



Einflüsse von Einspritzung und Zündung auf die Robustheit beim strahlgeführten Brennverfahren mit Piezo-Benzindirekteinspritzung

Martin Hese, Tobias Breuninger, Helmut Tschöke, Jürgen Schmidt, Frank Altenschmidt, Andreas Kufferath

Kurzfassung

Mit der Einführung eines Ottomotors mit strahlgeführtem Brennverfahren konnte die Daimler AG im Jahr 2006 eine für den Kunden spürbare Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitig verbesserter Dynamik realisieren. Die Verbrauchsenkung resultiert dabei überwiegend aus dem geschichteten Betrieb im Teillastbereich. Seitdem wird dieses effiziente Brennverfahren, dessen Hauptmerkmal die Piezo-Benzindirekteinspritzung mit A-Düse ist, kontinuierlich weiterentwickelt, um die Verbrauchsvorteile für nachfolgende Motorgenerationen in möglichst großen Kennfeldbereichen zu nutzen.

Um Potentiale aufzuzeigen werden in dieser Arbeit optische und motorische Untersuchungen vorgestellt und die Einflüsse von Einspritzung und Zündung auf die Entflammung herausgearbeitet. Als Zündsysteme werden neben einem Serien-Transistorspulenzündsystem auch ein parametrierbares Multifunken- sowie ein Powerzündsystem analysiert. Wesentliches Ziel der Untersuchungen ist die Verbesserung der Robustheit des strahlgeführten Brennverfahrens in Bezug auf mögliche Kennfelderweiterungen des geschichteten Betriebs. Darüber hinaus können grundlegende Kenntnisse zukünftig auch auf teilgeschichtete Betriebsarten (Homogen-Schicht HOS / Homogen-Split HSP) oder andere Einspritztechniken (Mehrlochinjektoren) übertragen werden.

1 Einführung und Motivation

Um direkteinspritzende Ottomotoren hinsichtlich ihres Kraftstoffverbrauches unter Berücksichtigung der gesetzlichen Abgasgrenzwerte weiterhin zu verbessern bieten sich neben dem Downsizing besonders magere homogen- sowie überstöchiometrische Schichtbrennverfahren an. Größtmögliche Verbrauchsvorteile sind durch das strahlgeführte Brennverfahren möglich, das durch den entdrosselten Schichtbetrieb (SCH) gekennzeichnet ist und im Teillastbereich Anwendung findet. Hiermit lassen sich auch bei PKW-Motoren mit größerem Hubraum deutliche Verbrauchsvorteile von 10 bis 12 % im NEFZ erzielen [1].

Allerdings sind die Randbedingungen des Gemischbildungsprozesses im Vergleich zum klassischen, stöchiometrisch betriebenen Ottomotor wesentlich komplexer. Ursache hierfür sind die kurzen Gemischbildungszeiten infolge der späten Einspritzung in den Kompressionshub sowie die damit verbundene enge räumliche und zeitliche Zuordnung von Einspritzung und Zündung. Diese ist erforderlich um den Kontakt des Kraftstoffsprays mit den Brennraumwänden sowie dem Kolbenboden weitestgehend zu vermeiden, so dass der Effekt der als Isolationsschicht wirkenden Lufthülle, die für reduzierte Wärmeverluste sorgt, genutzt werden kann. Als weitere Anforderung an



den Gemischbildner sollte der Kontakt der Zündkerzenelektroden mit flüssigem Kraftstoff möglichst vermieden werden, so dass der für eine sichere Entflammung notwendige Zündfunke nicht gelöscht wird bzw. ein lokal zu fettes, zündunfähiges Gemisch vorliegt. Mit einem Piezoinjektor mit außenöffnender Düse werden diese Bedingungen auch in Bezug auf die Reproduzierbarkeit derzeit am besten erfüllt. Ebenfalls für eine robuste Entflammung von inhomogenem Gemisch entscheidend sind neben dem lokalen Luftverhältnis die Strömungsgeschwindigkeiten des Sprays in der Funkenstrecke. Diese sollten idealerweise Werte um 10 m/s aufweisen [2]. Fallen die Geschwindigkeiten zu niedrig aus verbleibt der Funke zwischen den Kerzenelektroden, was im Schichtbetrieb nachteilig in Bezug auf die geometrische Toleranz ist. Sind die Geschwindigkeiten in der Funkenstrecke zu hoch wird der Funke zu schnell aus der Funkenstrecke transportiert, so dass es zu einer Streckung der Flammenfront kommen kann [2], durch die eine Entflammung erschwert oder verhindert wird. Eigene Untersuchungen zeigen, dass eine Entflammung im Schichtbetrieb auch noch bei Geschwindigkeiten um 20 m/s möglich ist [3]. Dennoch kommt der Entflammung und damit dem Zündsystem im Gegensatz zum Homogenbrennverfahren ($\lambda = 1$) besondere Bedeutung zu, da diese deutlich schwierigeren Bedingungen unterliegt:

- lokales Luftverhältnis am Zündort variiert während der Zündung
- Sprayausbildung (Eindringtiefe, Kompaktheit) abhängig von Einspritzzeitpunkt, -menge(n) und Last
- niedrigere Temperaturen am Zündort infolge Verdampfungsenthalpie des spät eingespritzten Kraftstoffes
- sprayinduzierte variable Strömungsgeschwindigkeiten mit steilen Gradienten bis hin zur Richtungsumkehr
- mögliche Flüssigkeitsanteile in der Funkenstrecke / an der Zündkerze
- höherer Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt auch bei niedrigen Lasten aufgrund wirkungsgradsteigernder Entdrosselung
- bei Benetzung der Zündkerzenelektroden oder Betrieb mit AGR Ablagerungen an der Zündkerze

