

DENSO

ZÜNDKERZEN

DENSO Technologie entdecken



Driven by
Quality

DENSO Aftermarket Europe ist ein Teil der DENSO Corporation, die weltweit zu den Top 3 Herstellern von fortschrittlichen Technologien, Systemen und Komponenten für den Automobilbereich zählt.

Seit der Gründung im Jahr 1949 entwickelte sich DENSO zu einem Pionier bei hochwertigen Produkten für die Automobilindustrie und zum Lieferanten eines großen Sortiments von Originalausrüstung für jeden größeren Fahrzeughersteller der Welt. So finden Sie DENSO Originalteile in neun von zehn Autos auf der Straße.

Wir sind stolz, diese einzigartige Kompetenz dem Freien Teilehandel zur Verfügung zu stellen. Unsere technologisch fortschrittliche Produktpalette wurde speziell für Großhändler und Endkunden zusammengestellt. Die Aftermarket-Produkte erfüllen dieselben Spezifikationen wie die Produkte, die an die Erstausrüster (OEMs) geliefert werden.

Zündkerzen sind einer der Schwerpunkte, auf die sich DENSO spezialisiert hat. Auf unsere kontinuierliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit gehen viele der wichtigsten Innovationen der Branche zurück, darunter die U-Rillen-Technologie, die weltweit kleinste Iridiumspitze und die ersten vorspringenden Masseelektroden. Als wichtiger Sponsor und technischer Partner von Toyota Gazoo WEC, Volvo Cyan WTCC, Toyota WRC, Subaru WRT und anderen Motorsportteams wissen wir auch alles über Hochleistung und nutzen diese Erfahrung als Grundlage unserer Iridium- und Rennsportangebote.

Da wir die passende Zündkerze für jede Anwendung und Motorisierung anbieten, können Sie sich stets auf DENSO verlassen.



Verfasser

Wouter Knol – **DENSO Aftermarket Application Engineer**

Mitverfasser

Peter Coombes – **Technischer Redakteur**

Gilbert Couvert – **DENSO Aftermarket Product Manager**

Inhaltsverzeichnis

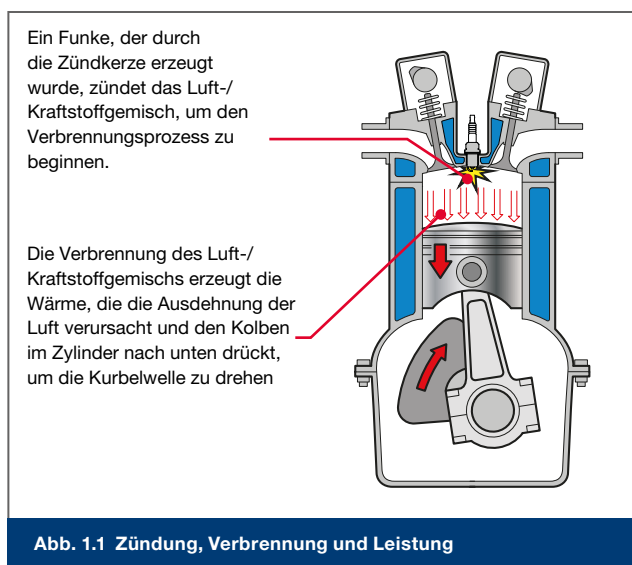
1.	EINFÜHRUNG: ZÜNDKERZEN	2
1.1.	Zündkerzen: ein entscheidender Teil des Verbrennungsprozesses.....	2
1.2.	Betriebsanforderungen für moderne Zündkerzen.....	3
1.3.	Verschiedene Zündkerzen für verschiedene Motoren.....	4
2.	4-TAKT-MOTORBETRIEB UND VERBRENNUNGSPROZESS.....	6
2.1.	Der 4-Takt-Zyklus: Einlass, Verdichtung, Zündung, Auslass.....	6
3.	BETRIEB DER SPULENZÜNDANLAGE	8
3.1.	Die Aufgaben einer Zündanlage.....	8
3.2.	Die Einführung der Spulenzündung	8
3.3.	Zündspulen: Umwandeln einer Niederspannung in eine Hochspannung.....	9
3.4.	Spulen-Aufladezeit und Verweildauer.....	11
3.5.	Zündzeitpunkt: Erzeugung des Funkens zur richtigen Zeit	12
4.	MECHANISCHE UND ELEKTRONISCHE ZÜNDANLAGEN	16
4.1.	Einfache, mechanische Zündanlage	16
4.2.	Frühe elektronische Zündanlagen.....	20
4.3.	Moderne elektronische Zündanlagen	21
5.	DER VERBRENNUNGSPROZESS IM DETAIL.....	24
5.1.	Die Verbrennung von Kraftstoff und Sauerstoff	24
5.2.	Erzielen einer guten Verbrennung	26
5.3.	Ursachen und Probleme schlechter Verbrennung	27
5.4.	Schadstoffe und schädliche Abgase, die während der Verbrennung entstehen	29
5.5.	Verringern der Abgase und Senkung des Kraftstoffverbrauchs	30
6.	ZÜNDKERZEN.....	32
6.1.	Der Schlüssel zur Verbrennung.....	32
6.2.	Leistungsanforderungen	32
6.3.	Aufbau der Zündkerze.....	33
6.4.	Elektrischer Funke und erforderliche Funkenspannung.....	35
6.5.	Betriebsbedingungen mit Auswirkungen auf die Zündkerzenspannung	36
6.6.	Wärmewert.....	39
6.7.	Flammenlöschung beeinträchtigt Flammenerzeugung und Flammenwachstum	41
7.	DENSO TECHNOLOGIEN: VERBESSERUNG DER ZÜNDKERZENLEISTUNG	42
7.1.	DENSO Entwicklung.....	42
7.2.	Elektrodenmaterialien.....	43
7.3.	Materialien für die Mittelelektrode	44
7.4.	Masseelektrode	45
7.5.	Andere Technologien, die an DENSO Zündkerzen verwendet werden	47
7.6.	Künftige Trends.....	48
8.	DENSO PRODUKTSORTIMENT	50
8.1.	Direct Fit.....	50
8.2.	Twin Tip.....	52
8.3.	Iridium Power	53
8.4.	Iridium Racing.....	54
9.	UPGRADE FÜR IHRE ZÜNDKERZEN	56
9.1.	Warum ein Upgrade Ihrer Zündkerze?	56
9.2.	Leistungsabgabe.....	57
9.3.	Kraftstoffeinsparung und Abgase.....	58
9.4.	Geschmeidiger Leerlauf, Fehlzündungen und Anlassen	59
9.5.	LPG und CNG umgerüstete Autos	60
9.6.	Tuning und Rennsport	61
10.	FAQ, INSTALLATION UND FEHLERBEHEBUNG.....	62
10.1.	FAQ	62
10.2.	Richtige Montage von Zündkerzen	64
10.3.	Fehlerbehebung.....	65

1. EINFÜHRUNG

1.1 Zündkerzen: ein wichtiger Teil des Verbrennungsprozesses

Verbrennungsmotoren: Erzeugen von Wärme zum Produzieren von Leistung

Verbrennungsmotoren produzieren Leistung, indem sie die Energie nutzen, die bei der Erwärmung von Luft in den Zylindern durch die Verbrennung von Kraftstoff erzeugt wird. Die Wärme bewirkt die rasche Ausdehnung der Luft, die wiederum eine Bewegung des Kolbens entlang der Zylinder auslöst, sodass die Kurbelwelle (Abb. 1.1) gedreht wird.



Der Verbrennungsprozess ist daher einer der wichtigsten Bestandteile des gesamten Motorbetriebszyklus; wenn die Verbrennung nicht effizient erfolgt, erzeugt der Motor nicht die erforderliche Leistung. Außerdem verursacht eine ineffiziente Verbrennung einen hohen Schadstoffausstoß und übermäßigen Kraftstoffverbrauch.

Um eine effiziente Verbrennung zu erreichen, muss die Luft im Zylinder mit einer kleinen Menge an Kraftstoff in einem exakten Verhältnis gemischt werden. Das Gemisch wird dann innerhalb des Zylinders durch die Bewegung des Kolbens komprimiert, was sie in einem kleinen Raum zusammenpresst, der als Brennraum bezeichnet wird (siehe Kapitel 2).

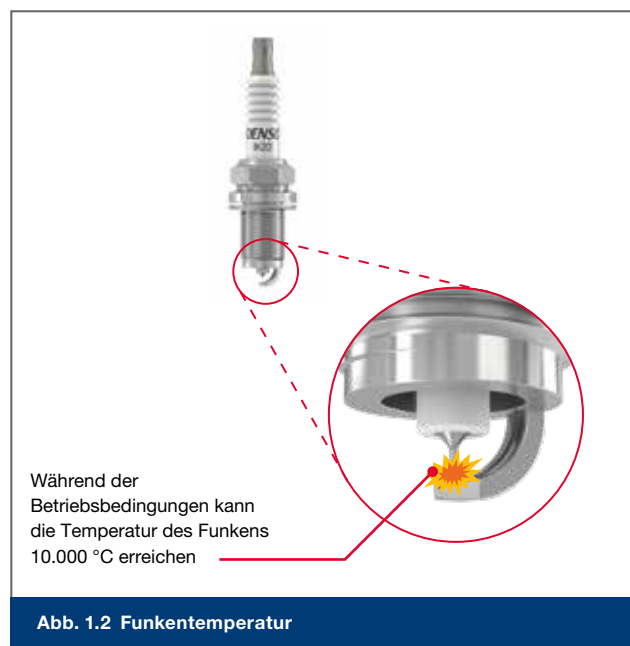
Die Komprimierung des Luft- und Kraftstoffgemischs erzeugt zwar Wärme, die aber für die Zündung des Gemischs nicht ausreicht. Daher ist eine zusätzliche Wärmequelle zum Einleiten der Verbrennung erforderlich. Die zusätzliche Wärme wird durch das Erzeugen eines Funkens (einem heißen elektrischen Lichtbogen) mithilfe einer Zündkerze bereitgestellt, die an strategisch vorteilhafter Stelle im Brennraum untergebracht ist.

Die Luft in der Atmosphäre (und daher im Zylinder) besteht aus ungefähr 78 % Stickstoff und rund 21 % Sauerstoff sowie kleinen Prozentsätzen von Argon, Kohlendioxid und einigen anderen Gasen. Der Kraftstoff (Benzin) besteht aus Wasserstoff und Kohlenstoff. Während des Verbrennungsprozesses, bei dem die im Kraftstoff gespeicherte Energie freigesetzt wird, reagieren die Gase und Elemente in der Luft

sowie der Kraftstoff chemisch miteinander, wobei sich verschiedene Gase bilden. Wenn wir somit von der Ausdehnung der Luft im Zylinder sprechen, handelt es sich tatsächlich um die Ausdehnung einer Gasmischung.

Die Zündkerze ist die entscheidende Komponente für den Verbrennungsprozess

Zum genau richtigen Zeitpunkt liefert die Zündanlage der Zündkerze einen kurzen Hochspannungsstoß, der den Funken über eine kleine Zündstrecke an der Spitze der Zündkerze erzeugt. In der Mitte bzw. dem Kern des Funkens (Abb. 1.2) kann die Temperatur kurz 10.000 °C erreichen oder sogar überschreiten, was ausreichend Wärme bereitstellt, um einen kleinen Teil des Gemischs in der Nähe der Zündkerzenspitze zu zünden.



Diese anfängliche Verbrennung erzeugt dann eine heiße Flamme, die sich auf den Rest des Gemischs ausbreitet und somit eine Verbrennung im gesamten komprimierten Luft-/Kraftstoffgemisch im Brennraum erzeugt.

Diese Wärme, die durch den Verbrennungsprozess erzeugt wird, verursacht dann die Expansion der komprimierten Gase im Zylinder, die den Kolben am Zylinder entlang schieben. Allerdings ist die Zündkerze die kritische Komponente beim Erzeugen der anfänglichen hohen Temperatur, die den gesamten Verbrennungsprozess erzeugt.

1.1. Zündkerzen: ein entscheidender Teil des Verbrennungsprozesses	2
1.2. Betriebsanforderungen für moderne Zündkerzen	3
1.3. Verschiedene Zündkerzen für verschiedene Motoren	4

1.2. Betriebsanforderungen für moderne Zündkerzen



Temperatur

Während die Zündkerzenelektroden anfänglich Temperaturen von bis zu 10.000 °C während des sehr kurzen Zeitraums beim Auftreten des Funkens ausgesetzt sind, liegen die Temperaturen, die während des längeren Verbrennungsprozesses auf Gehäuse und Elektroden der Zündkerze einwirken, im Bereich von 3.000 °C. Es gibt aber auch schnelle Temperaturänderungen, beispielsweise beim Eintritt von frischer Luft in den Zylinder während des Einlasstakts. Dies bewirkt einen sofortigen Kühleffekt für die Zündkerze, die gerade erst den hohen Verbrennungstemperaturen ausgesetzt war.

Es besteht nicht nur die Möglichkeit, dass die hohen Temperaturen Schäden an den Elektroden und am Gehäuse der Zündkerze verursachen, sondern es besteht auch das Risiko, dass ein Teil der Zündkerze so heiß bleiben könnte, dass dies eine Frühzündung bewirkt. Dies ist dann der Fall, wenn ein heißer Punkt auf der Zündkerze bereits das Luft-/Kraftstoffgemisch entzündet, bevor der Funke auftritt. Diese vorzeitige oder Frühzündung des Luft-/Kraftstoffgemischs verursacht eine vorzeitige Verbrennung, die zur Folge hat, dass Druckanstieg und Ausdehnung der Gase zu früh auftreten. Die zu frühe Gasausdehnung und der damit verbundene Druckanstieg verursacht die Krafteinwirkung auf den Kolben nach unten bevor dieser den obersten Punkt des Verdichtungsstakts (siehe Abschnitt 5.3) erreicht hat.

Zuverlässigkeit und Haltbarkeit

Unabhängig vom Motordesign herrschen in dem Bereich im Zylinder in dem die Verbrennung erfolgt, sehr ungünstige Umgebungsbedingungen. Die Zündkerze muss einen Funken mit hoher Temperatur erzeugen, um das Luft-/Kraftstoffgemisch zu zünden. Zudem muss die Zündkerze in der Lage sein, über eine Fahrleistung von vielen Tausenden von Kilometern und vielen Millionen von Verbrennungszyklen weiterhin einen Funken bereitzustellen.

Spannung und Funke

Die primäre Aufgabe der Zündkerze besteht darin, hohe Spannungen zu nutzen, um einen sehr schnellen heißen und intensiven Funken zu erzeugen. Die Spannungen sind typischerweise im Bereich von 10.000 bis 40.000 Volt (10 kV bis 40 kV), aber der Trend geht jetzt in Richtung von Spannungen von 45 kV und höher. Der Zündkerzenaufbau muss daher eine gute Isolation zwischen den verschiedenen Komponenten haben, um zu gewährleisten, dass die Hochspannung nicht überbrückt wird oder einen Kurzschluss zu anderen Komponenten verursacht.

Druck

Während der Verbrennung können höhere Drücke von typischerweise rund 50 bar erzeugt werden. Bei einigen Hochleistungsmotoren können sie sogar noch viel höher sein.

Daher muss eine gute Druckabdichtung zwischen dem Zündkerzengehäuse und dem Motor gewährleistet sein. Die Konstruktion der Zündkerze muss auch eine interne Dichtung haben, um zu vermeiden, dass heiße und unter hohem Druck stehende Gase zwischen den verschiedenen Komponenten der Zündkerze hindurchfließen können (Abb. 1.4). Abgesehen vom dann auftretenden Druckverlust, wenn Gase durch die Zündkerzenbaugruppe hindurchfließen können, würde dies Schäden an den Zündkerzenbestandteilen verursachen.

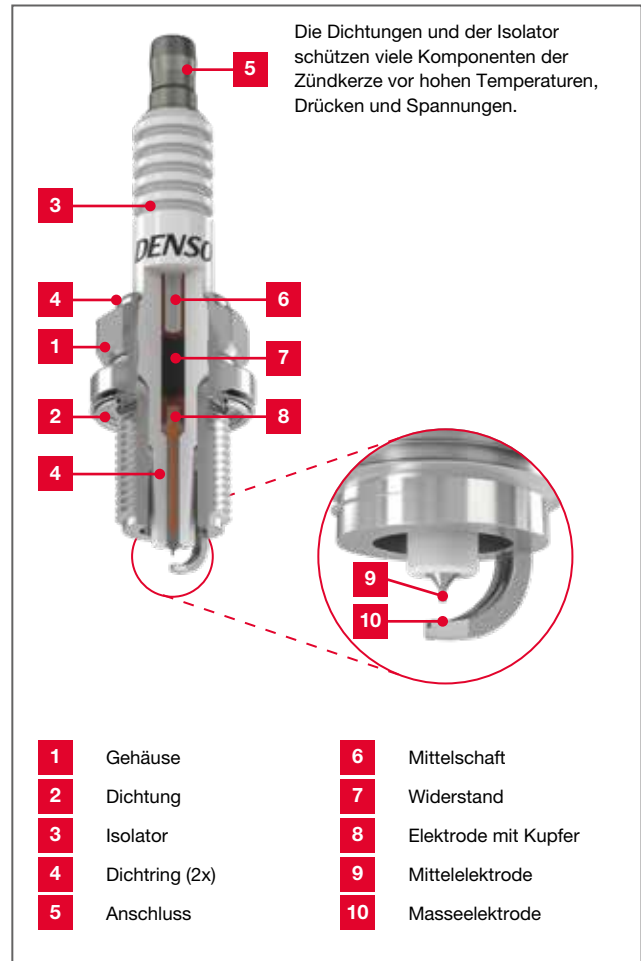
Verunreinigungen und Ablagerung

Der Verbrennungsprozess erzeugt viele verschiedene Verunreinigungen einschließlich verbranntem Kraftstoff und Ölablagerungen, die sich auf der Zündkerze ansammeln und die Leistung beeinträchtigen können. Obwohl die Zündkerze nicht zu heiß werden darf, muss sie ausreichend Wärme beibehalten, um die Verunreinigungen abzubrennen und deren Ablagerung an der Zündkerze zu verhindern (siehe Abschnitt 6.6).

Schlussfolgerung

Die wichtigen Merkmale bei der Auslegung von Zündkerzen sind daher die Fähigkeit, hohen Temperaturen und Temperaturänderungen standzuhalten, sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber hohen Drücken. Gleichzeitig muss die Zündkerze jedoch mit hohen Spannungen betrieben werden, um alle paar Tausendstel Sekunden einen heißen Funken – und dies während der gesamten Lebensdauer der Zündkerze.

Um die schädlichen Auswirkungen von hohen Temperaturen zu vermeiden, muss die Zündkerze fähig sein, Wärme von der Zündkerze weg und durch das Motorgehäuse abzuleiten oder zu übertragen. Es muss jedoch unbedingt beachtet werden, dass das Ableiten oder Übertragen von übermäßig viel Wärme von der Zündkerze die Temperatur des Funkens verringern und schlechte Zündung und Verbrennung verursachen kann. Wenn zu viel Wärme abgeleitet wird, ist die Zündkerze möglicherweise nicht mehr in der Lage, die Verunreinigungen abzubrennen.



Die Dichtungen und der Isolator schützen viele Komponenten der Zündkerze vor hohen Temperaturen, Drücken und Spannungen.

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1 Gehäuse | 6 Mittelschaft |
| 2 Dichtung | 7 Widerstand |
| 3 Isolator | 8 Elektrode mit Kupfer |
| 4 Dichtring (2x) | 9 Mittelelektrode |
| 5 Anschluss | 10 Masseelektrode |

Abb. 1.4 DENSO Iridium-Zündkerze

DENSO HIGHLIGHT

Die Verwendung von Edelmetallen und speziellen Materialien

Die Materialien, die in DENSO Zündkerzen verwendet werden (wie die hochwertigen speziellen Keramikisolatoren und die Edelmetalle, die in den Iridium- und Platinlegierungen für Elektroden verwendet werden), können den sehr hohen Temperaturen in Motor und Brennraum standhalten und machen DENSO Zündkerzen zu den haltbarsten auf dem Markt.

Hochwertige
Keramikisolatoren

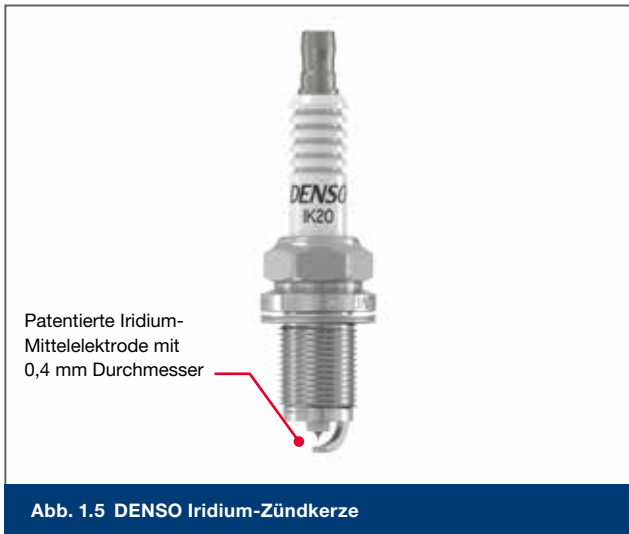
Iridium- und
Platinlegierungen
für Elektroden



1.3. Verschiedene Zündkerzen für verschiedene Motoren

Verschiedene Motorkonstruktionen erfordern zwangsläufig verschiedene Größen von Zündkerzen, deren Gesamtmaße abweichen können. Der Trend hin zu schmalen Zündkerzen bei Motorradanwendungen begann schon vor vielen Jahren, aber auch an den modernen Downsizing-Automotoren werden heute diese schmalen Zündkerzen montiert, die weiterhin denselben ungünstigen Betriebsbedingungen standhalten müssen.

Es gibt auch viele andere Konstruktionsmerkmale von Zündkerzen, die durch spezifische Betriebsbedingungen in verschiedenen Motorkonstruktionen beeinflusst werden. Temperaturen und Drücke innerhalb der verschiedenen Brennraumkonstruktionen sowie die Verwendung von höheren Spannungen haben eine Auswirkung auf den Aufbau einer Zündkerze. Da weiterhin großer Wert auf Abgasreduzierung gelegt wird, entwickeln sich die Zündkerzen kontinuierlich weiter, um die immer strikteren Anforderungen zu erfüllen, die an jede neue Motorgeneration gestellt werden.



Patentierte Iridium-Mittelelektrode mit 0,4 mm Durchmesser

Abb. 1.5 DENSO Iridium-Zündkerze

Für die vielen verschiedenen Motorkonstruktionen wären theoretisch viele verschiedene Zündkerzen mit spezifischen Anforderungen und Spezifikationen erforderlich. Durch die Verwendung fortschrittlicher Designmerkmale ist DENSO jedoch in der Lage, mit einer relativ kleinen Palette von Zündkerzen die Anforderungen von vielen verschiedenen Motortypen zu erfüllen. Fortschrittliche Zündkerzen mit höheren Spezifikationen können viele Zündkerzen mit niedrigeren Spezifikationen ersetzen.

Ein besonderes Merkmal von DENSO Zündkerzen ist die Verwendung von Iridium, sodass DENSO Iridium-Zündkerzen mit einer ultra-dünnen (0,4 mm Durchmesser) Mittelelektrode (Abb. 1.5) hergestellt werden können.

Die Iridium-Elektroden ermöglichen die Verwendung von kleineren Zündstrecken und geringeren Spannungen verglichen mit weniger fortschrittlichen Zündkerzen. Neben einer höheren Festigkeit und einem niedrigeren elektrischen Widerstand verglichen mit traditionellen Elektrodenmaterialien kann Iridium höheren Temperaturen standhalten und ist daher haltbarer.

Die Verwendung von Iridium-Elektroden sowie andere Konstruktionsmerkmale von Zündkerzen werden detailliert in den Kapiteln 6, 7 und 8 behandelt.

DENSO HIGHLIGHT

Eine DENSO Zündkerze für jeden Motor

Maßgeschneiderte Zündkerzen für OEMs

Bei der Entwicklung eines Motors wählen OEMs die Zündkerze auf Grundlage ihrer Anforderungen aus. Angesichts spezifischer Anforderungen spezifischer Motoren haben OEMs andere Bedürfnisse als der Aftermarket.

Für den OEM bietet die Verwendung einer maßgeschneiderten Zündkerze die folgenden Vorteile:

- > Eine Zündkerze, die mit ihren Leistungen mindestens die Minimalanforderungen erfüllt
- > Eine Zündkerze, die über ein akzeptables Austauschintervall verfügt
- > Eine fahrzeugspezifische Zündkerze ist üblicherweise das Ergebnis, wenn minimale Leistungs- und Haltbarkeitsanforderungen zu den niedrigsten Kosten erreicht werden.

Eine fahrzeugspezifische Zündkerze bringt zusätzliche Entwicklungskosten mit sich, wobei die Produktionsmengen häufig groß genug sind, um diese Kosten zu kompensieren.

Im freien Teilehandel (IAM) nutzen einige Zündkerzenhersteller gern diese Vorteile, um ihre eigenen fahrzeugspezifischen Zündkerzen als Original-Zündkerze zu vermarkten. DENSO produziert z.B. auch Zündkerzen mit exakt derselben Spezifikation wie die Original-Zündkerze.

Um jedoch eine komplette Palette anzubieten, die für jedes Auto passt, wären über 400 Zündkerzen erforderlich.

Die Alternative von DENSO

Um diese Anzahl zu verringern, bietet DENSO eine alternative Lösung an: Durch eine Aftermarket-Zündkerze, die eine höhere Leistung als die Original-Zündkerze bietet, kann DENSO mehrere unterschiedliche Zündkerzentypen ersetzen die sich oft nur in kleinen Nuancen unterscheiden. Das „DENSO Twin Tip“-Sortiment deckt z.B. mit nur 35 Teilenummern 90 % des Fahrzeugbestandes ab. Um dies zu erreichen, wurden Hochleistungs-Zündkerzen mit einem einzigartig kleinen Durchmesser und verschleißfesten Elektroden entwickelt.

Schlussfolgerung

Das Twin Tip-Sortiment wird aus Sicht des IAM entwickelt und weist fortschrittliche Technologien auf, die die Spezifikationen von vielen Zündkerzentypen abdeckt. Sie erreichen mindestens die Leistungen der OEM-Zündkerzen und übertreffen diese sogar häufig, sodass die Zündkerzen im Aftermarket konsolidiert werden können.

Nickel-Zündkerze



Platin-Zündkerze



Iridium-Zündkerze



SIP-Zündkerze



Nickel TT-Zündkerze



Iridium TT-Zündkerze



2. 4-TAKT-MOTORBETRIEB UND VERBRENNUNGSPROZESS

2.1. Der 4-Takt-Zyklus: Einlass, Verdichtung, Zündung, Auslass

Der durch N. Otto im Jahr 1876 entwickelte 4-Takt-Motor, auch unter den Bezeichnungen Ottomotor oder funkengezündeter Motor bekannt, basiert auf einem Zyklus aus 4 Prozessen, bei denen es sich um Einlass-, Verdichtungs-, Zündungs- und Auslasstakt handelt.

(1) Einlasstakt

Während des 1. Takts bewegt sich der Kolben im Zylinder nach unten (Abb. 2.1), wobei ein Druck entsteht, der geringer als der Umgebungsdruck ist. Da das Einlassventil offen ist, fließt die Luft außerhalb des Zylinders (die Umgebungsdruck aufweist) in Richtung des geringeren Drucks im Zylinder. So erzeugt die Bewegung des Kolbens einen Saugeffekt (oder Druckunterschied), der die Luft einsaugt.

Wenn Turbolader oder Kompressoren montiert sind, wird die Luft komprimiert, sodass noch mehr Luft durch den Einlasskrümmer in den Zylinder fließt.

Bei den meisten bereits im Einsatz befindlichen Motoren wird die erforderliche kleine Kraftstoffmenge mit der Luft gemischt, indem der Kraftstoff während oder manchmal unmittelbar vor dem Einlasstakt in den Einlasskrümmer eingespritzt wird. Allerdings haben einige moderne Motoren eine direkte Kraftstoffeinspritzung, bei der der Kraftstoff direkt in den Zylinder während des Einlasstakts eingespritzt wird oder (während bestimmter Motorbetriebsbedingungen) bei denen der Kraftstoff in den frühen Phasen des Verdichtungstakts eingespritzt werden kann.

(2) Verdichtungstakt

Während des 2. Takts (Abb. 2.2) wird das Einlassventil geschlossen, sodass der Zylinder abgedichtet und das Austreten von Luft oder Ablassen von Druck vermieden wird. Der Kolben bewegt sich im Zylinder nach oben, was das Luft- und Kraftstoffgemisch auf ungefähr 1/10 seines ursprünglichen Volumens komprimiert (das Ausmaß der Verdichtung hängt von der Motorkonstruktion ab). Der Druck im Zylinder weist daher theoretisch ungefähr das 10-fache des Umgebungsdrucks (10 bar) oder unter bestimmten Umständen sogar einen noch höheren Wert auf, wenn der Motor mit einem Turbolader oder Kompressor aufgeladen wird.

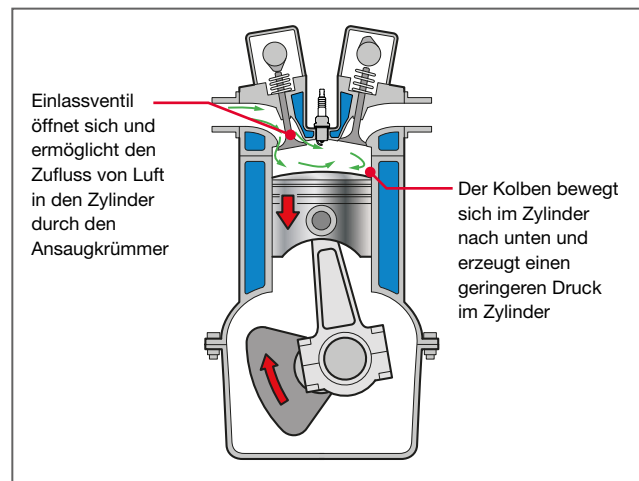


Abb. 2.1 Einlasstakt

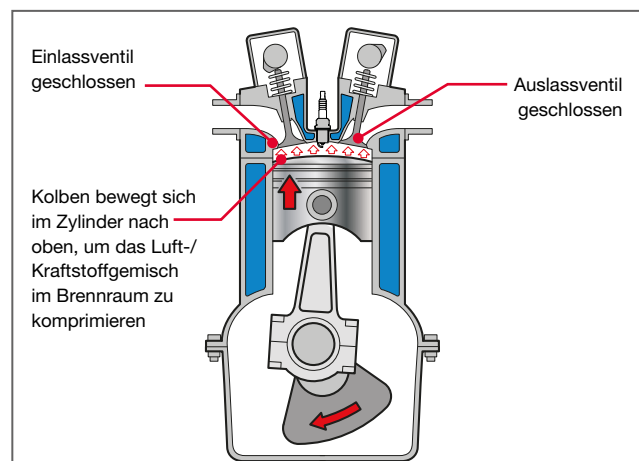


Abb. 2.2 Verdichtungstakt

(3) Zündungstakt (Verbrennungs- oder Arbeitstakt)

Während des 3. Takts (Abb. 2.3) erzeugt die Verbrennung des Luft-/Kraftstoffgemischs die Wärme, die die Ausdehnung der Luft verursacht und den Kolben im Zylinder nach unten drückt, wodurch effektiv die Leistung erzeugt wird, um die Kurbelwelle zu drehen. Im Gegensatz zu Dieselmotoren, die ein viel höheres Verdichtungsverhältnis haben, wird zwar beim Verdichtungstakt das Luft-/Kraftstoffgemisch erwärmt, aber nicht ausreichend für die Zündung. Daher wird eine Zündkerze verwendet, um einen heißen Funken zu erzeugen, der die erforderliche Wärme zum Einleiten des Verbrennungsprozesses bereitstellt.

Theoretisch sollte der Funke genau dann erzeugt werden, wenn der Kolben die Oberseite des Zylinders erreicht (oberer Totpunkt oder OT), wenn der Kolben kurz davor ist, sich im Zylinder wieder nach unten zu bewegen. Da es aber einige Tausendstelsekunden dauern kann, bis sich die Mischung entzündet und vollständig verbrennt (und dann den hohen Druck im Zylinder erzeugt), muss der Verbrennungsprozess geringfügig früher bzw. vor dem Zeitpunkt starten, zu dem die Wärme und Ausdehnung tatsächlich erforderlich sind. Die Zündkerze stellt daher üblicherweise den Funken zum Einleiten der Verbrennung bereit, während sich der Kolben noch dem OT am Ende des Verdichtungstakts nähert (siehe Abschnitt 4.3).

Diese frühzeitige Auslösung des Funkens und der dadurch frühere Beginn der Verbrennung ermöglichen dann ein progressives, aber schnelles Fortschreiten des verbleibenden Verbrennungsprozesses, um die erforderliche Wärme für die Ausdehnung der Gase im Zylinder bereitzustellen.

Obwohl wir diesen Takt im Allgemeinen als Zündungstakt bezeichnen, kann er auch als Verbrennungstakt oder Arbeitstakt betrachtet werden, weil während dieses Takts das Luft-/Kraftstoffgemisch verbrennt und die Kraft erzeugt, die den Zylinder nach unten drückt und den Motor antreibt.

(4) Auslasstakt

Während des 4. Takts (Abb. 2.4) ist das Auslassventil offen und die fortgesetzte Drehung der Kurbelwelle bewegt den Kolben im Zylinder nach oben, wodurch die verbrannten Gase aus dem Zylinder in das Abgassystem fließen.

Nach diesem 4. Takt schließt sich das Auslassventil und der gesamte 4-Takt-Zyklus kann wieder beginnen, wobei sich das Einlassventil zu Anfang wieder öffnet und eine frische Füllung an Luft und Kraftstoff bei einem neuen Einlasstakt in den Zylinder fließt.

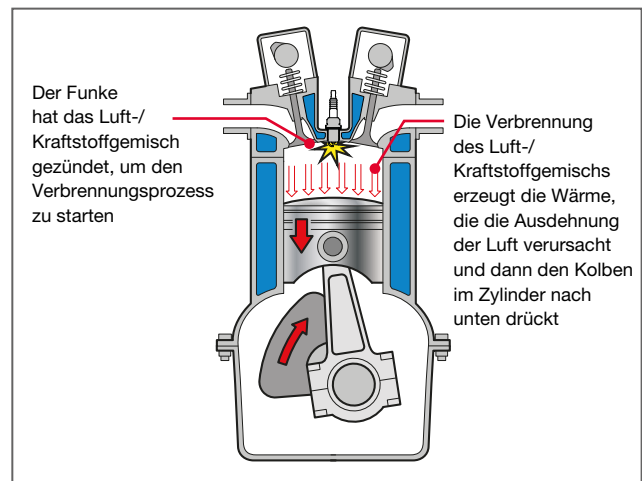


Abb. 2.3 Zündungs-/Arbeitstakt

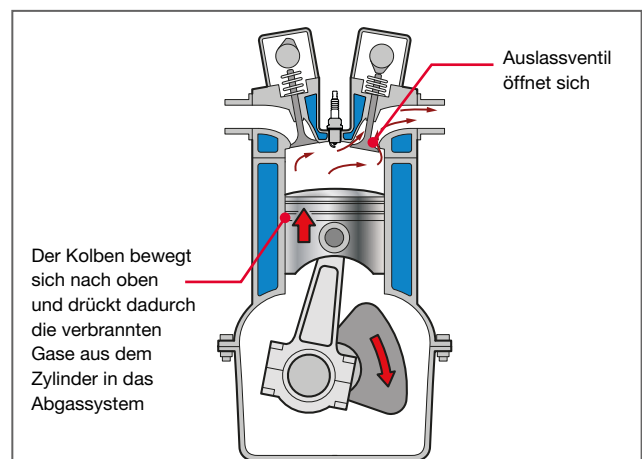


Abb. 2.4 Auslasstakt

Alternative Verbrennungsmotoren

Die meisten Automotoren werden mit dem 4-Takt-Zyklus betrieben; einige Motoren nutzen den 2-Takt-Zyklus oder das Rotationskolben- oder Wankelprinzip. Obwohl es Unterschiede im Betrieb gibt, basieren alle Motoren auf dem Komprimieren eines Luft-/Kraftstoffgemischs, die dann mit einer Zündkerze gezündet wird, wobei der erhöhte Druck zum Erzeugen von Drehkraft verwendet wird.

3. BETRIEB DER SPULENZÜNDANLAGE

3.1. Die Aufgaben einer Zündanlage

Zuverlässigkeit, lange Wartungsintervalle, Unterstützung bei der Abgasreduzierung

Zündanlagen haben sich im Laufe der Jahre von eher einfachen mechanischen Systemen zu den elektronischen Hightech-Systemen entwickelt, die heute in modernen Autos vorherrschen. Obwohl moderne Motoren mit höheren Verbrennungstemperaturen und -drücken, magereren Luft-/Kraftstoffgemischen und höheren Motordrehzahlen arbeiten, verbessern die Fortschritte bei der Konstruktion der Zündanlage ständig Zuverlässigkeit, Kraftstoffausnutzung, Wartungsintervalle und Motorleistung. Allerdings müssen moderne Zündanlagen auch die gestiegenen Anforderungen an sauberere Abgase berücksichtigen.

Zwei Hauptaufgaben

Zündanlagen müssen zwei Hauptaufgaben erfüllen:

- (1) Erzeugen der Hochspannung für einen Funken
- (2) Zum genau richtigen Zeitpunkt

3.2. Die Einführung der Spulenzündung

Bis auf sehr wenige Ausnahmen werden Zündanlagen für moderne Benzinmotoren, wie sie in Autos und Motorrädern verwendet werden, mit Zündspulen betrieben. Diese stellen dann die Hochspannung her, die zur Funkenerzeugung an der Zündkerze erforderlich ist. Seit den 1970er Jahren haben sich Zündanlagen aufgrund der Verwendung von Elektronik beträchtlich gewandelt. Aber selbst moderne Spulenzündungsanlagen stellen einen eindeutigen Fortschritt gegenüber den ursprünglichen Spulenzündungsanlagen dar, die vor mehr als 100 Jahren eingeführt wurden.

Die Erfindung der spulenzündungsanlagen wird dem amerikanischen Erfinder Charles Kettering zugeschrieben, der eine Spulenzündanlage entwickelte, die ursprünglich an Cadillac Fahrzeugen um das Jahr 1910/1911 angebracht war. Die Verwendung einer effizienten Spulenzündanlage wurde durch eine Batterie ermöglicht, die auch einen Anlasser (der in der Tat auch durch Kettering für den Cadillac entwickelt wurde) mit elektrischer Leistung versorgte. Die Batterie, ein Generator und die weiterentwickelte Fahrzeugelektrik stellten der Zündspule eine relativ stabile Stromversorgung zur Verfügung.

Das Kettering-System (Abb. 3.1) verwendete eine einzelne Zündspule, um die Hochspannung bereitzustellen, die dann an die Zündkerzen für alle Zylinder verteilt wurde. Die Hochspannung von der Zündspule wurde an einen Zündverteiler weitergeleitet, der die Hochspannung auf effektive Weise an eine Reihe von elektrischen Kontakten weiter übertrug, die sich in der Verteilerbaugruppe befanden (ein Kontakt für jeden Zylinder). Diese Kontakte wurden dann durch Zündkabel mit den Zündkerzen in einer Abfolge verbunden, die es möglich machte, die Hochspannung an die Zündkerzen in der richtigen Zylinder-Zündfolge zu verteilen.

Die Kettering-Zündanlage wurde nach und nach zur fast einzigen Art von Zündanlage, die in den serienfertigen Autos mit Benzinmotoren verwendet wurde. Erst während der 1970er und 1980er Jahre begannen elektronisch geschaltete und geregelte Zündanlagen, die mechanischen Zündanlagen zu ersetzen. (Siehe Abschnitt 4.1).

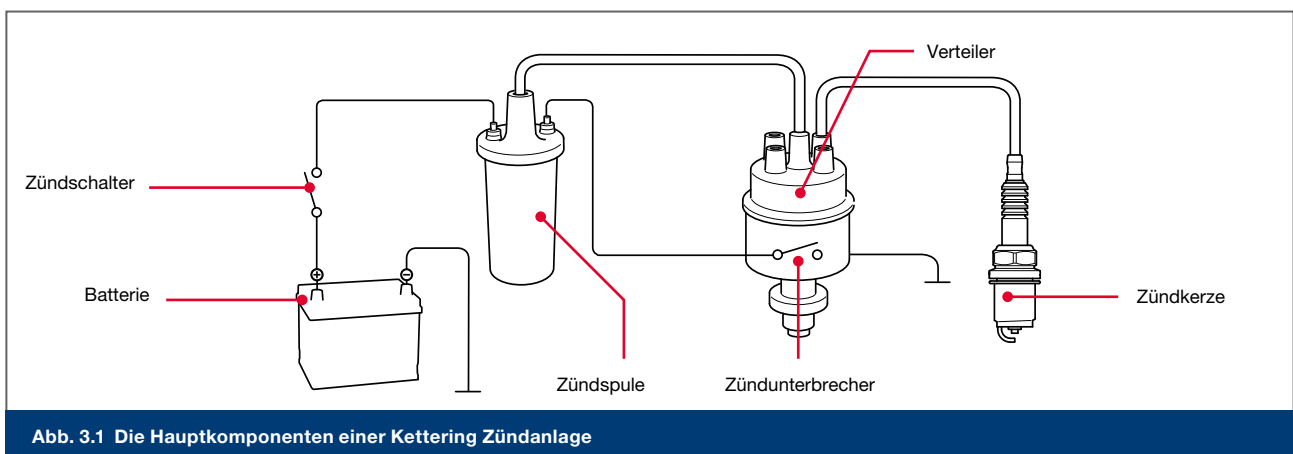
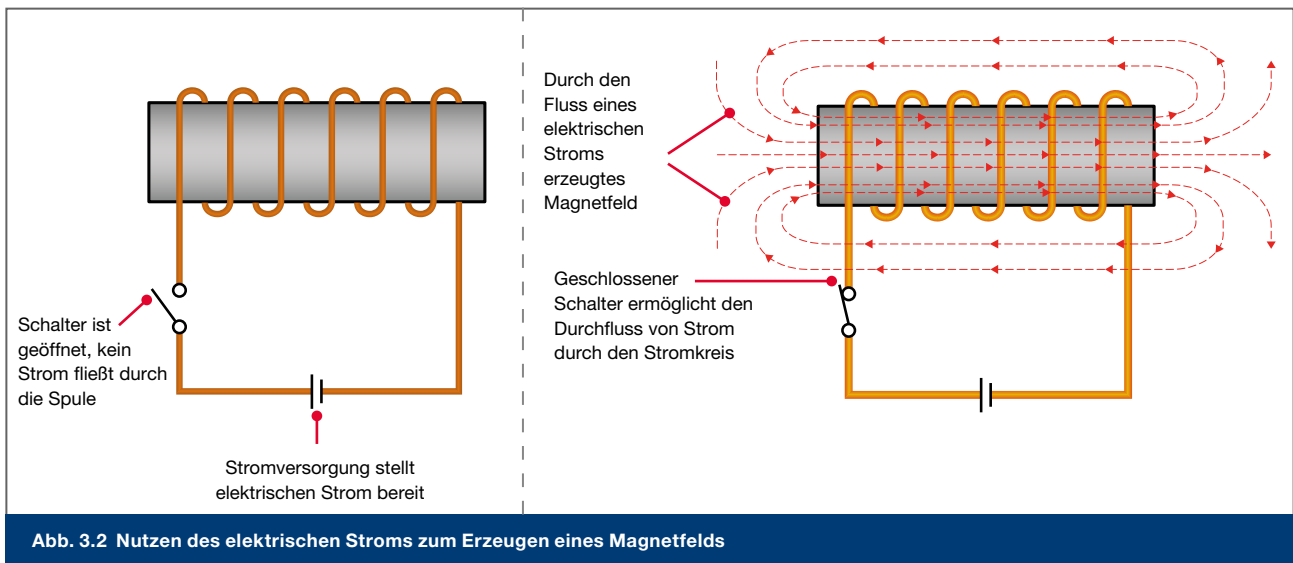


Abb. 3.1 Die Hauptkomponenten einer Kettering Zündanlage

3.1. Die Aufgaben einer Zündanlage	8
3.2. Die Einführung der Spulenzündung	8
3.3. Zündspulen: Umwandeln einer Niederspannung in eine Hochspannung	9
3.4. Spulen-Aufladezeit und Verweildauer	11
3.5. Zündzeitpunkt: Bereitstellen des Funkens zum richtigen Zeitpunkt	12

3.3. Zündspulen: Umwandeln einer Niederspannung in eine Hochspannung



Um die erforderlichen Hochspannungen erzeugen zu können, nutzen Zündspulen die Beziehungen, die zwischen Elektrizität und Magnetismus bestehen.

Nutzen des elektrischen Stroms zum Erzeugen eines Magnetfelds

Wenn ein elektrischer Strom durch einen elektrischen Leiter wie eine Zündspule fließt, erzeugt er ein Magnetfeld um die Spule herum (Abb. 3.2). Das Magnetfeld (oder genauer der Magnetfluss) ist effektiv ein Energiespeicher, der dann wieder in Elektrizität umgewandelt werden kann.

Wenn der elektrische Strom eingeschaltet wird, steigt der Stromfluss progressiv, aber schnell auf seinen Höchstwert. Gleichzeitig erreicht auch das Magnetfeld oder der Magnetfluss progressiv seine maximale Stärke und stabilisiert sich, wenn der elektrische Strom stabil ist. Wenn der elektrische Strom dann ausgeschaltet wird, fällt das Magnetfeld wieder in Richtung der Zündspule in sich zusammen.

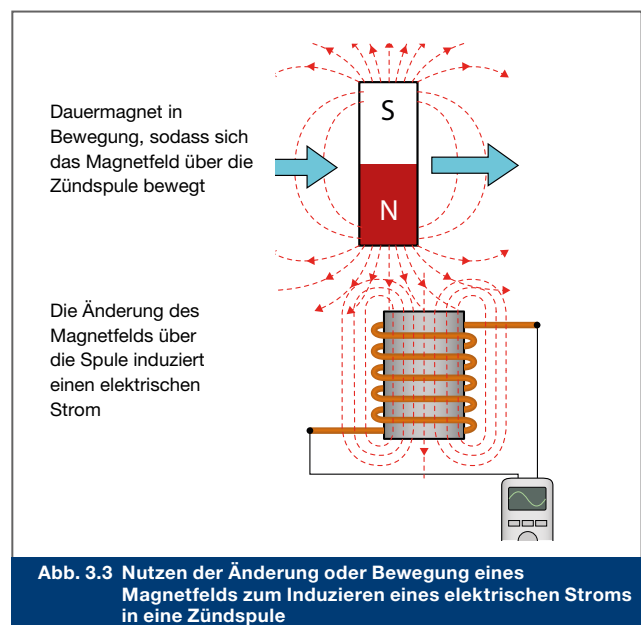
Zwei Hauptfaktoren wirken sich auf die Stärke des Magnetfelds aus:

- (1) Durch Erhöhen des Stroms, der auf die Zündspule angewandt wird, erhöht sich die Stärke des Magnetfelds.
- (2) Durch Erhöhen der Anzahl von Wicklungen in der Spule erhöht sich die Stärke des Magnetfelds.

