

1 Einleitung und Motivation

Das Pariser Klimaabkommen, der Nachfolger des Kyoto-Protokolls, in dem sich die Vertragsparteien dazu verpflichten, durch zahlreiche Maßnahmen die durchschnittliche Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, trat im November 2016 in Kraft [1–4]. In Bezug auf technische Anwendungen geht es um die Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen und die Entwicklung von nachhaltigen Technologien für die Zukunft. Diese Vorgaben werden in nationalen Gesetzgebungen umgesetzt [1]. In Deutschland ist daraus der Klimaschutzplan 2050 entstanden [5]. Das Bestreben im Verkehrssektor geht dabei eindeutig in Richtung Elektromobilität. Dies wird von den steigenden Zulassungszahlen von Personenkraftwagen mit elektrischem Antrieb bestätigt [6]. Elektro- und Plug-In-Hybrid-Personenkraftwagen stellten einen Anteil von 13,6 % aller PKW-Neuzulassungen im Jahr 2020. Dieser ist auf 31,4 % im Jahr 2022 gestiegen [7]. Trotz des zunehmenden Ersatzes des Verbrennungsmotors durch den E-Motor wird es allerdings auch in Zukunft Bereiche geben, in denen der Verbrennungsmotor weiterhin eine wichtige Rolle spielt. Dies gilt beispielsweise für den Heavy-Duty-Transportsektor und für den Energiesektor.

Die dezentrale Bereitstellung von Strom und Wärme in Form von Kraft-Wärme-Koppelung-Anlagen für einzelne Häuser, Mehrfamilienhäuser, ganze Wohnblocks oder industrielle Anwendungen und Freizeitangebote wie zum Beispiel Schwimmbäder gewinnt dabei an Bedeutung, um den Gesamtwirkungsgrad, die Flexibilität und die Unabhängigkeit der Bereitstellung zu erhöhen [8,9]. Diese dezentrale Bereitstellung erfolgt häufig durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken, die wiederum zu einem großen Teil auf Verbrennungsmotoren basieren und regionale Energieengpässe der erneuerbaren Energien ausgleichen können. Insbesondere der Einsatz von Großgasmotoren, die Erdgas oder Biogas als Brennstoff nutzen, ist hier relevant [10]. In jüngerer Vergangenheit werden zudem die Forschung, der Ausbau und der Einsatz von regenerativ gewonnenem Wasserstoff stark forciert [11–13]. Die Anforderungen an Motoren sind in den vergangenen Jahren stetig gestiegen.

Zum einen gilt es, den Verbrauch kontinuierlich zu senken und die Effizienz zu steigern, zum anderen muss die erlaubte Emissionsmenge der Schadstoffe weiter reduziert werden. Um die ausgegebenen Ziele zu erreichen, bedarf es in dieser Hinsicht daher einer umfassenden Weiterentwicklung der weiterhin eingesetzten Verbrennungsmotoren [14]. Die Abgasgrenzwerte sind in Bezug auf genehmigungspflichtige BHKW in der Verwaltungsvorschrift der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) und in den