Hinzu kommen geometrische Toleranzen die in der Serienanwendung an Vollmotoren mit vertretbarem Aufwand nicht zu vermeiden sind. Diese haben zur Folge, dass es zu einer zeitlichen Verschiebung des Entflammungsbereiches kommen kann, so dass sich der Anspruch an eine robuste Entflammung nochmals erhöht [4]. Um den Einfluss der zu Verfügung gestellten Zündenergie eines Serien-Transistospulenzündsystems und des Einspritztimings am strahlgeführten Brennverfahren exemplarisch zu erläutern, sind in Bild 1 und 2 die Aussetzerraten bezogen auf 500 am 1. Zylinderaggregat gemessene Zyklen dargestellt. Der Zündzeitpunkt (ZZP) lag konstant bei 21,75 °KW v. ZO; das Einspritzende (ESE) wurde jeweils variiert. Dem Diagramm in Bild 1 ist zu entnehmen, dass es bei Minimierung der Zündenergie nur eine aussetzerfreie Konstellation von Einspritzende (24,5 °KW v. ZOT) und Zündzeitpunkt gibt und eine Erhöhung der Zündenergie (Schließzeit $t_{sz} \uparrow$) mit einer Steigerung der Robustheit einhergeht. Beim Vergleich von Bild 1 und 2 ist ersichtlich, dass eine 3-fach-Einspritzung (ES) bei gleicher Zündenergie eine deutliche Vergrößerung des Zündfensters (aussetzerfreier Bereich) zur Folge hat. Wird hier die



Zündenergie auf ein Minimum reduziert sind zwei Zonen (20,5 bis 21 °KW und 25 bis 25,5 °KW) ersichtlich, in denen keine Entflammungsaussetzer auftreten, deren Ursache die Mehrfacheinspritzung (1. und 2. Einspritzung) ist. Hiermit ist auch der 3. Bereich (31 °KW) zu erklären, bei dem die Aussetzer nochmals abnehmen (3. Einspritzung) bevor diese bei weiterer Frühverschiebung des Einspritzendes endgültig ansteigen.

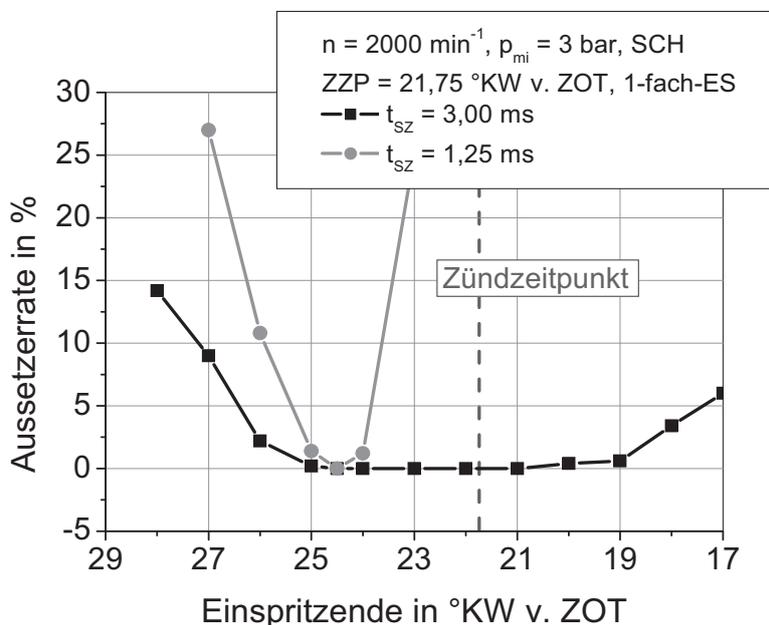


Bild 1: Zündfenster im Schichtbetrieb in Abhängigkeit der Zündenergie (TSZ) bei 1-fach-Einspritzung

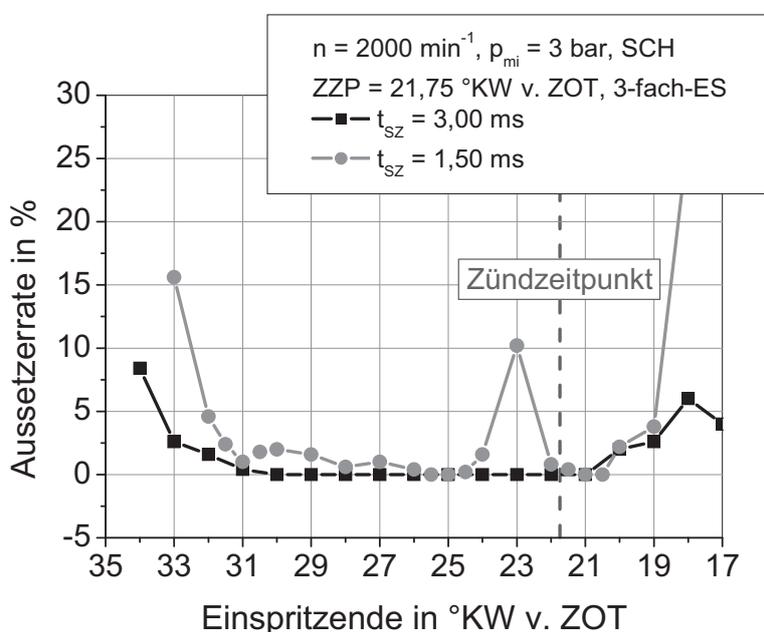


Bild 2: Zündfenster im Schichtbetrieb in Abhängigkeit der Zündenergie (TSZ) bei 3-fach-Einspritzung

2 Versuchsträger und -durchführung

Aus den vorangegangenen Diagrammen wird deutlich, dass neben der Gemisch-aufbereitung die Zündenergie einen entscheidenden Einfluss auf die Entflammung inhomogener Gemische hat. Neben der über den Zündvorgang bereitgestellten Gesamtenergie ist aber auch deren zeitlicher Verlauf bzw. die Leistung des Zündsystems entscheidend. Daher wird in den Untersuchungen ein schnell getaktetes Multifunkenzündsystem (MFZ) eingesetzt, mit dem bei vorhandener Anströmung in der Funkenstrecke, wie in Bild 3 gezeigt, durch gezielt abgestimmte Folgefunkens u. a. die Auslenkung des Zündfunken verändert werden kann [1], [5].

