

Reduzierung der Motor- emissionen durch kontrollierte Selbstzündung im Ottomotor

Die kontrollierte Selbstzündung im Ottomotor stellt eine interessante Möglichkeit zur Reduzierung der Stickoxidemissionen und zur Steigerung des Wirkungsgrads dar. Im Rahmen des FVV-Vorhabens „Benzinselbstzündung“ wurden am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) und am Institut für Technische Thermodynamik (ITT) der Universität Karlsruhe experimentelle und numerische Grundlagenuntersuchungen im Hinblick auf die Umsetzbarkeit dieses Brennverfahrens in Pkw-Motoren durchgeführt.

1 Einleitung

Das Konzept der Benzinselbstzündung in Motoren sieht vor, ein homogenes Luft-Kraftstoffgemisch durch die Verdichtung kontrolliert zur Selbstzündung zu bringen. Die hierzu notwendigen Verdichtungsendtemperaturen werden zum Beispiel durch die Rückhaltung heißer Abgase im Brennraum erreicht. Beim konventionellen Ottomotor wird durch den elektrischen Funken an der Zündkerze eine sphärische Flammenfrontausbreitung in Gang gesetzt, welche zu einem sequenziellen Umsatz des homogenen Luft-Kraftstoffgemisches führt. Da die Flammenfrontverbrennung für ottomotorische Luft-Kraftstoffgemische nur mit einer hohen Flammentemperatur prozesssicher dargestellt werden kann, sind damit hohe NO_x -Emissionen verbunden.

Bei der konventionellen dieselmotorischen Verbrennung führt die Diffusionsverbrennung zu erhöhten Ruß beziehungsweise NO_x -Emissionen. Durch die homogene Kompressionszündung wird eine Kraftstoffumsetzung ohne Flammenfront- und ohne Diffusionsverbrennung möglich. Damit ist eine Reduzierung der Spitztemperatur im Brennraum verbunden, so dass es möglich ist, die NO_x -Bildungstemperaturen zu vermeiden. Durch die homogene Selbstzündung werden sehr kurze Brenndauern und dadurch hohe Wirkungsgrade erreicht [1], [3].

Ausgehend von experimentellen Untersuchungen an einem mit optischen Zugängen ausgestatteten Einzylinderforschungsaggregat wurden thermodynamische und numerische Analysen zum Motorbetrieb mit kontrollierter Selbstzündung durchgeführt. Hierzu wurde ein reduziertes reaktionskinetisches Modell entwickelt und in einen kommerziellen CFD-Code eingebunden, um die räumlichen und zeitlichen Abläufe der Selbstzündung zu beschreiben. Durch die Adaption eines neuen dreidimensionalen Visualisierungssystems wurde eine direkte Erfassung der realen Abläufe im Motor ermöglicht.

2 Versuchsträger und experimentelle Sondermesstechnik

Die technischen Daten des untersuchten Motors, der von einem Motorradmotor abgeleitet wurde, sind in **Tabelle 1** aufgelistet. Der Motor verfügt über nachträglich adaptierte Nockenwellenversteller und eine Benzin-Direkteinspritzung. Die Selbstzündung wird durch symmetrische Ventilunterschneidung erreicht [1]. Die Untersuchungen wurden mit einem Modellkraftstoff durchgeführt, der aus unterschiedlichen Komponenten besteht, so dass die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Super-Benzin wiedergegeben werden.

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchsträgers

Basisaggregat	BMW / Rotax F650 Motorradmotor
Bauart	Einzylinder-Motor, wassergekühlt, Vierventil-Dachbrennraum
Verdichtungsverhältnis	11,5
Hubraum	652 cm ³
Bohrung x Hub	100 mm x 84 mm
Versuchsdrehzahl	2000 min ⁻¹
Gemischbildung	Drallinjektor in seitlicher Lage, Mehrlochinjektor in zentraler Lage
Einspritzdruck	125 bar
maximaler Hub Einlassventile	2 mm
maximaler Hub Auslassventile	1,5 mm
Öffnungsdauer Einlassventile	120°KW
Öffnungsdauer Auslassventile	110°KW
Steuerzeit Einlass schließt	182°KW v. ZOT – 140°KW v. ZOT
Steuerzeit Auslass schließt	272°KW n. ZOT – 324°KW n. ZOT

First published in:

Die Autoren



Dipl.-Ing.
Werner Sauter
 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH)



Dipl.-Ing.
Sebastian Hensel
 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH)



Prof. Dr.-Ing.
Ulrich Spicher
 ist Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH)



Dipl.-Ing.
Alexander Schubert
 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Thermodynamik der Universität Karlsruhe (TH)



Dr.-Ing.
Robert Schießl
 ist Leiter Laserdiagnostische Methoden des Instituts für Technische Thermodynamik der Universität Karlsruhe (TH)



Prof. Dr. rer. nat.
Ulrich Maas
 ist Leiter des Instituts für Technische Thermodynamik der Universität Karlsruhe (TH)