Verwenden eines sich ändernden Magnetfelds zum Induzieren von elektrischem Strom

Wenn eine Zündspule einem Magnetfeld ausgesetzt wird und sich das Magnetfeld dann ändert (oder sich bewegt), erzeugt es einen elektrischen Strom in der Zündspule. Dieser Prozess ist als „Induktion“ bekannt.

Ein einfaches Beispiel für das Ändern eines Magnetfelds um eine Zündspule herum ist das Bewegen eines Dauermagneten quer durch die Spule. Die Bewegung oder Änderung im Magnetfeld



oder Magnetfluss induziert dann einen elektrischen Strom in den Spulendraht (Abb. 3.3).

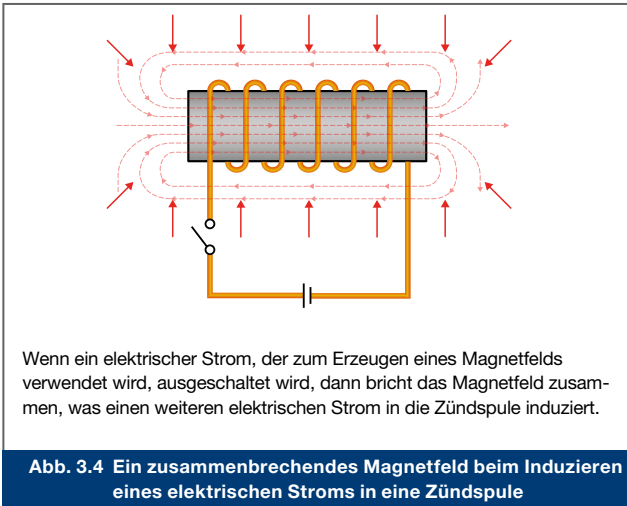
Zwei Hauptfaktoren wirken sich auf die Menge der Spannung aus, die in die Spule induziert wird:

- (1) Je schneller die Änderung (oder Bewegungsgeschwindigkeit) des Magnetfelds und je größer die Änderung der Stärke des Magnetfelds ist, desto größer ist die induzierte Spannung.
- (2) Je größer die Anzahl von Wicklungen in der Spule ist, desto größer ist die induzierte Spannung.

Verwenden eines sich ändernden oder zusammenbrechenden Magnetfelds zum Induzieren von elektrischem Strom

Wenn ein Magnetfeld durch Anlegen eines elektrischen Stroms auf eine Zündspule erzeugt wurde, dann bewirkt jegliche Änderung am elektrischen Strom (Erhöhung oder Verringerung des Stromflusses) dieselbe Änderung im Magnetfeld. Wenn der elektrische Strom ausgeschaltet wird, ändert sich das Magnetfeld rasch, es bricht in der Tat zusammen.

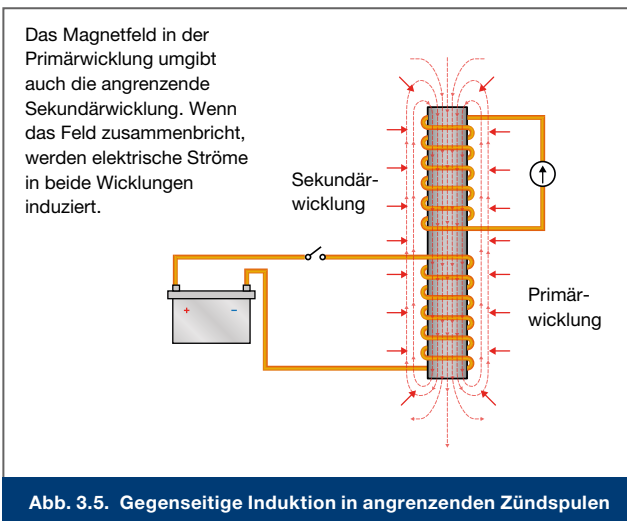
Das zusammenbrechende Magnetfeld induziert dann einen elektrischen Strom in die Spule (Abb. 3.4).



Auf dieselbe Weise, wie die Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit eines Magnetfelds durch eine Zündspule die in die Spule induzierte Spannung erhöht, wird auch eine höhere Spannung induziert, wenn die Geschwindigkeit erhöht wird, mit der ein Magnetfeld zusammenbricht. Außerdem kann eine höhere Spannung auch in die Spule induziert werden, wenn die Anzahl der Wicklungen in der Spule erhöht wird.

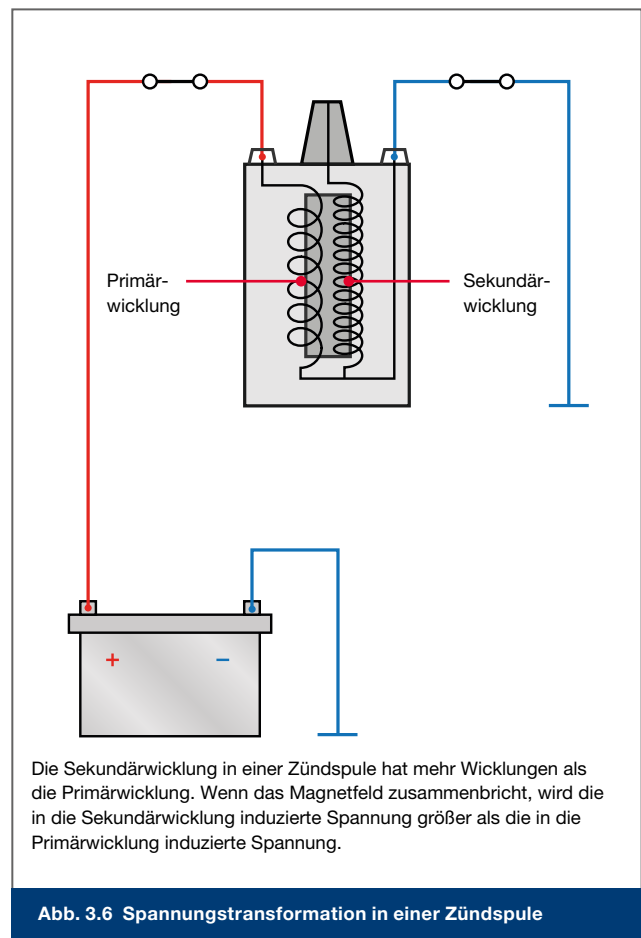
Gegenseitige Induktion und Transformatorwirkung

Wenn zwei Zündspulen nebeneinander oder umeinander platziert werden und ein elektrischer Strom verwendet wird, um ein Magnetfeld um eine Spule herum zu erzeugen (die wir als Primärwicklung bezeichnen können), umgibt das Magnetfeld auch die zweite Spule (oder Sekundärwicklung). Wenn der elektrische Strom ausgeschaltet wird und sich das Magnetfeld dann ändert oder zusammenbricht, induziert es eine Spannung sowohl in die Primär- als auch Sekundärwicklungen, was als „gegenseitige Induktion“ bezeichnet wird (Abb. 3.5).



Für Zündspulen (und viele Typen von elektrischen Transformatoren) wird die Sekundärwicklung mit mehr Wicklungen als die Primärwicklung hergestellt. Wenn das Magnetfeld zusammenbricht, induziert es daher eine höhere Spannung in die Sekundärwicklung verglichen mit der Spannung, die in die Primärwicklung induziert wird (Abb. 3.6).

Die Primärwicklung einer Zündspule kann typischerweise 150 bis 300 Drahtwindungen haben; wobei die Sekundärwicklung typischerweise 15.000 bis 30.000 Drahtwindungen umfassen kann, was ungefähr dem 100-fachen der Primärwicklung entspricht.



Das Magnetfeld wird anfänglich durch Anlegen von ca. 12 Volt von der elektrischen Anlage des Fahrzeugs auf die Primärwicklung der Zündspule aufgebaut. Wenn ein Funke an einer Zündkerze erforderlich ist, schaltet die Zündanlage den Stromfluss zur Primärwicklung aus, sodass der Stromfluss abrupt stoppt, was den Zusammenbruch des Magnetfelds bewirkt. Das zusammenbrechende Magnetfeld induziert dann eine Spannung in die Primärwicklung im Bereich von 200 Volt; die Spannung, die in der Sekundärwicklung induziert wird, ist dann allerdings ca. 100-mal größer und liegt bei rund 20.000 Volt.

Durch Nutzen der Auswirkungen der gegenseitigen Induktion und durch Verwenden einer Sekundärwicklung, die 100-mal mehr Wicklungen als die Primärwicklung hat, ist es daher möglich, die ursprüngliche 12-Volt-Spannungsversorgung in eine sehr hohe Spannung von ca. 20.000 Volt umzuwandeln. Dieser Prozess der Änderung von Niederspannung in Hochspannung kann als „Transformatorwirkung“ bezeichnet werden.

In einer Zündspule sind die Primär- und Sekundärwicklungen um einen Eisenkern gewickelt, was dazu beiträgt, die Stärke des Magnetfelds und -flusses zu bündeln und zu verstärken, sodass die Zündspule effizienter wird.

3.4. Spulen-Aufladezeit und Verweildauer

Zeit für das Aufbauen oder Aufladen des Magnetfelds

Wenn elektrischer Strom auf die Primärwicklung einer Zündspule angewandt wird, dauert es kurz, bis der Stromfluss seine maximale Stromstärke erreicht. Da die Stärke des um die Wicklung herum erzeugten Magnetfeld (oder Magnetfluss) direkt proportional zum Stromfluss ist, dauert es gleich lange bis das Magnetfelds seine maximale Stärke erreicht. Wenn Stromfluss und Magnetfeld ihre Höchstwerte erreicht haben, bleibt das Magnetfeld stabil.

Die Zeit, die das Magnetfeld für das Erreichen der maximalen Stärke benötigt, wird oft als „Aufladezeit“ der Zündspule bezeichnet.

- (1) Wenn der elektrische Strom nicht lang genug auf die Primärwicklung angewandt wird, erreicht das Magnetfeld nicht seine maximale Stärke.
- (2) Wenn der Strom zu lang angewandt wird, könnte er eine Überhitzung der elektrischen Stromkreise und der Primärwicklung verursachen.

Die erforderlichen Aufladezeiten variieren je nach Typ der Zündspule, liegen aber typischerweise im Bereich von 4 Millisekunden für Zündspulen des älteren Typs und erreichen 1,5 Millisekunden bei vielen modernen Spulentypen.

Die Zeitspanne, während der die Zündanlage einen elektrischen Strom auf die Primärwicklung der Zündspule gibt, wird häufig als „Verweildauer“ oder „Verweilzeit“ bezeichnet. Bei modernen Zündanlagen wird die Verweildauer elektronisch geregelt, sodass immer ausreichend Zeit zum vollständigen Aufladen der Spule vorhanden sein sollte. Bei mechanischen Zündanlagen des älteren Typs bewirkten die Einschränkungen des mechanisch

betätigten Zündunterbrecherschalters aber tatsächlich eine Verweildauer, die sich bei steigenden Motordrehzahlen verringerte. Daher verhinderte bei höheren Motordrehzahlen die verringerte Verweildauer, dass das Magnetfeld seine volle Stärke aufbauen konnte.

Das Problem von kurzer Verweildauer bei mechanischen Zündanlagen wird in Kapitel 4 erläutert.

Spannungsänderungen mit Auswirkungen auf Auflade- und Verweildauer der Spulen

Wie bei jedem elektrischen Stromkreis ändert sich der Stromfluss bei jeglichen Änderungen an der Spannung. Wenn sich die Spannung erhöht, die der Primärwicklung durch die elektrische Anlage des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt wird, erhöht dies den Stromfluss durch die Primärwicklung. Eine Erhöhung des Stromflusses verringert dann die erforderliche Aufladezeit für das Magnetfeld. Allerdings bewirkt eine Reduzierung von Spannung und Stromfluss dann die erforderliche Aufladezeit, mit der das Magnetfeld die volle Stärke erreicht.

Kleinere Spannungsänderungen in der elektrischen Anlage des Fahrzeugs treten regelmäßig während des normalen Fahrens auf. Ein beträchtlicher Spannungsabfall kann jedoch während des Anlassens des Motors auftreten, wenn sich die Batteriespannung deutlich verringern kann. Die Niederspannung erhöht dann die erforderliche Spulenaufladezeit spürbar; aber bei modernen elektronisch geregelten Zündanlagen wird die Verweildauer geändert, um die erhöhten bzw. reduzierten Spannungen zu kompensieren.

Abb. 3.7 zeigt die typische Verweildauer (in Millisekunden), die bei verschiedenen Batteriespannungen und Motordrehzahlen für eine moderne Zündanlage erforderlich wäre.

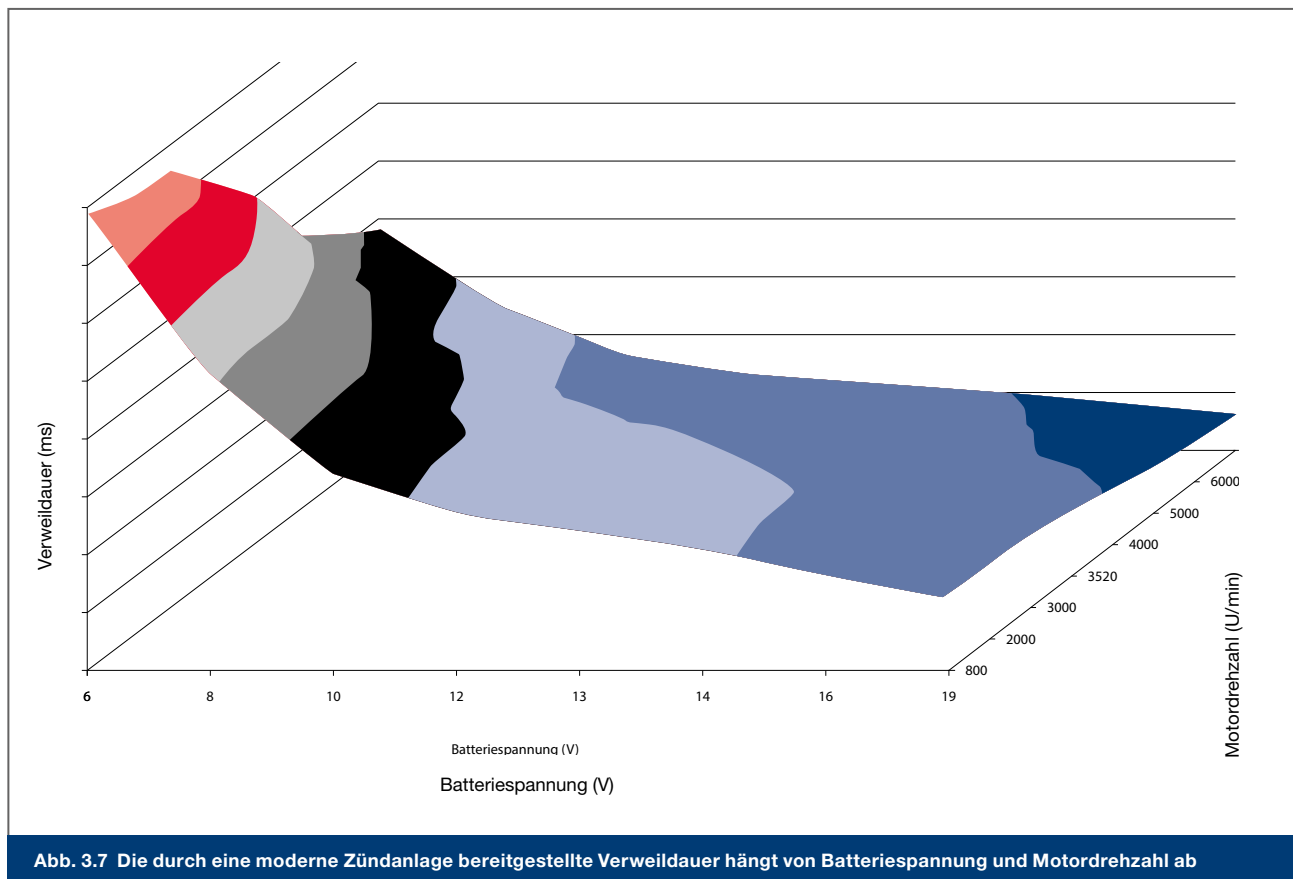


Abb. 3.7 Die durch eine moderne Zündanlage bereitgestellte Verweildauer hängt von Batteriespannung und Motordrehzahl ab

3.5. Zündzeitpunkt: Erzeugung des Funkens zum richtigen Zeitpunkt

Die Begriff „Zündzeitpunkt“ wird verwendet, um anzugeben, wann der Funke an der Zündkerze erzeugt wird. Der Zündzeitpunkt wird üblicherweise als Winkel der Kurbelwelldrehung angegeben, bevor der Kolben den oberen Totpunkt (OT) beim Verdichtungsstakt erreicht. Abb. 3.8 zeigt z.B. die Position von Kurbelwelle und Kolben, wenn der Zündzeitpunkt bei 20° vor OT erfolgt.

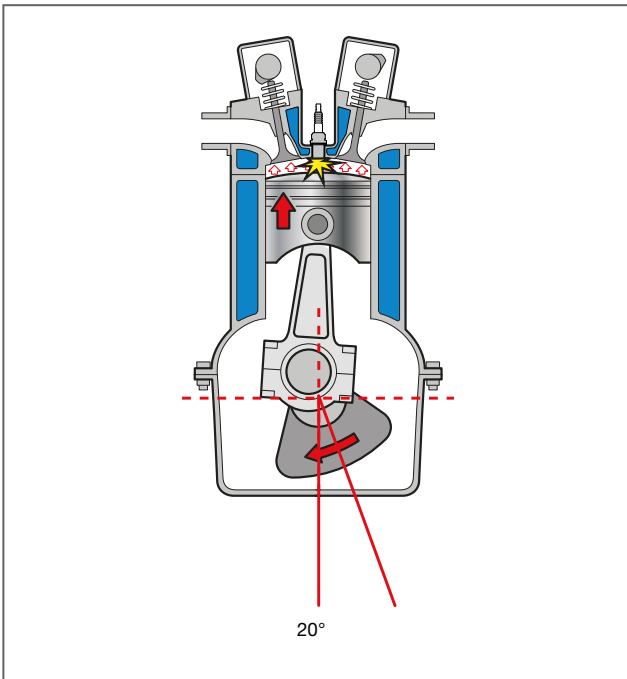


Abb. 3.8 Zündzeitpunkt bei 20° vor oberem Totpunkt (OT)

Zeitbedarf für Zündverzögerung, Verbrennung und Druckanstieg

Der Motor setzt im Allgemeinen die Höchstleistung frei, wenn der Höchstdruck im Zylinder bei ca. 10° nach OT auftritt (wenn der Kolben gerade damit begonnen hat, sich im Zylinder nach unten zu bewegen). Allerdings muss der Zündzeitpunkt vor dem Zeitpunkt liegen, wenn der höchste Druck benötigt wird, da es zu Verzögerungen zwischen der Funkenerzeugung und dem Auftreten des maximalen Zylinderdrucks kommt.

Die anfängliche Verzögerung ist auf die „Zündverzögerung“ zurückzuführen, bei der es sich um eine sehr kurze Zeitspanne zwischen dem Auftreten des Funkens und dem Beginn der Verbrennung des Luft-/Kraftstoffgemischs handelt. Dann braucht es Zeit, bis sich die bei der anfänglichen Verbrennung erzeugte Flamme auf die restliche Mischung ausbreitet, die dann verbrennt und die Wärme für die Ausdehnung der Gase erzeugt.

Diese Verzögerungen zwischen dem Auftreten des Funkens und dem Erreichen des maximalen Zylinderdrucks können im Bereich von 2 Millisekunden liegen. Der Funke sollte daher bereits ca. 2 Millisekunden bevor der Höchstdruck erforderlich ist bereitgestellt werden.

Die genaue Zeitspanne zwischen der Funkenerzeugung und dem höchsten Zylinderdruck variiert je nach Betriebsbedingungen und Aufbau des Motors. Die Verbrennungseffizienz ist im Allgemeinen bei mittleren Motordrehzahlen besser, was die Gesamtdauer der Verzögerung verringert. Aber auch Änderungen an Motorlast und Luft-/Kraftstoffverhältnissen sowie die Verwendung von Abgasrückführung wirken sich auf die Dauer der Verzögerung aus.

Abb. 3.9 zeigt ein Beispiel, in dem der höchste Zylinderdruck bei 10° nach OT erreicht wird; aber aufgrund der Verzögerungen durch die Zündverzögerung und Flammenausbreitung wird der Funke 2 Millisekunden vorab erzeugt. Die Kurbelwelle dreht sich mit 1.500 U/min, sodass sich die Kurbelwelle während der Zeitspanne von 2 Millisekunden um 18° dreht. Der Zündzeitpunkt (Funke) wird daher auf 8° vor OT eingestellt.

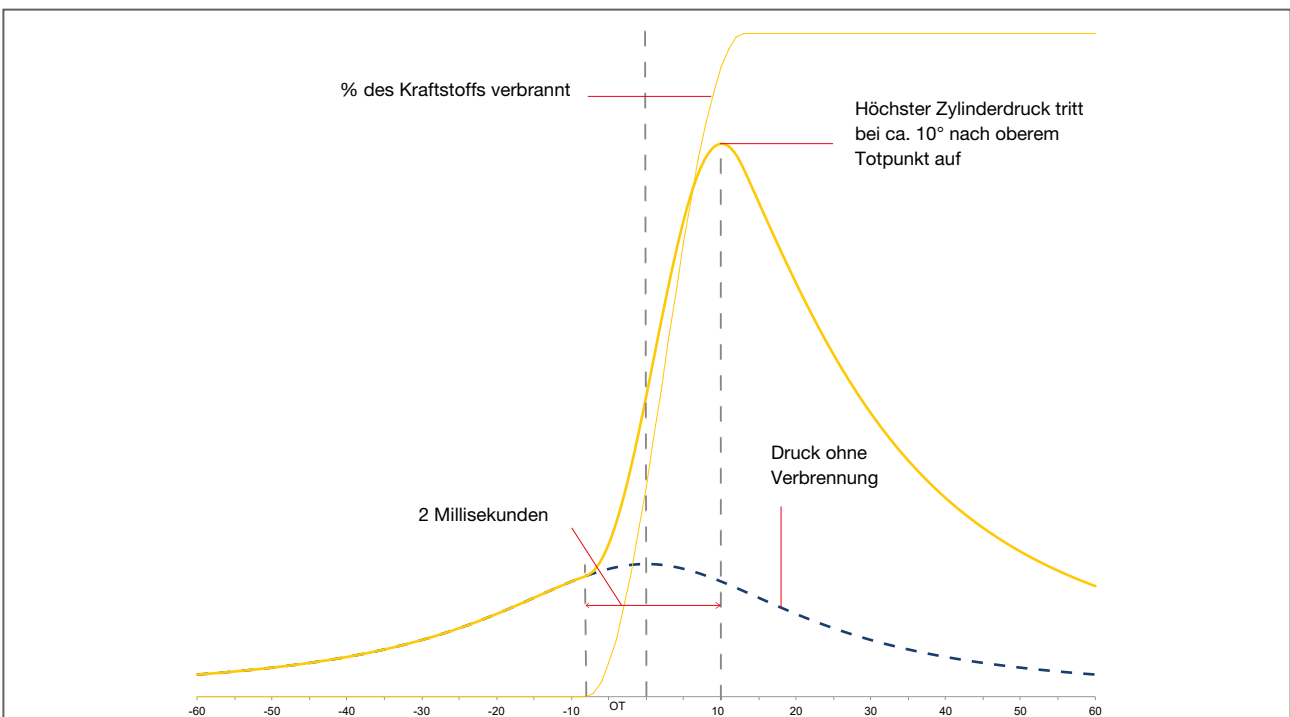


Abb. 3.9 Einstellen des Zündzeitpunkts auf ca. 2 Millisekunden, bevor der höchste Zylinderdruck erforderlich ist

Vorstellen des Zündzeitpunkts bei erhöhter Motordrehzahl

Wenn die Motordrehzahl dann von 1.500 U/min auf 3.000 U/min (Abb. 3.10) erhöht wird, dreht sich - wenn davon ausgegangen wird, dass die Zeitspanne für die Verzögerung konstant bei 2 Millisekunden bleibt - die Kurbelwelle jetzt durch insgesamt 36° in 2 Millisekunden (verglichen mit 18° bei 1.500 U/min). Um den höchsten Zylinderdruck bei 10° nach dem OT zu erreichen, muss der Zündzeitpunkt jetzt zu 26° vor dem OT vorverstellt werden (verglichen mit 8° bei 1.500 U/min).

Theoretisch würde der Zündzeitpunkt direkt proportional zur Steigerung der Motordrehzahl über den gesamten Bereich der Motordrehzahl vorverstellt. Weil sich aber die Effizienz von Motor und Verbrennung mit Änderungen an der Motordrehzahl ändert, erreicht das Ausmaß der Vorverstellung des Zündzeitpunkts bei den meisten modernen seriengefertigten Automotoren im Allgemeinen seinen Höchstwert bei rund 3.000 bis 4.000 U/min.

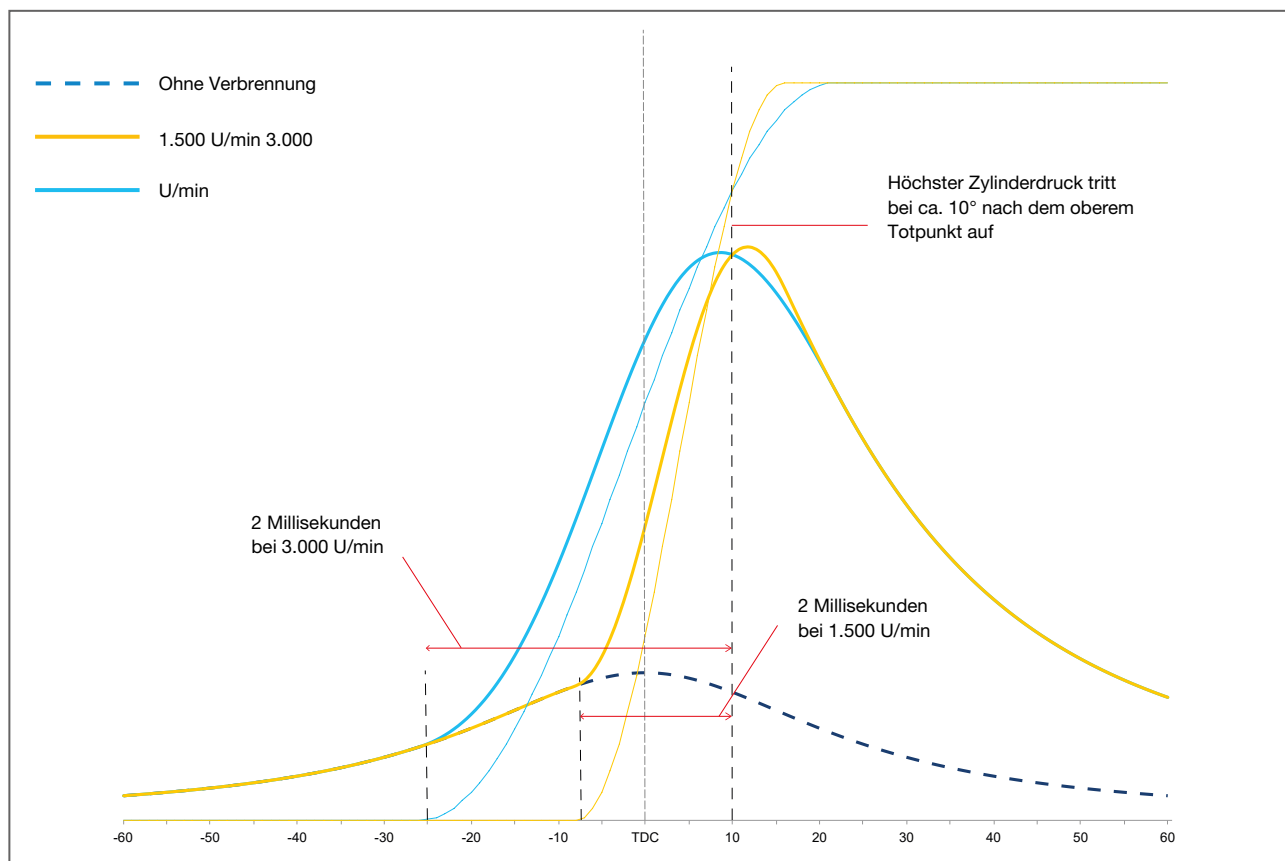


Abb. 3.10 Vorverstellung des Zündzeitpunkts bei 1.500 und 3.000 U/min

DENSO Highlight

DENSO Zündkerzen: Verringerung von Schwankungen bei der Zündverzögerung

Die Verzögerungszeit für die Zeitspanne der Zündverzögerung kann schwanken und zwischen zwei Verbrennungszyklen variieren. Diese Schwankungen verkürzen oder verlängern den gesamten Verbrennungsprozess, sodass der höchste Zylinderdruck zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt auftritt.

Die Motorenhersteller müssen daher einen Sicherheitsspielraum für die Berechnungen des

Zündzeitpunkts bereitstellen, um sicherzustellen, dass Zündzeitpunkt und Verbrennung nicht zu früh erfolgen.

Die DENSO Zündkerzen-Technologien beinhalten Zündkerzen mit feinem Elektrodendurchmesser (patentierter Durchmesser von 0,4 mm), die helfen, die Schwankungen der Zündverzögerung zu reduzieren. Dies ermöglicht den Motorherstellern, kleinere Sicherheitsspielräume für den Zündzeitpunkt einzuplanen, sodass der Zündzeitpunkt näher an der optimalen Einstellung liegen kann, was die Verbrennung und Motoreffizienz verbessert.

Zündzeitpunkt ist abhängig von Motorlast

Obwohl der optimale Zündzeitpunkt zunächst von der Motordrehzahl abhängt, wird die Motorsteuerung auch durch Änderungen bei der Motorlast geändert.

Wenn ein Motor unter leichten Lastbedingungen betrieben wird, was üblicherweise bedeutet, dass die Drosselklappe nur teilweise geöffnet ist, tritt nur eine verringerte Luftmenge in den Zylinder ein. Daher sind die Zylinderdrücke geringer als bei Vollastbedingungen. Außerdem kann bei Motoren der älteren Bauart und bei einigen modernen Motoren das Luft-/Kraftstoffverhältnis magerer sein (weniger Benzin mit der Luft gemischt), um einen Beitrag zur Verbrauchs- und Abgasreduzierung zu leisten. Die geringeren Zylinderdrücke und magereren Gemische brauchen länger für die Verbrennung, sodass der Zündzeitpunkt früher stattfinden muss, um mehr Zeit für die Verbrennung zu lassen und es zu ermöglichen, dass der höchste Zylinderdruck weiterhin bei ca. 10° nach OT auftritt.

Während der leichten Lastbedingungen kann das AGR-System (Abgasrückführungssystem) beträchtliche Mengen von reaktionsträgem Abgas in den Zylinder umleiten, um zum Verringern der Verbrennungstemperaturen und schädlichen Abgase beizutragen. Die Verwendung von AGR (siehe Abschnitt 5.5) verlangsamt den Verbrennungsprozess, was wiederum eine Vorverstellung des Zündzeitpunkts erfordert.

Andere Betriebsbedingungen mit Auswirkungen auf den Zündzeitpunkt

Bei älteren Fahrzeugen, die mit mechanischen Zündanlagen ausgerüstet sind (siehe Abschnitt 4.1), hing die optimale Motorsteuerung üblicherweise nur von Motordrehzahl und -last ab. Allerdings ändern moderne elektronisch gesteuerte Zündanlagen (die üblicherweise Teil der Motorsteuersysteme sind) den Zündzeitpunkt in Abhängigkeit von vielen Motorbetriebsbedingungen, darunter: Motordrehzahl, Motorlast, Kühlmitteltemperatur, Lufttemperatur, Luft-/Kraftstoffverhältnis, Drosselklappenöffnung, Kraftstoffqualität und AGR-Rate.

Die verschiedenen Betriebsbedingungen werden durch verschiedene Sensoren erkannt, die die Betriebsinformationen über elektronische Signale an das Motorsteuergerät übergeben. Der Computer überwacht dann die Signale und stellt den optimierten Zündzeitpunkt auf Grundlage der Informationen bereit, die durch die Sensoren geliefert werden.

Sensor zur Feststellung von Motorklopfen

Viele moderne Motoren sind auch mit einem zusätzlichen Sensor ausgerüstet, der als „Klopfsensor“ bekannt ist, oder anderen Geräten die das Motorklopfen erkennen. Kleinere Änderungen können bei den Motorbetriebsbedingungen auftreten, die nicht sofort von den anderen Sensoren erkannt werden. Wenn der Klopfsensor aber kurzzeitiges oder längeres Klopfen bei der Verbrennung erkennt, leitet er diese Informationen an das Motormanagement-Steuergerät weiter. Das Steuergerät kann dann den Zündzeitpunkt leicht verschieben, bis das Klopfen weg ist.

Bei Motoren ohne Sensoren moderner Bauart war der Zündcomputer mit einem vordefinierten Zündkennfeld programmiert, das möglicherweise nur Motordrehzahl und -last abdeckte. Um jedoch sicherzustellen, dass der Zündzeitpunkt während kritischer Betriebsbedingungen nicht übermäßig nach vorn oder hinten verstellt wird, wurde ein Sicherheitsspielraum in das vordefinierte Steuerungskennfeld aufgenommen, der beispielsweise den Zündzeitpunkt leicht verzögern würde, um Klopfen bei der Verbrennung zu verhindern.

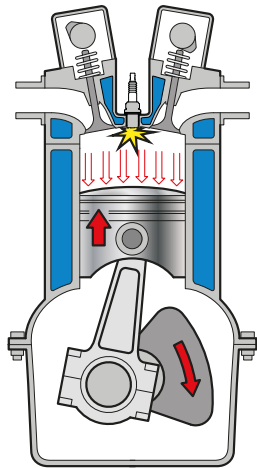
Auswirkungen von Vor- oder Spätzündung

Bei den meisten Motoren und Betriebsbedingungen erfolgt der Zündzeitpunkt in einem Bereich von nur wenigen Grad vor OT bei niedrigen Motordrehzahlen bis ca. 30° oder mehr vor OT bei höheren Motordrehzahlen. Bei älteren Motoren, die im Allgemeinen weniger effizient waren und weniger effizient ausgelegte Brennräume aufwiesen, konnte oft eine Steuerzeit von bis zu 45° vor dem OT vorhanden sein.

Bei einigen Motorkonstruktionen und einigen Betriebsbedingungen (die üblicherweise etwas mit den Abgasen zu tun hatten) konnte der Zündzeitpunkt auch unmittelbar nach dem OT liegen.

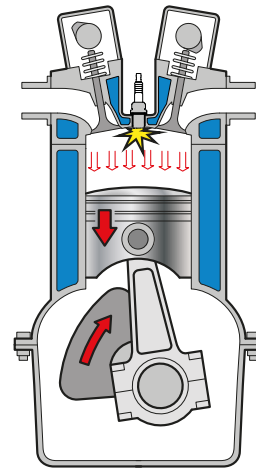
- (1) Optimaler Zündzeitpunkt.** Der optimale Zündzeitpunkt ist für eine effiziente Verbrennung von höchster Bedeutung. Diese führt dann zu guten Ergebnissen bei der Motorleistung, sparsamem Kraftstoffverbrauch und sauberem Abgasen.
- (2) Vorverstellter oder früher Zündzeitpunkt.** Wenn das Luft-/Kraftstoffgemisch zu früh gezündet wird und Zylinderdruck und -temperatur zu früh steigen. Druck und Temperatur können zu hohe Werte erreichen und zu Motorklopfen führen, insbesondere wenn der meiste Druckanstieg auftritt, während sich der Kolben während des Verdichtungstakts weiterhin nach oben bewegt (Abb. 3.11).
- (3) Verzögerter oder später Zündzeitpunkt.** Zündet das Luft-/Kraftstoffgemisch zu spät und der Druckanstieg, der durch die Verbrennung erzeugt wird, tritt ebenfalls zu spät auf. Der Kolben hat sich bereits weiter im Zylinder nach unten bewegt als unter normalen Bedingungen, daher wird die Kraft des Druckanstiegs, der den Kolben im Zylinder nach unten drückt, verringert und weniger Leistung wird entwickelt (Abb. 3.12).

Abb. 3.13 zeigt einen Vergleich der Auswirkungen von vorverstelltem, verzögertem und optimalem Zündzeitpunkt.



Wenn der Funke zu früh entsteht (vorverstellter Zündzeitpunkt), erhöht sich der Zylinderdruck zu früh, während sich der Kolben im Verdichtungsstakt weiterhin nach oben bewegt. Der frühe Anstieg des Zylinderdrucks kann Motorklopfen erzeugen.

Abb. 3.11 Vorverstellter Zündzeitpunkt



Wenn der Funke zu spät entsteht (verzögerter Zündzeitpunkt), tritt auch der Druckanstieg zu spät auf. Der Kolben könnte sich bereits im Zylinder beim nächsten Takt nach unten bewegt haben und der Druckanstieg, der durch die Verbrennung verursacht wurde, hätte daher eine viel geringere Auswirkung beim Schieben des Kolbens nach unten im Zylinder.

Abb. 3.12 Verzögerter Zündzeitpunkt

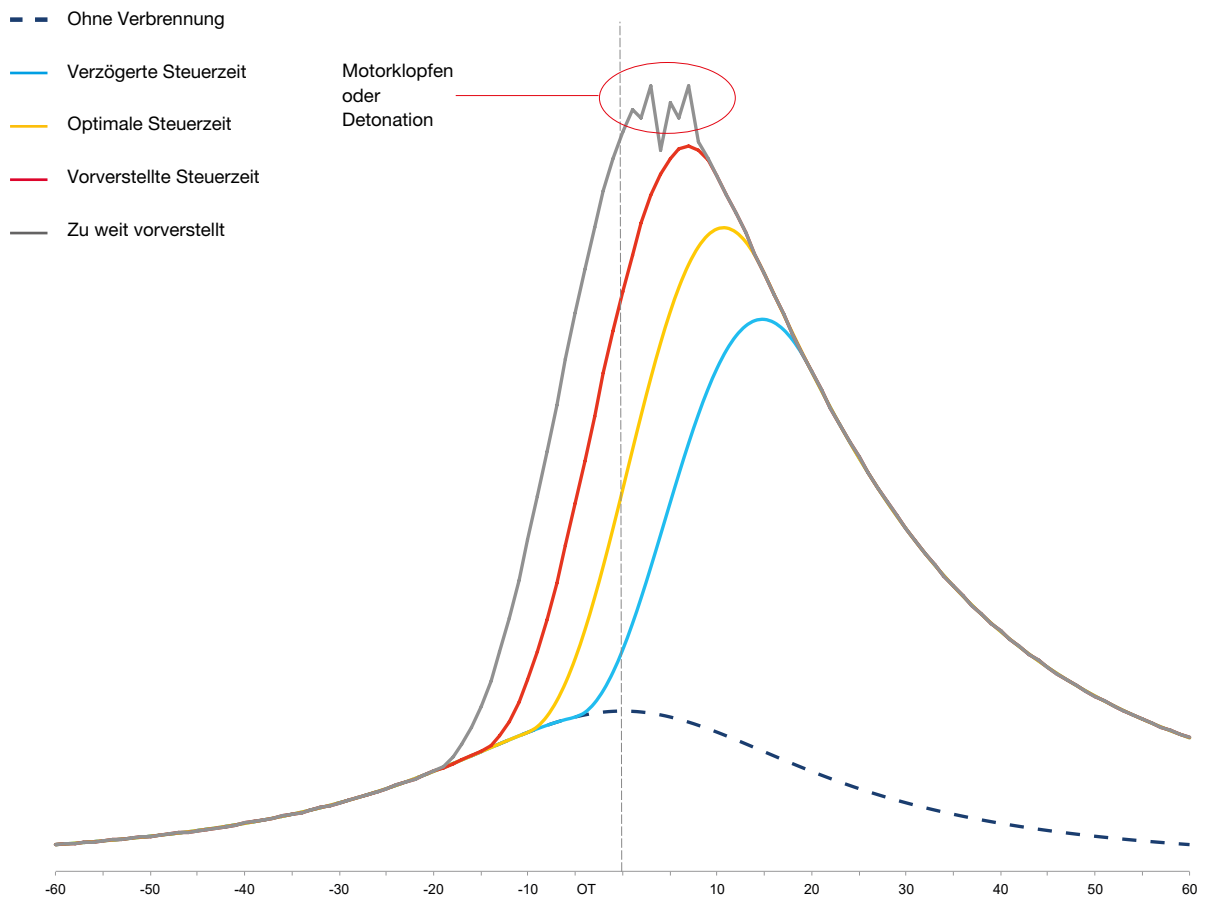


Abb. 3.13 Vergleich von vorverstelltem, verzögertem und optimalem Zündzeitpunkt

4. MECHANISCHE UND ELEKTRONISCHE ZÜNDANLAGEN

4.1. Einfache, mechanische Zündanlage

Mechanisches Schalten des Primärstromkreises

Abb. 4.1 zeigt die Hauptbestandteile einer mechanischen Zündanlage, die auf den Prinzipien der Kettering Zündanlage basiert.

Die Batterie stellt der Zündspule über den Zündschalter eine 12-Volt-Stromversorgung zur Verfügung. Die Stromversorgung läuft durch die Primärwicklung der Spule und weiter zur Masse über einen „Zündunterbrecher“-Schalter.

Erste Betriebsphase: Spulenaufade-/Haltespanne

Abb. 4.2 zeigt die erste Betriebsphase für das mechanisch betriebene System.

Die Batterie stellt der Zündspule über den Zündschalter eine 12-Volt-Stromversorgung zur Verfügung. Die Stromversorgung läuft durch die Primärwicklung der Spule und weiter zur Masse über einen „Zündunterbrecher“-Schalter.

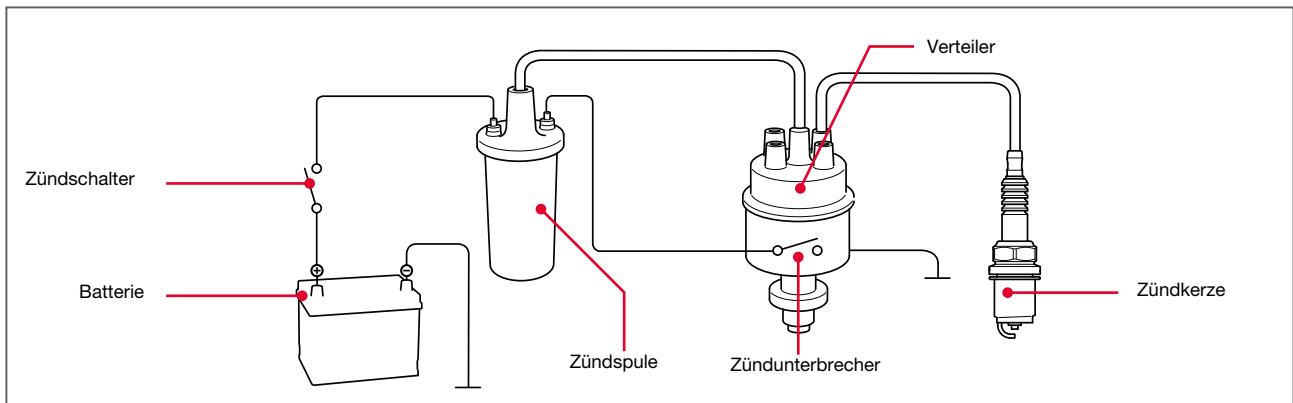


Abb. 4.1 Hauptbestandteile der mechanischen Zündanlage

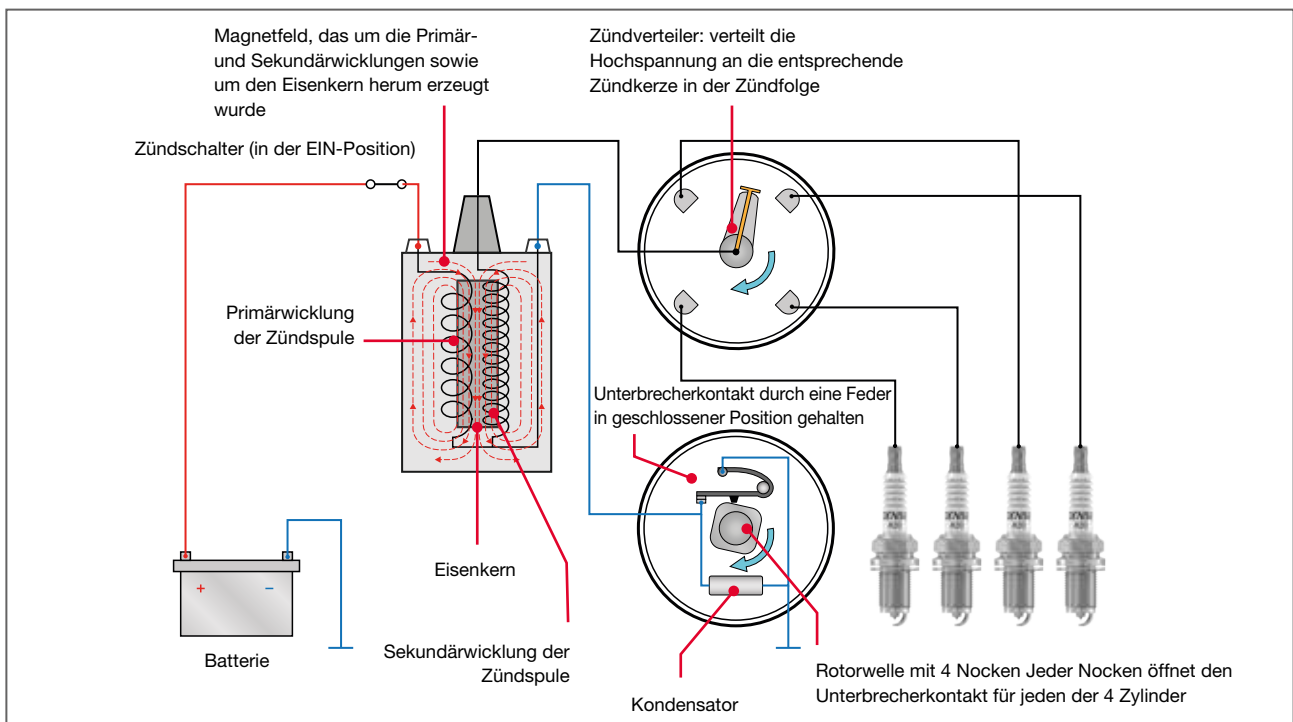


Abb. 4.2 Systembetrieb einer einfachen mechanischen Zündanlage. Phase-1 Verweildauer für die Erzeugung des Magnetfelds

4.1. Einfache mechanische Zündanlage	16
4.2. Ältere elektronische Zündanlagen	20
4.3. Moderne elektronische Zündanlagen	21

Eine Feder, die Teil der Zündunterbrecher-Baugruppe ist, hält den Schalter in der geschlossenen Position, sodass der elektrische Strom durch die Primärwicklung der Spule fließen kann. Der Stromfluss erzeugt dann ein Magnetfeld um die Primär- und Sekundärwicklungen herum.