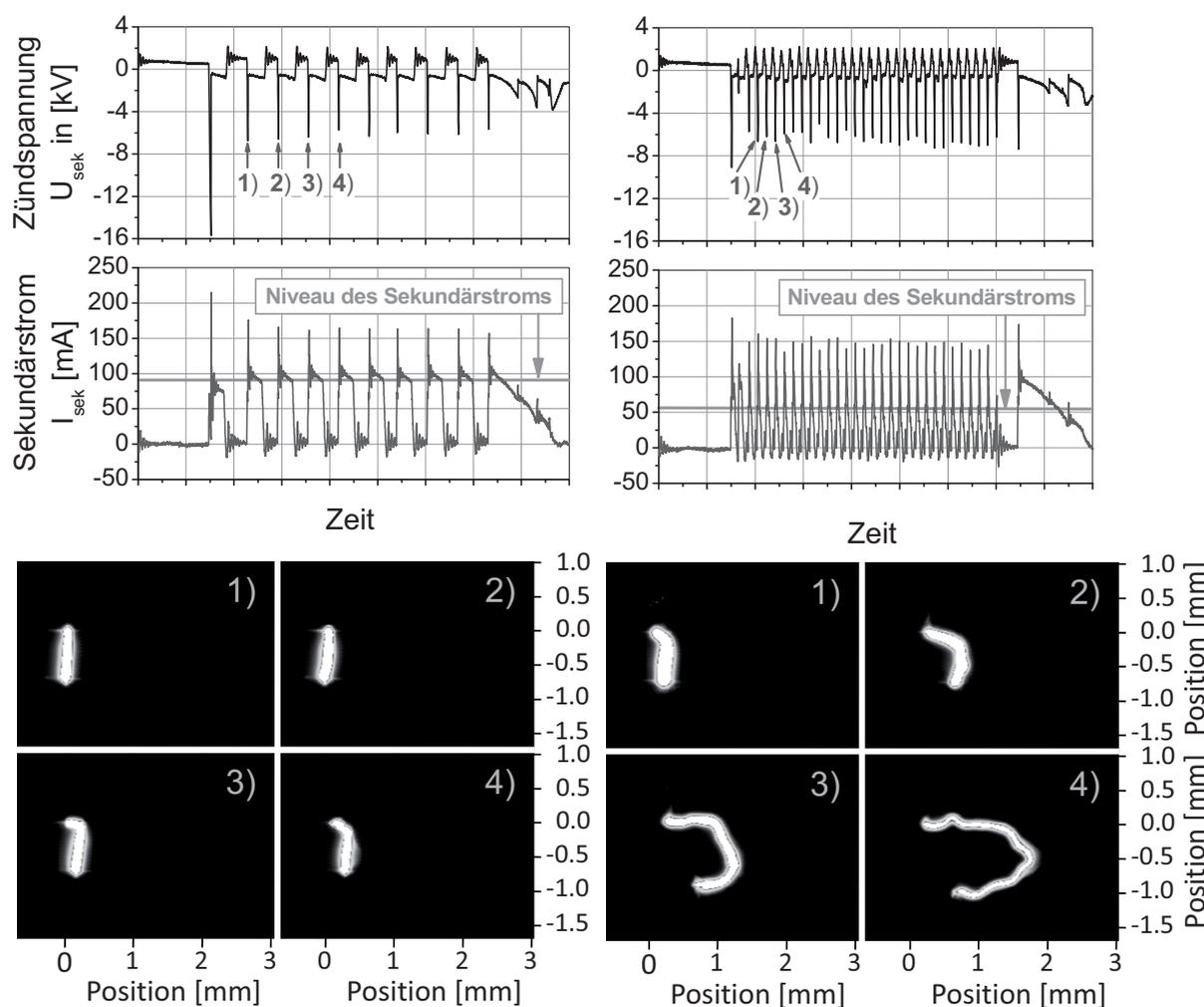


Bild 3: Zündsignale und visualisierter Zündfunken des verwendeten MFZ-Systems für zwei Einstellmöglichkeiten: Zündstrategie 1 (links); Zündstrategie 2 (rechts) [5]

Ein ähnliches System, das ebenfalls die Zündung mittels Mehrfachfunken ermöglicht, wird in [6] beschrieben, kommt hier jedoch nicht zum Einsatz. Weiterhin wird ein Powerzündsystem mit Sekundärstrombegrenzung untersucht, das infolge der hohen maximalen Zündenergie (TSZ Power, ca. 140 mJ) einen Funken mit einer Brenndauer von $t_B \leq 2,4$ ms bereit stellen kann [4]. Entsprechend ist die Brenndauer im Vergleich zum Referenzzündsystem (TSZ, ca. 100 mJ) um etwa 30 % länger.



Zur Analyse der Besonderheiten der Zündsysteme sowie der Einflüsse des Einspritzregimes werden neben Druckkammeruntersuchungen auch motorische Untersuchungen an einem 1-Zylinder-Aggregat auf Basis des Daimler-Motors M 272 DE 35 durchgeführt. An diesem indizierten Versuchsträger werden die verschiedenen Zündsysteme sowie Einspritzszenarien in Bezug auf deren Entflammungswirkung untersucht, wobei auch die Emissionswerte mittels Abgasanalyse erfasst und beurteilt werden. Außerdem werden die Zünd- und Einspritzsignale sowohl durch ein Indiziersystem als auch ein Speicheroszilloskop aufgezeichnet, um die exakte Übertragung der motorischen Randbedingungen auf parallel durchgeführte Druckkammeruntersuchungen zu ermöglichen. Hierbei kommen zwei Druckkammern unterschiedlichen Volumens zum Einsatz. Eine kleine unbeheizte Druckkammer ($V_K = 0,25 \text{ L}$) ermöglicht die grundlegende Zündfunkenanalyse bzw. bei Multifunkenzündung eine Abstimmung des Funkenverlaufes, indem die Funkenstrecke gezielt angeströmt und die Zündkerze in ihrer Lage (Ausrichtung der Elektroden) variiert werden kann.