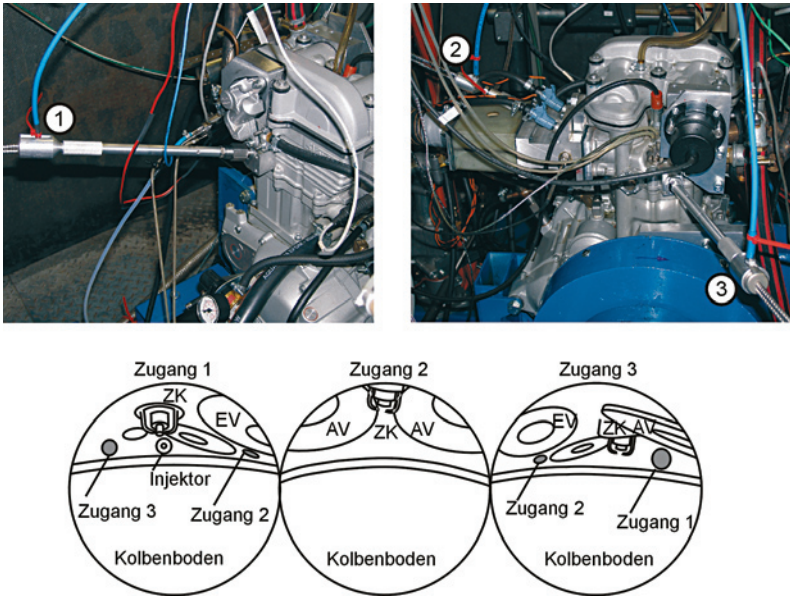


Bild 1: Adaption der drei Lichtleiterendoskope am Versuchsträger und Kameraansichten des Brennraums durch die optischen Zugänge 1 bis 3

Die Adaption des dreidimensionalen Visualisierungssystems [2] wird durch drei Lichtleiterendoskope erreicht. **Bild 1** zeigt die Endoskope am Versuchsträger sowie die Brennraumansichten der drei Endoskope. Die eingesetzten Kamerasysteme besitzen eine sehr hohe Sensitivität im ultravioletten Wellenlängenbereich der Verbrennungsstrahlung. Durch die sehr hohe Aufnahmefrequenz des Messsystems konnten bei einer Motordrehzahl von 2000/min zehn Bilder pro Grad Kurbelwinkel aufgezeichnet werden [5].

3 Reaktionskinetisches Modell zur Beschreibung der Selbstzündung

Der Zeitpunkt der Selbstzündung hängt weder ausschließlich von einer mittleren Temperatur noch von einer globalen Gemischzusammensetzung im Brennraum ab, sondern vielmehr vom lokal vorliegenden thermodynamischen Zustand. Dies verdeutlicht, dass null- und eindimensionale Betrachtungsweisen des Motorprozesses gerade für das hier untersuchte Brennverfahren nur unzureichende Informationen liefern.

Es gibt verschiedene Ansätze für eine realitätsnahe Berechnung der Selbstzündung und Verbrennung in der dreidimensionalen Simulation. Einfache Modelle erfordern keinen hohen Rechenaufwand,

weisen jedoch hinsichtlich ihrer Genauigkeit erhebliche Mängel auf. Mit detaillierten Reaktionsmechanismen können die chemischen Quellterme in Abhängigkeit von Spezieskonzentration, Druck und Temperatur detailliert und zuverlässig berechnet werden. Dieses Verfahren verursacht jedoch einen zu hohen Rechenaufwand. Im Rahmen des Projekts wurde deshalb auf Basis detaillierter Re-

aktionskinetik ein Fortschrittsvariablenmodell entwickelt mit dem Ziel ein realistisches aber Rechenzeit effizientes chemisches Modell für die CFD-Rechnung zur Verfügung zu stellen [6].

Zur Berechnung der zeitlichen Änderung der Fortschrittsvariable ist zunächst die Entwicklung eines detaillierten reaktionskinetischen Mechanismus für den Modellkraftstoff notwendig. Hierzu wurde eine automatisierte Mechanismenentwicklung eingesetzt [4].

Die Kopplung zwischen CFD-Rechnung und dem Fortschrittsvariablenmodell wird mit einer Tabellierungsmethode realisiert. Zur Nutzung des Fortschrittsvariablenmodells in der dreidimensionalen CFD-Rechnung wird die chemische Bildungsgeschwindigkeit der Fortschrittsvariablen als Funktion physikalischer und chemischer Randbedingungen berechnet und tabelliert. Die Fortschrittsvariable nimmt dabei einen Wert zwischen 0 (Frischgemisch vor Einsetzen der Reaktion) und 1 (chemisches Gleichgewicht nach der Verbrennung) an. Für den verwendeten Reaktionsmechanismus wurde die Bogenlänge der Reaktionstrajektorie im Zustandsraum als geeignete Fortschrittsvariable χ identifiziert. Ein Beispiel für eine Reaktionstrajektorie zeigt **Bild 2**. Im CO_2 , CO und CH_2O -Massenbruchunterraum ist hier die Entwicklung der Zündung und Verbrennung dargestellt.