Der Einfachheit halber zeigt Abb. 4.2 die Sekundärwicklung der Zündspule angrenzend an die Primärwicklung. Normalerweise sind die Spulen der Primär- und Sekundärwicklungen aber beide um den Eisenkern herumgewickelt.

Zweite Betriebsphase: Entladung der Hochspannung

Eine Reihe von Nocken (eine für jeden Zylinder) ist an einer Rotorwelle angebracht, welche innerhalb des Verteilergehäuses ist (Abb. 4.3). Die Rotorwelle ist mit der Nockenwelle verbunden und dreht sich mit der halben Motordrehzahl. Die rotierenden Nocken erzwingen die Öffnung des Unterbrecherkontakts zur richtigen Zeit, was sofort den Stromfluss durch die Primärwicklung der Spule unterbricht. Das Magnetfeld bricht dann sehr schnell (sowohl über die Primär- als auch Sekundärwicklungen) zusammen, was eine Hochspannung in der Sekundärwicklung induziert.

Die Hochspannung wird dann durch Zündkabel zum Verteilerläufer weitergeleitet, der sich innerhalb des Verteilerdeckels befindet. Da sich der Verteilerläufer auch auf der Verteilerwelle dreht, kann er die Hochspannung in der richtigen Abfolge an die vier Kontakte im Verteilerdeckel weiterleiten. Die Hochspannung fließt dann über isolierte Drähte weiter an die Zündkerzen.

Kondensator im Primärstromkreis

Wenn sich der Zündunterbrecherschalter öffnet, kann das zusammenbrechende Magnetfeld einen elektrischen Strom mit einer Spannung von ca. 150 bis 200 Volt in die Primärwicklung induzieren. Dieser Strom versucht, den geöffneten Unterbrecherkontakt zu überspringen und einen elektrischen Lichtbogen zu erzeugen, der rasch die Kontaktflächen des Schalters abtragen würde. Dieser induzierte Strom würde aber auch das Magnetfeld um die Primär- und Sekundärwicklungen aufrechterhalten und somit den schnellen Zusammenbruch des Magnetfelds verhindern, was wiederum die Induktion der Hochspannung in die Sekundärwicklung verhindern würde.

Ein Kondensator ist daher mit dem Primärstromkreis verbunden, sodass die induzierte Spannung effektiv im Kondensator absorbiert und darin gespeichert wird. Wenn sich der Unterbrecherkontakt dann wieder schließt (um wieder den Stromfluss durch die Primärwicklung zu ermöglichen), kann der Kondensator die gespeicherte elektrische Energie zurück in den Primärstromkreis entladen, was den Aufbau des nächsten Magnetfelds unterstützt.

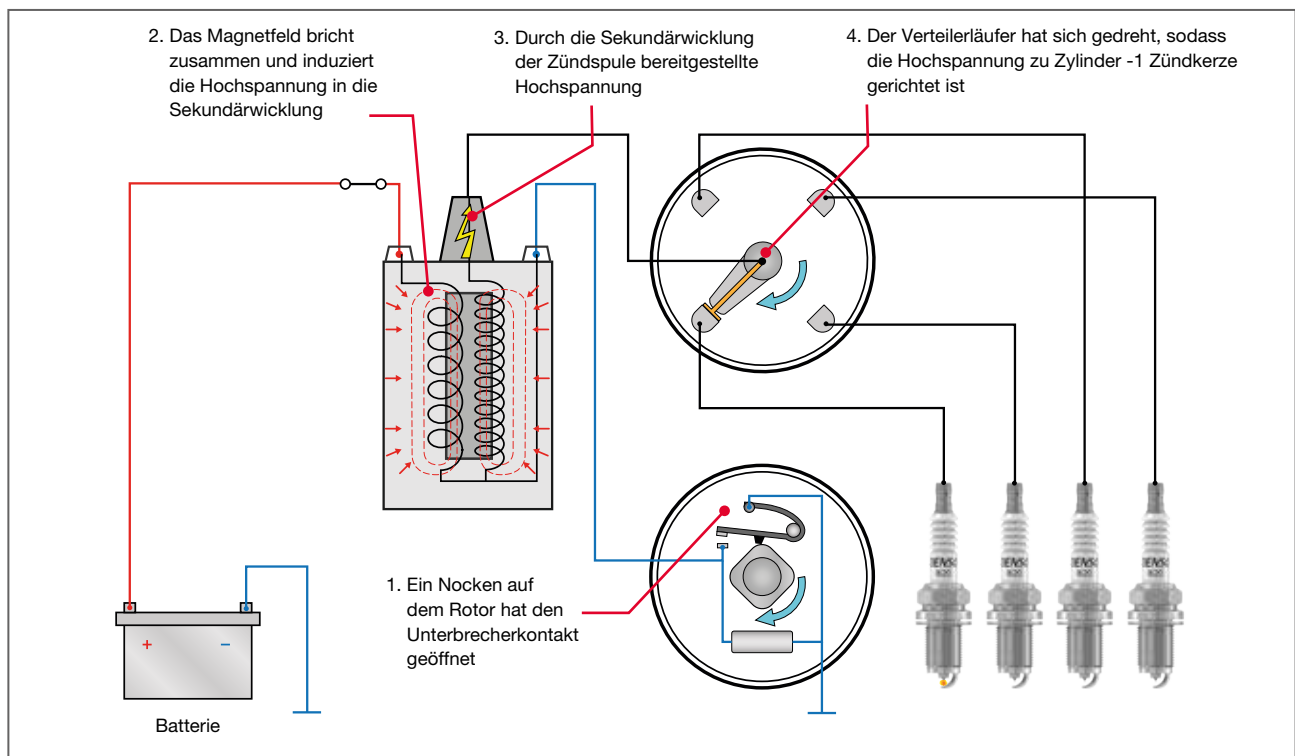


Abb. 4.3 Systembetrieb einer einfachen mechanischen Zündanlage. Phase-2 Entladung der Hochspannung zur Funkenerzeugung

Mechanismen zur Vorverstellung/Verzögerung des Zündzeitpunkts

In Kapitel 3 wurde erläutert, dass sich der Zündzeitpunkt beim Auftreten von Änderungen an Motordrehzahl und -last ändern muss.

Bei mechanischen Zündanlagen wurde die Vorverstellung der Steuerzeiten bei erhöhter Motordrehzahl mithilfe von drehbar gelagerten Gewichten und Federn erzielt (Abb. 4.4). Die Gewichte sind auf einer Platte montiert, die an der Rotorwellen-Baugruppe angebracht ist; daher drehen sich die Gewichte und die Platte mit der Welle. Bei steigender Motordrehzahl drückt die Zentrifugalkraft die Gewichte nach außen gegen die Spannung der kleinen Federn. Die Bewegung der Gewichte verstellt dann die Drehung der Nocken auf der Rotorwelle nach vorn, was auch eine Vorverstellung der Öffnung des Zündunterbrecherschalters bewirkt und somit den Zündzeitpunkt vorverstellt.

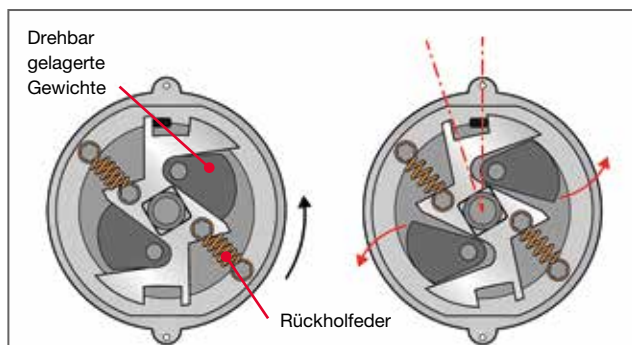


Abb. 4.4 Drehzahlbezogener Mechanismus für die mechanische Vorverstellung der Steuerzeit

Ein zweiter Mechanismus wird dann verwendet, um den Zündzeitpunkt mit den Änderungen an der Motorlast zu verändern (Abb. 4.5). Der Unterbrecherkontakt ist auf einer Grundplatte montiert, die sich etwas im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn drehen kann. Die Grundplatte ist dann mit einer Membrandose verbunden, die den Druck im Einlasskrümmer über ein Rohr erhält.

Wenn sich der Druck im Einlasskrümmer mit den Änderungen an der Motorlast ändert, bewegt sich die Membran und bewirkt eine leichte Drehung der Grundplatte und des Unterbrecherkontaktes. Die Drehung der Grundplatte und des Schalters ändert dann den Zündzeitpunkt mit den Änderungen an der Motorlast.

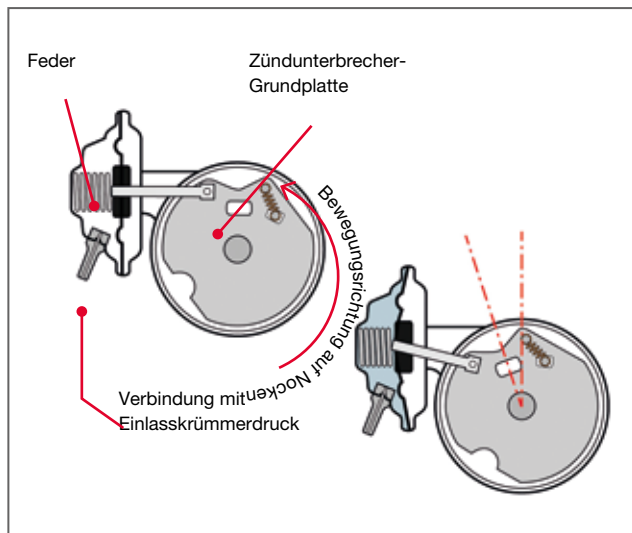


Abb. 4.5 Motorenlastbezogener Mechanismus für die mechanische Vorverstellung der Steuerzeit

Einschränkungen von mechanischen Steuersystemen

Die Genauigkeit des Zündzeitpunkts bei mechanischen Zündanlagen ist von den Fähigkeiten der Hardware abhängig. Feinabstimmung, Anpassungen und Austausch von Komponenten waren häufig als Bestandteil der routinemäßigen Wartung erforderlich. Als Beispiel der Einschränkungen zeigt Abb. 4.6 ein typisches Diagramm für die motordrehzahlabhängige Vorverstellung der Steuerzeit für eine mechanische Zündanlage verglichen mit den Anforderungen an die ideale Steuerzeit.

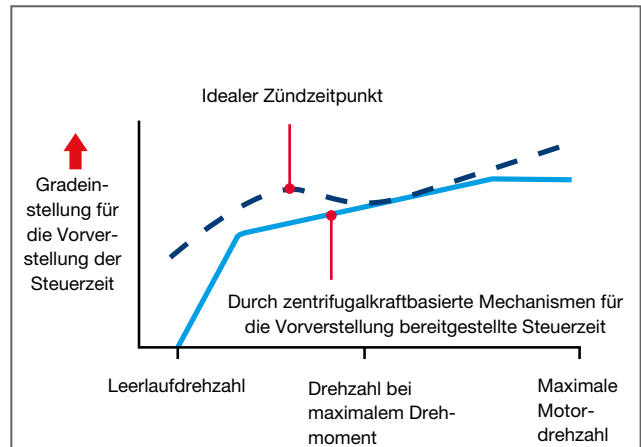


Abb. 4.6 Einschränkungen von zentrifugalkraftbasierten Mechanismen für die Vorverstellung

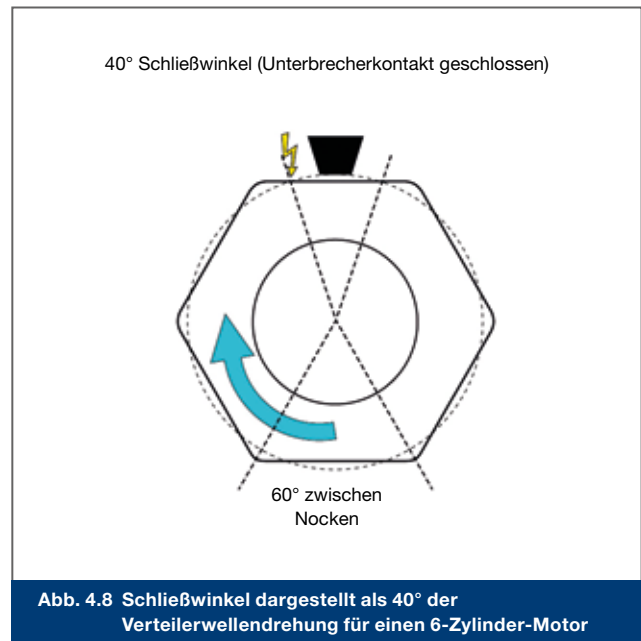
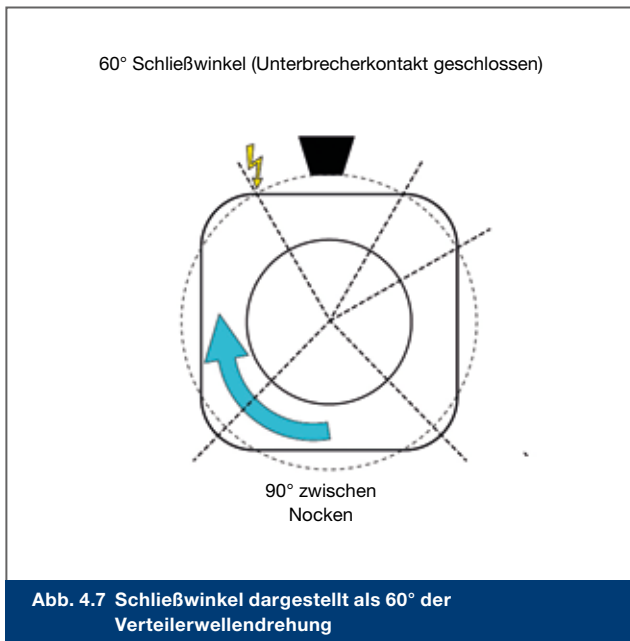
Aufgrund der Verwendung von progressiven Rückholfedern (Abb. 4.4) erhöht sich die Vorverstellung der Steuerzeit, die durch das Zentrifugalsystem bereitgestellt wird, in zwei linearen Schritten. Allerdings ändert sich die ideale Vorverstellung der Steuerzeit mit einer nicht-linearen Progression. Um sicherzustellen, dass die Steuerzeit nie übermäßig vorverstellt wird, muss die Zentrifugaleinstellung so konfiguriert werden, dass der Zündzeitpunkt immer leicht gegenüber dem idealen Wert verzögert ist.

Verweildauer/Schließwinkel

Bei einer mechanischen Zündanlage beginnt die Verweildauer, wenn die rotierenden Nocken das Schließen des Unterbrecherkontaktes ermöglichen, sodass dann Strom durch die Primärwicklung der Spule fließt. Die Verweildauer endet dann, wenn eine der Nocken die erneute Öffnung des Unterbrecherkontaktes erzwingt, was den Stromfluss zur Primärwicklung ausschaltet. Die Verweildauer kann daher als Drehwinkel der Nocken angegeben werden, während sich der Unterbrecherkontakt in der geschlossenen Position befindet.

Abb. 4.7 zeigt 4 Nocken (für einen 4-Zylinder-Motor), was bedeutet, dass 90° zwischen denselben Punkten von angrenzenden Nocken liegen. Die Form der Nocken im Beispiel ermöglicht es dem Unterbrecherkontakt, während eines Drehwinkels von 60° geschlossen zu bleiben. Daher liegt ein Schließwinkel von 60° am Verteiler vor, wenn der Unterbrecherkontakt geschlossen ist und Strom durch die Primärwicklung der Spule fließt.

Wenn sich beispielsweise eine Kurbelwelle mit 1.000 U/min dreht, so dreht sich der Verteilerfinger (der sich mit der halben Motordrehzahl dreht) mit 500 U/min. Bei dieser Drehzahl dauert es 20 Millisekunden, bis die Verteilerwelle die Drehung durch die 60° des Schließwinkels ausführt. Da jedoch die Zündspule nur eine Aufladezeit von ca. 4 Millisekunden benötigt, ist mehr als ausreichend Verweildauer für den Aufbau des Magnetfelds in der Spule vorhanden.



Wenn sich der Motor mit 5.000 U/min dreht, brauchen dieselben 60° der Verteilerwellendrehung nur 4 Millisekunden. Dies ist genau die richtige Zeitspanne, um die Spule mit einem Magnetfeld der höchsten Stärke aufzuladen. Aber wenn sich der Motor schneller drehen sollte, würde die Zeit für ein vollständiges Aufladen der Zündspule nicht ausreichen. Dies würde zu reduzierter Energie im Magnetfeld führen und hätte zur Folge, dass den Zündkerzen weniger Spannung bereitgestellt würde.

Das Problem einer verringerten Verweildauer bei steigender Motordrehzahl ist für Motoren mit mehr Zylindern schwerwiegender. An einem 6-Zylinder-Motor gibt es z.B. auch 6 Nocken, die jeweils nur 60° zwischen jedem Nocken (Abb. 4.8) und nur 40° für den Schließwinkel aufweisen. Dies hat zur Folge, dass bei einer Motordrehzahl von 5.000 U/min die 40° des Schließwinkels nur 2,6 Millisekunden lang dauern. Wenn die Spule 4 Millisekunden für die vollständige Aufladung braucht, ist die Verweildauer viel zu kurz, was zu geringerer Spannung führt und Fehlzündungen verursachen kann.

Es wurden verschiedene Lösungen an den mechanischen Zündanlagen ausprobiert, um das Problem der reduzierten Verweildauer zu lösen.

Eine Lösung bestand in der Verwendung einer leistungsfähigeren Zündspule. Eine andere extreme Lösung, die für hochdrehende Motoren mit 8 oder 12 Zylindern verwendet wurde, war die Anbringung von zwei separaten Verteilern, die jeweils über ihre eigene Zündspule verfügten. Die Motoren hatten daher effektiv zwei separate Zündanlagen, die den Zündkerzen die Hochspannung für die Hälfte der Zylinder des Motors lieferten.

DENSO HIGHLIGHT

Die mechanische Anlage hilft uns, die Entwicklung der aktuellen, digitalen Zündanlagen zu verstehen.

Der entscheidende Teil der Zündanlage, der nie ersetzt wurde und wahrscheinlich auch künftig nie ersetzt wird, ist die Zündkerze.

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Zündkerze eine leistungsfähige Zündung genau zum richtigen Zeitpunkt liefert. DENSO hat verstanden, dass hohe Qualitätsstandards nötig sind, um den Anforderungen der Motorhersteller gerecht zu werden. Um dies zu erreichen, kombiniert DENSO die besten und bewährtesten Systeme mit jahrelanger Erfahrung.

4.2. Ältere elektronische Zündanlagen

Elektronische Schaltung für den elektrischen Stromkreis der Primärwicklung

Die frühen Generationen von elektronischen Zündanlagen waren tatsächlich eine Weiterentwicklung der mechanischen Anlagen. Abb. 4.8 zeigt die Hauptbestandteile einer elektronischen Anlage der frühen Generation, bei der die mechanischen Vorverstellungs- und Verzögerungsmechanismen sowie der Verteilerläufer beibehalten wurden, welcher in vollständig mechanischen Anlagen verwendet wurde. Eine wichtige Änderung bestand allerdings bei den elektronischen Anlagen in der Verwendung von Elektronik zum Ein- und Ausschalten des Stromflusses durch die Primärwicklung anstelle der Verwendung eines mechanischen Unterbrecherkontaktes, der unpräzise war und regelmäßige Wartung erforderte.

Ein Transistor fungiert als elektronischer Schalter für den Primärstromkreis und bildet einen Teil eines relativ einfachen Verstärkers, der oft als „Zündmodul“ oder „Zündvorrichtung“ bezeichnet wird. Die Zündvorrichtungen reagierten auf ein Auslöse- oder Steuersignal, das durch einen Steuerzeitsensor oder Signalgenerator bereitgestellt wurde, der sich üblicherweise innerhalb des Zündverteilergehäuses befand.

Es gab zwei Hauptarten von Steuerzeitsensoren, die als induktive Sensoren und Hall-Effekt-Sensoren bekannt waren. Das Beispiel zeigt einen Sensor des induktiven Typs, der Referenzpunkte (einen für jeden Zylinder) verwendete, die sich auf der Verteilerrotorwelle befanden. Wenn sich der Rotor drehte, bewegten sich die Referenzpunkte über eine kleine Zündspule hinaus, die um einen Dauermagneten herum gewickelt war. Wenn sich jeder Referenzpunkt über den Magneten und die Spule hinaus bewegte, änderte sich bzw. schwankte das Magnetfeld, was dann einen

kleinen elektrischen Strom oder elektrischen Impuls in die Zündspule induzierte. Die elektrischen Impulse stellten dann ein Steuerzeit-Referenzsignal für die Zündvorrichtung bereit, die daraufhin den elektrischen Strom zur Primärwicklung der Zündspule ausschaltete.

Konstante Verweildauer und konstante Energie

Obwohl es eine Reihe von Unterschieden bei den frühen Anlagen gab, steuerte bei den meisten die Zündvorrichtung auch den Zeitpunkt, zu dem der elektrische Strom zur Primärwicklung ein- und ausgeschaltet wurde. Die Zündvorrichtung steuerte somit effektiv, wie lang der elektrische Strom durch die Primärwicklung floss, was der Verweildauer entsprach.

Im Gegensatz zu mechanischen Zündanlagen, bei denen sich die Verweildauer bei steigender Motordrehzahl verringert, wird die Verweildauer bei den elektronischen Anlagen unabhängig von der Motordrehzahl auf einer relativ konstanten Zeitspanne gehalten. Um zudem die Verwendung von Hochleistungs-Zündspulen zu ermöglichen, die mit höheren Stromflüssen durch die Primärwicklung betrieben werden, enthielten die Zündvorrichtungen auch eine elektronische Strombegrenzungsvorrichtung. Die Strombegrenzer lassen anfänglich einen hohen Stromfluss durch die Primärwicklung zu. Sobald aber der Strom den festgelegten Höchstwert erreicht, wird der Strom begrenzt, um die Überhitzung des Stromkreises zu verhindern.

Die Verwendung einer relativ konstanten Verweildauer in Kombination mit Strombegrenzung ermöglicht eine fast konstante Energie des Magnetfelds in der Zündspule, die von der Motordrehzahl und den normalen Änderungen bei der Batteriespannung unabhängig ist. Diese elektronischen Zündanlagen wurden daher als Zündanlagen mit „konstanter Energie“ bezeichnet.

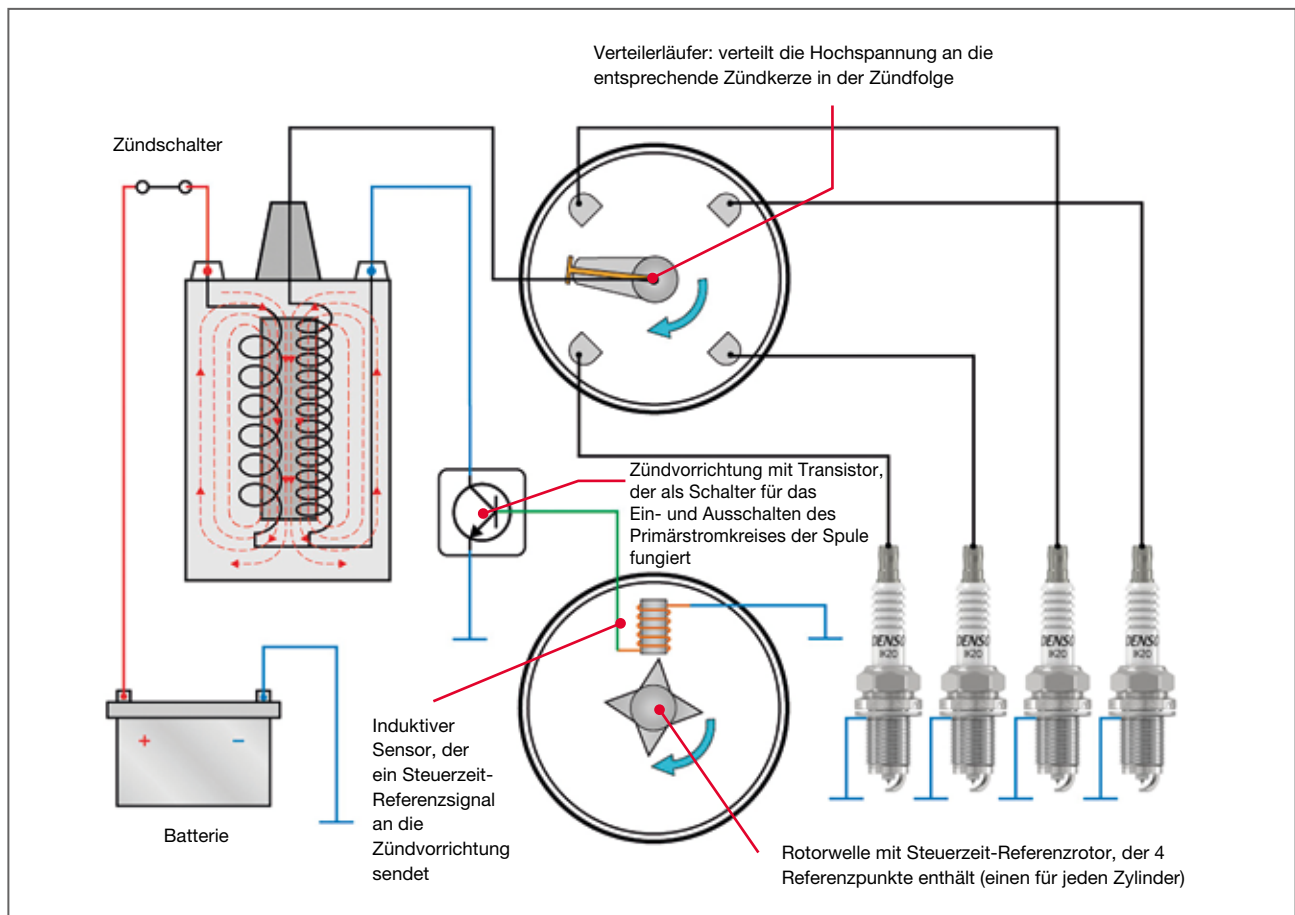


Abb. 4.9 Einfache elektronische Zündanlage

4.3. Moderne elektronische Zündanlagen

Elektronische Steuerzeitensteuerung

Obwohl die älteren, elektronischen Zündanlagen eine elektronische Verweilsteuerung und zuverlässige elektronische Umschaltung des Stroms hatten, der durch die Primärwicklung der Spule floss, griffen sie weiterhin auf Mechanismen zur mechanischen Vorverstellung und Verzögerung der Steuerzeit zurück. Diese mechanischen Steuerzeitsysteme konnten nicht bei allen Motordrehzahlen und -lasten den optimalen Zündzeitpunkt liefern (siehe Abschnitt 4.1). Aufgrund von immer strengeren Abgasvorschriften waren genauere und zuverlässigere Zündzeitpunkte erforderlich, was zur Einführung einer elektronischen Steuerzeitensteuerung führte, die einen optimalen Zündzeitpunkt für unterschiedliche Betriebsbedingungen konsistent liefern konnten.

Motormanagement: Integration in andere Motorsysteme

Die elektronischen Zündanlagen entwickelten sich in den 1980er und 1990er Jahren weiter. Die fortschrittlicheren elektronischen Zündanlagen nutzen hochentwickelte Computer oder elektronische Steuergeräte (ECUs), wobei aber die Systeme für Zündung, Kraftstoffeinspritzung, Abgase sowie weitere motorbezogene Systeme weiterhin als separate Systeme betrieben wurden. Da diese separaten Systeme alle effektiv computergesteuert waren und dieselben oder ähnliche Motorbetriebsdaten benötigten, wurden die verschiedenen Systeme schon früh in ein einzelnes Motorsteuersystem integriert, das einen Computer oder ein Steuergerät für den Betrieb aller Systeme verwendete.

Das Steuergerät ermöglicht die Verwendung von zusätzlichen und genaueren Motorbetriebsdaten, die von verschiedenen Sensoren geliefert werden (Abb. 4.10). Die Sensoren werden verwendet, um Motorbetriebsbedingungen wie Kurbelwellendrehzahl und -position, Nockenwellenposition, Luftmassenstrom, Drosselklappenposition und

Kühlmitteltemperatur zu erkennen. Die Sensorinformationen werden an ein Steuergerät weitergegeben, das dann effektiv den optimalen Zündzeitpunkt anhand eines programmierten Zündkennfelds berechnet. Das Steuergerät übergibt ein Steuerzeitsignal an die Zündvorrichtung, die den elektrischen Strom zur Primärwicklung ein- und ausschaltet. Beachten Sie, dass bei vielen Zündanlagen die Zündvorrichtung in das Steuergerät integriert ist.

Zündzeitpunkt und Motordrehzahlsensoren

Das Beispiel einer Zündanlage in Abb. 4.10 zeigt einen induktiven Sensor, der sich angrenzend zur Kurbelwelle befindet. In diesem Beispiel weist eine Rotorscheibe, die an der Kurbelwelle angebracht ist, 60 Referenzpunkte auf, die jeweils 6° an Kurbelwellendrehung darstellen. Wenn sich die Kurbelwelle und Scheibe drehen, bewegt sich jeder der Referenzpunkte über den induktiven Sensor hinaus, was die Induktion eines kleinen elektrischen Impulses in einer Zündspule bewirkt, die sich im Sensorgehäuse befindet. Die Folge an Referenzimpulsen wird an das Zündsteuergerät weitergegeben, das dann Anhaltspunkte zu Drehzahl und Position der Kurbelwelle hat. Der fehlende Zahn auf der Rotorscheibe liefert einen einzelnen Impuls (wie dies im Oszilloskop von Abb. 4.10 gezeigt wird), der eine übergeordnete Referenz für die Kurbelwellenposition liefert, welche eine genaue Position der Kurbelwelle angibt (sie gibt üblicherweise den OT für Zylinder 1 an). Mit den Sensorinformationen kann das Steuergerät dann die genaue Winkelposition der Kurbelwelle berechnen, um dann einen extrem präzisen Zündzeitpunkt bereitzustellen.

Verschiedene Zündanlagen nutzen Rotorscheiben, die oft einen Bestandteil der vorderen Riemenscheibe im Motor oder des Schwungrads bildeten. Die Scheiben können nur 2 Referenzpunkte oder aber bis zu 360 Referenzpunkte aufweisen.

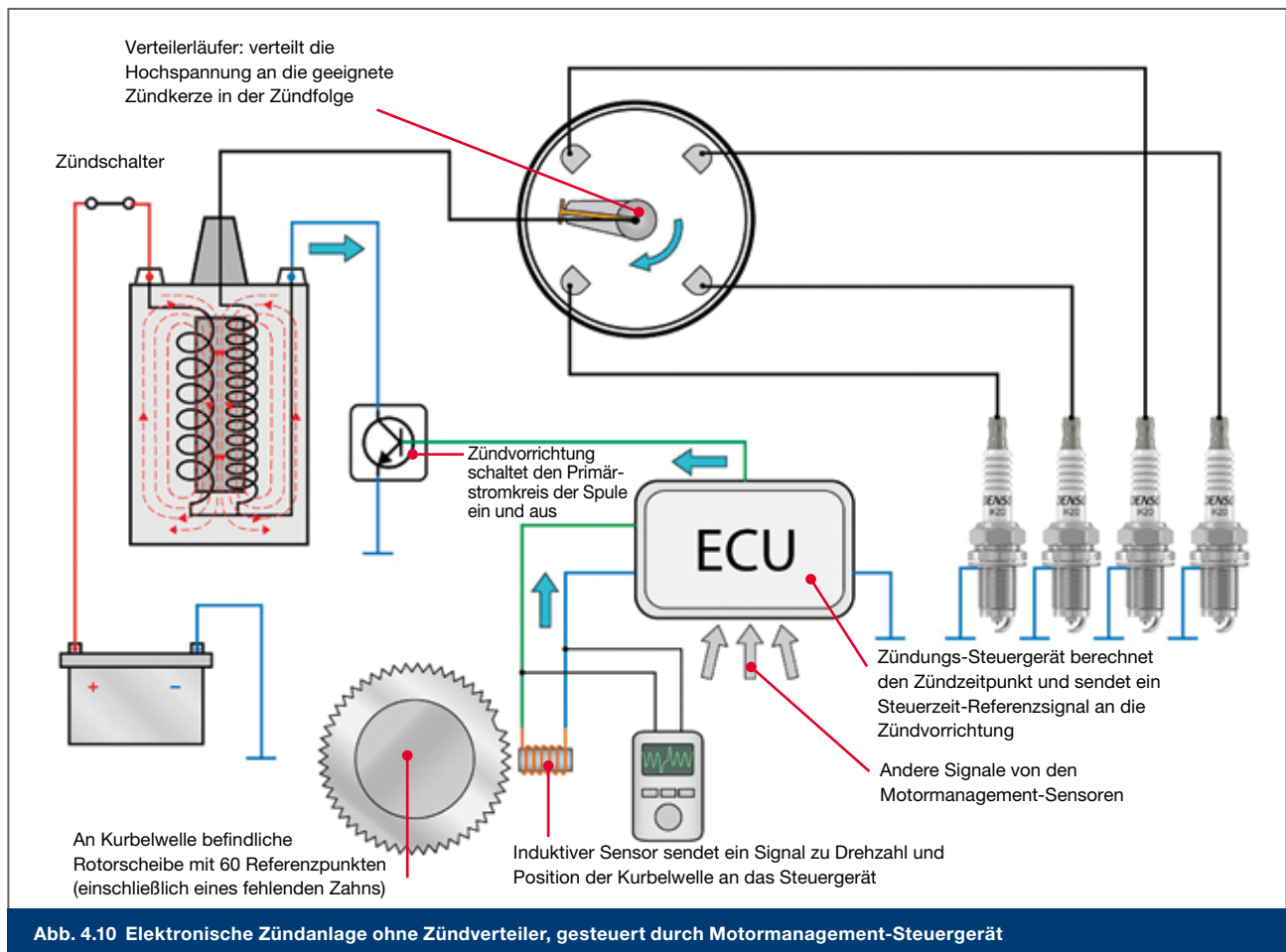


Abb. 4.10 Elektronische Zündanlage ohne Zündverteiler, gesteuert durch Motormanagement-Steuergerät

Mehrere Zündspulen/verteilerlose Zündanlage (DLI)

Wie bereits erwähnt, besteht ein bedeutender Nachteil der Verwendung einer einzelnen Zündspule darin, dass bei hohen Motordrehzahlen nur eine verringerte Zeit (Verweilzeit) verfügbar war, um das Magnetfeld in der Zündspule auf die volle Stärke aufzubauen. Dieses Problem tritt insbesondere bei hochdrehenden Motoren und Motoren mit 6 oder mehr Zylindern auf. Die Verweildauer wurde aber noch kritischer, da moderne Zündspulen noch höhere Spannungen als früher bereitstellen müssen. Dies soll zur Effizienzsteigerung von Zündung und Verbrennung beitragen.

Eine naheliegende Lösung besteht in der Verwendung einer einzelnen Spule für jede Zündkerze (wie in Abb. 4.11 gezeigt), was bedeutet, dass jede Spule nur einmal während eines vollständigen Motortakts aufgeladen werden muss. Im Vergleich dazu müsste an einem 12-Zylinder-Motor mit einer einzelnen Spule die Spule 12-mal für alle 2 Drehungen der Kurbelwelle aufgeladen werden. Wenn eine einzelne Spule für jede Zündkerze verwendet wird, ist eine einzelne Zündvorrichtung für jede Spule erforderlich. Die einzelnen Zündvorrichtungen könnten in das Motormanagement-Steuergerät integriert oder getrennt untergebracht werden. Allerdings werden jetzt Zündspulen verwendet (wie die DENSO „Stab“-Spulen), bei denen die Zündvorrichtung innerhalb der Spulenbaugruppe ist.

Ein weiterer Vorteil einzelner Zündspulen ist, dass der Verteilerläufer und Verteilerdeckel nicht mehr erforderlich sind. Somit besteht die Gefahr einer elektrischen Lichtbogenbildung, die an den Kontakten des Verteilerdeckels auftreten könnte, nicht mehr. Dies verringert die Wartungsanforderungen und verbessert die Zuverlässigkeit.

Einige Arten von verteilerlosen Zündanlagen verbinden weiterhin die Zündspulen mit den Zündkerzen mithilfe von isolierten Zündkabeln. Bei den meisten modernen Motorsteuersystemen sind die Zündspulen allerdings direkt auf den Zündkerzen angebracht, sodass keine Zündkabel mehr erforderlich sind.

Mit den modernen Technologien wurden die Computer leistungsfähiger. Ein Computer kann die Aufgaben übernehmen, für die zuvor viele Computer erforderlich waren. Dies gilt auch für die Motormanagement-Steuergeräte. Heutzutage sind die meisten Fahrzeuge nur mit einem einzelnen Motormanagement-Steuergerät ausgerüstet, das den kompletten Motorbetrieb einschließlich Zündanlage, Kraftstoffeinspritzung, AGR uvm. steuert. Das Motormanagement-Steuergerät wird mit Informationen von verschiedenen Sensoren gespeist (auch von DENSO geliefert).

Die Fähigkeit einzelne Zündspulen zu steuern, ermöglicht dem Steuergerät das vollständige Ausschalten des Betriebs von einzelnen Spulen (und einem zugehörigen Kraftstoffinjektor), wenn eine Fehlzündung in einem Zylinder auftritt. Fehlzündungen verursachen höhere Abgasemissionen und unverbrannter oder teilweise verbrannter Kraftstoff und überschüssiger Sauerstoff fließen durch den Katalysator. Der Katalysator wird dann ineffizient, denn die langfristige Aussetzung gegenüber überschüssigem Sauerstoff und unverbranntem Kraftstoff (der auch tatsächlich im Katalysator gezündet werden kann) verursacht dann Schäden.

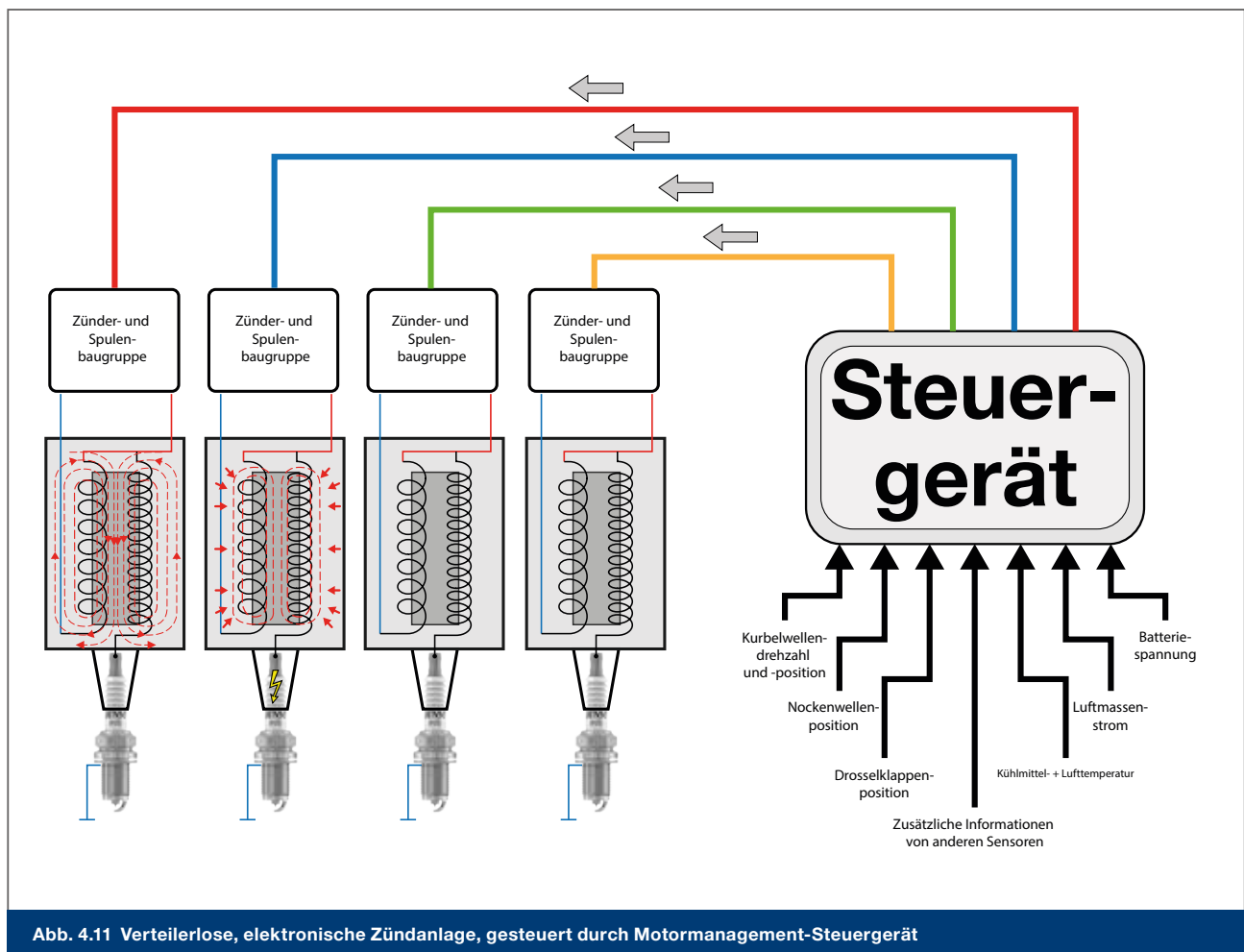


Abb. 4.11 Verteilerlose, elektronische Zündanlage, gesteuert durch Motormanagement-Steuergerät



DENSO HIGHLIGHT

Zündspulen

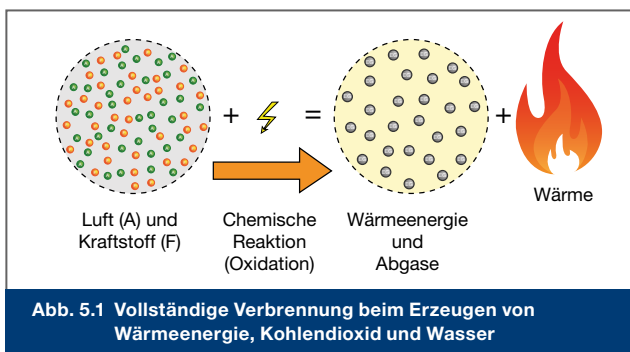
DENSO ist nicht nur ein führender Hersteller von Zündkerzen, sondern steht auch seit langem bei der Zündungstechnologie an der Spitze und arbeitet eng mit Fahrzeugherstellern auf der ganzen Welt zusammen. Wir haben die branchenweit erste kompakte Stabzündspule der Autoindustrie entwickelt. DENSO war auch ein Pionier bei Treiberschaltungen in Mikro-Größe und diagonalen induktiven Wicklungen, um auf weniger Raum eine verbesserte Leistung zu liefern. Diese und andere bahnbrechende Neuentwicklungen werden in den Zündspulen von DENSO für den Aftermarket eingesetzt und gewährleisten so eine zuverlässige und effiziente Zündleistung auf jeder Fahrt.

5. DER VERBRENNUNGSPROZESS IM DETAIL

5.1. Die Verbrennung von Kraftstoff und Sauerstoff

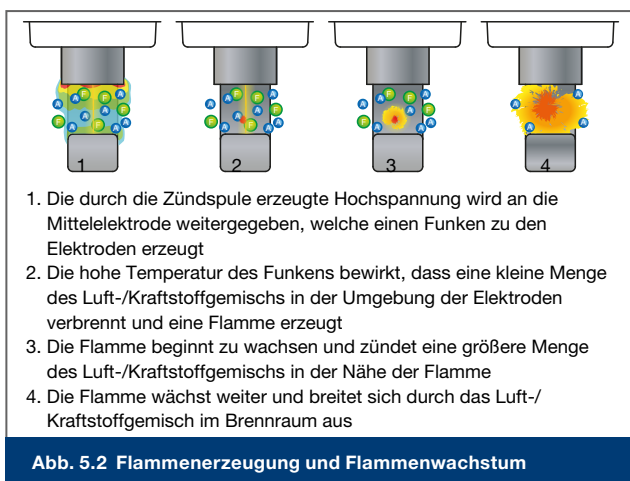
Energiegewinnung aus chemischen Reaktionen

Verbrennung ist ein Prozess, bei dem chemische Reaktionen zwischen Kraftstoff und Sauerstoff erfolgen; dieser Prozess ist auch als Oxidation bekannt. Dies führt dann zur Freisetzung der im Kraftstoff gespeicherten Energie als Wärmeenergie. In einem Verbrennungsmotor wird der Kraftstoff mit Luft gemischt, die den erforderlichen Sauerstoff enthält. Eine Quelle mit hoher Temperatur ist erforderlich, um die chemischen Reaktionen des Luft- und Kraftstoffgemischs einzuleiten. Die große Menge an Wärmeenergie, die während der Verbrennung erzeugt wird, dient dann zur Expansion der Gase im Zylinder.



In einem Benzinmotor wird die Wärme während des Verdichtungs takts erzeugt. Diese Wärme reicht allerdings nicht aus, um das Luft-/Kraftstoffgemisch zu zünden. Daher wird eine Zündkerze verwendet, um genau zum richtigen Zeitpunkt einen heißen Funken (bis zu 10.000 °C oder mehr) zu erzeugen, der die Temperatur des Kraftstoffs über seine „Zündtemperatur“ hinaus erhöht.

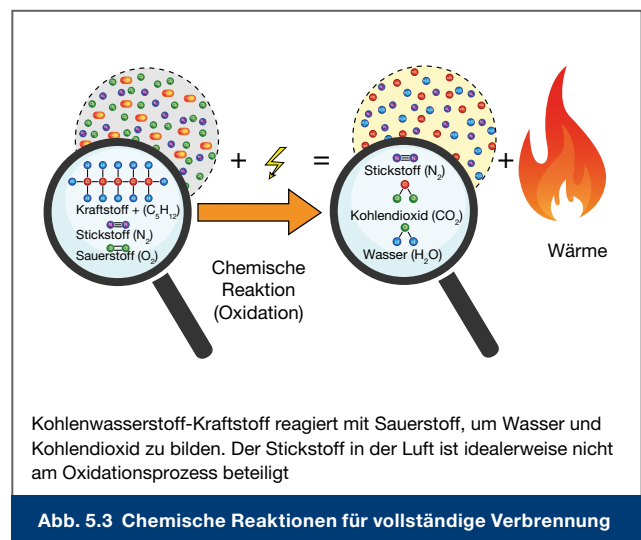
Es ist möglich, für die Zündung des Kraftstoffs nur die Wärme zu nutzen, die durch die Verdichtung erzeugt wird, was dem Funktionsprinzip eines Dieselmotors entspricht. Die höheren Verdichtungsverhältnisse, die in einem Dieselmotor herrschen, erzeugen höhere Zylinderdrücke und -temperaturen. Durch das Einspritzen des Dieselkraftstoffs in die erhitzte komprimierte Luft zur richtigen Zeit ist es möglich, eine Zündung und Verbrennung des Kraftstoffs genau zum richtigen Zeitpunkt zu erzielen.



