

# Konzeption und Entwicklung einer Laserzündkerze

Heinrich Kofler, Johannes Tauer, Ernst Wintner

Institut für Photonik, TU Wien

## 1. Einleitung

Dieses innovative Projekt beschäftigt sich mit dem neuartigen Motorenzündsystem der Laserzündung. Das Prinzip dieser Zündung besteht darin, den Strahl eines gepulsten Lasers mittels geeigneter Linsenoptik innerhalb eines brennbaren Gemisches derart zu fokussieren, so dass das entstehende Plasma das Kraftstoff-Luft-Gemische entzündet.



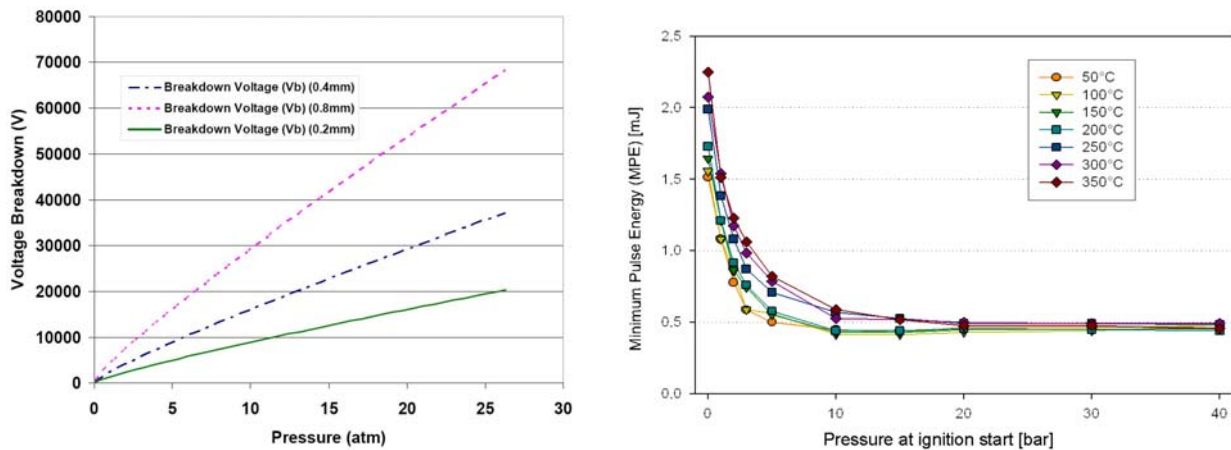
Der Grund für die Suche nach alternativen Zündquellen liegt in dem Ziel, den immer strenger werdenden EU - Emissionsrichtlinien gerecht zu werden und dem steigenden Primärenergieverbrauch entgegenzuwirken. Aus motortechnischer Sicht bedeutet das eine Erhöhung des Wirkungsgrades bei einer möglichst stickoxidarmen Verbrennung des Brennstoffes. Der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors steigt mit dem Verdichtungsverhältnis  $\varepsilon$  und der Luftzahl  $\lambda$ . Weiteres hat eine Verbrennung unter Luftüberschuss (hohes  $\lambda$ ) eine geringere Flammentemperatur und somit auch eine reduzierte  $\text{NO}_x$  - Bildung zur Folge. Motoren, die dieses Konzept verfolgen, werden hochaufgeladene Magermotoren genannt.

Eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses impliziert gleichzeitig eine Erhöhung des Zünddruckes und dies hat bei konventionellen elektrischen Zündsystemen wiederum eine erhöhte Durchbruchspannung zur Folge. Diese, laut dem Paschen-Back Gesetz erhöhte Spannung resultiert in einer stärker ausgeprägten Elektrodenerosion welche die Lebensdauer einer Kerze drastisch reduziert. Weiters sind extrem magere Kraftstoffgemische ausgesprochen zündunwillig und benötigen daher geometrisch optimale Zündverhältnisse die durch die elektrische Funkenzündung nicht gewährleistet werden können. Auf den Punkt gebracht - die seit mittlerweile über 100 Jahren verwendete elektrische Funkenzündung stößt an ihre physikalischen Grenzen und kann den modernen motortechnischen Anforderungen langfristig nicht mehr stand halten.

