

Vor dem Start steht der zündende Moment: Bevor sich eine mehrere hundert Tonnen schwere Weltraumrakete erhebt, muss das Triebwerk zuverlässig gezündet werden. Laserpulse könnten zukünftig dabei die tragende Rolle spielen. Das Bild zeigt die Versuchsbrennkammer am DLR-Teststand M3.1 mit integriertem HiPoLas-Laser: Die gläserne Brennkammer sowie Druck- und Temperatursensoren erlauben es, die Treibstoffeinspritzung und das Zündverhalten genau zu studieren.

INS ALL MUSS MAN ERST MAL KOMMEN



Zukünftige Trägerraketen zünden mit Lasern

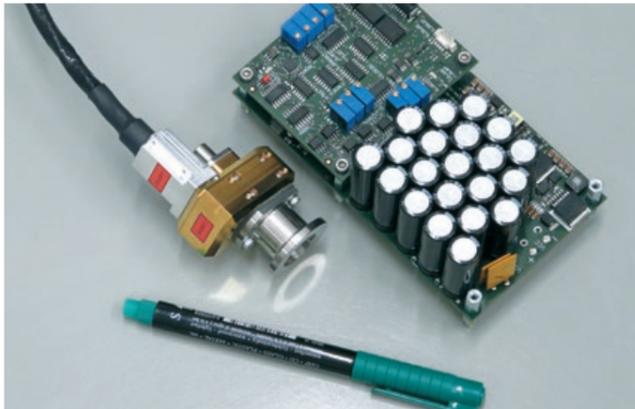
Von Dr.-Ing. Chiara Manfletti, Michael Börner, Gerhard Kroupa und Dr.-Ing. Sebastian Soller

Dezember 2014, Luxemburg. Der Ministerrat der Europäischen Weltraumorganisation ESA beschließt, eine neue Trägerrakete zu entwickeln: die Ariane 6. Sie soll Europa weiterhin den unabhängigen Zugang zum Weltall garantieren. Mit einem eigenen europäischen Trägersystem lassen sich aber nicht nur Europas Raumfahrtprojekte ins All bringen, ein wettbewerbsfähiges Trägersystem kann auch weltweit kommerziell genutzt werden.

Die neue Rakete ist Teil einer europäischen Trägerfamilie, bestehend aus der großen Ariane 6 und der kleineren, aber nicht weniger wichtigen VEGA-C. Beide zusammen werden das Rückgrat der aufeinander abgestimmten europäischen Raumtransportaktivitäten sein. Europas Trägerraketen ermöglichen spektakuläre Projekte: Die Kometenmission Rosetta und die ATV-Versorgungsflüge zur Internationalen Raumstation ISS sind herausragende Beispiele. Doch auch für Großprojekte zur Stärkung der europäischen Souveränität, wie das Galileo-Satellitensystem, sind europäische Trägerraketen von großer Bedeutung.

Diese neue Trägerfamilie basiert unter anderem auf dem Feststoffbooster P120C, der speziell für die neue Trägergeneration entwickelt wird. Zudem werden Technologien, die heute schon in der Ariane 5 eingesetzt werden, wie das Vulcain 2-Triebwerk, derzeit weiter verbessert. Eine tragende Rolle im wahrsten Sinn des Wortes wird dabei die Laserzündung spielen. Bei der Laserzündung wird ein kurzer Laserpuls mittels einer Linse gebündelt, wodurch ein mehrere tausend Grad Celsius heißes Plasma entsteht. Der sich daraus entwickelnde Flammenkern wächst zu einer Verbrennungszone und zündet so die Brennkammer.

Es war aber nicht immer so, dass Laser für das Zünden von Triebwerken in Erwägung gezogen wurden. Erste Ideen in den Siebzigerjahren des letzten Jahrhunderts scheiterten an den benötigten hohen Energiedichten des Laserpulses und an den komplizierten Bauformen: Damals waren die Laser noch tischgroße, temperatursensible und wartungsintensive Systeme. Um ein Plasma in der Luft zu erzeugen, muss das Lasersystem eine Intensität von einer Billionen Watt pro Quadratmeter generieren. Diese Laserpulsintensitäten können mit ausreichend kompakten Lasern nur durch sehr kurze Laserpulse im Nanosekundenbereich, also in Milliardstel Teilen einer Sekunde, erreicht werden.