Bei einem Benzinmotor zündet der Funke nur eine kleine Menge des Luft-/Kraftstoffgemischs, die direkt dem Funken ausgesetzt ist. Diese örtliche Verbrennung erzeugt dann aber eine Flamme mit Temperaturen im Bereich von 3.000 °C im Kern der Flamme. Die Flamme entwickelt sich dann zu einer sich selbst erhaltenden Flamme und breitet sich in der komprimierten Mischung aus, bis idealerweise der gesamte Kraft- und Sauerstoff durch die Verbrennung aufgebracht ist (siehe Abschnitt 5.3, über schlechte Verbrennung).

Die chemischen Reaktionen und das ideale Luft-/Kraftstoffverhältnis für die Verbrennung

Benzin ist ein Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (HC) mit Molekülen, die Wasserstoffatome (H) und Kohlenstoffatome (C) enthalten. Die Sauerstoffmoleküle enthalten zwei Sauerstoffatome (O₂) und wenn während der Verbrennung eine Oxidation auftritt, reagieren Wasserstoff und Sauerstoff und bilden H₂O (Wasser), wobei Kohlenstoff und Sauerstoff zu CO₂ (Kohlendioxid) reagieren. Diese chemischen Reaktionen, die während der Verbrennung auftreten, erzeugen den größten Anteil der Verbrennungswärme. Um jedoch die vollständige Verbrennung des Kraftstoffs und Sauerstoffs zu ermöglichen und die höchste Wärmeenergie zu erzeugen, muss sich der Kraftstoff mit genau der richtigen Menge von Sauerstoff mischen und reagieren können.



Der durch die Verbrennung verbrauchte Sauerstoff kommt aus der Umgebungsluft die ca. 21 % Sauerstoff (O₂) und ca. 78 % Stickstoff (N₂) enthält, wobei auf das verbleibende 1 % die anderen Gase entfallen. Der Kraftstoff muss gleichmäßig mit der Luft im richtigen Verhältnis gemischt werden, um zu gewährleisten, dass auch das Verhältnis von Kraftstoff und Sauerstoff richtig ist. Das richtige Verhältnis von Luft und Kraftstoff wird dann erreicht, wenn das Gewicht von Luft 14,7-mal größer als das Gewicht des Kraftstoffs ist (beispielsweise 14,7 Gramm Luft für 1 Gramm Kraftstoff).

Die gleichmäßige Mischung und Verteilung des Kraftstoffs in der Luft wird als „homogen“ bezeichnet, während das ideale Verhältnis von Luft und Kraftstoff als „stöchiometrisches Verhältnis“ bezeichnet wird.

5.1. Die Verbrennung von Kraftstoff und Sauerstoff	24
5.2. Erzielung einer guten Verbrennung	26
5.3. Ursachen und Probleme schlechter Verbrennung	27
5.4. Schadstoffe und schädliche Abgase, die während der Verbrennung entstehen	29
5.5. Abgasreduzierung und verbesserter Kraftstoffverbrauch	30

Stöchiometrisch und Lambda

Im Automobilbereich wird der Begriff „Lambda“ nun statt „stöchiometrisch“ verwendet. Der Lambda-Wert wird durch Messen des Sauerstoffgehalts ermittelt. Sauerstoffsensoren überwachen den Sauerstoffgehalt des Abgases, der anfänglich vom Luft-/Kraftstoffverhältnis abhängt. Die Sensoren, die auch als O₂- oder Lambda-Sonden bekannt sind (auch von DENSO geliefert), liefern dem Motormanagement-Steuergerät elektronische Signale, mit deren Hilfe das Steuergerät das Luft-/Kraftstoffverhältnis wie erfordert anpassen kann.

- (1) Für ein stöchiometrisches Luft-/Kraftstoffverhältnis wird ein Lambda-Wert von 1 festgelegt.
- (2) Ein mageres Luft-/Kraftstoffverhältnis, bei dem ein Überschuss an Sauerstoff erzeugt wird, hat einen Lambda-Wert höher als 1.
- (3) Ein fettes Gemisch mit einem Mangel an Sauerstoff hat einen Lambda-Wert von weniger als 1.

Theoretisch sollte ein Motor immer mit einem Lambda-Wert von 1 (stöchiometrisches Luft-/Kraftstoffverhältnis) betrieben werden. Aber selbst unter perfekten Bedingungen ist es sehr schwierig, eine vollständige Mischung und gleichmäßige Verteilung des Kraftstoffs in der Luft zu erzielen. Kleine Anpassungen erfolgen daher konstant, um ein richtiges Luft-/Kraftstoffverhältnis sicherzustellen.

Um einige der schädlichen Abgase zu verringern, die während der Verbrennung erzeugt werden, verwenden moderne Fahrzeuge Katalysatoren, die sich im Abgassystem befinden. Die Katalysatoren verwenden chemische Reaktionen, mit denen die besonders schädlichen Schadstoffe in weniger schädliche Substanzen umgewandelt werden (siehe Abschnitt 5.5).

Das Luft-/Kraftstoffverhältnis oder der Lambda-Bereich

Das Diagramm in Abb. 5.4 zeigt den Bereich der Luft-/Kraftstoffverhältnisse und die zugehörigen Lambda-Werte, die typischerweise in modernen Benzinmotoren verwendet werden.

Die grafische Darstellung zeigt einen relativ engen Bereich für die mageren und fetten Grenzen des Luft-/Kraftstoffverhältnisses, die dann die erforderliche Menge an Sauerstoff für effiziente Verbrennung und effizienten Katalysatorbetrieb liefern. Wenn die Luft-/Kraftstoffverhältnisse und Sauerstoffniveaus innerhalb des erforderlichen Bereichs liegen, befinden sich die Lambda-Werte in einem Bereich von ca. Lambda 1,03 (mager oder Sauerstoffüberschuss) und Lambda 0,97 (fett oder Kraftstoffüberschuss), was als Lambda-Fenster bezeichnet wird.

Durch die Verwendung der Sauerstoffsensoren (Lambda-Sonden) zur Überwachung des Sauerstoffs im Abgas kann das Motormanagement-Steuergerät das Luft-/Kraftstoffverhältnis und die Sauerstoffniveaus innerhalb des Lambda-Fensters halten. Es gibt jedoch einige Fahrbedingungen (siehe folgende Abschnitte), die kurzzeitig ein Luft-/Kraftstoffverhältnis oder Sauerstoffniveau erfordern, das außerhalb des Lambda-Fensters liegt.

Fette Gemische, die zu unvollständiger Verbrennung führen

Wenn das Gemisch fett ist, gibt es zu viel Kraftstoff um sich mit dem Sauerstoff zu mischen. Der Wasserstoff im Kraftstoff schafft es üblicherweise trotzdem, mit der erforderlichen Menge an Sauerstoff zu reagieren, um H₂O (Wasser) zu erzeugen. Ein gewisser Teil des Kohlenstoffs kann allerdings nicht vollständig mit der richtigen Menge an Sauerstoff reagieren. Dies führt zu einer unvollständigen Verbrennung, bei der ein Teil des Kohlenstoffs nur teilweise verbrannt wird. Die chemische Reaktion erzeugt dann Kohlenmonoxid (CO) anstelle des weniger schädlichen Kohlendioxids (CO₂). Außerdem könnte es passieren, dass ein Teil des Kraftstoffs überhaupt nicht mit dem Sauerstoff reagieren kann. Dies bedeutet, dass dieser Kraftstoff vollständig unverbrannt bleibt und in das Abgassystem als unverbrannter Kohlenwasserstoff (HC) weitergeleitet wird.

Die ausgestoßenen Abgase, die durch die Verbrennung eines fetten Gemischs entstehen, enthalten daher Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kraftstoff (HC). CO und HC werden beide als Schadstoffe betrachtet, die die Atmosphäre und unsere Gesundheit beeinträchtigen (siehe Abschnitt 5.4 für zusätzliche Informationen zu Schadstoffen).

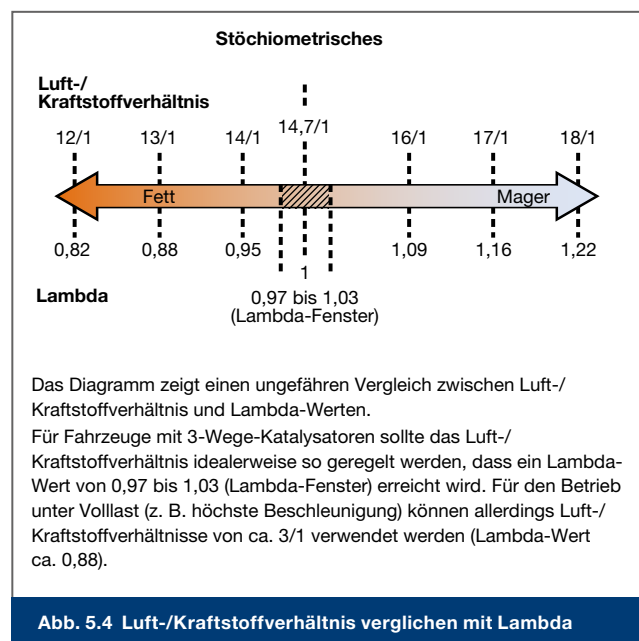
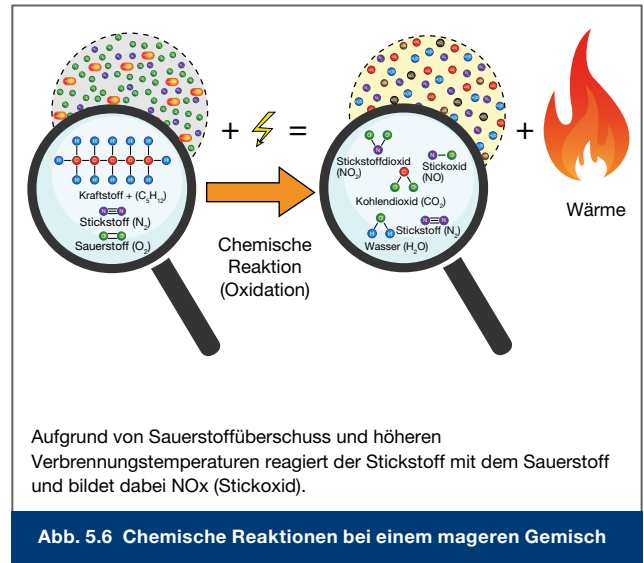
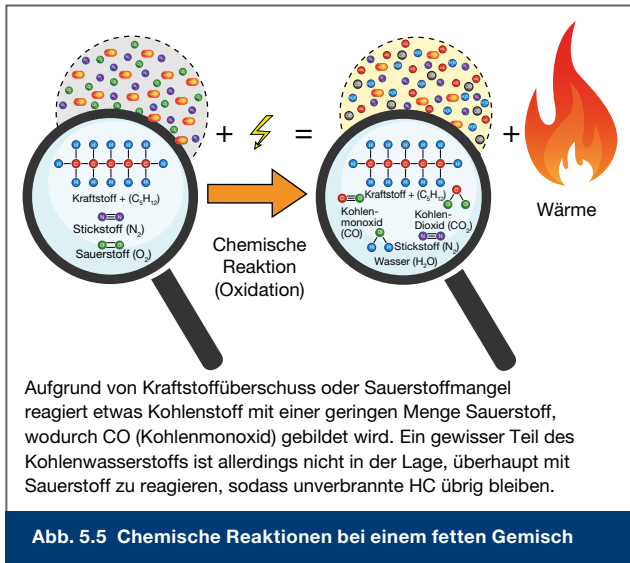


Abb. 5.4 Luft-/Kraftstoffverhältnis verglichen mit Lambda



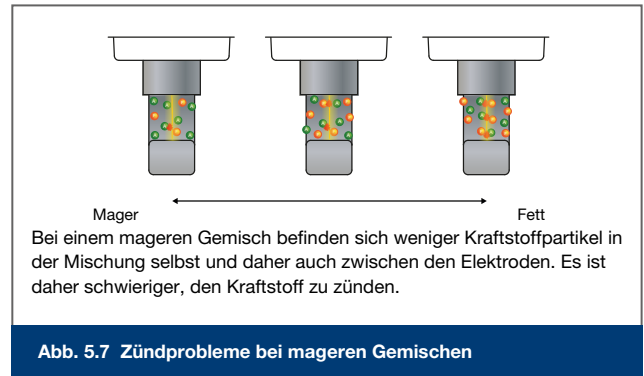
Ein fettes Luft-/Kraftstoffverhältnis wird oft für eine höhere Leistungsabgabe auf Kosten der Kraftstoffeffizienz verwendet. Rund 10 % Kraftstoffüberschuss (Lambda 0,9) kann verwendet werden, um sicherzustellen, dass ausreichend Kraftstoff für den gesamten verfügbaren Sauerstoff vorhanden ist, was zu einer Steigerung der Leistungsabgabe von ca. 2-3 % führt.

Ein Vorteil von fetten Gemischen ist, dass der flüssige Kraftstoff einen Kühleffekt auf die Verbrennungstemperatur hat. Während Betriebsbedingungen mit hoher Last steigen Verbrennungsdrücke und -temperaturen, was zu Frühzündung und Klopfen bei der Verbrennung führen könnte. Wenn ein fettes Gemisch verwendet wird, trägt die durch den Kraftstoffüberschuss absorbierte zusätzliche Wärme zu geringeren Verbrennungstemperaturen bei. Dies verringert das Risiko von Frühzündung und Klopfen bei der Verbrennung. So kann durch den Verbrennungsprozess sicher eine hohe Leistung erzeugt werden kann.

Ein fettes Gemisch ist üblicherweise auch während und unmittelbar nach einem Kaltstart erforderlich. Die niedrigen Temperaturen des Kraftstoffs sowie die kalten Zylinder- und Verbrennungsoberflächen können verhindern, dass der Kraftstoff gasförmig wird und sich mit der Luft und dem Sauerstoff vermischt. Daher ist zusätzlicher Kraftstoff erforderlich, um sicherzustellen, dass eine Verbrennung erfolgen kann.

Magere Gemische, die zu unvollständiger Verbrennung führen
In einem mageren Gemisch gibt es einen Sauerstoffüberschuss, sodass der gesamte Kraftstoff mit dem Sauerstoff reagieren kann. Der Sauerstoffüberschuss verringert die Bildung und den Ausstoß von CO und HC. Die verringerte Kraftstoffmenge absorbiert nicht so viel Wärme wie ein fettes Gemisch, sodass die Verbrennungstemperaturen höher sind.

Die höheren Temperaturen können dann bewirken, dass der Stickstoff in der Luft mit dem überschüssigen verfügbaren Sauerstoff



reagiert, was Stickoxide (NOx) bildet. Stickoxide sind Schadstoffe, die sowohl unserer Gesundheit als auch der Umgebung schaden.

Bei einem mageren Gemisch befinden sich weniger Kraftstoffpartikel im Luftvolumen. Deshalb befinden sich auch weniger Kraftstoffpartikel in der Nähe des Zündfunken. Die räumlich weit verteilten Kraftstoffpartikel erschweren die Zündung des Luft-/Kraftstoffgemischs. Zudem ist es auch schwieriger für die Flamme, sich durch das magere Gemisch zu verteilen oder auszubreiten. Extrem magere Gemische können daher schlechte Zündung und Verbrennung verursachen, was zu Fehlzündungen führt, die wiederum mehr unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) erzeugen.

Einige Motoren wurden für den Betrieb mit mageren Gemischen unter leichten Lastbedingungen ausgelegt, was zu einer verbesserten Kraftstoffausnutzung beiträgt. Aufgrund der Zünd- und Verbrennungsschwierigkeiten von mageren Gemischen werden Zündanlagen und Zündkerzen mit höherer Leistung verwendet, um einen stärkeren und länger anhaltenden Funken bereitzustellen. (Siehe Abschnitte 5.5 und 7.6).

5.2. Erzielen einer guten Verbrennung

Motor- und Brennraumkonstruktion

Bei der Entwicklung moderner Motoren spielt der Verbrennungsprozess eine wichtige Rolle.

Ein Motor muss die erforderliche Leistung in Verbindung mit niedrigen Abgasen und einem sparsamen Kraftstoffverbrauch erzeugen, was früher schwierig zu erreichen war. Moderne Motoren profitieren vom Einsatz elektronisch gesteuerter Systeme wie Zünd- und Kraftstoffanlage, die eine präzisere Regelung von Funktionen wie Zündzeitpunkt und Kraftstoffeinspritzung ermöglichen. Dies verbessert die Verbrennungseffizienz, sodass die höchste Energie während der Verbrennung mit der geringsten Kraftstoffmenge beim geringst-

möglichen Schadstoffausstoß erzeugt werden kann.

Es gibt jedoch viele andere Aspekte hinsichtlich der Motorkonstruktion (sowohl elektronisch als auch mechanisch), die den Verbrennungsprozess beeinflussen können:

> **Zündkerze.** Zündkerzen leiten die Hochspannung zu ihren Elektroden, um einen heißen Funken zu erzeugen, der das Luft-/Kraftstoffgemisch zündet. Die Zündkerze muss die richtige Temperatur beibehalten, um Ablagerung oder Frühzündungen zu vermeiden. Mehr Informationen über Anforderungen an die Zündkerze finden Sie in Kapitel 6.

- > **Zündanlage.** Zündanlagen müssen der Zündkerze zur richtigen Zeit die erforderliche Spannung und elektrische Energie liefern, um eine zuverlässige Zündung des Luft-/Kraftstoffgemischs zu erzielen.
- > **Luft-/Kraftstoffverhältnis.** Das Verhältnis muss stimmen, um sicherzustellen, dass eine möglichst große Menge des Kraftstoffs vollständig und effizient verbrennt.
- > **Einspritzsteuerzeit.** Bei modernen Motoren (mit Ansaugkanal- oder Direkt-Einspritzung) trägt die richtige Einspritzsteuerzeit dazu bei, dass sich Luft und Kraftstoff homogen vermischen.
- > **Brennraumform.** Die Form des Brennraums kann die Bildung einer Verwirbelung während Einlasstakt, Verdichtung und Verbrennung unterstützen. Verwirbelung trägt zu einer effektiveren Mischung von Luft und Kraftstoff bei und unterstützt die Ausbreitung der Flamme durch den gesamten Brennraum.
- > **Motorbetriebstemperatur.** Die Brennraumoberflächen (und Zylinderwände) müssen eine ausreichende Temperatur beibehalten, um zu vermeiden, dass kühle Oberflächen die Verbrennungsflamme zum Erlöschen bringen. Die Oberflächen dürfen aber nicht so heiß werden, dass sie eine Frühzündung verursachen.

- > **Variable Ventilsteuerzeit und variabler Ventilhub.** Das Ändern von Ventilsteuerzeit und Ventilhub trägt an einigen Systemen dazu bei, die Füllung des Zylinders mit Luft und den Ausstoß der Abgase über einen weiteren Bereich von Motordrehzahlen und -lasten zu verbessern.
- > **Abgasrückführung (AGR).** Während niedriger Lasten wird frische Luft mit Abgas gemischt, das dann in den Brennraum eintritt. Das Abgas ist nicht an der Verbrennung beteiligt und verringert somit die Verbrennungstemperatur und die NOx-Abgase (siehe Abschnitt 5.5).
- > **Turboaufladung (und Aufladung).** Erhöht die Luftmasse, die in den Zylinder fließt, und steigert daher Zylinderdruck/-temperatur, was Motordrehmoment und -leistung steigert (siehe Abschnitt 5.5).

5.3. Ursachen und Probleme schlechter Verbrennung

Die Motorkonstruktion hat offenkundig einen direkten Einfluss auf die Verbrennungseffizienz. Eine optimale Verbrennungseffizienz zu erreichen, bedeutet oft, nahe an Grenzwerten zu agieren. Das Überschreiten dieser Grenzwerte kann zu schlechter Verbrennung führen. Moderne Motoren profitieren von einer elektronischen Regelung für Kraftstoffeinspritzung, Zündung und anderen motorrelevanten Systemen, sodass das Risiko einer schlechten Verbrennung verglichen mit älteren Motoren beträchtlich verringert wurde.

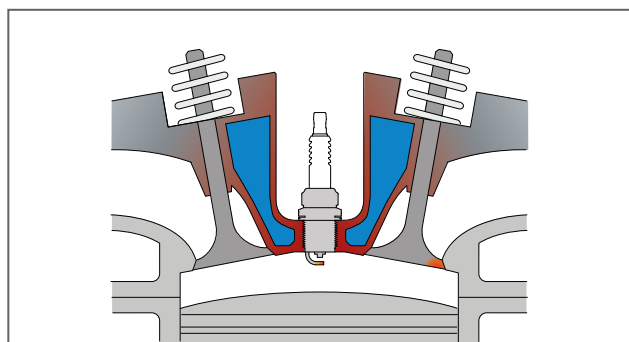
Frühzündung und Klopfen

Frühzündung und Klopfen sind verschiedene Symptome, die durch viele Störungen im Verbrennungsprozess verursacht werden können.

Frühzündung tritt dann auf, wenn ein heißer Punkt im Brennraum das Luft-/Kraftstoffgemisch zünden kann, bevor die Zündkerze den Funken zum richtigen Zeitpunkt liefert (Abb. 5.8). Dies hat dieselbe Wirkung wie ein zu stark vorverstellter Zündzeitpunkt (siehe Abschnitt 3.5). Die zu frühe Verbrennung von Kraftstoff bewirkt einen frühen Druck- und Temperaturanstieg im Zylinder, was schließlich zu einer schädlichen Detonation führen kann.

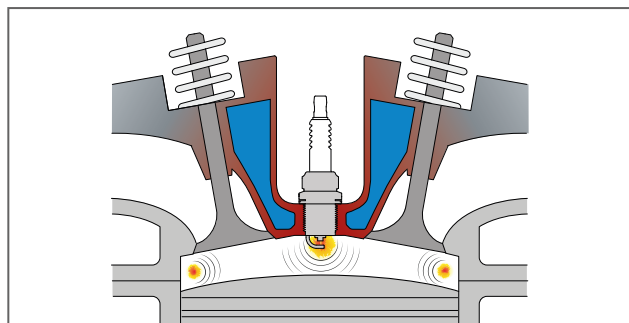
Eine Detonation tritt auf, wenn kleine Einschlüsse des Luft-/Kraftstoffgemischs einzeln durch hohe Drücke nach dem Verbrennungsbeginn gezündet werden (Abb. 5.9). Wenn während der normalen Verbrennung die Flamme immer weiter wächst und sich durch den gesamten Brennraum ausbreitet, steigen Druck und Temperatur in anderen Teilen des Brennraums. Während der Detonation werden Druck und Temperatur in den Abschnitten, in denen sich die Flamme noch nicht ausgebreitet hat, zu hoch. Die Einschlüsse des Luft-/Kraftstoffgemischs detonieren (explodieren) unabhängig von der Flamme. Die Detonation dieser kleinen Mischungs-Einschlüsse, kann schnelle Druckwellen verursachen, was ein erkennbares Klopf- oder Klingelgeräusch erzeugt.

Verlängerte Detonation kann ernsthafte Motorschäden verursachen wie das Schmelzen von Kolben und Auslassventilen.



Frühzündung kann durch heiße Stellen wie der Ansammlung von Kohlenstoff auf der Zündkerze oder einer so starken Erwärmung der Ventile verursacht werden, dass sie das Luft-/Kraftstoffgemisch zünden, bevor der Funke auftritt.

Abb. 5.8 Frühzündung



Die Druckwelle, die durch Frühzündung erzeugt wurde, führt zu Detonation

Abb. 5.9 Motorklopfen

DENSO HIGHLIGHT

Elektrodenform

Größere Elektroden verhindern das Flammenwachstum stärker, während die kleinsten Elektroden, wie die patentierte 0,4-mm-Mittelelektrode und die patentierte Twin Tip Technologie, ein verbessertes 3D-Wachstum ermöglichen.

Zur Optimierung des Zündvorgangs setzt DENSO auf kleinere Elektroden und eine verbesserte Zündleistung.



Fehler, die schlechte Verbrennung verursachen

Es gibt viele motorbezogene Fehler, die eine schlechte Verbrennung verursachen können. Im Folgenden werden nur die Hauptprobleme erklärt, die meist relativ einfach diagnostiziert und behoben werden können.

> **Zündkerzen.** Zündkerzenfehler beeinträchtigen sowohl moderne als auch ältere Motoren. Abschnitt 10.3 stellt einen detaillierten Leitfaden zur Fehlersuche bereit, um Fehler zu ermitteln, die auf die Zündkerze zurückzuführen sind. Es ist unerlässlich, dass die passende Zündkerze verwendet wird.

Die passende Zündkerze kann sehr leicht im DENSO e-Katalog auf denso-am.de/e-catalogue ermittelt werden.

> **Zündzeitpunkt.** Obwohl die elektronische Regelung von Zündanlagen an modernen Fahrzeugen keine Änderung des Zündzeitpunkts gegenüber dem programmierten Wert zulassen sollte, könnte ein Fehler am Motorsteuersystem zu einer falschen Steuerzeit führen. Bei älteren Fahrzeugen, insbesondere solchen mit mechanischen und frühen elektronischen Zündanlagen, haben Verschleiß der Komponenten und fehlerhafte Einstellung des Zündzeitpunkts eine spürbare Auswirkung auf Verbrennungseffizienz und Motorleistung.

> **Fettes Gemisch.** Obwohl sich ein leicht fettes Gemisch positiv auf Motorleistung und Drehmoment auswirkt, kann bei einem fetten Gemisch nicht der gesamte Kraftstoff aufgrund Sauerstoffmangels verbrannt werden. Der Verbrennungsprozess ist dann weniger effizient, was zu einer geringeren Kraftstoffausnutzung führt (siehe Abschnitt 5.1).

Fette Gemische werden bei modernen Fahrzeugen im Allgemeinen durch Folgendes verursacht:

- > Undichte oder tropfende Kraftstoffinjektoren
- > Hohe Kraftstoffdrücke
- > Blockierte oder eingeschränkte Luftfilter
- > Fehlerhafte Sauerstoffsensoren (Lambda-Sonden)

> **Magere Gemische.** Bei einem sehr mageren Gemisch sind die Kraftstoffpartikel über das gesamte Luftvolumen weiträumig verteilt. Daher kann der Funke die Mischung nur schwer entzünden.

Auch die Verbrennungsflamme kann nur schwer wachsen und sich durch das magere Luft-/Kraftstoffgemisch ausbreiten. Der erschwerte Zündungs- und Verbrennungsprozess kann zu Fehlzündungen führen.

Magere Gemische werden bei modernen Fahrzeugen im Allgemeinen durch Folgendes verursacht:

- > Luftleckagen im Einlasssystem
- > Niedriger Kraftstoffdruck
- > Verschmutzte oder blockierte Injektoren
- > Fehlerhafte Sauerstoffsensoren (Lambda-Sonden)

> **Fehler bei der Abgasrückführung.** Die Abgasrückführung (AGR) führt etwas Abgas zurück in das Einlasssystem, um zur Verringerung einiger schädlicher Abgase beizutragen. Es ist daher sehr wichtig, dass die rückgeführte Abgasmenge sorgfältig gesteuert wird.

Ein Fehler am AGR-System kann die rückgeführte Abgasmenge verringern, was zu erhöhten Verbrennungstemperaturen und somit zu Frühzündungen oder sogar Detonationen führen kann. Wenn jedoch ein Fehler eine übermäßige Menge an Abgasrückführung zulässt, schränkt dies das Frischluft- und Sauerstoffvolumen ein, welches in den Brennraum eintritt. Dies wiederum verursacht eine schlechte Verbrennung und Fehlzündungen.

> **Motor- und Brennraumtemperatur.** Der Verlust von Motorkühlmittel oder ein Fehler am Kühlsystem kann eine Temperaturerhöhung von Motor und Brennraum verursachen. Die Verbrennungstemperaturen steigen daher, was zu Frühzündung und Detonation führen kann.

Wenn jedoch ein Fehler im Kühlsystem verhindert, dass der Motor die normale Betriebstemperatur erreicht, sind Zylinderwände und Brennraumoberflächen kälter. Dies kann die Verbrennungsflamme zum Erlöschen bringen, bevor das gesamte Luft-/Kraftstoffgemisch durch die Verbrennung aufgebraucht wurde. Ein Motor, der bei niedrigen Temperaturen läuft, kann daher zu schlechter Kraftstoffeffizienz führen.

5.4. Schadstoffe und schädliche Abgase, die während der Verbrennung entstehen

Seit den 1960er Jahren wurden die Abgasvorschriften immer strenger, was Verbesserungen an der Motorkonstruktion sowie beträchtliche Verbesserungen und Änderungen an Zünd- und Kraftstoffanlagen erzwungen hat. Die Abgasvorschriften beinhalten weiterhin viele verschiedene Schadstoffe und obwohl einige Schadstoffe wie Schwefel und bleibasierte Schadstoffe beträchtlich verringert oder beseitigt wurden, werden weiterhin Schadstoffe während des Verbrennungsprozesses des Motors erzeugt. Die relevanten Hauptschadstoffe finden Sie in Tabelle 5.10.

Das Luft-/Kraftstoffverhältnis und seine Auswirkung auf die Hauptschadstoffe

Das Diagramm in Abb. 5.11 zeigt die Hauptschadstoffe und den Sauerstoffgehalt im Abgas. Es veranschaulicht, wie sogar kleine Änderungen am Luft-/Kraftstoffverhältnis das Schadstoffniveau deutlich erhöhen oder verringern können. Wenn sich das Luft-/Kraftstoffverhältnis innerhalb des Lambdafensters bewegt, kann ein ziemlich ausgewogenes Schadstoffverhältnis erzielt werden. Dennoch sind weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Abgasemissionen nötig.

Schadstoff	Symbol	Auswirkungen	Ursachen
Kohlenmonoxid	CO	Teilweise verbrannter Kraftstoff kann in die Blutbahn gelangen und den Sauerstoff verdrängen. Dies schränkt die Fähigkeit des Bluts, den Sauerstoff durch den Körper zu transportieren, ein.	Fette Gemische, schlechte Zündung (Fehler an Funke oder Zündanlage), schlechte Verbrennung, fehlerhafter Zündzeitpunkt
Kohlenwasserstoffe	HC	Unverbrannter Kraftstoff ist karzinogen (kann Krebs verursachen) und beeinträchtigt das Zellwachstum im Körper. Er kann mit anderen Schadstoffen zu Ozon reagieren.	Fette Gemische, schlechte Zündung (Fehler an Funke oder Zündanlage), schlechte Verbrennung, fehlerhafter Zündzeitpunkt
Stickoxide	NO _x (Stickstoffoxid-NO und Stickstoffdioxid-NO ₂)	Kann Reizung an Augen und Lungen verursachen und zu Atemproblemen führen. Trägt zu Smog und saurem Regen sowie zur Ozonkonzentration auf Bodenebene bei.	Entsteht während der Verbrennung bei hoher Temperatur mit mageren Gemischen, bei denen Stickstoff in der Luft mit Sauerstoff reagiert
Kohlendioxid	CO ₂	Der am wenigsten schädliche Schadstoff aus dieser Liste. Die Ansammlung von CO ₂ in der Atmosphäre schließt die Wärme ein und trägt zur globalen Erwärmung bei	Resultat aus der vollständigen Verbrennung von Kraftstoff und Sauerstoff

Abb. 5.10 Hauptschadstoffe

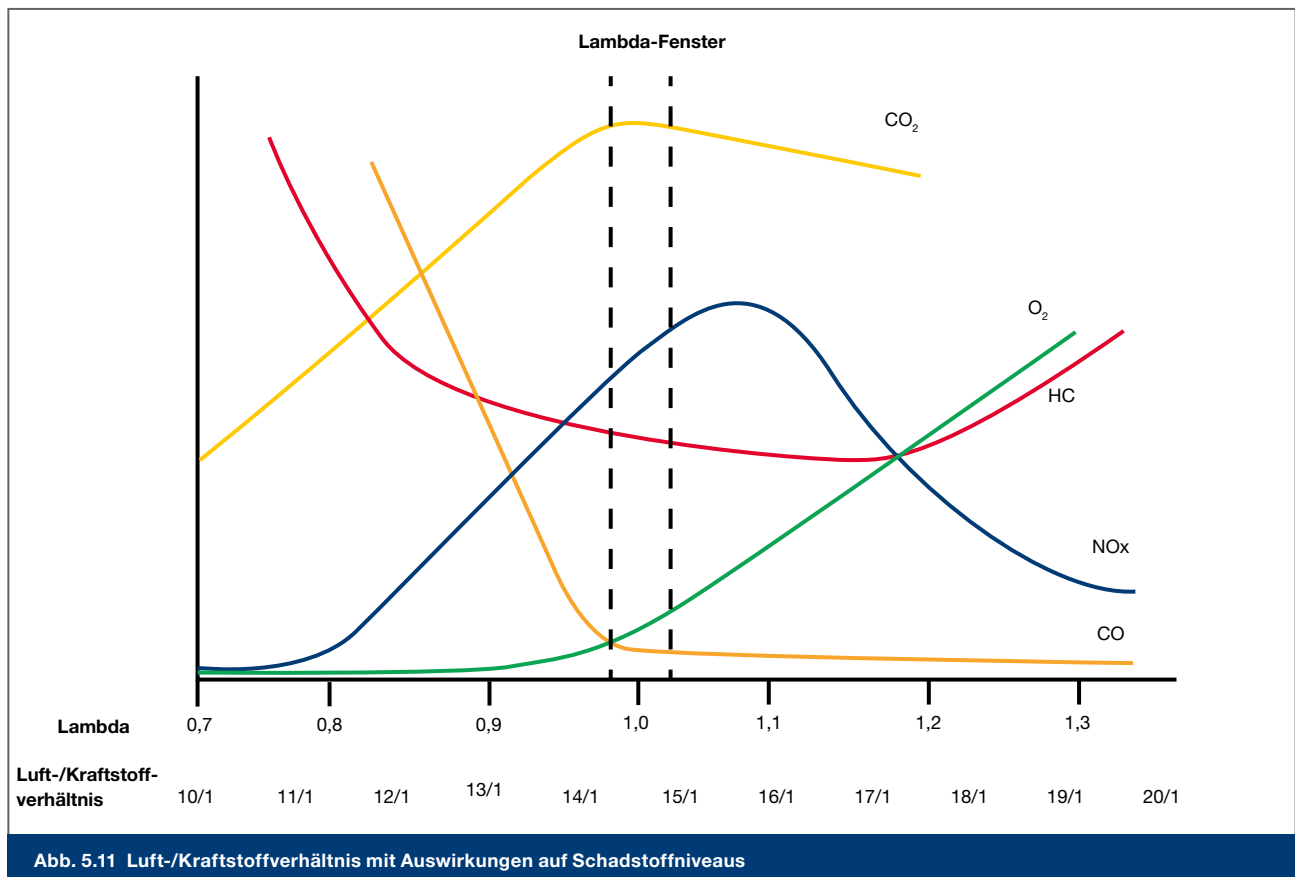


Abb. 5.11 Luft-/Kraftstoffverhältnis mit Auswirkungen auf Schadstoffniveaus

5.5. Abgasreduzierung und verbesserter Kraftstoffverbrauch

Durch Verbessern der Motorkonstruktionen und Verbrennungsprozesse wurden beträchtliche Schadstoffreduzierungen erzielt. Bei der Verschärfung der Vorschriften für Kraftfahrzeuge liegt einer der Schwerpunkte auf verbesserten Systemen für die Abgasnachbehandlung. Allerdings müssen neue Technologien entwickelt werden, um die Bildung von schädlichen Abgasen zu vermeiden oder zu verringern. Einige dieser Technologien werden unten erklärt.

Katalysatoren und Lambda-Sonden um den Gehalt an CO, HC und NOx zu verringern

3-Wege-Katalysatoren wurden während der 1980er Jahre eingeführt und sind jetzt in fast allen seriengefertigten Fahrzeugen mit Benzinmotor zu finden. Diese 3-Wege-Katalysatoren ermöglichen eine Nachbehandlung des Abgases, um die Schadstoffe CO, HC und NOx zu reduzieren, die während der Verbrennung erzeugt werden (Abb. 5.12).

In Katalysatoren im Automobilbereich werden Edelmetalle wie Palladium, Rhodium oder Platin als Katalysatormaterial zum Fördern der chemischen Reaktionen verwendet. Sie nehmen aber selbst nicht daran teil. Für den effektiven Betrieb eines Katalysators ist Wärme erforderlich.

Beim Behandeln von CO und HC (der teilweise verbrannte und unverbrannte Kraftstoff) werden die chemischen Reaktionen fortgesetzt, die während der Verbrennung im Motor nicht vollständig abgeschlossen wurden. Innerhalb des Katalysators reagieren Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) mit Sauerstoff – ähnlich wie bei den Oxidationsreaktionen - die während der Verbrennung erfolgen. Es wird ein leicht mageres Luft-/Kraftstoffgemisch eingesteuert, um Sauerstoff für die Reaktionen, die CO und HC in CO₂ (Kohlendioxid) und H₂O (Wasser) umwandeln, bereitzustellen.

Für die Verringerung der Stickoxide (NOx), die während der Verbrennung gebildet wurden, ist eine andere chemische Reaktion erforderlich, die den Sauerstoff (O₂) vom Stickstoff (N) trennt. Die Reaktion (bekannt als Reduktion) erfordert ein etwas fetteres Gemisch mit einer verringerten Menge von Sauerstoff, um den Sauerstoff vom Stickstoff zu trennen. Der abgeschiedene Sauerstoff kann dann verwendet werden, um mit dem verbleibenden CO und HC im Abgas zu reagieren, um wieder CO₂ zu erzeugen.

Da die eine chemische Reaktion einen Sauerstoffüberschuss und die andere Reaktion eine verringerte Sauerstoffmenge erfordert, schaltet das Motormanagement-Steuergerät das Luft-/Kraftstoffverhältnis zwischen den fetten und mageren Grenzwerten des Lambda-Fensters um. Der Sauerstoffgehalt des Abgases reicht daher von ca. Lambda 0,97 bis ca. 1,03, was den Katalysator in die Lage versetzt, die zwei verschiedenen chemischen Reaktionen zu fördern.

Damit das Steuergerät das Luft-/Kraftstoffverhältnis präzise regeln und die erforderliche Menge an Sauerstoff bereitstellen kann, liefert eine Vorkat-Lambdasonde dem Steuergerät ein elektrisches Signal, das den Sauerstoffgehalt im Abgas vor dem Katalysator angibt (Abb. 5.12). Je nach Signal, das vom Sensor eingeht, passt das Steuergerät das Luft-/Kraftstoffverhältnis an. Dieser kontinuierliche Prozess zur Überwachung und Korrektur des Sauerstoffgehalts ist als geschlossener Regelkreislauf bekannt. Eine zweite Lambda-Sonde nach dem Katalysator überwacht den Sauerstoffgehalt, um sicherzustellen, dass dieser während der chemischen Reaktionen verbraucht wurde. Diese zweite Sonde ist daher als Diagnosesonde bekannt.

Downsizing und Turboaufladung

Zusätzlich zur Reduzierung der bereits genannten Schadstoffe ist es seit kurzem immer wichtiger, auch CO₂ (Kohlendioxid), das aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe resultiert, zu senken. Dies hat seit Mitte der 2000er Jahre zum Trend des Motor-Downsizing geführt. Die Konstruktion von kleineren Motoren spart Gewicht, was zu einer Verringerung der Leistungsanforderungen und des Kraftstoffverbrauchs beiträgt. Aber um die Fahrzeugleistung beizubehalten, müssen kleinere Motoren weiterhin genügend Leistung und Drehmoment (vergleichbar mit größeren Motoren) erzeugen. Dies erfordert eine Steigerung der spezifischen Motorleistung.

Die spezifische Leistung ist die höchste Leistungsabgabe, geteilt durch den Motorhubraum (Motorkapazität). Eine effektive Methode zur Steigerung der spezifischen Leistung ist die Turboaufladung. Es gibt einen wachsenden Trend zur Verwendung von Turboladern, die die Luftmasse erhöhen, die in den Zylinder eintritt (Aufladung). Die erhöhte Luftmasse erhöht die Verbrennungstemperaturen und -drücke, was zu mehr Leistung und Drehmoment führt.

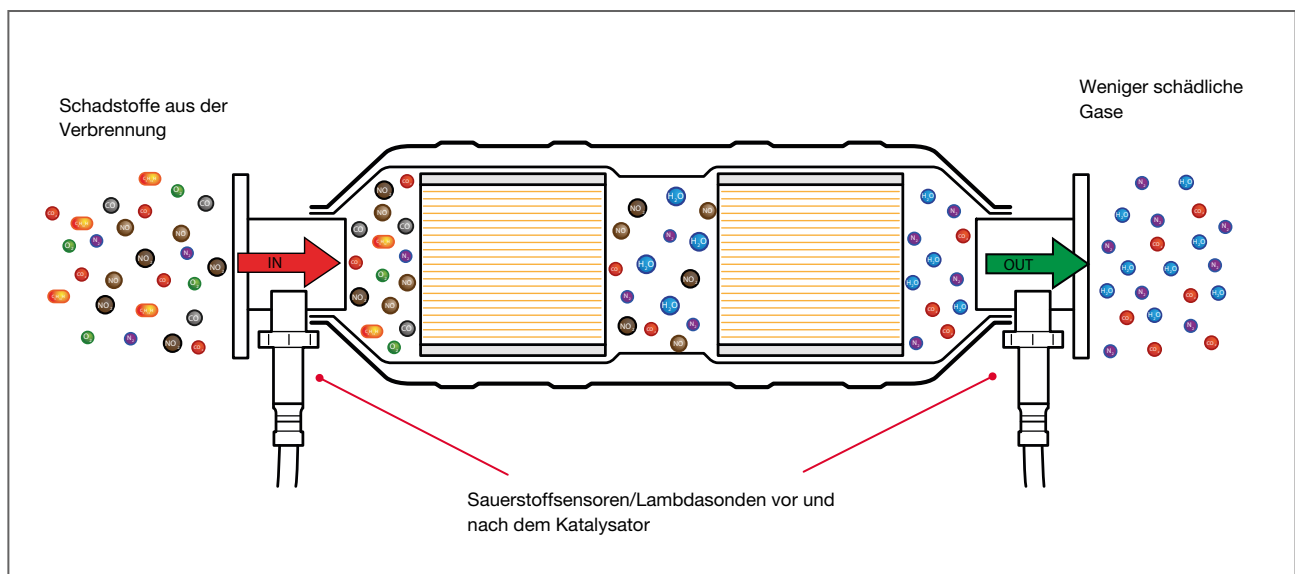


Abb. 5.12 Katalysator

Magere Gemische und direkte Einspritzung

Ein weitere Strategie, die zur Reduktion von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen beiträgt, ist der Motorbetrieb mit mageren Gemischen bei niedriger Motorlast. Die Verwendung von mageren Gemischen trägt dazu bei, dass der gesamte Kraftstoff für die Verbrennung verwendet und nicht durch den Übertritt in das Abgassystem vergeudet wird.

Eine Methode, die den Betrieb mit magerer Verbrennung ermöglicht, ist die Direkteinspritzung, bei der das Benzin nicht in die Ansaugkanäle, sondern direkt in den Brennraum eingespritzt wird (Abb. 5.13).

Bei niedriger Motorlast wird der Kraftstoff während des Verdichtungsakts eingespritzt; der Kraftstoff wird dann nur mit einer kleinen Menge der gesamten Luft im Zylinder vermischt. Obwohl dann nur eine kleine Menge des Gemischs gezündet wird, erzeugt der Verbrennungsprozess dennoch ausreichend Wärme, um die verbleibenden Gase auszudehnen und genug Leistung für Fahrbedingungen mit niedriger Last bereitzustellen. Dieses Prinzip, nur eine kleine Menge des Gemischs zu zünden, wird als „Schichtlade“-Verbrennung bezeichnet.

Bei höherer Last wird der Kraftstoff während des Einlassakts eingespritzt, sodass sich der Kraftstoff mit der gesamten Luft im Zylinder (homogenes Gemisch) vermischen kann und somit die Verbrennung mit einem normalen Luft-/Kraftstoffverhältnis ermöglicht, um mehr Leistung zu erzeugen.

Während der Schichtlade-Verbrennung verursacht das magere Gemisch hohe Verbrennungstemperaturen. Die Kombination von hohen Temperaturen und überschüssigem Sauerstoff erzeugt hohe NO_x-Konzentrationen, die dann durch einen höheren Anteil an Abgasrückführung verringert werden.

Abgasrückführung (AGR) zur Reduzierung von NO_x-Konzentrationen

Abgasrückführung (AGR) wird verwendet, um die Bildung von NO_x während der Verbrennung zu verhindern. Die NO_x-Konzentration steigt beträchtlich, wenn ein Sauerstoffüberschuss (mageres Gemisch) vorhanden ist und die Verbrennungstemperaturen 1.600 °C überschreiten.

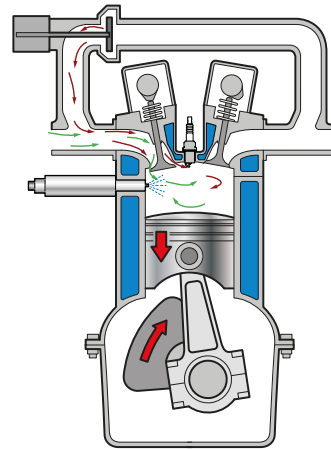
Durch die Rückführung einer kontrollierten Menge an Abgas in das Motoreinlasssystem, wo es mit der frischen Ansaugluft (Abb. 5.14) gemischt wird, ersetzen die reaktionsträgen (nicht brennbaren) Abgase etwas Luft und Sauerstoff im Zylinder. Obwohl das rückgeführte Abgas heiß ist, liegt seine Temperatur unter der Verbrennungstemperatur, sodass das Abgas Wärme aus dem Verbrennungsprozess absorbieren kann. Die verringerten Verbrennungstemperaturen reduzieren die NO_x-Bildung sowie das Risiko von Frühzündung und Detonation.

Während Vollast-Bedingungen ist die größtmögliche Menge an Frischluft für eine hohe Leistungsabgabe erforderlich. Daher wird AGR normalerweise während Vollast-Bedingungen nicht verwendet.

Das Motormanagement-Steuergerät reguliert die Öffnung eines AGR-Ventils (auch von DENSO hergestellt), sodass je nach Betriebsbedingungen etwa 5 % bis 15 % des Abgases in das Einlasssystem zurückgeführt werden können.

