

# Verbundvorhaben LaGaMo

## Schlussbericht zum Teilvorhaben: „Integration und Vermessung der Laserzündanlage an einem gasbetriebenen Ottomotor“

### Zuwendungsempfänger:

**2G Energietechnik GmbH**  
**Benzstraße 3**  
**48619 Heek**  
**Antragsteller:** Paul Warkentin  
**Projektleitung:** Andreas Rickert  
[a.rickert@2-g.de](mailto:a.rickert@2-g.de) , [p.warkentin@2-g.de](mailto:p.warkentin@2-g.de)

### Projektkoordinator:

Universität Bayreuth (UBT), Zentrum für Energietechnik (ZET)  
Professor Dr.-Ing. Dieter Brüggemann  
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT)  
Universitätsstr. 30  
95447 Bayreuth  
[brueggemann@uni-bayreuth.de](mailto:brueggemann@uni-bayreuth.de), [www.lttt.uni-bayreuth.de](http://www.lttt.uni-bayreuth.de)

**Förderkennzeichen:** 03EE5046B

**Vorhabenbezeichnung:** Verbundvorhaben „Laserzündung zur effektiven und emissionsarmen Verbrennung in Gasmotoren“

Teilvorhaben „Integration und Vermessung der Laserzündanlage an einem gasbetriebenen Ottomotor“

**Projektlaufzeit:** 01.09.2020 – 31.12.2023 (40 Monate)

**Berichtszeitraum:** 01.09.2020 – 31.12.2023

**Datum dieses Zwischenberichts:** 28.06.2024

### Anlagen:

- **Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht**
- **Berichtsblatt**
- **Zahlenmäßiger Nachweis für das Jahr 2023**

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor**



## Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung: .....	3
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
2	Eingehende Darstellung .....	9
2.1	Verwendung der Zuwendung .....	9
2.2	Evaluation der Zielerfüllung .....	10
2.3	Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis .....	22
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	23
2.5	Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans .....	23
2.6	Forschungsergebnisse und Fortschritte auf diesem Gebiet an anderen Stellen .....	24
2.7	Veröffentlichungen im Rahmen dieses Projektes .....	25
3	Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht .....	25
4	Kurzfassung – Berichtsblatt .....	25
5	Zahlenmäßiger Nachweis für das Jahr 2023 .....	25
6	Literaturverzeichnis .....	25

## 1 Kurze Darstellung:

### 1.1 Aufgabenstellung

Aufgabenstellung war die Entwicklung eines Laserbasierten Zündsystems, um die Verbrennung in Gasmotoren weiter zu optimieren. Besonders eine schadstoffarme hocheffiziente Verbrennung wird benötigt, um sowohl den Wirkungsgrad weiter zu steigern als auch die Umweltbelastung zu verringern.

Die Notwendigkeit dieser Verbesserung liegt unter anderem in dem Pariser Klimaabkommen. Den globalen Klimawandel und Temperaturanstieg zu bremsen kann nur erreicht werden, wenn in allen Bereichen der Energieerzeugung Anstrengungen unternommen werden. Das Konzept einer gekoppelten Strom und Wärme Erzeugung, wie es bei einem Blockheizkraftwerk der Fall ist, bietet enorme Vorteile im Gesamtwirkungsgrad. Deshalb machen weitere Verbesserungen in diesem Bereich besonders viel Sinn.

### 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In diesem Vorhaben ist 2G als Industriepartner aufgetreten und hat zum einen bei der Konstruktion der Laserzündkerze unterstützt, als auch den Motor gestellt, in dem die Tests durchgeführt wurden.

Die Konstruktion, Entwicklung und Verbrennungserprobung der Laserzündkerze wurde von den Projektpartnern durchgeführt. So hat 2G Vorgaben zu den Abmessungen der Laserzündkerze gemacht, um eine spätere Montage am Versuchsmotor zu gewährleisten.

Ebenfalls hat 2G Verbrennungsdaten der Motoren zur Verfügung gestellt, um eine möglichst genaue Nachbildung der Brennraum Atmosphäre zu ermöglichen, wie sie im Motorbetrieb unter Volllast vorzufinden wäre.

Die Laserzündkerze soll hinsichtlich der Verbrennung keine Nachteile zeigen zu der genutzten Serien Vorkammerzündkerze. Deshalb hat 2G die Serien Vorkammerzündkerze den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um für die Verbrennungsanalyse einen bekannten Vergleich zu haben.

Trotz genauer und vorausschauender Planung des Projektes, gab es Umstände, die die Planung massiv und unvorhersehbar negativ beeinflusst haben. So führte die Corona Pandemie und damit verbundene Lockdowns zu zeitweiligen Schließungen von Laboren, Büros und Produktionsstätten. Krankheitsbedingte Ausfälle in vielen Bereichen führten zu Verzögerungen. Die Pandemie fiel in die Phase, in der erste Prototypen der Laserzündkerze beschafft und aufgebaut werden sollten. Dies ist mit hohem organisatorischem Aufwand verbunden, der besonders auf Seiten der Projektpartner zu Verzögerung aufgrund von Ausfällen der Universitären Infrastruktur während der Pandemie zu Verzögerungen führte.

Das Projekt wurde aufgrund der Verzögerungen kostenneutral verlängert. Anstatt des ursprünglich geplanten Projektendes zum 31.08.2023 auf den 31.12.2023 verlängert. 2G musste für die Verlängerung keine Fördermittel umlegen, da sich der geplante Versuch und Erprobungsphase am Motor lediglich verschoben hat. Für 2G ergaben sich aus der Verschiebung keine Mehrkosten.

Regelmäßige absprachen und Projekttreffen ermöglichten einen schnellen Informationsaustausch und ermöglichte eine schnelle und flexible Anpassung des Systems. In die Änderungen konnten immer die neusten Erkenntnisse aus Versuchen und auch Erprobungen am Serienmotor von 2G einfließen.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des LaGaMo Vorhabens wurden gemeinsam die Ziele des Projekts formuliert. Damit eine Laserzündkerze entwickelt werden kann, die genau auf die Bedürfnisse eines hochaufgeladenen Erdgas Magermotors zugeschnitten ist, hat 2G den Projektpartnern Informationen, Daten und Teile des Serienmotors zur Verfügung gestellt.

Insbesondere wurden geometrische Vorgaben gemacht, um eine Problemlose Verbauung des Laserzündsystems am Verbrennungsmotor zu ermöglichen. Zusätzlich ergaben sich aus der Ziel-Motordrehzahl die Frequenz des Lasers und ein Ziel für die Lebensdauer des Laserzündsystems. All diese Informationen sind in ein Pflichten- und Lastenheft geflossen, anhand dessen das Laserzündsystem entwickelt wurde.

In der Rolle des Industriepartners war 2G maßgeblich an den Messkampagnen am Verbrennungsmotor sowie der Erstellung des Lastenhefts beteiligt. 2G hat den Projektpartnern eine herkömmliche, elektrische Vorkammerzündkerze zur Verfügung gestellt, anhand derer die Entwicklung der Laserzündkerze verglichen und bewertet werden kann.

Auf Basis einer gütegeschalteten Laserzündkerze mit externem Dioden-Pumplaser wurde das laserbasierte Zündsystem von den Projektpartnern entwickelt. Die Anforderungen an Kühlung, Länge und Beschaffenheit der Faseroptiken und geeignete Materialien der optomechanischen und optischen Komponenten des Laserzündsystems wurden von der Universität Bayreuth zusammen mit dem INFLPR und dem F-IOF ausgelegt.

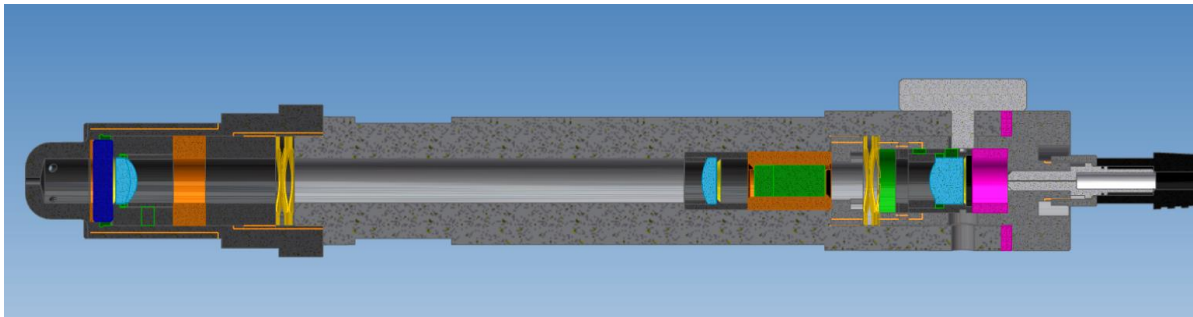
So wurde von den Projektpartnern im Jahr 2022 ein erster Alpha-Prototyp aufgebaut, der erfolgreich an einem Serien 2G Verbrennungsmotor getestet werden konnte. Anhand des Alpha-Prototypen konnte nachgewiesen werden, dass ein Zünden des Gas-Luft-Gemisches in einem Serienmäßigen Gasmotor mit Magerverbrennungskonzept möglich ist.

An dem Alpha-Prototypen zeigte sich jedoch Verbesserungspotential, welches über die verbleibende Projektlaufzeit umgesetzt und in die finalen Ausfertigungen der Laserzündkerze geflossen sind. In regelmäßigen Projekttreffen wurden die Projektfortschritte geteilt und kommende Schritte geplant. Die Projektpartner haben so über mehrere Iterationen ein Laserzündkerze entwickelt, die den Vorgaben von 2G entsprach und dennoch über eine hohe Flexibilität im verwendeten Vorkammerdesign verfügt.



**Abbildung 1: Demontierte Frontkappe der Laserzündkerze, Ausführung mit Vorkammer**

So ist die Frontkappe ein verschraubtes Bauteil (Abbildung 1), welches bei ausgebauter Laserzündkerze tauschbar ist. Dies ermöglicht eine hohe Variantenvielfalt, die im Verbrennungsmotor getestet werden kann. Da bisher keine Erfahrungen mit einer Laserbasierten Fremdzündung in einem Gasmotor vorhanden ist, ist dies ein willkommener Entwicklungsschritt, um mit wenig Aufwand die ideale Zündkerzengeometrie zu erproben.



**Abbildung 2: Konstruktion und Aufbau finale Laserzündkerze. Grundkörper (rechts) und Frontkappe (links)**

Das finale Design der Laserzündkerze zeigt diesen zweiteiligen Aufbau (Abbildung 2). Im Hauptteil der Laserzündkerze befinden sich die optischen Komponenten, um die Pumpulse mittels Glasfaser zur Laserkerze zu



führen, und dort mit Laserkristall und Linsen einen gebündelten Puls innerhalb der Vorkammer auf der linken Seite zu erzeugen. Diese Frontkappe auf der linken Seite der Laserzündkerze ist modular ausgeführt. Die Frontkappe lässt sich tauschen und ermöglicht so die Erprobung mehrerer Frontkappen, ohne für jede Variation einen neuen Grundkörper zu benötigen.

Ende des Jahres 2023 wurden die finalen Experimente mit der Laserzündkerze bei 2G in Heek an einem Serien Gasmotor durchgeführt. Aufgrund von Räumlichen Änderungen bei 2G war es nicht möglich die Laserzündkerzen an dem 4-zylinder Motor zu testen, wie ursprünglich geplant. Die Lasersicherheit konnten lediglich in einem separat aufgebauten Teststand gewährleistet werden. Da ein unbewachter Dauerlauf geplant war, und keine Daten zur Dauerfestigkeit und Dauersicherheit des Laserzündsystems bekannt waren, wurde ein Teststand gewählt, der vollkommen verschließbar ist, optisch unzugänglich ist, und der zu keiner Zeit von Mitarbeitern passiert werden muss. Der Versuch wurde deshalb an dem 6-zylinder Motor durchgeführt, an dem ebenfalls die Alpha-Prototyp Zündkerze 2022 erprobt wurde.

Der Motor entspricht in seiner gesamten Ausstattung dem Serienstand und besitzt ebenfalls Baugleiche Einheiten zum ursprünglich geplanten 4 zylindrigem Testmotor. Zylinderköpfe, Kolben, Zylinder, Brennverfahren und Peripherie sind somit baugleich zueinander, oder entsprechend skaliert, um den höheren Luft und Kühlungsbedarf der zwei zusätzlichen Zylinder zu decken.