HiPoLas-Laser des österreichischen Technologiezentrums Carinthian Tech Research

Der Laser, der heute in Zusammenarbeit von DLR und ASL (Airbus Safran Launchers) speziell für Raketentriebwerke weiterentwickelt wird, ist der HiPoLas-Laser des österreichischen Technologiezentrums Carinthian Tech Research (CTR). Es handelt sich dabei um ein sehr kleines und mit einem halben Kilogramm Gewicht sehr leichtes Lasersystem.

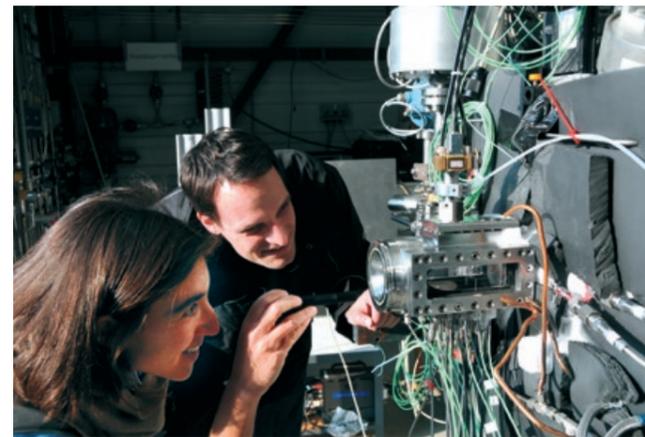
Die ersten Laserzündtests von Versuchsbrennkammern fanden in den Neunzigerjahren am Prüfstand M3.1 des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen statt. Ziel war es, experimentelle Daten zu gewinnen, mit denen der Zündprozess in Zahlen gefasst werden konnte: Dank des präzise festlegbaren Zündorts und -zeitpunkts eignet sich die Laserzündung perfekt für die numerische Simulation der Zündung. So konnten die Forscher die wechselseitigen Abhängigkeiten von Einspritzeneigenschaften der Treibstoffe, Zündzeitpunkt und Druckverlauf nach der Zündung untersuchen. An eine technische Übertragung auf reale Triebwerke war zu diesem Zeitpunkt noch nicht zu denken.

Die erste Version eines Laserzünders wurde von CTR im Jahr 2004 mit dem Ziel entwickelt, die elektrischen Zündkerzen für Pkw-Motoren zu ersetzen. Schnell zeigte sich, dass angesichts der Vibrationen und Temperaturen beim Betrieb von Pkw ein sehr kompakter und aus möglichst wenigen Komponenten bestehender Festkörperlaser nötig war. Auch an Laserzündern für Großgasmotoren und Flugzeugturbinen wurde gearbeitet. Dazu musste der Laser von Wasserkühlung auf eine passive Kühlung umgestellt und weiter verkleinert werden. Es entstand zudem eine kompakte, luftfahrttaugliche Elektronikbox. Damit waren auch die Voraussetzungen geschaffen, um das System in der Raumfahrt einzusetzen.

Erst 2009 wurde die Laserzündung als Zündtechnologie für sogenannte Lageregelungstriebwerke in Erwägung gezogen. Diese kleinen Triebwerke werden sowohl auf Satelliten als auch in Trägerraketen eingesetzt, um die Lage und Ausrichtung während des Starts und des Fluges zu korrigieren, zu ändern oder zu halten. Heutige Lageregelungssysteme werden mit hydrazinbasierten Treibstoffen betrieben. Sie haben den Vorteil, kein Zündsystem zu benötigen, sind aber giftig und gelten als krebserregend. Als 2007 die REACH-Verordnung der EU in Kraft trat, wurde die Anwendung bestimmter umweltschädlicher Stoffe eingeschränkt oder untersagt. Hydrazin gehört dazu. Eine Alternative ist die Nutzung von Wasserstoff und Sauerstoff aus den Haupttanks der Rakete. Für den Betrieb benötigen solche Lageregelungstriebwerke jedoch ein leichtes und zuverlässiges Zündsystem. Deshalb wurde die Laserzündung für flüssigen Sauerstoff und gasförmigen Wasserstoff oder gasförmiges Methan an einer Versuchsbrennkammer am DLR-Teststand M3.1 untersucht.