Die Spraycharakterisierung sowie ergänzende Zündfunkenanalysen erfolgen an einer beheizbaren Druckkammer ($V_K = 10 \text{ L}$). An dieser Druckkammer werden die Einspritzvorgänge durch den Einsatz von High-Speed-Visualisierung aufgezeichnet und charakterisiert. Außerdem wird das Kraftstoffspray mit der Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) untersucht, so dass Tropfendurchmesser und -geschwindigkeiten berührungslos bestimmt werden können. Desweiteren werden an dieser Druckkammer Extinktionsmessungen durchgeführt, um den Flüssigkeitsanteil am Zündort zu quantifizieren und so Aussagen zu dem vorliegenden Luftverhältnis Lambda Kraftstoff flüssig (λ_{Krfli}) zu ermöglichen. Mit λ_{Krfli} wird demzufolge ein Luftverhältnis beschrieben, das sich aus dem am Zündort gemessenen flüssigen Kraftstoff sowie der umgebenden Luft ergibt. Dampfförmige Kraftstoffanteile werden hier nicht gemessen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das reale lokale Verbrennungsluftverhältnis in der Funkenstrecke etwas niedriger ausfällt. Auf die Theorie des speziell für diese Untersuchungen angepassten Extinktionsmessverfahrens sowie der PDA-Messtechnik soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Hierzu wird auf die entsprechenden Literaturstellen verwiesen [7], [8], [9].

Um den Einfluss des Einspritztimings nochmals zu verdeutlichen sind in Bild 4 zwei entscheidende Größen, die den Gemischzustand am Zündort charakterisieren, über dem Einspritzende aufgetragen. Die Messdaten hierzu wurden an der beheizten Druckkammer, in der bis auf die Kammertemperatur ($T_K = 200 \text{ °C}$) vergleichbare Randbedingungen wie im motorischen Brennraum vorlagen, erfasst. Im Ergebnis sind die Verläufe der strahlinduzierten Strömungsgeschwindigkeit (v_{res}) sowie das Luftverhältnis (λ_{Krfli}) zusätzlich zur bereits gezeigten, am Motor ermittelten Aussetzerrate bei kleinstmöglicher Zündenergie in einem Diagramm für eine 1-fach-Einspritzung im Schichtbetrieb aufgetragen. Die Darstellung ermöglicht die Korrelation des Punktes in dem keine Aussetzer auftreten (also ideale Gemischbedingungen vorliegen) mit den gemischbeschreibenden Größen. Folglich kann den Verläufen entnommen werden, dass bei einem Einspritzende von $24,5 \text{ °KW}$ ein Luftverhältnis λ_{Krfli} von 1,25 sowie eine resultierende Strömungsgeschwindigkeit v_{res} von 15 m/s am Zündort vorliegen [7]. In der Darstellung ist zu beachten, dass sich die dargestellten Kurven auf das Einspritzende beziehen und entsprechend über dieser Variation aufgetragen sind. Somit wird aus diesem Kurvenverlauf beschrieben, welches lokale λ_{Krfli} oder welche v_{res} sich am Zündort bei Verschieben des Einspritzendes bezogen auf einen festen Zündzeitpunkt einstellt, in diesem Fall bei $21,75 \text{ °KW}$.

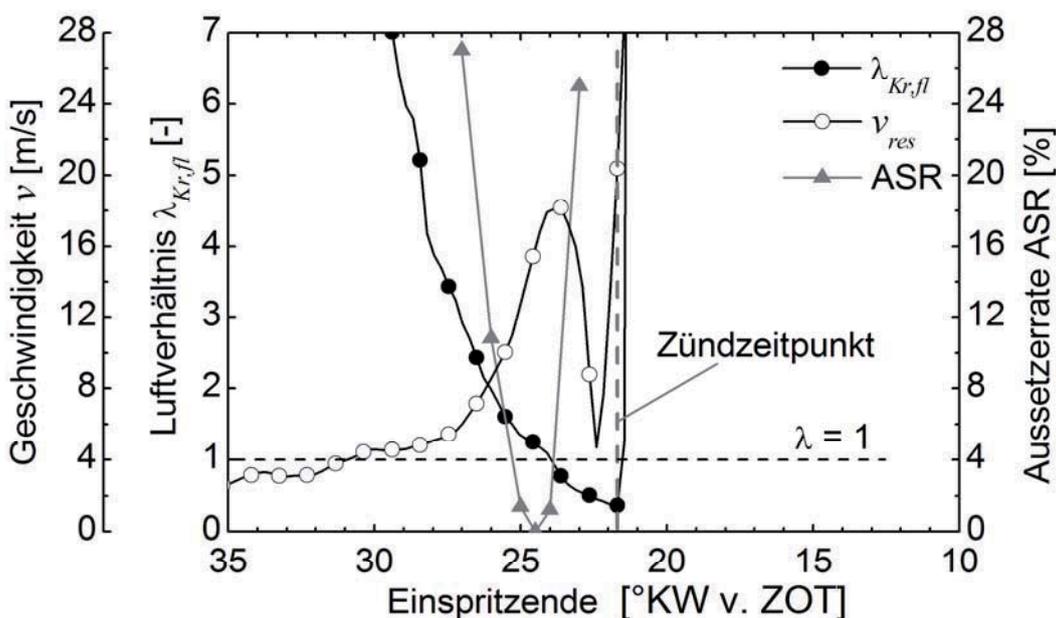


Bild 4: Aussetzerrate und Spraycharakteristika bei 1-fach-Einspritzung für den Betriebspunkt: $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi} = 3 \text{ bar}$, Schichtbetrieb [7]

