Konrad Reif (Hrsg.)

Bosch Fachinformation Automobil

Steuerung und Regelung von Ottomotoren

Zündkerzen

BOSCH
Technik fürs Leben

VIEWEG+
TEUBNER

Zündkerzen

Die Zündung des Luft-Kraftstoff-Gemischs im Ottomotor erfolgt elektrisch. Die elektrische Energie wird der Batterie entnommen und in der Zündspule zwischengespeichert. Die in der Zündspule erzeugte Hochspannung bewirkt einen Funkenüberschlag zwischen den Elektroden der Zündkerze im Brennraum des Motors. Die in dem Funken enthaltene Energie entzündet das verdichtete Luft-Kraftstoff-Gemisch.

Aufgabe

Aufgabe der Zündkerze ist es, beim Ottomotor die Zündenergie in den Brennraum einzubringen und durch den elektrischen Funken zwischen den Elektroden die Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs einzuleiten.

Durch den Aufbau der Zündkerze muss sichergestellt sein, dass die zu übertragende Hochspannung immer sicher gegen den Zylinderkopf isoliert und der Brennraum nach außen abgedichtet wird.

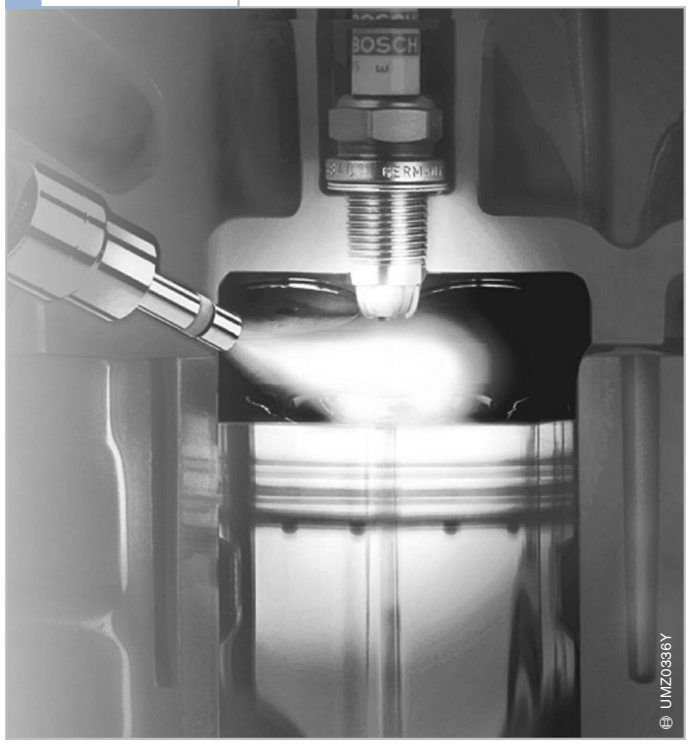
Die Zündkerze bestimmt im Zusammenwirken mit den anderen Komponenten des Motors, z. B. den Zünd- und Gemischaufbereitungssystemen, in entscheidendem Maße die Funktion des Ottomotors. Sie muss

- einen sicheren Kaltstart ermöglichen,
- über die gesamte Lebensdauer einen aussetzerfreien Betrieb gewährleisten und
- sie darf bei längerem Betrieb im Bereich der Höchstgeschwindigkeit nicht überhitzen.

Um diese Funktionen über die gesamte Lebensdauer der Zündkerze sicherzustellen, muss das richtige Zündkerzenkonzept schon sehr früh in der Entwicklungsphase der Motoren festgelegt werden. In Entflammungsuntersuchungen wird das optimale Zündkerzenkonzept hinsichtlich Abgasemission und Laufruhe bestimmt.

Ein wichtiger Kennwert der Zündkerze ist der Wärmewert. Die Zündkerze mit dem richtigen Wärmewert verhindert, dass sie im Betrieb so heiß wird, dass von ihr thermische Entflammungen ausgehen und den Motor schädigen.

1 Zündkerze im Ottomotor



Anwendung

Einsatzgebiete

Die Zündkerze wurde von Bosch im Jahr 1902 in Verbindung mit dem Magnetzünder zum ersten Mal in einem Pkw eingesetzt. Diese Komponente hat daraufhin einen unvergleichbaren Siegeszug in der Automobiltechnik angetreten.

Die Zündkerze findet in allen von einem Ottomotor angetriebenen Fahrzeugen und Geräten Verwendung – sowohl für Motoren, die nach dem Zweitakt- als auch nach dem Viertakt-Verfahren arbeiten. Sie ist zu finden in

- Pkw,
- Nkw,
- Zweirädern (Motorrad, Motorroller, Mofa),
- Booten und Schiffen,
- Land- und Baumaschinen,
- Motorsägen,
- Gartengeräten (z. B. Rasenmäher) usw.

Entsprechend der Vielfalt der Einsatzgebiete gibt es verschiedene Zündkerzenbauformen mit über 1200 Einzelvarianten.

Die größten Stückzahlen entfallen auf den Pkw-Sektor, da in jedem Fahrzeug entsprechend der Motorzylinderzahl gleich mehrere Zündkerzen erforderlich sind.

Die motorgetriebenen Geräte arbeiten wegen der geringeren Motorleistung in der Regel mit Einzylindermotoren und benötigen nur eine einzige Zündkerze.

Im Nkw-Bereich kommen in Europa – zumindest für schwere Nkw – vorwiegend Dieselmotoren zum Einsatz, sodass in diesem Sektor der Bedarf an Zündkerzen gering ist. In den USA jedoch ist auch bei schweren Nkw der Ottomotor am weitesten verbreitet.

Typenvielfalt

1902 leisteten Motoren pro 1000 cm^3 Hubraum lediglich ca. 6 PS. Mittlerweile werden 100 PS erreicht, bei Rennmotoren sogar bis 300 PS. Der technische Aufwand für die Entwicklung und Herstellung von Zündkerzen, die solche Leistungen ermöglichen, ist enorm.

Die erste Zündkerze musste 15...25-mal pro Sekunde zünden. Eine heutige Zündkerze muss das 5fache leisten. Die obere Temperaturgrenze stieg von 600 °C auf ca. 900 °C, die Zündspannung von 10 000 V auf bis zu 30 000 V. Während die Zündkerzen von heute mindestens 30 000 km überstehen müssen, musste früher alle 1000 km zum Zündkerzenschlüssel gegriffen werden.

Am Prinzip der Zündkerze hat sich in 100 Jahren wenig geändert. Trotzdem entwickelte Bosch im Lauf der Zeit mehr als 20 000 verschiedene Typen, um der Motorenentwicklung gerecht zu werden.

Aber auch das aktuelle Zündkerzenprogramm ist vielfältig. Es werden hohe Anforderungen an die Zündkerze bezüglich der

- elektrischen und
- mechanischen Eigenschaften sowie der
- chemischen und
- thermischen Belastbarkeit

gestellt. Neben diesen Anforderungen muss die Zündkerze auch an die geometrischen Vorgaben der Motorkonstruktion (z. B. Zündkerzenlage im Zylinderkopf) angepasst sein. Aufgrund dieser Anforderungen ist – hervorgerufen durch die unterschiedlichsten Motoren – eine Vielfalt von Zündkerzen erforderlich. Derzeit gibt es von Bosch mehr als 1250 verschiedene Zündkerzenvarianten, die im Handel und in den Kundendienstwerkstätten verfügbar sein müssen.

Anforderungen

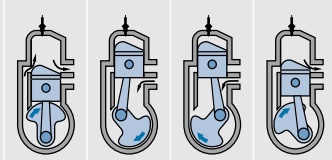
Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften

Beim Betrieb der Zündkerzen mit elektronischen Zündanlagen können Spannungen bis über 30 000 V auftreten, die nicht zu Durchschlägen am Isolator führen dürfen. Die sich aus dem Verbrennungsprozess abscheidenden Rückstände wie Ruß, Ölkohle und Asche aus Kraftstoff und Ölzusätzen sind unter bestimmten thermischen Bedingungen elektrisch leitend. Dennoch dürfen unter diesen Umständen auch bei hohen Spannungen keine Überschläge über den Isolator auftreten.

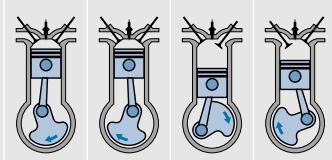
Der elektrische Widerstand des Isolators muss bis zu 1000 °C hinreichend groß sein und darf sich über der Lebensdauer der Zündkerze nur wenig verringern.