Diese Versuchsbrennkammer ermöglicht in Kombination mit dem Vakuumsystem des Teststands, den sehr geringen Druck zu simulieren, der bei großen Flughöhen herrscht. Eine sechsmonatige Versuchskampagne mit über 300 Testläufen bewies, dass die Laserzündung nicht nur unter den Bedingungen auf der Erdoberfläche, sondern auch für Höhenbedingungen geeignet ist. Zugleich wurde der miniaturisierte HiPoLas-Laser in einer Raketenversuchsbrennkammer eingesetzt. Der Erfolg dieser Tests war der Grundstein für die weitere Entwicklung der Laserzündung in der Raumfahrtantriebstechnik in Europa.

Die Technologie, die zunächst nur für Triebwerke zur Lageregelung angedacht war, wurde nach den ersten Grundagentests 2011 auch als mögliche Prüfstandtechnologie betrachtet. Pro Versuchstag sollten durch den Einsatz nur eines Laserzünders viele Zündtests möglich werden. Zeitgleich wurde die Laserzündung aber auch als Technologie für die Zündung von größeren Triebwerken identifiziert. Auf das erste ESA-Forschungsprojekt folgte 2014 ein zweites. Es hatte zum Ziel, die Laserzündung einer Brennkammer mit mehreren Einspritzelementen unter

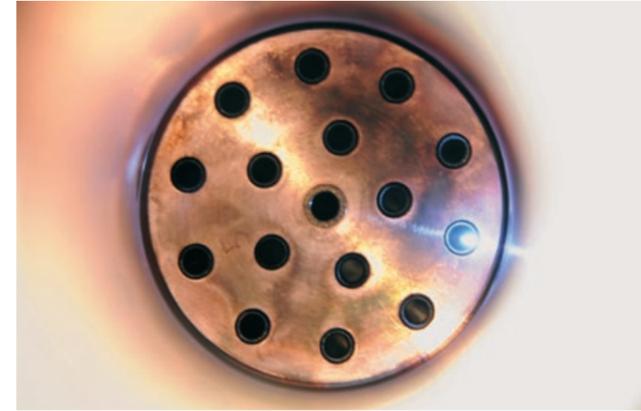


Am DLR-Teststand M3.1: Die Versuchsbrennkammer wird am Ende eines Testtages auf Schäden untersucht.

Höhenbedingungen zu testen. Die Grundagentests am Teststand M3.1 des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen waren so vielversprechend, dass eine Testkampagne am Europäischen Forschungs- und Technologieprüfstand P8, ebenfalls am DLR-Institut für Raumfahrtantriebe, folgte. Sie sollte die Eignung der Laserzündung für den Einsatz in Brennkammern von bodengezündeten Triebwerken mit hohem Schub unter Beweis stellen.

Während der viermonatigen Testkampagne Ende 2014 wurden mehr als 1.500 Zündtests für die Treibstoffkombinationen Sauerstoff/Wasserstoff und Sauerstoff/Methan durchgeführt. An kryogenen Testständen des DLR war es die Kampagne mit den meisten Zündungen überhaupt. In jeweils dreißigminütigen Versuchsläufen wurde die Brennkammer sechzig Mal gezündet, auf ihren stationären Betriebspunkt gebracht und wieder heruntergefahren. Diesen Eignungstest bestand die Laserzündung mit Bravour.

Parallel zu diesen Grundlagenuntersuchungen des DLR bereitete das Unternehmen ASL seit 2012 die industrielle Anwendung laserbasierter Zündsysteme für Raketentriebwerke vor. Die Arbeiten von ASL konzentrierten sich auf die Integration eines solchen Zündsystems in ein existierendes Triebwerk und auf die Demonstration der Machbarkeit unter Betriebsbedingungen, wie sie bei einer Raumfahrtmission auftreten.



Blick durch die Düse der Brennkammer auf die Einspritzelemente des Injektorkopfs mit dem mehrere tausend Grad heißen Plasma, erzeugt durch den Laserpuls

Dabei sind diverse Systemanforderungen zu berücksichtigen: In einem realen Triebwerk muss sich das Zündsystem nahtlos in die Architektur der gesamten Stufe einfügen. Das betrifft unter anderem die Stromversorgung sowie die elektromagnetische Verträglichkeit des Systems mit anderen elektronischen Komponenten oder Baugruppen auf der Träger Rakete. Auch der maximal mögliche Bauraum sowie die Zugänglichkeit für Montage- und Wartungsarbeiten sind zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Regularien einzuhalten, die in Europa für Raumfahrtkomponenten gelten. So müssen Bauteile vermieden werden, die durch internationale Gesetzgebung nur eingeschränkt verfügbar sind. Für das Zündsystem sind zudem Nachweise zur Zuverlässigkeit bei Vibrationen und Temperaturschwankungen zu führen, die bereits in der Entwurfsphase des Systems berücksichtigt werden müssen. Der Zündlaser muss thermisch hinreichend gut von der Umgebung entkoppelt werden und den verbleibenden Temperaturschwankungen und mechanischen Lasten standhalten. Gleichzeitig muss der optische Zugang zum Brennraum so ausgelegt werden, dass thermische Einflüsse die Zündeigenschaften nicht verschlechtern.