In [7] wurde außerdem gezeigt, dass sich die Korrelation auch auf die in Bild 2 gezeigten aussetzerfreien Bereiche bei Mehrfacheinspritzung anwenden lässt und sich insbesondere die Ergebnisse des lokalen Luftverhältnisses $\lambda_{Kr,fl}$ gleichen. Hieraus ergab sich die Idee, gezielte Sprayvariationen für einen konstanten Betriebspunkt durchzuführen um möglichst viele entflammungsgünstige Bereiche ($\lambda_{Kr,fl}$ um 1,25) zu kreieren. Ein Teil der hierzu untersuchten Einspritzvariationsmöglichkeiten ist in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Auszug von motorisch und optisch untersuchten Einspritzvariationen

Betriebspunkt $\text{min}^{-1} / \text{bar}$	Einspritzung (ES)	Aufteilung	Variationen am Motor	Ansteuerung Injektor
2000 / 3	1-fach-ES	-	Zündzeitpunkt, Einspritzende, Zündsysteme	
2000 / 3	3-fach-ES	fallende ES-Zeiten	Zündzeitpunkt, Zündsysteme	
2000 / 3	3-fach-ES	gleiche ES-Zeiten	Zündzeitpunkt, Zündsysteme, Pausenzeiten der ES	
2000 / 3	3-fach-ES	steigende ES-Zeiten	Zündzeitpunkt, Zündsysteme	

Weiterhin wurden diese Einspritzvariationen in Bezug auf die Entflammungswirkung der verschiedenen Zündsysteme untersucht. Ziel der Versuche ist eine deutliche Steigerung der Robustheit (Zündfenster) im Schichtbetrieb und diese anhand der optischen Ergebnisse sowie der speziellen Merkmale der Zündsysteme zu belegen.

3 Ergebnisse der optischen Untersuchungen

Im Folgenden werden 3 Varianten vorgestellt, bei denen jeweils das lokale Luftverhältnis λ_{Krf} am Zündort in Abhängigkeit der Einspritzzeiten verglichen wird. In Bild 5 sind zunächst die Verläufe von λ_{Krf} für eine 1-fach- sowie eine 3-fach-Einspritzung über dem Einspritzende aufgetragen. Mit den bisherigen Erkenntnissen des optimalen λ_{Krf} von 1,25 (gestrichelte Linie) lässt sich bereits anhand des Diagrammes abschätzen, dass sich der Zündbereich bei 3-fach-Einspritzung infolge der 1. und 2. Einspritzung vergrößern wird (überdeckter Bereich etwa 7 °KW). Die 3. Einspritzung hat hier jedoch keinen verbessernden Einfluss auf die Vergrößerung eines entflammungsbegünstigenden Bereiches. Zudem lässt sich feststellen, dass die Gradienten bei Mehrfacheinspritzung sowie verringerten Einspritzzeiten in Bezug auf eine Abmagerung (Betrachtung des Einspritzendes Richtung "früh") zunehmen. Die Abmagerung am Zündort vollzieht sich demnach schneller, so dass dieser Nachteil durch das Zündsystem ausgeglichen werden muss.

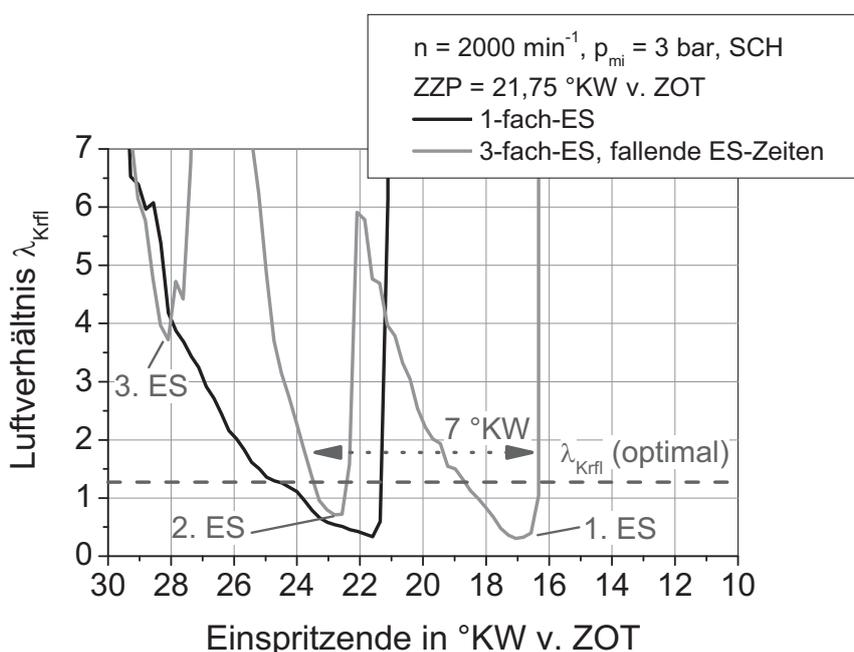


Bild 5: In beheizter Druckkammer ermitteltes lokales Luftverhältnis λ_{Krf} am Zündort für 1-fach- und 3-fach-Einspritzung

Die Ergebnisse für den Vergleich von drei verschiedenen 3-fach-Einspritzszenarien sind in Bild 6 aufgetragen. Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich ein für die Entflammung günstiger, großer Bereich für eine 3-fach-Einspritzung mit gleichen Einspritzzeiten ergibt (durch Einspritzungen überdeckter Bereich ca. 11 °KW). Allerdings dürfen die Pausenzeiten $t_{p 12 / 23}$ zwischen den einzelnen Einspritzungen nicht zu groß



gewählt sein, damit der beschriebene Bereich in ungünstigen, zu fetten oder mageren Zonen durch das Zündsystem bzw. dessen Energie und daran gebundene Funkenbrenndauer überbrückt werden kann. Um diese Variationsmöglichkeit ebenfalls abzudecken wurden in einem weiteren Versuch die Pausenzeiten der sich als günstig herausgestellten 3-fach-Einspritzung bei gleichen Einspritzzeiten variiert. Die Ergebnisse hierzu sind in Bild 7 dargestellt. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die überdeckten Bereiche sich je nach Pausenzeit ändern und Werte von etwa 10, 11 und maximal 13 °KW aufweisen.

