

Kurzfassung

Motiviert wurde diese Arbeit durch das Ziel, zyklische Verbrennungsschwankungen von Verbrennungsmotoren aufgrund der Zündung besser zu verstehen, um eine Steigerung des Wirkungsgrads infolge optimierter Verbrennungsschwerpunktlage zu erreichen. Zur Erfüllung dieses Ziels ist es notwendig, das Funkenplasma hinsichtlich Temperaturen, Teilchendichte, zeitlicher und räumlicher Ausprägung zu charakterisieren, um infolgedessen das Verständnis über den Entflammungsprozess durch die Funkenzündung zu verbessern. So zeigen die derzeitigen Erkenntnisse bezüglich des Zündfunkens, dass dieser in die drei Phasen des Durchbruchs, der Bogen- und der Glimmentladung unterteilt wird, welche neben unterschiedlichen physikalischen Prozessen der Elektronenbereitstellung signifikant unterschiedliche Entflammungswahrscheinlichkeiten aufweisen. Diese Arbeit soll zum Verständnis dieser Zusammenhänge beitragen und somit die Effizienz der ottomotorischen Verbrennung verbessern.

Zunächst wird hierfür ein Aufbau konzipiert, mit dem der Zündfunken unter Druck, jedoch ohne Entflammung, sowohl zeitlich wie auch räumlich, optisch und elektrisch analysiert wird. Anschließend werden die Funkenphasen mittels optischer Emissionsspektroskopie hinsichtlich ihres Spektrums separat voneinander untersucht. Aus diesen Spektren werden aufgrund der deutlich unterschiedlichen Eigenschaften des jeweiligen Plasmas verschiedene Methoden zur Ermittlung von Temperaturen und Elektronendichten des Plasmas appliziert. Die zu Beginn durchgeführte Druckvariation im Bereich 1 bar bis 15 bar zeigt, dass im Durchbruch ab einem Druck von vier bar ein Wechsel des physikalischen Mechanismus der Elektronenbereitstellung vom Generationen- zum Streamermechanismus mit intensiver Kontinuumstrahlung erfolgt. Dieser Druck wird jedoch durch die hohe absolute Luftfeuchte reduziert. Weiterhin wird eine signifikante Erhöhung der Rotationstemperatur durch den Druck und den Entladungsstrom festgestellt, während sich die Anregungstemperatur der Metallionen in der Bogenentladung vom Strom unabhängig zeigt, jedoch mit zunehmendem Druck abnimmt. Anhand einer Variation des Sauerstoffpartialdrucks sowie der absoluten Luftfeuchte verdeutlicht sich, dass sowohl Bogen- wie auch Glimmentladung bei der Erzeugung von atomarem Sauerstoff dem Durchbruch merklich nachstehen. Die Sauerstoffatome werden in Bogen- und Glimmentladung signifikant von anderen Spezies gequench, wodurch diese einer Reaktion mit einem Brennstoff nicht mehr zu Verfügung stehen. Abschließend zeigt die Diskussion mit Blick auf die Entflammung, dass diese von der Elektronendichte, der räumlichen Nähe zu den Elektroden und der Photoionisation und -dissoziation abhängig ist.

Abstract

This work was motivated by the goal to better understand cyclic combustion fluctuations of internal combustion engines due to the ignition in order to achieve an increase in efficiency as a result of optimized center of combustion. To fulfill this goal, it is necessary to characterize the ignition spark plasma with respect to temperatures, particle density, temporal and spatial characteristics in order to improve the understanding of the inflammation process due to the spark ignition. Thus, previous findings regarding spark ignition show that it is divided into the three phases of breakdown, arc and glow discharge, which exhibit significantly different inflammation probabilities in addition to different physical processes of electron provision. The purpose of this work is to contribute to the understanding of these relationships and thus improve the efficiency of the combustion in spark ignition engines.