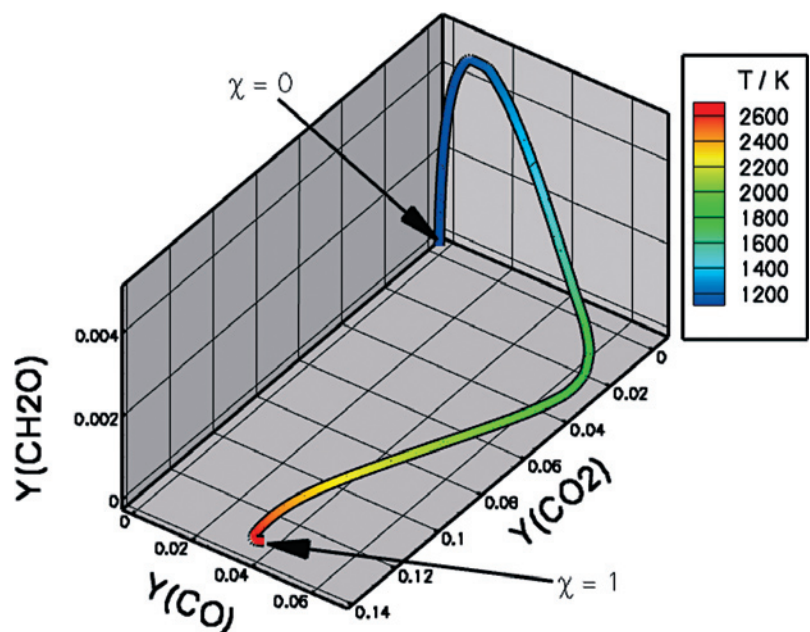


Bild 2: Reaktionstrajektorie im CO_2 , CO und CH_2O Massenbruchunterraum

Zu Beginn der Reaktion ist der Massenbruch für alle drei Spezies null. Kurz vor Einsetzen der Zündung besitzt der CH_2O -Massenbruch ein Maximum und geht anschließend wieder gegen null. Als weiteres Zwischenprodukt bildet sich neben CH_2O auch CO , welches aber im weiteren Verlauf teilweise in CO_2 umgewandelt wird. Der CO_2 -Massenbruch nimmt während der Verbrennung stark zu. Die Einfärbung der Reaktionstrajektorie repräsentiert den Temperaturverlauf während der Verbrennung.

Zur Implementierung des Fortschrittvariablenmodells in den CFD-Code StarCD werden in der CFD-Rechnung zusätzlich die Transportgleichungen für die Fortschrittsvariable χ und für die Massenbrüche verschiedener Spezies (CO_2 , CO , CH_2O , Kraftstoff) gelöst. Aus einer Tabellierung der detaillierten Chemie kann der CFD-Rechnung für vorgegebene Werte von Druck, Luft-Kraftstoffverhältnis, Enthalpie des Gasgemischs und chemischer Fortschrittsvariable die Rate des chemischen Fortschritts und die chemische Zusammensetzung übergeben werden. Eine ausführliche Beschreibung des Verbrennungsmodells findet sich in [6].

4 Phänomenologie der kontrollierten Selbstzündung

Im Rahmen grundlegender Untersuchungen wurden die phänomenologischen Abläufe im Motor bei kontrollierter Selbstzündung untersucht.

4.1 Bevorzugte Zündorte und sequenzielle Selbstzündung

Bild 3 zeigt die Entflammung für zwei ausgewählte Arbeitsspiele. Für beide Arbeitsspiele kann ein Zündort im Zentrum des Brennraums identifiziert werden. Es wird deutlich, dass es nicht zu einer zeitgleichen Kraftstoffumsetzung im gesamten Brennraum kommt, sondern aufgrund der lokalen Gemisch- und Temperaturverteilung bestimmte Bereiche besonders früh und andere Bereiche zeitlich verzögert zünden. Diese bevorzugten Zündorte sind nicht an den Brennraumwänden sondern relativ zentral im Brennraum positioniert. Von den Zündorten ausgehend kann ein sequenzieller Selbstzündungsprozess verfolgt werden, der

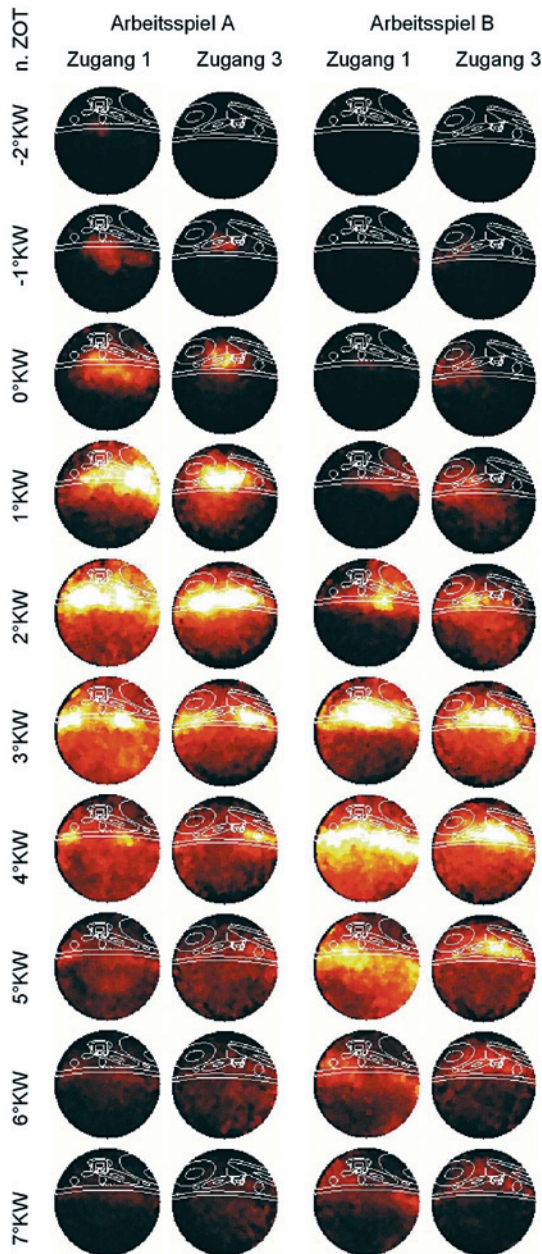


Bild 3: Visualisierung des Verbrennungsverlaufs zweier ausgewählter Arbeitsspiele

