geringer war. Das Zünden beider Zündkerzen zum gleichen Zeitpunkt hatte keinen Einfluss auf die Form der Flammenkernbildung an der zentralen Kerze. Der Flammenkern breitete sich ebenfalls fast symmetrisch mit einer Vorzugsrichtung gegen 2 Uhr aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Flammenkerns war deutlich höher als bei Einzelzündung. Dies wird auf die höheren Zylinderdrücke und den größeren Anteil an turbulenter kinetischer Energie bei späteren Zündwinkeln zurückgeführt.

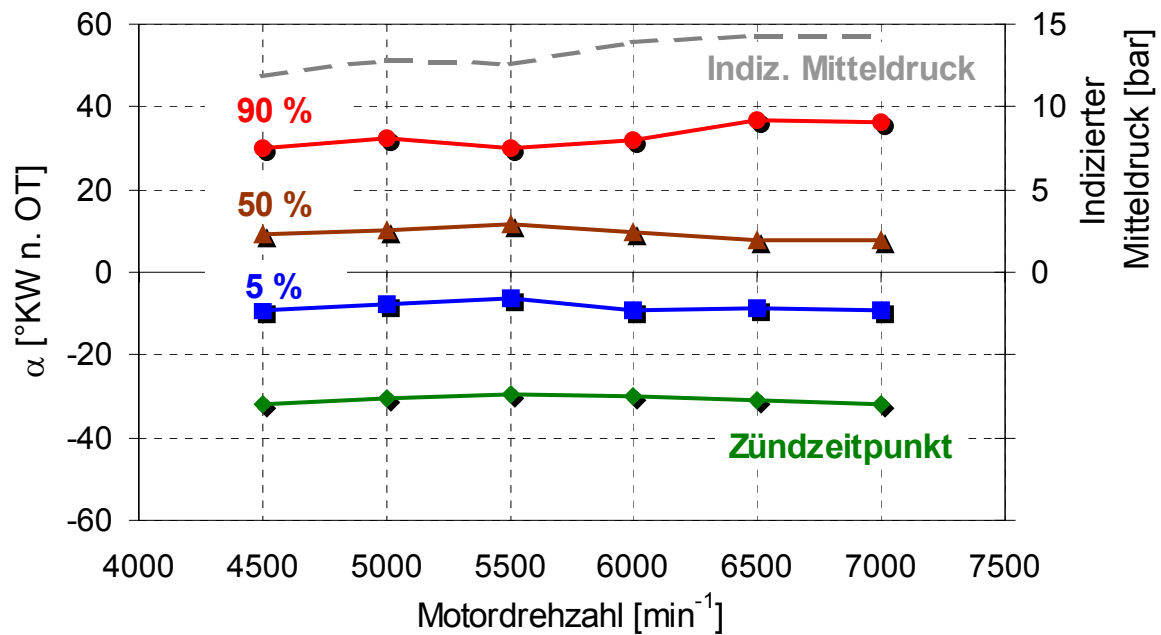


Bild 12: Ergebnisse der Indiziermessung an der Klopfgrenze, Vollast, Doppelzündung, Zylinder 1

Eher unerwartet sind die Ergebnisse der Klopfortverteilung im Brennraum bei Doppelzündung in der Vollast (Bild 13). Die Hauptklopforte lagen nahezu an den gleichen Stellen im Brennraum wie bei Einzelzündung. Ebenso befindet sich der Hauptklopfort bei niedrigen Drehzahlen auslasseeitig, bei hohen Drehzahlen einlasseeitig.