1 Druck- und Temperaturbeanspruchung der Zündkerze

Zweitaktmotor

Taktphase	Überströmen	Verdichten	Verbrennen u. Arbeiten	Ausstoßen
Gastemp.	...120 °C	200... 400 °C	2000... 2800 °C	500... 1200 °C
Gasdruck	1 bar	5...8 bar	15...30 bar	1...3 bar
Kolbenstellung				
Kurbelwinkel	0° UT	90°	180° OT	270°	360° UT

Viertaktmotor

Taktphase	Verdichten	Verbrennen u. Arbeiten	Ausstoßen	Ansaugen
Gastemp.	300... 600 °C	2000... 3000 °C	1300... 1600 °C	...120 °C
Gasdruck	8...15 bar	30...50 bar	1...5 bar	0,9 bar
Kolbenstellung				
Kurbelwinkel	0° OT	180° UT	360° OT	540° UT	720° OT

UMZ0325D

Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften

Die Zündkerze muss den im Verbrennungsraum periodisch auftretenden Drücken (bis ca. 100 bar) widerstehen, ohne an Gasdichtheit zu verlieren. Zusätzlich wird eine hohe mechanische Festigkeit besonders von der Keramik gefordert, die bei der Montage und im Betrieb durch den Zündkerzenstecker und die Zündleitung belastet wird. Das Gehäuse muss die Kräfte beim Anziehen ohne bleibende Verformung aufnehmen.

Anforderungen an die chemische Belastbarkeit

Der in den Brennraum ragende Teil der Zündkerze kann bis zur Rotglut erhitzen und ist den bei hoher Temperatur stattfindenden chemischen Vorgängen ausgesetzt. Im Kraftstoff enthaltene Bestandteile können sich als aggressive Rückstände an der Zündkerze ablagern und deren Eigenschaften verändern.

Anforderungen an die thermische Belastbarkeit

Während des Betriebs nimmt die Zündkerze in rascher Folge Wärme aus den heißen Verbrennungsgasen auf und wird kurz danach durch das angesaugte kalte Luft-Kraftstoff-Gemisch abgekühlt. An die Beständigkeit des Isolators gegen „Thermoschock“ werden deshalb hohe Anforderungen gestellt.

Ebenso muss die Zündkerze die im Brennraum aufgenommene Wärme möglichst gut an den Zylinderkopf des Motors abführen; die Anschlussseite der Zündkerze sollte sich möglichst wenig erwärmen.

Aufbau

Die wichtigsten Bestandteile einer Zündkerze sind (Bild 1)
- Anschlussbolzen (1),
- Isolator (2),
- Gehäuse (3),
- Dichtsitz (6) und
- Elektroden (8, 9).

Anschlussbolzen

Der Anschlussbolzen aus Stahl ist im Isolator mit einer leitfähigen Glasschmelze, die auch die leitende Verbindung zur Mittelelektrode herstellt, gasdicht eingeschmolzen. Er hat an dem aus dem Isolator herausragenden Ende ein Gewinde, in das der Zündkerzenstecker der Zündleitung einrastet. Für Anschlussstecker nach ISO-/DIN-Norm wird entweder auf das Gewinde des Anschlussbolzens eine Anschlussmutter (mit der geforderten Außenkontur) aufgeschraubt, oder der Bolzen wird bei der Herstellung bereits mit einem massiven ISO-/DIN-Anschluss versehen.

Isolator

Der Isolator besteht aus einer Spezialkeramik. Er hat die Aufgabe, die Mittelelektrode und den Anschlussbolzen gegen das Gehäuse zu isolieren. Die Forderungen nach guter Wärmeleitfähigkeit bei hohem elektrischem Isoliervermögen stehen in starkem Gegensatz zu den Eigenschaften der meisten Isolierstoffe. Der von Bosch verwendete Werkstoff besteht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), dem in geringem Anteil andere Stoffe zugemischt sind. Nachdem diese Spezialkeramik gebrannt ist, werden nicht nur die Forderungen nach mechanischer und chemischer Festigkeit erfüllt, sondern das dichte Gefüge sorgt auch für eine hohe Sicherheit gegen elektrische Durchschläge.

Zur Verbesserung des Kaltwiederholstartverhaltens bei Luftfunken-Zündkerzen kann die Außenkontur des Isolatorfußes modifiziert werden, um ein günstigeres Aufheizverhalten zu erreichen.

Die Oberfläche der Isolator-Anschlussseite ist mit einer bleifreien Glasur überzogen. Auf der glatten Glasur haften Feuchtigkeit und Schmutz weniger gut, wodurch Kriechströme weitgehend vermieden werden.

1 Aufbau der Zündkerze

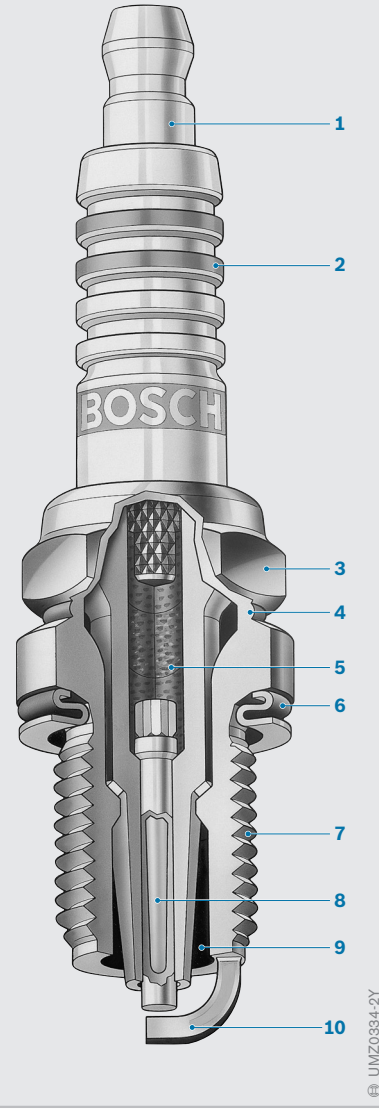


Bild 1
1 Anschlussbolzen mit Anschlussmutter
2 Isolator aus Al_2O_3-Keramik
3 Gehäuse
4 Warmschrumpfzone
5 leitendes Glas
6 Dichtring (Dichtsitz)
7 Gewinde
8 Verbundmittelelektrode (Ni/Cu)
9 Atmungsraum (Luftraum)
10 Masseelektrode (hier als Verbundelektrode Ni/Cu)

Gehäuse

Das Gehäuse wird aus Stahl über einen Kaltumformungsprozess hergestellt. Aus dem Presswerkzeug kommt der Rohling schon mit seiner endgültigen Kontur und muss nur noch an einzelnen Stellen spanend bearbeitet werden. Der untere Teil des Gehäuses ist mit einem Gewinde (Bild 1, Pos. 7) versehen, damit die Zündkerze im Zylinderkopf befestigt und nach einem vorgegebenem Wechselintervall ausgetauscht werden kann. Auf die Stirnseite des Gehäuses werden – je nach Zündkerzenkonzept – bis zu 4 Masseelektroden aufgeschweißt.

Zum Schutz des Gehäuses gegen Korrosion ist auf der Oberfläche galvanisch eine Nickelschicht aufgebracht, die in den Aluminiumzylinderköpfen ein Festfressen des Gewindes verhindert.

Am oberen Teil des Gehäuses befindet sich ein Sechs- oder bei neueren Zündkerzenkonzepten auch ein Doppelsechskant zum Ansetzen des Schraubenschlüssels. Mit dem Doppelsechskant kann bei unveränderter Isolatorkopfgeometrie die Schlüsselweite auf 14 mm reduziert werden. Dadurch wird für die Zündkerze weniger Platz im Zylinderkopf benötigt und der Motorenkonstrukteur ist freier in der Gestaltung der Kühlkanäle.

Der obere Teil des Zündkerzengehäuses wird nach dem Einsetzen des Stöpsels (Isolator mit funktionssicher montierter Mittelelektrode und Anschlussbolzen) umgebördelt und fixiert diesen in seiner Position. Der anschließende Schrumpfprozess – induktive Erwärmung unter hohem Druck – stellt die gasdichte Verbindung zwischen Isolator und Gehäuse her und garantiert eine gute Wärmeleitung.

2 Dichtsitz der Zündkerze

Bild 2
a Flachdichtsitz mit Dichtring
b Kegeldichtsitz ohne Dichtring

1 Dichtring
2 kegelige Dichtfläche

Dichtsitz

Je nach Motorbauart dichtet ein Flach- oder Kegeldichtsitz (Bild 2) zwischen der Zündkerze und dem Zylinderkopf ab.

Beim Flachdichtsitz wird ein Dichtring (1) als Dichtelement verwendet. Der Dichtring ist „unverlierbar“ am Zündkerzengehäuse angebracht. Er hat eine spezielle Formgebung und dichtet bei Montage der Zündkerze nach Vorschrift dauerelastisch ab. Beim Kegeldichtsitz dichtet eine kegelige Fläche (2) des Zündkerzengehäuses ohne Verwendung eines Dichtrings direkt auf einer entsprechenden Fläche des Zylinderkopfs ab.

Elektroden

Beim Funkenüberschlag und dem Betrieb bei höherer Temperatur wird das Elektrodenmaterial so stark beansprucht, dass die Elektroden verschleißen – der Elektrodenabstand wird größer. Um die Forderungen nach bestimmten Wechselintervallen erfüllen zu können, müssen die Elektrodenwerkstoffe so konzipiert sein, dass sie eine gute Erosionsbeständigkeit (Abbrand durch den Funken) und eine gute Korrosionsbeständigkeit (Verschleiß durch chemisch-thermische Angriffe) aufweisen. Erreicht wird dies im Wesentlichen durch die Verwendung von hochtemperaturfesten Nickellegierungen.