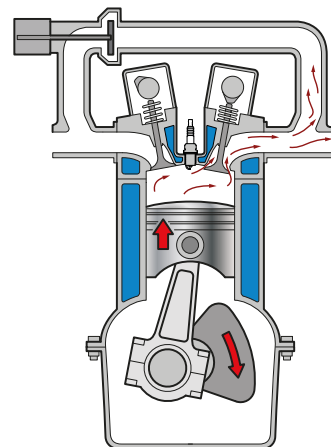
Diese Technologien wurden entwickelt, um die Abgase zu reduzieren und Leistung und Kraftstoffverbrauch zu verbessern.

Sie wurden weiter verbessert. Die neuen Trends und ihre Auswirkungen auf die Zündanlage werden in Abschnitt 7.6 beschrieben.

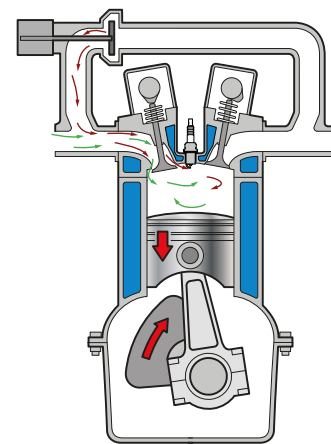


Der Kraftstoff wird während des Einlassakts in den Brennraum eingespritzt. Bei vielen Arten von Direkteinspritzsystemen kann der Kraftstoff aber auch während des Verdichtungsakts bei Betriebsbedingungen mit leichter Last eingespritzt werden.

Abb. 5.13 Direkteinspritzung



Während des Auslassakts kann etwas Abgas zum AGR-Ventil gelangen.



Während des Einlassakts erlaubt das AGR-Ventil die Mischung einer kalibrierten Abgasmenge mit der Einlassluft.

Abb. 5.14 Abgasrückführung (AGR)

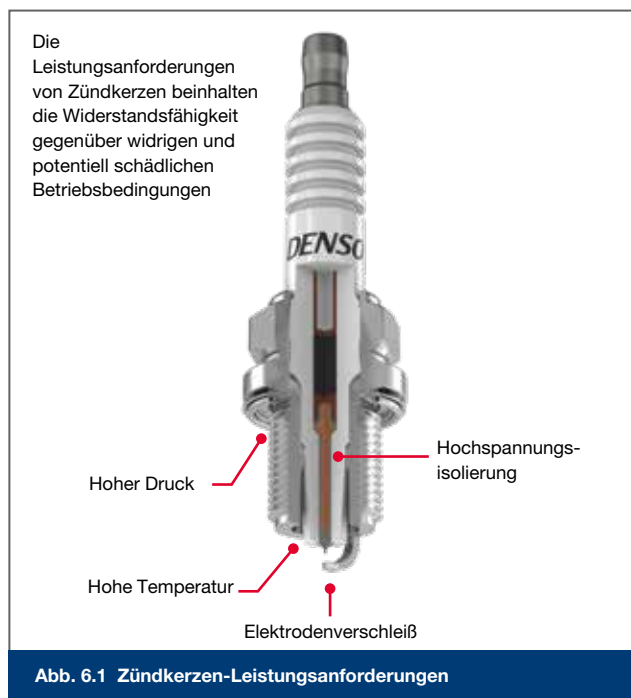
6. ZÜNDKERZEN

6.1. Der Schlüssel zur Verbrennung

Zündkerzen sind eine Schlüsselkomponente für einen effizienten Zündungs- und Verbrennungsprozesses. Obwohl der Zweck einer Zündkerze lediglich darin besteht, den Zündfunken für die Verbrennung der Luft-/Kraftstoffmischung bereitzustellen, hat das Design der Zündkerze einen großen Einfluss auf den Verbrennungsprozess während der früheren Phasen der Verbrennung.

6.2. Leistungsanforderungen

Zündkerzen müssen nicht nur den Funken erzeugen, sondern auch eine Reihe von Leistungsanforderungen erfüllen. Die wichtigsten Anforderungen werden unten aufgeführt (Abb. 6.1).



Widerstandsfähigkeit gegenüber hohen Temperaturen und ständigen Temperaturänderungen

Die Oberflächen der Zündkerzen im Brennraum sind fortlaufend Temperaturen von rund 3.000 °C während der Verbrennung des Luft-/Kraftstoffgemischs ausgesetzt. Allerdings unterliegt die Zündkerze während des Einlassstakts einer plötzlichen Abkühlung durch die niedrige Temperatur der frischen Einlassluft. Diese plötzliche Erhitzung und Abkühlung wird für jeden 4-Takt-Zyklus bei laufendem Motor wiederholt. Die Zündkerze muss nicht nur der Hitze standhalten, sondern auch genug Wärme ableiten, um die Entstehung von heißen Stellen auf der Zündkerze zu verhindern, die eine Frühzündung verursachen könnten.

Widerstandsfähigkeit gegenüber starken Druckänderungen

Während des Einlassstakts ist der Druck geringer als 1 bar, aber während des Verbrennungstakts kann der Druck 50 bar überschreiten. Die Zündkerze muss daher die mechanische Stärke

und Haltbarkeit aufweisen, um den beträchtlichen Drücken und den Druckänderungen standzuhalten.

Hochspannungsisolierung

In einer Umgebung, in der sich die Temperatur und der Druck drastisch und fortlaufend ändern, müssen Zündkerzen auch mit einer außergewöhnlichen Isolierung konstruiert werden, um die hohen Spannungen aufzunehmen, die über 40 kV bei modernen Zündanlagen erreichen.

Aufrechterhaltung einer luftdichten Versiegelung in rauen Umgebungen

Zündkerzen müssen unter anspruchsvollsten Bedingungen mit starken Temperatur- und Druckänderungen und unter Hochspannung eine luftundurchlässige Dichtung zwischen dem Gehäuse und dem Isolator aufrechterhalten. Daher werden zwischen dem Isolator und dem Gehäuse hochwertige Dichtungen eingesetzt, um zu verhindern, dass heiße und unter Hochdruck stehende Gase durch die Zündkerzenbaugruppe nach außen austreten und die verschiedenen Komponenten der Zündkerze beschädigen.

Minimierung von Ablagerungen

Unter extremen Einsatzbedingungen kann die Verbrennung des Luft-/Kraftstoffgemischs zu Ablagerungen und Verunreinigungen des Zündkerzengehäuses und der Elektroden führen. Die Zündkerzen müssen daher in der Lage sein, die Bildung von Ablagerungen an den Elektroden zu minimieren und Selbstreinigungseigenschaften aufweisen, sodass durch die Hitze die Kohlenstoffablagerungen abgebrannt werden.

Der Isolatorabschnitt in der Nähe der Elektroden sollte idealerweise die Selbstreinigungstemperatur (ungefähr 500 °C) erreichen; daher ist es wünschenswert, dass die Zündkerzentemperatur sogar dann rasch steigt, wenn die Verbrennungstemperaturen relativ niedrig sind (wie während Fahrbedingungen mit niedriger Last). Einige Zündkerzen wurden konstruktiv mit zusätzlichen Merkmalen ausgelegt, die die Ablagerungen minimieren oder die Selbstreinigung verbessern (siehe Abschnitt 6.6).

Minimierung des Elektrodenverschleißes

Die Elektroden der Zündkerze sind hohen Temperaturen sowie schnellen Temperaturänderungen ausgesetzt; dabei müssen die Elektroden wiederholt ihre Hauptfunktion ausführen, also das Bereitstellen des Zündfunken, der beim Spannungsüberschlag an den Elektroden auftritt.

Die Elektroden müssen daher ein hohes Maß an Verschleißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Funkenerosion und den vorherrschenden hohen Temperaturen aufweisen (siehe Abschnitt 7.2).

6.1. Der Schlüssel zur Verbrennung	32
6.2. Leistungsanforderungen	32
6.3. Zündkerzenaufbau	33
6.4. Elektrischer Funke und erforderliche Spannung	35
6.5. Betriebsbedingungen mit Auswirkungen auf die Zündkerzenspannung	36
6.6. Wärmewert	39
6.7. Flammenlöschung mit Auswirkungen auf Flammenerzeugung und Flammenausbreitung	41

DENSO HIGHLIGHT

DENSO produziert ein Sortiment an Zündkerzen, deren Elektroden unter Verwendung von Edelmetallen hergestellt werden. Diese leisten einen beträchtlichen Beitrag zur Verringerung des Elektrodenverschleißes.

Die Nutzung fortschrittlicher Technologien wie der DENSO Twin Tip Technologie ermöglicht eine bessere Leistung über eine längere Zeitspanne. Die DENSO Iridium Zündkerzen mit Longlife-Eigenschaften können sogar eine Standzeit von bis zu 180.000 km erreichen.

6.3. Zündkerzenaufbau

Hauptbestandteile einer Zündkerze

Um unter schwierigen Bedingungen betrieben werden zu können und die Leistungsanforderungen zu erfüllen, umfasst der Aufbau von Zündkerzen drei Hauptbauteile:

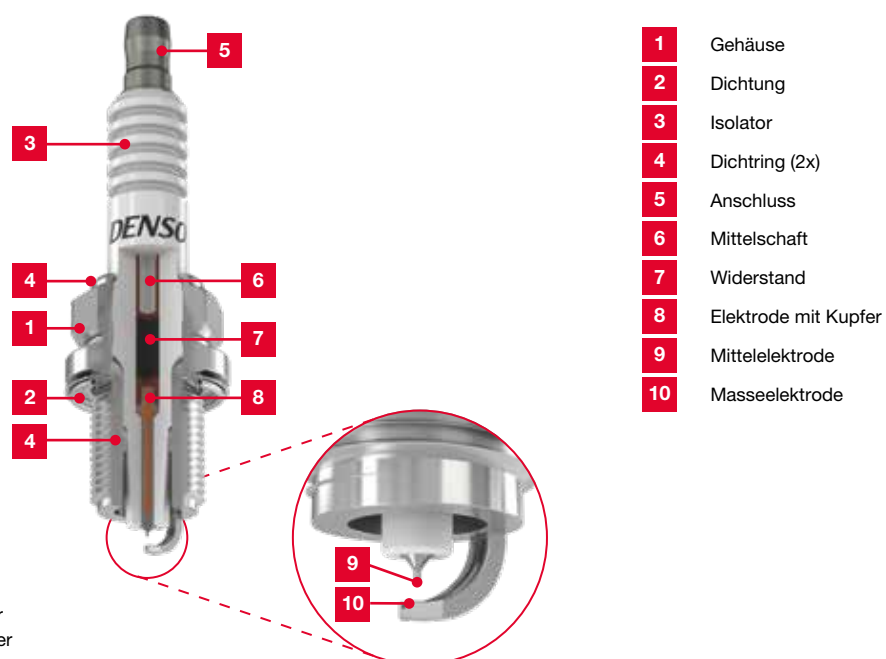
- (1) Gehäuse
- (2) Isolator
- (3) Elektroden

Diese Hauptbauteile enthalten dann die einzelnen Komponenten der Zündkerze, die aus sorgfältig ausgewählten Materialien hergestellt werden. Das Diagramm (Abb. 6.2) zeigt die Hauptbauteile und -komponenten für eine DENSO Iridium Power-Zündkerze.

Gehäuse

Das Gehäuse (Komponente 1) bildet eine Außenhülle, die den Isolator umgibt und schützt und den Einbau der Zündkerze im Motor sichert. Der Dichtring oder die Dichtung (Komponente 2) stellen eine Isolierung zwischen dem Zündkerzengehäuse und dem Motor her, um den Austritt jeglicher Gase während Verdichtung und Verbrennung zu vermeiden.

Die Masseelektrode (Komponente 10) ist am unteren Gehäuseabschnitt mit dem Gewinde verbunden, sodass der elektrische Strom durch den Motor zurück zur Batterie fließen kann.



Die Dichtungen und der Isolator schützen viele Komponenten der Zündkerze vor hohen Temperaturen, Drücken und Spannungen.

Abb. 6.2 Zündkerzenaufbau

Isolator

Der keramikbasierte Isolator (Komponente 3) sorgt für eine elektrische Isolierung zwischen Anschluss, Mittelschaft und Mittelelektrode sowie Gehäuse.

Da Zündspannungen moderner Zündanlagen teils 40 kV überschreiten, muss der Isolator die erforderlichen Isolierungseigenschaften mit einer Dicke im Millimeterbereich bereitstellen.

DENSO verwendet ein Keramikmaterial mit hochreinem Aluminiumoxid, um überlegene Hitzebeständigkeit, mechanische Festigkeit und ausgezeichnete elektrische Isoliereigenschaften bereitzustellen.

Die Ringdichtungen (Komponente 4) stellen eine sichere Passung und luftdichte Abdichtung zwischen Gehäuse und Isolator bereit.

Anschluss

Die Hochspannung wird durch den Anschluss (Komponente 5) entweder über eine direkte Anbringung am Sockel der Zündspule oder durch Verwendung eines Zündkerzenkabels bereitgestellt, das den Zündkerzenanschluss mit der Spule verbindet. Es gibt unterschiedliche Ausführungen der Anschlüsse, sodass fast jeder Hochspannungs-Zündkerzendraht oder jede Zündspule mit dem Zündkerzenanschluss verbunden werden kann.

DENSO bietet 4 verschiedene Arten von Anschlüssen an:

1. **Gewinde** (ohne Anschlussmutter, verwendet für Motorräder und ältere Fahrzeugtypen)
2. **Anschlussmutter** (Gewinde mit Mutter, die problemlos gelöst werden kann)
3. **Mit Crimpverbindung** (Gewinde mit Crimpmutter für eine bessere Verbindung zwischen Mutter und Gewinde. Die Mutter kann entfernt werden, aber dies ist schwieriger)
4. **Fest** (fester Anschluss für Autoanwendungen, kann nicht entfernt werden)

Mittelschaft

Der Mittelschaft aus Stahl (Komponente 6) verbindet den Anschluss und die Mittelelektrode und ermöglicht den Fluss der Hochspannung vom Anschluss zur Mitte.

Widerstand

Der Widerstand (Komponente 7), der auch als Entstörer bezeichnet wird, senkt die Ausstrahlung der im Zündvorgang entstehenden Störstrahlung. Ohne einen Widerstand würden Stromspitzen zu starken Impulsen aus elektromagnetischen Feldern oder Funkstörungen führen, die dann die elektrische Ausrüstung im Auto stören können. DENSO Zündkerzenwiderstände werden aus einer Mischung aus Spezialglas und Kupferpulver hergestellt.

Mittelelektrode

Die Mittelelektrode (Komponente 9) wird aus Materialien wie Nickellegierungen hergestellt, die hohen Temperaturen standhalten können. Diese Materialien müssen auch extrem hart und haltbar sein, um den Verschleiß zu minimieren, der durch Funkenerosion verursacht wird. Der Mittelabschnitt der Elektrode (Komponente 8) enthält häufig einen Kupferkern, um die thermische Leitfähigkeit zu verbessern.

Für verbesserte Leistung und Haltbarkeit können Mittelelektroden mit einer Elektrodenspitze aus Edelmetallen hergestellt werden, die sogar noch belastbarer als die traditionellen Elektrodenmaterialien sind. Diese härteren Materialien können bei höheren Temperaturen mit verringertem Verschleiß betrieben werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser härteren Materialien besteht darin, dass sie die Herstellung feinerer Elektroden ermöglichen, was zu einer besseren Zündleistung führt.

DENSO Zündkerzen weisen eine Reihe einzigartiger, patentierter Materialien auf:

1. Standardmäßig Ø 2,5 mm Nickellegierung.
2. Neue und einzigartige Ø 1,5 mm Nickellegierung (verwendet in den Nickel TT*-Zündkerzen), die verglichen mit standardmäßigem Nickel den Verschleiß an den Zündkerzen um 40 % verringert.
3. Platin, ein Edelmetall, das sehr hohen Temperaturen standhalten kann, mit Ø 1,1 mm Elektroden.
4. Hochreine Iridium-Legierung, die den höchsten Temperaturen standhält und das härteste Material darstellt, das jemals in einer Zündkerze verwendet wurde. Die Iridium-Spitzen mit Ø 0,4 mm*, 0,55 mm oder 0,7 mm sind an die Mittelelektrode lasergeschweißt.

Die feineren Elektroden verringern die erforderliche Spannung, gewährleisten einen zuverlässigen Funken, reduzieren den Auslöschereffekt und verbessern die Zündleistung.

Masseelektrode

Die Masseelektrode (Komponente 10) unterliegt den extremen Temperaturänderungen innerhalb des Brennraums. Für die meisten Masseelektroden wird eine Nickelchrom-Legierung verwendet, aber es kann auch Platin hinzugefügt werden, um die Lebensdauer der Elektrode zu verlängern. Einige Zündkerzen sind mit einer Kupferkern-Masseelektrode ausgerüstet, um die thermische Leitfähigkeit zu verbessern.

DENSO setzt spezielle Technologien bei der Masseelektrode ein, um die Zündleistung zu verbessern:

1. Patentierte U-Rille* ermöglicht eine leichtere Funkenbildung und vergrößert den Raum für ein schnelleres Flammenwachstum.
2. Kegelförmige Masseelektrode, zur Verringerung des Auslöschereffekts und Verbesserung des Flammenwachstums.
3. Nadeltyp mit entweder Ø 1,5 mm vorspringender Nickelelektrode* (Nickel TT) oder Ø 0,7 mm geschweißter Platinelektrode (SIP und Iridium TT).

Wie bei der Mittelelektrode senken die feineren nadelförmigen Masseelektroden den Zündspannungsbedarf, gewährleisten eine zuverlässige Funkenbildung, verringern den Auslöschereffekt und verbessern die Zündleistung.

*Patentierter DENSO Technologie

6.4. Zündfunke und erforderliche Funkenspannung

Der Funke, der über den Spalt zwischen den Elektroden der Zündkerze überspringt, stellt die erforderliche Energie und Temperatur zum Zünden der Luft-/Kraftstoffmischung zum genau richtigen Zeitpunkt bereit; aber wenn unzureichende Wärme durch den Funken erzeugt wird, kann dies Fehlzündungen verursachen.

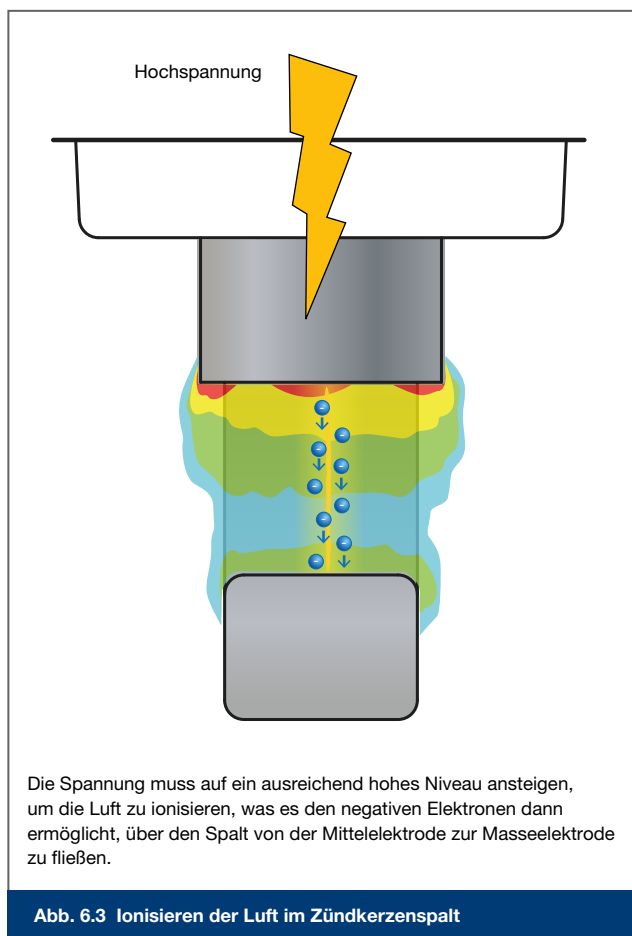
Wie in Kapitel 3 erläutert, wird Energie in Form eines Magnetfelds verwendet, um eine Hochspannung in der Sekundärwicklung der Zündspule zu induzieren. Die Hochspannung wird dann an die Zündkerze weitergeleitet, um den Funkenüberschlag zwischen den Elektroden zu erzeugen. Der Funke zündet dann das Luft-/Kraftstoffgemisch, das sich direkt innerhalb des Zündkerzenspalts befindet. Der Funke kann jedoch nur erzeugt werden, wenn ausreichend elektrische Energie zum Erzeugen eines ionisierten, elektrisch leitfähigen Kanals oder Pfads durch das normalerweise isolierende Luft-/Kraftstoffgemisch vorhanden ist.

Ionisierung ist ein komplexer Prozess, bei dem die Änderung der elektrischen Eigenschaften einer Substanz bewirkt werden kann. Luft ist eine der vielen Substanzen, die natürliche elektrische Isolatoren darstellen, da die Atome elektrisch neutral sind und keinen Pfad für den Fluss von Elektrizität bereitstellen. Aber durch Anlegen von ausreichend Spannung bewirkt die elektrische Energie, dass sich negativ geladene Partikel (Elektronen) in den Atomen zwischen die Atome bewegen. Die elektrisch neutralen Atome werden in elektrisch geladene Atome umgewandelt, die als „Ionen“ bekannt sind, daher wird dieser Umwandlungsprozess als „Ionisierung“ bezeichnet (Abb. 6.3).

Um ausreichend Energie zum Ionisieren der Luft bereitzustellen, ist eine Hochspannung von typischerweise 10 kV bis 40 kV erforderlich, wobei für einige Motoranwendungen bis zu 45 kV erforderlich sind. Die Ionisierung der Luft erzeugt einen leitfähigen Pfad für die elektrische Energie, der dann mit hoher Temperatur den Funkenüberschlag über den Elektroden spalt erzeugt, der das Luft-/Kraftstoffgemisch zündet.

Der Funke selbst kann Temperaturen von über 10.000 °C erreichen; wobei die Entladungsdauer gerade einmal 1 Millisekunde betragen kann. Während dieser kurzen Entladungszeitspanne ist die Funkenstruktur außerordentlich komplex und besteht aus verschiedenen Phasen und verschiedenen Spannungsniveaus, die in Abb. 6.4 gezeigt werden.

Ein Fluss von Elektrizität (sogar über einen Zündkerzenspalt) ist ein Fluss der negativ geladenen Elektronen. Elektronenfluss kann leichter von einer heißeren Oberfläche aus erzeugt werden. Der Funke wird durch Erzwingen eines Elektronenflusses von der heißeren Mittelelektrode zur kühleren Masselektrode erzeugt, was bedeutet, dass die Zündanlage einen negativen Spannungsfunken erzeugt. Die Spannungsanforderung von 10 kV bis 40 kV ist daher eine negative Spannung. Daher sind die Spannungen bei den Punkten 'b' und 'c' in Abb. 6.4 negativ.



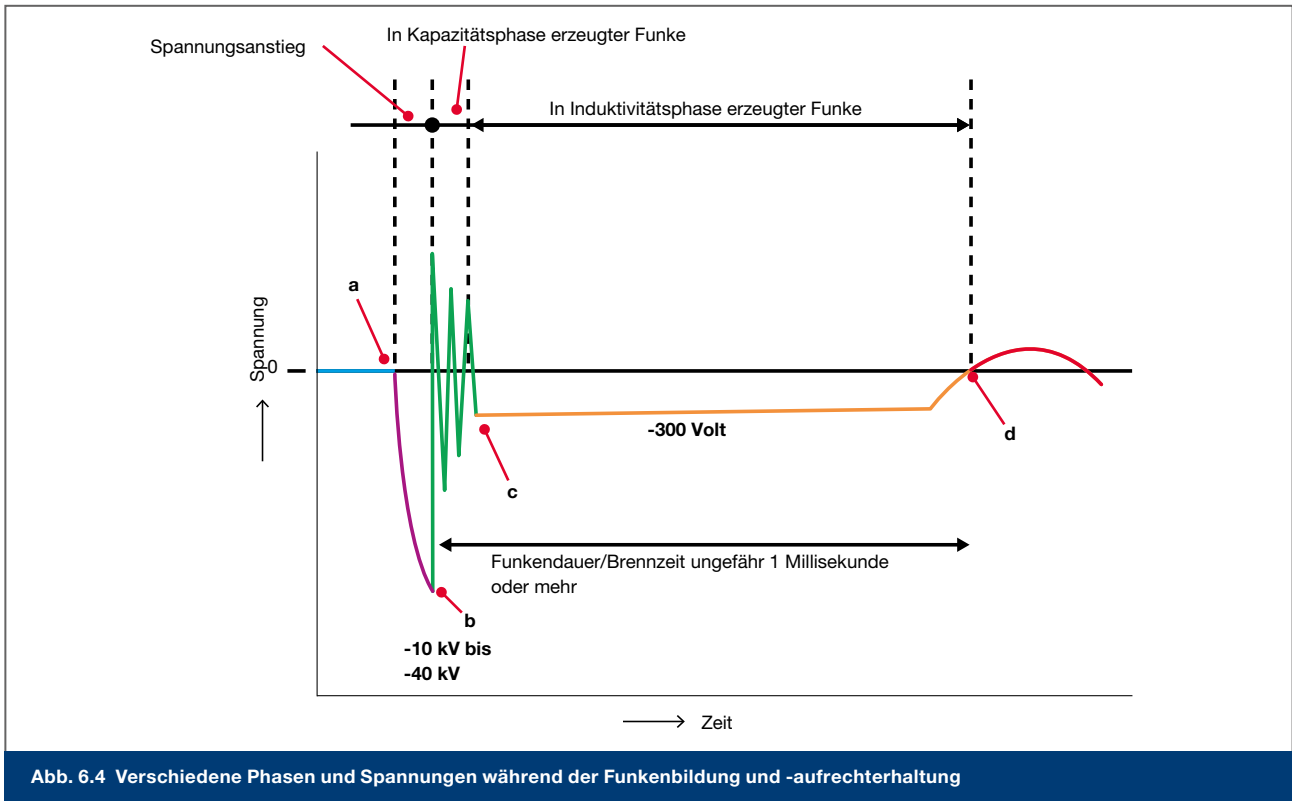


Abb. 6.4 Verschiedene Phasen und Spannungen während der Funkenbildung und -aufrechterhaltung

1. Wenn der Strom, der auf die Primärwicklung angewendet wird, ausgeschaltet wird (Punkt 'a'), dann wird eine steigende (negative) Hochspannung in die Sekundärwicklung induziert, die zur Zündkerze weiterfließt.
2. An Punkt 'b' steigt die Spannung auf 10 kV bis 40 kV oder mehr, um den Funken zwischen den Elektroden zu erzeugen, was beim Ionisieren der Luft erfolgt.
3. Zu Beginn der Entladung zwischen den Punkten 'b' und 'c' wird der Funke anfänglich durch die elektrische Energie erzeugt, die im sekundären Stromkreis gespeichert ist. Während dieses Abschnitts, der als „in Kapazitätsphase erzeugter Funke“ bekannt ist, liegt ein starker Strom vor, dessen Dauer jedoch kurz ist.
4. Sobald der Funke erzeugt wurde, tritt die längere Phase des Funkens zwischen den Punkten 'c' und 'd' bei einer Entladungsspannung von ungefähr 300 V ein. Dieser Abschnitt des Funkens (als „in Induktivitätsphase erzeugter Funke“ bezeichnet) wird durch die elektromagnetische Energie in der Spule erzeugt, in der sich der Strom schrittweise in dem Maße verringert, in dem die gespeicherte Energie abfließt. Die Funke ist ungefähr 1 Millisekunde lang bis Punkt 'd' weiterhin vorhanden. Dann ist nicht mehr ausreichend Energie vorhanden, um den Funken aufrechtzuerhalten und die Entladung endet.

6.5. Betriebsbedingungen mit Auswirkungen auf die Zündkerzenspannung

Es wird in Abschnitt 6.4 erläutert, dass die durch die Zündspule bereitgestellte Spannung ansteigt, bis sie in der Lage ist, die Luft über dem Elektrodenabstand zu ionisieren. Die zwei Hauptfaktoren, die sich auf die erforderliche Spannung auswirken, sind die Größe des Elektrodenabstands sowie Form und Größe der Elektrode. Aber auch unterschiedliche Betriebsbedingungen haben einen Einfluss auf die Spannungsanforderung. Einige dieser Bedingungen können durch das Zündkerzendesign beeinflusst werden, andere wiederum nicht. Wenn die erforderliche Spannung verringert werden kann, bedeutet dies eine geringere Belastung für die Zündspule und insbesondere ein geringeres Risiko von Fehlzündungen.

Elektrodenabstand

Die erforderliche Spannung zum Erzeugen des Funkens steigt proportional zur Größe des Zündkerzenspalts (Abb. 6.5). Ein größerer Spalt bedeutet, dass mehr Luft ionisiert werden muss, was eine höhere Spannung erfordert.

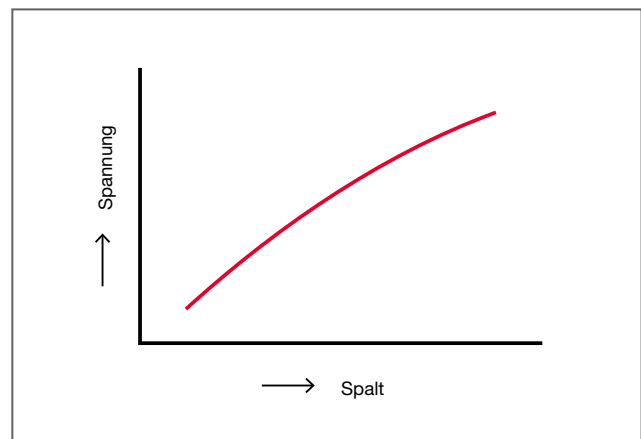


Abb. 6.5 Erforderliche Spannung zum Erzeugen eines Funkens steigt mit einem größeren Elektrodenabstand

Form und Größe der Elektroden

Die Ionisierung der Luft im Elektrodenabstand ist einfacher, wenn die Ionisierung stärker konzentriert ist. In der Elektrodenkonstruktion gibt es zwei Hauptfaktoren, die zum Konzentrieren der Ionisierung beitragen, nämlich Form und Größe der Elektrode.

Der größte Faktor ist die Elektrodenform (Abb. 6.6), wobei die Entladung von elektrischer Energie von einer scharfen Kante eine konzentriertere Ionisierung der Luft erzeugt. Beim Verschleiß der Elektroden wird die Form der Kanten runder, was die erforderliche Spannung erhöht.

Kleinere Elektroden haben einen kleineren Oberflächenbereich, was wiederum eine konzentriertere Ionisierung der Luft erzeugt und somit die erforderliche Spannung reduziert.

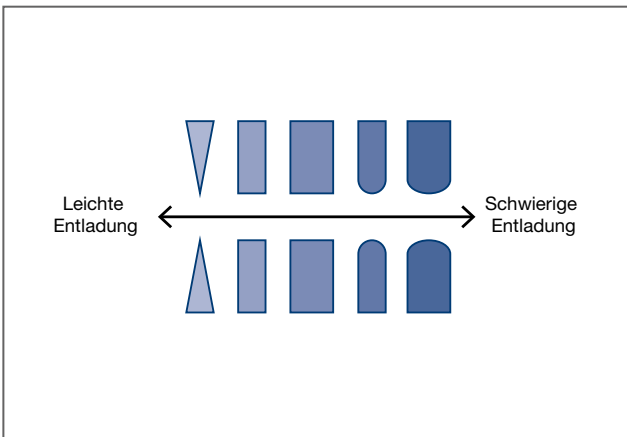


Abb. 6.6 Elektrodenformen, die eine leichtere oder schwierigere elektrische Entladung ermöglichen

Elektrodentemperatur

Die erforderliche Spannung zum Erzeugen des Funkens verringert sich bei steigender Elektrodentemperatur (Abb. 6.7). Da die Elektrodentemperatur proportional zur Motordrehzahl steigt, wird die Spannungsanforderung verringert.

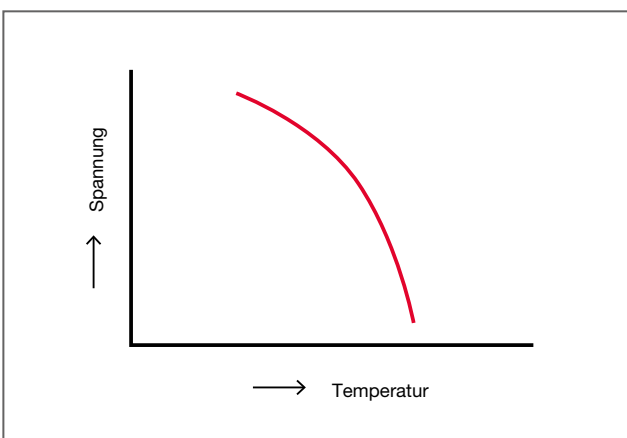


Abb. 6.7 Erforderliche Spannung zur Funkenbildung verringert sich mit einer erhöhten Elektrodentemperatur

Verdichtungsdruck

Die erforderliche Spannung zum Erzeugen des Funkens steigt proportional zum Verdichtungsdruck (Abb. 6.8). Bei höheren Drücken sind mehr Luft-/Kraftstoffmoleküle innerhalb des Zündkerzenspalts vorhanden, die ionisiert werden müssen, was zu einer höheren Spannungsanforderung zum Erreichen der Ionisierung führt.

Bei höheren Motorlasten tritt mehr Luft-/Kraftstoffgemisch in den Brennraum ein, was zu einem höheren Druck und einer höheren Spannungsanforderung führt.

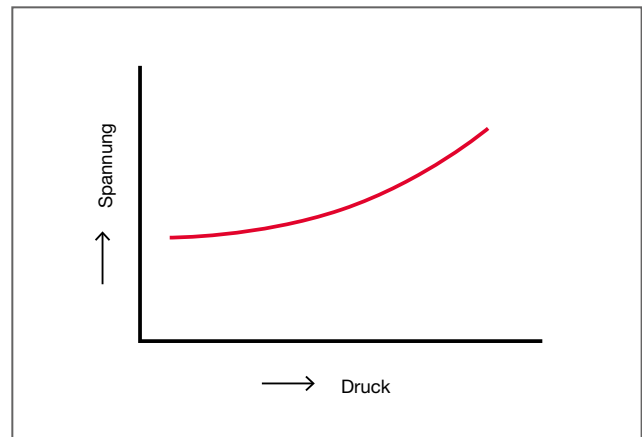


Abb. 6.8 Erforderliche Spannung zur Funkenbildung ist mit steigendem Verdichtungsdruck höher

Hohe Verdichtungsverhältnisse und Turbolader, wie sie in modernen Motoren immer üblicher werden, erhöhen auch den Verdichtungsdruck, der wiederum eine höhere Spannung für die Ionisierung erfordert.

Luft-/Kraftstoffverhältnis

Kraftstoff ist insbesondere in seiner flüssigen Form einfacher zu ionisieren als Luft. Fettere Luft-/Kraftstoffverhältnisse sind daher einfacher zu ionisieren und erfordern eine geringere Spannung als magerere Luft-/Kraftstoffverhältnisse.

Einige Motoren sind für den Betrieb mit mageren Gemischen bei niedriger Motorlast ausgelegt; daher muss die Zündanlage in der Lage sein, die höhere erforderliche Spannung bereitzustellen.

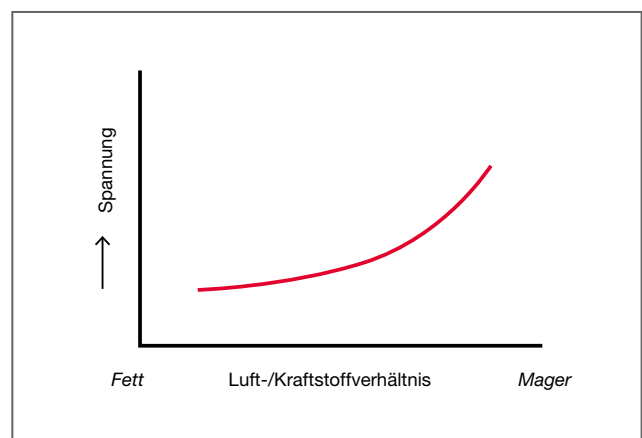


Abb. 6.9 Erforderliche Spannung zur Funkenbildung ist mit mageren Luft-/Kraftstoffverhältnissen höher

Temperatur des Luft-/Kraftstoffgemischs

Die erforderliche Spannung zur Funkenbildung verringert sich, wenn die Temperatur des Luft-/Kraftstoffgemischs steigt (Abb. 6.10). Bei höheren Temperaturen pulsieren die Luftmoleküle stärker, was die Ionisierung vereinfacht und die Spannungsanforderung reduziert.

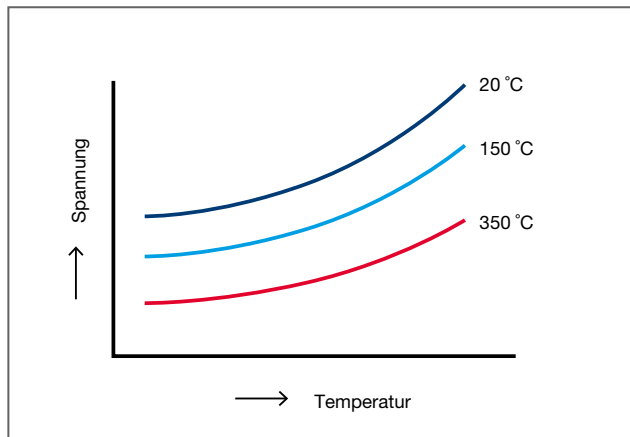


Abb. 6.10 Erforderliche Spannung zur Funkenbildung sinkt bei steigender Temperatur des Luft-/Kraftstoffgemischs

Feuchtigkeit

Bei steigender Feuchtigkeit sinkt die Elektrodentemperatur, sodass sich die erforderliche Ionisierungsspannung wiederum erhöht (Abb. 6.11).

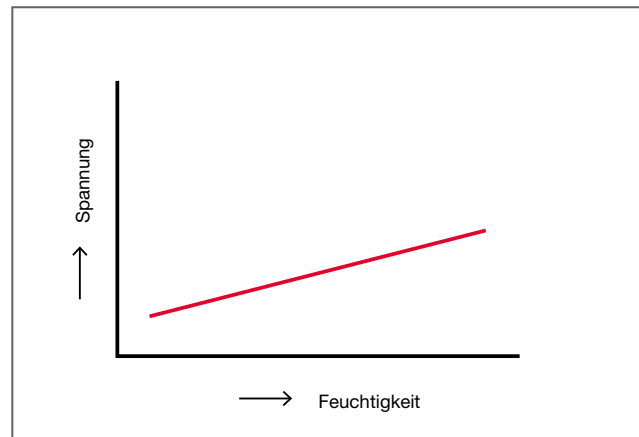


Abb. 6.11 Erforderliche Spannung zur Funkenbildung ist bei erhöhter Feuchtigkeit höher

DENSO HIGHLIGHT

Die DENSO Lösung

Um die Probleme zu überwinden, die mit den immer höheren erforderlichen Spannungen zur Funkenbildung verbunden sind, bietet DENSO eine Produktpalette an Zündkerzen mit feineren Elektroden, die unter Verwendung von Edelmetallen wie Iridium hergestellt werden.

Einige DENSO Iridium-Zündkerzen werden mit hochfeinen Mittelelektroden hergestellt, wie die patentierte Iridium-Zündkerze mit nur 0,4 mm Elektrodendurchmesser, während SIP-Zündkerzen auch über eine feinere Masseelektrode verfügen.

Die feineren Elektroden reduzieren den Spannungsbedarf und das Iridium stellt eine verschleißfeste Oberfläche mit hoher Temperaturfestigkeit für die Elektroden bereit.

Das DENSO Zündkerzenprogramm ermöglicht ein Upgrade von Standardzündkerzen, die an vielen Fahrzeugen montiert sind. Dadurch sinkt die erforderliche Zündspannung, der Betrieb der Zündanlage wird erleichtert und sogar die Motorleistung wird verbessert.

DENSO SIP-Zündkerze



6.6. Wärmewert

Die Zündkerze ist beträchtlichen Wärmemengen aus dem Verbrennungsprozess sowie der Wärme ausgesetzt, die durch den Funken über die Elektroden entsteht. Es ist daher wichtig, dass ausreichend Wärme abgeleitet werden kann, sodass die Zündkerze auf eine akzeptable Betriebstemperatur abgekühlt wird. Unzureichende Kühlung bedeutet, dass die Zündkerze zu heiß wird und Frühzündung verursacht. Zu viel Kühlung verhindert, dass die Zündkerze die erforderliche Temperatur zum Abbrennen von Verbrennungsrückständen erreicht, was zur Bildung von Ablagerungen an der Zündkerze führen kann. Das Ausmaß, in dem eine Zündkerze die Wärme ableitet oder sich selbst kühlt, wird als deren 'Wärmewert' bezeichnet.

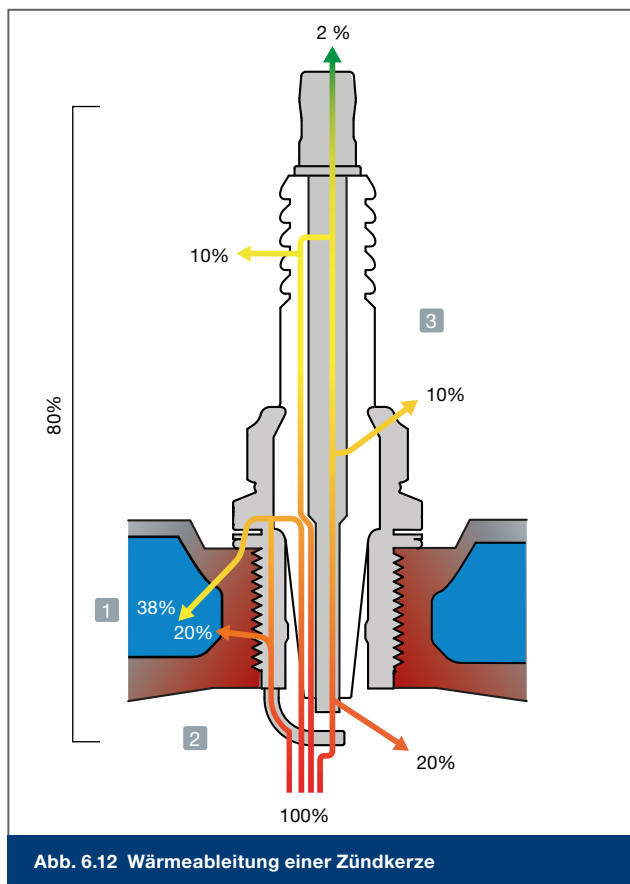


Abb. 6.12 Wärmeableitung einer Zündkerze

Wärmeableitung oder Kühlung

Die Abbildung in Abb. 6.12 zeigt, wie die durch die Zündkerze absorbierte Wärme hauptsächlich zum Motorkühlmittel (1) abgeleitet wird. Die restliche Wärme wird in die Ansaugung der Frischluft für die Luft-/Kraftstoffmischung (2) sowie durch das Zündkerzengehäuse und durch den Isolator zur Umgebungsluft (3) abgeleitet.

Auswählen des richtigen Wärmewerts

Es gibt Grenzen hinsichtlich der Temperaturen, bei denen Zündkerzen zuverlässig und effizient betrieben werden können. Eine Zündkerze arbeitet nur ordnungsgemäß, wenn ihre Mittelelektroden-Temperatur zwischen ungefähr 500 °C und 950 °C liegt.

Selbstreinigungstemperatur

Während einiger Betriebsbedingungen wie Kaltstarts kann die unvollständige Verbrennung kleine Kohlenstoffpartikel erzeugen, die sich auf dem Isolatorfuß ablagern können. Wenn die richtige Zündkerze installiert ist, sollte die Mittelelektrode dann eine Temperatur von über rund 500 °C erreichen, was die Ablagerungen abbrennt. Zudem werden sich keine neuen Ablagerungen mehr auf dem Isolator bilden. Diese untere Temperaturgrenze wird daher als 'Selbstreinigungstemperatur' bezeichnet.

Wenn die Elektrodentemperatur unterhalb der Selbstreinigungstemperatur bleibt, kann die Ansammlung von Ablagerungen einen elektrischen Pfad zwischen dem Isolator und dem Zündkerzengehäuse bereitstellen. Dieser Pfad schränkt die Bildung von Funken über die Elektroden ein oder verhindert sie.

Frühzündungstemperatur

Wenn die Mittelelektrode 950 °C oder mehr erreicht, wird die Elektrode so heiß, dass sie eine Frühzündung verursachen kann (siehe Abschnitt 5.2).

Zündkerzen mit niedrigem und hohem Wärmewert

Die Begriffe niedriger oder hoher Wärmewert bezeichnen die Betriebsbedingungen und nicht die tatsächliche Wärmewert. Eine Zündkerze mit niedrigem Wärmewert weist eine kleine Wärmeableitung auf und kann daher als 'heiße Zündkerze' bezeichnet werden, die besser für Betriebsbedingungen mit niedriger Temperatur geeignet ist. Eine Zündkerze mit hohem Wärmewert weist eine erhöhte Wärmeableitung auf und wird daher als 'kalte Zündkerze' bezeichnet, die besser für Betriebsbedingungen mit höheren Temperaturen geeignet ist.

Die Beispiele in Abb. 6.13 zeigen die verschiedenen Längen des Isolatorfußes, die zum Herstellen von drei verschiedenen Wärmewerten von Zündkerzen verwendet werden.

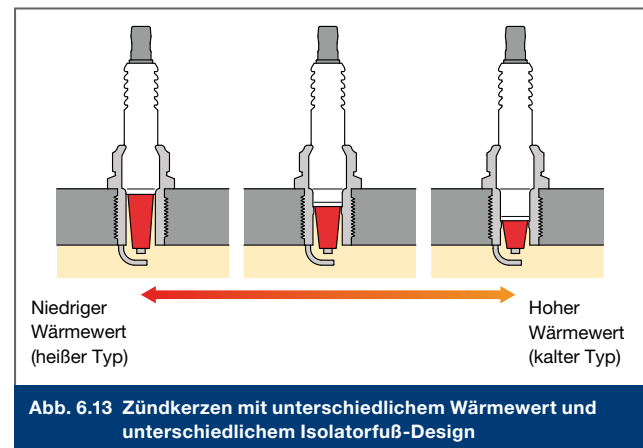


Abb. 6.13 Zündkerzen mit unterschiedlichem Wärmewert und unterschiedlichem Isolatorfuß-Design

Zündkerze mit niedrigem Wärmewert (heiße Zündkerze)

Zündkerzen mit niedrigem Wärmewert haben einen langen Isolatorfuß. Der lange Fuß stellt der Wärme einen langen Pfad für die Übertragung oder Ableitung auf das Zündkerzengehäuse bereit, sodass die Ableitung der Wärme verringert und der Temperaturanstieg an der Mittelelektrode erleichtert wird. Bei Motoren, bei denen die durch die Verbrennung erzeugte Wärme im Allgemeinen geringer ist, wird sich eine Zündkerze mit niedrigem Wärmewert dennoch aufwärmen und schnell die Selbstreinigungstemperatur erreichen, sodass die Ansammlung von Kohlenstoff auf dem Isolator vermieden wird.