unter den Ventilen im Randbereich des Brennraums endet. Von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel kommt es bezüglich der Form und der Lage dieser Zündorte zu sehr hohen zyklischen Schwankungen.

4.2 Einfluss der Zündfunkenunterstützung

In motorischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass in Betriebspunkten mit hohem Restgasanteil durch die Fremdzündung kein Einfluss auf die Verbrennung genommen werden kann, während bei niedrigen Restgasanteilen eine Ausdehnung des Betriebsbereichs erreicht wird

[6]. Zur systematischen Untersuchung der Zündfunkenunterstützung wurden zwei Betriebspunkte gegenübergestellt: Be-

triebspunkt 1 mit hohem Restgasanteil und Betriebspunkt 2 mit niedrigem Restgasanteil, **Tabelle 2**. **Bild 4** zeigt Aufnahmen der Verbrennung ausgewählter Arbeitsspiele für Betriebspunkt 1 und 2. Für beide Betriebspunkte wird zum Zündzeitpunkt der Zündfunke über Zugang 1 deutlich sichtbar, während in den Aufnahmen des Zugangs 3 eine Abschattung durch die Zündkerzenelektrode vorliegt.

In Betriebspunkt 1 setzt die Verbrennung zum Zeitpunkt 4°KW v. ZOT sehr unvermittelt ein und es folgt die für das Brennverfahren typische sehr schnelle Gemischumsetzung. Der Energieeintrag durch die Zündkerze bewirkt keine Veränderung des Verbrennungsablaufs.

Für Betriebspunkt 2 konnte beobachtet werden, dass durch eine Frühverlagerung des Zündfunkens eine Frühverlagerung der Verbrennung erzielt wird [6]. Der Wirkmechanismus zwischen Zündfunkenunterstützung und Frühverlagerung der Verbrennung wird aus den Verbrennungsbildern deutlich. Die Fremdzündung an der Zündkerze bewirkt zunächst eine sich sehr langsam ausbreitende Reaktionsfront, deren Geschwindigkeit im weiteren Verlauf zunimmt bis es zu einer schlagartigen Gemischumsetzung kommt und die erreichte Ausbreitungsgeschwindigkeit auf eine sequenzielle Selbstzündung schließen lässt.

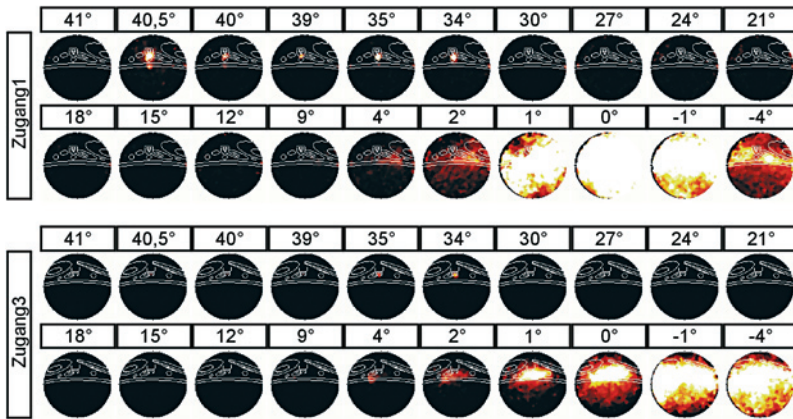
5 Einfluss des Einspritzbeginns

In den motorischen Untersuchungen konnte ein starker Einfluss des Einspritzbeginns auf das Betriebsverhalten festgestellt werden, **Bild 5**. Durch die Variation des Einspritzbeginns kann eine Anpassung des Verbrennungsschwerpunkts und damit auch eine Minimierung der Druckgradienten ($dp/d\alpha$) erreicht werden.

Tabelle 2: Betriebspunkte zur Untersuchung der Zündfunkenunterstützung

Betriebspunkt	1	2
Drehzahl	2000 min ⁻¹	2000 min ⁻¹
Indizierter Mitteldruck	2 bar	3 bar
Restgasanteil	70%	55%
Luft-Kraftstoffverhältnis	1,0	1,0
Zündzeitpunkt Fremdzündung	42°KW v. ZOT	42°KW v. ZOT