Verordnungen zur europäischen Abgasnorm geregelt [15,16]. Zu den Schadstoffen zählen sowohl treibhausaktive Bestandteile wie Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Methan (CH_4), als auch weitere Schadstoffe wie Stickstoff-Oxide (NO_x), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) [17,18]. Um deren Ausstoß zu reduzieren, wird an verschiedenen Punkten im Motor angesetzt. Das Downsizing, die Reduzierung des Hubraums zugunsten aufgeladener Motoren, ist eine der Maßnahmen [19,20]. Seit den 80er Jahren wird der 3-Wege-Katalysator für die Abgasnachbehandlung eingesetzt [21]. Problematisch ist jedoch das Kaltstartverhalten, da die Effektivität des Katalysators hier stark reduziert ist [19,22]. Unter anderem deshalb ist es vorteilhaft, früher anzusetzen und die Entstehung der Emissionen zu reduzieren. Der Einsatz des Magerbetriebs bietet großes Potenzial bei der Verbesserung des Wirkungsgrades und bei der Reduzierung von Emissionen. Zum einen wird durch die größere benötigte Luftmasse der Teillastbetrieb verbessert, da bei einer starken Abmagerung und einer damit verbundenen größeren benötigten Luftmasse die Notwendigkeit zur Drosselung im Teillastbetrieb verringert wird. Somit können die Drosselverluste signifikant reduziert werden [19,23]. Zum anderen sorgt die große Luftmasse für eine niedrigere Verbrennungstemperatur [24]. Der überwiegende Anteil der NO_x -Emissionen wird bei der Verbrennung durch hohe Temperaturen gebildet, das thermische NO_x [25]. Durch die Absenkung dieser Temperatur können der Ausstoß des thermischen NO_x und die Wärmeverluste deutlich verringert werden [26–33]. Allerdings nimmt auch die Verbrennungsgeschwindigkeit aufgrund einer verringerten Flammengeschwindigkeit bei einem mageren Gemisch ab. Dies führt zu einer instabileren Verbrennung, die sich durch erhöhte Zyklusschwankungen zeigt [26,28,34–38]. So stellten Yang et al. [34] bei einer Abmagerung vom Kraftstoff-Luft-Verhältnis $\lambda = 1,4$ auf $\lambda = 1,6$ einen Anstieg der Zyklusschwankungen in Form des Variationskoeffizienten oder Coefficient of Variation des indizierten Mitteldrucks (COV_{IMEP}) fest. Dieser stieg teils um mehr als das 3-fache an.

Um diesem Nachteil entgegen zu wirken und die Verbrennungsgeschwindigkeit zu erhöhen, bietet sich die Direkteinblasung an, die außerdem das Potential aufweist, den Kraftstoffverbrauch und die Emission von CO_2 sowie NO_x zu senken [39–42]. So stellten Kalam et al. [39] durch den Einsatz von Direkteinblasung im Vergleich zur Saugrohreinsaugung Verbesserungen fest. Der Ausstoß von NO_x wurde um bis zu 42 % verringert und der Verbrauch um 0,28 % reduziert. Bei einer späten Einbringung des Kraftstoffs zum Zündzeitpunkt kann ein geschichtetes Gemisch erzeugt werden. Dabei fällt das global auf die Luftmasse im gesamten Brennraumvolumen bezogene Kraftstoff-Luft-Verhältnis extrem mager aus. Am Zündort ermöglicht eine höhere Kraftstoffkonzentration die Zün-

dung dieser extrem mageren Gemische [43–47]. Gong et al. [32] haben durch den Einsatz eines geschichteten Gemisches die Magergrenze bei Methanol-Luft-Gemischen auf ein Kraftstoff-Luft-Verhältnis von bis zu $\lambda = 4$ erweitert. Allerdings liegen in diesem inhomogenen Gemisch auch Herausforderungen, da gleichzeitig die Gefahr für einen Anstieg der Emissionen von Partikeln zunimmt, die in Bereichen mit einer unvollständigen Verbrennung entstehen [32,42,48].

Durch die Auswahl des Kraftstoffs kann Einfluss auf die Partikelemissionen genommen werden. Studien haben gezeigt, dass der Einsatz von Methan als Hauptbestandteil von Erdgas und Biogas oder als ein mögliches Produkt von Power-To-Gas-Anwendungen den Ausstoß von Partikeln reduzieren kann [49–51]. Zusätzlich bietet die Strukturformel von Methan, CH_4 , den Vorteil eines günstigen C/H-Verhältnisses, wodurch im Vergleich zu Benzin und Diesel der Ausstoß von CO_2 verringert werden kann [52]. Als Gas weist Methan jedoch eine im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen deutlich niedrigere volumetrische Energiedichte auf. Um keine Leistungseinbußen hinnehmen zu müssen, kann der Motor als Ausgleich stärker aufgeladen werden. Steigerungen des effektiven Mitteldrucks und des Kompressionsverhältnisses, unterstützt durch die hohe Oktanzahl von Methan, führen außerdem zu einer Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades des Motors [32,53–57]. So wurde in den Untersuchungen von Gong et al. [32] durch das Anheben des Kompressionsverhältnisses von $\epsilon = 14$ auf $\epsilon = 16$ bei Methanol-Luft-Gemischen der indizierte thermische Wirkungsgrad um 17,5 % erhöht.