Zündkerze mit hohem Wärmewert (kalte Zündkerze)

Verglichen mit Zündkerzen mit niedrigem Wärmewert weisen Zündkerzen mit hohem Wärmewert einen kurzen Isolatorfuß auf. Der kürzere Fuß stellt einen kürzeren Wärmepfad bereit, der die Wärme schneller ableitet. Die Temperatur der Mittelelektrode steigt nicht so leicht an. Aber da Zündkerzen mit hohem Wärmewert an Motoren montiert sind, an denen die durch die Verbrennung erzeugte Wärme im Allgemeinen höher ist, bewirkt die Verbrennungswärme dennoch, dass der Isolator die Selbstreinigungstemperatur erreicht.

Zündkerzen mit hohem Wärmewert sind für die Verwendung in Hochleistungsmotoren konzipiert, die mit hohen Drehzahlen betrieben werden. Wenn ein Motor modifiziert wird, um eine höhere Leistungsabgabe und verbesserte Leistung zu erbringen, ist möglicherweise eine Zündkerze mit höherem Wärmewert (kältere Zündkerze) erforderlich, um mit den konsistenteren höheren Verbrennungstemperaturen umgehen zu können (siehe Abschnitt 9.6).

Weitere Faktoren, die den Wärmewert beeinflussen

Der Wärmewert der Zündkerze wird direkt durch die Brennraumtemperaturen beeinflusst. Daher hat der Fahrstil ebenso wie das Gewicht des Fahrzeugs und dessen Größe einen Einfluss auf die Motorlast und somit auf die Verbrennungstemperaturen. Die Diagramme in Abb. 6.14 zeigen die Zusammenhänge zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und den kritischen Temperaturen (Selbstreinigungs- und Frühzündungstemperatur) bei Zündkerzen mit niedrigem und hohem Wärmewert.

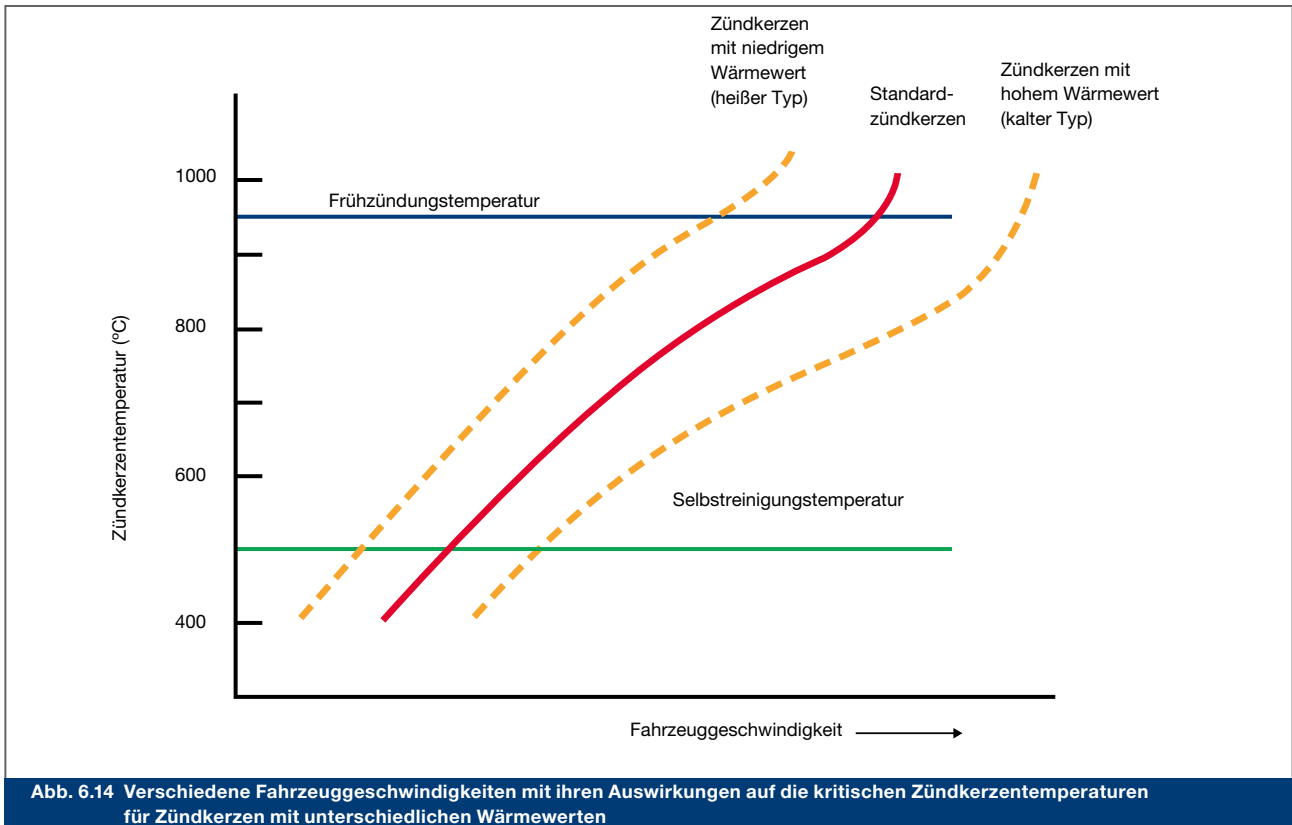


Abb. 6.14 Verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten mit ihren Auswirkungen auf die kritischen Zündkerzentemperaturen für Zündkerzen mit unterschiedlichen Wärmewerten

6.7. Flammenlöschung mit Auswirkungen auf Flammenerzeugung und Flammenwachstum

Flammenerzeugung und -wachstum

Wenn der Zündfunke an den Elektroden erzeugt wird, bewirkt die hohe Temperatur des Funkens, dass ein kleiner Flammenkern die Verbrennung des Luft-/Kraftstoffgemischs einleitet (siehe Abschnitt 5.1). Die Wärme des Flammenkerns (ungefähr 3.000 °C) zündet die nächste Schicht des Luft-/Kraftstoffgemischs.

Die Flamme wächst anfänglich innerhalb des Spalts zwischen den Elektroden der Zündkerze und dehnt sich dann über den Zündkerzenspalt hinaus aus, um eine sich selbst erhaltende Flamme im gesamten Brennraum zu erzeugen.

Die Flammenfront sollte idealerweise mit einer konsistenten und gleichmäßigen Rate wachsen, sodass das gesamte Luft-/Kraftstoffgemisch mit wachsender Geschwindigkeit schnell verbrennt. Das gleichmäßige Wachstum der Flamme hängt von der Brennraumform, der Verwirbelung und dem Luft-/Kraftstoffgemisch innerhalb des Brennraums ab.

Es ist jedoch unmöglich, ein perfekt gleichmäßiges Flammenwachstum zu erzeugen, da es nicht möglich ist, die perfekte Form für einen Brennraum zu schaffen, der dabei die Ventile, die Zündkerze und optional den Injektor einschließt. Das Flammenwachstum kann teilweise unterbrochen oder eingeschränkt werden und die Flamme kann sogar aufgrund der Wärmeableitung von der Flamme auf eine kalte Oberfläche erlöschen.

Die Verwirbelung trägt dazu bei, das gesamte Gemisch der Flammenfront auszusetzen, was die Verbrennung des verfügbaren Luft-/Kraftstoff-Gemischs im gesamten Brennraum unterstützt.

Flammenlöschung und Elektrodentemperatur

Wenn der Flammenkern entsteht, befindet sich die Flamme, bevor sie sich selbst erhält, sehr nah an den Elektroden, die eine geringere Temperatur als die Flamme haben; diese geringere Temperatur zieht Wärme vom Flammenkern ab. Der Kühleffekt kann tatsächlich das Erlöschen der Flamme verursachen, was als 'Auslösch'-Effekt bekannt ist.

Da kalte Elektroden mehr Wärmeenergie von der Flamme absorbieren, als heiße Elektroden, muss das Design von Kerze und Elektroden dafür sorgen, dass die Elektroden ausreichend Wärme beibehalten, um den Auslöschereffekt zu verringern.

Der Auslöschereffekt kann durch das Zündkerzengestaltung reduziert werden; die Elektrodenform und der Zündkerzenspalt haben eine beträchtliche Auswirkung auf das Auslöschereffekt der Flamme.

Die Flammenlöschung kann auch auftreten, wenn sich die wachsende Flammenfront in der Nähe der Brennraumwände befindet. Wenn der Motor kalt ist (wie bei einem Kaltstart), bewirken die kalten Oberflächen im Zylinder das (teilweise) Auslöschereffekt der Flamme (siehe Abschnitt 5.3).

Elektrodenform. Die gezeigten Beispiele in Abb. 6.15 veranschaulichen, wie eine größere Elektrode mehr Wärmeenergie vom Flammenkern abzieht, da sie eine größere Masse und einen größeren Oberflächenbereich aufweist. Wenn eine kleinere Mittelelektrode verwendet wird, die eine kleinere Masse und einen kleineren Oberflächenbereich besitzt, zieht diese weniger Wärme vom Flammenkern ab und verringert somit das Potential für das Auslöschereffekt der Flamme. Eine kleinere Masseelektrode hat wiederum denselben Effekt, sodass auch hier das Potential für das Auslöschereffekt der Flamme geringer ist.

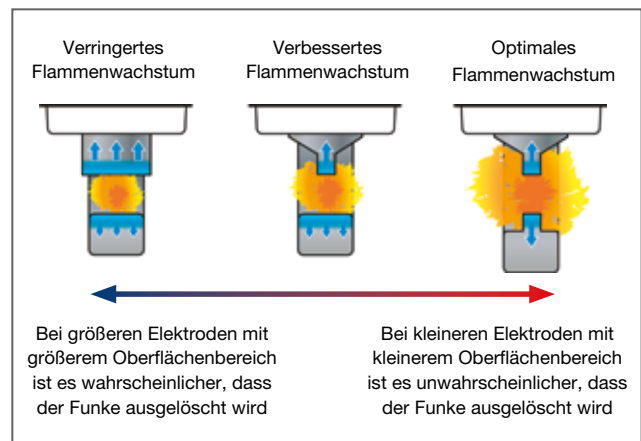


Abb. 6.15 Auslöschereffekt, der durch Elektroden mit unterschiedlicher Größe erzeugt wird

Elektrodenabstand. Bei einem kleinen Elektrodenabstand (Abb. 6.16) befinden sich die Elektroden in der Nähe des Flammenkerns, sodass die Wärme leicht von der Flamme zu den Elektroden abfließen kann; daher ist der Auslöschereffekt größer. Ein größerer Elektrodenabstand weißt mehr Platz auf, sodass Beeinträchtigungen bei der Flammenerzeugung reduziert werden.

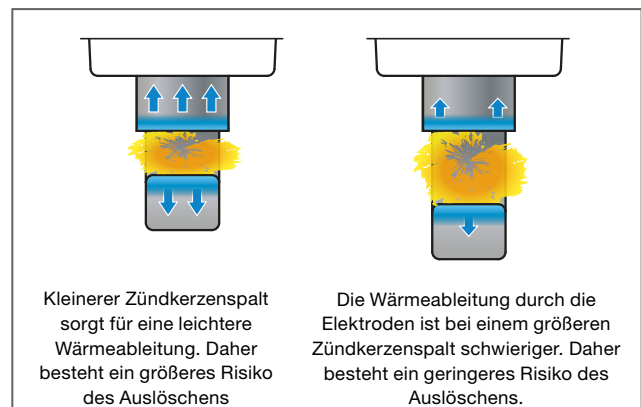


Abb. 6.16 Auslöschereffekt, der durch kleine und große Elektrodenabstände erzeugt wird

DENSO HIGHLIGHT

DENSO bietet ein Zündkerzen-Sortiment mit verschiedenen Elektrodenformen und -größen, um bei den unterschiedlichsten Motoranwendungen den Auslöschereffekt zu reduzieren. Diese verschiedenen Zündkerzentypen werden in Kapitel 7 gezeigt.

7. DENSO TECHNOLOGIEN: VERBESSERUNG DER ZÜNDKERZENLEISTUNG

7.1. DENSO Entwicklung

DENSO hat eine lange Tradition in der Entwicklung und Herstellung von Zündkerzen, wobei einige Technologien weiterhin nur von DENSO erhältlich sind, während andere vom Zündkerzenmarkt fast universell übernommen wurden.

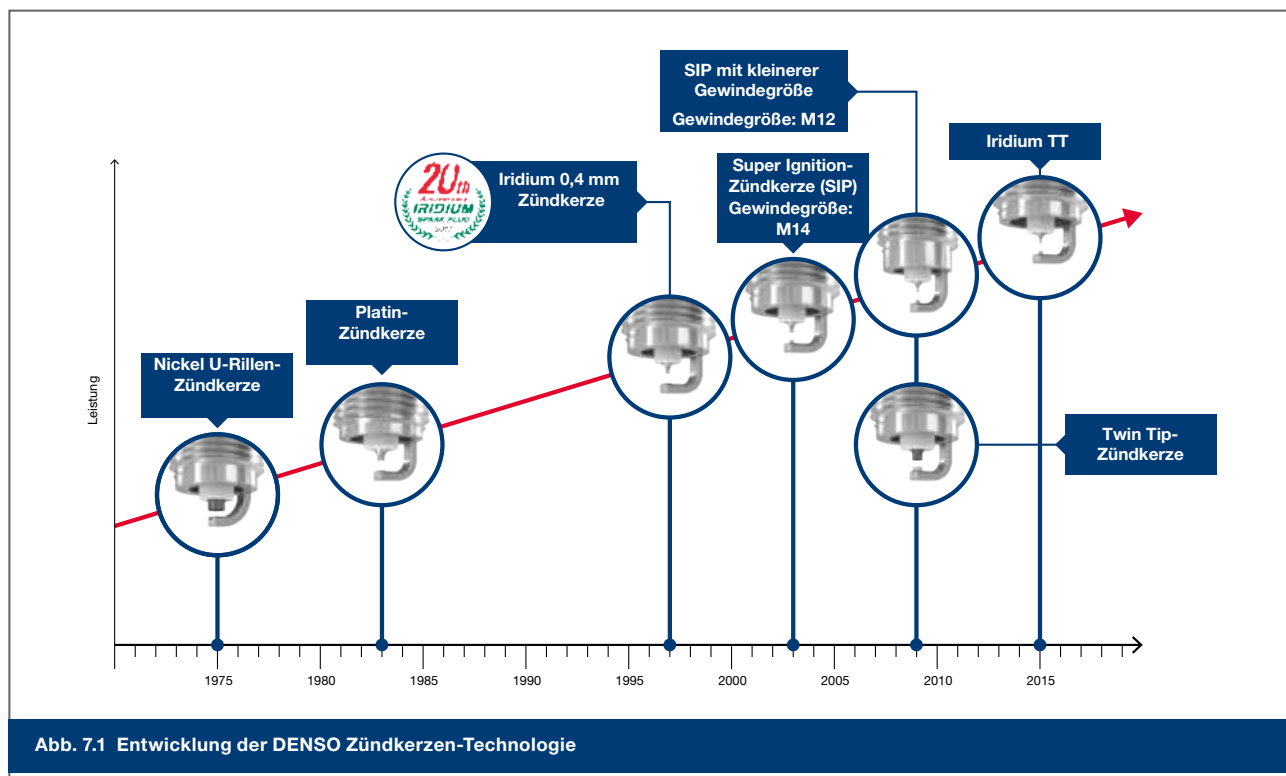
Im Jahr 1960 begann DENSO mit der Herstellung von Zündkerzen mit Kupferkern für Autos und Zweiräder. Die U-Rillen-Masselektrode, die für eine verbesserte Leistung sorgt, wurde 1972 patentiert und 1975 auf den Markt gebracht. Um die Lebensdauer der Zündkerzen zu verlängern, wurden Doppel-Platin-Zündkerzen im Jahr 1983 eingeführt. 1997 brachte DENSO die Iridium Power auf den Markt, die bis heute über die weltweit kleinste Iridium-Elektrode verfügt.

Die Entwicklung der Super Ignition Plug (SIP) kann als einer der wichtigsten Durchbrüche für die Verbesserung der Zündwilligkeit betrachtet werden.

Die SIP-Technologie führte zur Entwicklung von Nickel TT (2009) und Iridium TT (2015) Zündkerzen, die insbesondere für den freien Teilehandel konzipiert wurden.

Der wachsende Trend zu Downsizing-Motoren hat zur Entwicklung von Zündkerzen mit einem längeren, aber schmaleren Gewinde von der Zündkerze mit 12 mm geführt. Die Zündkerzen mit schmalere Gewinde erlauben mehr Platz für die Motorkühlmittelwege und ermöglichen die Verwendung von größeren Einlass- und Auslassventilen.

Diese kleineren Zündkerzen, wie sie von DENSO hergestellt werden, müssen weiterhin in der Lage sein, eine ähnliche oder bessere Leistung im Vergleich zu Zündkerzen herkömmlicher Größen bringen, und das mit einer viel kleineren und kompakteren Bauform.



DENSO HIGHLIGHT

Null Fehler

DENSO setzt seit 1959 Standards in der Zündkerzentechnologie. Alle Zündkerzen-Sortimente werden firmenintern entwickelt und in unseren eigenen Fabriken, die IATF 16949 zertifiziert sind, weltweit hergestellt – mit „Null-Fehler“-Standard. Sowohl OEMs als auch dem freien Teilehandel stellen wir dieselbe herausragende Qualität zur Verfügung, um jederzeit die optimale Motorleistung zu garantieren.

7.1. DENSO Entwicklung	42
7.2. Elektrodenmaterialien	43
7.3. Materialien für die Mittelelektrode	44
7.4. Masseelektrode	45
7.5. Weitere Technologien, die bei DENSO Zündkerzen verwendet werden	47
7.6. Künftige Trends	48

7.2. Elektrodenmaterialien

Die Positionierung der Zündkerzenelektroden in der Brennkammer setzt diese extremen Belastungen durch Wärme und Druck sowie wiederholten und schnellen Änderungen Temperatur- und Druckänderungen aus. Dennoch müssen die Elektroden auch unter solchen harten Betriebsbedingungen einen zuverlässigen und starken Zündfunken für Millionen von Verbrennungszyklen und viele Tausende gefahrene Kilometer liefern (bis zu 180.000 km für einige Zündkerzentypen).

Die Tabelle in Abb. 7.2 hebt die verschiedenen Eigenschaften einiger Materialien hervor, wobei Nickel (oft Nickellegierungen), Platin und Iridium häufig bei der Herstellung von Elektroden für DENSO Zündkerzen verwendet werden.

Obwohl die Tabelle zeigt, dass Platin unter den drei wichtigsten Elektrodenmaterialien am oxidationsbeständigsten ist, ermöglicht Iridium die beste Gesamtleistung aufgrund seines sehr hohen Schmelzpunkts sowie seiner hohen Festigkeit und Härte.

	Iridium (Ir)	Platin (Pt)	Nickel (Ni)	Gold (Au)	Silber (Ag)
Schmelzpunkt (°C)	2454	1769	1453	1063	960
Festigkeit (kgf/mm ²)	112	14	68	13	13
Elektrischer Widerstand (μΩ · cm)	5,3	10,6	6,8	2,3	1,6
Härte (HV; 20 °C)	240	40	160	25	26
Oxidationsbeständigkeit	+	++	+	++	++

Abb. 7.2 Entwicklung der DENSO Zündkerzen-Technologie

Schmelzpunkt

Aufgrund der hohen Temperaturen und der Wärme, die während der Verbrennung und der elektrischen Entladung auftreten, müssen die verwendeten Materialien für die Elektroden einen hohen Schmelzpunkt aufweisen, um das Schmelzen des Elektrodenmaterials zu verhindern.

Festigkeit

Stärkere Materialien ermöglichen einen stabilen Zündfunken und verbessern die Haltbarkeit, insbesondere beim Fahren unter hoher Motorlast, das eine stärkere physikalische Belastung der Elektroden verursacht.

Oxidationsbeständigkeit

Die Oxidationsbeständigkeit, insbesondere bei hohen Temperaturen, ist entscheidend für einen geringeren Elektrodenverschleiß.

Iridium weist zwar keine herausragende Oxidationsbeständigkeit auf, aber durch das Beimischen einer kleinen Menge Rhodium entsteht eine Legierung, die eine ähnliche Oxidationsbeständigkeit wie Platin aufweist.

Elektrischer Widerstand

Metalle weisen im Allgemeinen einen sehr niedrigen elektrischen Widerstand auf, der sich nicht negativ auf den Strom oder die Spannung, die für die Funkenerzeugung benötigt wird, auswirkt. Die Elektrodenmaterialien müssen ihren sehr niedrigen elektrischen Widerstand während der gesamten Lebensdauer der Zündkerze beibehalten, auch dann, wenn die Elektroden den rauen Betriebsbedingungen ausgesetzt sind.

7.3. Materialien für die Mittelelektrode

Die kontinuierliche Entwicklung von Verbrennungsmotoren mit den Hauptzielen Leistungssteigerung, Senkung des Kraftstoffverbrauchs und Reduzierung von Emissionen, führt zu erhöhten Verbrennungstemperaturen und Zylinderdrücken sowie einer insgesamt effizienteren Verbrennung. Um diese Entwicklung bei den Motoren zu unterstützen, haben sich auch die DENSO Zündkerzen weiterentwickelt, um Zündfunken mit höherer Energie zu erzeugen.

Das verbesserte Design der Mittelelektrode schließt kleinere Durchmesser (Abb. 7.3) ein, die durch die Verwendung von

haltbareren Metallen ermöglicht werden. Dadurch sind geringere Spannungen erforderlich, um Zündfunken mit ähnlichem oder höherem Energielevel zu erzeugen.

Bei kleineren Mittelelektroden (und Masseelektroden) wird die Flamme während Zündung und Verbrennung weniger blockiert. Zudem reduzieren kleineren Elektroden auch den Wärmeabfluss weg von der Flamme und verringern dadurch auch den Auslöschereffekt.

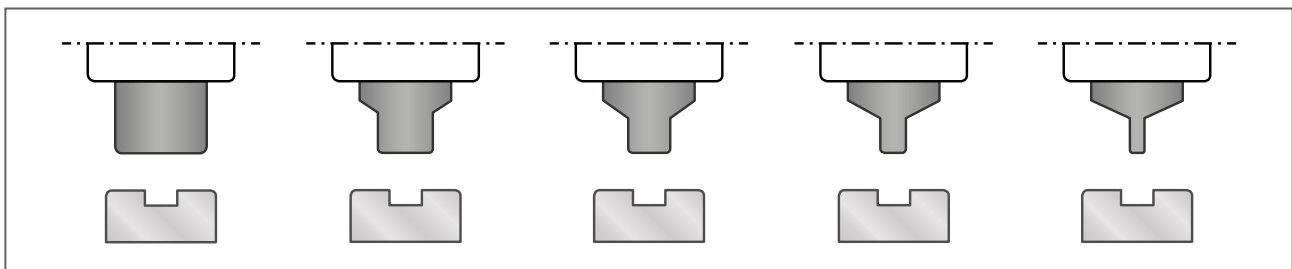


Abb. 7.3 Beispiele unterschiedlicher Typen und Größen von Mittelelektroden

Nickel-Mittelelektrode

Seit vielen Jahren werden DENSO Zündkerzen mit Nickel-Mittelelektroden hergestellt, die üblicherweise eine Breite von 2,5 mm haben (Abb. 7.4). Die Nickelelektroden des Standardtyps sind sehr zuverlässig und erschwinglich und werden auch heute noch verwendet.

Platin-Mittelelektrode

Platin wird in Mittelelektroden aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber hohen Temperaturen verwendet. Auf die Elektrode wird eine Platinspitze geschweißt. Dank ihrer hohen Temperaturbeständigkeit kann der Durchmesser der Elektrodenspitze auf 1,1 mm reduziert werden (Abb. 7.5), wobei eine längere Lebensdauer als bei Nickel-Zündkerzen erreicht wird. Platin-Mittelelektroden waren aufgrund ihrer herausragenden Leistung in den 1980er und 1990er Jahre sehr beliebt, wurden seitdem aber schrittweise durch die überlegenen Iridium-Mittelelektroden ersetzt.



Abb. 7.4 Nickel-Mittelelektrode – 2,5 mm Durchmesser



Abb. 7.5 Platin-Mittelelektrode – 1,1 mm Durchmesser

DENSO HIGHLIGHT

DENSO Iridium-Zündkerzen bieten mit etwa 90 % Iridium und 10 % Rhodium die höchste Iridium-Konzentration auf dem Markt. Andere Zündkerzenhersteller vermarkten ihre Zündkerzen häufig als 'Iridium', auch wenn diese tatsächlich nur aus einer Legierung aus größtenteils Platin und einem nur geringen Prozentsatz Iridium bestehen. Diese Mischung erlaubt nicht die Herstellung derselben kleinen Elektroden und sie kann zu einer kürzeren Lebensdauer führen.

Iridium-Mittelelektrode

DENSO Iridium-Mittelelektroden bestehen aus einer Iridium-Legierung mit dem höchsten Iridium-Anteil auf dem Markt. Aufgrund der patentierten Herstellungstechnologien von DENSO ist das Unternehmen in der Lage, Mittelelektroden mit Durchmessern von gerade einmal 0,7 mm oder 0,55 mm herzustellen. Zudem bietet DENSO die einzigartige patentierte Elektrode mit nur 0,4 mm Durchmesser (Abb. 7.6).

Iridium ist das härteste und temperaturbeständigste Material, das jemals in einer Zündkerze verwendet wurde. Reines Iridium weist jedoch für Zündkerzenelektroden keinen ausreichenden Oxidationswiderstand bei hohen Temperaturen auf. Daher hat DENSO eine Iridium-Legierung mit Rhodium entwickelt, um den Oxidationswiderstand zu verbessern. Diese neue Legierung ist ein durch DENSO patentiertes Material.

Iridium ist ein extrem hartes Material. In der Vergangenheit war Sintern der einzige verfügbare Herstellungsprozess für Iridium. Diese Art der Herstellung ist teuer und mit Einschränkungen hinsichtlich Form und Abmessungen verbunden, sodass dieser Prozess nicht in der Zündkerzenproduktion verwendet werden konnte. DENSO hat jedoch eine neue Edelmetall-Technologie entwickelt, mit der Iridium in seiner geschmolzenen Form gezogen oder geformt werden kann, was die Herstellung von Iridium-Mittelelektroden ermöglicht. Die Iridium-Elektrode wird mit einem patentierten 360° Laserschweiß-Prozess befestigt.

Mit diesen neuen Technologien war DENSO das erste Unternehmen, das Zündkerzen mit Iridium-Elektroden herstellte.

Aufgrund seines hohen Schmelzpunkts und seiner überlegenen Korrosionsbeständigkeit wird Iridium häufig in Bereichen eingesetzt, in denen Technologie auf dem aktuellsten Stand der Technik zum Einsatz kommt. Dies betrifft beispielsweise die Luftfahrtbranche und den medizinischen Bereich, aber auch die Schmuckherstellung.



Abb. 7.6 Iridium-Mittelelektrode – 0,4 mm Durchmesser

7.4. Masselektrode

Die Masselektrode ragt in den Brennraum hinein und muss daher hohen Temperaturen und extremen Temperaturschwankungen standhalten. Die Masselektrode hat auch einen wichtigen Einfluss auf die Zündkerzenleistung und Verbrennung und daher auf die gesamte Motorleistung. Wie bei der Mittelelektrode ist auch bei der Masselektrode das Material von entscheidender Bedeutung, um eine lange Lebensdauer für die Zündkerze zu gewährleisten. Dazu hat DENSO auch eine Reihe von Technologien speziell für die Masselektrode entwickelt.

U-Rille

Die DENSO U-Rillen-Elektrode (Abb. 7.7) weist zusätzliche Kanten an der Masselektrode auf und verringert dadurch den Spannungsbedarf. Zudem schafft sie Raum für ein größeres Volumen an Luft-/Kraftstoffmischung in der Nähe des Funkens. Dies erleichtert auch die Zündung von mageren Gemischen. Die höhere Zündenergie reduziert die Kohlenstoffablagerungen und trägt zu einer sanfteren Beschleunigungsleistung bei.

Kegelform

Mit einer kegelförmigen Masselektrode (Abb. 7.8) wird die Größe der Elektrodenspitze verringert, was den Auslöschereffekt reduziert und die Zündwilligkeit verbessert.



Abb. 7.7 U-Rillen-Masselektrode



Abb. 7.8 Kegelförmige Masselektrode

Oberflächenentladung für Drehkolbenmotoren

Die Zündkerzen mit Oberflächenentladung (Abb. 7.9) werden hauptsächlich in Drehkolbenmotoren verwendet, bei denen herkömmliche Masseelektroden nicht in die Konstruktion des Brennraums passen. Der Funke tritt zwischen der Mittelelektrode und der Innenkante der Masseelektrode auf.

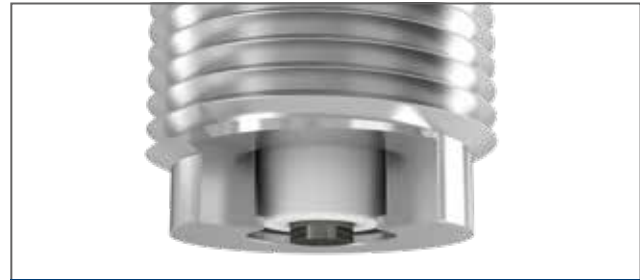


Abb. 7.9 Oberflächenentladungs-Masseelektrode

Seitenelektroden

Diese Zündkerzenbauweise (Abb. 7.10) stellt die optimale Leistung für Motoren mit Direkteinspritzung bereit, bei denen das Luft-/Kraftstoffgemisch in der Nähe der Zündkerze recht fett sein kann, was zu Ablagerungen an der Zündkerze führen kann. Im Normalbetrieb wird der Funke zwischen der Hauptelektrode und der Masseelektrode erzeugt; aber wenn sich Ablagerungen bilden, wechselt der Funke zu den Seitenelektroden und brennt dabei den Kohlenstoff ab (siehe Abb. 10.3).



Abb. 7.10 Seitenelektroden

Halbleitfunken-Zündkerze

Die Verwendung einer Halbleitfunken-Zündkerze verbessert die Zündwilligkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen Ablagerungen (Abb. 7.11). Die Kante an der Innenseite des Gehäuses erfüllt eine ähnliche Funktion wie Seitenelektroden. Wenn die Ansammlung von Kohlenstoff den Funkenüberschlag zur normalen Masseelektrode verhindert, stellt diese Kante einen alternativen Massepfad bereit. Dieser alternative Massepfad ermöglicht dem Funken das Abbrennen von Kohlenstoffablagerungen direkt wenn sie entstehen, sodass der Funke wieder über die normale Masseelektrode gleiten kann.

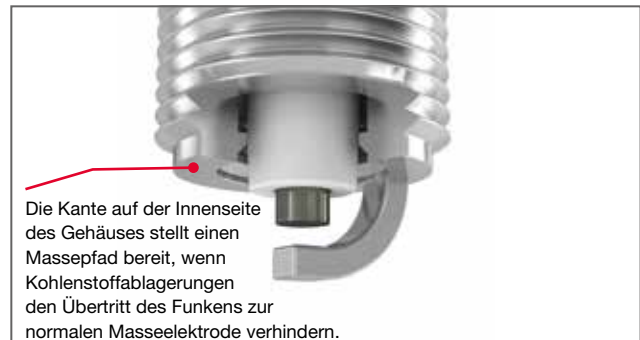


Abb. 7.11 Halbleitfunken-Zündstrecke

Mehrere Masseelektroden

Bei Nickel-Zündkerzen kann die Standzeit durch das Hinzufügen von zusätzlichen Masseelektroden erhöht werden. Dieser DENSO Zündkerzentyp ist mit zwei oder drei Masseelektroden lieferbar. Sie bieten eine kostengünstige Lösung, um die Lebensdauer einer Zündkerze zu verlängern (Abb. 7.12). Allerdings sind mehrere Masseelektroden unvorteilhaft für die Verbrennungsleistung. Daher stellt die Anbringung einer Platin-Einlage auf der Masseelektrode die bevorzugte Lösung für eine längere Lebensdauer dar.



Abb. 7.12 Mehrere Masseelektroden

Masseelektrode mit Platin-Einlage

Platin ist sehr korrosionsbeständig und kann plötzlichen Temperaturänderungen standhalten. Es erhöht die Lebensdauer der Zündkerze, ohne sich negativ auf die Leistung auszuwirken. Masseelektroden mit Platin-Einlage werden immer mit einer Platin- oder Iridium-Mittelelektrode kombiniert (Abb. 7.13).

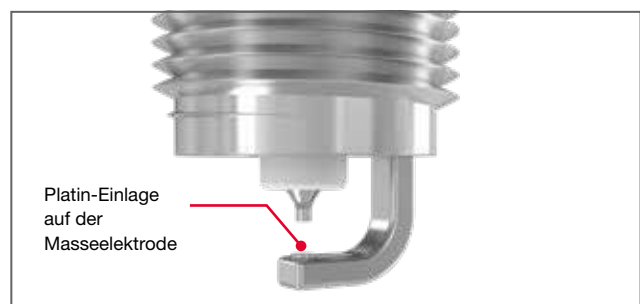


Abb. 7.13 Platin-Einlage auf der Masseelektrode

Super Ignition Plug (SIP)

Die Masseelektrode dieser revolutionären Iridium-Zündkerze, die von DENSO im Jahr 2003 eingeführt wurde, ist mit der speziellen DENSO-eigenen Platintechnologie ausgestattet und nadelförmig mit einem Durchmesser von 0,7-1,0 mm. Diese Masseelektrode mit kleinem Durchmesser ermöglicht eine einzigartige Reduktion des Auslöscheffekts und gewährleistet ein uneingeschränktes Flammenwachstum.

Diese Masseelektrode mit kleinem Durchmesser wird immer mit einer Iridium-Mittelelektrode kombiniert (Abb. 7.14).



Abb. 7.14 Super Ignition Plug (Superzündkerze)

7.5. Weitere Technologien, die für DENSO Zündkerzen verwendet werden

Entstörte Zündkerze

Durch die Integration eines 5-k Ω -Widerstands zwischen dem Anschluss und der Mittelelektrode haben wir eine Zündkerze geschaffen, die weniger elektromagnetische Störungen während der Zündung erzeugt. Durch die steigende Anzahl von elektronischen Geräten in Fahrzeugen werden heute alle neuen Autos standardmäßig mit entstörten Zündkerzen ausgeliefert (Abb. 7.15).

Der Widerstand beeinträchtigt nicht die Spannung, sondern verringert nur den Spitzenstrom und damit die elektromagnetische Störung ohne negative Auswirkungen auf die Funkenbildung.

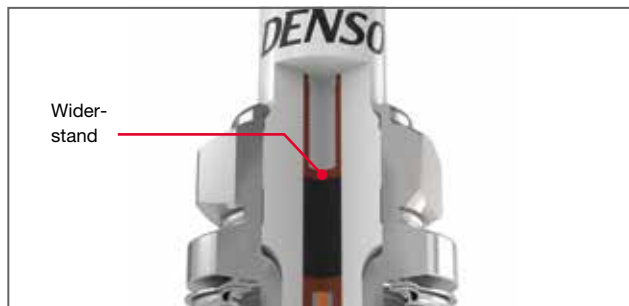


Abb. 7.15 Entstörte Zündkerze

Verlängerte Zündkerze

Durch Verlängern der Elektroden (Abb. 7.16) wird der Funke näher an der Mitte der Brennkammer positioniert. Die zentrale Positionierung des Funkens kann Vorteile für Motoren mit erschwerter Zündwilligkeit mit sich bringen, zum Beispiel für Motoren mit niedriger Leistung und niedriger Verdichtung, die tendenziell mit geringeren Verbrennungstemperaturen betrieben werden. Da der Pfad von der Elektrode zum Gehäuse viel länger ist, gibt es diese Art von Zündkerzen nur mit niedrigen Wärmewerten.



Abb. 7.16 Verlängerte Elektroden

Einführungsansatz

Der verlängerte Einführungsansatz ermöglicht eine Verlängerung der Funkenposition (Abb. 7.17). Wie die verlängerten Zündkerzen reicht diese Zündkerze tiefer in die Brennkammer hinein; der verlängerte Einführungsansatz schützt sie jedoch besser vor höheren Temperaturen und erleichtert eine höhere Leistungsabgabe. Zündkerzen mit verlängertem Einführungsansatz sind mit höheren Wärmewerten als verlängerte Zündkerzen verfügbar.

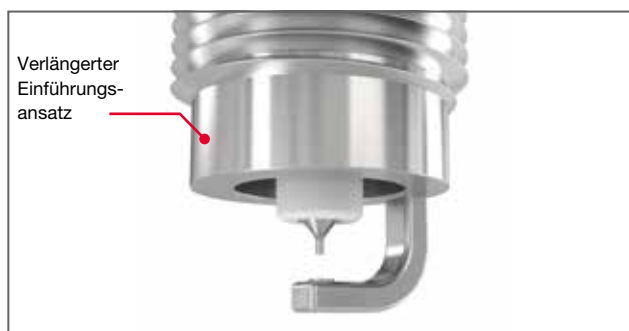


Abb. 7.17 Einführungsansatz

Kegelsitz-Zündkerzen

Kegelsitz-Zündkerzen sind ausschließlich für nicht-japanische Fahrzeuge vorgesehen, bei denen die Zündkerze ohne Dichtung verwendet wird (Abb. 7.18). Im Wesentlichen entscheidet der Motorhersteller, ob er Kegelsitz-Zündkerzen oder Zündkerzen mit einer Dichtung verwenden möchte.



Abb. 7.18 Kegelsitz-Zündkerzen

7.6. Künftige Trends

Überblick

Derzeit werden in über 75 % aller neu zugelassenen Autos mit Benzinmotor Iridium-Zündkerzen verwendet (Abb. 7.19). Wir erwarten, dass diese Zahl sogar noch steigt, wenn die Abgasrichtlinien strenger werden.

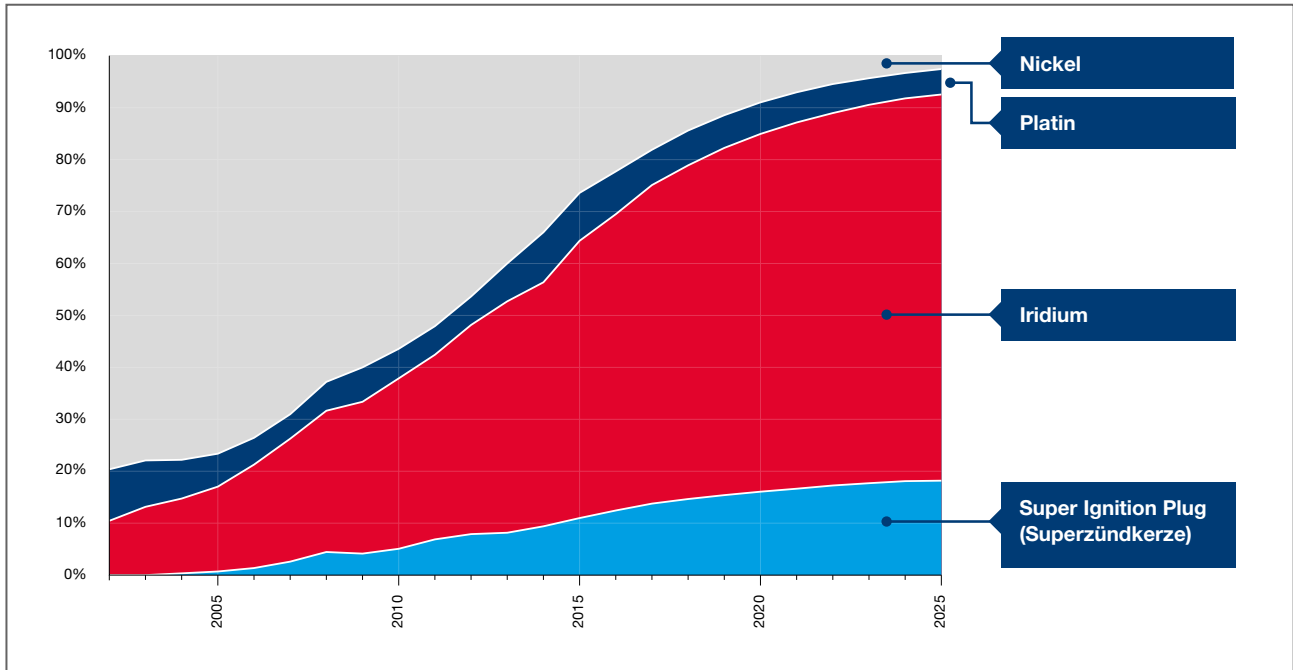


Abb. 7.19 Marktanteil für verschiedene Zündkerzentypen (Prognose bis 2025)

Um sogar noch strengere CO₂-Ziele zu erreichen, müssen die Autohersteller nach Wegen suchen, um die Effizienz der Verbrennungsmotoren zu steigern. In Benzinmotoren kann dies durch eine Reihe von Technologien wie Motor-Downsizing, umfassende Abgasrückführung (AGR) und magere Gemische erzielt werden. Obwohl diese Motortechnologien, die sich immer weiterentwickeln, bereits in Abschnitt 5.5 behandelt wurden, gehen wir hier nochmals darauf ein, welche Auswirkungen sie auf das Zündkerzendesign haben. Dazu zählt beispielsweise die Fähigkeit, Spannungen von mehr als 45 kV standzuhalten.

Abb. 7.20 zeigt eine grobe Prognose zu den Trends bei Verbrennungsmotoren, bei denen die EU CO₂ Abgasvorschriften, Verdichtungsverhältnisse und AGR-Raten bis 2025 berücksichtigt werden.

Als führender Entwickler und Erfinder von Technologien für den Automobilbereich bleibt DENSO auch künftig ein Vorreiter bei der Konstruktion von Verbrennungsmotoren. So stellen wir sicher, dass unsere Produkte auch künftig den Anforderungen an erhöhte Motoreffizienz, Leistungsabgabe und verringerte Abgase entsprechen.

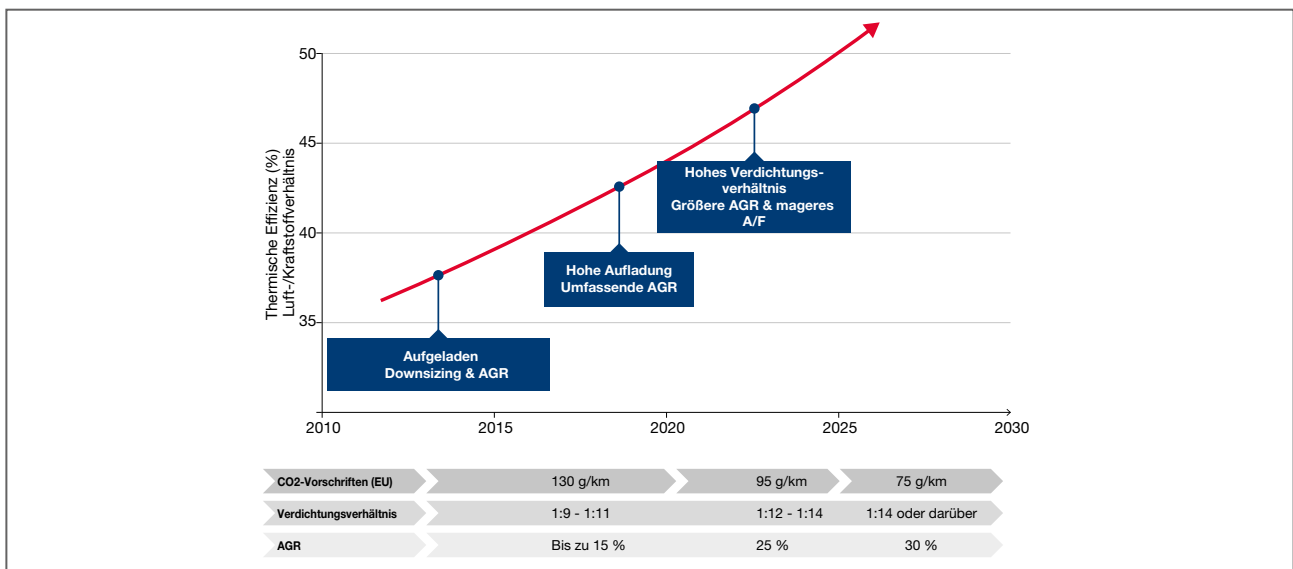


Abb. 7.20 Prognose zu Verbrennungsmotorentrends bis 2025

Downsizing

Seit einiger Zeit entwickelt die Automobilindustrie Downsizing-Motoren, die über einen relativ kleinen Hubraum verfügen. Dies muss jedoch mit hohen Leistungsabgaben kombiniert werden, die häufig mithilfe von Turboaufladung realisiert werden.

Ein Downsizing-Motor bringt einige ganz besondere Herausforderungen mit sich, beispielsweise die Unterbringung der Komponenten (Abb. 7.21). In einem kleineren Zylinderkopf ist es weiterhin notwendig, 4 große Ventile für die ordnungsgemäße Luftzufuhr sowie eine Zündkerze und oft einen Kraftstoffinjektor unterzubringen, aber es muss auch ausreichend Platz für die Kühlmittelkanäle vorhanden sein, damit alles auf der gewünschten Temperatur gehalten wird. Eine Lösung des Platzproblems besteht in der Verwendung von schmalen Zündkerzen mit langen Gewinden. Diese werden bereits seit einiger Zeit in Motorradmotoren verwendet und jetzt auch in Autos eingesetzt.

Downsizing und hohe Leistung gehen mit höheren Drücken im Zylinder einher, entweder durch erhöhte Turboladerdrücke oder höhere Verdichtungsverhältnisse. Aber die erhöhten Drücke erschweren die Ionisierung der Luft und die Funkenerzeugung (siehe Abschnitt 6.4, um mehr Informationen zur Ionisierung zu erhalten). Um dieses Problem zu überwinden, sind höhere Funkenspannungen erforderlich, und es wird erwartet, dass die erforderliche Spannung auf mehr als 45 kV steigen wird.

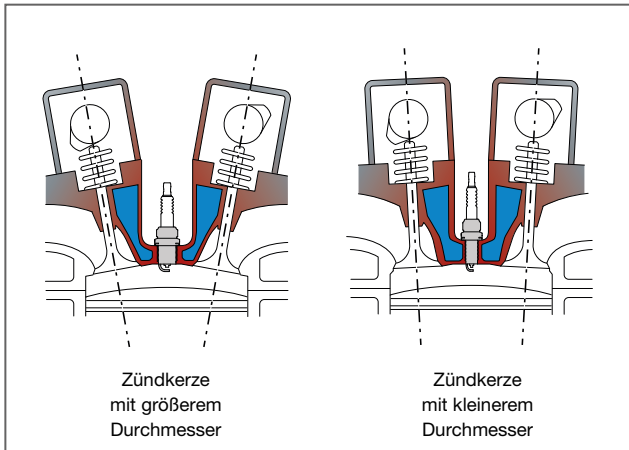


Abb. 7.21 Schmalere Zündkerze mit längerem Gewinde nimmt weniger Platz im Zylinderkopf in Anspruch

Hohe AGR

Angesichts der steigenden Verdichtungsverhältnisse und Verbrennungstemperaturen erhöht sich das Risiko von Detonationen oder Klopfen. Um das Motorklopfen zu unterdrücken, wird die AGR-Rate erhöht, was dazu beiträgt, die Verbrennungstemperaturen zu senken. Gleichzeitig erhöht dies den Gasstrom in der Brennkammer, was wiederum zu einer besseren Mischung von Luft und Kraftstoff führt.

