

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Anstellung als Entwicklungsingenieur im Formel 1 Programm bei Alpine Racing in Viry-Châtillon in einem Forschungsprojekt mit dem Institut für Kolbenmaschinen des Karlsruher Institut für Technologie, bei dem ich als Gastwissenschaftler tätig war. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für seine Unterstützung und die Betreuung meiner Arbeit. Bei Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber bedanke ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova danke ich für die Übernahme des Vorsitzes bei der mündlichen Prüfung.

Je remercie chaleureusement Rémi Taffin, Vincent Hubert et Jean-Philippe Aignan de m'avoir accordé leur confiance dans ce projet et m'avoir permis de l'effectuer en parallèle de mon rôle d'ingénieur de développement. Je remercie l'équipe Culasse, Distribution et Allumage d'Alpine pour son soutien et sa compréhension. Je remercie Hubert De-Sousa pour sa collaboration constructive et ses performances exceptionnelles lors du développement de l'allumage chez Alpine. Cette expérience marquera à jamais ma carrière professionnelle et ma vie personnelle. Je remercie Emmanuel Labussière pour ses nombreuses inspirations et sa contribution à mon apprentissage de la langue française. Je remercie Julie Colling de sa compréhension pendant la thèse et d'avoir été une cheffe parfaite. C'est une tristesse profonde que tu sois partie si tôt. Je remercie également Alexandre Borie pour ses conversations instructives et ses idées géniales, Alexandre Hebert de sa confiance au fil des ans et Frédéric Castex de son soutien, particulièrement dans la phase finale du projet. Je remercie Franck Dubois de la poursuite du développement et la bonne coopération que nous entretenons. Enfin, je remercie également tous les mécaniciens et ingénieurs qui m'ont aidé à réaliser ce travail. Mes années passées en France à vos côtés resteront à jamais un souvenir heureux, gravé dans ma mémoire. Merci infiniment pour ce moment extraordinaire.

Am Institut möchte ich besonders den Herren Dr. Olaf Toedter und Tobias Michler danken, mit denen ich meinen Horizont für das Thema erweitern konnte und mit denen ich gleichgesinnte Zündungsverrückte gefunden habe. Ich freue mich auf zukünftige spannende Jahre. Am IFKM möchte ich außerdem den Herren Alexander Heinz, Johannes Dornhöfer und Thomas Wheying, Moritz Grüniger und Jan Reimer für die freundliche Aufnahme am IFKM und die Hilfe vor Ort in Karlsruhe danken. Außerdem danke ich Herrn Michael Busch für den Support mit der Internetverbindung über den Rhein und Julia Reichelt für die organisatorische Unterstützung am KIT.

Mein herzlicher Dank gebührt der Multitorch GmbH, die mich während des Projekts mit Versuchsteilen und Rat unterstützt hat. Herrn Dr. Steffen Kuhnert danke ich besonders für die vielen Diskussionen und die andauernde Unterstützung bei dem Projekt.

Der Firma LaVision und besonders Dr. Olaf Thiele danke ich für die Unterstützung mit der beeindruckenden Messtechnik und den technischen Austausch bei der Auswertung.

Ganz besonders danke ich meiner Familie. Meinem Vater Klaus für das Wecken und Fördern meiner Begeisterung für Technik und für die vielen Gespräche und das Interesse an meiner Arbeit. Meiner Mutter Angela danke ich für meine Offenheit für Sprachen und dadurch das Vertrauen in mich nach Frankreich zu ziehen. Meinen Geschwistern Robert, Christina und Magdalena für den tollen Zusammenhalt seit unserer Kindheit und die aufmunternden Worte wenn sie nötig waren. Ich bin sehr stolz auf jeden von uns. Meinen Schwagern und meiner Schwägerin und allen sieben Neffen und Nichten danke ich für die schöne Zerstreung in der Freizeit und den Familienzusammenhalt.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Sabrina, die mich während den unzähligen Stunden der Doktorarbeit unterstützt und motiviert hat. Die mir zusätzlich zu der Arbeit in Frankreich die ermöglicht hat den Wunsch einer Dissertation neben dem Beruf zu verwirklichen. Unserer wundervollen Tochter Amélie danke ich für die letzte notwendige Motivation zum Fertigstellen der Arbeit. Ich liebe euch und freue mich auf unsere Zukunft.