Die finale Messkampagne wurde in zwei Etappen abgehalten. Zunächst wurde im Oktober eine Woche mit allen Projektpartnern der Gasmotor mit den Laserzündkerzen ausgestattet. So wurde das Triggersystem der Laserzündkerzen aufgebaut, mit den Pumplasern verbunden und am Verbrennungsmotor installiert. Der Plan zu Beginn der Testwoche im Oktober war es, die Laserzündkerzen im Dauerbetrieb zu erproben. So sollte der Motor mit 4 installierten Laserzündkerzen bis an das Ende des Projektes durchlaufen. Es ergaben sich jedoch innerhalb der ersten Testwoche Probleme, die dazu führten, das von einem Dauerbetrieb zunächst abgesehen werden musste. So bildeten alle Laserzündkerzen mit Vorkammer Frontkappe bei höheren Leistungen Verunreinigungen am Saphirglas, die dazu führten das der Laser nicht mehr in den Brennraum eintreten konnte, und so keine Verbrennung mehr möglich war. Ebenfalls zeigte sich, dass die Laserzündkerzen vorgeheizt werden mussten, um bei kalten Umgebungstemperaturen mit hoher Luftfeuchtigkeit sicher betrieben werden zu können.

Die Verunreinigungen der Vorkammer Frontkappen waren auf hohe Brennraumtemperaturen zurückzuführen, die den verwendeten Kleber an dem Sapphire-Glas der Frontkappe zum Schmelzen brachte. Zusammen mit den hohen Spitzendrücken in der Vorkammer und dem Brennraum unter Volllast hat sich der Kleber auf dem Sapphire-Glas verteilt, und so den Optischen Zugang zum Brennraum blockiert, sodass der Laser nicht mehr in die Vorkammer eintreten konnte, und kein Plasma mehr gebildet werden konnte, um eine Verbrennung sicher zu stellen. Dies konnte auch bei einem Testaufbau mit ausgebauten Laserzündkerzen neben dem Motor gezeigt werden. Sind die Kerzen funktionstüchtig, ist ein sichtbarer Plasmadurchbruch in der Luft zu sehen, der durch den Laser hervorgerufen wird (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Optisch sichtbarer Plasmadurchbruch bei einer Laserzündkerze. Zwei Kerzen mit verschiedenen Frontkappen sind gezeigt, im Hintergrund mit einer 11mm Fokuslinse, im Vordergrund mit einer 8 mm Fokuslinse**

Dasselbe Phänomen ereignet sich ebenfalls bei kalt Verbauten Laserzündkerzen. Dort sorgen nach kurzer Betriebsdauer Kondenswasser Tröpfchen auf der Linse für ein Änderung im optischen System der Laserzündkerze, welches dazu führt das kein Plasma mehr innerhalb des Brennraums gebildet werden kann. Das Kaltstartverhalten der Laserzündkerze war jedoch zu jeder Zeit hervorragend. Die Vermutung liegt nahe, dass die Laserzündkerzen ungleichmäßig aufheizen. So erreicht die Frontkappe zuerst Betriebstemperatur, während Bauteile weiter entfernt vom Brennraum sich noch nicht aufheizen konnten. Hinzu kommt, dass die Laserzündkerze, genau wie eine herkömmliche Zündkerze, nicht zu 100% abdichtet. Verbrennungsgase finden den Weg an dem Sapphire-Glas vorbei, und schlagen sich an kalten Teilen der Zündkerze nieder. Da die Linse am oberen Teil der Laserzündkerze zuletzt die Temperatur des metallischen Grundkörpers annimmt, ist anzunehmen das dort sich zum Zeitpunkt des Ausfalls die Feuchtigkeit niederschlägt, und so das Durchdringen des Lasers verhindert. Wird die Laserzündkerze vor dem Einbau in den Motor auf Betriebstemperatur gebracht, kann diese Problem nicht mehr auftreten und erlaubt so einen sicheren Motorstart.

Außerdem tritt dieses Problem auch nicht bei jedem Kaltstart auf, es wird dort einen erheblichen Zusammenhang zur Herrschenden Luftfeuchtigkeit geben. Dies konnte in den Messreihen auch beobachtet werden. Ausfälle, aufgrund von Kondenswasserbildung gab es besonders an den Tagen, an denen es entweder regnete, oder neblig war.

Aufgrund der Probleme in der ersten Messwoche, haben alle Projektpartner gemeinschaftlich entschieden von einem Dauerbetrieb abzusehen, und eine zweite Messkampagne Ende November durchzuführen. So konnte man in der zweiten Testwoche mehr Betriebszeit sammeln, und die bisher gewonnenen Erkenntnisse in die Überarbeitung und weitere Planung stecken.

Die zweite Messkampagne wurde erneut gemeinsam mit allen Projektpartnern in Heek abgehalten. So flossen die gesammelten Erfahrungen in die Überarbeitung der Frontkappen der Laserzündkerzen. Ebenfalls wurden die Laserzündkerzen auf defekte geprüft. So zeigten alle Laserzündkerzen mit einer 8mm Fokuslinse Schäden im Glas. Aufgrund der kurzen Zeit zwischen den Messkampagnen konnte kein Ersatz für die Beschädigten Linsen beschafft werden, und die Linsen wurden umgerüstet auf Linsen mit einem 11mm Fokuspunkt. Der veränderte Fokuspunkt liegt bei den Frontkappen mit Vorkammer zu tief in der Vorkammer, so dass das Plasma in der Austrittsbohrung der Vorkammer gebildet werden würde. Deshalb wurden ebenfalls die Frontkappen nachbearbeitet.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Förderantrag des Projekts LaGaMo wurde auf den zum Zeitpunkt des Antrags herrschenden Stand der Technik eingegangen. Der Stand der Technik wird an dieser Stelle erneut zusammengefasst und aktualisiert.

Um immer schärfer notwendig werdende Abgasgrenzwerte einzuhalten (Bundesministerium für Umwelt, 2016), ohne dabei deutliche Einbußen im Wirkungsgrad verzeichnen zu müssen oder eine aufwändige und kostenintensive Abgasnachbehandlung zu benötigen, wird schon seit einiger Zeit bei stationären Großgasmotoren ein Magerbrennverfahren angewandt. Auf diese Weise können Verbrennungstemperaturen niedrig gehalten werden, was die entstehenden Stickoxide während der Verbrennung deutlich reduziert. Jedoch bringt diese Art der Verbrennung eigene Herausforderungen mit sich. Eine solch magere Verbrennung benötigt einen enormen Luftüberschuss. Um vertretbare Leistung und Wirkungsgrade zu erreichen, wird eine Motoraufladung per Turbolader umgesetzt für Großgasmotoren mit Magerbrennverfahren. In Verbindung mit einer hohen Verdichtung, ergeben sich zusammen mit der hohen Aufladung sehr hohe Zylinderdrücke zum Zündzeitpunkt. Dieser erhöhte Zylinderdruck zum Zündzeitpunkt erhöht den Zündspannungsbedarf signifikant, sodass mit einer deutlich verringerten Lebensdauer der regulären elektrischen Zündkerze zu rechnen ist. (G. Herdin, 2005) (J. Biet, 2014) (H. Kopecek, 2003)

Erschwerend hinzu kommt dabei das magere Gemisch im Brennraum. So gibt es weniger Brenngas welches durch den Lichtbogen entzündet werden kann. Dies erhöht den Bedarf an Zündenergie zusätzlich, da in der Regel bei mageren Gemischen ein größerer Lichtbogen benötigt wird, der zusätzlich für eine längere Zeit gehalten werden muss, um eine zuverlässige Verbrennung zu initiieren. Außerdem führen magere Gemische zu einer deutlich abnehmenden Flammgeschwindigkeit, welche die Zyklusschwankung negativ beeinflusst, (D.K. Srivastava, 2014) (C. Gong, 2020).

Eine Zündung per Laserinduziertem Plasma profitiert hingegen von den erhöhten Zylinderdrücken (H. Kopecek, 2003). Die erhöhte Teilchendichte bei hohen Drücken ermöglicht eine bessere Energieabsorption und erleichtert somit die Bildung von Plasma. So lässt sich mit Hilfe der Laserzündung die Magergrenze erweitern (S. Yamaguchi, 2015) und zusätzlich die Verbrennungsstabilität verbessern (J.D. Mullett P. D., 2008) (J.D. Mullett R. D., 2007). Außerdem lässt sich der Fokuspunkt der Laserzündkerze frei wählen. So kann man den Startpunkt der Verbrennung räumlich frei wählen. Man ist nicht durch eine Elektrode mit Maskeband wie bei einer herkömmlichen Zündkerze begrenzt, welche sich immer in Nähe des Zylinderkopfes befinden muss. Herkömmliche Zündkerzen lassen sich bei hochaufgeladenen Magergasmotoren nicht mittig im Brennraum platzieren, da die Zündkerze thermisch überlastet werden würde.

Obwohl diese Vorteile einer Laserzündkerze deutlich sind, und eine Laserzündkerze keinen Verschleiß zu erwarten hat, sind keine kommerziell erhältliche Verbrennungsmotoren bekannt, die über eine Laserzündkerze betrieben werden. Auch sind keine aufgeladenen Großgasmotoren bekannt, die langfristig mit einer Laserzündanlage betrieben wurden.

Für die Bewertung der Verbrennung mit Fremdzündung durch ein per Laserzündkerze erzeugtes Plasma im Brennraum werden gängige Messverfahren zur Bewertung der Verbrennung genutzt. So wird der Brennraum mit Hilfe von Hochgeschwindigkeits-Drucksensoren induziert und die Daten nach gängigen Parametern bewertet. So lässt sich die Verbrennungsstabilität (COV) bewerten, und ebenfalls Daten wie Verbrennungsgeschwindigkeit und maximaler Spitzendruck zur Überprüfung der Vorangegangenen Thesen und aus Laborversuchen bekannten Vorteile der Laserzündkerze nutzen.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu dem Erfolg des Projektes hat die gute und reibungslose Zusammenarbeit zwischen den Partnern einen erheblichen Teil zu beigetragen. Es wurden regelmäßige Projekttreffen abgehalten, um den aktuellen Entwicklungsstand vorzustellen, sich auszutauschen und die Entwicklung voranzubringen. Während der Entwicklung und des Aufbaus des Laserzündsystems war 2G nicht an den Workshops und Treffen in den Laboren der Projektpartner beteiligt. Darin bestand auch keine Notwendigkeit, da 2G die Entwicklung des



Laserzündsystems nicht produktiv unterstützen konnte. 2G entwarf für das Projekt ein Pflichten und Lastenheft und stellte einen Versuchsmotor samt Personal zur Erprobung des finalen Zündsystems. Die Entwicklung und Auslegung des Pumplasers, der Optiken sowie der Konstruktion und Erprobung der Laserkomponenten wurden von den Projektpartnern durchgeführt, die dort ihre Kernkompetenz besitzen.

Als die ersten funktionsfähigen Prototypen entwickelt wurden, wurden gemeinsame Projekttreffen in Heek bei 2G geplant, um die Funktion der Laserzündkerze am Serienmotor zu erproben. Zuerst Ende des Jahres 2022, wo der erste Alpha Prototyp getestet wurde, und die generelle Funktion des Laserzündsystems bewiesen werden konnte. Die daraus gelernten Punkte sind in die Weiterentwicklung des Laserzündsystems geflossen, sodass zu den abschließenden Projekttreffen in Heek zwei Messkampagnen gefahren wurden. An den Versuchen bei 2G in Heek waren immer alle Projektpartner anwesend und so konnten kleine Probleme vor Ort direkt gelöst werden. Ebenfalls wurden in den Versuchen viele Erfahrungen gesammelt.

Diese gemeinsame, effiziente, analytische und zielorientierte Arbeit aller Projektpartner miteinander hat enorm zu dem Erfolg des Forschungsprojektes beigetragen. Insbesondere hinsichtlich erschwerter Bedingungen durch die langanhaltende Pandemie. Ebenfalls hat die gute Zusammenarbeit sich als Vorteil erwiesen, wenn bei Versuchen unerwartete Hindernisse auftraten, wie es bei Forschungsprojekten eines solchen Umfangs durchaus üblich ist.



## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung

Das technische Ziel des Förderprojektes war es ein neues Laserzündsystem zu entwickeln, welches an einem Großgasmotor verwendet werden kann. Insbesondere soll das System an einem Serienmäßigen 2G BHKW mit magerbrennverfahren verwendet werden können. Dieses Ziel wurde in vollem Umfang erreicht. Am Ende des Projektes war ein nutzbares Laserzündsystem aufgebaut, welches aus sechs Laserzündkerzen bestand, von denen maximal vier Laserzündkerzen gleichzeitig betrieben werden konnten. Das System umfasst eine Kontrolleinheit mit vier Pumplasern und Faseroptiken. Zwei der sechs Laserzündkerzen sind als Reserve vorgesehen. Die Laserzündkerzen können mit unterschiedlichen Frontkappen ausgestattet werden, die eine Vielzahl von Varianten ergeben. An einem serienmäßigen 2G Aggregat konnte das System ausgiebig getestet werden, und hat dort die Funktionsfähigkeit der Laserzündanlage bewiesen.