First step is the design of a setup to analyze the ignition spark under pressure without combustion. It is analyzed temporally and spatially, optically and electrically. With respect to their physical mechanism, the spark phases are analyzed by optical emission spectroscopy. From these spectra, different methods are applied to determine temperatures and electron densities of the plasma due to the significantly different properties of the respective plasma. The pressure variation in the range of 1 bar to 15 bar (carried out at the beginning) shows that, when a breakdown happens from a pressure of more than four bar, there is a change of the physical mechanism of electron supply from the generation mechanism to the streamer mechanism with intense continuum radiation. However, a high absolute humidity is reducing this pressure again. Furthermore, a significant increase of the rotational temperature is observed due to the pressure and the discharge current. In comparison, the excitation temperature of the metal ions in the arc discharge is found to be independent of the current but decreases with increasing pressure. Based on a variation of the oxygen partial pressure as well as the absolute humidity, it becomes clear that both arc and glow discharge are noticeably inferior to breakthrough in the generation of atomic oxygen. In the first two forms of discharge, the oxygen atoms are significantly quenched by other species, making them unavailable for reaction with a fuel. In conclusion, the discussion with respect to inflammation shows that it depends on electron density, spatial proximity to the electrodes, and photoionization and dissociation.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Zum Schutz des Weltklimas haben die 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU-27) das Ziel gesetzt, die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Daraus resultiert die Verpflichtung einer schrittweisen Reduzierung der Treibhausgasemissionen, um bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden. Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurden Zwischenziele definiert, welche sich auf eine Reduktion des CO₂-Äquivalents zum Jahr 1990 beziehen. Im ersten Zwischenziel wird eine Abnahme der Treibhausgasemissionen der EU-27 um 55 % angestrebt [37], wobei dieses Ziel in Deutschland auf 65 % verschärft wurde. Um den Wunsch den Einfluss auf das Klima zu verringern, wurde ein weiterer Meilenstein im Jahr 2050 gesetzt, in dem sich die EU verpflichtet, das 1,5 °C zu erreichen [18]. Eine aktuelle Prognose der European Enviroment Agency zeigt allerdings, dass diese Ziele mit den aktuellen Mitteln verfehlt werden [38], wie Abbildung 1.1 zeigt.

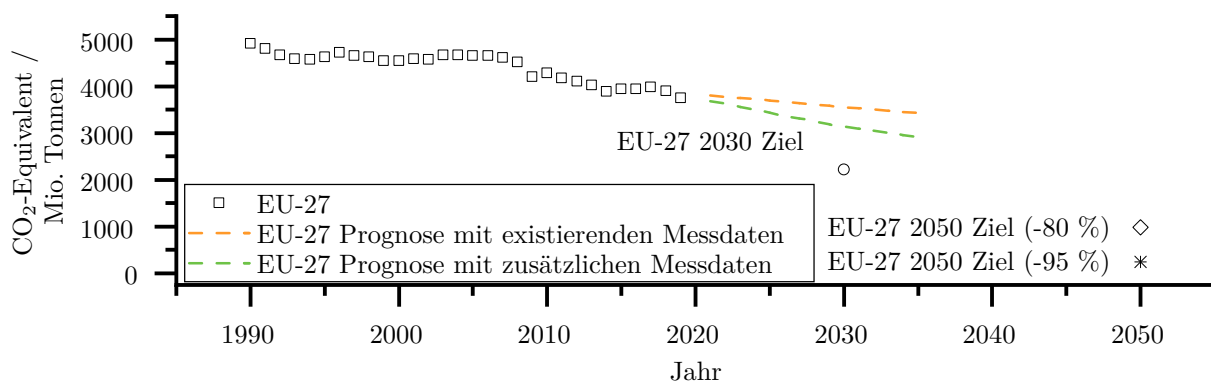


Abbildung 1.1: Entwicklung des CO₂-Äquivalents und Klimaziele der EU-27 nach [38]

Mit einem Anteil von über 26 % der Treibhausgasemissionen am gesamten CO₂-Äquivalent der EU ist der Verkehrssektor einer der wichtigsten Verursacher dieser [178], wodurch der mit Kraftstoffen aus fossilen Quellen betriebene Verbrennungsmotor in den Fokus der Diskussion rückt. Somit wird in der Forschung und Entwicklung nach Alternativen für diese Kraftstoffe gesucht und neben den batterieelektrischen Antrieben synthetisch hergestellte und biogene Kraftstoffe entwickelt [187]. Im Fokus stehen hierbei vor allem Dieselmotoren wie HVO (Hydrogenated Vegetable Oils), auf Alkohol oder Stroh basierende Otto-Kraftstoffe (wie beispielsweise bioliq[®] [114]) sowie Wasserstoff. Da deren Herstellung mit der Aufwendung von Energie verbunden ist, resultiert daraus nicht nur die Anforderung einer energieeffizienten Herstellung dieser Kraftstoffe, sondern auch deren verbrauchsarmer Nutzung.

Hierzu bietet sich die Entwicklung neuer oder die Optimierung bereits bestehender Brennverfahren an. Im Bereich der Ottomotoren kann in diesem Zusammenhang auf die Entwicklung von Magerbrennverfahren, stark verdünnte Gemische oder den Einsatz von Vorkammerkerzen verwiesen werden. Alle Verfahren bieten das Potential der Wirkungsgradsteigerung, beispielsweise durch Entdrosselung oder eine effizientere Verbrennung. Diese wirken sich jedoch auf das Zündsystem aus, so steigt beispielsweise bei mageren Luftkraftstoffverhältnissen die notwendige Zündenergie an [84]. Als Resultat wachsen die Anforderungen an das verwendete Zündsystem als Initiator für eine sichere und reproduzierbare Entflammung bei unterschiedlichsten und schwierigsten Bedingungen [23, 28, 208].