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Optimierung des fremdgezündeten Motorbetriebs durch den Einsatz einer Vorkammerzündung. Dabei wird der Hauptfokus neben der Steigerung des thermischen Wirkungsgrads, auf die Verkürzung der Brenndauer und die Reduktion von zyklischen Schwankungen gelegt. Als Haupteinflüsse auf das Verhalten der Vorkammer wurden definiert: Gemischzusammensetzung, Temperatur, Druck und Luftbewegung innerhalb der Vorkammer im Zusammenspiel mit dem Design der Vorkammerzündkerze. Nach Vorbild des üblichen Entwicklungsablaufs wurden Simulationen von unterschiedlichen Vorkammern durchgeführt und Varianten an Prüfständen in Karlsruhe und Viry-Châtillon untersucht. Die Prüflinge unterschieden sich hierbei in den verwendeten Materialien aber teilweise auch stark in ihrer Konstruktion. Bei der Analyse wurden auch unterschiedliche Lastbereiche und Umgebungsbedingungen für den Fahrzeugeinsatz berücksichtigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen legen nahe, dass die einströmende Luftbewegung entscheidend für die Leistung der Vorkammer ist. Um deren Einfluss auf die Funkenbildung zu quantifizieren, wurde im Rahmen der Forschung am IFKM eine Funkenauslenkprüfkammer für Vorkammerzündkerzen entwickelt. Während der Parametervariation wurde die höchste Funkenauslenkung durch einen kleinen Innendurchmesser der Vorkammer und einen erhöhten Lochversatz erreicht. Im Prüfstandbetrieb erwies sich die Druckmessung innerhalb der Vorkammer zusätzlich zu der im Brennraum als wertvolles Instrument für ein vertieftes Verständnis über den Gasaustausch zwischen beiden Volumina. Das Wissen über die parallele Druckentwicklung in der Vorkammer und dem Hauptbrennraum hilft, das richtige Verhältnis zwischen Vorkammervolumen und Luft-Kraftstoff-Verhältnis für einen optimalen Betriebspunkt zu finden. Für die Auslegung der Vorkammerkomponenten können so außerdem mechanische Grenzen bestimmt und die Ursachen von Motorstörungen identifizieren werden. Durch die Kenntnis der Temperatur der Vorkammer können potentielle Entstehungsorte für Oberflächenentzündungen bestimmt werden. Die Oberflächentemperatur der Mittelelektrode wurde hierbei als Hauptursache für Vorentflammungen identifiziert. Die Auswirkungen des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses wurde bei optimalem Zündwinkel als Haupttreiber für die Zündkerzentemperatur ermittelt. Die Analyse der Gemischaufbereitung innerhalb der Vorkammer erfolgte mithilfe eines Infrarot-Sensors. Aufgrund der Absorption des Lichts durch Kohlenwasserstoff- und Kohlendioxidmoleküle ist die Identifizierung von unverbranntem und verbranntem Kraftstoff innerhalb der Vorkammer möglich. Eine starke Abhängigkeit des Kraftstoffgehalts in der Vorkammer vom Einspritzbeginn wurde bestätigt. Ein überraschendes Ergebnis ist, dass in der Vorkammer am Ende des Arbeitszyklus keine vollständige Kohlendioxid-Füllung gemessen wurde. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden in einem Leitfaden zur Entwicklung einer Vorkammerzündung zusammengefasst.

1 Introduction

The development of internal combustion engines (ICE) is an ongoing process over the last century. The increase in interest about the global warming, together with a higher acceptance of the population to change towards environmental protection, challenge the engineers and companies that work for the optimization of thermal engines. Since the beginning of the mass production of passenger cars and their powertrains, the internal combustion engine using a diesel or otto process was the undisputed choice. During the last decades, stricter emission allegations and carbon dioxide (CO₂) targets pushed engine developers towards new solutions, for example the direct fuel injection for mass-produced cars in 1996 by Mitsubishi motors [87] or the begin of the downsizing of engines in the 2000s [42]. Due to the efforts to reduce the fuel consumption of the vehicles, the increase of the stock of cars does not augment the overall CO₂ emissions of cars as shown in Figure 1.1. The increase of the ICE efficiency in combination with the treatment of the combustion emissions are therefore key for the engine development.