Bei 2G wurden ein Großteil der Fördermittel für Personalkosten aufgewendet. So wurden sowohl für die Betreuung des Projektes ein Projektingenieur benötigt als auch mehrere Techniker und einen Prüfstands Ingenieur, die den Betrieb und die Vorbereitung des Testmotors und der Messkampagne verantworten. Ebenfalls wurde ein Teil der Fördermittel für den Betrieb und Aufbau des Testmotors verwendet.

So wurde in AP1 das Pflichten- und Lastenheft erstellt, welches vollständig innerhalb des vorgemerkten Zeitplans fertiggestellt wurde. In diesem Arbeitspaket entfiel ein Großteil der Zuwendung auf Personalkosten.

Das erstellte Pflichten- und Lastenheft wurde in den folgenden Arbeitspaketen berücksichtigt. AP 2.1, das Entwickeln eines Designs für die Laserzündkerze erfolgte ohne Beteiligung von 2G. Das Design der Motorinfrastruktur, AP2.2, wurde von 2G unterstützt. Innerhalb des zweiten Halbjahres 2022 begannen die Hauptarbeiten für 2G. Hierzu gehören erste testweise Installation der Laserzündanlage und des Prototypentests auf dem 2G Verbrennungsmotor. Zuvor musste hierfür der Einbau ermöglicht werden, indem die Hülse des Zylinderkopfes modifiziert wurde und ein Montagewerkzeug entwickelt und beauftragt wurde. Die Tests passierten im Rahmen einer gemeinsamen Projektwoche in Kooperation mit der Uni Bayreuth, dem Fraunhofer IOF und dem INFLPR. Im Rahmen des Tests konnte ein erster Betrieb realisiert werden. Weiterhin wurde Ende des Jahres mit den Integrationsarbeiten des Motors für den Dauerversuch begonnen. AP 3.1, die Implementierung der Laserzündkerze, wurde ebenfalls ohne Beteiligung von 2G durchgeführt und abgeschlossen. Die Implementierung in die Motorinfrastruktur in Arbeitspaket 3.2 wurde durch 2G unterstützt. So hat 2G die Frontkappen Druckgetestet und Feedback zur Konstruktion und dem Aufbau der Frontkappen gegeben. So konnten Frontkappen aufgebaut werden, die vom Vorkammerdesign der 2G Serienkerze entsprechen, und Problemfrei am Serienmotor verbaut werden können.

Im Arbeitspaket 4 wurden Zuwendungen genutzt, um Personalkosten zu decken. 2G ist in diesem Arbeitspaket in der Bewertung und den Umstieg der Laserzündung vom Laborbetrieb an den Verbrennungsmotor unterstützend tätig. So hat 2G anhand der erarbeiteten Daten aus Versuchen der Projektpartner den Prüfstandsbetrieb geplant und vorbereitet.

Arbeitspaket 5 bezog sich auf den finalen Test am Motor. In diesem Arbeitspaket wurde ein Großteil der gesamten Zuwendungen genutzt. So hat 2G mit mehreren Mitarbeitern den Betrieb der Laserzündkerze am Verbrennungsmotor umgesetzt, und Tests zusammen mit den Projektpartnern durchgeführt. Die finalen Messkampagnen sind mit in dieses Arbeitspaket gefallen. Zuwendungen in AP 5 wurden ebenfalls für den Betrieb des Motors genutzt. Darunter fallen Gaskosten, der Zeitwert samt verschleiß des Motors über die Testdauer und die Vorbereitung des Prüfstands durch einen Prüfstandstechniker.

## 2.2 Evaluation der Zielerfüllung

Für die Laserzündanlage wurden zum Projektbeginn Ziele festgelegt bezüglich der Funktion und den zu gewünschten Vorteilen gegenüber einer konventionellen, elektrischen Zündanlage.

So wurde als Grundvoraussetzung für die Funktion und Test am Motor geometrische Vorgaben gemacht zu den Abmessungen des Bauraums, in dem die Laserzündkerze installiert werden kann. Diese Vorgabe wurde schon früh in der Projektphase erfüllt, nachdem der erste Alpha-Prototyp aufgebaut wurde, und dieser an einem 2G Motor erprobt wurde. Daraufhin gab es Anpassungen an der Frontkappe, die die Modularität verbesserten, um schneller eine größere Variantenvielfalt zu testen. Ebenfalls wurde dadurch die Zuverlässigkeit der Laserzündkerze verbessert, da die Frontkappe nun das Glas zum Brennraum mechanisch fixiert, anstatt es ausschließlich zu verkleben.

Um zu prüfen welche Ziele in welchem Maße erfüllt werden konnten, wurden die finalen Laserzündkerzen in zwei gemeinsamen Projekttreffen mit allen Projektpartnern am Serienmotor bei 2G in Heek vermessen. Die Messungen wurden an einem Sechszylinder Motor durchgeführt, bei dem zwei Zylinder über eine Drucksensoren indiziert werden. Diese zwei Zylinder wurden genutzt, um die verschiedenen Varianten der Laserzündkerzen zu vermessen und zu vergleichen.

So wurde in der ersten Messkampagne im Oktober 2023 das Laserzündsystem erfolgreich in Betrieb genommen. Zuerst wurden alle Laserzündkerzen einzeln getestet und vermessen. Abschließend wurden vier Zylinder mit Laserzündkerzen ausgestattet. Aufgrund von technischen Problemen waren nur drei der vier Laserzündkerzen funktionstüchtig, sodass die defekte Kerze wieder gegen eine elektrische Zündkerze getauscht wurde. In dieser Konfiguration wurde der Motor mehrere Stunden betrieben. Somit wurde bewiesen, dass ein funktionierendes, laserbasiertes Zündsystem entwickelt wurde. Damit war eines der Ziele erfüllt.

In der ersten Messkampagne wurden jedoch noch Schwachstellen in dem Design der Laserzündkerzen gefunden. Diese wurden bis zur zweiten Messkampagne behandelt und weitestgehend behoben. So wurden dann Ende November die finalen Messungen durchgeführt.

Die Überarbeitungen beinhalteten kleine Änderungen an den Frontkappen, sowie weitere leichte Detailanpassungen an den Linsen der Zündkerzen. Äußerlich sind die Verschiedenen Varianten der Laserzündkerze nur durch die verwendete Frontkappe zu unterscheiden. In Abbildung 4 sind diese beiden Varianten dargestellt.



**Abbildung 4:** zwei Laserzündkerzen mit den verfügbaren Frontkappen Varianten. Links: offene Frontkappe, Rechts: Frontkappe mit Vorkammer

Die Zündkerzen wurden in mehreren stationären Betriebspunkten getestet. Die Drehzahl wurde konstant bei 1500 U/min gehalten, genauso wurde im Betrieb ein konstanter Zündwinkel gewählt. Die Zündkerzen wurden bei 3 Leistungen vermessen, 200 kW, 250 kW und 275 kW. Dies entspricht Mitteldrücken von 14 bar, 17,5 bar und 19 bar. Dabei wurde in den Betriebspunkten mit 200 kW und 250 kW Leistung zusätzlich die Magergrenze angefahren und vermessen.

In der finalen Messkampagne wurden lediglich die 3 Varianten der Laserzündkerze vermessen, die eine Brennweite von 11mm haben. In der ersten Messkampagne traten Probleme mit den Linsen mit 8mm Brennweite auf. Aufgrund der Kurzen Zeit zwischen den Messkampagnen konnten diese Probleme nicht bis zur finalen Messkampagne gelöst werden. Somit stehen für die Messungen die folgenden Zündkerzenvarianten zur Verfügung:

1. Laserzündkerze mit 11 mm Brennweite ohne Vorkammer
2. Laserzündkerze mit 11 mm Brennweite mit Vorkammer und verklebte Linse
3. Laserzündkerze mit 11 mm Brennweite mit Vorkammer ohne verklebte Linse

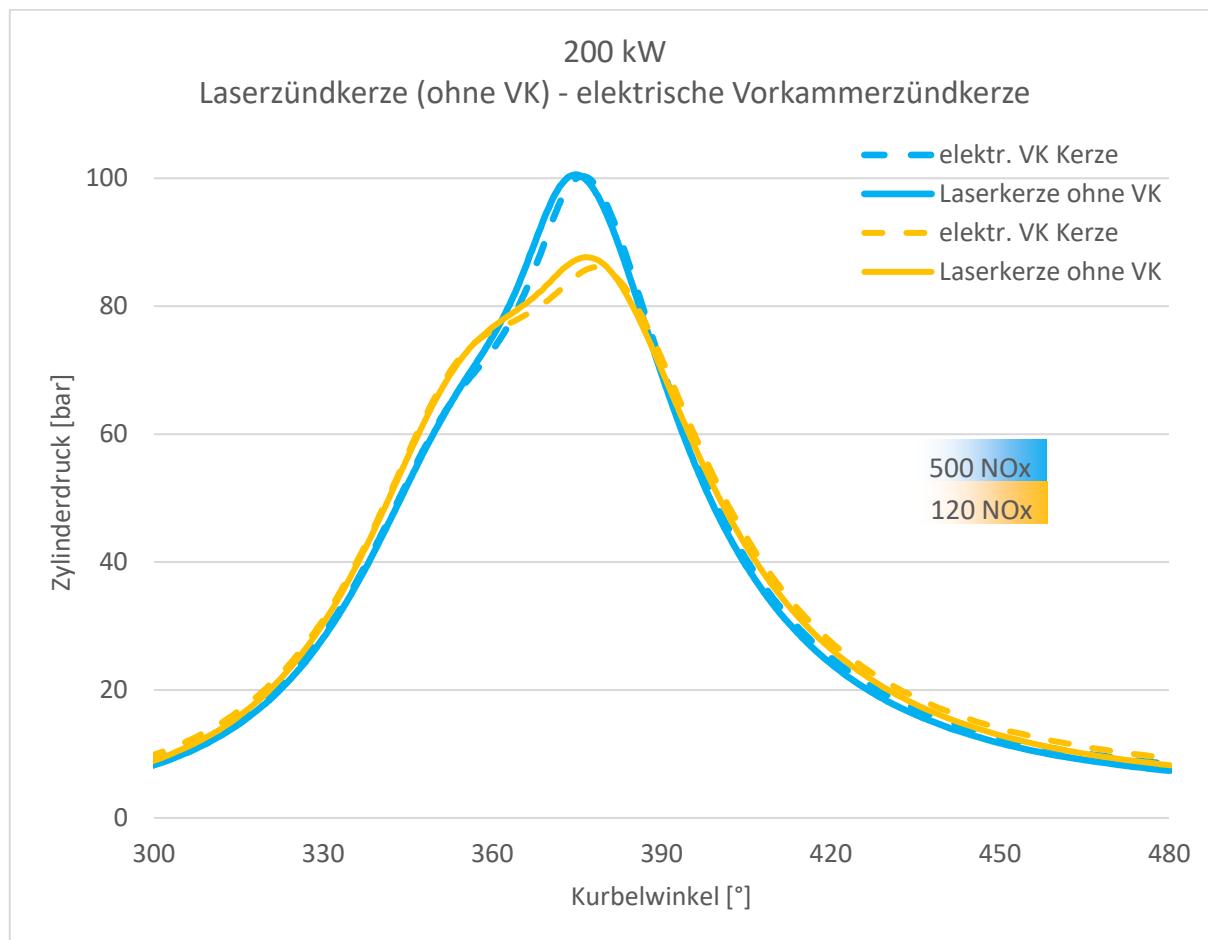
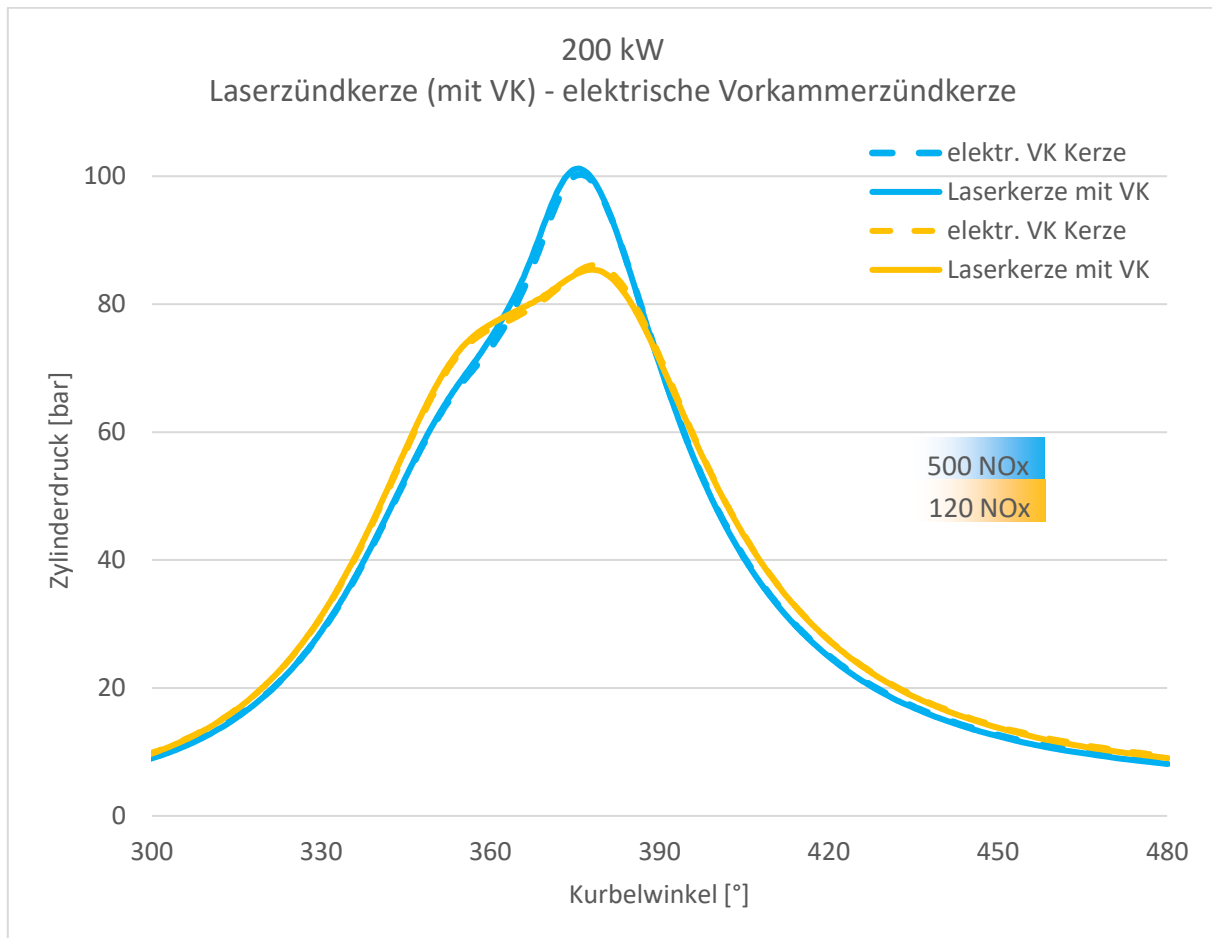