Eine Optimierung von Zündsystemen erfolgt meist mit Blick auf Entflammung oder Verschleiß. Diese Kriterien verhalten sich jedoch oft gegenläufig zueinander und führen somit zu einem Zielkonflikt. Aus diesem Grund sind die Kenntnisse über die grundlegenden Mechanismen der Entflammung mittels konventioneller Zündsysteme bedeutungsvoll, um neuen Brennverfahren den Weg zu ebnen und dennoch den erwähnten Zielkonflikt aufzulösen. Folglich müssen zunächst die charakteristischen Eigenschaften des Zündfunkenplasmas bekannt sein, um weitere Optimierungsmaßnahmen treffen zu können. Ein Überblick über bisherige Forschungsarbeiten zu diesem Thema wird im nachfolgenden Kapitel gegeben.

1.2 Stand der Forschung

Da es sich bei den folgenden Arbeiten von Maly et al. [2–4, 105–108, 160] um die vollständigste Beschreibung des Zündfunkens handelt, soll ihnen an dieser Stelle der gebührende Umfang gewidmet werden.

Eine der ersten grundlegendsten Beschreibungen des Zündfunkens wurde 1977 von Albrecht in Zusammenarbeit mit Rudolph Maly [2] veröffentlicht. Sie verdeutlichten die Unterteilung des Zündfunken in seine drei Entladungsformen Durchbruch, Bogen- und Glimmentladung. Zusätzlich prägten sie die Begriffe Funkenkopf und -schwanz für den kapazitiven und induktiven Teil der Entladung. Mittels N_2 -Laser-Interferometrie bestimmten sie bei Atmosphärendruck Teilchendichten und Temperaturen verschiedenster Spezies. So zeigten Messungen ihrerseits eine Elektronendichte (n_e) in der Größenordnung von 10^{19} cm^{-3} im Durchbruch, die mittels Starkverbreiterung berechnet wurde. Zusätzlich bestimmten sie mit Hilfe von N II Linien und des Boltzmann-Plot-Verfahrens die Elektronentemperatur zu besagtem Zeitpunkt auf 60.000 K.

Weitere Untersuchungen unter Anleitung von Maly zeigten den Einfluss elektrischer Bauteile induktiver Zündsysteme auf die benannten Phasen der Funkenzündung [3, 4, 106]. In diesen Veröffentlichungen wurden unter anderem die Elektronentemperatur des Durchbruchs mittels des Ohm'schen Gesetzes auf 65.000 K abgeschätzt und somit die zuvor ermittelten Werte bestätigt. Ferner bestimmte er die Temperatur der Bogenentladung bei Strömen von 10 A auf Werte zwischen 5000 K und 6000 K und die Rotationstemperatur der Glimmentladung auf 3000 K. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Versuche mit einem Modellzündsystem durchgeführt wurden, dessen hohe Ströme für moderne induktive Zündsysteme untypisch sind.

In weiteren Veröffentlichungen, begleitet durch Maly [62, 106], wurden die unterschiedlichen Eigenschaften der Funkenphasen bezüglich der Entflammung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass Glimmentladungen bezogen auf die elektrisch zugeführte Arbeit die geringste Entflammungswahrscheinlichkeit boten, wohingegen Bogenentladungen und vor allem der Durchbruch deutlich bessere Werte erreichten. Als Begründung lieferte [160] die höhere Energieübertragungseffizienz der beiden letztgenannten Entladungsformen. Ein zusammenfassendes Werk über die Arbeiten von Maly et al. entstand 1984 in [105].

Jüngere Veröffentlichungen, wie die von Oliveira [126], untersuchten mittels kommerziellen Zündsystemen die Gastemperatur durch Bestimmung der Rotationstemperatur von Stickstoffbanden unter Atmosphärendruck. Als Methode diente im erwähnten Fall der Vergleich gemessener mit simulierten Spektren, aus welchem Temperaturen zwischen 1600 K und 2800 K hervorgingen. Neben der Rotationstemperatur konnte mit Hilfe von Argon-Linien und dem Boltzmann-Plot-Verfahren die Anregungstemperatur des Gases auf 17.000 K bis 20.000 K bestimmt werden. Weiterhin ermittelte er durch Starkverbreiterung an der Wasserstoff H_α -Linie die Elektronendichte dieser Entladungen zwischen $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ und $1,7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Ähnliche Ergebnisse wurden von Hnatiuc [65] erzielt. Er bestimmte neben der Rotationstemperatur auch die Vibrationstemperatur von Glimmentladungen unter Anwendung konventioneller Zündsysteme unter atmosphärischem Druck. Dabei konnte er Werte zwischen 2000 K und 3000 K beziehungsweise 2885 K bis 4325 K für Rotations- und Vibrationstemperatur ermitteln. Als zusätzliche Abschätzung nahm er aufgrund der reduzierten elektrischen Feldstärke an, dass die Elektronentemperatur kleiner als 10.000 K ist.