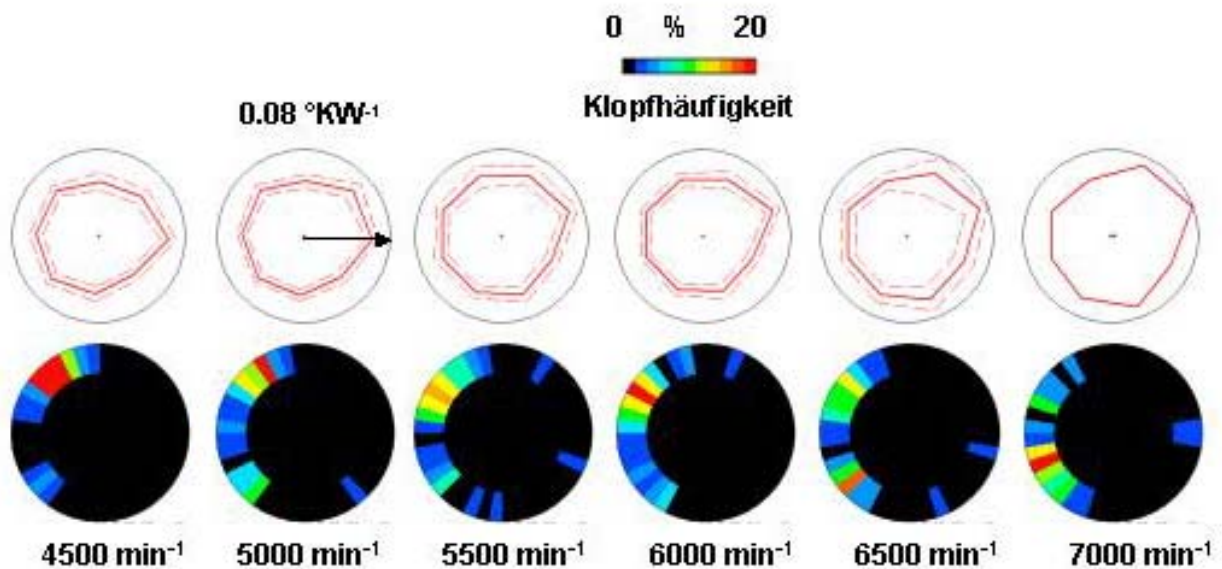


Bild 13: Verteilung der Klopfhäufigkeiten und der Flammenkernausbreitung, Vollast, Doppelzündung, Zylinder 1

3.3 Vergleich der Zündungsvarianten und der Zylinderseiten

Die Ergebnisse der Indiziermessung an der Klopfgrenze beider Zündungsvarianten lässt deutlich erkennen, dass sowohl bei Einzel- als auch bei Doppelzündung der Verbrennungsschwerpunkt in der Vollast über den gezeigten Drehzahlschnitt thermodynamisch optimal bei ca. 8 °KW nach OT lag. Aber damit wurden Verbrennungszyklen mit nicht unerheblichen Druckamplituden toleriert. Für einen sicheren, kloppfreien Motorbetrieb über dessen Lebensdauer müssen die Zündwinkel entsprechend angepasst werden.

Der Zündverzug zwischen den Varianten unterschied sich bis zu 8 °KW. Die indizierten Mitteldrücke differierten nur wenig. Die Brenndauerenden waren bei beiden Zündungsvarianten auffällig spät.

Der Großteil der Klopfereignisse konnte zwischen 7 und 11 Uhr auf der Seite der Nebenkerze lokalisiert werden. Mit zunehmender Drehzahl wanderten die Klopfereignisse zum einem von der Auslassseite zur Einlassseite und zum anderen traten sie vermehrt zwischen 2 und 4 Uhr auf. Bei beiden Zündungsvarianten fanden in der auslassseitigen Quetschfläche Klopfereignisse statt.