Abbildung 5: Zylinderdruckverlauf bei 200 kW, Vergleich Laserzündkerze ohne Vorkammer mit elektrischer Vorkammerzündkerze

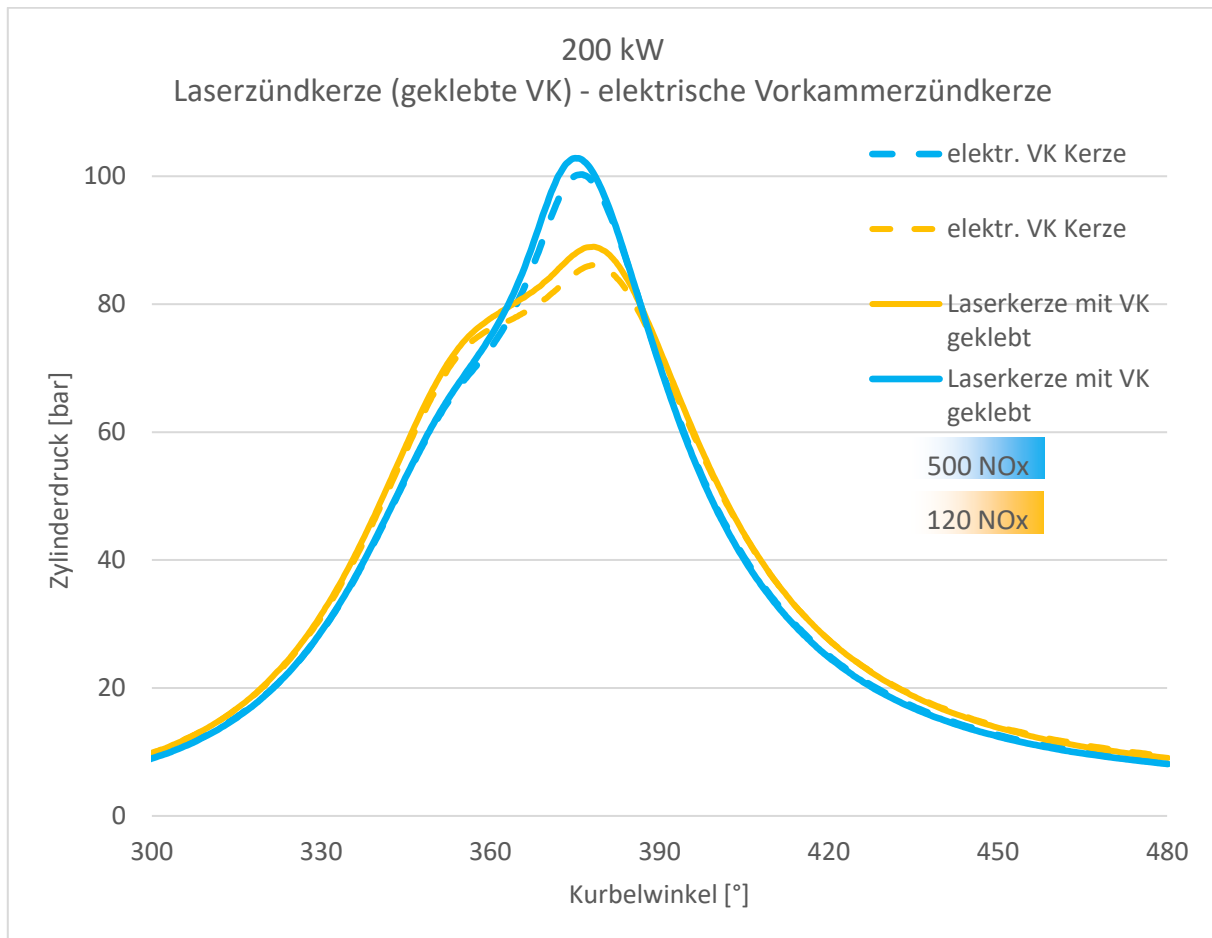
In der Abbildung 5 werden die Druckverläufe von elektrischer Vorkammerzündkerze mit einer Laserzündkerze ohne Vorkammer verglichen. Gemessen wurde dabei zum einen bei dem regulären Betriebspunkt mit einer NO<sub>x</sub> Konzentration im Abgas von 500 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> und zum anderen bei der magergrenze mit einer Abgaskonzentration von 120 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>. Diese Betriebspunkte entsprechen einem innermotorischen  $\lambda$  von 1,8 bei 500 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>, respektive  $\lambda = 1,97$  bei 120 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>. Es zeigt sich, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit mit der laserbasierten Zündung marginal schneller ist. Der maximale Verbrennungsdruck ist über 50 Zyklen gemittelt bei einem  $\lambda$  von 1,8 mit der Laserzündkerze 0,28% höher als bei einer elektrischen Vorkammerzündkerze. Diese Abweichung ist innerhalb des Toleranzbereichs. Bei  $\lambda = 1,97$  zeigt die Laserzündkerze jedoch im mittel über 50 Werte einen um 2,1% höheren Spitzendruck. Ebenfalls ist eine schnellere Verbrennung zu erkennen.



**Abbildung 6: Zylinderdruckverlauf bei 200 kW, Vergleich Laserzündkerze mit Vorkammer (geklemmtes Saphirglasfenster) mit elektrischer Vorkammerzündkerze**

Wird die Laserzündkerze mit einer Frontkappe mit Vorkammer betrieben, nähern sich die Druckverläufe der elektrischen Vorkammerzündkerze an (Abbildung 6). Im Durchschnitt über 50 Zyklen ist der Druckanstieg nach dem Zündzeitpunkt minimal stärker mit der Laserzündkerze, was eine schnellere Verbrennung innerhalb der Vorkammer erahnen lässt. Der Vorteil, den die Laserzündung im offenen Brennraum hat bezüglich der Verbrennung bei hohem Luftüberschuss scheint mit einer Vorkammer nicht mehr zu existieren. Dort ist die Energie in der Vorkammer für die Verbrennungsgeschwindigkeit im Brennraum entscheidend. Die Vorkammer vergrößert über mehrere Überströmbohrungen die Fackelfläche im Hauptbrennraum. Die Energie der Fackeln bestimmt sich insbesondere durch die Temperatur und den Druck, der in der Vorkammer entsteht.

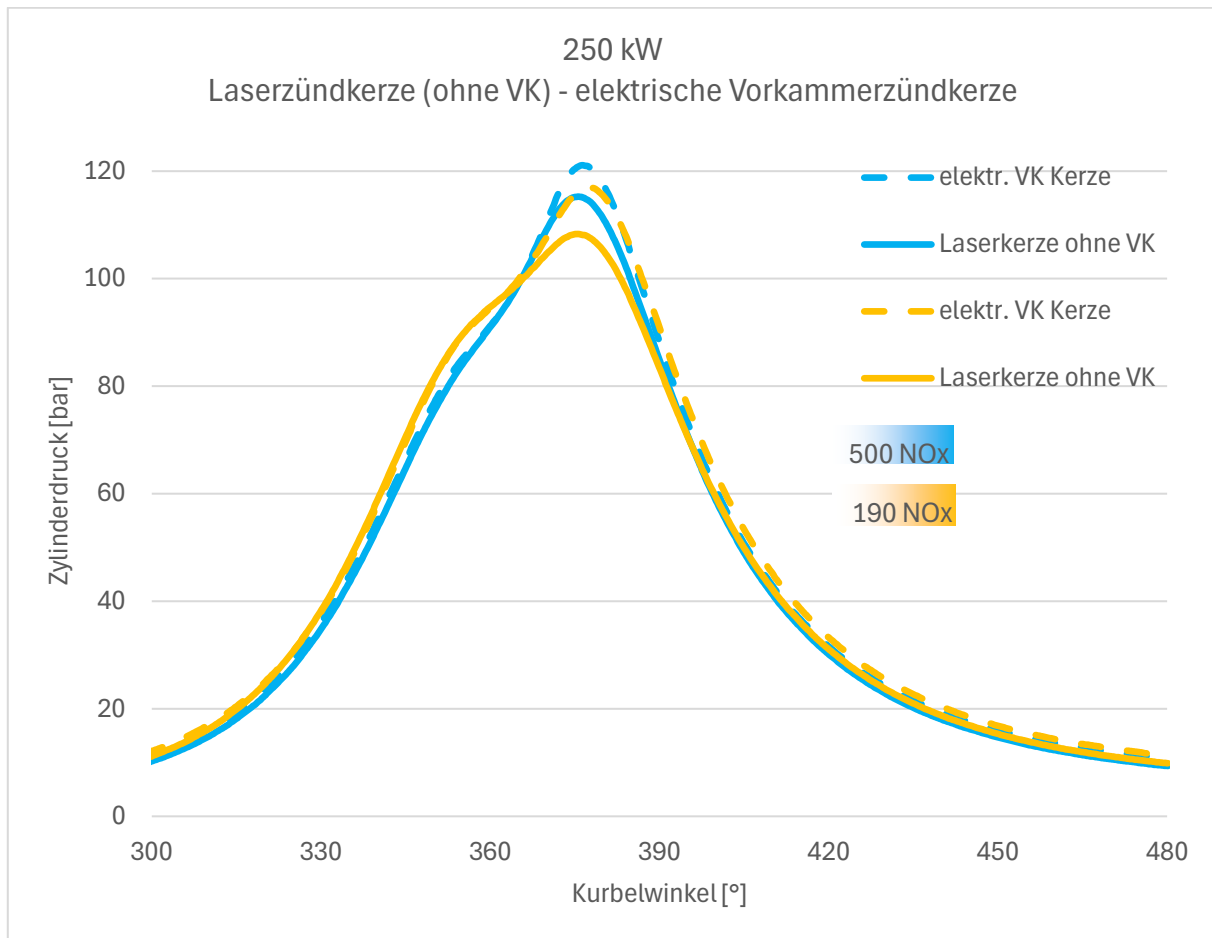
In Abbildung 7 ist zu sehen, dass die Frontkappe mit verklebtem Saphirglasfenster einen anderen Verlauf zeigt. So wird die Laserzündkerze mit geklebter Linse in der Frontkappe einen höheren Druck gehalten haben, woraus sich die verbesserte Verbrennungsgeschwindigkeit und den höheren maximalen Brennraumdruck erklären lassen. Das geklebte Saphirglasfenster wird eine deutlich geringere Leckagerate besitzen als die Frontkappe mit einer geklemmten Linse. Die verklebte Frontkappe wird auch verglichen mit einer elektrischen Vorkammerzündkerze Vorteile bieten.