Die elektrische Funkenzündkerze benötigt bei steigendem Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt allerdings deutlich höhere Spannungen an der sekundären Spule, um einen Zündfunken für eine erfolgreiche Zündung bereit zu stellen [58,59]. Die höheren Spannungen führen zu einem deutlich stärkeren Verschleiß an den Elektroden der Zündkerze und damit zu einer reduzierten Lebensdauer. In den Untersuchungen von Herdin et al. [60] wurde durch einen Anstieg des Mitteldrucks von 17 auf 22 bar eine Verkürzung der Lebensdauer der eingesetzten Zündkerze um bis 50 % nachgewiesen. Somit erhöhen sich die Wartungskosten und es bietet sich an, alternative Zündquellen in Betracht zu ziehen. Neben Zündkonzepten mit Doppelspulen [61], Nanosekunden-Entladung [62], mikrowellen-assistierter Zündung [63,64], Koronazündung [65,66], Hochfrequenzzündung [67] und Zündung mittels Radiofrequenz [68] stellt die Laserzündung eine vielversprechende Möglichkeit dar. Im Gegensatz zur elektrischen Funkenzündkerze ist ein hoher Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt bei laserbasierten Zündsystemen von Vorteil, da dies den optischen Durchbruch und damit die Plasmabildung begünstigt. Die höhere Teilchendichte bei höherem Druck sorgt für eine bessere Absorption der Laserenergie. Dies hat zur Folge, dass für ein laserbasiertes Zündsystem mit einem steigendem Zylinderdruck die

minimal benötigte Zündenergie abnimmt [33,58,69–72]. Kopecek et al. [73] stellten bei der Verbrennung von Methan-Luft-Gemischen und einer Zunahme des Drucks zum Zündzeitpunkt von 20 bar auf 40 bar eine um 20 % reduzierte minimale Zündenergie fest. Darüber hinaus bieten Laserzündsysteme weitere Vorteile, die vor allem auf der Abwesenheit von Elektroden und auf den Eigenheiten des Energieübertrags bei laserinduzierten Plasmen basieren. Im folgenden Kapitel 2 zum Stand der Technik werden diese Aspekte genauer erläutert.

Untersuchungen in der Literatur haben bereits Vorteile der laserbasierten Zündsysteme bei der Verbrennung aufgezeigt. Die Experimente fokussierten sich jedoch hauptsächlich auf Brennkammern mit konstantem Volumen und hatten zwar teilweise die Untersuchungen der einzelnen Aspekte zum Inhalt, nicht jedoch die Kombination aus dem Kraftstoff Methan, der direkten Einbringung des Kraftstoffs mit einer geschichteten Ladung, stark abgemagerten Gemischen und laserbasierten Zündsystemen mit Impulsketten unter motorähnlichen Bedingungen mit der Möglichkeit, Kompressionshübe mit einzubeziehen. Wegen der oben genannten Vorteile werden die einzelnen Aspekte im Rahmen dieser Arbeit kombiniert und zwei laserbasierte Zündsysteme mit einer konventionellen elektrischen Funkenzündkerze in einer schnellen Kompressionsmaschine oder Rapid Compression Machine (RCM) verglichen. Kern der Untersuchungen ist der Vergleich zwischen den laserbasierten Zündsystemen und dem elektrischen Zündsystem. Direkt eingeblassenes Methan wird unter Ausbildung einer teilgeschichteten Ladung durch Impulsketten von ein, zwei und drei einzelnen konsekutiven Pulsen gezündet und der Verbrennungsverlauf analysiert. Die Werte der untersuchten Kraftstoff-Luft-Gemische $\lambda = 2,9$, $\lambda = 3,1$ und $\lambda = 3,3$ beziehen sich dabei auf das theoretische Verhältnis, das sich bei einer homogenen Verteilung des Kraftstoffs über den gesamten Brennraum ergeben würde.