In diesem Falle bietet die Laserzündung, als neues innovatives Konzept, gegenüber der konventionellen elektrischen Zündung eine Reihe vielversprechender Vorteile:

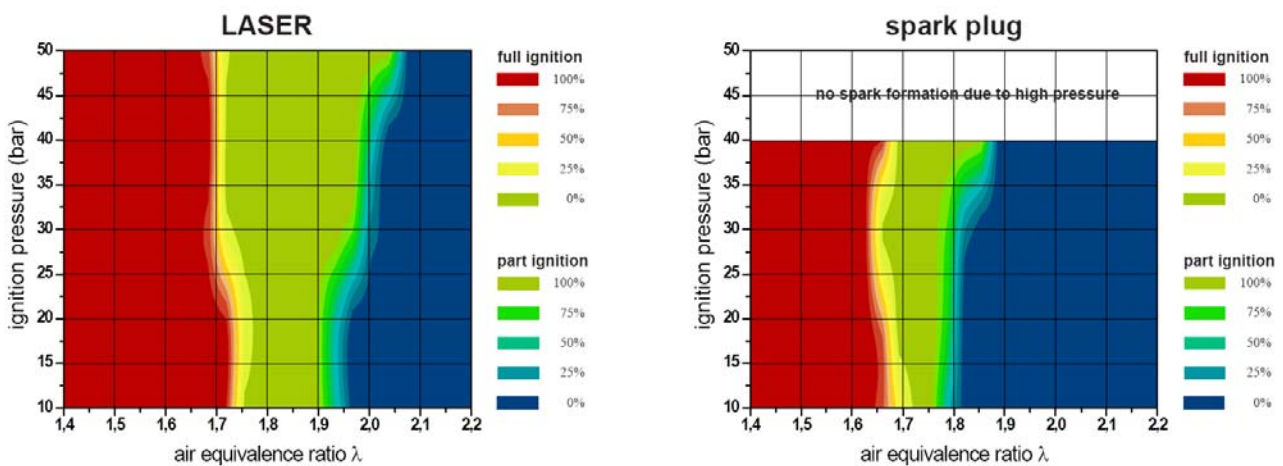
- Zündung extrem magerer Gemische möglich  $\rightarrow$  erniedrigte Flammentemperatur  $\rightarrow$  Reduktion der  $\text{NO}_x$  Emissionen
- Keine Erosionseffekte an der Zündkerze  $\rightarrow$  längere Lebensdauer
- Höhere Verdichtungsverhältnisse möglich  $\rightarrow$  Steigerung des Wirkungsgrades  $\rightarrow$  Senkung des Verbrauchs

- Beliebige Wahl des Fokus → in das Zentrum des Verbrennungsraumes um ein optimale Flammenentwicklung zu gewährleisten.
- Keine Flammenlöschungseffekte (Quenching) an den Elektroden der Zündkerze → Zündung magerer Gemische möglich.



**Abbildung 1** Die Durchbruchspannung als eine Funktion des Druckes nach dem Paschen-Back Gesetz (links). Unterschiedliche Linien kennzeichnen unterschiedliche Elektrodenabstände. Im Gegensatz zur elektrischen Zündkerze, nimmt die MPE mit steigendem Druck ab (rechts).

Die minimale Pulsenergie (MPE), das Analogon zur Durchbruchspannung, nimmt mit steigendem Druck ab. Abbildung 1 zeigt die Durchbruchspannung und die minimale Pulsenergie in Abhängigkeit des Druckes. Zusätzlich bietet die Laserzündung höhere Zündwahrscheinlichkeiten und ermöglicht somit die Entzündung magerer Gemische. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Vergleich der Methan – Luft - Zündwahrscheinlichkeiten der Laserzündung und der elektrischen Zündung. Die Messungen wurden unter statischen Bedingungen und geringen Zündtemperaturen ermittelt.

Die Plasmabildung bei der Laserzündung basiert auf dem Phänomen des nicht-resonanten Durchbruches wobei optische Intensitäten von etwa  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> notwendig sind. Im Allgemeinen können diese Intensitäten durch Fokussierung von Pulsen mit Pulsenergien von einigen mJ und Pulsdauern von einigen ns erreicht werden. Um jedoch eine zuverlässige Entzündung des Gemisches zu garantieren sind Pulsenergien über 10 mJ bei Pulsdauern von weniger als 5 ns notwendig. Im Detail hängt die minimale Pulsenergie stark von der Temperatur und der Luftzahl ab (3).