**Abbildung 7: Zylinderdruckverlauf bei 200 kW, Vergleich Laserzündkerze mit Vorkammer (geklebtes Saphirglasfenster) mit elektrischer Vorkammerzündkerze**

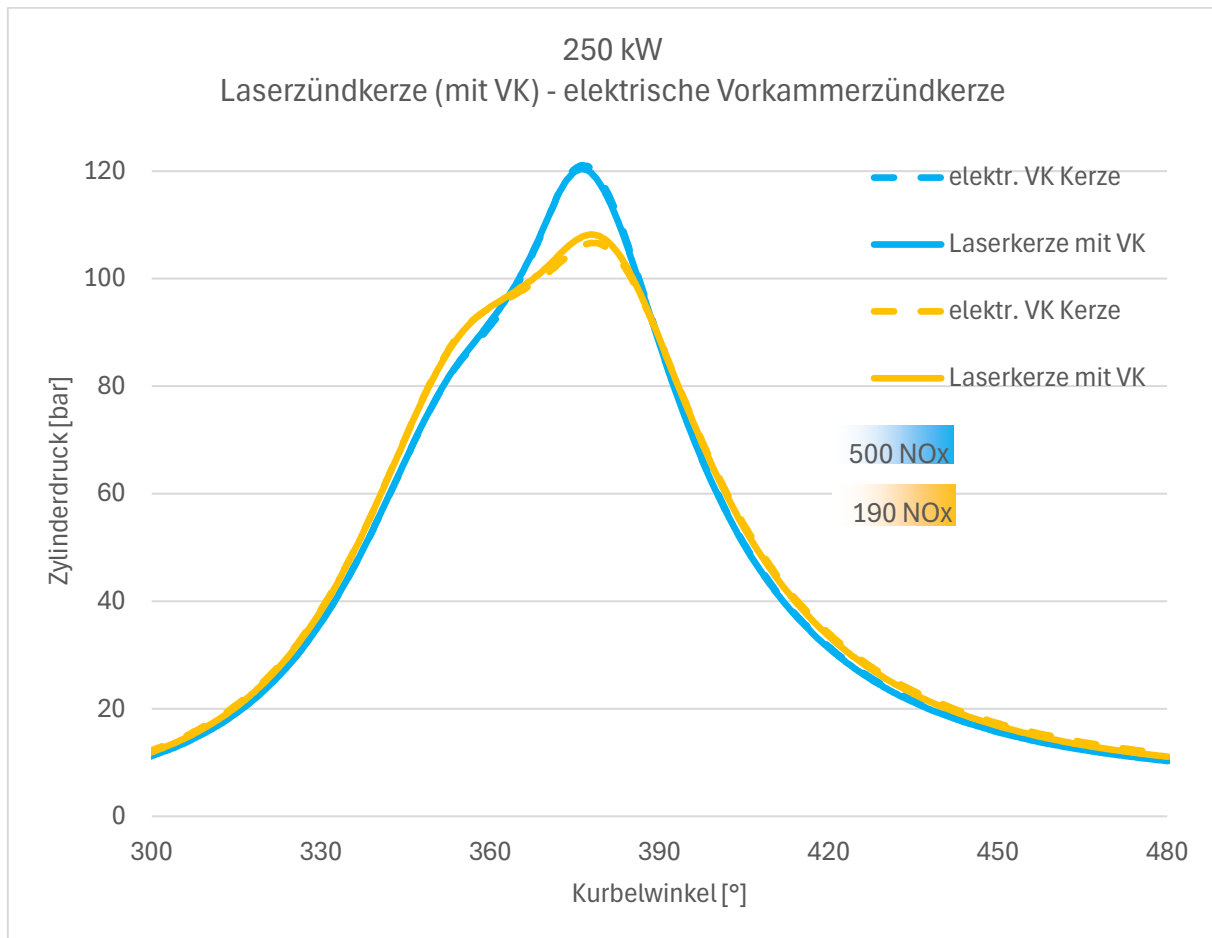
Die Verklebte Vorkammer zeigt einen um 2,3 % höheren Spitzendruck bei der Verbrennung mit Abgaswerten von 500 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>. Ebenfalls ist der Druckanstieg steiler und die Verbrennungsgeschwindigkeit marginal schneller, was auf eine bessere Verbrennung in der Vorkammer der Laserzündkerze hindeutet. Noch eindeutiger zeigt sich das Phänomen schon wie bei der offenen Laserzündkerze unter einer sehr mageren Brennraumatmosfera mit einem  $\lambda$  von 1,97. Dort besitzt die Laserzündkerze mit geklebter Vorkammer einen 5,6% höheren Spitzendruck im Mittel von 50 Messungen im Vergleich zu einer herkömmlichen elektrischen Vorkammerzündkerze.

Bei einer Motorleistung von 200kW ist die Laserzündkerze in jeder Variante und jedem Lambda wenigstens gleich gut verglichen mit einer Regulären elektrischen Vorkammerzündkerze. Wird der Motor mit einem sehr mageren Gasgemisch betrieben, zeigt die Laserzündkerze deutliche Vorteile in der Verbrennung.



**Abbildung 8: Zylinderdruckverlauf bei 250 kW, Vergleich Laserzündkerze ohne Vorkammer mit elektrischer Vorkammerzündkerze**

Wird die Motorleistung und damit auch der Zylinderdruck erhöht, verliert die Laserzündkerze ohne Vorkammer Ihre Vorteile bei 500 NOx/Nm<sup>3</sup>. Dies ist sehr deutlich in den Zylinderdruckverläufen in der Abbildung 8 zu sehen. Die initiale Verbrennungsgeschwindigkeit nimmt ab, und es wird ein um 9,3 % geringerer Spitzendruck erreicht als mit einer elektrischen Vorkammerzündkerze. Bei einem Motorbetrieb nahe der Magergrenze zeigt die offene Laserkerze ebenfalls keine Vorteile. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist niedriger, insbesondere der Spitzendruck ist um 8,03 % geringer als bei der elektrischen Vorkammerzündkerze. Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeit bei mehr Leistung am Zündort besitzt eine Vorkammerzündung deutliche Vorteile. So ist der Zündort vor turbulenter Strömung geschützt und es kann sich eine erste Flammenfront innerhalb der Vorkammer ausbilden, die ihre Energie über die Überstrombohrungen an mehrere Orte des Brennraums zeitgleich ausgeben kann.



**Abbildung 9: Zylinderdruckverlauf bei 250 kW, Vergleich Laserzündkerze mit Vorkammer (geklebtes Saphirglasfenster) mit elektrischer Vorkammerzündkerze**

Abbildung 9 zeigt, wie bereits bei einer Leistung von 200 kW schon, das sich die Laserzündkerze mit Vorkammer sehr ähnlich zu einer elektrischen Zündkerze mit Vorkammer verhält. Unter mageren Bedingungen scheint erneut die initiale Verbrennung innerhalb der Vorkammer schneller statt zu finden. Der Druckaufbau bei 190 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> ist steiler, ebenfalls ist der Spitzendruck um 1,2 % höher. Da es sich um eine passive, nicht gespülte Vorkammer handelt, befindet sich innerhalb der Vorkammer dasselbe Gemisch wie im gesamten Brennraum. So sollten dieselben Vorteile, die mit der Laserzündkerze in der Vorkammer gemessen wurden, auch in der Vorkammer selbst herrschen.

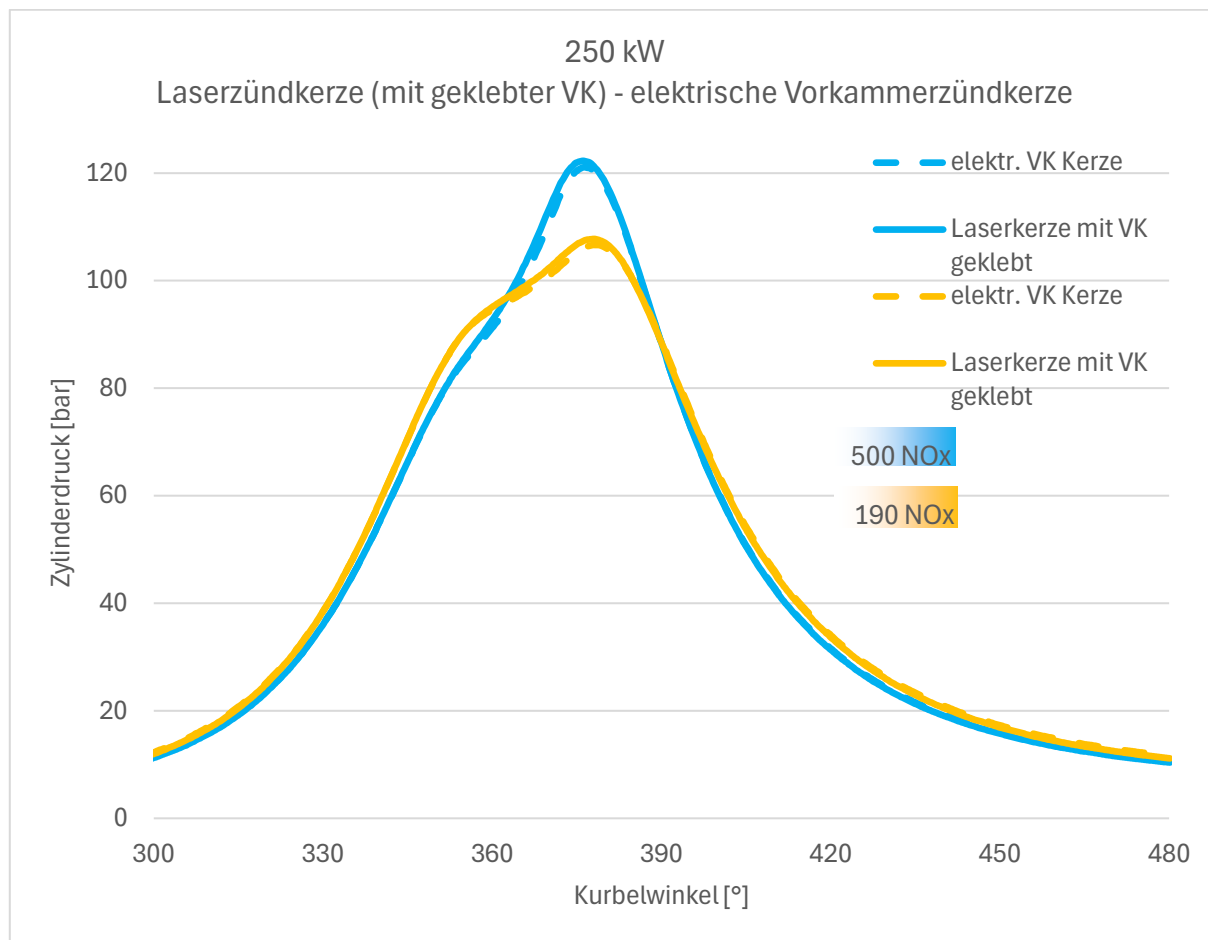
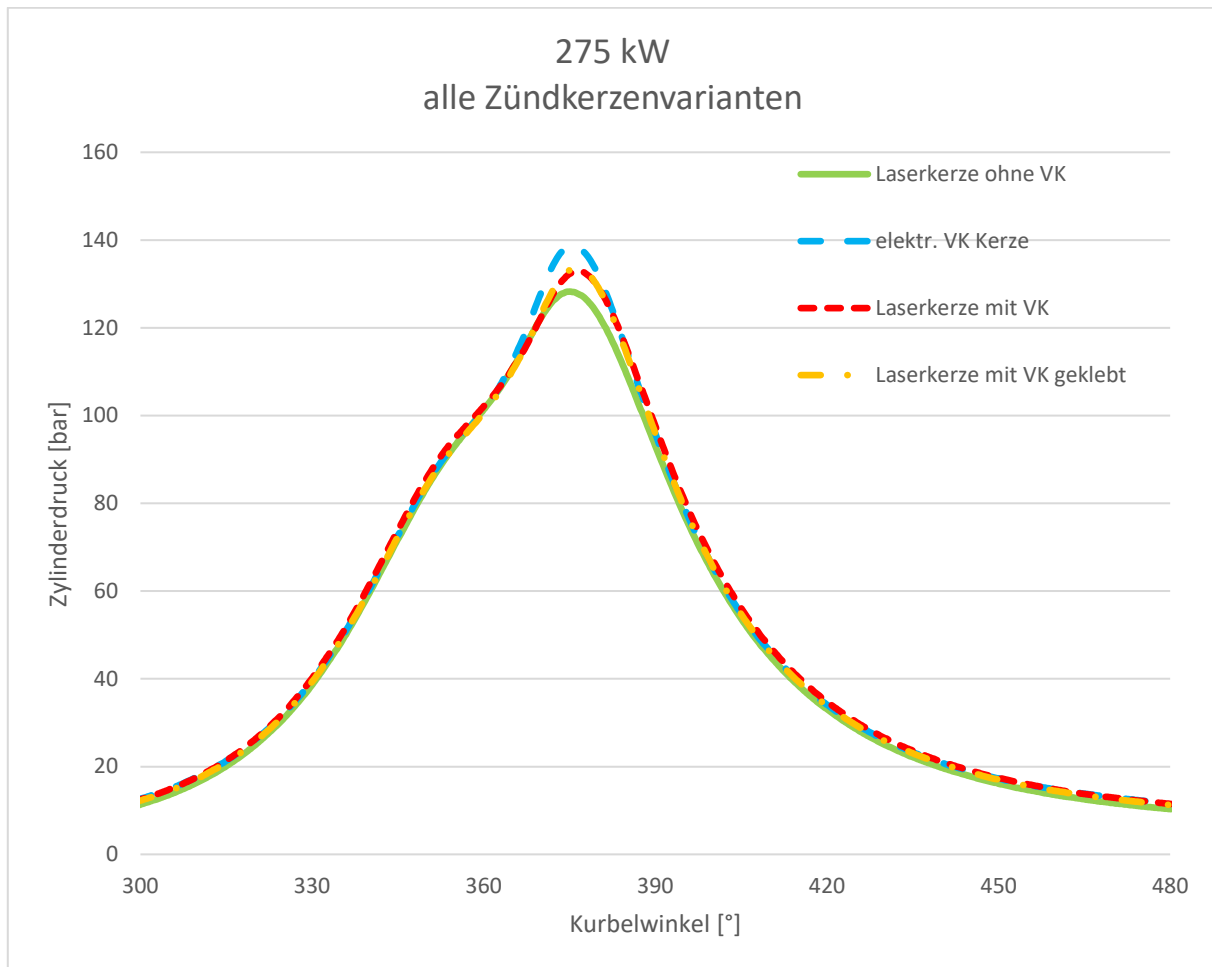