Auf den folgenden Seiten wird zunächst der Stand der Technik und Forschung in Bezug auf die einzelnen Aspekte der Untersuchungen und insbesondere die Laserzündung und deren Entwicklung dargestellt. Anschließend werden die wissenschaftlichen Fragestellungen und die Zielsetzung der Arbeit erläutert. Darauf folgt die Vorstellung des Versuchsaufbaus und anschließend die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse, die in einer Zusammenfassung und einen Ausblick münden.

2 Stand der Technik der Laserzündung

In diesem Kapitel wird zunächst die allgemeine Funktionsweise eines Lasers dargestellt. Anschließend wird auf die Vorteile der Laserzündung detailliert eingegangen, der Ablauf des laserbasierten Zündprozesses erläutert und bereits durchgeführte Forschung im Bereich der Laserzündung vorgestellt.

2.1 Aufbau eines Zündlasers

Das Akronym „Laser“ steht für „light amplification by stimulated emission of radiation“ und beschreibt bereits die grundsätzliche Wirkungsweise eines Lasers. Es existieren zahlreiche Typen von Lasern, die sich unter anderem durch die Wellenlänge der ausgesendeten Strahlung unterscheiden. Kern eines jeden Lasers ist das Lasermaterial oder aktive Medium, in dem die Emission von Photonen stattfindet. Das Material kann dabei sehr unterschiedlich ausgestaltet sein und in Form von Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern vorliegen.

Durch Energieeintrag in das Lasermaterial, das im Falle der hier eingesetzten Festkörperlaser aus mit Neodym-Ionen dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Kristallen (Nd:YAG) besteht, werden die Elektronen dort auf ein höheres Energieniveau angehoben. Beim Übergang der Elektronen zurück auf das Ursprungsniveau geben sie die eingebrachte Energie wieder ab. Ein Teil dieser Energie wird in Form von Licht oder Photonen abgestrahlt. Diese abgestrahlten Photonen stellen die Laserstrahlung dar, die für eine Anwendung zur Verfügung steht. In der Abbildung 1 sind die Energieübergänge der Elektronen anhand eines 4-Niveau-Modells eines Lasers dargestellt. Damit aus einem Laser Licht ausgekoppelt werden kann, muss eine Besetzungsinversion vorliegen, es müssen sich mehr Elektronen auf dem höheren Energieniveau befinden als auf dem niedrigeren. Außerdem muss die Aufenthaltsdauer im oberen Niveau ausreichend groß sein, damit die Verstärkung des Lichts wirken kann [74,75]. Für das Einbringen der Energie in den Laser, das so genannte „Pumpen“, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Beim optischen Pumpen wird die Energie durch Licht in den Kristall eingebracht. Das optische Pumpen kann mit einer Blitzlichtlampe erfolgen, die ihr Licht direkt auf das Lasermaterial abgibt. Eine weitere, robuste Möglichkeit bieten Diodenlaser wie die hier eingesetzte Version mit der Wellenlänge 808 nm. Diese können außerdem sehr flexibel angeordnet werden, da ein Lichtwellenleiter genügt, um das Licht des Diodenlasers in das Lasermaterial des Hauptlasers einzukoppeln. Bei der Emission von Photonen aus dem Lasermaterial wird zwischen spontaner und induzierter Emission unterschieden. Es wird von spontaner Emission gesprochen, wenn die Elektronen ohne äußere Einwirkung auf das untere Energielevel zurückfallen.

Wird dieser Übergang durch andere, bereits freie Photonen hervorgerufen, die den Übergang eines weiteren Elektrons anstoßen, liegt die induzierte Emission vor. In dem Lasermaterial beginnt die Emission von Licht zunächst spontan. Die freiwerdenden Elektronen regen anschließend weitere Elektronenübergänge an, wodurch wieder freie Photonen entstehen, die ihrerseits die Reaktion fortsetzen. Es kommt zu einer lawinenartigen Zunahme der freien Photonen und damit zu einer Verstärkung des Lichts, das in der spontanen Emission den Anfang nahm [74]. In einem einzelnen Durchlauf wird in den meisten Lasermaterialien nicht die benötigte Verstärkung erreicht, um die „Lawine“ zu erzeugen.

