

Einfluss der Fokussierung und der Impulsenergie auf die Entflammung bei der Zündung mit einem passiv gütegeschalteten Laser

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Mark Bärwinkel, M.Sc.

aus

Augsburg

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Brüggemann

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Kiefer

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Dezember 2018

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT)

Bayreuth Engine Research Center (BERC)

Universität Bayreuth

2019

1 Einleitung

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 80,2% der Primärenergie durch fossile Energieträger bereitgestellt. Bezieht man die erneuerbaren Energien mit ein, sind 88,6% der Primärenergieträger durch Verbrennungsprozesse in End- und Nutzenergie umgewandelt worden [1]. Diese Tatsache zeigt, dass die Verbrennung immer noch das am häufigsten angewendete Energieumwandlungsverfahren ist.

Eine Verbrennung wird stets durch die Zündung eingeleitet. In vielen Anwendungen ist eine Fehlzündung aufgrund von Sicherheitsaspekten oder der Einhaltung von Emissionsrichtlinien nicht tolerierbar. So stellen beispielsweise die sichere Zündung und sichere Wiederzündung von Helikoptertriebwerken eine Herausforderung dar, da eine schnelle und zuverlässige Entflammung in einem weiten Flughöhenbereich gewährleistet sein muss. Die Kombination aus niedrigen Drücken und Temperaturen sowie einer schlechten Zerstäubung des Kraftstoffes führen in der Luftfahrt zu teuren, komplexen und schweren Zündeinrichtungen [2]. Aber auch bei Verbrennungsmotoren wird die Zündung durch neue Technologien zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduzierung erschwert. Eine starke Abmagerung wird vor allem in Gasmotoren [3–8] aber auch bei direkteinspritzenden Ottomotoren [8] eingesetzt, um die Stickoxidemissionen zu senken und gleichzeitig den thermischen Wirkungsgrad zu erhöhen. Neben einem langsameren Durchbrand führt die Abmagerung zu einer geringeren Leistungsdichte des Motors [5, 7, 9, 10]. Gegen den langsamen Durchbrand wird der Turbulenzgrad im Brennraum erhöht [10, 11], wohingegen die niedrigere Leistungsdichte durch die Aufladung des Motors kompensiert wird [5]. Die aktuellen Trends in der Motorenentwicklung, die Einfluss auf die Zündung nehmen, lassen sich wie folgt zusammenfassen [12]:

- **Downsizing und Aufladung:** Ein erhöhter Druck zum Zündzeitpunkt führt zu einem steigenden Zündspannungsbedarf.
- **Hohe Turbulenzen im Brennraum:** Eine erhöhte Ladungsbewegung im Zylinder erhöht die Diffusionsverluste des Flammenkerns [13], dadurch steigt das Risiko einer Flammenkernauslöschung.
- **Ladungsverdünnung durch Abgasrückführung oder Abmagerung:** Aufgrund der niedrigeren Zündwilligkeit, langsameren Verbrennung und dem Risiko von Fehlzündungen werden höhere Zündenergien und längere Funkendauern nötig.
- **Schichtladung:** Da die Lage des zündfähigen Gemisches räumlich und zeitlich variieren kann, werden längere Funkendauern und höhere Zündenergien benötigt.

Die beschriebenen Maßnahmen erschweren die Zündung und erhöhen den Zündspannungsbedarf von konventionellen Funkenzündkerzen [14]. Infolgedessen korrodieren die Elektroden der Funkenzündkerze deutlich schneller und die Wartungs- und Instandhaltungskosten des Zündsystems steigen [15–17], während gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit sinkt. Die Zündspannung kann jedoch aufgrund der endlichen Festigkeit der keramischen Isolatoren nicht beliebig erhöht werden [14]. Um den Zündspannungsbedarf bei hohen Drücken zu reduzieren, kann zwar der Elektrodenabstand verkleinert werden, allerdings hat dies negative Auswirkungen auf die Verbrennungsstabilität, insbesondere bei starker Verdünnung, wie zum Beispiel bei der Abmagerung oder bei hohen Abgasrückführraten. Alternative Zündsysteme, die eine stabile und robuste Zündung bei starker Abmagerung und hoher Aufladung ermöglichen, sind daher der Wegbereiter für die nächste Generation von Verbrennungsmotoren [14]. Ein zukünftiges Zündsystem muss aus der Sicht von Motorenherstellern die folgenden Anforderungen erfüllen [12]:

- Der **Energieverbrauch** des Zündsystems muss vergleichbar mit dem eines konventionellen Zündsystems sein. Ein etwaiger Mehraufwand muss durch eine erhöhte Motoreffizienz kompensiert werden.
- Das Zündsystem muss auf dem Motor applizierbar sein, das heißt, die **Größe** muss vergleichbar mit einem herkömmlichen Zündsystem sein.
- Die **mechanische Festigkeit** muss auch bei rauen Bedingungen, wie Außentemperaturen von -30 °C bis 50 °C , hoher Feuchtigkeit, lokal hohen Temperaturen oder Vibrationen gewährleistet sein.
- Eine **hohe Lebensdauer** wird erwartet (in der Automobilindustrie mindestens 240.000 km oder 10 Jahre).
- Die **Sicherheitsanforderungen** bei Einbau, Wartung oder Gebrauch müssen minimal sein.
- Die **Kosten** müssen vergleichbar mit dem konventionellen Zündsystem sein oder durch eine bessere Motoreffizienz kompensiert werden.

Ein vielversprechendes alternatives Zündverfahren stellt die laserinduzierte Zündung dar. Bei diesem Zündverfahren wird ein Laserimpuls in den Brennraum fokussiert. Durch die freie Wahl des Zündorts kann die Verbrennung wandfern initiiert und Wandwärmeverluste minimiert werden. Außerdem handelt es sich um ein elektrodenloses Verfahren,

wodurch eine Beeinflussung der Strömung verhindert wird. Zusätzlich kann durch eine räumliche Mehrfachzündung der Durchbrand beschleunigt werden. Die Laserzündung wird in zahlreichen Anwendungen als Kandidat für ein zukünftiges Zündsystem gehandelt. Die potentiellen Anwendungen reichen von der Zündung von Raketentriebwerken in der Raumfahrt [18, 19], Turbinenantrieben in der Luftfahrt [20] bis hin zur Zündung von Staustrahltriebwerken [21, 22] oder stationären Gasturbinen [23, 24]. Aber auch Untersuchungen in Großgasmotoren [7, 25, 26] und kleineren Verbrennungsmotoren [27–34] zeigen die Vorteile der Laserzündung gegenüber der konventionellen Zündung auf.

Passiv gütegeschaltete Laserzündsysteme bieten das Potential auch die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen zu erfüllen. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob und wie durch die Variation der Impulsenergie und der Fokussierung des Laserimpulses eines passiv gütegeschalteten Lasers der Zünd- und Verbrennungsablauf optimiert werden kann. Die systematische Analyse der Einflüsse dieser Parameter auf den laserinduzierten Zündverlauf stehen dabei im Vordergrund.

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Entwicklungsstand von Laserzündsystemen erörtert. Des Weiteren wird auf den Laserzündprozess näher eingegangen und bisherige Untersuchungen zum Einfluss der Impulsenergie und Fokussierung auf den Zündprozess vorgestellt. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 wissenschaftliche Fragestellungen abgeleitet und der Aufbau der Arbeit erläutert.

2 Stand der Forschung und Entwicklung

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Stand der Forschung und Entwicklung der laserinduzierten Zündung gegeben. Zunächst wird kurz auf die Geschichte der Laserzündung und auf die Entwicklung von Laserzündkerzen eingegangen. Nachdem die Vorteile der Laserzündung erläutert wurden, wird der Zündverlauf nach einer laserinduzierten Zündung näher betrachtet. Abschließend werden bisherige Erkenntnisse zum Einfluss der Fokussierung und der Impulsenergie auf die Laserzündung zusammengefasst.

2.1 Geschichte der Laserzündung

Die hier aufgeführten Meilensteine in der Erforschung der Laserzündung haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Für einen detaillierten Überblick wird auf die Arbeit von Pavel et al. [35] verwiesen.