Betriebspunkt 1



Betriebspunkt 2

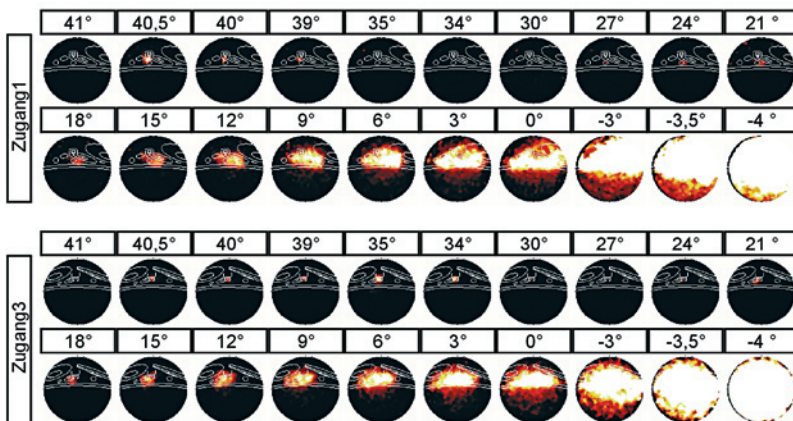


Bild 4: Visualisierung der Verbrennung im Betriebspunkt 1 und 2

Wie in den Untersuchungen herausgearbeitet wurde, kann die Verlagerung des Verbrennungsschwerpunkts hauptsächlich auf einen temperaturgesteuerten Mechanismus zurück geführt werden. Mit der Spätverlagerung des Einspritzbeginns ist eine Zunahme der zugeführten Luftmasse verbunden, Bild 5, so dass es zu einer Gemischabkühlung kommt und dadurch die Selbstzündung später einsetzt.

Durch die Restgasstrategie „Abgasrückhaltung“ kommt es während der Ventilunterschneidung zu einer Zwischenkompression. Bei früher Einspritzung muss berücksichtigt werden, dass das hohe Temperatur- und Druckniveau (1400 K und 15 bar) in der Zwischenkompression zu Vorreaktionen führen kann. Mit Hilfe der optisch erfassten Brennraumstrahlung konnte gezeigt werden, dass durch

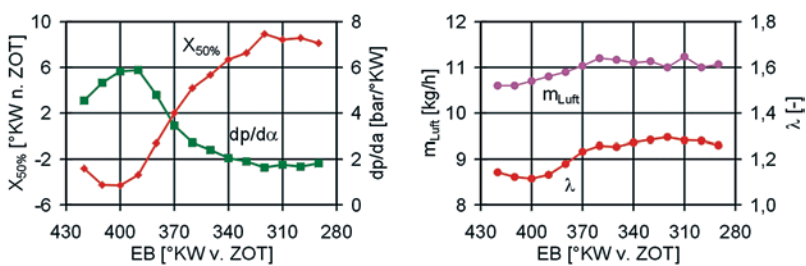


Bild 5: Verlauf des Verbrennungsschwerpunkts ($X_{50\%}$), des maximalen Druckgradienten ($dp/d\alpha$), des zugeführten Luftmassenstroms (m_{Luft}) und des Luft-Kraftstoffverhältnisses (λ) über dem Einspritzbeginn (EB), $p_{mi}=2$ bar

First published in:

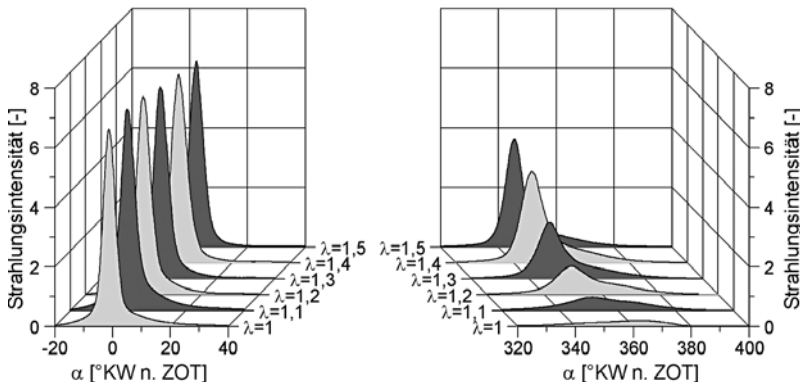


Bild 6: Erfasste Brennraumstrahlung (PMS) während der Hauptverbrennung und während des Ladungswechsels bei Variation des Luft-Kraftstoffverhältnisses (λ)

die Wahl einer geeigneten Betriebsstrategie im Magerbetrieb bei früher Kraftstoffeinspritzung eine geringfügige Kraftstoffumsetzung in der Zwischenkompression erreicht werden kann, **Bild 6**. Hierzu wurde eine Doppelspritzstrategie verfolgt, die eine sehr frühe Piloteinspritzung 450°KW v. ZOT beinhaltet.

Die Spätverlagerung des Einspritzbeginns führt jedoch auch zu einer Verschlechterung der Gemischbildungsgüte. Bei besonders später Einspritzung wurde festgestellt, dass die berechneten Verdichtungsendtemperaturen nicht mehr mit dem Verbrennungsschwerpunkt korrelieren.

Um die Frage zu klären, wie die zum Zündzeitpunkt erreichte Gemischhomogenität Einfluss auf den Ablauf der Selbstzündung nimmt, wurde der räumliche und zeitliche Ablauf der Selbstzündung für drei Zeitpunkte des Einspritzbeginns (EB=380°KW, 320°KW und 260°KW v. ZOT) mit Hilfe der dreidimensionalen Visualisierung und der dreidimensionalen Simulation analysiert. Dabei wurde ein konstantes Luft-

Kraftstoffverhältnis eingestellt ($\lambda=1,15$). Die frühe Einspritzung erfolgt in die Zwischenverdichtung des heißen Abgases. Die mittlere Einspritzung findet am Ende der Zwischenkompression, die späte Einspritzung während der Ansaugphase statt.