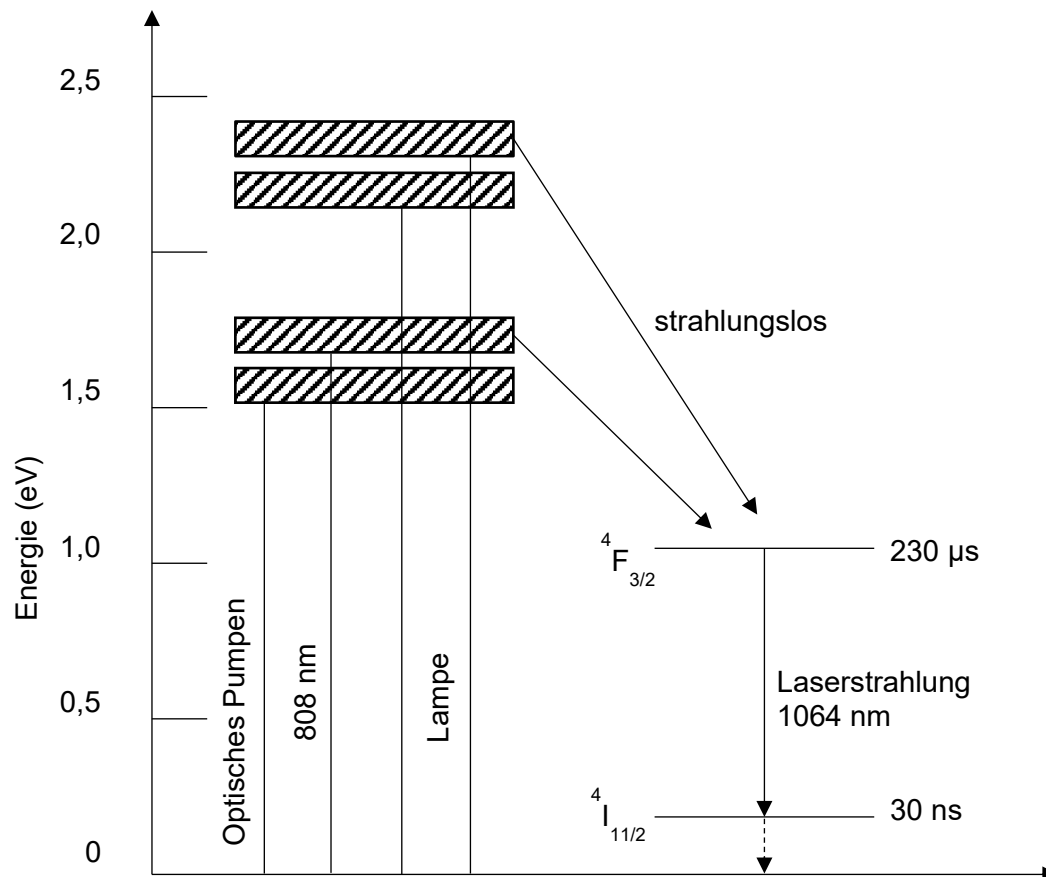


Abbildung 1 Energieübergänge der Elektronen in einem Laser anhand des 4-Niveau-Modells nach Eichler [74]; nach dem Pumpen zunächst strahlungsloser Übergang zum 1. Zwischenenergieniveau, anschließend Laserstrahlung bei 1064 nm zum 2. Zwischenenergieniveau, schließlich strahlenloser Übergang auf Grundenergieniveau; Verweildauern in den mittleren Zwischenenergieaus sind 230 μ s bzw. 30 ns

Es bedarf daher Vorrichtungen, die dafür sorgen, dass die Photonen mehrfach durch das Lasermaterial geführt werden, um den Laser anschwingen zu lassen. Auf beiden Seiten des Lasermaterials werden zu diesem Zweck Spiegel eingesetzt, die Photonen reflektieren und kontinuierlich durch das Lasermedium senden, sodass die Lichtintensität stetig steigt. Diese Anordnung wird Resonator genannt. Aus einem der Spiegel wird

das Licht schließlich ausgekoppelt und steht für die Anwendung zur Verfügung. Zu diesem Zweck muss der Auskoppelspiegel folglich einen Reflexionsgrad kleiner als 100 % aufweisen.