In zahlreichen Zündexperimenten mit unterschiedlichen Gemischen (Methan-Luft, Wasserstoff-Luft, Isooktan/n-Heptan-Luft, Biogas-Luft) stellte sich heraus, dass die minimale Pulsenergie unabhängig von der Art des Brennstoffes ist.

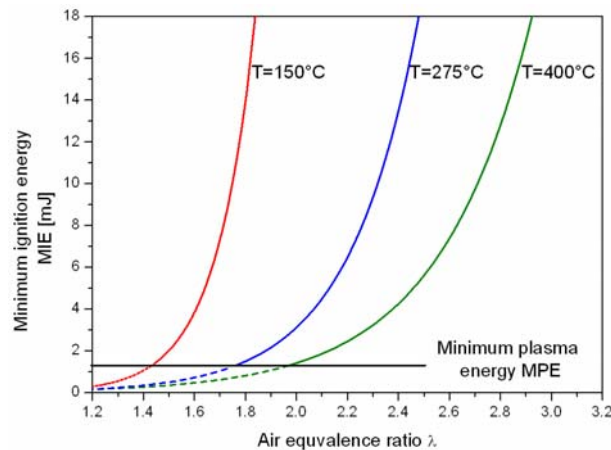


Abbildung3: Minimale Zündenergien bei unterschiedlichen Zündtemperaturen in Abhängigkeit der Luftzahl  $\lambda$ .

Der Laser muss neben der zu fordernden Ausgangsleistung von über 10 mJ bei Dauern von  $\sim 1$  ns auch in einer kompakten, robusten und kostengünstigen Ausführung gefertigt werden. Eine umfangreiche Recherche führte zu dem Ergebnis, dass kommerzielle Produkte am Markt das Anforderungsprofil für einen Zündlaser nicht erfüllen. Hauptkritikpunkt an den Produkten sind die Abmessungen sowie zu niedrige Pulsenergien bei zu langen Pulsdauern. Dies führte zu dem Entschluss, einen speziellen Laser mit den erforderlichen Eigenschaften für die Zündung zu entwickeln.

## 2. Laserentwicklung

Diodengepumpte Festkörperlaser mit einer passiven Güteschaltung erfüllen die Anforderungen in Bezug auf Robustheit und Kompaktheit, sowie auf eine kostengünstige Herstellung am besten. Abbildung 4 skizziert schematisch den Aufbau eines longitudinal diodengepumpten Festkörperlasers. Das optische Pumpen mit einer Laserdiode bietet gegenüber der Blitzlampe den Vorteil eines höheren Wirkungsgrades und des Wegfallens der Hochspannungsquelle sowie des aufwendigen Kühlsystems. Durch die longitudinale Anordnung der Pumpquelle zum Resonator ist zum einen ein einfacher und kleiner Aufbau realisierbar und zum anderen entsteht bevorzugt ein „Gaußsches“ Strahlprofil. Dieses Strahlprofil gilt als Optimum und ermöglicht ein Zünden mit minimalsten Pulsenergien.

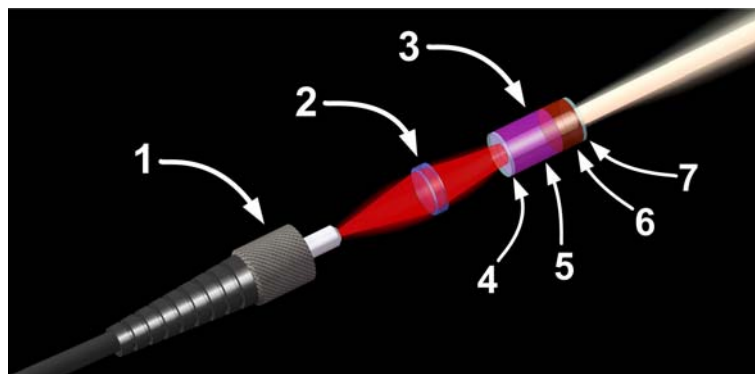


Abbildung 4: Schematische Darstellung des longitudinal gepumpten Festkörperlasers. Der Pumpimpuls wird mittels Lichtwellenleiter (1) zum Festkörperlaser (3) transportiert. Die Linse (2) dient zur Einkopplung des Pumpimpulses. Der Festkörperlaser, der aus dem Einkoppelspiegel (4), dem aktiven Medium (5), dem passiven Güteschalter (6) und dem Auskoppelspiegel (7) besteht, ist hier bereits in einer monolithischen Form dargestellt.