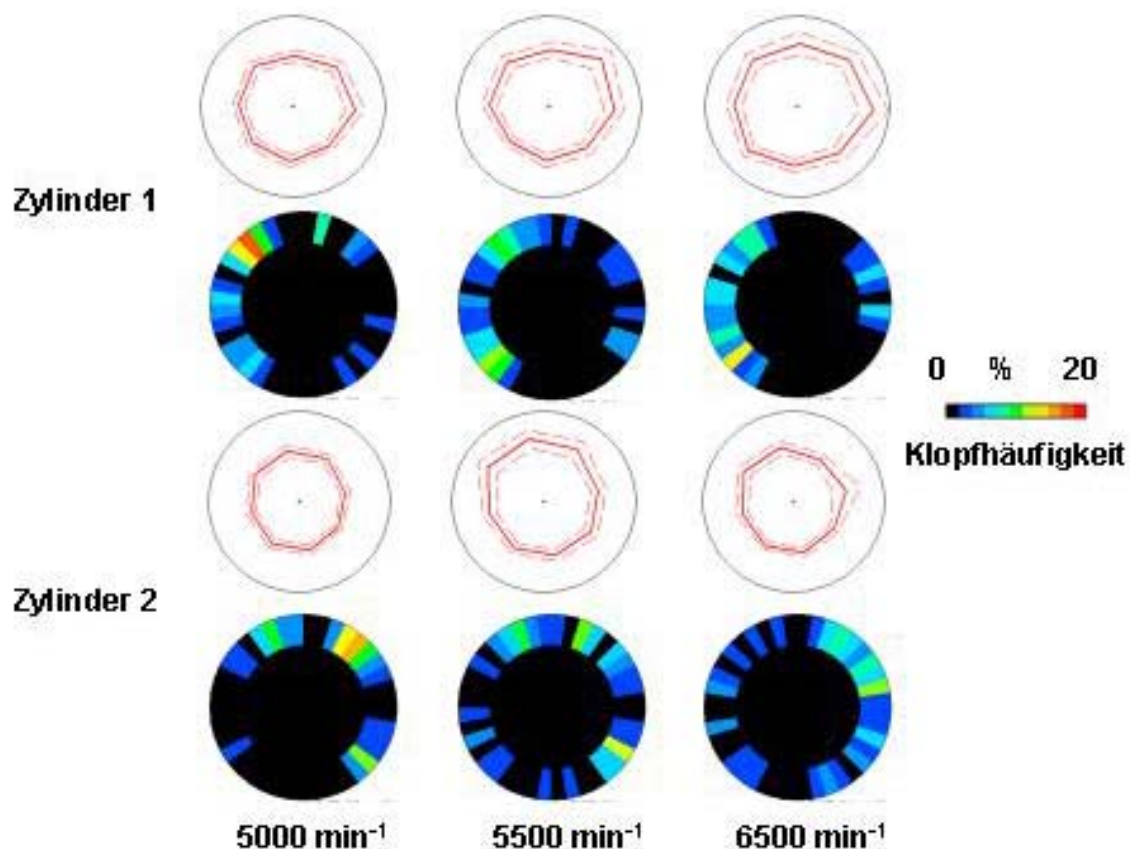


Bild 14: Verteilung der Klopfhäufigkeiten und der Flammenkernausbildung, Vollast, Einzelzündung, Zylinder 1 und 2

Die Ergebnisse des im Zylinderkopf 2 verbauten „Visio Knock“ Sensors und der Druckindizierung zeigten keine signifikanten Unterschiede gegenüber den Messungen am Zylinder 1 (Bild 14). Wieder wurden die Klopforte auf der Seite der zweiten Zündkerze detektiert. Die Verteilung der Klopfhäufigkeit auf der zweiten Zylinderseite war gegenüber Zylinder 1 homogener, die auftretenden Intensitätsmaxima geringer.

3.4 Verschiebung der Klopforte im Brennraum

Die Ergebnisse mit Einzel- und Doppelzündung ergaben, dass eine Verschiebung der Klopforte durch die Zündungsvariante nicht möglich war. Da sich die Verteilung der Klopfhäufigkeit immer auf der Seite der zweiten Zündkerze zwischen 7 und 11 Uhr befand, wurde versucht diese Stelle der Motorunterseite in der Nähe des Steuerkettenschachtes mit Luft einer Temperatur von ca. 5 °C zu kühlen. Der Vergleich der Klopforte zeigt, dass der Einfluss der Bauteiltemperatur auf die Verteilung der Klopforte im Zweizylinder-Boxermotor nicht signifikant war (Bild 15).