Abbildung 10: Zylinderdruckverlauf bei 250 kW, Vergleich Laserzündkerze mit Vorkammer (geklebtes Saphirglasfenster) mit elektrischer Vorkammerzündkerze

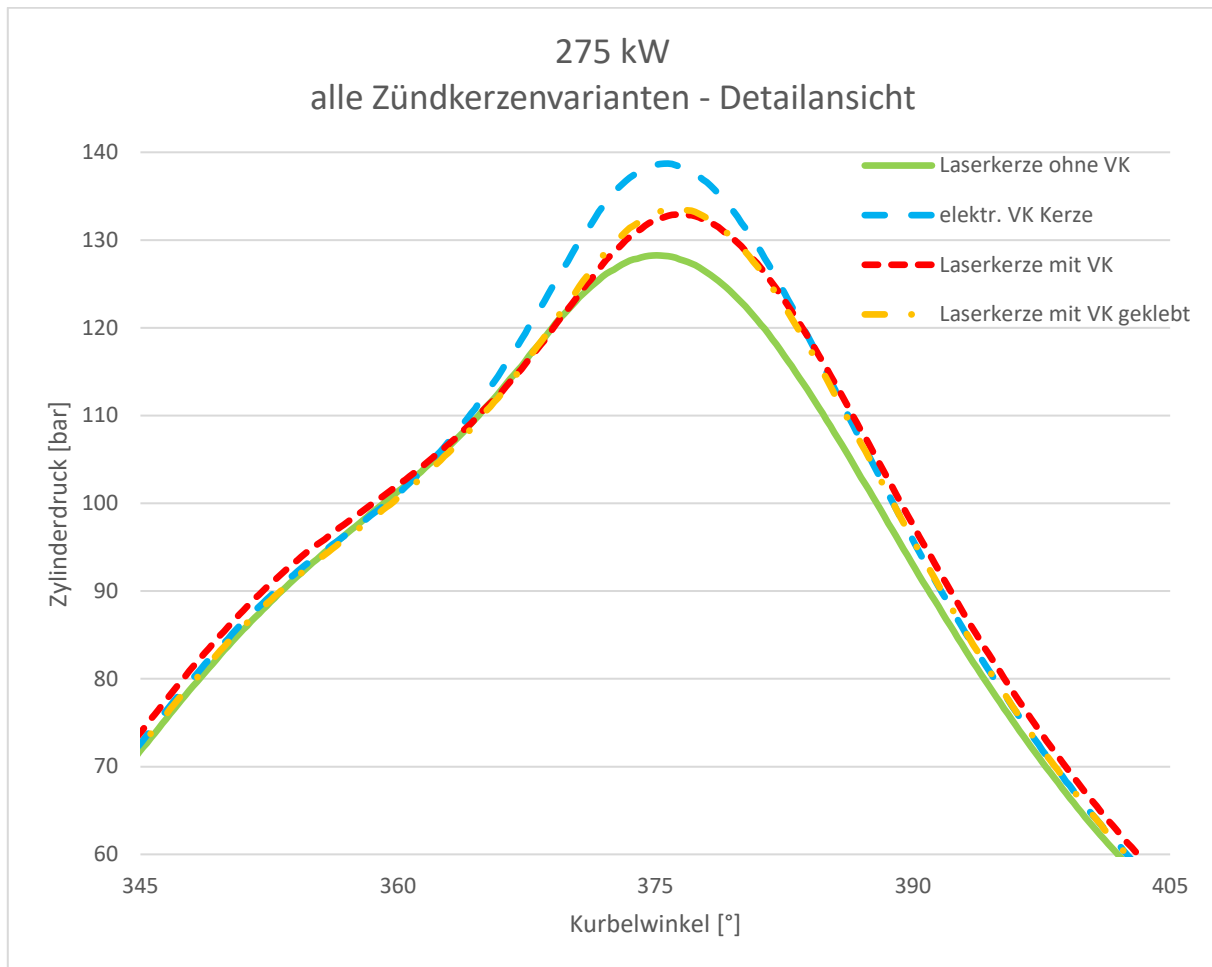
Mit einem verklebten Saphirglasfenster in der Frontkappe verhalten sich die Druckkurven ähnlich. So ist kein großer Unterschied zur Frontkappe mit geklemmtem Fenster ersichtlich. Abbildung 10 zeigt sehr ähnliche Druckkurven, jedoch mit einer etwas besseren Leistung im Betrieb mit 500 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup>. Die Laserzündkerze erreicht etwas höhere Spitzendrücke. Bei einer Verbrennung mit 500 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> 0,98%, bei 190 NO<sub>x</sub>/Nm<sup>3</sup> sind es hingegen 1,01%.



**Abbildung 11: Zylinderdruckverlauf bei 275 kW, Vergleich Laserzündkerze ohne Vorkammer, mit Vorkammer und geklemmtem Saphirglas, mit Vorkammer und geklebtem Saphirglas sowie elektrischer Vorkammerzündkerze**

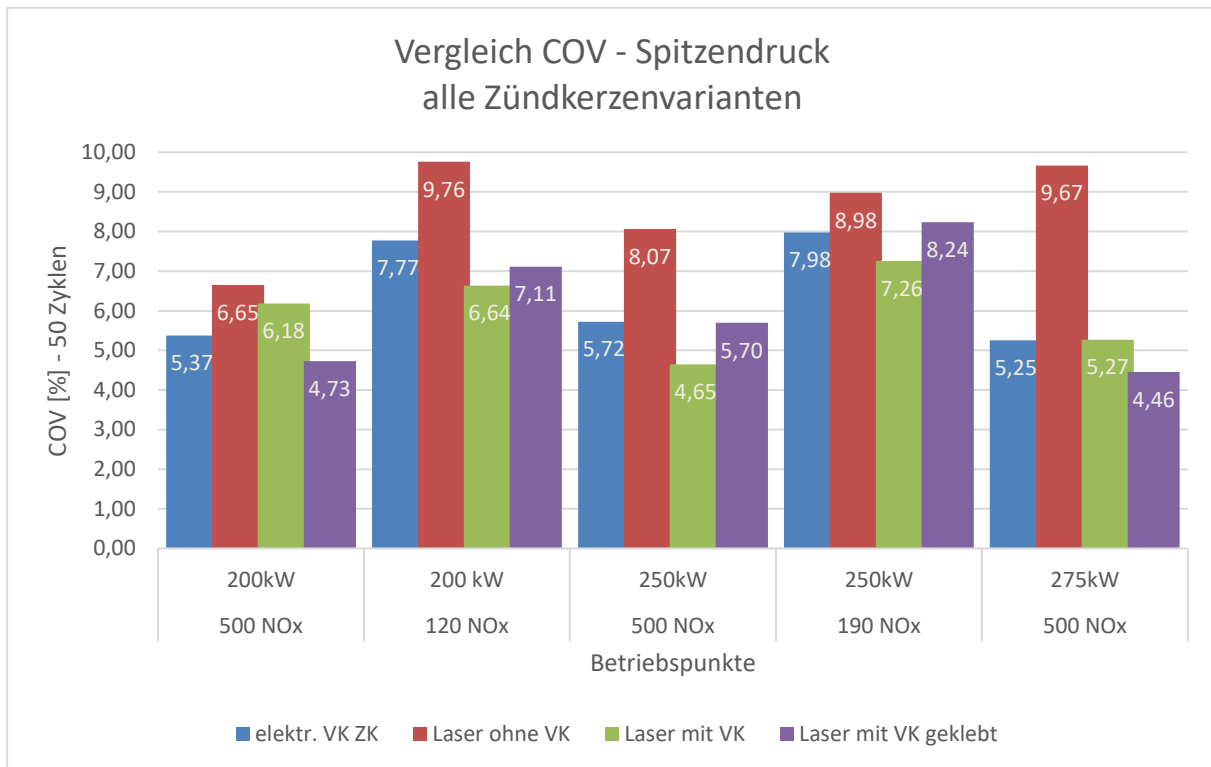
Bei der maximalen Motorleistung von 275 kW zeigen alle Laserzündkerzen geringere maximaldrücke im Vergleich zu der elektrischen Vorkammerzündkerze (Abbildung 11). Dabei beträgt das Defizit der Laserkerze ohne Vorkammer 8,15 %. Die Varianten der Laserkerze mit Vorkammer haben jeweils einen um 3,5 % geringeren Maximaldruck. Dabei ist es egal, ob die Vorkammer der Laserzündkerze ein verklebtes oder eine geklemmtes Saphirglasfenster hat.

Dennoch zeigt die Vorkammer mit verklebtem Fenster einen marginal steileren Druckanstieg in Verbindung mit einer etwas schnelleren Verbrennung verglichen mit der Frontkappe ohne verklebtem Saphirglas (Abbildung 12). Dies würde erneut für die verbesserte Abdichtung der Vorkammer mit verklebtem Saphirglasfenster sprechen.



**Abbildung 12: Detaildarstellung des Zylinderdruckverlaufs bei 275 kW, Vergleich Laserzündkerze ohne Vorkammer, mit Vorkammer und geklemmtem Saphirglas, mit Vorkammer und geklebtem Saphirglas sowie elektrischer Vorkammerzündkerze**

Ein weiterer wichtiger Bewertungsfaktor der Laserzündung besteht in der Varianz der Verbrennung. In dem Brennraum herrschen zum Zeitpunkt der Zündung sehr turbulente Strömungen und in Verbindung mit dem sehr mageren Gemisch variiert die Gemischzusammensetzung am Zündort von Zyklus zu Zyklus. Dementsprechend ist auch die Geschwindigkeit der Verbrennung nicht immer gleich. Die Größe der Varianz ist dabei ein Indikator für eine stabile, wiederholbare Verbrennung und hat somit einen positiven Einfluss auf die Abgaswerte und den Motorwirkungsgrad.