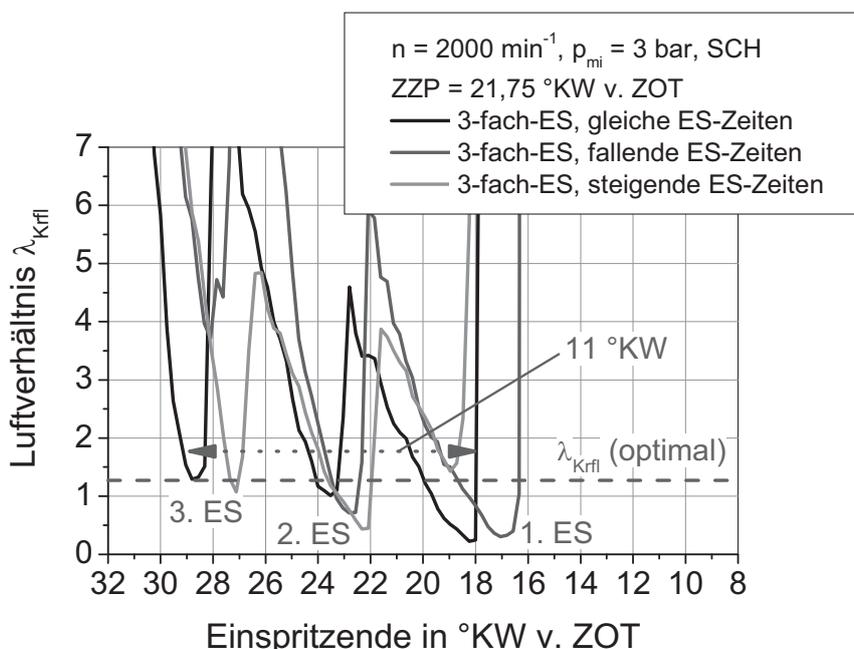


Bild 6: In beheizter Druckkammer ermitteltes lokales Luftverhältnis λ_{Krff} für 3-fach-Einspritzungen (unterschiedliche Aufteilung der Einspritzzeiten)

4 Ergebnisse der motorischen Untersuchungen

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der motorischen Versuche vorgestellt. Zunächst sind in Bild 8 zur Klärung der Einflüsse der Zündsysteme Verläufe für Variationen des Einspritzendes bei konstantem Zündzeitpunkt und in Abhängigkeit der Zündsysteme für eine 1-fach-Einspritzung aufgetragen. Der Zündzeitpunkt wurde in diesem Fall für alle $ZZP = 24$ °KW v. ZOT eingestellt. Das linke Diagramm zeigt die Aussetzerraten, die sich in Abhängigkeit der Zündsysteme und bei Multifunkenzündung in Abhängigkeit der Parametrierung (vgl. auch Bild 3) deutlich unterscheiden. Im rechten Diagramm sind die Kovarianzen des indizierten Mitteldrucks (ohne Aussetzer) für die gleichen Variationen abgebildet. Die Parametrierung des Multifunkenzündsystems, bei der die Folgefunkens in den vorhandenen Plasmakanal entladen werden (Zündstrategie 2), erweist sich offensichtlich als ungünstige Parametrierungsmöglichkeit. Hier wirkt sich die geringe Energie der Folgefunkens, erkennbar an dem niedrigeren Niveau des Sekundärstroms (siehe Bild 3, rechts), ungünstig auf die Entflammung aus. Hingegen weist das Multifunkenzündsystem bei veränderter Parametrierung (Zündstrategie 1) gute Bedingungen hinsichtlich einer robusten Entflammung auf, so dass in diesem Fall

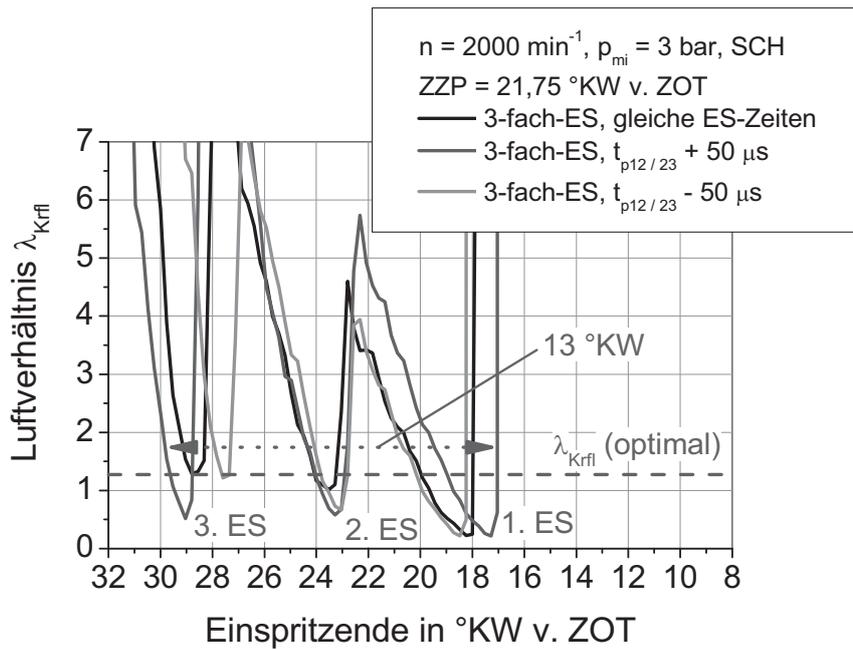


Bild 7: In beheizter Druckkammer ermitteltes lokales Luftverhältnis λ_{Krff} für 3-fach-Einspritzungen gleicher Aufteilung (verschiedene Pausenzeiten)

das größte Zündfenster ermittelt wurde. Bei späten Einspritzzeitpunkten wirkt sich hier die quasi konstante Leistung des Multifunkenzündsystems infolge der getakteten Nachladung der Zündspule positiv auf die Entflammung aus.