Dieser verbesserte Gasstrom hat insbesondere bei höheren Motordrehzahlen die Tendenz, den Funken von den Elektroden wegzublasen, was einen gestreckten oder längeren Lichtbogen erzeugt. Da dieser Bogen einer größeren Menge der Luft-/Kraftstoffmischung ausgesetzt ist, trägt dies zur Verbesserung der Zündwilligkeit bei (Abb. 7.22). Um jedoch ein vollständiges Wegblasen zu vermeiden, ist ein höherer Strom von der Zündspule erforderlich, um den Lichtbogen aufrechtzuerhalten.

Wenn nun ein geringerer Gasstrom vorhanden ist, wie er bei geringeren Motordrehzahlen auftreten kann, ist die Mischung aus Luft, Kraftstoff und Abgas möglicherweise schwerer zu zünden. Um dieses Problem zu überwinden, sollte der Funke länger dauern, damit er länger dem Luft-/Kraftstoffgemisch ausgesetzt ist und dadurch die Zündwilligkeit wieder verbessert wird.

Die Zündspule muss daher in der Lage sein, der Zündkerze eine höhere Energie bereitzustellen, um entweder den physikalisch längeren Lichtbogen aufrechtzuerhalten oder den Lichtbogen für eine längere Dauer beizubehalten.

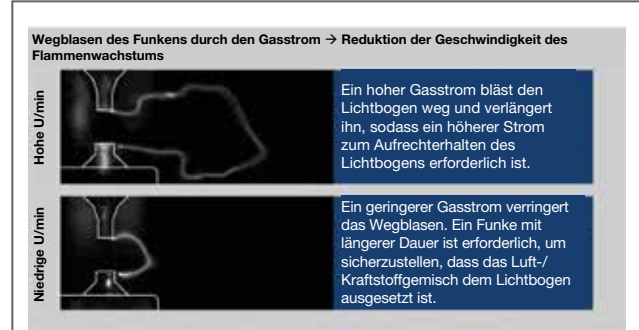


Abb. 7.22 Verbrennungsluftstrom mit Auswirkungen auf das Wegblasen des Funkens

Die Maßeinheit für Energie ist Joule (J); die durch eine Zündspule produzierte Energie liegt typischerweise im Bereich von 30 bis 80 mJ (Millijoule, 1 mJ = 1/1000 J). Um jedoch die erforderlichen höheren Spannungen, höheren Ströme und Funken mit längerer Dauer bereitstellen zu können, wird davon ausgegangen, dass die verfügbare Spulenenergie auf über 200 mJ steigt.

Mageres Luft-/Kraftstoffverhältnis

Obwohl magere Gemische zu höheren Verbrennungstemperaturen führen, kann dies in der Tat die Motoreffizienz verbessern. Magere Gemische erhöhen auch die NOx-Abgase, die dann eine Abgasnachbehandlung erfordern. Wie bei hohen AGR-Raten erfordern auch magere Gemische einen stärkeren Zündfunken. Angesichts eines erwarteten Luft-/Kraftstoffverhältnisses von Lambda 2 (Luft-/Kraftstoffverhältnis ungefähr 30 zu 1) oder höher wird die Zündkerzenentwicklung weiterhin darauf ausgerichtet sein, den bestmöglichen Funken unter noch extremeren Betriebsbedingungen zu liefern.

Abb. 7.23 zeigt die Zündwilligkeit des Luft-/Kraftstoffgemischs, wenn Nickel-, Platin- und Iridium-Zündkerzen mit verschiedenen Zündstrecken verwendet werden.

Iridium-Zündkerzen stellen die beste Leistung bereit. Um die perfekte Zündwilligkeit zu garantieren, werden feine Iridium-Elektroden, wie sie bereits von DENSO hergestellt werden, eines Tages Standard sein.

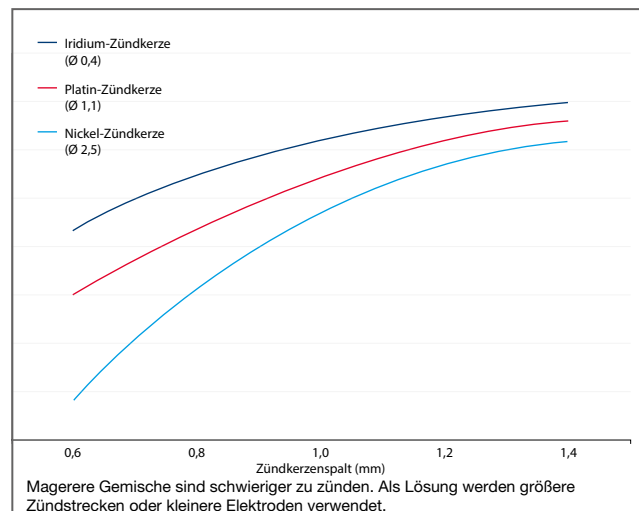


Abb. 7.23 Grenzen der Zündwilligkeit von verschiedenen Zündkerzentypen

8. DENSO PRODUKTPALETTE

8.1. Direct Fit

Führende Motor- und Fahrzeughersteller wählen DENSO Zündkerzen aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und Leistung. DENSO Direct Fit Zündkerzen sind sowohl in Oberklasse- als auch in Großserienfahrzeugen anzutreffen. Die DENSO Direct Fit Zündkerzen sind die Originalzündkerzen aus der Erstausrüstung oder stellen die Alternative von DENSO dar, die dem Original genau gleichwertig ist (Haupt-OE-Referenz).

Die Direct Fit Produktpalette umfasst: Nickel-, Platin-, Iridium- und SIP-Zündkerzen sind für allgemeine Automobil- und Motorradanwendungen sowie für Marine, Landwirtschaft und Kleinmotoren verfügbar.

Nickel

DENSO Nickel-Zündkerzen bieten dank der patentierten U-Rillen-Masseelektrode eine verbesserte Zündleistung (Abb. 8.1). Die U-Rillen-Technologie wurde von DENSO erfunden und in den 1970er Jahren als beste verfügbare Optimierungsmöglichkeit anerkannt.

Autohersteller, die in der Erstausrüstung auf DENSO Zündkerzen setzen, übernehmen die U-Rillen-Technologie direkt für ihre gesamte Fahrzeugalette.

DENSOs Wärmewert-Technologie für Nickel-Zündkerzen kann verglichen mit anderen Herstellern einen breiteren Wärmewertbereich abdecken, sodass ein konsolidiertes Sortiment mit weniger Teilenummern und geringeren Lagerbeständen ermöglicht wird.

DENSO verwendet weiterhin die U-Rillen-Technologie bei den meisten Zündkerzen mit einer einzelnen Masseelektrode.

DENSO Nickel-Zündkerzen sind beispielsweise im Toyota Aygo, Citroën C1 und Peugeot 107 (Bj. 2005) mit dem 1KR-FE-Motor mit 1,0 l Hubraum sowie in vielen anderen Großserienfahrzeugen verbaut.



Alle verfügbaren DENSO Teilenummern finden Sie im DENSO e-Katalog unter:

denso-am.de/e-catalogue

Platin

Platin-Zündkerzen wurden in den 1980er Jahren populär, um eine höhere Zündkerzen- und Motorleistung zu ermöglichen. Angesichts steigender Anforderungen an die Abgasreduktion war es nötig, die Nickel-Technologie durch eine Zündkerze mit höheren Leistungsspezifikationen zu ersetzen.

Langlebige Platin-Zündkerzen weisen sowohl eine Platin-Mittelelektrode als auch ein Platinplättchen auf der Masseelektrode auf (siehe Abb. 8.2).

DENSO hat seit einiger Zeit seinen Entwicklungsschwerpunkt von Platin-Zündkerzen hin zu den überlegenen Iridium-Zündkerzen verschoben. Platin wird jedoch aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit weiterhin auf den Masseelektroden der meisten modernen Zündkerzen verwendet.

DENSO Platin-Zündkerzen werden im Lexus LFA-Supercar von 2010 mit V10-Motor verwendet.

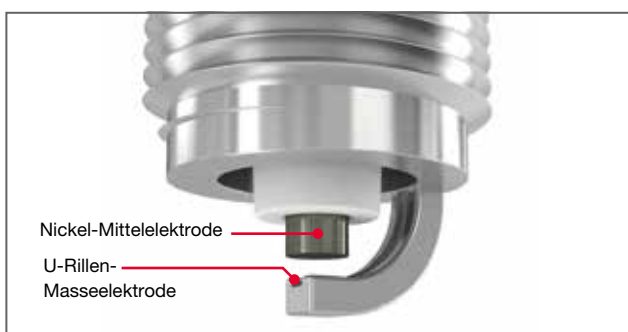


Abb. 8.1 DENSO U-Rillen-Masseelektrode

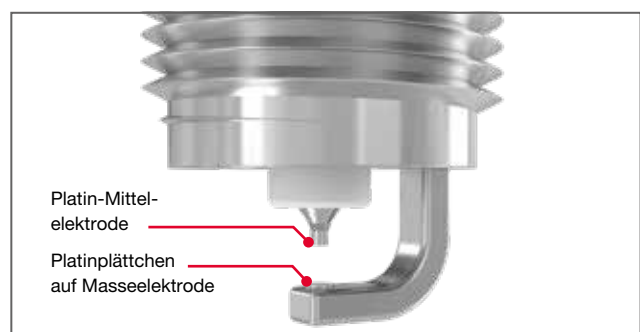


Abb. 8.2 Platinplättchen-Masseelektrode

8.1. Direct Fit	50
8.2. Twin Tip	52
8.3. Iridium Power	53
8.4. Iridium Racing	54

Iridium

Als Pionier in der Herstellung von Iridium-Zündkerzen hat DENSO die mit 0,4 mm feinste verfügbare Mittelelektrode einschließlich ihrer Befestigungsmethode, dem 360°-Laserschweißen, patentieren lassen (Abb. 8.3).

Die Iridium-Zündkerze ist nicht nur zuverlässiger, sondern auch präziser. Sie zündet das Luft-/Kraftstoffgemisch zum genau richtigen Zeitpunkt, wie dies durch das Motorsteuersystem vorgesehen ist.

In Kombination mit einem Platinplättchen auf der Masseelektrode (siehe Abb. 8.3) können Iridium-Zündkerzen eine sehr hohe Lebensdauer erreichen, was zu geringeren Wartungskosten führt.

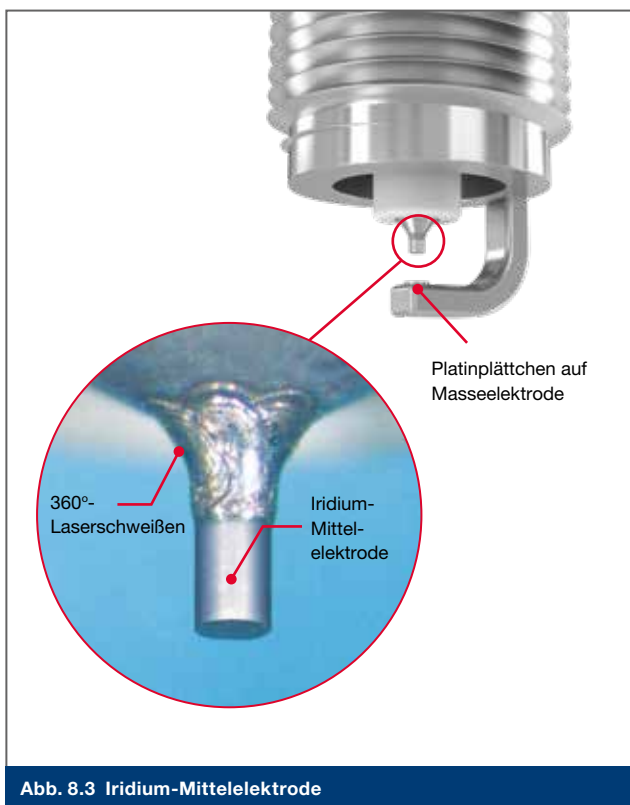


Abb. 8.3 Iridium-Mittellektrode

DENSO OEM Iridium-Zündkerzen werden beispielsweise im Volvo XC60 3.0 T6 AWD von 2015 und in vielen anderen Volvo-Motoren verbaut. Darauf aufbauend bietet DENSO dem Aftermarket Iridium TT-Kerzen auch für andere neue Volvo Motoren, die für eine optimale Leistung sorgen und auf denselben Produktionslinien hergestellt werden.

Super Ignition

Die Super Ignition-Technologie wurde als High-end-Zündkerze eingeführt, um die Abgasemissionen von Fahrzeugen der Oberklasse zu verringern. Derzeit handelt es sich dabei um die beste verfügbare Zündkerzentechnologie.

Dabei wird auf eine Iridium-Mittellektrode und eine einzelne, nadelförmige Platin-Masseelektrode zurückgegriffen. Die Elektrode weist einen Durchmesser von 0,55 mm oder 0,7 mm auf. Die Masseelektrode ist eine Platinnadel mit einem Durchmesser von 0,7 mm oder 1,0 mm.

Diese einzigartige nadelförmige Platin-Masseelektrode bietet mehr als eine außergewöhnliche Standzeit. Sie verringert auch den Zündspannungsbedarf und stellt mehr Platz für das Flammenwachstum bereit, wodurch der Auslöschereffekt praktisch beseitigt wird.

Die DENSO Super Ignition-Zündkerze FXE20HR11 ist beispielsweise im Nissan Qashqai von 2007 sowie in vielen anderen Oberklassefahrzeugen verbaut. Für diese Anwendungen ist auch eine Iridium TT-Kerze als gleichwertige Alternative verfügbar. Sie erfüllt die Motoranforderungen und bietet zusätzlich die Vorteile der patentierten 0,4-mm-Mittellektrode.

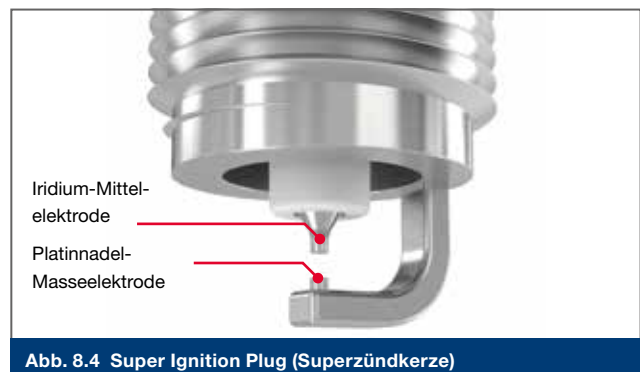


Abb. 8.4 Super Ignition Plug (Superzündkerze)

8.2. Twin Tip

In den vorherigen Kapiteln wurde erläutert, dass mit Ausnahme der Standzeit bei fast allen Leistungskriterien kleinere Elektroden für die beste Leistung sorgen.

Kleinere Elektroden haben ein konzentrierteres elektrisches Feld, was den Spannungsbedarf reduziert. Die kleinere Oberfläche und Masse reduzieren den Auslöschereffekt und ermöglichen uneingeschränktes Flammenwachstum.

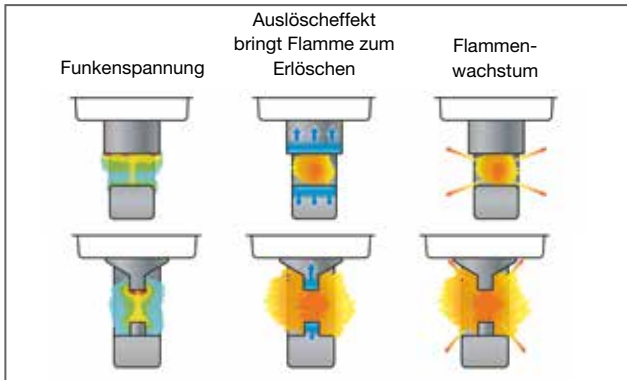


Abb. 8.5 Vorteile von kleinen Elektroden

Eine einfache Verkleinerung der Elektroden würde normalerweise die Standzeit der Zündkerze verringern. DENSO hat einzigartige Materialien entwickelt, mit denen kleinere Elektroden ohne Beeinträchtigung der Standzeit realisiert werden können.

Auf Grundlage der Erfahrungen und Erfolge mit den Super Ignition (SIP) Zündkerzen, die schmale Mittel- und Masseelektroden aufweisen, hat DENSO zwei Typen von Twin Tip-Zündkerzen mit kleinen Elektroden entwickelt, die die Standzeit nicht beeinträchtigen, sondern diese häufig sogar erhöhen. Diese Zündkerzen können als Alternative zu den Originalzündkerzen oder sogar als Upgrade verwendet werden. Das DENSO Twin Tip-Zündkerzen-Programm für erhöhte Leistung ermöglicht mit wenigen Teilenummern den Großteil an Fahrzeugen abzudecken.

Nickel TT

Nickel ist ein relativ günstiges Material, das sich für Zündkerzenelektroden eignet. Aufgrund der geforderten langen Standzeit hat die Mittelelektrode üblicherweise einen Durchmesser von 2,5 mm. Wenn eine kleinere Masseelektrode gewünscht ist, müsste normalerweise eine zusätzliche Spitze auf die Masseelektrode geschweißt werden, was die Herstellungskosten beträchtlich erhöhen und die Standzeit der Zündkerze reduzieren würde.

DENSO Nickel TT (Abb. 8.6) Kerzen verwenden eine einzigartige patentierte Legierung, die Nickel, Silikon, Yttrium und Titan (Ni-Si-Y-Ti) enthält.

Das Verbundmaterial hat ähnliche Eigenschaften wie Nickel, ist aber 80 % widerstandsfähiger gegenüber Oxidation und 40 % widerstandsfähiger gegenüber Verschleiß, der durch den Funken verursacht wird.

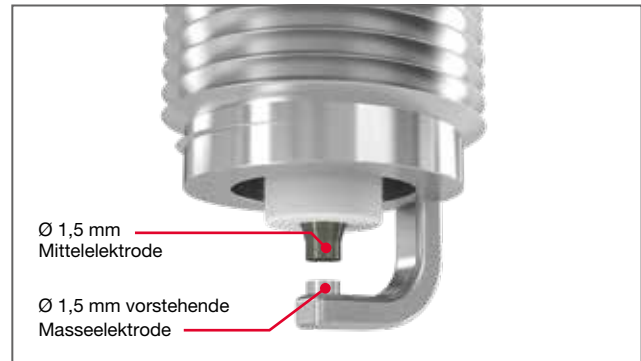


Abb. 8.6 DENSO Nickel TT-Zündkerze

Die Verwendung dieser speziellen Legierung ermöglicht dünnere Elektroden mit 1,5 mm Durchmesser, die dieselbe Standzeit wie konventionelle Standard-Nickelektroden mit 2,5 mm erreichen. Außerdem ermöglicht die neue Legierung das Ausstanzen von kleinen Masseelektroden aus dem Material anstelle sehr kostspieliger Produktionsprozesse. Die neue Nickellegierung ist günstiger als Edelmetalle wie Platin oder Iridium und bietet dem Endkunden somit einen hohen Gegenwert.

Mit zwei 1,5 mm Elektroden können Nickel TT-Zündkerzen eine ähnliche Leistung wie eine Platin-Zündkerze zum Preis einer Standard-Nickelzündkerze erbringen.

Aufgrund ihrer kleinen Elektroden und der daraus resultierenden höheren Leistung gegenüber den Standard-Nickelkerzen kann die Nickel TT-Zündkerze viele andere Zündkerzen mit derselben Form ersetzen und verbessert dabei häufig die Motoreffizienz. Dank Einsatz dieser fortschrittlichen Technologien ist es möglich, viele unterschiedliche Zündkerzenspezifikationen mit einer viel kleineren Menge an Teilenummern abzudecken.

Die Ni-Si-Y-Ti-Legierung und die vorstehende Masseelektrode, die in Nickel TT-Zündkerzen verwendet werden, sind von DENSO patentiert.

Iridium TT

Durch die Kombination des grundlegenden Konzepts der Nickel TT- und Super Ignition-Zündkerze, hat DENSO seine Zündkerzentechnologie weiterentwickelt und die Iridium TT-Kerze auf den Markt gebracht, die sich zum Maßstab für Iridium-Zündkerzen entwickelt hat. Die SIP-Technologie in Kombination mit der 0,4 mm Iridium-Mittelelektrode ergibt eine einzigartige Zündkerze, die alle anderen Technologien auf dem Markt übertrifft.

Die neue Iridium TT-Zündkerze (Abb. 8.6) kombiniert die SIP-Technologie mit der patentierten 0,4 mm Iridium-Mittelelektrode von DENSO und einer nadelförmigen 0,7 mm Platin-Masseelektrode. Die Iridium TT ist die leistungsfähigste Zündkerze auf dem Markt, die auch eine sehr lange Standzeit erreicht. Gleichzeitig senkt die Iridium TT auch Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch.



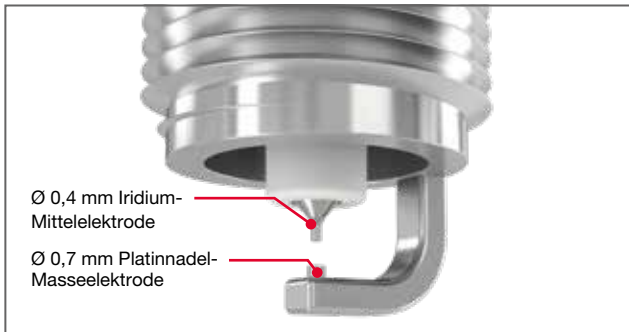


Abb. 8.7 DENSO Iridium TT-Zündkerze

Die 0,4-mm-Mittelelektrode wird unter Verwendung der patentierten Iridium-Legierung hergestellt, die die höchste Menge an Iridium auf dem Markt und einen extrem hohen Schmelzpunkt aufweist. Diese Merkmale haben die Miniaturisierung der Iridium TT-Mittelelektrode ermöglicht, die zur Reduktion des Zündspannungsbedarfs und Verbesserung der Zündleistung beitrug (siehe Abschnitt 7.3 für mehr Informationen zu Iridium-Mittelelektroden).

8.3. Iridium Power

Während die Iridium TT die beste verfügbare Lösung für Autos darstellt, ist die Iridium Power die beste Lösung für Motorräder. Mit derselben feinen Iridium-Mittelelektrode mit 0,4 mm Durchmesser (Abb. 8.7) erbringt die Iridium Power eine bessere Leistung als fast jede andere Zündkerze auf dem Markt. Sie kann mit hohen Motordrehzahlen umgehen, sodass Iridium Power die perfekte Zündkerze für Motorräder und getunte Hochleistungs-Autos darstellt.

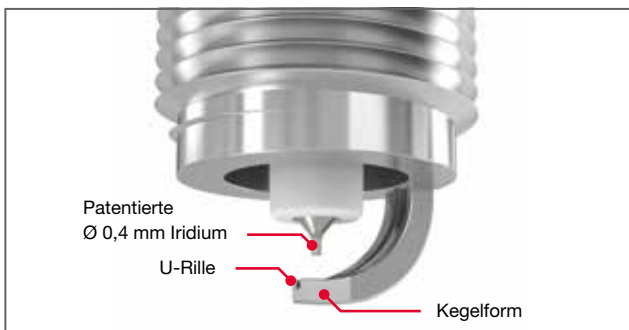


Abb. 8.8 DENSO Iridium Power-Zündkerze

Iridium Power-Zündkerzen sind mit einer breiten Auswahl an Wärmewerten verfügbar, sodass dieses Zündkerzen-Sortiment für einen weiten Anwendungsbereich geeignet ist.

Aufgrund ihrer überlegenen Leistung kann die Iridium TT-Zündkerze viele verschiedene Zündkerzentypen ersetzen. Dies ermöglicht eine stärker konsolidierte Produktpalette, die fast jedes Fahrzeug abdecken kann. Das Iridium TT-Sortiment umfasst derzeit 19 Teilenummern, die eine Hochleistungsalternative zu fast allen Nickel-, Platin-, Iridium- und SIP-Zündkerzen darstellen.

Iridium Power-Zündkerzen sind ideal für Hochleistungsmotoren und hochdrehende Motoren geeignet, wie sie in Motorrädern, aber auch in Hochleistungsautos, Schneemobilen und Jetskis verwendet werden.

Ultrafeine Iridium-Elektrode mit 0,4 mm Durchmesser
Mithilfe der patentierten 0,4 mm Iridium-Mittelelektrode konnte der Zündspannungsbedarf reduziert und die Zündleistung verbessert werden.

U-Rille und kegelförmige Masseelektrode
Die Iridium Power-Masseelektroden können mit einer U-Rille hergestellt werden, die in die Innenfläche der Masseelektrode geschnitten wird. Die U-Rille stellt viel Platz für die Flammenbildung zur Verfügung, während die zusätzlichen Kanten den Zündspannungsbedarf weiter reduzieren. Diese Technologie ermöglicht eine ausgezeichnete Zündleistung ohne Vergrößerung der Funkenstrecke.

Die Spitze der Masseelektrode weist eine Kegelform auf, was den Kontaktbereich mit der Flamme verringert. Die kegelförmige Masseelektrode hat auch eine verringerte Masse, was die Belastung durch Vibrationen und die Wärmebelastung an der Elektrode reduziert, sodass die Zündkerze mit anspruchsvolleren Fahrbedingungen zurechtkommt.

Nicht alle Iridium Power-Zündkerzen weisen eine U-Rille und/oder eine kegelförmige Masseelektrode auf.

IRIDIUM POWER®

8.4. Iridium Racing

Fahrer und Rennteams vertrauen unseren Iridium Racing-Zündkerzen aufgrund der Zuverlässigkeit, Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit.

Iridium Racing-Zündkerzen (Abb. 8.9) sind speziell ausgelegt, um die sehr hohen Anforderungen zu erfüllen, die durch Hochleistungs-Rennsportmotoren und harte Rennsportbedingungen gestellt werden.

Bei Rennen mit Vollgas und hohen Motordrehzahlen werden konsistent hohe Verbrennungstemperaturen und -drücke erzeugt. Daher liegt der Schwerpunkt bei der Auslegung von DENSOs Iridium Racing-Zündkerzen auf dem Erzeugen eines hochwertigen Funkens, um diesen extremen Betriebsbedingungen standzuhalten.

Für viele Rennsport-Kategorien sind Kraftstoffeinsparung und Magerbetrieb nicht die primären Überlegungen. Zur Leistungserzeugung werden fettere Luft-/Kraftstoffmischungen verwendet, die die Bildung von Kohlenstoffablagerungen auf der Zündkerze erhöhen, insbesondere während der gelegentlich auftretenden geringeren Lastzustände. Daher müssen die Iridium Racing-Zündkerzen auch in der Lage sein, die Kohlenstoffablagerungen schnell abzubrennen, um deren Ansammlung zu vermeiden.

Außerdem ragen Elektroden, wie sie in den meisten Zündkerzentypen für den Straßenverkehr verwendet werden, in den Brennraum hinein; aber die höheren Drücke und Temperaturen, die durch Rennsportmotoren mit hohem Verdichtungsverhältnis erzeugt werden, können die vorspringenden Elektroden beschädigen. Die Iridium Racing-Zündkerzen verwenden daher Elektroden, die fast bündig mit der Unterseite des Zündkerzengehäuses sind.

Da Iridium Racing-Zündkerzen nur für die Verwendung unter harten Rennsportbedingungen ausgelegt sind, eignen sie sich nicht für den effizienten Betrieb bei normalen Fahrbedingungen bzw. für das langsame Fahren oder leichte Lastbedingungen. Selbst bei leicht getunten Motoren und Motoren, die für gelegentliche Rennen eingesetzt werden, werden möglicherweise nicht die erforderlichen Temperaturen, Drücke und anderen Bedingungen erreicht, die den effizienten Betrieb von Iridium Racing-Kerzen ermöglichen. Für weniger anspruchsvolle Motoren und Fahrbedingungen (wie für Autos für den Straßenverkehr und gelegentliche Renntage) stellen Iridium Power-Zündkerzen die beste Lösung dar.

Elektroden, die in den Brennraum ragen oder vorstehen, bieten im Allgemeinen eine bessere Zündwilligkeit und Leistung. Allerdings ist aufgrund der hohen Verdichtungsverhältnisse, Drücke und Temperaturen, die bei Hochleistungs-Rennsportmotoren anzutreffen sind, kein hoher Bedarf an Zündkerzen mit vorspringenden Elektroden. Auch würde angesichts der Aussetzung gegenüber hohen Verbrennungstemperaturen eine lange Masseelektrode keine ausreichende Wärmeableitung aufweisen und sich daher zu stark erhitzen. Je größer der Umfang des Leistungstunings für einen Motor ist, desto geringer ist die Notwendigkeit einer vorspringenden Elektrode.

Fernando Alonso im Hybrid Toyota Gazoo Racing Auto, Gewinner der 24 Stunden von Le Mans 2018



Ultrafeine Iridium-Elektrode mit 0,4 mm Durchmesser

Mit einer patentierten ultrafeinen Iridium-Elektrode mit 0,4 mm Durchmesser erzielen Iridium Racing-Kerzen eine ausgezeichnete Zündleistung.

0,8-mm-Masseelektrode komplett aus Platin

Verglichen mit der Nickellegierung, die in herkömmlichen Zündkerzen verwendet wird, verringert der hohe Schmelzpunkt von Platin Probleme wie das Schmelzen von Masseelektroden und deren Verschleiß. Die Platinspitze wird auf die Elektrode geschweißt und eingestellt, ohne die Elektrode zu verbiegen. Dies verringert die Eigenspannung, die durch Herstellungsprozesse verursacht werden, und erhöht daher Haltbarkeit und Zuverlässigkeit.

Isolator für den Rennsport

Ein rennsportertprobter Isolator bietet eine um rund 20 % erhöhte Festigkeit.

Freibrennvertiefung

Da Kohlenstoffablagerungen die Zündkerzeneffizienz verringern können, wurde eine kleine Vertiefung zwischen der Mittelelektrode und dem Isolator vorgesehen. Diese Vertiefung ermöglicht das Abbrennen des Kohlenstoffs und anderer Ablagerungen durch die elektrische Entladung, wodurch die Zündkerzenleistung aufrechterhalten wird.

Silikonbeschichtung

Zu Beginn des Rennens kann ein Nicht-Anspringen aufgrund von Kohlenstoffablagerungen fatal sein. Um diese Situation zu vermeiden, wurde der Isolator mit einem hochgradig wasserabstoßenden Silikon beschichtet, das den Isolator vor jeglicher Feuchtigkeit und Kohlenstoff schützt.

Abschrägung an der Stirnfläche des Gewindes

Um die Toleranz gegenüber extremen Verbrennungsbedingungen zu verbessern, wurde die Abschrägung an der Stirnfläche des Gewindes vergrößert. Die Gase der fetten Luft-/Kraftstoffgemische werden vom Isolator weggeleitet, um dadurch Kohlenstoffablagerungen zu vermeiden.

IRIDIUM RACING®

DENSO Kobelco SARD RC F, 2016 Super GT 500 Champion



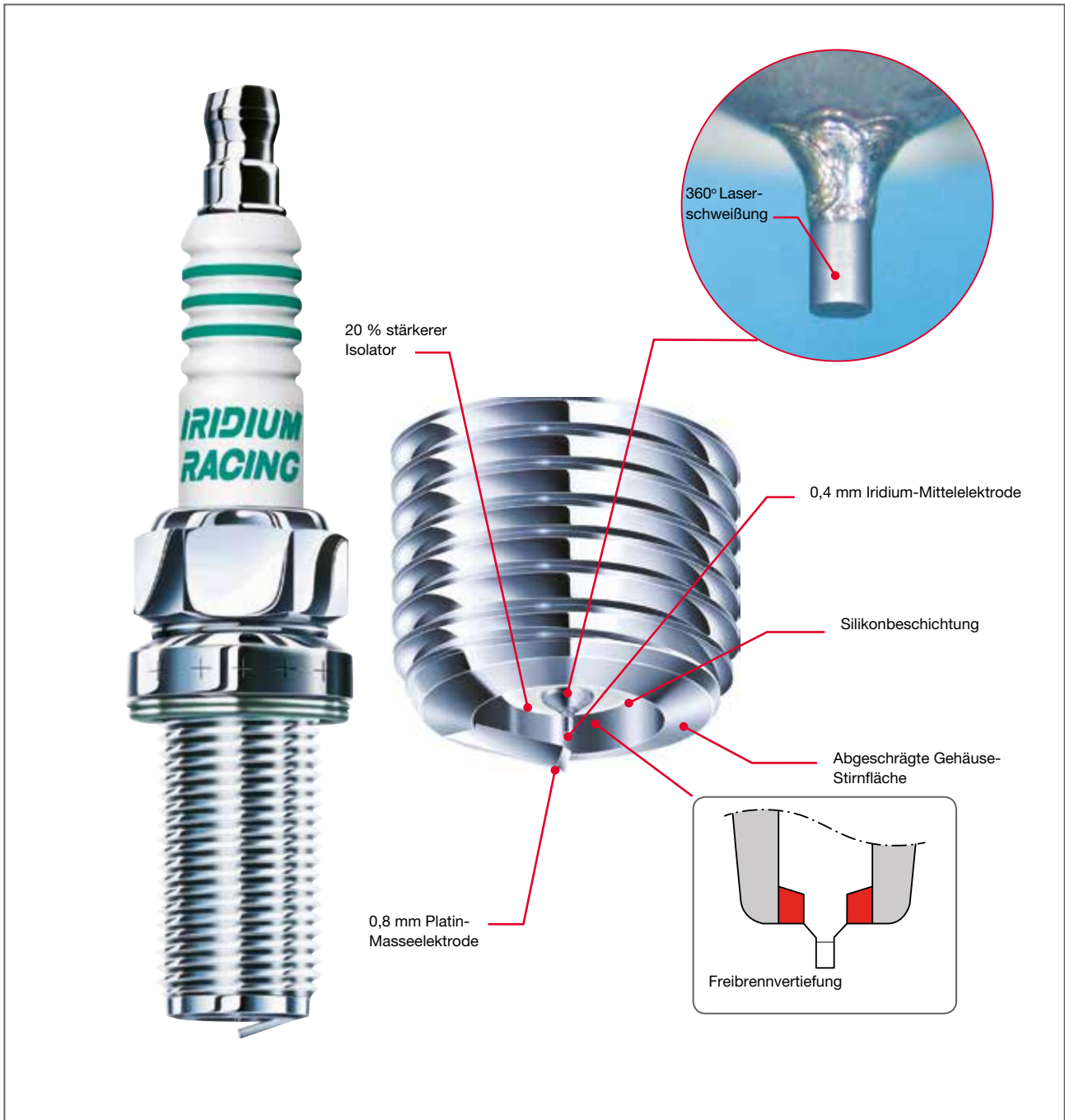


Abb. 8.9 DENSO Iridium Racing-Zündkerze

Polestar Cyan Racing, WTCC-Weltmeister 2017



Subaru BRZ in der Super GT-Rennserie



9. UPGRADE IHRER ZÜNDKERZEN

9.1. Warum ein Upgrade Ihrer Zündkerze?

Es gibt viele Gründe, um ein Upgrade von einer Standardzündkerze auf eine leistungsstärkere Zündkerze vorzunehmen, die eine verbesserte Zündleistung erbringt. Vielleicht möchten Sie die höchstmögliche Motorleistung für Rennen erzielen oder einfach den Kraftstoffverbrauch bei den alltäglichen Fahrten senken, vielleicht möchten Sie auch Probleme mit einem Motor lösen, der schwer anspringt oder einen schlechten Leerlauf hat. Ganz gleich, welche Gründe Sie für ein Upgrade haben, das DENSO Zündkerzen-Sortiment stellt für fast alle Fahrzeuge ein geeignetes Upgrade bereit.

Der DENSO e-Katalog listet Zündkerzen mit Standard- und Upgrade-Spezifikationen für die meisten Fahrzeuge einschließlich Motorrädern auf. Der e-Katalog steht unter folgender URL zur Verfügung: denso-am.de/e-catalogue

Die Hauptvorteile des Upgradens

Die Hauptvorteile, die durch das Upgraden von Zündkerzen erreicht werden können, werden in den folgenden Abschnitten aufgeführt. Neben Verbesserungen bei Motorleistung und Drehmoment können beträchtliche Verbesserungen bei der Laufruhe des Motors, beim Anlassen, Kaltstartverhalten sowie bei der Kraftstoffeinsparung erzielt werden. Dazu kommen noch die Vorteile reduzierter Abgasemissionen. Außerdem kann das Upgrade auf eine Zündkerze mit höheren Spezifikationen dazu beitragen, Probleme mit gelegentlichen oder sogar anhaltenden Fehlzündungen bei Leerlaufdrehzahl oder unter Last zu lösen.

Für Fahrzeuge, die Nickel-Zündkerzen mit Standardspezifikation verwenden, wird durch das Upgrade auf Iridium-Kerzen eine bessere Zündleistung ermöglicht, die üblicherweise mit geringeren Spannungen erzielt wird. Der geringere anfängliche Spannungsbedarf belastet die Zündspule weniger und es bleibt mehr Energie in der Spule, sodass die Zündanlage unter anspruchsvolleren Betriebsbedingungen wie Vollastbeschleunigung bessere Leistungen erbringt.

LPG/CNG

Für Fahrzeuge, die für den Betrieb mit LPG oder CNG umgerüstet wurden, sind die Vorteile eines Upgrades sogar noch deutlicher, denn beim Zünden von gasförmigen Kraftstoffen ist eine höhere Zündspannung erforderlich, da sie nicht so leicht zu zünden sind (siehe Abschnitt 9.5). Auch die Verbrennungstemperaturen schwanken bei LPG/CNG stärker als bei Benzinmotoren, was zu einer verringerten Standzeit von bis zu 30 % beiträgt. Durch das Upgrade der Nickel-Zündkerzen auf Iridium-Zündkerzen mit längerer Lebensdauer und verbesserter Zündleistung wird die Motorleistung verbessert und die Wechselintervalle für die Zündkerze werden verlängert.

Die Vorteile der modernen Zündkerzentechnologie

Ein wichtiger Faktor, der berücksichtigt werden muss, besteht in der Weiterentwicklung der Zündkerzentechnologie in den letzten Jahren. In vielen neueren Fahrzeugen sind heute standardmäßig Iridium-Zündkerzen verbaut, die verglichen mit früheren Zündkerzendesigns effizienter sind. Obwohl möglicherweise Ersatzzündkerzen derselben Spezifikation verfügbar sein könnten, wäre es vorteilhaft, eine Ersatzzündkerze mit modernerer Auslegung und höheren Spezifikationen (wie die DENSO Iridium TT) zu montieren, die Zündung und Motorleistung verbessert.

Der Vorteil des Upgrades hängt in großem Umfang vom Standardtyp der Zündkerze ab. Beim Upgrade von einer Nickel- auf eine Iridium-Zündkerze kann ein beträchtlicher Unterschied gemessen werden. Wird jedoch ein Upgrade von einer Iridium- auf eine SIP-Zündkerze ausgeführt (wie die DENSO Iridium TT), ist der Unterschied kleiner.



Um die beste Iridium-Zündkerze für Ihre LPG- oder CNG-Anwendung zu finden, können Sie im DENSO e-Katalog nachsehen.

denso-am.de/e-catalogue

9.1. Warum ein Upgrade Ihrer Zündkerze?	56
9.2. Leistungsabgabe	57
9.3. Kraftstoffersparung und Abgase	58
9.4. Ruhiger Leerlauf, Fehlzündungen und Anlassen	59
9.5. Zu LPG und CNG umgerüstete Autos	60
9.6. Tuning und Rennsport	61

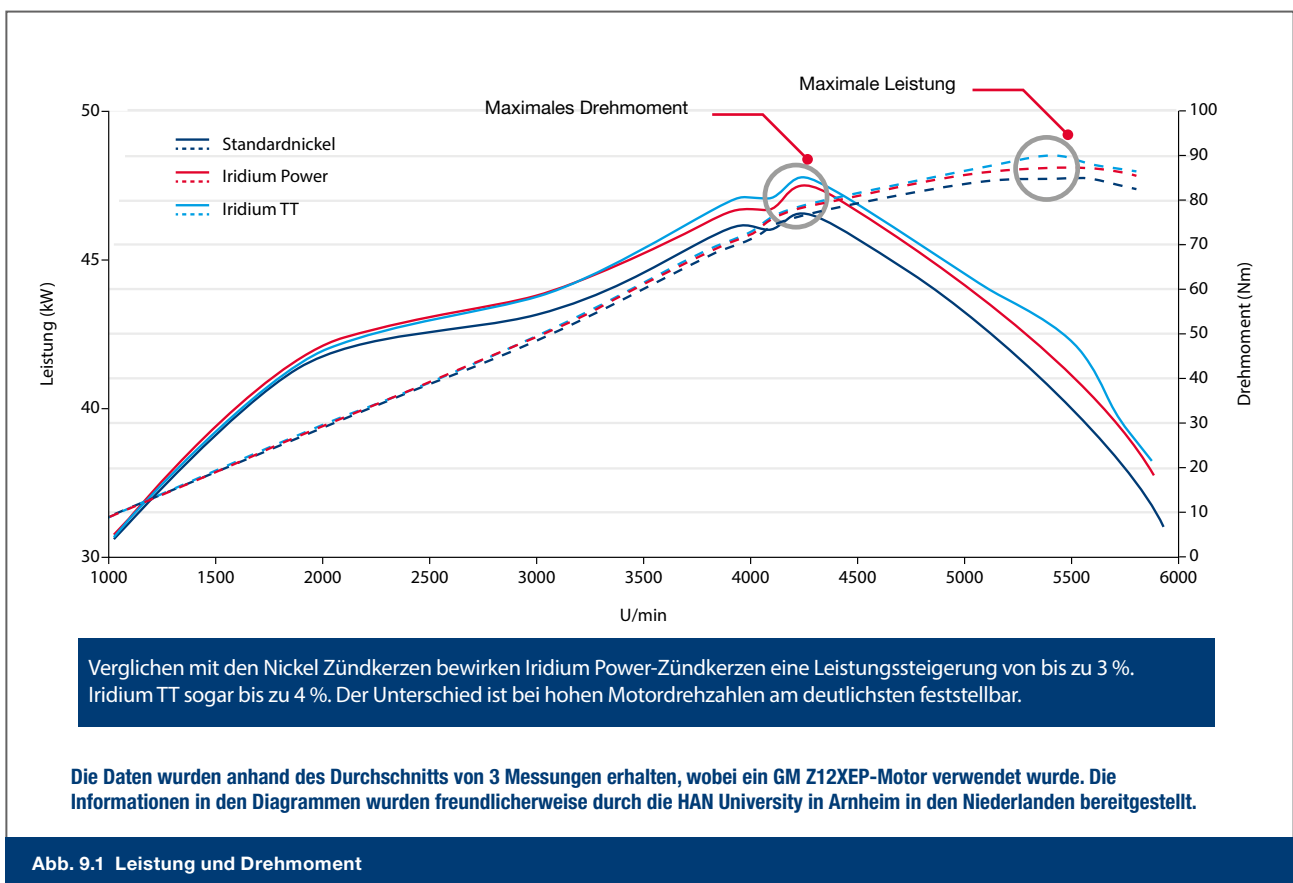
9.2. Leistungsabgabe

Das Upgrade von Nickel-Zündkerzen auf Iridium-Zündkerzen kann beträchtliche Steigerungen von Motorleistung und Drehmoment bewirken.

Die Diagramme in Abb. 9.1 veranschaulichen die Verbesserungen, die durch die Verwendung von Iridium Power- und Iridium TT-Zündkerzen verglichen mit Standardkerzen des Nickeltyps erzielt werden können. Die Verwendung von Iridium Power-Zündkerzen führte zu einer Leistungssteigerung von bis zu 3 %, wobei Iridium TT-Zündkerzen eine Leistungssteigerung von bis zu 4 % aufwiesen, was insbesondere bei höheren Motordrehzahlen bemerkbar ist.

DENSO Iridium-Zündkerzen nutzen feinere Elektroden. Die Iridium TT arbeitet mit einer 0,7 mm feinen Masselektrode und einer noch feineren 0,4 mm Mittelelektrode.

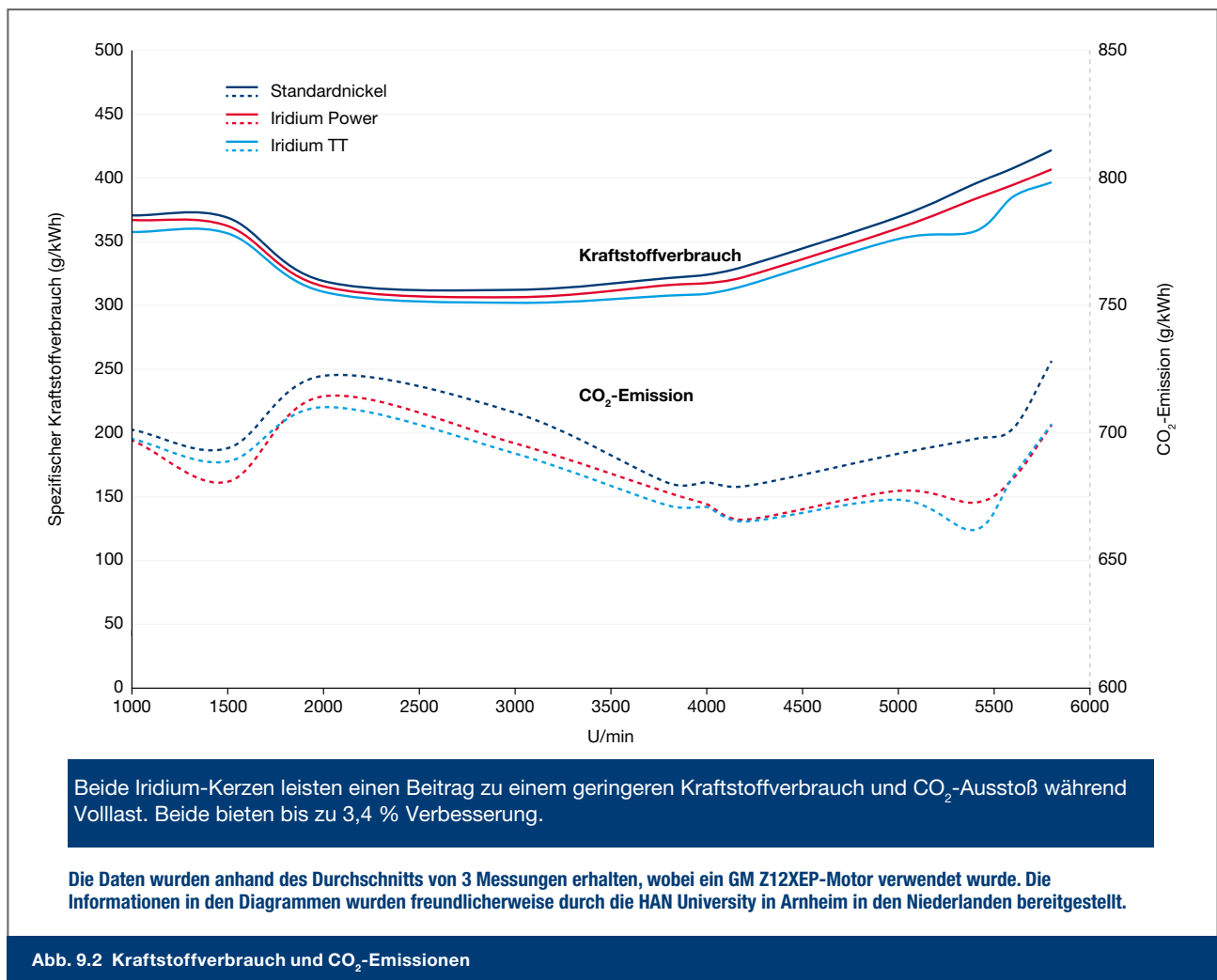
Diese feineren Elektroden lassen der Flamme mehr Raum und bieten ein viel geringeres Risiko des Auslöscheffekts verglichen mit den größeren Nickelelektroden. Die Flamme kann schneller wachsen, wodurch effektiv mehr Kraftstoff verbrannt und eine effizientere Verbrennung ermöglicht wird, sodass mehr Leistung erzeugt wird.