Mittelelektrode

Die Mittelelektrode (Bild 1, Pos. 8) ist mit ihrem Kopf in der leitenden Glasschmelze verankert und zur besseren Wärmeableitung mit einem Kupferkern versehen.

Bei Longlife-Zündkerzen dient die Mittelelektrode als Trägermaterial zur Aufnahme eines Edelmetallstifts, der über eine Laserschweißung dauerhaft mit der Basiselektrode verbunden wird. Darüberhinaus gibt es Zündkerzenkonzepte, bei denen die Elektrode nur aus einem dünnen Platindraht hergestellt und mit der Keramik eingesintert wird, um einen guten Wärmetransport sicherzustellen.

Masseelektroden

Die Masseelektroden (9) sind am Gehäuse befestigt und haben vorwiegend einen rechteckigen Querschnitt. Je nach Art der Anordnung unterscheidet man zwischen Dach- und Seitenelektroden (Bild 3). Die Dauerstandfestigkeit der Masseelektroden wird durch deren Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Wärmeableitung kann durch die Verwendung von Verbundwerkstoffen (wie bei den Mittelelektroden) zwar verbessert werden, aber letztendlich bestimmt die Länge und der Profilquerschnitt die Temperatur der Masseelektroden und damit deren Verschleißverhalten.

Ein stärkeres Masseelelektroden-Profil sowie mehrere Masseelektroden erhöhen die Standzeit der Zündkerzen.

3 Elektrodenformen

Bild 3
a Dachelektrode
b Seitenelektroden
c Gleitfunken-Zündkerze ohne Masseelektrode (Spezialanwendung für Rennmotoren)

Elektrodenwerkstoffe

Grundsätzlich leiten reine Metalle die Wärme besser als Legierungen. Andererseits reagieren reine Metalle – wie z. B. Nickel – auf chemische Angriffe von Verbrennungsgasen und festen Verbrennungsrückständen empfindlicher als Legierungen. Durch Zulegierung von Mangan und Silizium wird die chemische Beständigkeit von Nickel vor allem gegen das sehr aggressive Schwefeldioxid (SO_2, Schwefel ist Bestandteil des Schmieröls und des Kraftstoffs) verbessert. Zusätze aus Aluminium und Yttrium steigern darüber hinaus die Zunder- und Oxidationsbeständigkeit.

Verbundelektroden

Die korrosionsbeständigen Nickellegierungen haben sich zur Herstellung von Zündkerzenelektroden durchgesetzt. Mit einem Kupferkern versehen kann die Wärmeableitung zusätzlich gesteigert werden, so dass diese Verbundelektroden den Forderungen nach hohem Wärmeleitvermögen und hoher Korrosionsbeständigkeit gerecht werden (Bild 1).

Auch die Masseelektroden, die zur Einstellung des Elektrodenabstandes biegbar sein müssen, können aus einer Nickel-Basis-Legierung oder einem Verbundwerkstoff bestehen.

Silbermittelelektroden

Silber weist unter allen Werkstoffen die höchste elektrische und thermische Leitfähigkeit aus. Es ist darüber hinaus chemisch außerordentlich beständig, sofern bleifreier Kraftstoff verwendet wird und der Werkstoff keiner hohen Temperatur in reduzierender Atmosphäre (fettes Luft-Kraftstoff-Gemisch) ausgesetzt wird.

Eine erhebliche Steigerung der Warmfestigkeit wird durch Teilchenverbundwerkstoffe auf Silberbasis erreicht.

Platinelektroden

Platin (Pt) bzw. Platinlegierungen weisen eine sehr gute Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit sowie eine hohe Abbrandfestigkeit auf. Sie werden daher als Elektrodenwerkstoffe für Longlife-Zündkerzen eingesetzt.

Bei einigen Zündkerzentypen wird der Pt-Stift bereits bei der Herstellung des Keramikkörpers in die Keramik eingefügt. In dem nachfolgenden Sinterprozess schrumpft die Keramik auf den Pt-Stift und fixiert diesen dauerhaft im Stöpsel.

Bei anderen Zündkerzentypen werden die dünnen Pt-Stifte auf die Mittelelektrode aufgeschweißt (Bild 2). Die dauerstandfeste Verbindung wird bei Bosch mit einem kontinuierlich arbeitenden Laser hergestellt.

1 Zündkerzen mit Verbundelektroden

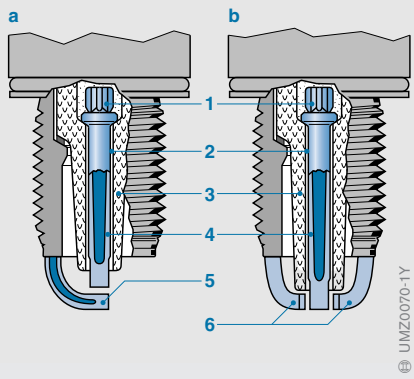


Bild 1
a Mit Dachelektrode
b mit Seitenelektroden

1 Leitendes Glas
2 Luftspalt
3 Isolatorfuß
4 Verbundmittelelektrode
5 Verbundmasseelektrode
6 Masseelektroden

2 Lasergeschweißte Stifte

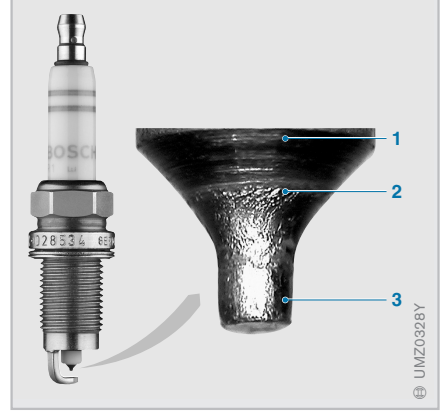


Bild 2
1 Verbundelektrode (Ni/Cu)
2 Laserschweißnaht
3 Platinstift

Zündkerzenkonzepte

Die gegenseitige Anordnung der Elektroden und die Position der Masseelektroden zum Isolator bestimmt den Typ des Zündkerzenkonzepts (Bild 1).

Luftfunkenkonzept

Bei den Luftfunkenkonzepten ist die Masseelektrode so zur Mittelelektrode angestellt, dass der Zündfunke auf direktem Weg zwischen den Elektroden springt und das Luft-Kraftstoff-Gemisch entzündet, das sich zwischen den Elektroden befindet.

Gleitfunkenkonzept

Durch die definierte Anstellung der Masseelektroden zur Keramik gleitet der Funke zunächst von der Mittelelektrode über die Oberfläche der Isolatorfußspitze und springt dann über einen Gasspalt zur Masseelektrode. Da für eine Entladung über die Oberfläche eine niedrigere Zündspannung benötigt wird als für die Entladung durch einen gleich großen Luftspalt, kann der Gleitfunke bei gleichem Zündspannungsbedarf größere Elektrodenabstände überbrücken als der Luftfunke. Dadurch entsteht ein größerer Flammenkern und die Entflammungseigenschaften werden deutlich verbessert.

Gleichzeitig hat der Gleitfunke im Kaltwiederholstart eine reinigende Wirkung bzw. verhindert, dass sich auf der Isolatorstirnseite Ruß niederschlägt. Die Eigenschaften beim häufigen Starten des Motors bei niedriger Temperatur werden verbessert.

Luftgleitfunkenkonzepte

Bei diesen Zündkerzenkonzepten sind die Masseelektroden in einem definierten Abstand zur Mittelelektrode und zur Keramikstirnseite angestellt. Dadurch ergeben sich zwei alternative Funkenstrecken, die beide Entladungsformen – Luftfunken und Luftgleitfunken – ermöglichen und unterschiedliche Zündspannungsbedarfswerte aufweisen. Je nach Betriebsbedingungen und Zündkerzenzustand (Zündkerzenverschleiß) springt der Funke als Luft- oder als Luftgleitfunke.

1 Zündkerzenkonzepte

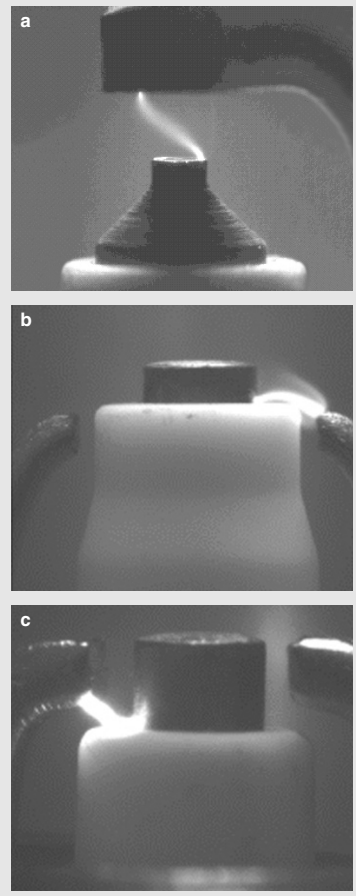


Bild 1
a Luftfunke
b Gleitfunke
c Luftgleitfunke

Elektrodenabstand

Der Elektrodenabstand (EA) ist die kürzeste Entfernung zwischen Mittel- und Masseelelektrode(n) und bestimmt u. a. die Länge des Funkens (Bild 1). Je kleiner der Elektrodenabstand ist, umso niedriger ist die Spannung, die benötigt wird, um einen Zündfunken zu erzeugen.