Vom ersten laserinduzierten Durchbruch in Luft wurde 1963 von Maker et al. [36] berichtet. Dieser Durchbruch wird im Allgemeinen als „Urknall der Laserzündung“ betrachtet. Lee und Knystautas [37] haben 1969 chemisch reaktive Gasgemische in einer Brennkammer mit einem passiv gütegeschalteten Rubin-Laser gezündet. Die minimale Zündenergie (Minimum Ignition Energy, MIE) wurde mit 1,2 J angegeben. Weinberg und Wilson [38] haben ebenso einen Rubin-Laser genutzt, um ein stöchiometrisches Methan/Luft-Gemisch in einer Brennkammer zu zünden. Der Vergleich mit einer konventionellen elektrischen Funkenzündung lieferte eine kürzere Standzeit und ein kleineres Volumen des laserinduzierten Plasmas. Dies resultierte in einer geringeren MIE und einem geringeren Löschabstand. Über die laserinduzierte Zündung von verschiedenen Alkanen, Indol und Diesel haben Hickling und Smith [39] von General Motors im Jahr 1974 berichtet. Die Laserzündung wird in dieser Arbeit aufgrund der niedrigen Effizienz und der hohen Kosten als nicht zweckmäßig betrachtet. Allerdings wird der Vorteil des elektrodenfreien Lasers und die freie Wahl des Zündortes im Brennraum hervorgehoben.

Der erste Betrieb eines Verbrennungsmotors durch laserinduzierte Plasmen wurde von Dale et al. [40] im Jahr 1978 gezeigt. Ein gepulster CO₂-Laser mit einer Impulsenergie von 300 mJ wurde in den Brennraum eines Einzylindermotors fokussiert. Durch den Einsatz der Laserzündung konnte im Vergleich zur konventionellen Zündung der Spitzendruck und die Motorleistung erhöht und gleichzeitig der Verbrauch reduziert wer-

den. Die CO- und HC-Emissionen befanden sich dabei auf dem gleichen Niveau, wobei sich die NO_x-Emissionen erhöht haben. Des Weiteren konnte die Magergrenze erweitert und die Motorleistung erhöht werden, indem der Fokuspunkt weiter von der Brennraumwand entfernt wurde. Ma et al. [41] berichteten nach der Laserzündung in einem Einzylinder-Forschungsmotors von einer Senkung der Brenndauer um 4 – 6 ms im Vergleich zur Zündung mit einer konventionellen Zündkerze. Ein Ottomotor mit Direkteinspritzung wurde von Liedl et al. [42] im Jahr 2004 sowohl durch einen gütegeschalteten Nd:YAG-Laser als auch durch einen Excimer-Laser gezündet. Als Hauptvorteil wird die nahezu freie Wahl des Zündortes im Brennraum genannt. Es wurde von einer deutlichen Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemissionen berichtet. Zudem wird der Selbstreinigungseffekt des optischen Zugangs durch den Laserimpuls hervorgehoben. Nachdem Dodd et al. [43] im Jahr 2007 einen Zylinder eines 4-Zylinder-Motors erfolgreich durch einen Laser gezündet hatten, präsentierte die selbe Gruppe im darauffolgenden Jahr zum erstmalig einen 4-Zylinder-Motor, der ausschließlich durch Laserimpulse gezündet wurde [31]. Die Gruppe berichtet von geringeren zyklischen Schwankungen und von einer erweiterten Magergrenze im Vergleich zur konventionellen Zündung.

Ein vollständiger Überblick über die Forschung an der Laserzündung kann aufgrund der Fülle an Arbeiten nicht gegeben werden. Eine grundlegende Übersicht zur Laserzündung bieten die Artikel von Ronney [44], Bradley [45], Tauer et al. [8], Morsy [3] sowie Dearden und Shenton [46]. Es wird der Bedarf an kompakten und robusten Lasern aufgezeigt, die unter widrigen Bedingungen zuverlässig arbeiten und eine vergleichbare Größe wie konventionelle Zündsysteme besitzen.