Für viele Anwendungen, so auch für die Laserzündung, sind kurze Pulse mit hoher Energie erwünscht, also hohe Spitzenleistungen. Bei gleichbleibender Pumpleistung kann die Spitzenleistung des Lasers erhöht werden, indem die Emissionsdauer und damit die Pulslänge verkürzt wird. Dies wird mit Hilfe von Güteschaltungen umgesetzt. Neben der Möglichkeit, aktive Komponenten für diese Funktion einzusetzen, die die Komplexität des Aufbaus allerdings weiter erhöhen, eine zusätzliche Stromversorgung benötigen und eine geringere Robustheit aufweisen, eignen sich passive Güteschaltungen insbesondere für den Einsatzbereich am platzbeschränkten, schwer zugänglichen Motor, da sie ohne die genannten Nachteile auskommen. Eine passive Güteschaltung wird im Nd:YAG-Laser mittels eines sättigbaren Absorbers ausgestaltet. Dabei handelt es sich um einen Kristall, der dem Nd:YAG-Kristall angefügt wird, meist ein mit Chrom-Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall (Cr:YAG). Aufgabe des Absorbers ist es, die Auskoppelung des Laserpulses erst dann zu veranlassen, wenn die maximale Besetzungsinversion im Lasermaterial vorliegt, um einen möglichst kurzen, energiereichen Puls zu erhalten. Der sättigbare Absorber weist einen variierenden Transmissionsgrad auf, der von der eingestrahnten Intensität abhängt und mit ihr ansteigt. Zu Beginn des Pumpvorgangs ist die Intensität des Lichts noch gering und der Transmissionsgrad des sättigbaren Absorbers entsprechend niedrig. Somit werden die Verluste im Resonator künstlich erhöht, um ein frühes Leeren des oberen Energieniveaus zu verhindern. Der sättigbare Absorber wird so ausgelegt, dass dieser bei der Intensität des Lichts, die bei maximaler Besetzungsinversion vorliegt, einen hohen Transmissionsgrad aufweist. Der Absorber ist nun gesättigt und die Verluste auf der Wegstrecke durch das Lasermaterial im Resonator sinken schlagartig ab. Die gesamte durch die Besetzungsinversion gespeicherte Energie kann nun durch einen einzelnen Puls ausgekoppelt werden. Die Besetzungsinversion wird damit abgebaut. Nach einer kurzen Regenerationszeit sinkt der Transmissionsgrad des sättigbaren Absorbers durch die absinkende Lichtintensität im Resonator wieder ab und die Verluste im Resonator nehmen somit wieder zu, bis der Absorber durch die erneut ansteigende Besetzungsinversion wieder gesättigt wird und den nächsten Puls auskoppelt [74,75].

Das ausgekoppelte Licht weist bestimmte Eigenschaften auf. Zum einen besteht zeitliche und räumliche Kohärenz, das Licht ist folglich monochrom und breitet sich parallel

aus. Zum anderen ist es linear polarisiert und besitzt eine geringe Divergenz. Die Energiedichte im Strahlprofil kann somit über weite Strecken nahezu konstant gehalten werden [74–76].