Bei zu kleinem Elektrodenabstand entsteht nur ein kleiner Flammenkern im Elektrodenbereich. Über die Kontaktflächen mit den Elektroden wird diesem wiederum Energie entzogen (Quenching), der Flammenkern kann sich nur sehr langsam ausbreiten. Im Extremfall kann die Energieabfuhr so groß sein, dass sogar Entflammungsaussetzer auftreten können.

Mit zunehmendem Elektrodenabstand (z. B. durch Verschleiß der Elektroden) werden die Entflammungsbedingungen zwar verbessert, da die Quenchingverluste geringer sind. Der erforderliche Zündspannungsbedarf steigt aber an (Bild 2). Bei gegebenem Zündspannungsangebot der Zündspule wird die Zündspannungsreserve reduziert und die Gefahr von Zündaussetzern erhöht.

Den genauen, für den jeweiligen Motor optimalen Elektrodenabstand ermittelt der Motorenhersteller aus verschiedenen Tests. Zunächst werden in charakteristischen Betriebspunkten der Motoren Entflammungsuntersuchungen durchgeführt und der minimale Elektrodenabstand ermittelt. Die Festlegung erfolgt über die Bewertung der Abgasemission, der Laufruhe und des Kraftstoffverbrauchs.

In anschließenden Dauerläufen wird das Verschleißverhalten dieser Zündkerzen bestimmt und hinsichtlich des Zündspannungsbedarfs bewertet. Ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zur Zündaussetzergrenze gegeben, wird der Elektrodenabstand festgeschrieben. Er kann entweder der Betriebsanleitung oder den Zündkerzen-Verkaufsunterlagen von Bosch entnommen werden.

Bei Bosch-Zündkerzen ist der richtige Elektrodenabstand bereits ab Werk eingestellt.

1 Elektrodenabstand (EA)

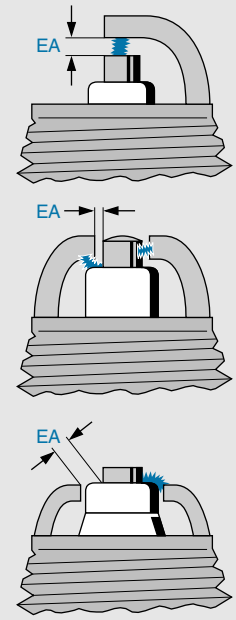


Bild 1
a Zündkerze mit Dachelektrode (Luftfunke)
b Zündkerze mit Seitenelektrode (Luftfunke oder Luftgleitfunke)
c Gleitfunkenkerze

2 Zusammenhang zwischen Elektrodenabstand und Zündspannung

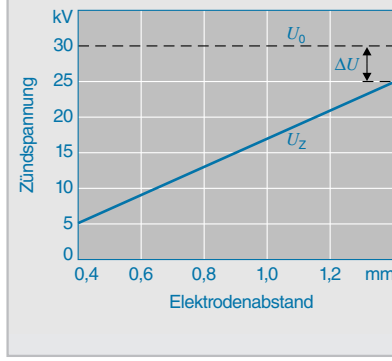


Bild 2
U_0 Zündspannungsangebot
U_Z Zündspannung
ΔU Zündspannungsreserve

Funkenlage

Die Lage der Funkenstrecke relativ zur Brennraumwand definiert die Funkenlage (Bild 1a). Bei modernen Motoren (insbesondere auch bei BDE-Motoren) ist ein deutlicher Einfluss der Funkenlage auf die Verbrennung zu beobachten. Zur Charakterisierung der Verbrennung dient die Laufruhe des Motors, die wiederum über eine statistische Auswertung des mittleren indizierten Drucks beschrieben werden kann. Aus der Höhe der Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten ($cov = s/p_{mi} \cdot 100\,[\%]$) kann abgeleitet werden, wie gleichmäßig die Verbrennung abläuft. Diese Werte liefern auch Informationen, ob durch verschleppte oder aussetzende Verbrennungen der Motorlauf nachhaltig beeinflusst wird. Als Maß für die Laufgrenze ist für *cov* ein Wert von 5 % definiert.

Bild 1 zeigt für zwei verschiedene Funkenlagen, wie sich die Laufruhe des Motors ändert, wenn das Luft-Kraftstoff-Gemisch abgemagert und/oder der Zündwinkel nach Früh oder Spät verstellt wird. Die Linien beschreiben konstante Laufruhewerte, der 5 %-Grenzwert ist blau hervorgehoben. Werte oberhalb dieser Kurve (<5 %-Bereich) stehen für eine gute Laufruhe des Motors – der Verbrennungsablauf der einzelnen Arbeitszyklen ist gleichmäßig und ohne größere Schwankungen. Werte unterhalb dieser Kurve (>5 %-Bereich) beschreiben einen schlechteren Motorlauf – die Verbrennungen verlaufen nicht immer gleichmäßig, im Extremfall können schon einzelne Aussetzer oder verschleppte Verbrennungen auftreten.

Aus dem Vergleich dieser beiden Diagramme kann abgeleitet werden, dass an diesem Motor mit einer tiefer in den Brennraum ragenden Funkenlage das Entflammungsverhalten spürbar verbessert wird, da der Zündwinkelbereich über der 5 %-Linie größer wird und die Laufgrenze zu höheren Luftzahlen verschoben ist.

Längere Masseelektroden führen allerdings zu höheren Temperaturen, was wiederum einen Anstieg im Elektrodenverschleiß zur Folge hat. Außerdem sinkt die Eigenresonanzfrequenz, was zu Schwingungsbrüchen führen kann. Daher erfordern vorgezogene Funkenlagen mehrere Maßnahmen, um die geforderten Standzeiten erreichen zu können:

- Verlängerung des Zündkerzengehäuses über die Brennraumwand hinaus. Durch diesen Bund wird die Bruchgefahr der Elektroden reduziert.
- Einbringen eines Kupferkerns in die Masseelektroden. Durch den direkten Kontakt des Kupfers mit dem Zündkerzengehäuse kann die Temperatur um ca. 70 °C abgesenkt werden.
- Einsatz von hochtemperaturfesten Elektrodenwerkstoffen.

1 Laufunruhe für verschiedene Funkenlagen (*f*)

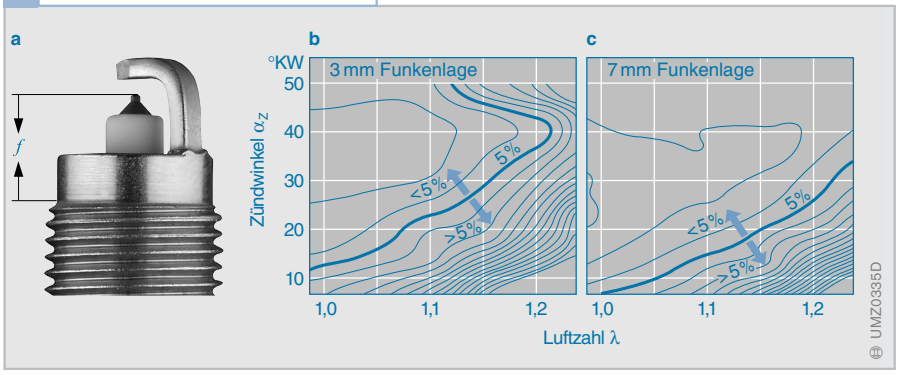


Bild 1
a Definition der Funkenlage *f*
b Diagramm für *f* = 3 mm
c Diagramm für *f* = 7 mm

Linien geben Betriebspunkte mit konstanten *cov*-Werten an

$cov = s/p_{mi} \cdot 100\,[\%]$
s Standardabweichung
p_{mi} mittlerer indizierter Druck

5 %-Linie: Laufgrenze
< 5 %-Bereich: gute Laufruhe
> 5 %-Bereich: schlechte Laufruhe

Wärmewert der Zündkerze

Betriebstemperatur der Zündkerze

Arbeitsbereich

Im kalten Zustand wird der Motor mit einem fetten Luft-Kraftstoff-Gemisch betrieben. Dadurch kann während des Verbrennungsvorgangs durch unvollständige Verbrennungen Ruß entstehen, der sich im Brennraum und auf der Zündkerze ablagert. Diese Rückstände verschmutzen den Isolatorfuß und bewirken eine mehr oder weniger leitfähige Verbindung zwischen Mittelelektrode und Zündkerzengehäuse (Bild 1). Dieser „Nebenschluss“ leitet einen Teil der Zündenergie als „Nebenschlussstrom“ ab und reduziert die zur Entflammung benötigte Energie. Mit zunehmender Verschmutzung steigt die Wahrscheinlichkeit, dass kein Zündfunke mehr zustande kommt.