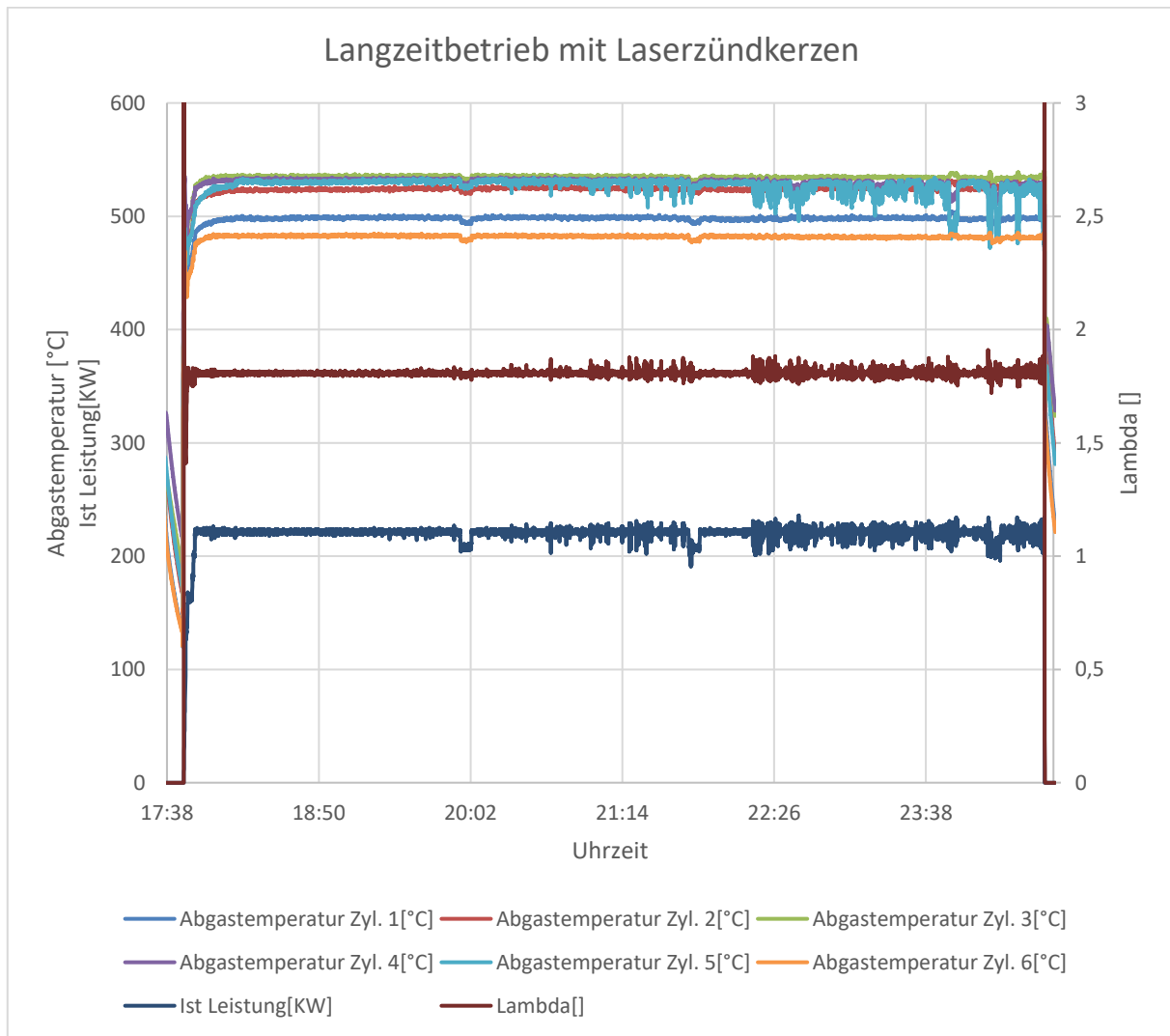
**Abbildung 13: COV des Zylinder Spitzendrucks der getesteten Zündkerzenvarianten**

Die Zyklusvarianz ist bei Zündkerzen mit Vorkammer geringer als bei der Laserzündkerze ohne Vorkammer. Die Laserzündkerze zeigt in Verbindung mit einer Vorkammer in Punkten höherer Last und in Verbindung mit einem mageren Gemisch bessere COV-Werte als die elektrische Vorkammerzündkerze (Abbildung 13).

Die offene Laserzündkerze ist bis zu einem gewissen Grad in der Lage, ähnliche Werte zu produzieren wie Zündkerzen mit Vorkammer. Sind die Gemische besonders mager, oder die Leistung gering, zeigt die offene Laserzündkerze gute Ergebnisse. Die Vorkammer schützt besonders bei hohen Ladedrücken und damit verbundener starker turbulenter Strömung den Zündort. Die offene Laserzündkerze zeigt jedoch nur geringfügige Verschlechterungen bei 250kW und 190 NOx/Nm<sup>3</sup>. Das deutet darauf hin, dass die offene Laserzündkerze aufgrund der hohen Turbulenz im offenen Brennraum einen schlechteren COV besitzt. Die magere Atmosphäre scheint nur einen geringen Einfluss zu haben, das belegt erneut die Vorteile der Laserzündkerze bei besonders mageren Betriebspunkten.

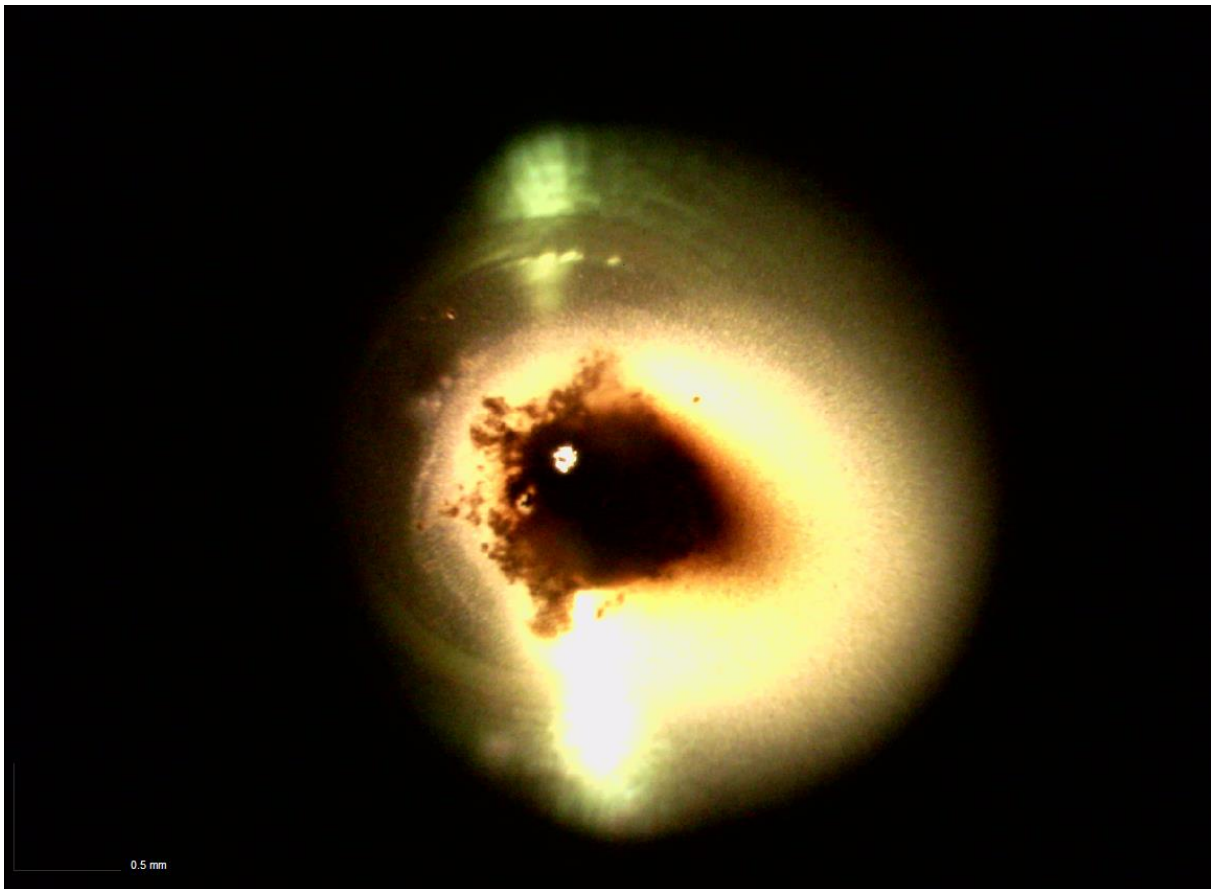
Ein weiteres Ziel war, dass ein Dauerbetrieb mit einem Laserzündsystem möglich sein sollte, um so die elektrischen Zündkerzen, welche einem konzeptbedingten Verschleiß unterliegen, gegen ein verschleißfreies System zu ersetzen.

Dies ist ein sehr ambitioniertes Ziel, da über einen langen Zeitraum ein sauberer optischer Zugang zum Brennraum benötigt wird. In der ersten Messreihe wurde der Motor mit drei Laserzündkerzen über eine Dauer von sechs Stunden betrieben. Der Motor zeigte innerhalb der ersten drei Betriebsstunden mit den Laserzündkerzen keine Auffälligkeiten, jedoch konnten in der vierten Betriebsstunde erste Einbrüche in der Abgastemperatur festgestellt werden, die auf vollständige Verbrennungsaussetzer auf dem Zylinder hindeuten. Diese Aussetzer wurden über die Dauer des Motorbetriebs stärker, bis keine Verbrennung mehr auf einem Zylinder mit Laserzündkerze stattfand. Das führte wiederum zur Abschaltung des Motors durch die Motorsteuerung. Die Laserzündkerzen waren bei diesem Versuch auf Zylinder 3, 4 und 5 verbaut. In der Abbildung 14 lassen sich die Zündaussetzer auf Zylinder 5 gut nachvollziehen.



**Abbildung 14: Sechs Stunden Dauerbetrieb mit Laserzündkerzen auf Zylinder 3, 4 und 5. Problemloser Betrieb für drei Stunden, danach beginnende Zündaussetzer auf Zyl 5**

Nach dem Ausbau der Laserzündkerzen und optischer Überprüfung der Frontkappen konnten Ablagerungen an dem Saphirglas der Frontkappe erkannt werden (Abbildung 15). Die verwendeten Frontkappen waren mit einer Vorkammer ausgerüstet, welche innerhalb der Vorkammer einen schlechteren Ladungswechsel aufweisen als der offene Brennraum. An Frontkappen ohne Vorkammer konnten diese Ablagerungen am Saphirglas nicht festgestellt werden. Die Vermutung liegt also nahe, dass Frontkappen ohne Vorkammer weniger anfällig für Ablagerungen sind. Ebenfalls lässt sich erkennen, an welchem Punkt auf dem Saphirglas der Laser durchbricht. Es scheint also ein gewisser Reinigungseffekt durch den Laser vorhanden zu sein. Aus diesem Grund wird die Laserzündkerze nach Zündaussetzern vermutlich nicht komplett ausgefallen sein, sondern nach kurzer Zeit wieder eine Verbrennung ermöglichen haben.



**Abbildung 15: Mikroskop Aufnahme des Saphirglases einer Frontkappe mit Vorkammer**

Die im Rahmen des Förderprojekts entwickelte Laserzündkerze erfüllt somit alle wesentlichen Ziele des Projektvorhabens:

- Fertigung und Implementierung eines Prototyps für ein neues, laserbasiertes Zündsystem für Großgasmotoren
- Erfolgreiche Evaluierung des Prototyps des Systems im Labormaßstab und auf einem Serienmotor
- Fertigung und Implementierung des neuen, laserbasierten Zündsystems in vierfacher Ausfertigung
- Erfolgreiche Evaluierung des vierfachen Systems auf einem Serienmotor
- Erfolgreicher Betrieb des Serienmotors über mehrere Stunden hinweg
- Vorteile der Laserzündung in manchen Betriebspunkten

Wichtige Erkenntnisse waren zum einen, dass ein längerer Motorbetrieb mit einem Laserzündsystem möglich ist. Außerdem hat es sich gezeigt, dass die Laserzündung ebenfalls von einer Vorkammer profitiert. In einem möglichen Folgeprojekt sollten die Aspekte der Vorkammer und einer idealen Geometrie, die die Stärken der Laserzündung nutzt, weiter untersucht werden.

### 2.3 Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Der größte Teil der Zuwendung für 2G wurden für Personalmittel genutzt. Über die Gesamtzeit des Projektes haben mehrere Ingenieure und Techniker daran gearbeitet, die Ziele des Projektvorhabens zu erreichen. So wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Absprachen getroffen, um das System für den 2G Serienmotor zu entwickeln.