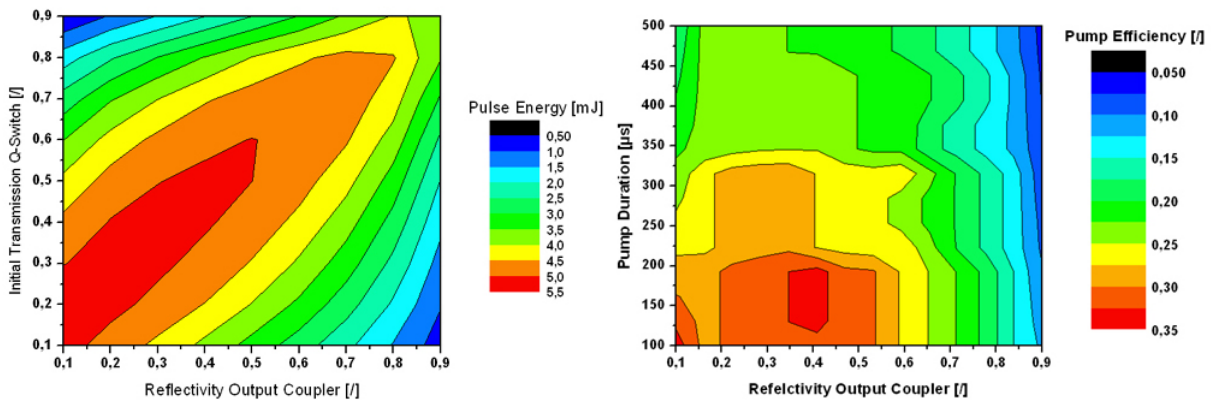
Für den Festkörperlaser wurde Nd:YAG (Neodym dotierter-Yttrium-Aluminium-Granat) als laseraktives Material und  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG als passiver Absorber herangezogen. Dieses Medium ist hart, robust und vor allem wenig temperaturempfindlich und daher bestens geeignet für die Belastungen am

Zylinderkopf. Die emittierte gepulste Strahlung des Festkörperlasers mit einer Wellenlänge von  $1,06 \mu\text{m}$  wird in weitere Folge aufgeweitet und am Linsenfenster in den Verbrennungsraum fokussiert.

Aufgrund der mechanischen Beanspruchungen soll der Zündlaser so robust wie möglich aufgebaut sein. Das lässt sich nur mit einer monolithischen Bauweise realisieren. Zur Evaluierung der optimalen Eigenschaften der einzelnen Laserbestandteile (Abbildung 4: Komponenten 4-7) wurde im Labor mit diskreten Elementen gearbeitet.

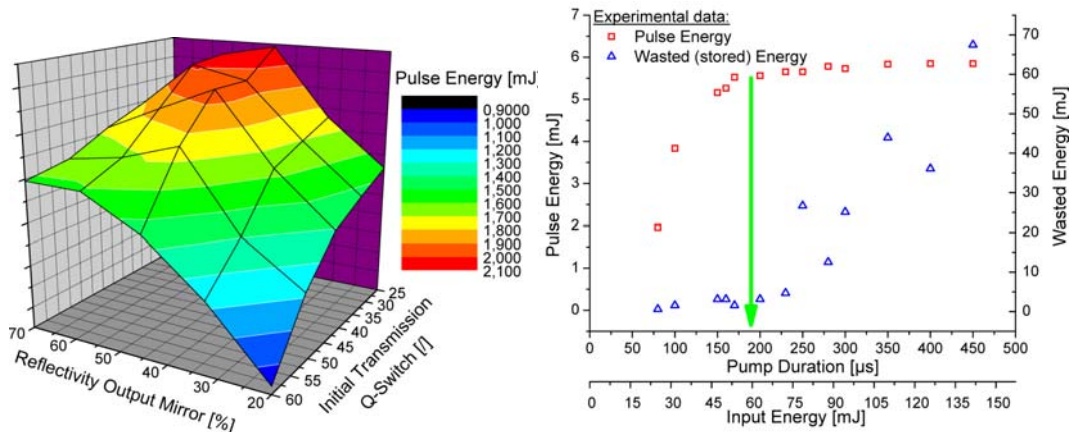
Für das Pulsverhalten sind in erster Linie die Reflektivität des Auskoppelspiegels  $R$  sowie die Anfangstransmission des Güteschalters  $T_0$  von Bedeutung. Der passive Güteschalter (Q-Switch) ist für die Akkumulierung der Pulsenergie und die Auslösung der Pulse verantwortlich. Aufgrund der kurzen Resonatorlängen  $L$  können Pulslängen von weniger als einer ns erreicht werden.