Die Gegenüberstellung der Druckverläufe aus dem Motorversuch und der Simulation in **Bild 7** zeigt die sehr gute Abbildungsgenauigkeit, die durch das reaktionskinetische Modell erreicht wird.

In **Bild 8** sind die Restgas-, die Kraftstoff- und die Temperaturverteilung sowie das lokale Luft-Kraftstoffverhältnis bei früher, mittlerer und später Einspritzung unmittelbar vor der Zündung dargestellt. Die Unterschiede in der Restgasverteilung sind gering. Bezüglich der Kraftstoffverteilung führt die frühe und mittlere Einspritzung zu einer gleichmäßigeren Kraftstoffverteilung als die späte Einspritzung. Es kommt zu einem sehr ungleichmäßigen lokalen Luft-Kraftstoffverhältnis bei später Einspritzung mit Zonen stark unterstöchiometrischer und überstöchiometrischer Ge-

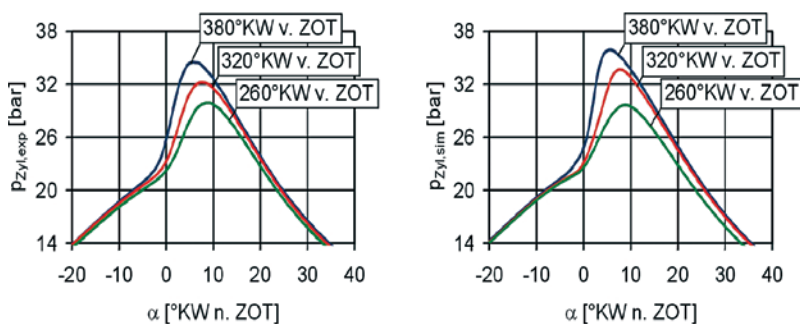


Bild 7: Gegenüberstellung der Druckverläufe aus Experiment ($p_{Zyl,exp}$) und Simulation ($p_{Zyl,sim}$)

mischzusammensetzung. Die Temperaturverteilung im Brennraum zeigt, dass in Bereichen mit geringen Kraftstoff- und hohen Restgasanteilen die höchsten Temperaturen vorliegen. Die größten Temperaturunterschiede stellen sich bei später Einspritzung ein, wobei die kraftstoffreichen Bereiche geringere Temperaturen aufweisen. Bei früher Einspritzung überlagern sich kraftstoff- und restgasreiche Bereiche teilweise oder grenzen aneinander. Dadurch wird insgesamt eine homogenere Temperaturverteilung erzielt.

Aus **Bild 9** wird eine Verlagerung der Zündorte durch die Variation des Einspritzbeginns deutlich. Während bei früher Einspritzung die Zündorte dem Injektor gegenüber liegen, führt die Spätverlagerung des Einspritzbeginns zunehmend zu einer Verlagerung der Zündorte in den zentralen Brennraumbereich. Auch in den Ergebnissen der dreidimensionalen Simulation wird dieser Trend bestätigt, **Bild 10**. Bei frühem Einspritzbeginn bildet sich ein Zündort auf der Brennraumseite des Quetschspalts aus, bei mittlerem Einspritzbeginn liegen zwei Zündorte relativ zentral im Brennraum, bei später Einspritzung liegt der Zündort unterhalb der Einlassventile auf der Seite des Injektors.

Die Gegenüberstellung des Reaktionsfortschritts bei früher, mittlerer und später Einspritzung in **Bild 10** zeigt, dass die relativ homogene Temperatur- und Kraftstoffverteilung bei früher Einspritzung zu einer sehr schnellen Kraftstoffumsetzung führt, während die Inhomogenität bei später Einspritzung zu einer langsameren Gemischumsetzung führt. Die Zündorte liegen in allen Fällen in den Bereichen höchster Temperatur. Bei spätem Einspritzbeginn wird die Verbrennung so stark verlangsamt, dass in besonders mageren und besonders fetten Bereichen kein vollständiger Umsatz erreicht wird.

Die Simulationsrechnungen zur Variation des Einspritzbeginns zeigen, dass durch eine Variation der Kraftstoffverteilung eine Beeinflussung des Verbrennungsablaufs erzielt werden kann. So ist durch die gezielte Kraftstoffschichtung eine Steigerung der Zündstabilität, eine Verlagerung des Zündzeitpunktes und eine Beeinflussung der Brenndauer möglich.