Die Ablagerung von Verbrennungsrückständen auf dem Isolatorfuß ist stark von dessen Temperatur abhängig und findet vorwiegend unterhalb von ca. 500 °C statt. Bei höherer Temperatur verbrennen die kohlenstoffhaltigen Rückstände auf dem Isolatorfuß, die Zündkerze reinigt sich also selbst.

Man strebt deshalb eine Betriebstemperatur des Isolatorfußes an, die über der „Freibrenngrenze“ von ca. 500 °C (für bleifreien Kraftstoff) liegt und schon kurz nach dem Start erreicht wird.

Als obere Temperaturgrenze sollen ca. 900 °C nicht überschritten werden. Oberhalb dieser Temperatur unterliegen die Elektroden einem starken Verschleiß durch Oxidation und Heißgaskorrosion.

Bei einem weiteren Anstieg der Temperaturen können Glühzündungen nicht mehr ausgeschlossen werden (Bild 2). Dabei entzündet sich das Luft-Kraftstoff-Gemisch an den heißen Zündkerzenteilen; diese unkontrollierten Zündungen können den Motor sehr stark belasten oder sogar zerstören.

Thermische Belastbarkeit

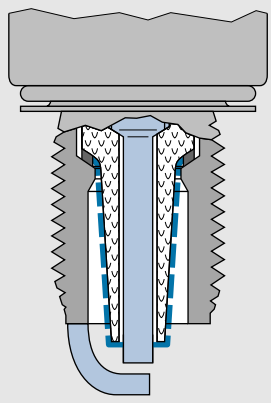
Die Zündkerze wird im Motorbetrieb durch die bei der Verbrennung entstehenden Temperaturen erhitzt. Ein Teil der von der Zündkerze aufgenommenen Wärme wird an das Frischgas abgegeben. Der größte Teil wird über die Mittelelektrode und den Isolator an das Zündkerzengehäuse übertragen und an den Zylinderkopf abgeleitet (Bild 3). Die Betriebstemperatur stellt sich als Gleichge-

Bild 1
- - - Nebenschlussstrom

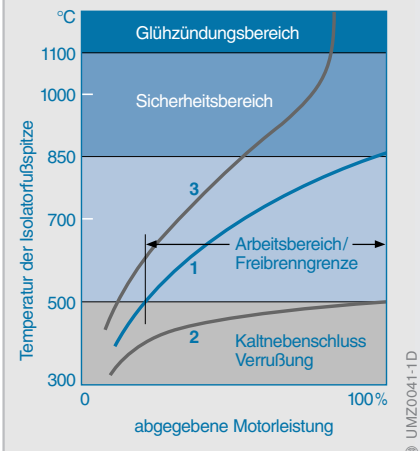
Bild 2
1 Zündkerze mit passender Wärmekennzahl
2 Zündkerze mit zu niedriger Wärmekennzahl (kalte Zündkerze)
3 Zündkerze mit zu hoher Wärmekennzahl (heiße Zündkerze)

Die Temperatur im Arbeitsbereich sollte bei verschiedenen Motorleistungen zwischen 500...900 °C am Isolator liegen

1 Nebenschluss bei verschmutztem Isolatorfuß führt zu verringertem Hochspannungsangebot



2 Arbeitsbereich der Zündkerze



wichtstemperatur zwischen Wärmeaufnahme aus dem Motor und Wärmeabfuhr an den Zylinderkopf ein.

Die Wärmezufuhr ist vom Motor abhängig. Motoren mit hoher spezifischer Leistung haben in der Regel höhere Brennraumtemperaturen als Motoren mit niedriger spezifischer Leistung.

Die Wärmeabfuhr ist im Wesentlichen über die konstruktive Gestaltung des Isolatorfußes festgelegt. Die Größe der Isolatoroberfläche bestimmt die Wärmeaufnahme, über die Querschnittsfläche und die Mittelelektrode wird die Wärmeabfuhr beeinflusst.

Die Zündkerze muss deshalb in Ihrem Wärmeaufnahmevermögen dem Motortyp entsprechend angepasst sein. Kennzeichen für die thermische Belastbarkeit der Zündkerze ist der Wärmewert.

Wärmewert und Wärmewertkennzahl

Der Wärmewert einer Zündkerze wird relativ zu Kalibrierzündkerzen ermittelt und mit Hilfe einer Wärmewertkennzahl beschrieben. Eine niedrige Kennzahl (z. B. 2...5) beschreibt eine „kalte Zündkerze“ mit geringer Wärmeaufnahme durch einen kurzen Isolatorfuß. Hohe Wärmewertkennzahlen (z. B. 7...10) kennzeichnen „heiße Zündkerzen“ mit hoher Wärmeaufnahme durch lange Isolatorfüße. Um Zündkerzen mit verschiedenen Wärmewerten leicht unterscheiden und den entsprechenden Motoren zuordnen zu können, sind diese Kennzahlen Bestandteil der Zündkerzentypformel.

Der richtige Wärmewert wird in Volllastmessungen ermittelt, da in diesen Betriebspunkten die thermische Belastung der Zündkerzen am höchsten ist. Die Zündkerzen dürfen im Betrieb nie so heiß werden, dass von ihnen thermische Entflammungen ausgehen. Mit einem Sicherheitsabstand in der Wärmewertempfehlung zu dieser Selbstentflammungsgrenze werden die Streuungen in der Motoren- und Zündkerzenfertigung abgedeckt und auch berücksichtigt, dass sich die Motoren in ihren thermischen Eigenschaften über die Laufzeit verändern können. So können z. B. Ölascheablagerungen im Brennraum das Verdichtungsverhältnis erhöhen, was wiederum eine höhere Temperaturbelastung der Zündkerze zur Folge hat. Wenn in den abschließenden Kaltstartuntersuchungen mit dieser Wärmewertempfehlung keine Ausfälle mit verrußten Zündkerzen auftreten, ist der richtige Wärmewert für den Motor bestimmt.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Kraftfahrzeugmotoren hinsichtlich Betriebsbelastung, Arbeitsverfahren, Verdichtung, Drehzahl, Kühlung und Kraftstoff machen es unmöglich, mit einer Einheitszündkerze für alle Motoren auszukommen. Ein und dieselbe Zündkerze würde sich in einem Motor sehr stark erhitzen, in einem anderen Motor dagegen relativ niedrige Temperaturen annehmen.

3 Wärmeleitwege in der Zündkerze

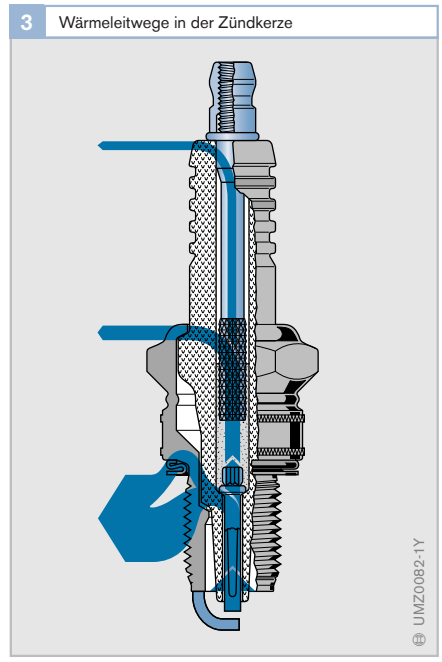


Bild 3
Ein großer Anteil der aus dem Brennraum aufgenommenen Wärme wird durch Wärmeleitung abgeführt (geringer Anteil der Kühlung von ca. 20 % durch vorbeiströmendes Frischgemisch ist hier nicht berücksichtigt)

Anpassung von Zündkerzen

Die für den Motor geeignete Zündkerze wird gemeinsam vom Motorenhersteller und von Bosch festgelegt.

Temperaturmessung

Eine erste Aussage zur richtigen Zündkerzenauswahl gibt die Temperaturmessung mit speziell hergestellten Temperatur-Messzündkerzen (Bild 1). Mit einem Thermoelement (2) in der Mittelelektrode (3) lassen sich in den einzelnen Zylindern die Temperaturen in Abhängigkeit von Drehzahl und Last aufnehmen. Damit ist eine Sicherheit für die Anpassung der Zündkerze gewährleistet, aber auch auf einfache Art die Bestimmung des heißesten Zylinders und des Betriebspunkts für die nachfolgenden Messungen möglich.