Im Rahmen der Entwicklung wurden die experimentellen Ergebnisse mit Simulationen verglichen. Die Grundlage der Simulationen sind gekoppelte Ratengleichungen welche direkt numerisch gelöst wurden. Bereits in den Simulationen zeigte sich eine sensible Abhängigkeit der Pulsenergie bzw. Pulsdauer von  $R$ ,  $T_0$  und  $L$ . Diese Parameter wurden anhand der Theorie eingehend studiert und analysiert um den experimentellen Rahmen einzuschränken. Es stellte sich heraus, dass Reflektivitäten um 50% und Anfangstransmissionen von 40% erforderlich sind um eine maximale Ausgangsleistung zu erreichen.



**Abbildung 5: Simulationsergebnisse bei einer Pumpleistung von 70W und einer Resonatorlänge von 12 mm. Die Pulsenergie als Funktion der Reflektivität und Anfangstransmission (links) sowie die Effizienz in Abhängigkeit von der Reflektivität und Pumpdauer (rechts). Es zeigt sich, dass die optimale Pumpdauer im Bereich um  $180 \mu\text{s}$  liegt.**

Weiters zeigte sich, dass eine Pumpdauer  $t$  bis maximal  $250 \mu\text{s}$  sich positiv auf die Pulsenergie auswirkt, bei längeren Pumpdauern bleibt die Ausgangsenergie nahezu konstant und der Wirkungsgrad fällt rapide ab. Abbildung 5 zeigt die Simulation der Pulsenergie als eine Funktion von  $R$  und  $T_0$ ., sowie den optischen Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Pumpdauer  $\tau$ . Korrespondierende experimentelle Fakten sind in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Bei beschränkter Diodenleistung (70 W, wie in den ersten Experimenten) beläuft sich die maximale Energie auf etwa 2,1 mJ. Die Parameter für die optimale Pulsenergie sind in diesem Fall bei  $R=50\%$  und  $T_0=40\%$  (links). Bei maximaler verfügbarer Diodenleistung von 300 W wurden Pulsenergien von bis zu 6 mJ erreicht. Ein Anstieg der Pulsenergie konnte nur bis zu einer Pumpdauer von etwa 180  $\mu\text{s}$  beobachtet werden (rechts).

### 3. Entwicklung der Laserzündkerze

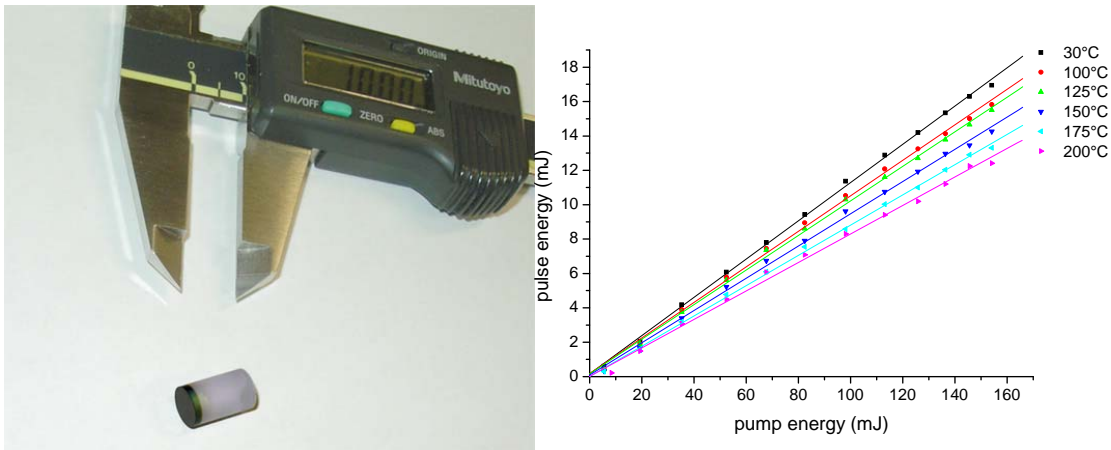
Anhand der ermittelten optimalen Laserparameter wurde der Zündlaser in einer monolithischen Bauweise angefertigt wobei folgende Konfiguration gewählt wurde (Abbildung 7 links):