Luftbild eines Vulcain 2-Tests am Prüfstand P5 des DLR in Lampoldshausen

Die DLR-Wissenschaftler arbeiten weiter an Experimenten mit Brennkammern im kleinen Maßstab, um so den Schritt zur Anwendung im Originalmaßstab zu gehen. Dabei handelt es sich um ein Technologie-demonstrator-Triebwerk im Originalmaßstab eines Flugtriebwerks.



MIT DER NEUGIER ALS TREIBENDER KRAFT

Fünf Fragen an die Beitragsautorin Dr.-Ing. Chiara Manfletti

Wann war Ihnen klar, dass Sie sich beruflich mit Raketentriebwerken befassen wollen?

Es gab da so einen Moment, noch vor dem Beginn meines Studiums, im September 1997. In den Fernsehnachrichten kam ein Video über die Huygens-Sonde der ESA, es zeigte, wie sie in die Atmosphäre des Saturn-Mondes Titan eintauchte. In dem Moment wusste ich: Ich will so etwas machen – Raumtransporte ermöglichen! Ich ging zu meinen Eltern und sagte: „Ich ziehe nach London, ich werde Raumfahrt machen.“ So ging die Reise los.

Welche Fähigkeit oder Fertigkeit ist besonders wichtig, wenn man sich mit Raumfahrtantrieben befasst?

Die Fähigkeit, alles theoretisch Erlernte und praktisch Erfahrene genau dann einzusetzen, wenn es notwendig ist. Ich sehe es wie einen Beutel mit magischen Instrumenten, den man auf Exkursion bei sich trägt, und aus dem man sich je nach Anlass bedient und genau weiß, was man jetzt rausholen muss. Man sollte offen für Neues, vielleicht auch erst mal unmöglich Erscheinendes sein.

Welchen Beruf hätten Sie gern ergriffen, wenn Sie nicht Raumfahrtingenieurin geworden wären?

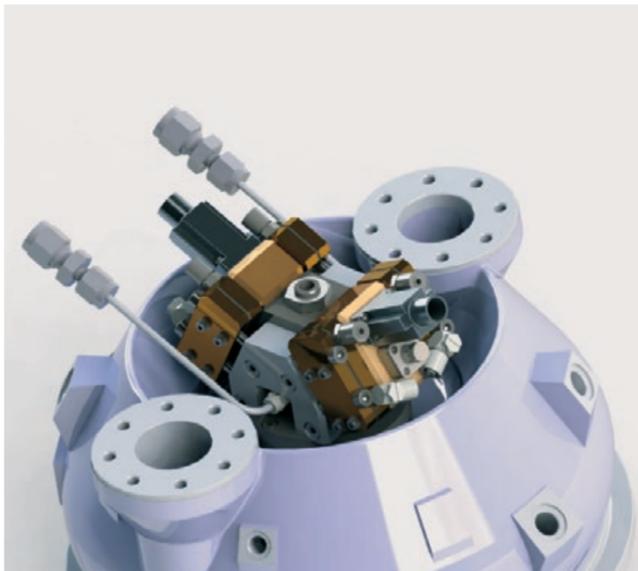
Ich bin ein neugieriges Wesen – für mich kam vieles infrage, von Meeresbiologin, Juristin, Journalistin, Tierärztin, Bauingenieurin, ... die Liste ist lang, ... ich wollte auch mal der italienischen Luftwaffe beitreten und Kampfpilotin werden.

Würden Sie selbst auch ins All fliegen?

Oh ja! – Wann geht es los?

Mögen Sie Silvester?

Absolut! Freunde, Familie, Sekt, Schnee, Linsen um Mitternacht (... italienischer Brauch) ... und natürlich die Silvesterraketen.