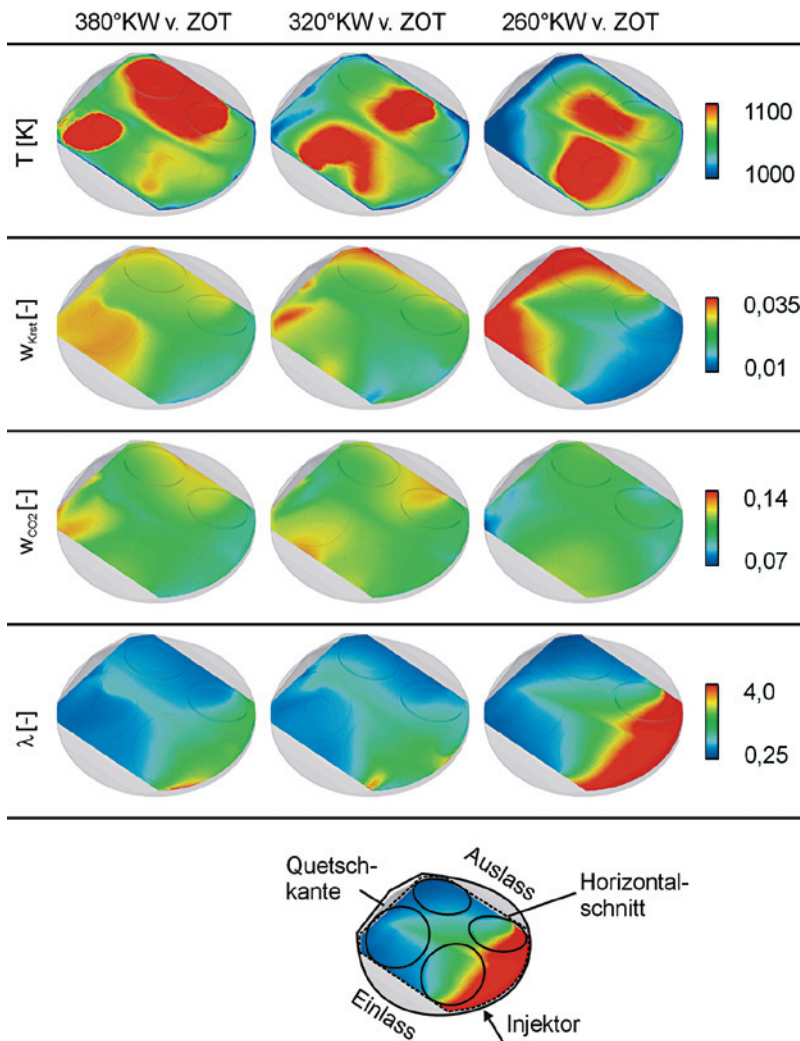


Bild 8: Restgas- (w_{coz}), Kraftstoff- (w_{krst}), Temperaturverteilung (T) und lokales Luft-Kraftstoffverhältnis (λ) vor der Zündung

6 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden in einem kombinierten Vorhaben aus Motorversuch und Simulation die Prozessabläufe der kontrollierten Selbstzündung erforscht. Durch die Entwicklung eines reaktionskinetischen Verbrennungsmodells konnte das motorische Betriebsverhalten anhand dreidimensionaler Simulationsrechnungen analysiert werden. Erstmals gelang eine dreidimensionale Erfassung der Zündorte auf Basis eines endoskopischen Visualisierungssystems. Neben umfangreichen Untersuchungen zum Einfluss der Ventilsteuerzeiten und der direkten Kraftstoffeinspritzung wurden unter anderem auch Untersuchungen zur Zündfunkenunterstützung durchgeführt.

Sowohl über den Einspritzzeitpunkt als auch über die Zündfunkenunterstützung ist eine Beeinflussung des Verbrennungsschwerpunkts möglich. Die Einflussnahme durch den Zündfunken auf den Verbrennungsschwerpunkt und den Kennfeldbereich steigt mit einem Rückgang des Restgasanteils. Mit steigender Last kommt es zu einer Überlagerung aus Flammenfrontverbrennung an der Zündkerze und nachfolgender sequenzieller Selbstzündung. Die Benzindirekteinspritzung stellt ein wichtiges Mittel zur Betriebspunktoptimierung dar, da über den Einspritzbeginn der Verbrennungsschwerpunkt beeinflusst werden kann.

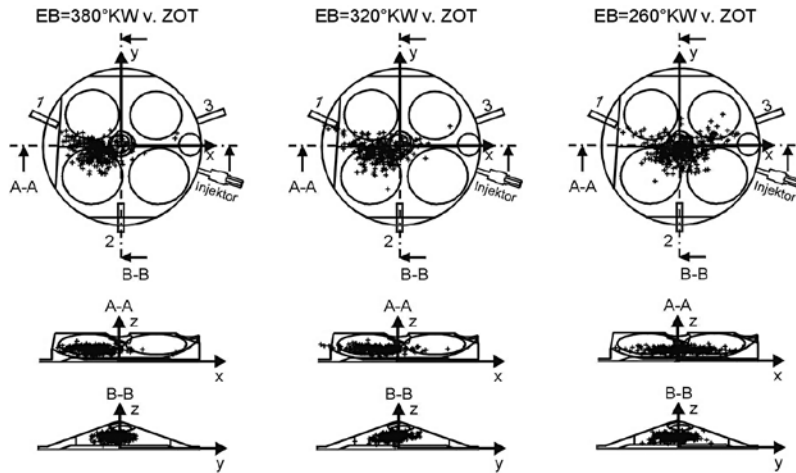


Bild 9: Zündortverteilung bei früher, mittlerer und später Einspritzung aus der experimentellen Messung