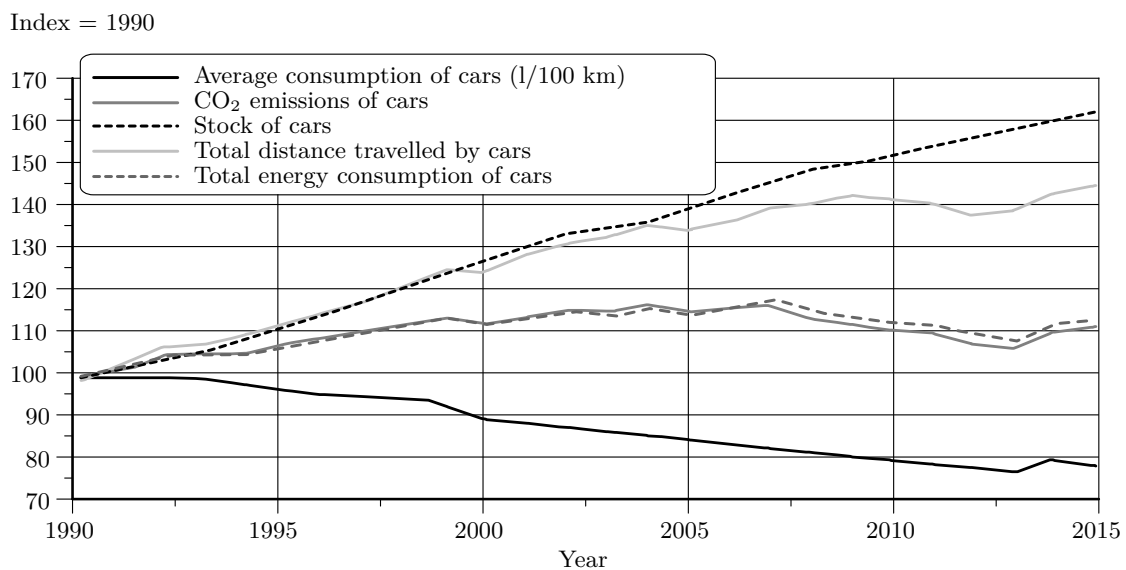


Figure 1.1: Fuel efficiency and fuel consumption trends for private cars in the EU-28 in the period 1990 to 2015. Adapted from the European Environment Agency [37]

Since the beginning of the 20th century, a new trend is challenging the ascendance of the ICE. Electric vehicles use local emission free powertrains, where the ICE is replaced by an electrical motor. Their electrical energy source consists of either an accumulator or a fuel cell.

Besides of a total replacement of the combustion engine, the hybridization combines the ICE with electrical components to increase the overall efficiency of the powertrain. Different automotive manufacturers such as Renault are using their motorsport engagement to test and develop these complex powertrains. As motorsport is used for marketing of road cars, they are strongly dependent on their image and trends in the targeted population. An example of the upcoming connection between motorsport and the environment is the work of Schwarz, who investigated different propulsion concepts in regard to their CO₂ impact in motorsports [104]. Rule maker of motorsport series, like the Fédération Internationale de l'Automobile (FIA), are creating the regulations to give the necessary freedom for the car companies for developing the future powertrains. Therefore the rules are build around a wish of the car companies to develop more road car relevant propulsion systems and to build up further competence to increase the efficiency of the ICE.

While in the past the power of high level motorsport engines was limited either by an air restrictor or by their displacement and a maximal engine speed together with a defined maximal boost pressure or even an interdiction of supercharging [38], the regulations changed to a more engine efficiency related approach. Since 2014 the FIA Formula 1 (F1) rules limit the fuel mass flow of the engine to 100 kg/h, thus the engine power is principally defined by the engine efficiency for a given fuel and oil consumption. The same principal is also used or adapted for several other race series such as the World Endurance Championship, Deutsche Tourenwagen Masters and Super GT series [33, 39, 58].

In F1 the regulation change results in powertrains with over 50 % efficiency. The ICE in the F1 cars reaches values of about 45 % thermal efficiency [127]. Key for the performance of the ICE is an optimized overstoichiometric combustion. To increase the power output of the lean operation points (OPs), different strategies are developed. Mandatory for a competitive efficiency level seems to be the introduction of a pre-chamber ignition system [110]. The gain by the pre-chamber is not only the increase of the combustion efficiency but it permits also to unblock operation fields that are not accessible with a standard spark plug¹. The first F1 team that introduced the innovative ignition was Mercedes giving them a significant development and performance advantage. After the information about the introduction of a pre-chamber combustion spread, their potential use was investigated in other motorsport classes [25].