Gleichzeitig hat 2G einen Großgasmotor aufgebaut für Versuche mit dem Laserzündsystem. Dieser Motor wurde vor den Versuchen mit Messinstrumenten ausgestattet für die Druckindizierung des Brennraums und



der Überwachung des Motors. Dabei sind neben den Kosten für Erdgas ebenfalls die Kosten für die Betreuung der Messungen durch Mitarbeiter wichtige Positionen in der Zuwendung.

## 2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Zuwendung war in diesem Maße notwendig, um ein System zu entwickeln, welches diesen hohen Funktionsgrad an einem Serienmäßigen Verbrennungsmotor aufweist. Dabei war es für 2G wichtig, durch starke und kompetente Projektpartner unterstützt zu werden, die in der Lage sind Komponenten für das Laserzündsystem von Grund auf zu Entwickeln und erproben.

2G ist ein etablierter Hersteller von BHKWs und nutzt wie alle anderen Hersteller von Gasbetrieben BHKWs auch die seit vielen Jahren erfolgreich genutzte und erprobte elektrische Zündkerze. Die elektrische Zündkerze hat bereits viele Jahrzehnte Entwicklung hinter sich und arbeitet in der Serie zuverlässig mit akzeptablen Wartungsintervallen. Eine Entwicklung einer Laserzündkerze wäre aufgrund der damit Verbundenen Kosten und der Unsicherheit bezüglich Serienreife ohne die Zuwendung nicht machbar und wäre auch nicht in Erwägung gezogen worden.

Im Vergleich zur herkömmlichen elektrischen Vorkammerzündkerze erforderte die Entwicklung des in diesem Projekt entwickelten Lasersystems einen erheblichen Aufwand und viele Arbeitsstunden. Die Konfiguration der Endkappe der Laserzündkerze beeinflusst den Verbrennungsverlauf signifikant, und es wurde festgestellt, dass die Vorkammer in Verbindung mit der Laserzündung zu einem schnelleren Durchbrennen führt als eine Ausführung ohne Vorkammer. Trotzdem konnte das komplett neu entwickelte laserbasierte System innerhalb von nur 3 Jahren eine vergleichbare oder sogar bessere Leistung erbringen als das elektrische System.

Jedes geplante und durchgeführte Arbeitspaket war dabei unerlässlich. Das System wurde mit minimalem, aber notwendigem Aufwand iterativ entwickelt. Jede Iteration war von Bedeutung. Die Fertigung eines frühen Alpha-Prototyps ermöglichte eine frühzeitige Überprüfung des grundlegenden Designs und ermöglichte, den Alpha-Prototyp auf dem Serienmotor vor Ort in Heek zu testen. Dort zeigten sich kleine Schwachstellen, die in dem finalen Design behandelt und gelöst wurden. Anschließend wurde das 4-Kanal-System aufgebaut, um es bei der Abschlussuntersuchungen bei 2G zu testen.

Dabei hat 2G hauptsächlich unterstützend gearbeitet, indem 2G den Motor für die Versuche zur Verfügung gestellt hat, und gesammelte Erfahrungen über die elektrische Vorkammerzündkerze mit den Projektpartnern geteilt hat, damit die Entwicklung der Laserzündkerze so schnell und erfolgreich wie möglich stattfinden kann. Die Verwendeten Mittel für Erdgas und Zeitwert des Motors waren ebenfalls notwendig, damit so viel Erfahrung mit dem Laserzündsystem gesammelt werden konnte wie möglich.

## 2.5 Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans

Im Antrag für das Projekt wurde im Verwertungsplan als Ziel aufgeführt, das ein „erster, funktionsfähiger Prototyp fertiggestellt, mit dem Serientests am Vollmotor auf dem Prüfstand bei 2G durchgeführt“ werden kann. Dieses Ziel wurde vollumfänglich erreicht. So konnten zu Projektende zwei gemeinsame Wochen bei 2G in Heek die Laserzündkerze ausführlich getestet und erprobt werden. Auf einem Serienmotor wurden zahlreiche Versuche gefahren.

Im Antrag wurde davon ausgegangen, dass das System innerhalb von 3–5 Jahren nach Projektende serienreif sein würde, sowohl wirtschaftlich als auch technisch. Als nachfolgende Schritte wurden die Überprüfung der Komponenten und Fertigungsstrategien auf Serienreife sowie die Suche nach einem Partner genannt, der die Fertigung übernehmen kann. Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Projekt hat sich jedoch

gezeigt, dass diese Schritte zu früh sind. Es sind weitere Arbeiten erforderlich, um das System bis zur Marktreife zu entwickeln.

Die Ergebnisse und Herausforderungen verdeutlichen, dass die Laserzündung für diese Anwendung zwar Vorteile bietet, aber weiterer Forschungsbedarf besteht. Insbesondere das Design der Laserzündkerze muss hinsichtlich der Langzeitstabilität überprüft werden. Zudem beeinflusst die Gestaltung der Frontkappe die Verbrennung signifikant. Bevor wir uns auf die Markteinführung konzentrieren, ist eine detaillierte Untersuchung dieses Einflusses erforderlich. Daher empfiehlt sich ein Folgeprojekt mit besonderem Fokus auf den vorderen Teil der Laserzündkerze. Hierbei kann eine speziell auf die Anforderungen der Laserzündung zugeschnittene Vorkammer entwickelt werden. Die Geometrie, das Verhältnis des Volumens der Vorkammer im Vergleich zum Hauptbrennraum sowie die Anzahl, Anordnung, Durchmesser und Winkel der Überströmbohrungen beeinflussen die Verbrennung maßgeblich. Bisher wurde diese Vorkammer auf die elektrische Elektrodenzündung optimiert. Auch in der Vorkammer können die Vorteile der Laserzündung, wie die flexible Wahl des Zündorts, genutzt werden. Eine Optimierung der Vorkammer unter diesen Gesichtspunkten ist daher sinnvoll. Ebenfalls muss für eine mögliche Serieneinführung das Thema Lasersicherheit weiter betrachtet werden, da über die Lebensdauer des BHKWs viele reguläre Wartungsarbeiten an dem Motor durchgeführt werden müssen. Dabei ist eine einfache Sensibilisierung der Techniker bezüglich der Gefahren und Risiken, die von hochenergetischem Laserlicht ausgehen können, nicht ausreichend.

Darüber hinaus kann parallel an der Verbesserung der Verbrennungsparameter ohne den Einsatz der Vorkammer gearbeitet werden. Der grundsätzliche Vorteil der Vorkammer ist die Beschleunigung der Verbrennung durch die Vergrößerung der Flammenoberfläche beim Übertritt der Fackelstrahlen vom geschützten Zündort in den Hauptbrennraum. Um die Verbrennung auch ohne Vorkammer zu beschleunigen und den Flammenkern zu stabilisieren, kann beispielsweise eine höhere Pulsenergie des Lasers gewählt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine höhere Pulsenergie zu einem größeren Plasmavolumen und Flammenkern führen kann. Damit steigt auch ohne Vorkammer die Oberfläche der Flamme zu Beginn des Verbrennungsprozesses und der Durchbrand wird beschleunigt. Eine weitere Möglichkeit wäre, mehrere Zündorte im Brennraum über eine Laserzündkerze zu nutzen. So untersuchten Vasile et al. [28] und Dumitrache et al. [29] die Mehrort-Laserzündung und konnten damit Verbesserungen erzielen.

## 2.6 Forschungsergebnisse und Fortschritte auf diesem Gebiet an anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurden neben der inhaltlichen Bearbeitung auch Literaturrecherchen durchgeführt, um über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Laserzündung in Großgasmotoren auf dem Laufenden zu bleiben. Insbesondere in Großgasmotoren ist die Forschungsaktivität begrenzt, und viele Untersuchungen wurden im Labormaßstab durchgeführt. Im Folgenden werden einige Veröffentlichungen vorgestellt, die während des Projektzeitraums von anderen Quellen veröffentlicht wurden.

Prasad et al. (R.K. Prasad, 2020) untersuchten 2020 die Laserzündung in einem Gasmotor, bei dem Erdgas als Kraftstoff verwendet wurde und dem unterschiedliche Anteile Wasserstoff zugesetzt wurden. Dabei stellten sie fest, dass die Zyklusschwankungen in Bezug auf den indizierten Mitteldruck reduziert wurden und die Magergrenze erweitert wurde. Patane et al. (P. Patane, 2020) veröffentlichten 2020 ein Übersichtsartikel zur Mehrort-Laserzündung in Motoren. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Mehrort-Laserzündung insbesondere für magere Gemische geeignet ist. Im Vergleich zur einfachen Zündung werden die Zyklusschwankungen reduziert, die Motorleistung erhöht und die Anzahl der Fehlzündungen verringert. Vasile et al. (N.-T. Vasile, 2020) und Dumitrache et al. (C. Dumitrache, 2022) untersuchten die Mehrort-Laserzündung ebenfalls in den Jahren 2021 bzw. 2022 und kamen zu dem Ergebnis, dass wesentliche Verbrennungsparameter wie Zyklusschwankungen und maximaler Verbrennungsdruck verbessert werden. Shukla et al. (A. Shukla, 2022) veröffentlichten 2022 ebenfalls einen Übersichtsartikel zur Laserzündung. Dabei wurden zahlreiche Vorteile zusammengefasst, darunter die besondere Eignung für Magerbrennverfahren sowie die bessere Kontrolle über den Zündzeitpunkt, die flexible Wahl des Zündorts und verbesserte Verbrennungs- und Abgasparameter. Als größte Herausforderungen wurden die Kosten, die Größe des Systems und die Empfindlichkeit

gegenüber Motorvibrationen zusammengefasst, die zu Problemen bei der Justierung der optischen Bauteile führen können.

Diese Forschungsergebnisse decken sich zum großen Teil mit den in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnissen.

## 2.7 Veröffentlichungen im Rahmen dieses Projektes

Im Rahmen des Förderprojektes haben die Projektpartner Veröffentlichungen Abseits des Abschlussberichtes getätigt. 2G hat innerhalb dieses Förderprojektes den Abschlussbericht veröffentlicht.

## 3 Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

Siehe Anlage

## 4 Berichtsblatt

Siehe Anlage

## 5 Zahlenmäßiger Nachweis für das Jahr 2023

Siehe Anlage

## 6 Literaturverzeichnis

- A. Shukla, J. V. (2022). Effect of laser ignition on combustion and performance of internal combustion engine: A Review. . *Energy Conversion and Management: X*, 13.
- Bundesministerium für Umwelt, N. u. (2016). Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
- C. Dumitrache, N.-T. V. (2022). Laser-induced ignition of methane-air mixtures by a four-beam, pulse-burst mode passively Q-switched Nd:YAG/Cr4+:YAG laser. 42.
- C. Gong, Z. L. (2020). Evaluation on combustion and lean-burn limit of a medium compression ratio hydrogen/methanol dual-injection spark-ignition engine under methanol late-injection. *Applied Energy*, 277.
- D.K. Srivastava, A. A. (2014). Comparative experimental evaluation of performance, combustion and emissions of laser ignition with conventional spark plug in a compressed natural gas fuelled single cylinder engine. *Fuel*, 123.
- G. Herdin, J. K. (2005). *Laser Ignition: A New Concept to Use and Increase the Potentials of Gas Engines*. In: *ASME 2005 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (ICEF2005)*. ASME.



- H. Kopecek, H. M. (2003). Laser ignition of methane–air mixtures at high pressures. *Experimental Thermal and Fluid Science* , 499ff.
- J. Biet, M. N. (2014). Ignition by Electric Spark and by Laser-Induced Spark of Ultra-Lean CH<sub>4</sub>/Air and CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/Air Mixtures at High Pressure. *Combustion Science and Technology*.
- J.D. Mullett, P. D. (2008). Multi-Cylinder Laser and Spark Ignition in an IC Gasoline Automotive Engine: A Comparative Study. *SAE Technical Paper*.
- J.D. Mullett, R. D. (2007). The influence of beam energy, mode and focal length on the control of laser ignition in an internal combustion engine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40.
- N.-T. Vasile, N. P. (2020). Multi-point laser-induced ignition of air-methane mixtures by a high peak-power passively Q-switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG Laser. *Optics & Laser Technology*, 141.
- P. Patane, M. N. (2020). Review: Multipoint laser ignition system and its applications to IC engines. *Optics & Laser Technology*, 130.
- R.K. Prasad, N. M. (2020). Effect of spark timing on laser ignition and spark ignition modes in a hydrogen enriched compressed natural gas fuelled engine. *Fuel*, 276.
- S. Yamaguchi, T. K. (2015). Dual-Point Laser Ignition and its Location Effects on Combustion in Lean-Burn Gas Engine. *SAE International Journal of Engines*.
- S.B. Gupta, B. B. (2005). Ignition Characteristics of Methane-air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures. *SAE Technical Paper Series. SAE International400* .