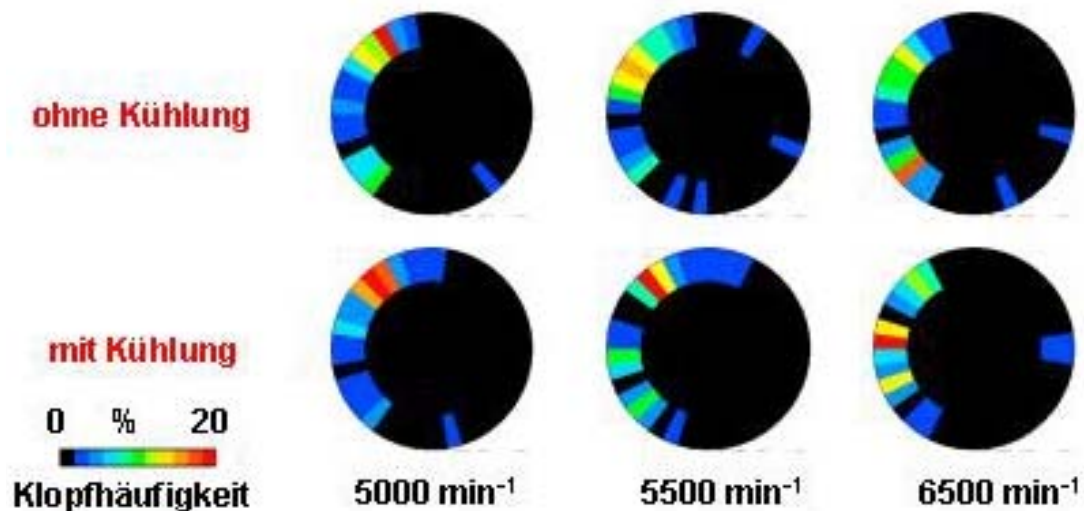


Bild 15: Verteilung der Klopfhäufigkeiten mit und ohne Kühlung der Motorunterseite, Vollast, Doppelzündung, Zylinder 1

Synchrone Doppelzündung:

Der Zündzeitpunkt der Hauptkerze entsprach dem Zündzeitpunkt der Nebenkerze (32.50 °KW v. OT).



Doppelzündung mit variablen Zündabstand:

Der Zündzeitpunkt der Hauptkerze (26.25 °KW v. OT) blieb unverändert.

Der Zündzeitpunkt der Nebenkerze (32.50 °KW v. OT) wurde soweit verändert bis Klopfen auftrat.



Doppelzündung mit konstantem Zündabstand:

Die Differenz zwischen Zündzeitpunkt der Hauptkerze (27.75 °KW v. OT) und dem Zündzeitpunkt der Nebenkerze (33.00 °KW v. OT) blieb konstant.



0 % 20
Klopfhäufigkeit

Bild 16: Verteilung der Klopfhäufigkeiten bei Variation der Zündzeitpunkte von Haupt- und Nebenkerze, Vollast, 5000 min⁻¹, Zylinder 1

Die Versuche, die Klopfzentren durch Variation des Zündwinkels der Haupt- und Nebenkerze zu verschieben, ist in Bild 16 dargestellt. Um den Einfluss der Zündungsstrategie auf das Klopfverhalten zu untersuchen, wurde der Motor mit synchroner Doppelzündung, mit phasenversetzter Zündung mit variablen und konstanten Zündabstand zwischen Haupt- zu Nebenkerze betrieben. Auch wenn die zweite Kerze vor der zentralen Kerze gezündet wurde, änderte sich die Klopfortverteilung nicht signifikant. Nach wie vor lagen die Hauptklopfzentren zum überwiegenden Teil auf der Seite der zweiten Zündkerze.

Zuletzt wurde versucht, die Verteilung der Klopforte durch die Zusammensetzung des Kraftstoff-Luftgemisches zu beeinflussen. Bild 17 beinhaltet die Klopforte im Betriebspunkt „Vollast, Motordrehzahl 5000 min⁻¹“ bei Lambdawerten von 0.8, 0.9 und 1.0. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Variation der Gemischzusammensetzung die Position der Klopforte nur geringfügig beeinflusst, aber eine Veränderung des Lambdawertes sich massiv auf die Klopfempfindlichkeit des Motors auswirken kann. Tendenziell liegt bei leicht unterstöchiometrischen Gemisch der höchste Oktanzahlbedarf vor [2].