However, the spark ignition (SI) inside a pre-chamber is not a recent invention but subject of various research projects. It was used in road cars in the 1970s by Honda for their Compound Vortex Controlled Combustion [123] and is a common ignition system for larger gas engines. The interest in the pre-chamber ignition is rising over the last years. This is also documented by the number of pre-chamber relevant topics on the International Conference on Ignition Systems for Gasoline Engines in Berlin, where the number increased from one in 2016 to nine in 2018 [46, 47]. The pre-chambers that are used in SI engines can be divided in active and passive systems. An active pre-chamber has a dedicated fuel supply to enrich the mixture around the electrodes, where the flame kernel grows. The richer mixture is beneficial for a fast and stable combustion [48]. As the air-fuel ratio in the pre-chamber is independent of the mixture in the main combustion chamber, the global mixture can be significantly diluted.

¹For example higher compression ratios or extreme mixture movements inside the combustion chamber

Passive pre-chamber systems do not have a dedicated fuel supply at their disposal. The fuel that is used for the pre-chamber combustion is injected outside its volume into the inlet ports or the main combustion chamber (MCC), therefore the lean limit occurs earlier than with an active system [105].

As FIA F1 regulations do not allow an active system, this work focuses on the development of passive pre-chambers. However, most results can be transferred and investigation methods can be adapted for an active system.

Common for both pre-chamber types is the use of a relatively small amount of fuel energy for a premature combustion in the separate volume. The defined values of Gussak et al. in the 1970s give an orientation about the design of a pre-chamber with a size of 2% - 3% of the compression volume together with an orifice surface to volume ratio of 0.03 cm^{-1} - 0.04 cm^{-1} and length to diameter ratio of 1:2 [48, 49]. The pre-chamber is connected with holes to the MCC, the pressure rise in the pre-chamber creates hot gas jets that protrude into the MCC and ignite the mixture at multiple points. The result is a faster combustion with less cyclic variations.

Although the use of pre-chamber ignition systems in SI engines is a well known technique to increase efficiency of larger gas engines, its introduction in motorsport shows the potential to reduce fuel consumption and emissions for more road relevant engines. Due to the hype that was caused by the F1 pre-chambers in the years 2014-2018, several engine manufacturers and suppliers focus on the development of pre-chamber ignition systems. The development principals of the ignition system can be inspired by the existing knowledge base of the larger engines and need to be validated or adapted for engines with smaller displacements. New aspects that occur during this transfer of technology are focus of the research in this work.

The data that contribute to the results in this work is collected on test benches at Renault Sport Racing (RSR) in Viry-Châtillon (France) and at the Institute of Internal Combustion Engines (IFKM) at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Karlsruhe (Germany). The investigation focus on the achievement of new analysis methods and results to optimize the performance of the pre-chamber ignition systems.

The principal drivers that impact a pre-chamber ignition in an SI engine and their origin are displayed in Figure 1.2. The two volumes of MCC and pre-chamber exchange gas via orifices that connect them both.

The performance and reliability of the pre-chamber mainly depend on the mixture composition (air-fuel equivalence ratio (λ) and CO_2), the state of the gas (pressure and temperature), the composition of the used fuel and air, but also the air movement into and out of the pre-chamber. The latter is controlled by the orifice design such as number of holes, hole diameter and hole orientation. The gas movement inside the pre-chamber has a significant impact on the combustion inside the pre-chamber. The right positioning of the hot gas jets, which ignite the mixture in the MCC, is key for the performance of the engine.

The pressure in the MCC creates the gas flow into the pre-chamber and sets the level on which the pre-chamber combustion pressure is added. Pressure and temperature that are imposed by the combustion in the MCC define the reliability requirements of the pre-chamber and are therefore essential design input parameters.