9.3. Kraftstoffeinsparung und Abgase

Das Upgrade von Nickel-Zündkerzen auf Iridium-Zündkerzen kann eine effizientere Kraftstoffnutzung bei Beschleunigung und hohen Motorlasten ermöglichen. Die Diagramme in Abb. 9.2 vergleichen wiederum Iridium Power- und Iridium TT-Zündkerzen mit Standard-Nickelzündkerzen. Die Diagramme zeigen den verbesserten Kraftstoffverbrauch bei der gleichen Menge erzeugter Motorleistung (kWh). Das Auto beschleunigt mit der gleichen Kraftstoffmenge schneller, sodass die Drosselklappe etwas früher geöffnet werden kann, wodurch Kraftstoff gespart wird.

Dieser zum Erbringen der gleichen Motorleistung reduzierte Kraftstoffverbrauch führt zu verringerten CO₂-Emissionen. Da der Kraftstoff während der Verbrennung effizienter im Motor als im Abgaskanal verbrannt wird, werden auch die anderen schädlichen Abgase verringert.



9.4. Ruhiger Leerlauf, Fehlzündungen und Anlassen

Leerlaufdrehzahlprobleme

Verbrennungsmotoren sind für das Bereitstellen von Leistung ausgelegt. Jedoch können Motoren eine lange Zeit im Leerlauf verbringen und übertragen in dieser Phase keinerlei Leistung auf die Räder. Um während des Leerlaufs Kraftstoff zu sparen und ein niedriges Abgasniveau zu gewährleisten, ist die Leerlaufdrehzahl auf einen niedrigen Drehzahlwert festgelegt. Allerdings befinden sich während des Leerlaufs sehr wenig Luft und Kraftstoff in der Brennkammer und die Luftverwirbelung ist niedrig. In Verbindung mit der niedrigen Verwirbelung erschwert die kleine Menge an Luft-/Kraftstoffgemisch die Zündung des Gemischs, was oft Fehlzündungen verursacht und zu einem unruhigen Leerlauf führt.

Einige Motorenhersteller akzeptieren eine Leerlauf-Fehlzündungsrate von bis zu 30 % (insbesondere bei 4 oder mehr Zylindern), wenn dadurch eine geringere Leerlaufdrehzahl ermöglicht wird. Eine geringere Leerlaufdrehzahl führt zu geringeren Emissionen, als ein Leerlauf mit höherer Drehzahl ohne Fehlzündungen.

Durch das Upgrade auf eine Zündkerze mit höherer Leistung wie die Iridium TT reduziert die durch die kleineren Elektroden verbesserte Zündwilligkeit die Gefahr von Fehlzündungen, was einen ruhigeren Leerlauf unterstützt. Mit weniger Fehlzündungen und einem ruhigeren Motorlauf wird weniger Kraftstoff in den Abgaskanal vergeudet, das heißt, dass weniger unverbrannter Kraftstoff in die Abgasanlage gelangt, wodurch Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen reduziert werden. Der ruhigere Motorlauf ermöglicht auch eine niedrigere Leerlaufdrehzahl, was den Kraftstoffverbrauch und die Abgase weiter reduziert.

Große Unterschiede beim verbesserten Leerlauf können bei Motoren mit 1, 2 oder 3 Zylindern festgestellt werden, insbesondere bei Motorrädern mit einem V2-Motor.

Startprobleme

Dieselben Probleme, die während des Leerlaufs auftreten, können auch während des Anlassens vorkommen, da die Drehzahl des Motors beim Starten/Anlassen sehr niedrig ist. Zudem ist während des Startens weniger Luft-/Kraftstoffgemisch in der Brennkammer, alle Oberflächen sind noch sehr kalt und es gibt nur einen sehr niedrigen Gasstrom mit begrenzter Verwirbelung, was die Zündung ebenfalls erschwert. Ein weiteres Problem tritt auf, da die Batteriespannung während des Anlassens abfällt, was die Fähigkeit der Zündspule reduzieren kann, die erforderliche Zündspannung und Energie zu erzeugen. Dieses Problem ist bei älteren Zündanlagen, die nicht in der Lage sind, die Verweildauer zum Ausgleichen der verringerten Batteriespannung zu erhöhen, stärker bemerkbar. Aber selbst bei modernen Zündanlagen nimmt die Fähigkeit, einen guten Funken bereitzustellen, auch dann ab, wenn der Motor nur langsam startet und daher die Batteriespannung weiter reduziert oder wenn die Batteriespannung vor dem Start bereits niedrig ist.

Einige der Iridium Power-Zündkerzen mit niedrigerem Wärmewert haben standardmäßig eine Zündstrecke von 1,1 mm. Bei einigen Motorrädern (insbesondere älteren Motorrädern) sind die Zündanlagen möglicherweise nicht in der Lage, ausreichend Spannung zur Funkenenerzeugung bei einer so großen Zündstrecke bereitzustellen (insbesondere während des Anlassens). In diesen Ausnahmefällen kann der Elektrodenspalt auf 0,8 mm verringert werden. Beim Ändern der Zündstrecken bei Zündkerzen mit Iridium-Elektroden müssen Sie besonders sorgfältig vorgehen und immer geeignete Spezialwerkzeuge verwenden, um eine Beschädigung der feinen Mittelelektrode zu vermeiden.

Das Starten kann durch das Upgrade auf eine leistungsfähigere Kerze wie die DENSO Iridium-Zündkerze verbessert werden. Sie benötigt weniger Spannung und stellt eine verbesserte Zündleistung bereit.

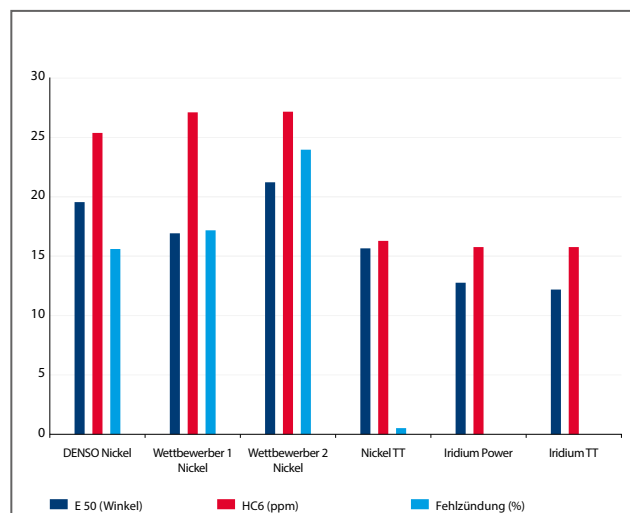
Verbesserte Zündleistung im Leerlauf

Abb. 9.3 zeigt die Ergebnisse eines Tests bei Leerlaufdrehzahl. Verglichen wurden DENSO Nickel-Zündkerzen und Nickelkerzen zweier Wettbewerber mit DENSO Nickel TT-, Iridium Power- und Iridium TT-Zündkerzen.

Die Ergebnisse zeigen zu Beginn den Winkel nach dem OT, wenn 50 % des Kraftstoffs verbrannt sind (E50-Winkel). Bei der Zündkerze eines Wettbewerbers erfolgen 50 % der Kraftstoffverbrennung mehr als 20° nach dem OT, was bedeutet, dass der Kolben im Zylinder bereits eine beträchtliche Distanz nach unten zurückgelegt hat. Die Ausdehnung der Gase und der Druckanstieg aufgrund der Verbrennung bewirken daher nicht die höchstmögliche Kraft auf den Kolben.

Mit der DENSO Iridium TT-Zündkerze wird eine Kraftstoffverbrennung von 50 % bei ungefähr 12° nach dem OT erreicht. Dies bedeutet, dass der Kolben näher am OT ist und dass der Druckanstieg einen viel größeren Effekt auf das Herabdrücken des Kolbens im Zylinder hat. Tatsächlich ermöglicht die Verwendung einer Iridium TT-Zündkerze eine effektivere Verbrennung, was die Laufruhe des Leerlaufs verbessert und einen leichteren Motorstart ermöglicht.

Die Diagramme zeigen auch eine Verringerung der Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) während der Verbrennung (HC6), wenn die DENSO Nickel TT verwendet wird. Die HC-Emissionen werden bei Verwendung von DENSO Iridium-Zündkerzen sogar noch stärker reduziert. Diese Verringerung der HC-Emissionen wird großteils durch die Verringerung des Prozentsatzes an Fehlzündungen (Fehlzündung in %) erzielt, die von fast 25 % bei Verwendung einer Wettbewerber-Zündkerze auf fast Null bei Verwendung der DENSO Nickel TT-Zündkerze reduziert werden. Wenn Iridium Power- oder Iridium TT-Zündkerzen verwendet werden, können die Fehlzündungen sogar vollständig beseitigt werden.



Die Daten wurden anhand von durchschnittlich 3 Messungen erhalten, wobei ein GM Z12XEP-Motor verwendet wurde. Die Informationen in den Diagrammen wurden freundlicherweise durch die HAN University in Arnheim in den Niederlanden bereitgestellt.

Abb. 9.3 Zündkerzenleistung bei Leerlaufdrehzahl

9.5. LPG und CNG umgerüstete Autos

Die Zündung des Luft-/Kraftstoffgemischs ist sowohl für Autogas (LPG) als auch Erdgas (CNG) schwieriger als bei Motoren, die mit Benzin betrieben werden. Der Grund ist, dass LPG und CNG als Gas eingespritzt werden, während Benzin in flüssiger Form eingespritzt wird. Gase erfordern eine höhere Ionisierungsspannung zur Funkenerzeugung als Flüssigkeiten. Gas nimmt auch mehr Platz als eine Flüssigkeit ein, sodass in der Brennkammer weniger Platz für Frischluft vorhanden ist; dies verringert die Menge an Luft-/Kraftstoffmolekülen in der Nähe der Elektroden. Folglich besteht ein höheres Risiko von Fehlzündungen.

Der höhere Zündspannungsbedarf zum Zünden von LPG/ CNG belastet Zündspule und Zündkerze stärker. Daher wird in vielen Fällen eine Zündkerze mit einer kleineren Zündstrecke ausgewählt, um den Spannungsbedarf zu senken, die kleinere Zündstrecke verringert aber auch die Zündleistung. Eine Alternative zur Reduktion der Lasten an Spulen und Kerzen besteht in der Verwendung von Zündkerzen mit feinen Elektroden wie den DENSO Iridium-Zündkerzen, die geringere Spannungen erfordern, sodass größere Elektrodenabstände beibehalten werden können.

Bei einigen Anwendungen wie turboaufgeladenen Motoren muss der Abstand möglicherweise auf 0,8 mm verringert werden.

LPG und CNG verbrennen bei einer höheren Temperatur als Benzin, was zu größeren Änderungen der Elektrodentemperatur während der verschiedenen Motortakte führt. Diese größeren Temperaturschwankungen reduzieren die Standzeit einer Zündkerze um etwa 20-30 %; bei einem Upgrade auf Iridium-Zündkerzen mit langer Lebensdauer wird die Standzeit verlängert, wodurch die Gesamtkosten sinken.

Um die beste Iridium-Zündkerze für Ihre LPG- oder CNG-Anwendung zu finden, schauen Sie im DENSO e-Katalog nach.



denso-am.de/e-catalogue

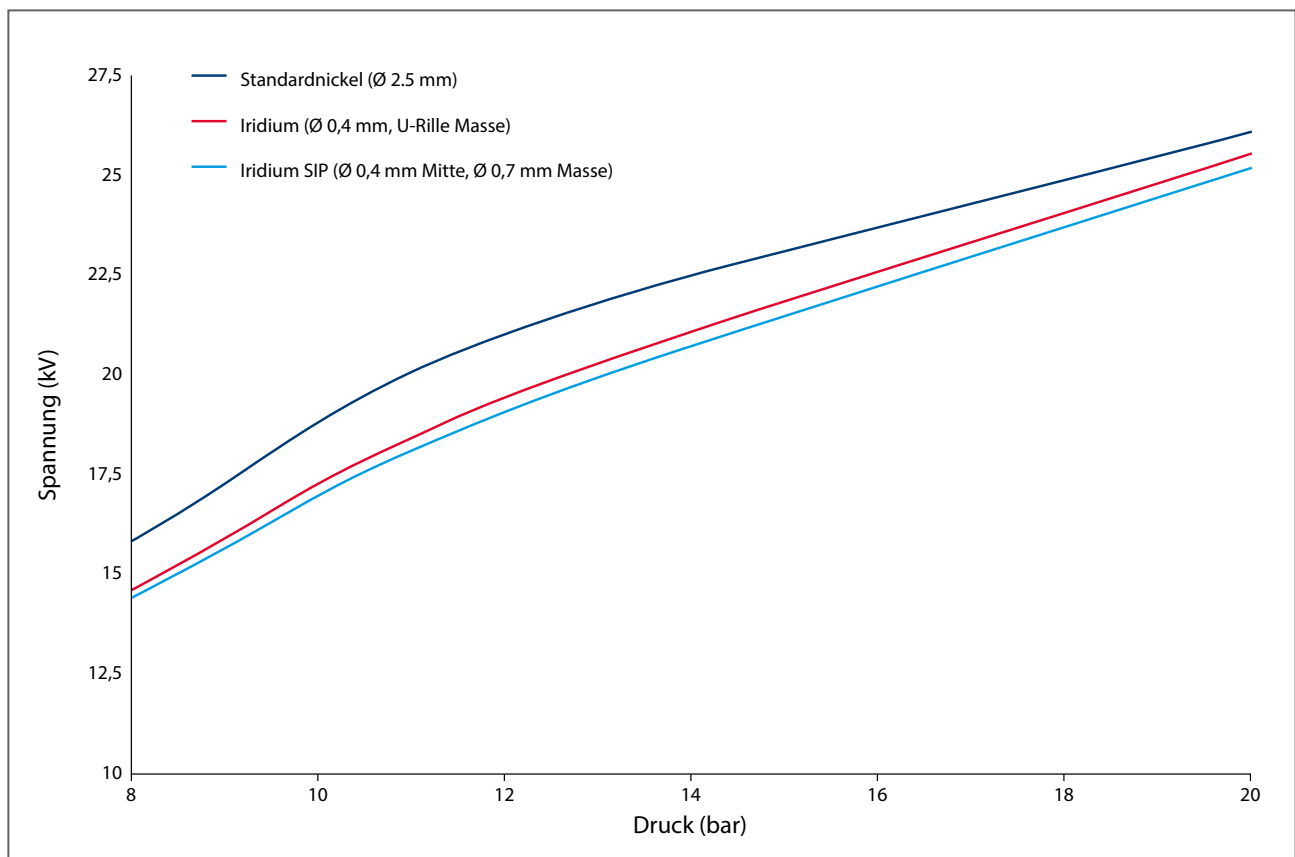


Abb. 9.4 Spannungsbedarf je Zündkerzentyp

9.6. Tuning und Rennsport

Wenn ein Motor getunt wurde, um die bestmögliche Leistung zu erbringen, empfiehlt sich die Verwendung einer Zündkerze, die auf die Motorleistung abgestimmt ist (siehe Abschnitte 8.3 und 8.4). Beim Auswählen der richtigen Zündkerze müssen einige Punkte berücksichtigt werden.

Als Ausgangspunkt sollten die Abmessungen der Zündkerze zum Zylinderkopf passen und in den meisten Fällen kann die Originalzündkerze als Referenz verwendet werden.

Zündkerzentyp

Zündkerzen wie die DENSO Iridium Power, die sich als Upgrade eignen, erbringen in vielen Bereichen sehr gute Leistungen. Sie erhöhen die Zündwilligkeit und erzielen zuverlässige Ergebnisse, egal bei welcher Anwendung. In den meisten Fällen ist die DENSO Iridium Power die ideale Zündkerze, insbesondere wenn ein Auto oder ein Motorrad im Straßenverkehr oder gelegentlich im Rennsport benutzt wird.

Wenn ein Motor stark getunt wurde und für die ausschließliche Verwendung auf Rennstrecken ausgelegt ist, können spezielle Rennkerzen wie die DENSO Iridium Racing die bessere Lösung darstellen. Rennkerzen bestehen aus noch härteren Materialien, die den hohen Druckspitzen innerhalb des Motors standhalten. Sie sind mit Iridium-Mittelelektroden und Platin-Masseelektroden ausgestattet und bieten die zuverlässigste Zündleistung, die auf dem Markt verfügbar ist.

Iridium Racing-Zündkerzen sind in zwei Typen lieferbar: schräge und flache Ausführung (Abb. 9.5). Die schräge Ausführung weist eine abgeschrägte Masseelektrode auf, die für die Verwendung an Saugmotoren und turboaufgeladenen Motoren mit Ladedrücken von bis zu 1,3 bar (19 psi) vorgesehen sind.

Die flache Ausführung der Rennzündkerze mit einer flachen Masseelektrode ist für die Verwendung bei sogar noch höheren Ladedrücken und für Motoren vorgesehen, die mit einem Distickstoffoxid-System ausgerüstet sind.

Wärmewert

Ein Motor mit höherer Leistungsabgabe ist gleichbedeutend mit höheren Temperaturen innerhalb der Brennkammer. Folglich muss der Wärmewert der Zündkerze entsprechend ausgewählt werden, da Motoren mit einer höheren Leistungsabgabe eine höhere Wärmewertzahl benötigen (Abb. 9.6). Aber auch der Fahrstil ist wichtig, da Motoren in Straßenfahrzeugen nicht dieselben Temperaturen wie Fahrzeuge erreichen, die auf der Rennstrecke eingesetzt werden; daher ist für die Verwendung im Straßenverkehr möglicherweise ein geringerer Wärmewert erforderlich. In einigen Fällen könnte im Winter ein etwas geringerer Wärmewert erforderlich sein, um bessere Kaltstarts zu ermöglichen.

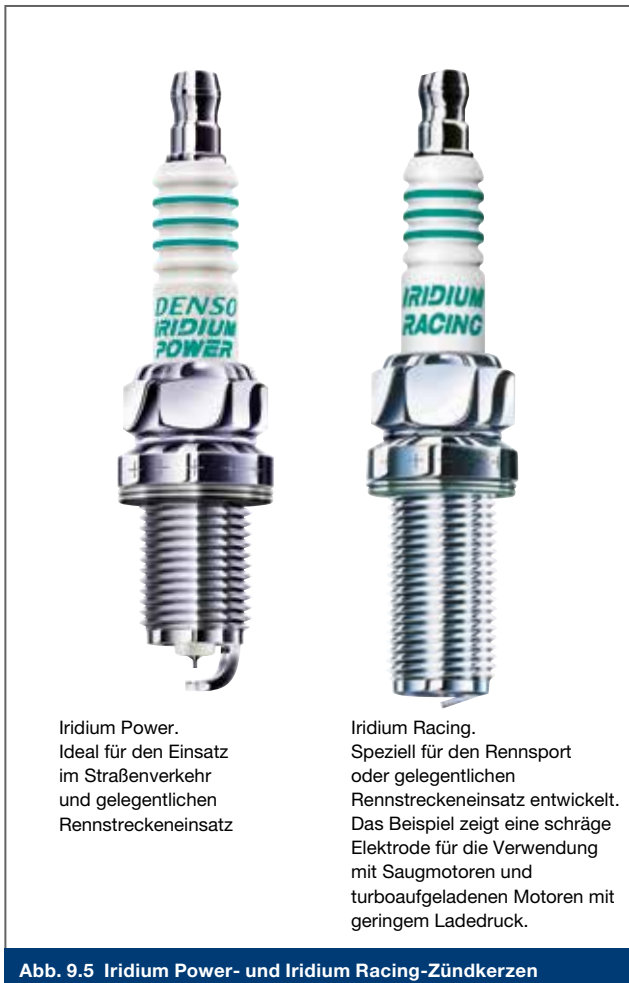


Abb. 9.5 Iridium Power- und Iridium Racing-Zündkerzen

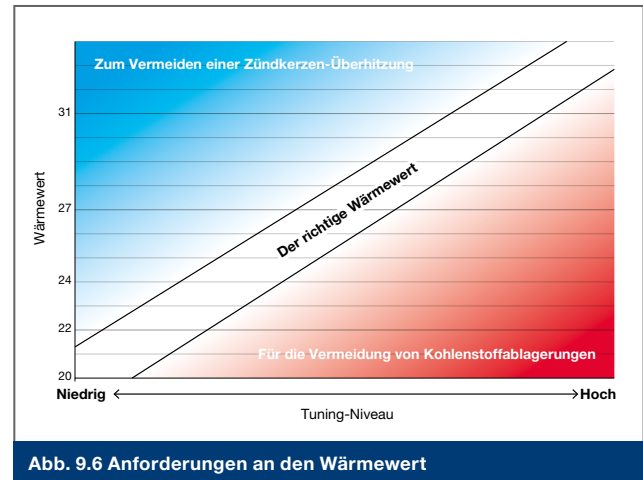


Abb. 9.6 Anforderungen an den Wärmewert

Wenn Sie Hilfe beim Auswählen der richtigen Zündkerzen für ein bestimmtes Fahrzeug benötigen, können Sie auf die Spezialisten von DENSO zählen. Weitere Informationen erhalten Sie über die Website: denso-am.de/produkte/automotive-aftermarket/zuendung/zuendkerzen



Sie können sich auch an die Spezialisten von DENSO über die folgende E-Mail-Adresse wenden: info.am-sales@denso-auto.de

10. FAQ, INSTALLATION UND FEHLERBEHEBUNG

10.1. FAQ

Wie wähle ich die richtige Zündkerze aus?

Es müssen viele Faktoren berücksichtigt werden, darunter Abmessungen, Überstand und Wärmewert. Die einfachste Methode zum Ermitteln der richtigen Zündkerze erfolgt über den DENSO e-Katalog (Abb. 10.1 und 10.2).

Mit dem e-Katalog können Sie die richtigen DENSO Teile auf der Grundlage von Marke und Modell oder Querverweisen finden.

Welche Zündkerze sollte ich für LPG verwenden?

LPG- und CNG-Motoren erfordern eine höhere Zündkerzenleistung als Benzinmotoren. Das TT-Sortiment bietet ein Upgrade, um die LPG/CNG-Anforderungen zu erfüllen. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel 9 Abschnitt 9.4.

Sollte ich den Elektrodenabstand ändern?

DENSO Zündkerzen werden mit einem voreingestellten Spalt hergestellt.

Bei Nickel-Kerzen muss der Spalt möglicherweise angepasst werden, was insbesondere für Motorräder gilt. Verwenden Sie immer ein spezielles Zündkerzenwerkzeug zum Ändern des Elektrodenabstands. Ändern Sie nicht den Elektrodenabstand an Platin-, Iridium- oder Twin Tip-Zündkerzen, da die feinen Elektroden beschädigt werden könnten.

Was ist Frühzündung?

Frühzündung oder Selbstzündung tritt auf, wenn das Luft-/Kraftstoffgemisch verbrennt, bevor der Funke zum vorgesehenen Zeitpunkt auftritt. Dies kann sich aufgrund einer heißen Oberfläche in der Brennkammer ereignen. Frühzündung kann durch folgende Faktoren verursacht werden:

- (1) Eine überhitzte Spitze der Zündkerze (falscher Wärmewert ist ausgewählt).
- (2) Das Auslassventil, wenn es unzureichend gekühlt wird.
- (3) Kohlenstoffablagerungen, die aufgrund eines vorherigen Verbrennungstakts glühen.

In Abschnitt 5.3 erhalten Sie mehr Informationen zur Frühzündung.

Was ist Motorklopfen (Detonation)?

Motorklopfen ist oft ein Ergebnis von Frühzündung. Anstatt nach und nach zu verbrennen, explodiert das Luft-/Kraftstoffgemisch auf unkontrollierte Weise. Motorklopfen kann für die Zündkerze fatal sein und ernsthafte Motorschäden verursachen.

In Abschnitt 5.3 erhalten Sie mehr Informationen zum Motorklopfen.



Um die beste Zündkerze für Ihr Auto zu ermitteln, verwenden Sie den DENSO e-Katalog (Abb. 10.1 und 10.2) unter:

denso-am.de/e-catalogue

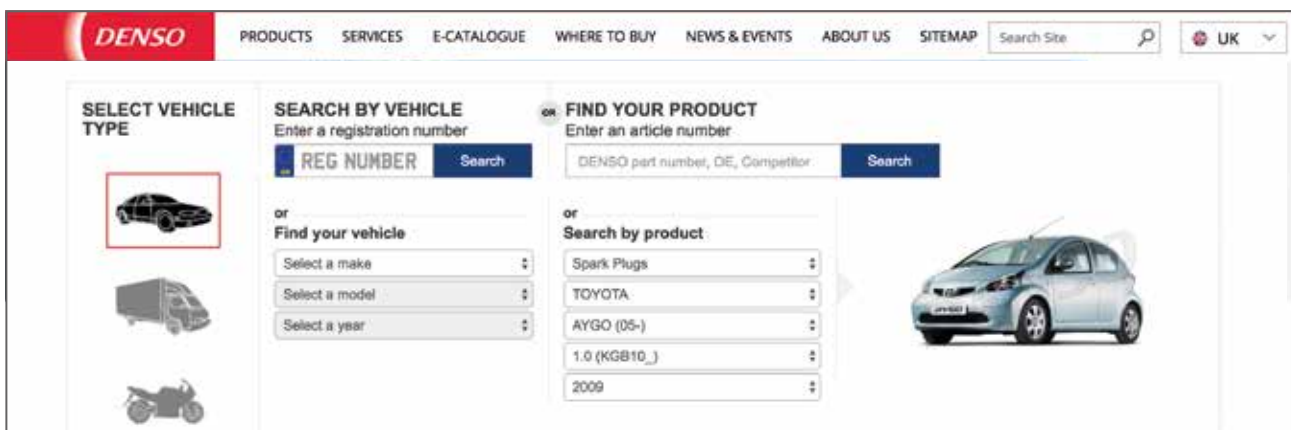


Abb. 10.1 Fahrzeugauswahl im DENSO e-Katalog

Spark Plugs							
kW	Engine Codes	Notes	Application years	Part number	TT	Iridium LPG/CNG	Qty of Fit
50	1KR-FE		07/05-05/11	+ K16HR-U11	+ KH16TT	+ IKH16TT	3

Abb. 10.2 Suchergebnisse für Zündkerzenoptionen im DENSO e-Katalog

Wie oft sollte ich meine Zündkerzen ersetzen?

Im Allgemeinen wird das Austauschintervall durch den Fahrzeughersteller angegeben. DENSO Zündkerzen richten sich nach demselben Intervall. Beim Upgraden der Zündkerzen ändert sich möglicherweise das Intervall.

Durch den Betrieb mit LPG oder CNG wird die Lebensdauer einer Zündkerze um 25-30 % verringert. Es wird empfohlen, regelmäßig den Zustand der Zündkerze zu prüfen und diese zu ersetzen, wenn sich darauf Ablagerungen gebildet haben.

Sollte ich Fett auf das Zündkerzengewinde auftragen?

Wenn ein Gewindeschmiermittel wie Fett auf das Gewinde aufgetragen wird, dann wird die Zündkerze beim Anwenden des empfohlenen Anzugmoments wahrscheinlich zu stark festgedreht; dies kann Schäden an der Zündkerze verursachen. Im Anschluss daran können Vibrationen dazu führen, dass sich die Zündkerze lockert. Daher empfiehlt DENSO, dass kein Gewindeschmiermittel verwendet wird.

Nur in wenigen Ausnahmefällen (wie bei einigen Gabelstaplern mit LPG-Antrieb) kann eine kleine Menge Fett erforderlich sein. In einem solchen Fall wird die Zündkerze bereits in vorab geschmiertem Zustand ausgeliefert (siehe Abschnitt 10.2).

Was ist der Unterschied zwischen Seitenelektroden und Mehrfach-Masseelektroden?

Bei Motoren mit Direkteinspritzung kann das Luft-/Kraftstoffgemisch in der Nähe der Zündkerze sehr fett sein, was zu Ablagerungen auf dem Keramikisolator führen kann. Kohlenstoff kann für die elektrische Energie einen alternativen Pfad entlang des Isolators zum Zündkerzengehäuse erzeugen (Abb. 10.3a), der zu einer Fehlzündung führt.

Durch das Hinzufügen von Seitenelektroden (Abb. 10.3b) wird der Funke vom Isolator auf die Seitenelektrode weggeleitet, was eine Fehlzündung verhindert. Wenn die Verbrennung in der Nähe der Seitenelektroden beginnt, brennt die erzeugte Hitze die Kohlenstoffablagerungen ab. Während des nächsten Takts ist der Isolator dann sauber und der Funke springt wieder zwischen der Mittelelektrode und Haupt-Masseelektrode über.

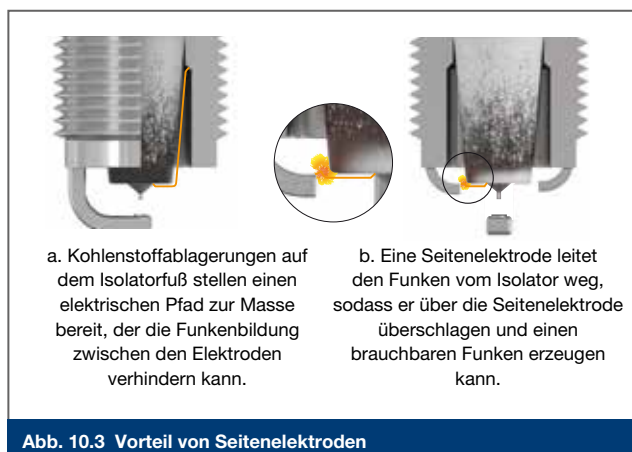


Abb. 10.3 Vorteil von Seitenelektroden

Von welcher Leistungssteigerung kann ich bei einem Upgrade meiner Zündkerzen ausgehen?

Beim Upgraden von Zündkerzen auf Iridium TT oder Iridium Power wurden Verbesserungen der Motorleistung von bis zu 5 % gemessen. Allerdings hängt dies vom Motor ab. Moderne Motoren sind oft bereits mit Hochleistungs-Zündkerzen ausgerüstet, sodass der Unterschied nicht so groß ist. Die Hauptverbesserungen bei der Leistung sind im Allgemeinen ein besseres Startverhalten und ein geschmeidigerer Motorlauf. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel 9 zum Upgraden Ihrer Zündkerze.

Kann ich eine Zündkerze mit mehreren Masseelektroden durch eine Zündkerze mit einer Masseelektrode ersetzen?

Einige Motor- und Fahrzeughersteller bevorzugen eine Zündkerze mit mehreren Masseelektroden wegen der verlängerten Lebensdauer durch die zusätzlichen Masseelektroden (Abb. 10.4). Es ist eine sehr günstige Lösung, um das Wechselintervall der Zündkerze ohne die Verwendung von Edelmetallen zu verlängern.

Zündkerzen mit mehreren Masseelektroden sind für eine lange Standzeit und weniger für eine höhere Leistung optimiert. Wenn eine Zündkerze mit mehreren Masseelektroden durch eine Zündkerze mit einer Masseelektrode ersetzt wird, verbessert dies die Leistung, sofern Sie die kürzere Standzeit der Zündkerze mit einer Masseelektrode berücksichtigt.

Wenn Sie ein Upgrade einer Zündkerze mit mehreren Masseelektroden auf eine Iridium-Zündkerze mit langer Lebensdauer wie die DENSO Iridium TT vornehmen, dann ist die Lebensdauer sogar noch länger als bei der Zündkerze mit mehreren Masseelektroden. Gleichzeitig führt dies zu einer verbesserten Leistung.

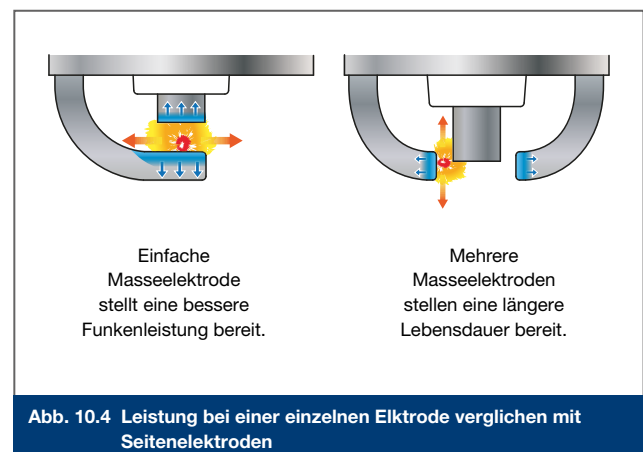


Abb. 10.4 Leistung bei einer einzelnen Elktrode verglichen mit Seitenelektroden

10.2. Korrekter Zündkerzeneinbau

Ausbau der alten Zündkerzen

An Zündanlagen, an denen die Zündkerzen mit Zündkabeln verbunden sind, sollten die Kabel idealerweise durch Ziehen am Kerzenstecker am Kerzenende von der Zündkerze abgezogen werden, anstatt am dünneren Abschnitt des Zündkabels zu ziehen. In einigen Fällen, in denen die Zündkerze tief im Zylinderkopf versenkt angebracht ist, könnte ein Ausbauwerkzeug für das Zündkerzenkabel erforderlich sein. Überprüfen Sie auch den Zustand der Zündkabel auf Risse, Brüche oder Verunreinigung, die zu Leckagen der einem Spannungsabfluss weg von der Zündkerze führen könnten. Ersetzen Sie diese, wenn sie sich in keinem guten Zustand befinden.

Wenn die Zündspulen direkt auf der Zündkerze angebracht sind, müssen Sie die jeweils gültigen fahrzeugspezifischen Ausbauanleitungen zur Spule heranziehen.

Vor dem Ausbauen der alten Zündkerze müssen Sie sich vergewissern, dass Öl, Sand und jegliche anderen Verunreinigungen auf der Außenseite der Zündkerze entfernt werden, sodass sie beim Ausbau der Zündkerze nicht in das Motorinnere gelangen können. Entfernen Sie die alte Zündkerze mithilfe eines Zündkerzenschlüssels mit der richtigen Sechskantgröße für die Zündkerze.

Installation, Anzugsmoment oder -winkel

Die meisten Zündkerzen für moderne Motoren werden mit einem voreingestellten Elektrodenabstand ausgeliefert; wenn dieser jedoch angepasst werden muss, müssen Sie ein spezielles Einstellwerkzeug verwenden. Gehen Sie beim Ändern des Abstands von Platin- oder Iridium-Zündkerzen besonders sorgfältig vor; die Elektroden können leicht beschädigt werden.

Vergewissern Sie sich, dass die neue Zündkerze ordnungsgemäß an der Gewindebohrung ausgerichtet ist, und ziehen Sie sie von Hand an, bis sie vollständig sitzt.

Idealerweise sollten Sie einen Drehmomentschlüssel und die richtige Größe der Stecknuss mit der empfohlenen Drehmomenteinstellung verwenden (laut Angabe im Drehmoment-Diagramm in Abb. 10.5). Wenn ein Drehmomentschlüssel nicht verfügbar ist, verwenden Sie den empfohlenen Anzugswinkel.

Es ist sehr wichtig, das richtige Anzugsmoment zu verwenden, wenn Sie Zündkerzen installieren. Wenn ein unzureichendes Drehmoment angewandt wird, können Leckagen auftreten und einen Druckverlust im Brennraum insbesondere während der Verdichtungs- und Zünd-/Verbrennungstakte verursachen. Wenn zu viel Drehmoment angewandt wird, dehnt sich das Gewinde, was die Wärmeableitung beeinträchtigen oder mechanische Belastung innerhalb der Zündkerze bewirken und sogar einen Bruch des Keramikisolators verursachen kann. Ein beschädigter oder gebrochener Isolator führt zu Leckage an der Zündkerze oder zu einer Beeinträchtigung der thermischen Eigenschaften der Zündkerze, was zu Überhitzung, Frühzündung und in einige Fällen zu Motorschäden führen kann.


Schließen Sie die Zündspulen- oder Zündkabel wieder an und vergewissern Sie sich, dass sie richtig auf dem Anschluss der Zündkerze sitzen.


DENSO rät von der Verwendung jeglicher Gewindeschmiermittel ab. Wenn ein Gewindeschmiermittel wie Fett auf das Gewinde aufgetragen wird, könnte das Anziehen mit dem empfohlenen Drehmoment zu übermäßigem Anziehen führen und die Dichtung beschädigen. Nur in Ausnahmefällen ist ein Schmiermittel erforderlich. In diesem Fall wird die DENSO Zündkerze einsatzbereit bereits vorgefettet in der Packung ausgeliefert.


Die Gewährleistung der Zündkerze erlischt, wenn ein fehlerhaftes Anzugsdrehmoment angewendet wird.


Gewindegröße	Anwendungsarten	Empfohlenes Drehmoment	Empfohlener Winkel	
			Neue Zündkerze	Gebrauchte Zündkerze
M8	Alle Arten	8 – 10 Nm	1 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M10	Andere Typen als unten gezeigt	10 – 15 Nm	1/3 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M10	Typen UFE, IUH, VUH, VNH	10 – 15 Nm	2/3 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M10	Edelstahl-Dichtungstyp (endet mit "S")	10 – 15 Nm	3/4 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M12	Alle Arten	15 – 20 Nm	1/3 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M14	Alle anderen Typen als unten gezeigt	20 – 30 Nm	1/2 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M14	Edelstahl-Dichtungstyp (endet mit "S" oder "G")	20 – 30 Nm	2/3 Umdrehung	1/12 Umdrehung
M14	Kegelsitz alle Typen	20 – 30 Nm	1/16 Umdrehung	1/16 Umdrehung
M18	Alle Arten	30 – 40 Nm	1/4 Umdrehung	1/12 Umdrehung


Abb. 10.5 Anzugsmomente und -winkel für die Zündkerze











WARNUNG verbotene Verwendung

- > Verwenden Sie DENSO Zündkerzen niemals in Motoren von Luftfahrzeugen jeglicher Art, einschließlich Flugzeugen, Helikoptern, Segelflugzeugen und Drohnen. DENSO Zündkerzen sind weder für Luftfahrzeuge ausgelegt noch dafür hergestellt: Die Verwendung könnte möglicherweise aufgrund von Motorfehlfunktionen zu Flugzeugabstürzen oder anderen Unfällen führen.
- > Verwenden Sie DENSO Zündkerzen, die in unserem Katalog gelistet sind, niemals in Motoren von Generatoren und gasbetriebenen Wärmepumpen-Klimaanlagen. Die DENSO Zündkerzen sind nicht für eine solche Verwendung ausgelegt und nicht dafür hergestellt. Die Verwendung könnte möglicherweise zu Störungen und Schäden einschließlich des Stopps von Stromerzeugung oder Wärmeerzeugung führen.
Ein separater Katalog für DENSO Zündkerzen, die speziell für Generatoren (Gasmotoren) konzipiert sind, ist verfügbar. Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an Ihren DENSO Ansprechpartner.
- > Verwenden Sie DENSO Zündkerzen niemals für die Zündung von Gasbrennern. Die DENSO Zündkerzen sind nicht für eine solche Verwendung ausgelegt und nicht dafür hergestellt. Eine solche Verwendung kann zu Zündausfällen oder Schäden an der Ausrüstung aufgrund von Überhitzung führen.

10.3. Fehlerbehebung

Es gibt verschiedene Symptome beim Zündvorgang, die anfänglich wie Zündkerzenfehler wirken können; viele dieser Symptome können jedoch durch Fehler in anderen Fahrzeugsystemen oder andere Probleme verursacht werden, die den Betrieb der Zündkerzen beeinträchtigen.

Wenn Probleme auftreten, müssen Sie sich zu Anfang vergewissern, dass es sich bei den verwendeten Zündkerzen um den richtigen Typ für den Motor handelt und dass die Zündkerzen weiterhin innerhalb ihrer empfohlenen Nutzdauer liegen. Prüfen Sie den Zustand der Elektroden und prüfen Sie auf Risse oder Schäden am Isolator.

Die folgende Liste weist auf einige der einfacher zu bestimmenden Probleme in Zusammenhang mit der Zündung hin, die durch eine eingehende Betrachtung von Elektroden, Isolatorfuß und Zündkerzengehäuse diagnostiziert werden können, was oft als „Lesen“ der Zündkerze bezeichnet wird.

Normaler Betrieb

Aussehen: Hellgraue oder hellbraune Ablagerungen und leichte Elektrodenerosion.

Kohlenstoffablagerung

Aussehen: Trockener, weicher schwarzer Kohlenstoff auf Isolator und Elektroden.

Ergebnisse: Schlechter Start, Fehlzündungen insbesondere bei Beschleunigung und unter Bedingungen mit hoher Last.

Mögliche Ursachen: Zu fette Luft-/Kraftstoffmischungen, schlechte Zündleitungen, Wärmewert der Zündkerze zu kalt. Bei älteren Fahrzeugen oder Fahrzeugen mit anpassbarer Zündsteuerung und Gemischbildung können die Symptome durch einen verzögerten/verspäteten Zündzeitpunkt und Vergaserfehler wie ein fehlerhaftes Kaltstart-/Choke-System verursacht werden.

Blei Ablagerungen

Aussehen: Gelbe oder hellbraune zunderartige Ablagerungen oder eine glänzende glasurähnliche Beschichtung auf dem Isolator.

Ergebnisse: Fehlzündungen unter plötzlicher Beschleunigung oder Bedingungen mit hoher Last, aber unter normalen Betriebsbedingungen keine Beeinträchtigungen.

Mögliche Ursachen: Verwendung von Benzin mit hohem Bleigehalt.

Überhitzung

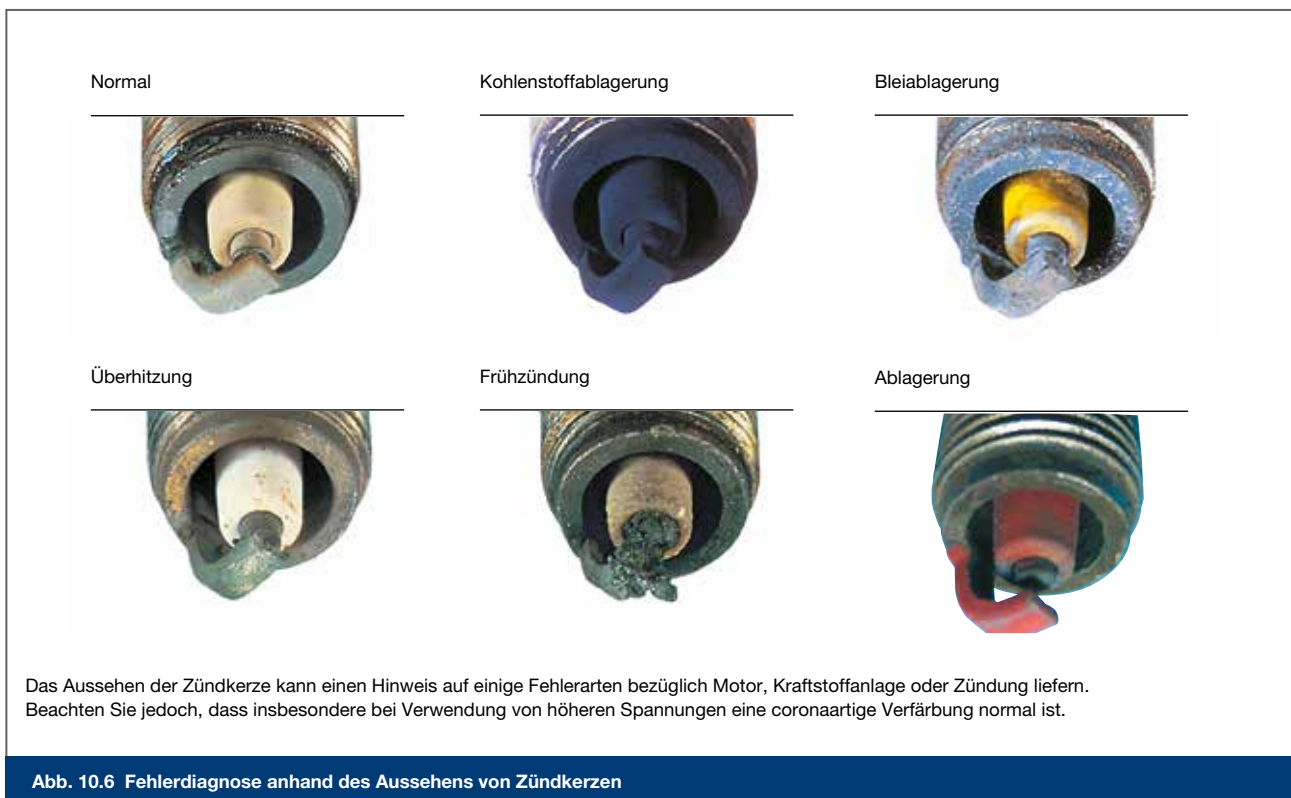
Aussehen: Ein extrem weißer Isolator mit kleinen schwarzen Ablagerungen und vorzeitigen Erosions- oder Schmelzschäden an der Elektrode.

Ergebnisse: Leistungsverlust insbesondere bei hoher Drehzahl/ hoher Last.

Mögliche Ursachen: Zündkerze unzureichend festgezogen, Motor unzureichend gekühlt, Wärmewert der Zündkerze zu hoch, schwere Detonation. Bei älteren Fahrzeugen oder Fahrzeugen mit anpassbarem Zündzeitpunkt könnte der Zündzeitpunkt zu weit vorverstellt sein.

Frühzündung

Aussehen: Eine geschmolzene oder verbrannte Mittel- und/oder Masselektrode, mit Blasen.



DENSO AUTOMOTIVE Deutschland GmbH

Freisinger Str. 21-23, 85386 Eching
Deutschland

Tel: +49 8165 944 424 | Fax: +49 8165 944 824
Info.am-sales@denso-auto.de

www.denso-am.de