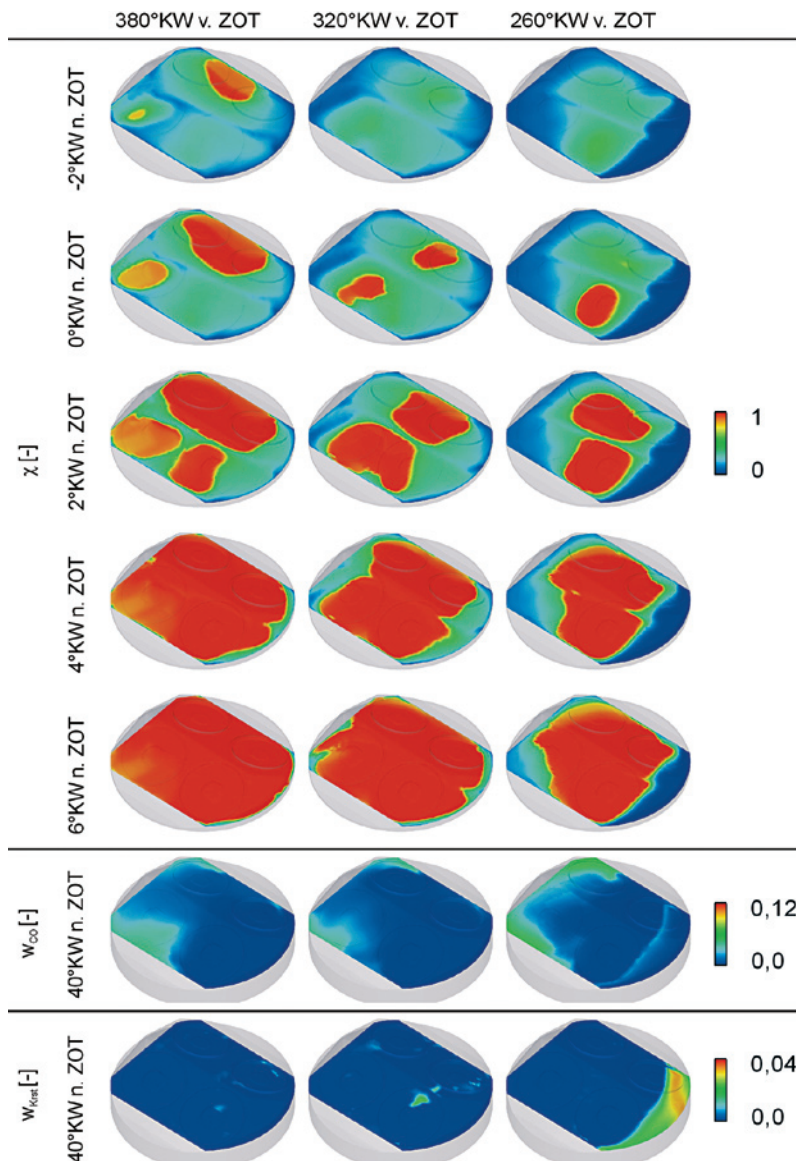


Bild 10: Reaktionsfortschritt bei früher, mittlerer und später Einspritzung; sowie Kohlenmonoxidkonzentration (w_{CO}) und Kraftstoffkonzentration (w_{Krst}) nach der Verbrennung

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) gestellt und am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH) unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. U. Spicher und am Institut für Technische Thermodynamik der Universität Karlsruhe (TH) unter der Leitung von Herrn Professor Dr. rer. nat. U. Maas bearbeitet wurde. Die Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF), (AIF-Nr. 140 Z) finanziell gefördert. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen dankt Professor Dr.-Ing. U. Spicher und Professor Dr. rer. nat. U. Maas sowie den wissenschaftlichen Bearbeitern, Dipl.-Ing. W. Sauter, Dipl.-Ing. S. Hensel und Dipl.-Ing. A. Schubert, für die Durchführung des Vorhabens sowie dem BMWi und der AIF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. M. Berckmüller, BMW AG, begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Literatur

- [1] Günthner, M.: Untersuchung der Eigenschaften und Kontrollmöglichkeiten der homogen kompressionsgezündeten Verbrennung von Ottokraftstoff, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Logos Verlag, 2004
- [2] Han, K.-M.; Velji, A.; Spicher U.: 3D-Lichtleitermesstechnik zur räumlichen Flammenanalyse in Verbrennungsmotoren, 7. Internationales Symposium für Verbrennungsdagnostik, MTZ 68 (2007), Nr. 4
- [3] Kaufmann, M.: Thermodynamische Analyse des kompressionsgezündeten Benzinmotors, Dissertation, Technische Universität Graz, 2005
- [4] Miyoshi, A.: KUCRS software library, 2005.
- [5] Sauter, W.; Nauwerck, A.; Han, K.-M.; Pfeil, J.; Velji, A.; Spicher, U.: High-Speed Visualisation of Combustion in Modern Gasoline Engines, Second International Conference on Optical and Laser Diagnostics (ICOLAD), London, 2005
- [6] Sauter, W.; Hensel, S.; Spicher, U.; Schubert, A.; Maas, U.: Untersuchung der Selbstzündungsmechanismen für einen HCCI-Benzinbetrieb im Hinblick auf NO_x und HC-Rohemissionen unter Berücksichtigung der Kennfeldtauglichkeit, Abschlussbericht FVV-Vorhaben Nr. 831, 2007

Download des Beitrags online unter | Download this article online at
www.all4engineers.de



For an English version of this article, see MTZ Worldwide.