1 Temperatur-Messzündkerze

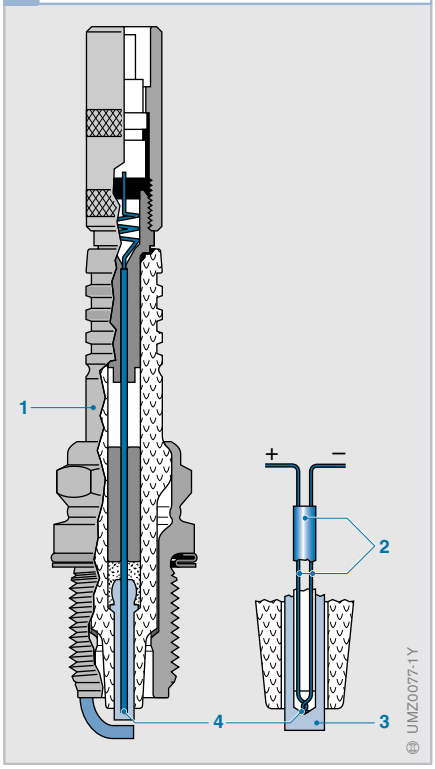


Bild 1
1 Isolator
2 Mantel-thermoelement
3 Mittelelektrode
4 Messstelle

Ionenstrommessung

Mit dem Ionenstrom-Messverfahren von Bosch wird der Verbrennungsablauf zur Bestimmung des Wärmewertbedarfs des Motors herangezogen. Die ionisierende Wirkung von Flammen erlaubt über eine Leitfähigkeitsmessung in der Funkenstrecke, den zeitlichen Ablauf der Verbrennung zu beurteilen (Bild 2). Zum Zündzeitpunkt steigt der Ionenstrom sehr stark an, da durch den elektrischen Zündfunken sehr viele Ladungsträger in der Funkenstrecke vorhanden sind. Nachdem die Zündspule entladen ist, nimmt der Stromfluss zwar ab, durch die Verbrennung sind aber immer noch genügend Ladungsträger vorhanden, sodass der Verbrennungsvorgang weiterhin sichtbar bleibt. Wird parallel dazu der Brennraumdruck mit aufgenommen, ist eine normale Verbrennung mit einem gleichmäßigen Druckanstieg zu sehen, die Lage des Druckmaximimums liegt nach dem Zünd-OT. Wird bei diesen Messungen der Wärmewert der Zündkerze variiert, zeigt der Verbrennungsablauf charakteristische Veränderungen mit der thermischen Belastung einer Zündkerze in Abhängigkeit des Wärmewerts (Bild 4).

2 Schaltschema der Ionenstrommessung

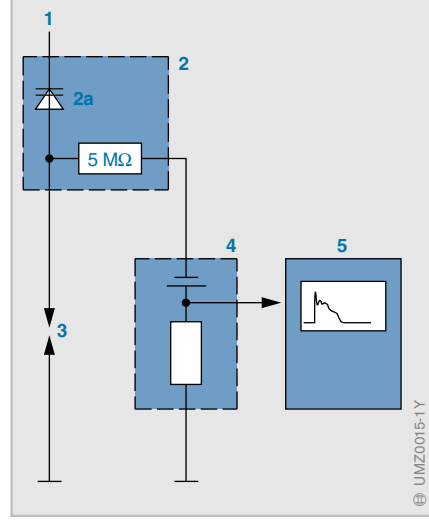


Bild 2
1 Hochspannung von der Zündspule
2 Ionenstromadapter
2a Kippdiode
3 Zündkerze
4 Ionenstromgerät
5 Oszilloskop

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber einer reinen Temperaturmessung im Brennraum liegt in der Ermittlung der Entflammungswahrscheinlichkeit, die nicht nur von der Temperatur, sondern auch von den konstruktiven Parametern des Motors und der Zündkerze abhängt.

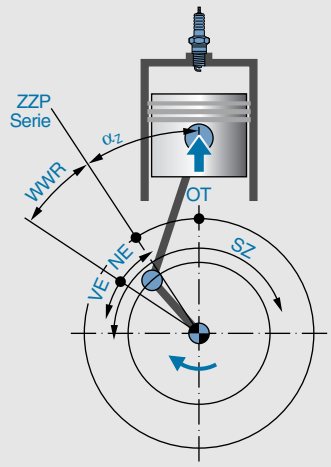
Begriffsdefinitionen

Für die Wärmewertanpassung von Zündkerzen wurden entsprechend einer internationalen Übereinkunft Begriffe und Definitionen für die unkontrollierte Zündung von Luft-Kraftstoff-Gemischen festgelegt (ISO 2542 – 1972, Bild 3).

Thermische Entflammung

Zündungen des Luft-Kraftstoff-Gemischs, die unabhängig vom Zündfunken und meistens an einer heißen Oberfläche entstehen (z. B. an der zu heißen Isolatorfußoberfläche einer Zündkerze mit zu hohem Wärmewert), bezeichnet man als Selbstzündungen (auto ignition). Aufgrund ihrer zeitlichen Lage relativ zum Zündzeitpunkt können diese in zwei Kategorien unterteilt werden.

3 Begriffe für die Wärmewertanpassung



4 Charakteristische Ionenstrom-Oszillogramme

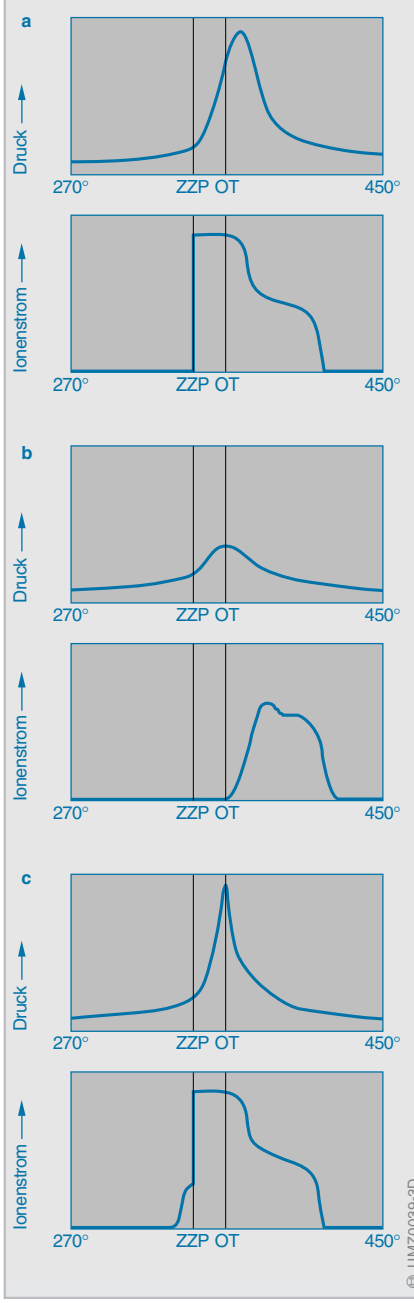


Bild 3
SZ Selbstzündung
OT oberer Totpunkt
VE Vorentflammung
NE Nachentflammung
WWR Wärmewertreserve in °KW
ZZP Zündzeitpunkt in °KW vor OT
α_z Zündwinkel

Bild 4
a Normale Verbrennung
b ausgetastete Zündung mit Nachentflammung
c Vorentflammung

Nachentflammungen
Nachentflammungen (post ignition) treten nach dem elektrischen Zündzeitpunkt auf, sind jedoch für den praktischen Motorbetrieb unkritisch, da die elektrische Zündung immer früher erfolgt. Um herauszufinden, ob durch die Zündkerze thermische Entflammungen eingeleitet werden, muss bei dieser Messung der elektrische Zündfunke unterdrückt werden. Beim Auftreten einer Nachentflammung steigt der Ionenstrom erst deutlich nach dem Zündzeitpunkt an. Da aber eine Verbrennung eingeleitet wird, ist auch ein Druckanstieg und damit eine Drehmomentabgabe zu registrieren (Bild 4 b).

Vorentflammungen
Vorentflammungen (pre ignition) treten vor dem elektrischen Zündzeitpunkt auf (Bild 4c) und können durch ihren unkontrollierten Verlauf zu schweren Motorschäden führen. Durch die zu frühe Verbrennungseinleitung verschiebt sich nicht nur die Lage des Druckmaximums zum OT, sondern auch der maximale Brennraumdruck zu höheren Werten. Damit steigt die Temperaturbelastung der Bauteile im Brennraum. Daher muss die Anpassung der Zündkerzen so erfolgen, dass keine Vorentflammungen auftreten.

Auswertung der Messergebnisse

Mit dem Bosch-Ionenstrom-Messverfahren können beide Typen sicher erfasst werden. Zur Detektion der Nachentflammungen muss jedoch der Zündfunke in gewissen Abständen unterdrückt werden. Die Lage der Nachentflammungen relativ zum Zündzeitpunkt sowie der prozentuale Anteil der Nachentflammungen zur Austastrate liefern Informationen über die Belastung der Zündkerze im Motor. Da Zündkerzen mit längeren Isolatorfüßen (heiße Zündkerzen) mehr Wärme aus dem Brennraum aufnehmen und die aufgenommene Wärme schlechter ableiten, ist die Wahrscheinlichkeit, dass mit diesen Zündkerzen Nachentflammungen oder sogar Vorentflammungen ausgelöst werden, größer als bei Zündkerzen mit kürzeren Isolatorfüßen. Zur Auswahl des für den jeweiligen Motor korrekten Wärmewerts werden in Applikationsmessungen daher Zündkerzen mit verschiedenen Wärmewerten miteinander verglichen und ihre Neigung zu Nach- oder Vorentflammungen bewertet.