2.2 Fortschritt in der Entwicklung von Laserzündkerzen

Für den kommerziellen Erfolg muss ein Laserzündsystem spezifische Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen unter anderem Stromverbrauch, Robustheit gegen Temperaturschwankungen und Vibrationen, Platzbedarf sowie Produktionskosten [42]. Bei der motorischen Anwendung können z. B. Temperaturschwankungen zwischen $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftreten. Zudem ist die Leistungsaufnahme in einem Personenkraftwagen (PKW) auf etwa 100 W begrenzt [42]. Die genannten Anforderungen können von passiv gütegeschalteten Festkörperlasern (PQL) erfüllt werden [42, 46, 47]. Im Folgenden wird der Fortschritt in der Entwicklung von Laserzündkerzen basierend auf PQL kurz zusammengefasst.

Ein Konzept für eine derartige Laserzündkerze (LZK) ist von Weinrotter et al. [48] im Jahr 2005 beschrieben worden. Es wird vorgeschlagen jeweils einen Zündlaser pro Zylinder einzusetzen, wobei alle Laser von einer zentralen Quelle über Glasfaseroptiken gepumpt werden. Zur Bereitstellung von kurzen Laserimpulsen soll ein passiver Güteschalter herangezogen werden, um hohe Spannungen der elektro-optischen Güteschalter zu vermeiden. Im Jahr 2007 ist von Kofler et al. [49] ein Laser nach dem oben beschriebenen Prinzip vorgestellt worden. Als aktives Medium dient ein Festkörper-Nd:YAG-Kristall, der durch den sättigbaren Absorber Cr^{4+} :YAG passiv gütegeschaltet wird. Die Anregung des aktiven Mediums erfolgt longitudinal durch einen fasergekoppelten Diodenlaser bei einer Wellenlänge von 808 nm. Der aus einzelnen Elementen aufgebaute Laser erreicht Impulsenergien von 6 mJ bei einer Impulsbreite (Full Width at Half Maximum, FWHM) von weniger als 1,5 ns. Es wird allerdings hervorgehoben, dass für eine robuste LZK eine monolithische Bauform unabdingbar ist.

Parallel zu den Untersuchungen an der TU Wien wurde von einer Gruppe in Japan um Prof. Takunori Taira an PQL geforscht. Die Gruppe hat im Jahr 2008 aufbauend auf Vorarbeiten [50, 51] einen der ersten Mikrochip PQL vorgestellt [52]. Der longitudinal gepumpte Laser emittiert Impulse mit einer Energie von 3 mJ und einer FWHM von 1,2 ns bei einer Frequenz von 12 Hz. Die weitere Erforschung der Mikrochip-Laser – auch die Entwicklung von räumlichen Mehrfunkenzündsystem – wird von der Gruppe stetig vorangetrieben, was durch die Vielzahl an Publikationen [53–60] ersichtlich ist.

Eine LZK mit einem alternativen Pumpkonzept ist im Jahr 2009 von Kroupa et al. [17] präsentiert worden. Die Wissenschaftler der Carinthian Tech Research AG entwickelten einen kompakten seitlich gepumpten Nd:YAG/ Cr^{4+} :YAG PQL mit einer Impulsenergie von 25 mJ und einer Impulsbreite von 3 ns bei einer Pumpfrequenz von bis zu 150 Hz. Als Pumplaser kommen auch hier Diodenlaser zum Einsatz. Seit der ersten Präsentation wird die LZK stetig weiterentwickelt [18, 61, 62]. Durch eine zusätzliche Verstärkerstufe kann inzwischen in Labortests eine Impulsenergie von bis zu 70 mJ und integriert in einem Prototypen bis zu 55 mJ erreicht werden [18].

Die Robert Bosch GmbH entwickelte seit dem Jahr 2000 intensiv LZK [63, 64]. Zwei Pumpkonzepte wurden detailliert untersucht. Zum einen das Pumpen mit Hilfe eines Diodenlasers und einer Glasfaser, zum anderen mit Hilfe eines Oberflächenemitters (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) und einer Linse. Es wird berichtet, dass die LZK Impulsenergien von bis zu 10 mJ erreichen.

Umfangreiche Untersuchungen und Entwicklungen zu PQL werden auch von einer Gruppe des INFLPR in Magurele, Rumänien, vorangetrieben [28, 65–69]. Die weitrei-