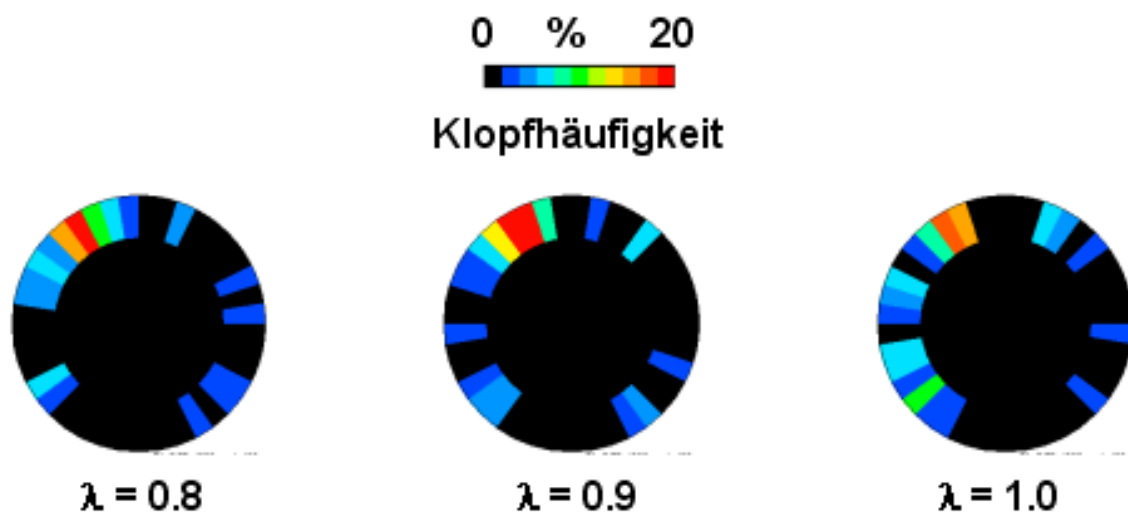


Bild 17: Verteilung der Klopfhäufigkeiten bei Variation des Lambdawertes, Vollast, 5000 min⁻¹, Doppelzündung, Zylinder 1

3.5 Fazit

Mit der Vorgabe, die Klopfzentren im Brennraum eines Zweizylinder-Boxermotordrums zu identifizieren und die Flammenkernausbildung zu untersuchen, können nun folgende Aussagen getroffen werden:

Nahezu unabhängig vom Betriebszustand befanden sich die Klopfzentren bei beiden Zylindern stets am Brennraumrand auf der Motorunterseite. Glühzündungen konnten nicht detektiert werden. Mit ansteigender Motordrehzahl verlagerte sich der Schwerpunkt der Klopfereignisse von der Auslassseite auf die Einlassseite.

Die Verteilung der Klopforte im Brennraum konnte weder durch

- Einzel- oder Doppelzündung,
- Variation des Zündzeitpunktes der Haupt- und/oder der Nebenkerze,
- Kühlung der Motorunterseite
- noch durch Veränderung der Gemischzusammensetzung beeinflusst werden.

Mögliche Ursachen, die dieses unerwartete Verhalten erklären könnten, sind:

- eine zu langsame Flammenkernbildung an und Flammenausbreitung entlang der Brennraumwand im Bereich der Nebenkerze,
- die aufgrund der bekannten schlechteren Wärmeleitung deutlich höheren Bauteiltemperaturen auf der Motorunterseite,
- die Unterschiede in der Gemischladung, die in den Brennraum einströmt und vor allem durch die Asymmetrie des Einlasskanals zustande kommt.