- Nd:YAG – Länge: 10mm, Durchmesser 7mm, Dotierung 1,2 at.%
- $\text{Cr}^{4+}$ :YAG – Anfangstransmission: 40%
- Auskoppelspiegel – Reflektivität 50%

Im Laborbetrieb konnten mit dem Monolithen bei einer Pumpleistung von 600W Laserpulse mit Pulsenergien von bis zu 22mJ und Pulsdauern unter 1,5ns erreicht werden. Neben der großzügig erreichten Zielsetzung von mindestens 10mJ Pulsenergie, repräsentieren diese Spitzenwerte die weltweit höchsten, die jemals aus einem monolithischen, diodengepumpten Laser erzielt wurden.

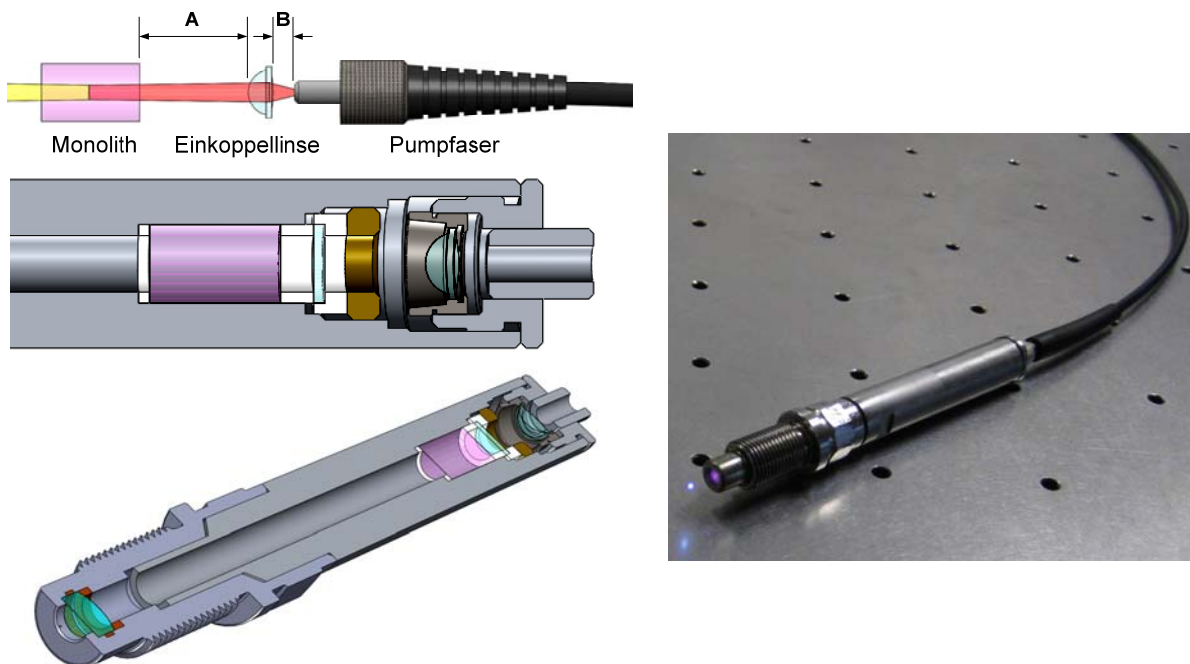
Das verfolgte Laserkonzept sieht vor, dass die Laserzündkerze direkt am Zylinderkopf montiert wird. Dementsprechend erwärmt sich der monolithische Laserkristall, wobei Temperaturen bis zu 200°C zu erwarten sind. Um den Einfluss der Temperatur auf das Emissionsverhalten des Lasers zu untersuchen, wurde der Monolith bei unterschiedlichen Pumpenleistung und Kristalltemperaturen vermessen. Der für die Laseremission benötigte Pumpschwellwert steigt nur marginal mit der Temperatur. Jedoch sinkt der differentielle Wirkungsgrad exponentiell mit der Temperatur. Bei Betriebstemperaturen von 200°C erreicht der Laser noch eine optische Effizienz von ca. 8,5%.