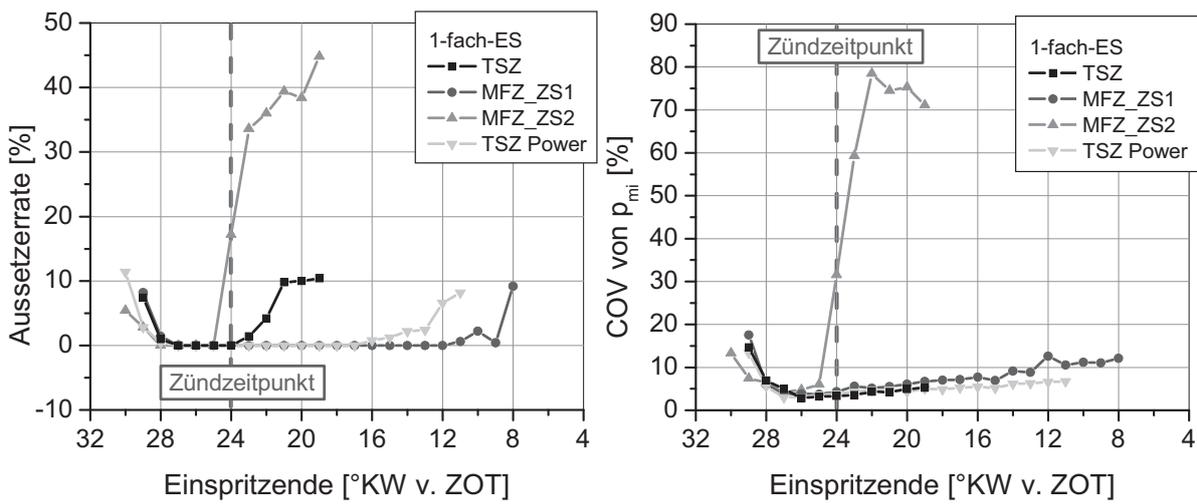


Bild 8: Aussetzerrate und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks (ohne Aussetzer) für den Betriebspunkt $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$, Schichtbetrieb, 3-fach-Einspritzung, gleiche Einspritzzeiten

Ebenfalls positive Effekte auf die Entflammung zeigt das Powerzündsystem, mit dem sich sowohl ein großes Zündfenster als auch niedrige Werte für die Kovarianz ergeben. Mit dem Referenzzündsystem (TSZ) ergibt sich ein schmaleres Zündfenster, was im Vergleich zu den beiden anderen Systemen in der kürzeren Brenndauer des Funkens zu begründen ist. Im nachfolgenden Bild 9 sind wiederum Aussetzerraten und Kovarianzen des indizierten Mitteldruckes aufgetragen. In diesem Fall wurde das Einspritzende bei 24 °KW v. ZOT konstant gehalten und der Zündzeitpunkt nach "früh" und "spät" variiert bis Aussetzer auftraten. Es erfolgte eine 3-fach-Einspritzung mit gleichen Einspritzzeiten und verringerter Pausenzeit wie bereits in den Ergebnissen der optischen Untersuchungen vorgestellt. Wie dem linken Diagramm zu entnehmen ist ergeben sich mit dieser Konstellation mit den entsprechenden Zündsystemen (MFZ_ZS1, TSZ Power) deutlich größere Zündfenster als diese für eine 1-fach-Einspritzung bei einer sonst identischen Variation ermittelt wurden (maximales Zündfenster etwa 14 °KW). Für das Multifunken- und das Powerzündsystem ergeben sich Zündfenster von 24 °KW, wobei die Lagen um 3 °KW zueinander verschoben sind. Dies ist wiederum eine Folge der Leistungscharakteristik des Multifunkenzündsystems, welche sich auch noch gegen Ende des Zündvorganges positiv auf die Entflammung auswirkt, so dass auch noch bei Zündzeitpunkten, die 3 °KW früher liegen, erfolgreich gezündet werden kann. Umgekehrt wirkt sich das Powerzündsystem in der entgegengesetzten Richtung positiv auf die Entflammung aus, was in der nicht unterbrochenen Bereitstellung der Zündenergie zu begründen ist. Folglich kann im Vergleich zum Multifunkenzündsystem mit dem Powerzündsystem bei Verschiebung des Zündzeitpunktes Richtung oberen Totpunkt bis zu 3 °KW später gezündet werden. In diesem Bereich zeigt das Referenzzündsystem (TSZ) ein ähnliches Verhalten. Aufgrund der kürzeren Funkenbrenndauer fällt das Zündfenster dieses Systems insgesamt wieder schmalere aus.