Dies lässt darauf schließen, dass sich erst mit einer Veränderung des Gesamtströmungsfeldes im Brennraum eine Verschiebung der Klopfzentren ergibt. Das Ziel sollte zum einen eine möglichst gleichmäßige Flammenausbreitung sein, um die für das Klopfen notwendigen Vorreaktionszeiten im Endgasbereich so gering wie möglich zu halten, zum anderen ist die homogene Verteilung der Klopfhäufigkeiten über den gesamten Umfang der Brennraumwand anzustreben. Mit der Erhöhung der turbulenten kinetischen Energie kann diese Brennrauminnenströmung verändert werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass durch die einlassseitig generierte Ladungsbewegung unter Umständen auch der maximal mögliche Luftaufwand reduziert werden kann. Somit wirkt die Vergrößerung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit der Steigerung des indizierten Mitteldrucks entgegen. Eine sorgfältige Auslegung der Einlasskanal- und Brennraumgeometrie wird unumgänglich.

Dass zum Zündzeitpunkt keine makroskopischen Strömungsfelder im Kerzenbereich vorlagen, belegte die auf beiden Zylinderseiten nahezu symmetrische Flammenkernbildung an der Hauptkerze. Durch das Ausbilden der Helligkeitsmaxima zum oberen Totpunkt konnte keine Diffusionsverbrennung nachgewiesen werden. Somit waren Brennraumoberflächen nicht von Kraftstoff benetzt, der ein spätes und äußerst unerwünschtes Flammenleuchten verursachen könnte.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Flammenfronten von Haupt- und Nebenkerze bei synchroner Zündung beider Kerzen in Wechselwirkung traten. So wirkte die Entflammungsfläche vergrößernde zweite Zündkerze an der Vollast nicht optimal.

Eine „kleeblattförmigen“ Anordnung der ein- und auslassseitigen Quetschflächen wäre eine mögliche Gestaltung zur Reduktion der Klopfempfindlichkeit des Zweizylinder-Boxermotors. Damit könnte die Verbrennung in die Quetschflächen hinein beschleunigt und die seitlichen Quetschflächen mit einer gleichzeitigen Verbesserung des Durchflusses vergrößert werden.

Bei hochverdichteten Motoren besitzt die Kühlung des Kolbenbodens mit einer entsprechend eventuell drehzahlabhängig angepassten Ölmenge ein zusätzliches Potenzial die Klopfempfindlichkeit auf indirektem Weg durch das Senken des Kolben- und so in weiterer Folge des Brennraumtemperaturniveaus herabzusetzen.

Da die Zündhaken in dem vorgestellten Drehzahlband sehr steil verlaufen, würde mit der Umsetzung dieser Maßnahmen eine Verschiebung der Klopfgrenze Richtung früh von mindestens 3 °KW erwartet werden. Abhängig vom Betriebspunkt und der Zündungsvariante könnte dies einem Leistungs- bzw. Drehmomentzuwachs in der Vollast von 2-4 % bedeuten.

4. Zusammenfassung

Die gestiegenen Forderungen hinsichtlich Verbrauchs- und Emissionsreduktion kombiniert mit den zunehmend höher werdenden Leistungsansprüchen führen dazu, dass moderne Motoren immer näher an die Grenzen der Belastbarkeit stoßen. Verbesserungen des inneren Wirkungsgrades verursachen höhere Brennraumtemperaturen und -drücke.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wird in der Motorenentwicklung seit Jahren Simulationsverfahren eingesetzt, die sehr gut dem besseren Verständnis der innermotorischen Vorgänge dienen. Die komplexen Vorgänge, die vor allem während einer klopfenden Verbrennung auftreten, können heute durch die Simulationsrechnung noch nicht ausreichend mathematisch beschrieben werden. Dies bedeutet, dass auch zukünftig die Analyse der klopfenden Verbrennung hauptsächlich auf experimentellen Weg erfolgen wird.

Für die weitere Entwicklungsphase des Motorradmotors verhalf die vorgestellte Methode, mit der durch die Zündkerze ein verhältnismäßig unkomplizierter optischer Zugang zum Brennraum geschaffen wurde, am Vollmotor zu wesentlichen Erkenntnissen. Neben der Lokalisierung der Klopfzentren unterstützt die Analyse der Entflammungsphase des Kraftstoff-Luftgemisches zusammen mit der Zylinderdruckindizierung die systematische Entwicklung von Brennverfahren.