**Abbildung 7:** Links: Der monolithische Laserkristall. Rechts: Differenzielle Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Kristalltemperaturen. Der Laser beginnt ab einem Pumpschwellwert von ca. 5mJ zu emittieren. Der Wirkungsgrad nimmt mit zunehmender Temperatur exponentiell ab.

Das konkrete Ziel war es nun, einen funktionstüchtigen Prototypen aufzubauen, um erste Erkenntnisse über die konstruktiven Problematiken und thermischen Belastungen zu erlangen. Abbildung 8 zeigt die Laserzündkerze als schematischen Schnitt und im fertigen Aufbau in Betrieb. Im Labor konnten bei Raumtemperatur Pulsenergien von bis zu 15mJ erreicht werden. Für einen bestmöglichen Betrieb müssen die Distanzen Faser – Einkoppellinse – Kristall genau abgestimmt werden.



**Abbildung 8:** Aufbau des Prototyps – Laserzündkerze. Die Distanzen A und B zwischen den einzelnen optischen Elementen benötigen eine sehr genaue Justierung.

Im Labor wurde die Laserzündkerze unter erhöhter Temperatur getestet. Der Betrieb konnte bis zu 180°C aufrecht erhalten werden. Bei weiterer Temperatursteigerung versagte die Funktion, da Ablagerungen am Faseraustritt auftraten und diese sich in die Faser einbrannten. Die Ablagerungen stammten vermutlich von Ausdampfungen aus dem eingegossenen Faserende oder aus der Fasermantelung.

Der Prototyp wurde auch kurzzeitig unter realen Bedingungen an einem Gasmotor (GE Jenbacher)

getestet. Erste Ergebnisse ergaben, dass sich die Laserzündkerze einwandfrei unter unterschiedlichen Lastpunkten verhält.

#### 4. Publikationen, Konferenzbeiträge und Patente

Lackner M. "*Lasers in Chemistry - Probing and Influencing Matter*", ISBN-13:978-3-527-31997-8 - Wiley-VCH, Weinheim, 2008; darin

H. Kofler, J. Tauer, E. Wintner, Buchkapitelbeitrag „*Laser-induced ignition for combustion engines*”

H. Kofler, J. Tauer, K. Iskra, G. Tartar, E. Wintner: "*Development of a high peak power solid-state laser for engine ignition*"; Vortrag: Advanced Solid-State Photonics 2008, Nara, Japan; 27.01.2008 - 30.01.2008; in: "*Conference Program and Technical Digest*", (2008), ISBN: 1-55752-850-0; 3 S.

J. Tauer, H. Kofler, K. Iskra, E. Wintner: "*Laserzündung von stationären Gasmotoren*"; Vortrag: 10. Symposium Energieinnovation, TU Graz, Österreich; 13.02.2008 - 15.02.2008; in: "*Eninnov 08*", Verlag der Technischen Universität Graz, (2008), ISBN: 978-3-902465-94-8; S. 105 - 106.

H. Kofler, J. Tauer, G. Tartar, K. Iskra, J. Klausner, G. Herdin, E. Wintner: "*An innovative solid-state laser for engine ignition*"; Laser Physics Letters, 4 (2007), 4; S. 322 – 327

J. Tauer, F. Orban, H. Kofler, A. Fedotov, V. Mitrokhin, A. Zheltikov, E. Wintner: "*High-throughput of single high-power laser pulses by hollow photonic band gap fibers*"; Laser Physics Letters, 4 (2007), 6; S. 444 - 448.

J. Tauer, H. Kofler, G. Tartar, E. Wintner: "*Entwicklung eines kompakten und leistungsstarken Zündlasers für Verbrennungsmotoren*"; Vortrag: AMOP-Frühjahrstagung 2007, Düsseldorf, Deutschland; 19.03.2007 - 23.03.2007; in: "*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*", (2007), ISSN: 0420-0195; S. 149 - 150.