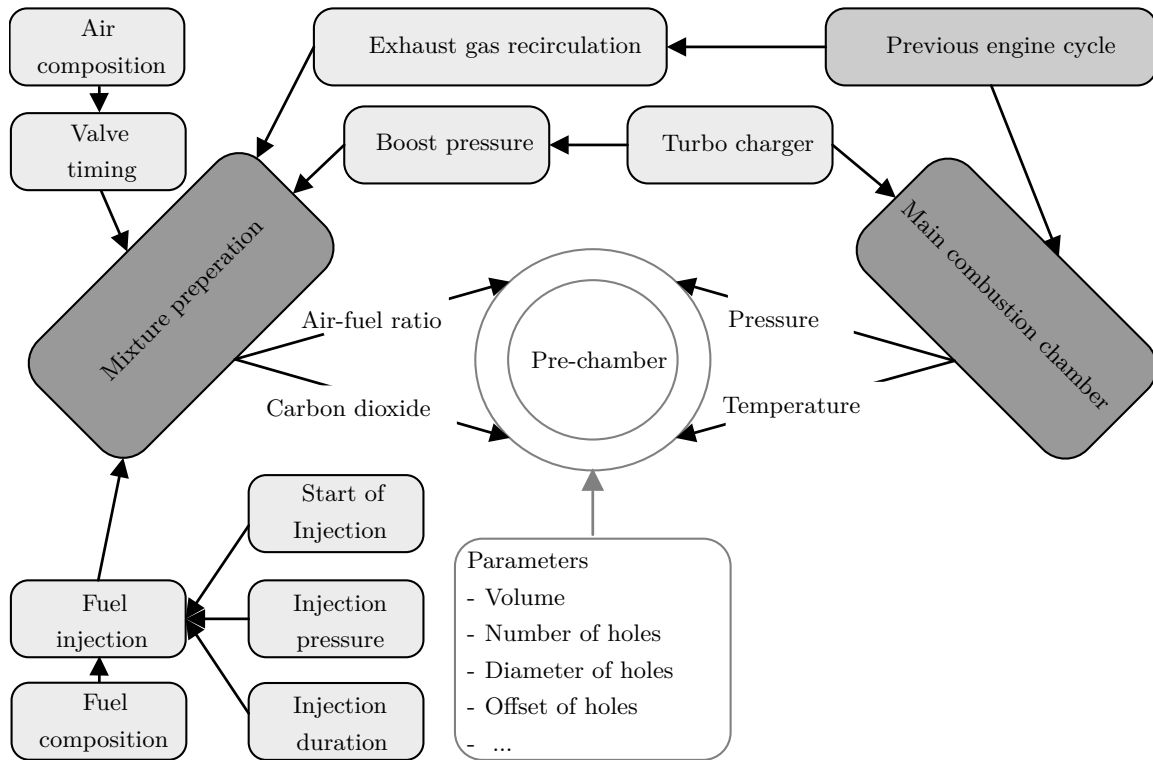


Figure 1.2: Principle impacts on the pre-chamber in a spark ignition engine. The schema shows the connection between the different influences that are investigated in the present work

The mixture preparation is driven by the injection of fuel and the scavenging during the gas exchange of the MCC and pre-chamber. For active pre-chambers the internal air-fuel ratio can be directly controlled, passive pre-chambers depend on the mixture around their connection holes in the MCC.

The fuel that contributes to the combustion in the pre-chamber is coming from an injection with the common parameters such as injection duration, start of injection or fuel pressure and forms the combustible mixture together with the air in the cylinder. CO_2 , which remains or enters the pre-chamber is left over from the previous engine cycle or from an external exhaust gas recirculation. The turbo charger creates the boost pressure, which increases the density of the fresh air but also increases the burned residuals in MCC, due to the increased exhaust pressure of a turbo engine.

In this work the different main drivers of the scheme in Figure 1.2, which have an impact on the pre-chamber combustion, are investigated. In combination with an analysis of major pre-chamber design parameters such as materials and orifice designs, knowledge is created for the use of the ignition system in a car application.

To determine the local air-fuel ratio inside the pre-chamber, a pre-chamber spark plug was developed using an infrared (IR) sensor to measure the fuel density, due to the absorption of light by the hydrocarbons. The same principal is used for the local concentration of CO_2 inside the pre-chamber.

The pressure measurement inside the pre-chamber volume is done via an integration of piezoelectric pressure sensors. The knowledge of the pressure in MCC and pre-chamber helps to understand the gas exchange between both volumes.

The temperature of the pre-chamber is measured with thermocouples.

As the orifice design is crucial for the functioning of the pre-chamber ignition, a test chamber was developed to quantify the caused internal movement inside the pre-chamber by the inflowing gas. Focus is hereby the deflection of the plasma between the spark plug electrodes. The ignition of the mixture in the MCC by the hot gas jets is investigated via multiple experiments with different pre-chamber designs both at RSR and at the IFKM. The development is supported by common simulation techniques that are correlated with the data from the measurement. The use of investigation methods such a high speed camera recording to visualize the jets and the spark are giving additional insights. The reader is given assistance for the dimensioning and the mechanical design of the passive pre-chamber ignition system.

As the well operating pre-chamber significantly changes the combustion in the MCC, the control mechanism of the engine needs to be adapted. The challenges that occur hereby, but also the benefits of the jet ignition are part of the present work.