Anpassungsmessungen von Zündkerzen werden vorzugsweise auf dem Motorprüfstand oder am Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand vorgenommen. Messfahrten zur Ermittlung des heißesten Betriebspunkts bei Volllast über längere Zeit auf öffentlichen Straßen sind aus Sicherheitsgründen nicht zulässig.

Zündkerzenauswahl

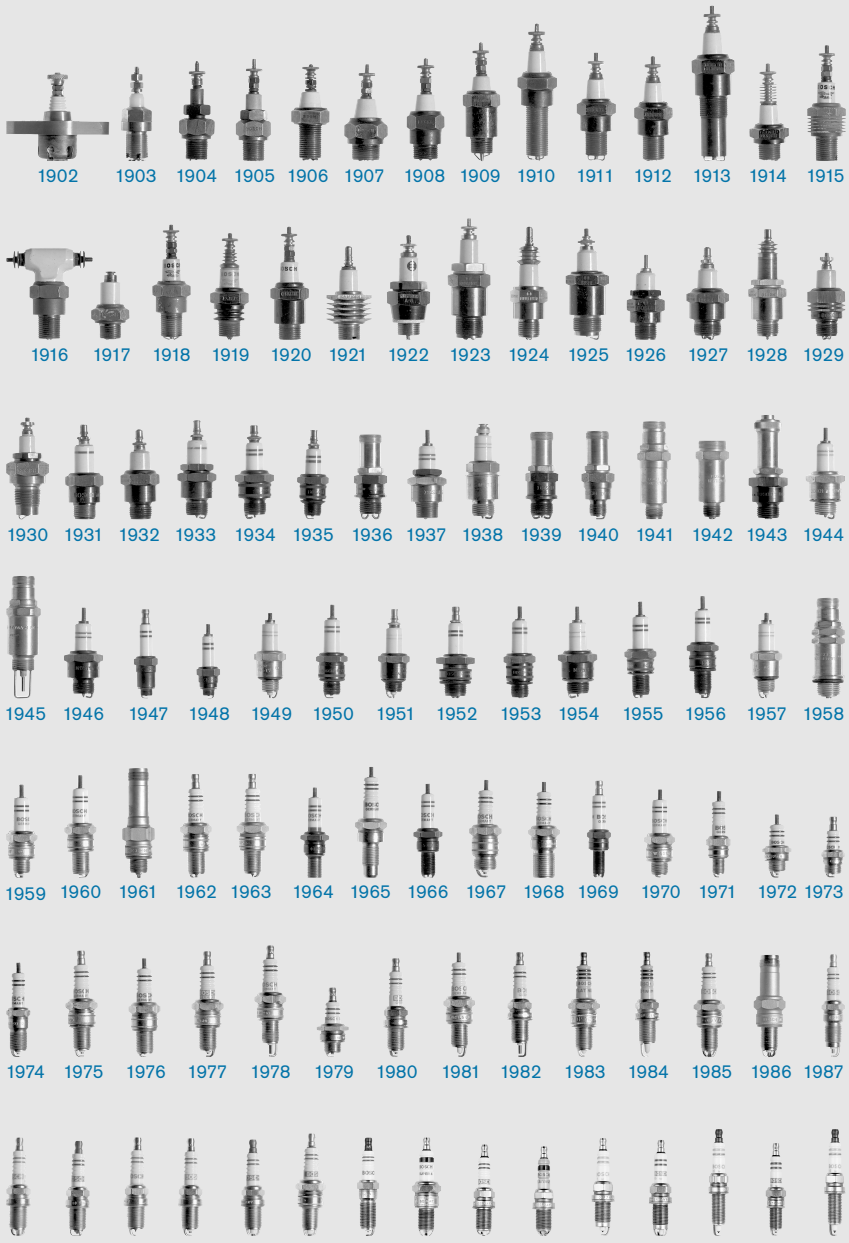
Ziel einer Anpassung ist es, eine Zündkerze auszuwählen, die vorentflammungsfrei betrieben werden kann und eine ausreichende Wärmewertreserve besitzt. Das heißt, Vorentflammungen dürfen erst mit einer um mindestens zwei Wärmewertstufen heißeren Zündkerze auftreten.

Die vorstehenden Ausführungen verdeutlichen, dass Zündkerzen nicht beliebig ausgewählt und eingesetzt werden können. Vielmehr ist zur Auswahl geeigneter Zündkerzen eine enge Zusammenarbeit zwischen Motor- und Zündkerzenhersteller üblich.

5 Bosch Zündkerzenkatalog

Bild 5
Zündkerzenauswahl: Für Kraftfahrer sind die Vorschriften der Motorhersteller oder die Empfehlungen in den Verkaufsunterlagen von Bosch bindend. Bosch bietet für jeden Motor die optimale Zündkerze – Sie finden sie in diesem Katalog

100 Jahre Zündkerzen – Produktvielfalt



Betriebsverhalten der Zündkerze

Veränderungen im Betrieb

Aufgrund des Betriebs der Zündkerze in einer aggressiven Atmosphäre unter z. T. hohen Temperaturen entsteht an den Elektroden Verschleiß, der den Zündspannungsbedarf ansteigen lässt. Wenn der Zündspannungsbedarf von der Zündspule nicht mehr gedeckt werden kann, kommt es zu Zündaussetzern.

Weiterhin kann die Funktion der Zündkerze aber auch wegen alterungsbedingter Veränderungen im Motor oder durch Verschmutzung beeinträchtigt werden. Die Alterung des Motors kann Undichtigkeiten zur Folge haben, die wiederum einen höheren Ölanteil im Brennraum nach sich ziehen. Dies führt zu verstärkten Ablagerungen von Ruß, Asche und Ölkohle auf der Zündkerze, die Nebenschlüsse und damit Zündaussetzer bewirken, im Extremfall aber auch Glühzündungen hervorrufen können. Sind darüber hinaus den Kraftstoffen noch Additive zur Verbesserung der Klopfeigenschaften zugegeben, können sich Ablagerungen bilden, die unter Temperaturbelastung leitend werden und zu einem Heißnebenschluss führen. Die Folgen sind auch hier Zündaussetzer, die mit einem deutlichen Anstieg der Schadstoffemission verbunden sind und zur Schädigung des Katalysators führen können. Daher müssen die Zündkerzen regelmäßig ausgetauscht werden.

1 Verschleiß an Mittel- und Masseelektroden

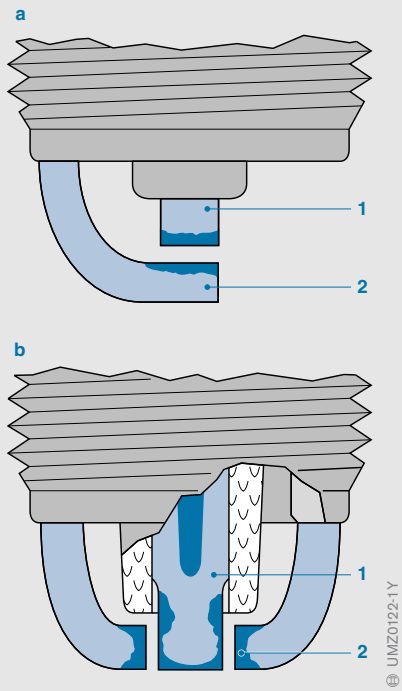


Bild 1
a Zündkerze mit Dachelektrode
b Zündkerze mit Seitenelektroden

1 Mittelelektrode
2 Masseelektrode

Elektrodenverschleiß

Unter Elektrodenverschleiß versteht man einen Materialabtrag an den Elektroden, der mit zunehmender Betriebsdauer den Elektrodenabstand merklich wachsen lässt. Verantwortlich dafür sind im Wesentlichen zwei Mechanismen:

- Funkenerosion und
- Korrosion im Brennraum.

Funkenerosion und Korrosion

Der Überschlag elektrischer Funken führt zu einer Anhebung der Temperatur der Elektroden bis zu deren Schmelztemperatur. Die aufgeschmolzenen mikroskopisch kleinen Oberflächenbereiche reagieren mit dem Sauerstoff oder den anderen Bestandteilen der Verbrennungsgase. Die Folge ist ein Materialabtrag, der zu dem Anstieg des Elektrodenabstands und des Zündspannungsbedarfs führt (Bild 1).

Zur Minimierung des Elektrodenverschleißes werden Werkstoffe mit hoher Temperaturbeständigkeit eingesetzt (z. B. Platin und Platinlegierungen) Aber auch durch geeignete Wahl der Elektrodengeometrie (z. B. kleinere Durchmesser, dünne Stifte) und des Zündkerzenkonzepts (Gleitfunken-Zündkerzen) kann der Materialabtrag bei gleicher Laufleistung reduziert werden.

Der in der Glasschmelze realisierte ohmsche Widerstand verringert den Abbrand und trägt somit auch zu einer Verschleißminderung bei.

Anomale Betriebszustände

Anomale Betriebszustände können den Motor und die Zündkerzen zerstören. Dazu gehören:

- Glühzündung,
- klopfende Verbrennung und
- hoher Ölverbrauch (Aschebildung und Ölkohlebildung).