H. Ranner, P. K. Tewari, H. Kofler, M. Lackner, E. Wintner, A. K. Agarwal, and F. Winter, "Laser cleaning of optical windows in internal combustion engines," *Optical Engineering*, vol. 46, pp. 104301-8, 2007.

M. Puhl, H. Kofler, J. Tauer, K. Iskra, E. Wintner: "*Laser ignition of lean methane-air mixtures. A comparison to a conventional spark plug system.*"; Vortrag: 57. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Donau-Universität Krems, Austria; 24.09.2007 - 28.09.2007; in: "*Ta-gungsprogramm*", (2007), S. 113.

H. Kofler, J. Tauer, K. Iskra, G. Tartar, H. Ranner, E. Wintner: "*Key features and elements for laser ignition of engines*"; Vortrag: International Conference ALT'07 Advanced Laser Technologies, Levi, Finland; 03.09.2007 - 07.09.2007.

H. Kofler, J. Tauer, E. Wintner: "*Monolithic high peak power solid-state laser for engine ignition*"; Hauptvortrag: 16th International Laser Physics Workshop (LPHYS'07), Leon, Mexico; 20.08.2007 - 24.08.2007; in: "*Book of Abstracts*", (2007), 1 S. H. Ranner, M. Lackner, H. Kofler, F. Winter: "*Optical Windows for Combustion Research and Control Applications: Anti-fouling Strategies*"; IFRF Combustion Journal, (2007).

J. Tauer, H. Kofler, G. Tartar, E. Wintner: "*Laser ignition of combustion engines: Developments of an ignition laser*"; Vortrag: CLEO/Europe - IQEC 2007, Munich, Germany; 17.06.2007 - 22.06.2007; in: "*Conference Digest*", (2007), ISBN: 1-4244-0931-4; 1 S.

H. Kofler, J. Tauer, G. Tartar, K. Iskra, F. Orban, E. Wintner: "*Laser ignition of engines: Laser spark plug or fiber transportation?*"; in: "*Proceedings of International Conference and Symposium*", herausgegeben von: Technical University Sofia, Branch Plovdiv; International Conference and Symposium ILLA/LTL 2006, Plovdiv, Bulgaria, 2007, (eingeladen), ISSN: 1312-0638, S. 26 - 35.

J. Tauer, H. Kofler, E. Wintner: "*Development of an ignition laser*"; Poster: 56. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Graz, Austria; 18.09.2006 - 21.09.2006; in: "*Book of Abstracts*", (2006), S. 21.

H. Kofler, J. Tauer, K. Iskra, E. Wintner: "*Laserzündung von Gasmotoren: Entwicklung eines kompakten und leistungsstarken Zündlasers*"; Vortrag: 56. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Graz, Austria; 18.09.2006 - 21.09.2006; in: "*Book of Abstracts*", (2006), S. 20.

F. Orban, H. Kofler, A. Fedotov, A. Zheltikov, E. Wintner: "*Propagation of high power laser pulses through hollow core photonic band gap fiber*"; Poster: Junior Scientist Conference 2006, Vienna, University of Technology; 19.04.2006 - 21.04.2006; in: "*Proceedings*", (2006), ISBN: 3-902463-05-8; S. 315 - 316.

H. Kofler, J. Tauer, E. Wintner: "*A novel solid-state laser for engine ignition*"; Vortrag: 15th International Laser Physics Workshop (LPHYS'06), Lausanne, Switzerland; 24.07.2006 - 28.07.2006; in: "*Book of Abstracts*", (2006), S. 218.

M. Lackner, H. Kofler, H. Ranner, F. Winter, J Klausner, G Herdin: "*The Optical Spark Plug: Window - Related Issues*"; Vortrag: European Combustion Meeting (ECM 2005), Lovain-la-Neuve, Belgium; 03.04.2005 - 06.04.2005; in: "*Book of Abstracts ECM 2005*", (2005), S. 248.

Bereits veröffentlichte Patente:

Laser ignition device: EP1911967

Laser ignition device for a combustion engine: EP1887218

Method for igniting a fuel-air mixture: EP1693566