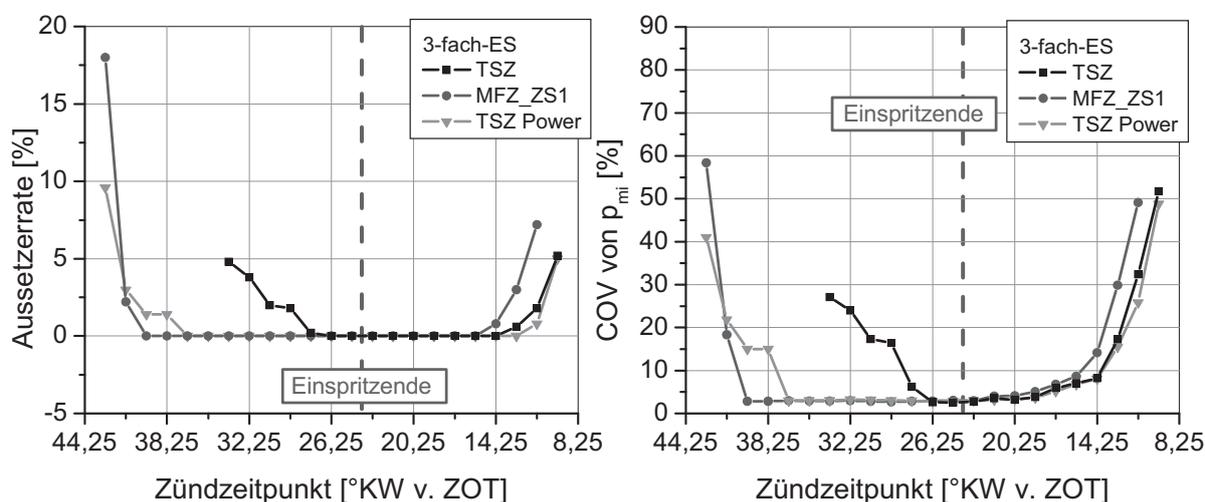


Bild 9: Aussetzerrate und Kovarianz des indizierten Mitteldruckes für den Betriebspunkt $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$, Schichtbetrieb, 3-fach-Einspritzung, gleiche Einspritzzeiten, $t_{p \ 12/23} - 50 \ \mu\text{s}$

In einer weiteren Variation wird der Einfluss der Pausenzeiten zwischen erster und zweiter sowie zweiter und dritter Einspritzung bei 3-fach-Einspritzung erläutert. Dazu sind in Bild 10 die entsprechenden Verläufe aufgetragen. Hier sind die Einspritzzeiten identisch zu denen der vorangegangenen Abbildung, jedoch wurden die Pau-



senzeiten um je $50 \mu\text{s}$ verändert. Als Zündsystem wurde hier das Powerzündsystem eingesetzt. Aus dem linken Diagramm wird der Einfluss der veränderten Pausenzeiten ersichtlich. Eine zunehmende Einspritzpause wirkt sich deutlich verringern auf die Breite des Zündfensters aus, da die Bereiche, in denen das Gemisch nach erfolgter Einspritzung abmagert, zu groß werden und die Funkenenergie diese Phasen nicht mehr ausreichend überbrücken kann. Dieser Effekt wirkt sich insbesondere bei einer Frühverschiebung des Zündzeitpunktes aus. Entsprechend verringert sich das Zündfenster von 24°KW bis auf einen Bereich von 11°KW für die längsten Pausenzeiten.

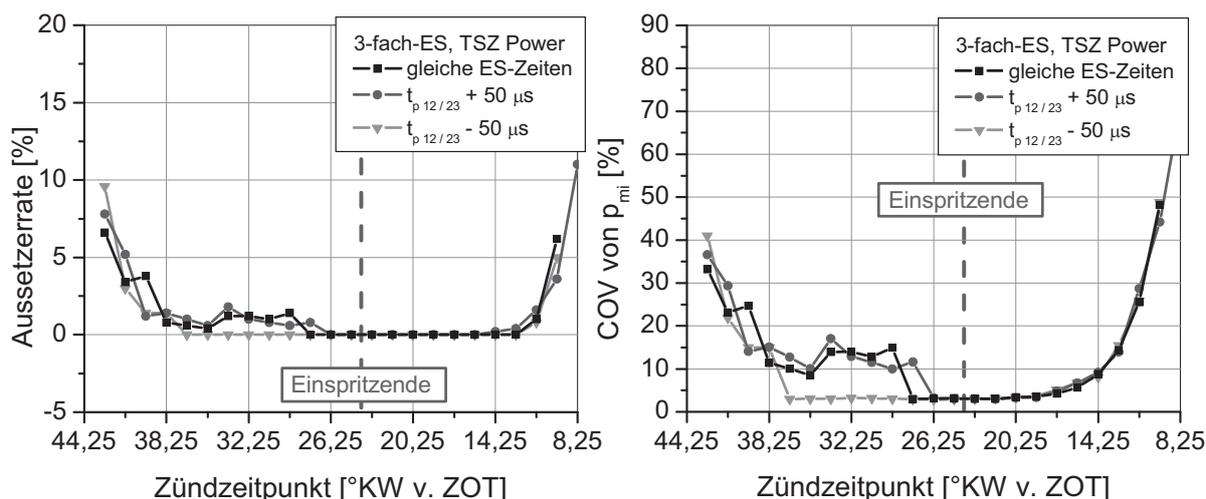


Bild 10: Aussetzerrate und Kovarianz des indizierten Mitteldrucks für den Betriebspunkt $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$, Schichtbetrieb, 3-fach-Einspritzung, gleiche Einspritzzeiten, verschiedene Pausenzeiten $t_{p12/23}$

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde herausgearbeitet, wie sich die Robustheit des strahlgeführten Brennverfahrens durch eine Optimierung der Einspritzung und des Zündsystems verbessern lässt. Das Zündsystem muss hierbei unbedingt angepasst werden, da sich die Vorteile sonst nicht direkt erschließen lassen. Für den vorgestellten Betriebspunkt im Schichtbetrieb von $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ und $p_{mi} = 3 \text{ bar}$ zeigte eine gleichmäßige Aufteilung von 3 Einspritzungen mit geringen Pausenzeiten zwischen den Einspritzereignissen die beste Ergebnisse in den vorgestellten optischen und motorischen Untersuchungen. Gerade die Kombination dieser Untersuchungsmethoden ist sehr gut für das Verständnis der komplexen Vorgänge im Schichtbetrieb geeignet. Schließlich konnte das Zündfenster im gezeigten Betriebspunkt im Hinblick auf eine aussetzerfreie Entflammung im Vergleich zu einem einzelnen Einspritzvorgang fast verdoppelt werden. Allerdings ist bei dieser Optimierung zu beachten, dass diese individuell an den jeweiligen Betriebspunkt und somit an die Einspritzmenge und Drehzahl anzupassen ist, so dass sich die Aufteilung der einzelnen Einspritzereignisse in anderen Betriebspunkten nicht gleichen muss.

Die vorgestellten Zündsysteme weisen deutliches Potential auf. Vorteilhaft an der Powerzündung ist neben der hohen Energiebereitstellung die über den Zündvorgang