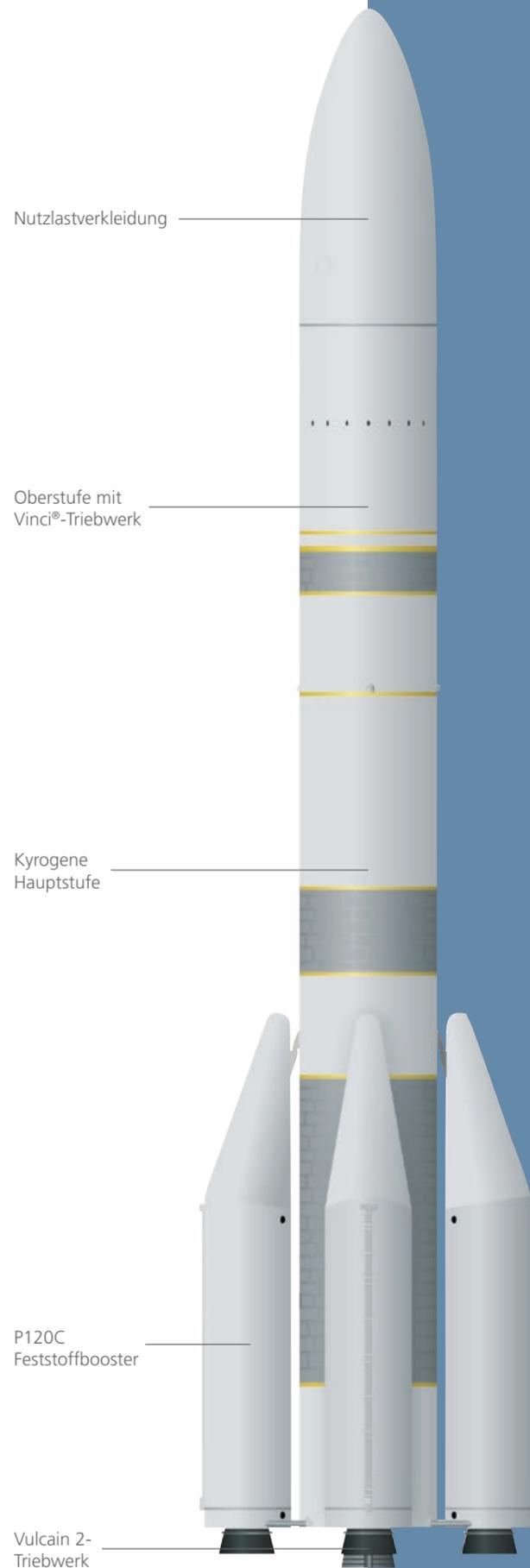


Laserzündsystem im Gasgenerator des Vulcain 2-Triebwerks

Dieser Demonstrator wird 2017 auf dem DLR-Prüfstand P3 in Lampoldshausen getestet werden. Die Funktionalität des dafür gebauten Laserzündsystems wurde im Herbst 2015 auf dem Forschungsprüfstand P8 im Rahmen einer eigenen Testkampagne nachgewiesen. Bei diesen Tests wurden zusätzlich die Ventile so angebracht und die Zündsequenz so realisiert, wie dies beim späteren Triebwerk durch die Interaktion der einzelnen Teilsysteme wie Turbopumpen, Ventile und Kühlsystem vorgegeben ist. Die erneute Zündung des Triebwerks nach einer ersten Brennphase und einer längeren Abschaltung, ähnlich wie es bei einem echten Raketenflug der Fall wäre, konnte ebenfalls demonstriert werden. Das System hat seine technische Reife nachgewiesen und den Weg frei gemacht, die Laserzündung auch für die Anwendung auf dem Vinci®-Oberstufentriebwerk der Ariane 6 unter den dort geltenden Randbedingungen zu prüfen.

Die Erfahrungen an den Prüfständen haben gezeigt, dass die Robustheit eines laserbasierten Zündsystems eine deutliche Verringerung der Betriebskosten für das Trägersystem ermöglicht. Laserzündsysteme für den Einsatz in Raketentriebwerken haben durch die Arbeiten der vergangenen Jahre einen Entwicklungsstand erreicht, der die Anwendung in Flüssigkeitsraketenantrieben erlaubt. Der erste Einsatz auf einer Trägerrakete Ariane 6 ist in greifbare Nähe gerückt. Mit Spannung erwarten die Forscher den Jungfernflug 2020 und hoffen, dass die Laserzündung dabei genauso funktioniert wie in den Tests und entscheidend zum Erfolg beiträgt.