2.2 Vorteile der Laserzündung

In zahlreichen Arbeiten wurden bereits die grundlegenden Funktionsmechanismen und die Vorteile der Laserzündung untersucht. Sie werden hier zusammengefasst:

- Im Gegensatz zu konventionellen elektrischen Funkenzündkerzen sind höhere Zylinderdrücke für laserbasierte Zündsysteme durch die höhere Teilchendichte und die damit verbundene verbesserte Energieabsorption vorteilhaft und die minimal benötigte Zündenergie sinkt [33,58,69–72].
- Im Gegensatz zu elektrischen Funkenzündkerzen sind keine Elektroden vorhanden, die auf das Gemisch und die Verbrennung Einfluss nehmen. Die Wärmeableitung aus dem Gemisch fällt deutlich niedriger aus und die Gefahr des Quenchings, des Auslöschens der Flamme, kann dadurch reduziert werden [33,58,59,70,77].
- Durch die Abwesenheit der Elektroden kann der Zündort über die Auswahl geeigneter Linsen flexibel gewählt und auf die Betriebsbedingungen angepasst werden.
- Durch konsekutive Pulse der Laserzündkerze kann die Verbrennung weiter optimiert werden. Dabei kann zum einen der Flammenkern durch die Pulse vergrößert und stabilisiert werden. Zum anderen können zusätzliche Flammenkerne erzeugt werden, die sich im Verlaufe der Verbrennung vereinigen [33,58,59,70,77,78].
- Außerdem ist es möglich, den Puls der Laserzündkerze über entsprechende Optiken auf mehrere Punkte im Brennraum zu fokussieren. Diese Mehrortzündung bietet weiteres Potential die Verbrennung zu unterstützen [33,79–83].
- Der Energietransfer bei der Laserzündung erfolgt im Zeitraum von Nanosekunden. Im Gegensatz dazu erfolgt der Energieübertrag bei der elektrischen Zündkerze im Zeitraum von Mikrosekunden [26].
- Die Größenordnung der Plasmatemperatur bei der Laserzündung liegt mit 10^6 K bedeutend über der Größenordnung der Plasmatemperatur bei der konventionellen Zündung mit 10^4 K [84–88].

- Ähnlich verhält es sich mit dem Druckniveau des Plasmas. Bei der Laserzündung liegt dieses in der Größenordnung von 10^3 bar und damit ebenfalls bedeutend über der Größenordnung des Druckniveaus bei der konventionellen Zündung mit 10^2 bar [84–88].
- Die optische Frequenz der Laserstrahlung ist höher als die Plasmafrequenz und erlaubt daher eine Absorption der Energie im Inneren des Plasmas. Die Frequenz der elektrischen Zündung ist hingegen kleiner als die des Plasmas, wodurch die Energieabsorption am Rand des Plasmas erfolgt [86].
- Im Vergleich zu konventionellen elektrischen Zündsystemen kann auch die Ansteuerung eines passiv gütegeschalteten Lasers wesentlich schneller erfolgen. Das Delay zwischen Ansteuerung und Pulsemission kann niedriger ausfallen. Zusammen mit den deutlich kürzeren Pulsen und den oben genannten Aspekten einer schnelleren und intensiveren Energieübertragung führt dies zur Möglichkeit einer flexibleren und zeitlich feiner aufgelösten Ansteuerung des Zündzeitpunktes.

2.3 Ablauf des laserbasierten Zündprozesses

Der Zündablauf eines laserbasierten Zündsystems beginnt mit der Auskopplung des Laserpulses aus der Laserzündkerze und der Erzeugung eines laserinduzierten Funkens [89]. Je nach Ausführung und Konfiguration des Lasers sind Pulslängen von mehreren hundert Pikosekunden bis einigen Nanosekunden üblich [74,75]. Im Fokuspunkt wird das Licht auf einen sehr geringen Strahltaillendurchmesser fokussiert. Steigt die Leistungsdichte in diesem Punkt stark genug an, werden die Atome des Gasgemischs ionisiert und der Plasmadurchbruch erfolgt [90–92].