Auch die Arbeit von Huang [69] beschäftigte sich mit Glimmentladungen von Zündsystemen bei atmosphärischen Druckverhältnissen. Seine Werte für die Rotationstemperatur fielen jedoch mit 1400 K bis 2600 K etwas niedriger aus als die von den Vorgängern ermittelte, wohingegen die Vibrationstemperatur ähnlich hohe Werte im Bereich 3700 K bis 4300 K annahm. Die Temperaturen wurden zusätzlich zu verschiedenen Zeitpunkten während der Glimmentladung bestimmt. Dabei zeigten sich nur geringe Änderungen in Abhängigkeit der Zeit.

Von Kinoshita [85] wurde der Einfluss der Funkenauslenkung durch Strömung auf die Rotations- und Vibrationstemperatur untersucht. Dabei verwendete er eine räumliche Auflösung des Zündfunken und stellte Temperaturen zwischen 2000 K und 4000 K beziehungsweise 3700 K bis 4500 K für die Rotations- und Vibrationstemperatur fest.

Unabhängig von den plasmaphysikalischen Eigenschaften des Zündfunken konnten [75, 201, 204] zeigen, dass durch den Einsatz und die Kombination von Kondensatoren und Widerständen an bestehenden Zündsystemen das Abmagerungspotential signifikant beeinflusst werden kann. So wiesen Zündsysteme, bei denen Widerstände vor die Kondensatoren eingebracht wurden, ein geringeres Abmagerungspotential im Vergleich zu Zündsystemen ohne diese Widerstände auf. Bereits in [111] konnte gezeigt werden, dass durch Hinzufügen von Kondensatoren der Durchbruch und die Bogenentladung energetisch begünstigt werden.

1.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen der Arbeit

Die bisher gezeigten Untersuchungen, die das Zündsystem und deren Einfluss auf die Verbrennung betrachten, weisen darauf hin, dass es möglich ist, durch Vermessung der elektrischen und plasmaphysikalischen Eigenschaften Zündsysteme zielgerichtet auf ihre Anwendungen auszuwählen. Dabei soll eine Bewertung der Entflammungseignung des Zündfunken aufgrund relevanter plasmaphysikalischer Kenngrößen erfolgen. Hierzu ist es notwendig, die bisherigen Untersuchungen zu ergänzen und Effekte der Plasmaphysik näher zu beleuchten. Im Unterschied zu den genannten Veröffentlichungen soll in dieser Arbeit der Fokus zum einen auf eine hohe räumliche Auflösung der verschiedenen Funkenphasen in axialer Richtung, sowie in der Betrachtung verschiedener Plasmakenngrößen liegen. Untersucht werden diese Eigenschaften in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks, des Sauerstoffpartialdrucks, der Luftfeuchte und unterschiedliche Kombinationen aus Widerständen und Kondensatoren.

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Methodiken zur Analyse von Zündfunken zu applizieren und deren Variation in Abhängigkeit der oben genannten Variablen qualitativ zu beschreiben. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Gliederung der Arbeit, die im Folgenden kurz erläutert wird. Zunächst stellt Kapitel 2 den Zusammenhang zwischen Zündsystem und Funkenphasen vor und thematisiert anschließend die benötigten Grundlagen der Plasmaphysik. Daran anknüpfend wird der Versuchsaufbau sowie die Methodik zur Bestimmung der elektrisch zugeführten Energien in Kapitel 3 gezeigt. Das nachfolgende Kapitel 4 beinhaltet zunächst eine Übersicht über Spektren und die axiale Intensitätsverteilungen der verschiedenen Funkenphasen. Anhand dieser Spektren wird im Anschluss die Applikation der Berechnungsverfahren erläutert. Kapitel 5 beinhaltet den Ergebnisteil, bevor eine Diskussion zur Entflammung durch die Funkenphasen in Kapitel 6 folgt. Abgeschlossen wird diese Arbeit durch die in Kapitel 7 stehende Zusammenfassung sowie den Ausblick zu nachfolgenden Arbeiten.