Die bisher gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass durch eine sorgfältige Optimierung der Einlass- und Brennraumgeometrie eine Verschiebung Klopfzentren ermöglicht werden könnte. Mit einer Veränderung der räumlichen Verteilung und der Umsatzraten des Kraftstoff-Luftgemisches würde die von der Gasströmung im Zylinder und der Kolbenbewegung beeinflusste Flammenausbreitung beider Kerzen verbessert werden. Die Klopfbegrenzung des Motors würde sich reduzieren, indem das langsame Ausbrennen der Endgasregionen vermeiden wird.

Die Anwendung der von der Firma AVL List GmbH angebotenen neuen Visioskopie Messtechnik als Entwicklungswerkzeuge zur Lokalisierung von Klopfzentren und Analyse der Flammenausbreitung an Motorradmotoren zeigt deutlich, wie entscheidend die Gleichmäßigkeit der Klopfverteilung im Brennraum als Kriterium für eine gute Brennraumgestaltung und somit einer maximalen Leistungsausbeute ist. Diese modernen Diagnosewerkzeuge zur Brennverfahrensentwicklung ermöglichen das weitere Ausschöpfen der noch vorhandenen Verbesserungspotenziale am Motorradmotor, machen dieses zwar nicht leichter, aber vor allem systematischer und damit definitiv kostengünstiger.

5. Literatur

- [1] Braunsperger, M.: „Entwicklungstendenzen im Motorradbau aus Sicht von BMW, Entwicklungstendenzen im Motorradbau, Zwickau, 2001.
- [2] Pischinger, F.: „Motorische Verbrennung“, Abschlußbericht Sonderforschungsbereich 224, RWTH Aachen, 2001.
- [3] Schelling, H.; Freier, R.; Geisselbrecht, M.: „Messung verschiedener Einflussgrößen bei klopfender Verbrennung auf die Kolbenbelastung“, Technische Information d. Fa. Mahle GmbH, Stuttgart.
- [4] Münzinger, St.; Hanula, B.; Schnitzler, Th.; Geiser, F.: „Das Phänomen Glühzündung“, MTZ 11, 2002.
- [5] Fischer, M.; Günther, M.; Röpke, K.; Lindemann, M.; Placzek, R.: „Klopferkennung am Ottomotor“, MTZ 3, 2003.
- [6] Winklhofer, E.; Fraidl, G.; Philipp, H.; Kapus, P.: „Praktischer Einsatz optischer Methoden bei der Brennverfahrens- und Emissionsentwicklung von Ottomotoren“, MTZ 3, 1997.
- [7] Winklhofer, E.; Fraidl, G.; Philipp, H.; Kapus, P.: „Optische Indizierverfahren für Otto-DI-Verbrennungssysteme – Aufwand und Nutzen“, MTZ 11, 1998.
- [8] Winklhofer, E.; Beidl, Ch.; Philipp, H.; Piock, W.: „Optische Verbrennungsdiagnostik mit einfach applizierbarer Sensorik“, MTZ 9, 2001.
- [9] Schünemann, E.; Luttermann, Ch.; Klüting, M.: „Einsatz optischer Messtechniken in der Brennverfahrensentwicklung der BMW VALVETRONIC-Motoren“, 5. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden Baden, 2002.
- [10] Winklhofer, E.; Beidl, C.; Philipp, H.; Piock, W.: „Micro-optic sensor techniques for flame diagnostics“, JSAE-Paper 20015301, JSEA Spring Convention, 2001.

Autor/ Author:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Heidelinde Holzer

BMW Motorrad

München

Co-Autor/ Co-Author:

Dr. Ing. Jörg Reissing

BMW Motorrad

München

Co-Autor/ Co-Author:

Dipl.-Ing. Franz-Xaver Biermeier

BMW Motorrad

München

Co-Autor/ Co-Author:

Dipl.-Ing. Wolfgang Nehse

BMW Motorrad

München

Co-Autor/ Co-Author:

Dr. Ing. Markus Braunsperger

BMW Motorrad

München

Co-Autor/ Co-Author:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Philipp

AVL List GmbH

Graz

Co-Autor/ Co-Author:

Erich Kelz

AVL List GmbH

Graz