Bereits 1964 entstanden Arbeiten über die Entwicklung von laserinduzierten Funken in Gasen von Ramsden und Savic [93], Meyerand und Haught [94] sowie Wright [95]. 1975 hat Morgan [96] den laserinduzierten Durchbruch und die Plasmabildung in Gasen untersucht. In dieser Arbeit beschreibt er den Ionisierungsprozess, der durch die Multiphotonen-Ionisation und die inverse Bremsstrahlung charakterisiert ist. Ronney hat in seinem Werk 1994 [70] einen umfangreichen Überblick über die zugrundeliegenden Abläufe der Laserzündung und einige der Vorteile geliefert. Seine Ausführungen über die möglichen Mechanismen für den Beginn der Verbrennung, und zwar die thermische Einleitung, der nicht-resonante Durchbruch, der resonante Durchbruch und die photochemische Zündung, wurden von vielen späteren Arbeiten aufgegriffen. In der Arbeit von Phuoc et al. von 1999 [85] wurde resümiert, dass im Falle von langwelliger Strahlung und der Plasmaentstehung durch den nicht-resonanten Durchbruch, die bei der in dieser

Arbeit eingesetzten Nd:YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm vorliegen, die Multiphotonen-Ionisation vernachlässigbar ist, da diese hauptsächlich bei kurzen Wellenlängen und niedrigen Drücken eine Rolle spielt. Bei der Infrarotstrahlung des Nd:YAG-Lasers ist die Photonenenergie von 1,17 eV nicht ausreichend, um die Gasmoleküle, deren Ionisierungsenergie im Bereich von 12 eV liegt, ohne weiteres ionisieren zu können, es wären mehr als 10 Photonen hierfür notwendig. Stattdessen wird bei langwelliger Strahlung und hohen Drücken die lawinenartige Ionisierung der Elektronen durch den Prozess der inversen Bremsstrahlung bestimmt, der für eine kontinuierliche Absorption von weiteren Photonen seitens der Elektronen sorgt, die anschließend weitere Gasmoleküle ionisieren. Hierfür sind jedoch freie Elektronen zu Beginn notwendig. Durch kleinste Unreinheiten im Medium im Bereich des Fokuspunktes des Lasers wird die Ionisationsschwelle so weit herabgesetzt, dass nur diese ersten freien Elektronen durch die Multiphotonen-Ionisation erzeugt werden [73,97–100]. Auch Koga et al. [101] haben den Plasmadurchbruch in numerischen Simulationen untersucht und eine thermische Schwelle von 100 eV für freie Elektronen ermittelt, um eine für den optischen Durchbruch ausreichende Ionisation zu erhalten.

Um den Energieeinsatz so niedrig wie möglich zu halten, ist die minimal benötigte Energie für einen optischen Durchbruch und eine erfolgreiche Zündung Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [102–107]. Das erzeugte Plasma weist eine Standzeit im Bereich einiger Mikrosekunden auf, breitet sich nach der Bildung detonationsartig aus [108] und wurde ebenfalls in zahlreichen Arbeiten charakterisiert [109–111]. Die Energie des Laserpulses wird durch das gebildete Plasma weiter absorbiert, wodurch die Größe des Plasmas zunimmt [112–114]. Der Plasmadurchbruch erzeugt durch den starken Temperatur- und Druckanstieg eine Druckwelle, die sich mit Überschallgeschwindigkeit durch den Brennraum in das kühlere Gas ausbreitet [58,115,116]. Die aus dem Plasma hervorgehende Druckwelle wurde von Lackner et al. [117] in ihrer Arbeit zu der frühen Phase des Verbrennungsverlaufs von Methan-Luft-Gemischen untersucht. Neben der gewonnenen Erkenntnis, dass der Prozess des Durchbruchs hochgradig stochastisch ausfällt, wurde die Geschwindigkeit der Druckwelle auf 1900 m/s bestimmt. Eine Verdünnungswelle mit zum Zentrum gerichtetem Druckgradienten folgt der Druckwelle und sorgt durch gasdynamische Effekte für eine Ausbildung zwei entgegengesetzter Ringströmungen, die auf der laserabgewandten Seite stärker ausgeprägt sind [97,98,115]. Die hohe Temperatur und die Druckwelle erzeugen einen heißen Gasball, der zunächst kollabiert [118]. In den ersten 10 bis 50 μ s bildet sich über selbsterhaltende chemische Reaktionen der frühe Flammenkern [113,117,119,120]. Der durch laserbasierte Zündsys-