Dr.-Ing. Chiara Manfletti forschte bis April 2016 in der Abteilung Raketenantriebe des DLR-Instituts für Raumfahrtantriebe und leitete die Gruppe Triebwerkstransienten. Dann wechselte sie zur ESA. **Gerhard Kroupa** ist Projektleiter im Bereich Hochenergie-Laser am Forschungszentrum Carinthian Tech Research AG. **Michael Börner** arbeitet am DLR-Institut für Raumfahrtantriebe als Projektleiter im Bereich Zündprozesse. **Sebastian Soller** ist Systemingenieur und Projektleiter im Bereich Forschung und Entwicklung bei Airbus Safran Launchers GmbH.



Vulcain 2-Triebwerk während eines Tests am DLR-Prüfstand P5



Vinci®-Triebwerk am DLR-Prüfstand P4.1

DIE TRIEBWERKE DER ARIANE 5 UND 6

Das Hauptstufentriebwerk Vulcain 2 der heutigen Ariane-5-Rakete arbeitet mit flüssigem Sauerstoff und flüssigem Wasserstoff. Sein Maximalschub von 1.359 Kilonewton (kN) würde ausreichen, um das Gewicht von 100 Kleinwagen zu tragen. Zusammen mit dem neuen Vinci®-Oberstufentriebwerk (180 kN Schub) wird die Ariane 6 auch Missionen fliegen können, bei denen die Wiederzündung eines Triebwerks notwendig ist, also wenn eine Nutzlast auf eine bestimmte Umlaufbahn um die Erde oder zu anderen Himmelskörpern gebracht werden muss, oder wenn mehrere Nutzlasten mit nur einer Trägerrakete auf unterschiedliche Bahnhöhen gebracht werden sollen. Auch kann die Raketenoberstufe nach der Trennung von der Nutzlast mit einem Triebwerk zur Bahnkorrektur zum Wiedereintritt in die Atmosphäre gebracht werden, um sie nicht als Weltraumschrott im Erdorbit zu hinterlassen.

Für eine einmalige Zündung gibt es unterschiedliche technische Lösungen: Um das Vulcain 2-Triebwerk hochzufahren, werden derzeit pyrotechnische Elemente eingesetzt. Sie funktionieren ähnlich wie Treibladungen von Silvesterraketen. Solche Elemente zünden sowohl die Brennkammer als auch den Gasgenerator von Vulcain 2. Vorteile pyrotechnischer Zünder sind deren einfache Bauweise, das geringe Gewicht und das kompakte Bauvolumen. Nachteilig ist zum einen, dass pyrotechnische Elemente nur einmal verwendet werden können und

deshalb eine Wiederzündung des Triebwerks ausschließen. Außerdem unterliegen sie der Sprengstoffverordnung, was den Zusammenbau der Raketen komplizierter macht und damit verlangsamt.

Eine Alternative zu den pyrotechnischen Zündern sind Gasfackelzünder. Diese nutzen Zündkerzen, um in einer kleineren, separaten Brennkammer den gasförmigen Oxidator (zum Beispiel Sauerstoff) und den gasförmigen Brennstoff (zum Beispiel Wasserstoff) zu zünden und zu verbrennen. Danach wird das entstehende Heißgas in die Hauptbrennkammer eingeleitet, um die dort eingespritzten Treibstoffe zu zünden. Der Vorteil der elektrischen Zünder: Das Triebwerk ist wiederzündbar. Nachteilig sind neben der kleinen Brennkammer die vielen zusätzlichen Komponenten wie Treibstoffleitungen, Steuerventile und das separate Treibstoffhochdruckversorgungssystem. Sie machen das Triebwerk schwerer und wegen der vielen Komponenten muss die Reihenfolge, in der Zünder und Treibstoffventile aktiviert werden, präzise abgestimmt sein. Wird jedoch ein Laserzünder direkt an der Hauptbrennkammer angebracht, entfallen diese komplexen Teilschritte und ebenso die schweren Bauteile. Das macht die Zündung durch einen Laser zu einer vielversprechenden Alternative. Deshalb wird sie aktuell nicht nur für das Vulcain 2-Triebwerk, sondern auch für das Vinci®-Triebwerk der Ariane 6 untersucht.