Falsch eingestellte Zündanlagen sowie die Verwendung von Zündkerzen mit nicht zum Motor passendem Wärmewert oder die Verwendung ungeeigneter Kraftstoffe können Motor und Zündkerzen schädigen.

Glühzündung

Die Glühzündung ist ein unkontrollierter Entflammungsvorgang, bei dem die Temperatur im Brennraum so stark ansteigen kann, dass schwere Schäden am Motor und an der Zündkerze entstehen.

Wegen örtlicher Überhitzung im Volllastbetrieb können Glühzündungen an folgenden Stellen entstehen:

- an der Spitze des Isolatorfußes der Zündkerze,
- am Auslassventil,
- an vorstehenden Zylinderkopfdichtungen und
- an sich lösenden Ablagerungen.

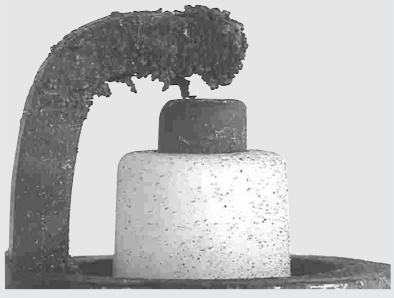
Klopfende Verbrennung

Unter Klopfen versteht man eine unkontrollierte Verbrennung mit sehr steilem Druckanstieg. Dieser entsteht durch selbstzündende Gemischteile vor einer Flammenfront, die durch den elektrischen Funken eingeleitet wurde. Die Verbrennung läuft wesentlich schneller ab als die normale Verbrennung.

Es treten Druckschwingungen mit hohen Spitzendrücken und hohen Frequenzen auf, die den normalen Druckverlauf überlagern (Bild 3). Durch die hohen Druckgradienten erfahren die Bauteile (Zylinderkopf, Ventile, Kolben und Zündkerzen) eine hohe Temperaturbelastung, die zu einer Schädigung eines oder mehrerer Bauteile führen kann.

Das Schadensbild ähnelt dem bei Kavitationsschäden, die bei Strömungen mit Ultraschallgeschwindigkeit entstehen. Auswirkungen klopfender Verbrennungen sind bei den Zündkerzen zuerst an der Oberfläche der Masseelektrode in Form von Grübchenbildung zu erkennen.

2 Schadensbild einer durch starkes Klopfen geschädigten Masseelektrode



3 Druckverlauf im Zylinder

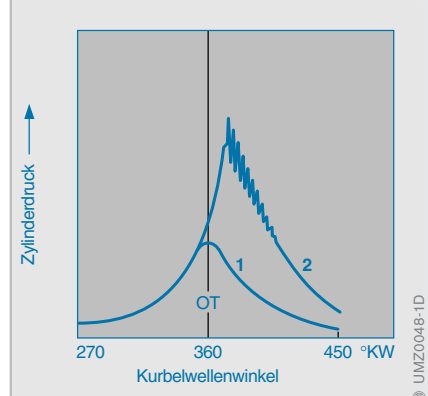


Bild 3
1 Bei normaler Verbrennung
2 bei klopfender Verbrennung

Ausführungen

SUPER Zündkerze

SUPER Zündkerzen (Bild 1) repräsentieren den Großteil des Zündkerzenprogramms von Bosch und dienen als Basis für viele darauf aufbauende Zündkerzentypen und -konzepte. Für nahezu jede Anwendung gibt es eine geeignete Variante, die mit ihrem speziellen Wärmewertbereich dem jeweiligen Motor angepasst ist.

Das Schnittbild der SUPER Zündkerze ist im Abschnitt „Aufbau“ dargestellt (Bild 1). Die wesentlichen Merkmale der SUPER Zündkerze sind:

- eine Verbund-Mittelelektrode aus einer Nickel-Chrom-Legierung mit eingeschlossenem Kupferkern,
- optional eine Verbund-Masseelektrode zur Reduzierung des Masseelektrodenverschleißes durch Absenken der maximalen Temperatur an der Elektrode und
- ein bereits ab Werk für den jeweiligen Motor eingestellter Elektrodenabstand.

Das Zündkerzengesicht ist je nach Anforderung unterschiedlich ausgeführt. Im Vergleich zur klassischen SUPER Zündkerze (Bild 2a) ist in Bild 2b eine aktuelle Variante dargestellt, die neben einer tiefer in den Brennraum ragenden Funkenlage eine optimierte Isolatorfußgeometrie besitzt und außerdem mit einer dünneren Mittelelektrode ausgeführt ist, um das Kaltwiederholstartverhalten zu verbessern.

Die Variante in Bild 2c ist mit einem lasergeschweißten Edelmetallstift versehen, der nicht nur eine höhere Standzeit garantiert, sondern aufgrund seines geringen Durchmessers auch bessere Entflammungseigenschaften aufweist.

SUPER 4 Zündkerze

Aufbau

Die SUPER 4 Zündkerze von Bosch unterscheidet sich von herkömmlichen SUPER Zündkerzen durch

- vier symmetrisch angeordnete Masseelektroden (Bild 3),
- eine versilberte Mittelelektrode und
- einen für die gesamte Nutzungsdauer eingestellten Elektrodenabstand.

1 Die SUPER Zündkerze von Bosch

Bild 1
1 Verbund-Mittelelektrode mit Kupferkern

2 Elektrodenformen der SUPER Zündkerze

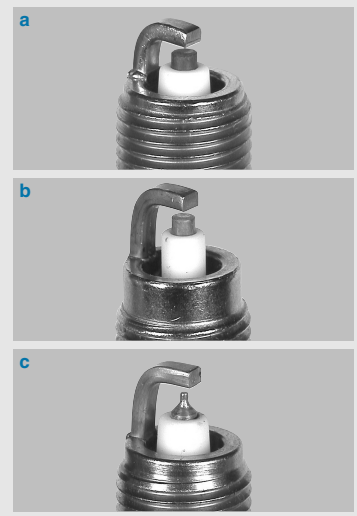


Bild 2
a Dachelektrode
b Dachelektrode und vorgezogener Funkenlage
c Dachelektrode und Platin-Mittelelektrode

Arbeitsweise
Die vier Masseelektroden sind aus einem dünnen Profil gefertigt, um gute Entflammungseigenschaften sicherzustellen. Sie sind in einem definierten Abstand zur Mittelelektrode und zur Isolatorfußspitze angestellt, damit der Funke – abhängig von den Betriebsbedingungen – entweder als Luftfunke oder als Luftgleitfunke überspringen kann. Insgesamt ergeben sich acht mögliche Funkenstrecken. Welche dieser Funkenstrecken gewählt wird, ist von den Betriebsbedingungen und der Dichte des Luft-Kraftstoff-Gemischs zum Zündzeitpunkt abhängig.

Gleichmäßiger Elektrodenverschleiß
Da die Wahrscheinlichkeit der Funkenausbreitung für alle Elektroden gleich ist, verteilen sich die Funken gleichmäßig über den Isolatorfuß. Dadurch ist auch der Verschleiß der Masseelektroden gleichmäßig auf alle vier Elektroden verteilt.

Arbeitsbereich
Die versilberte Mittelelektrode leitet die Wärme gut ab. Die Gefahr von Glühzündungen wegen Überhitzung wird dadurch geringer und der sichere Arbeitsbereich erweitert. Die SUPER 4 Zündkerze deckt damit mindestens zwei Wärmewertbereiche von herkömmlichen Zündkerzen ab. Damit können mit relativ wenigen Zündkerzentypen viele Fahrzeuge bei der Wartung nachgerüstet werden.

Zündkerzenwirkungsgrad
Durch die dünn ausgeführten Masseelektroden der SUPER 4 Zündkerze wird dem Zündfunken weniger Energie entzogen, als dies bei herkömmlichen Zündkerzen der Fall ist. Der Zündkerzenwirkungsgrad steigt, denn dem Luft-Kraftstoff-Gemisch steht für jede Zündung eine um bis zu 40 % höhere Zündenergie zur Verfügung (Bild 4).

Entflammungswahrscheinlichkeit
Mit zunehmendem Luftüberschuss (mageres Gemisch, $\lambda > 1$) sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die an das Gas abgegebene Energie ausreicht, um das Gemisch sicher zu entflammen. In Laborerprobungen konnte mit der SUPER 4 Zündkerze das Gemisch noch mit $\lambda = 1{,}55$ sicher entflammt werden, während mit der Standard-Zündkerze in diesem Bereichen mehr als die Hälfte aller Zündungen nicht zur Verbrennungseinleitung ausreichte (Bild 5).

Kaltwiederholstartverhalten
Durch die Gleitfunkenbildung erfolgt die Selbstreinigung auch bei niedrigen Temperaturen. Dadurch sind bis zu dreimal mehr Kaltstarts möglich als mit herkömmlichen Zündkerzen (Starten ohne den Motor warmzufahren).

3 Elektroden der SUPER 4 Zündkerze von Bosch

4 Zündkerzenwirkungsgrad

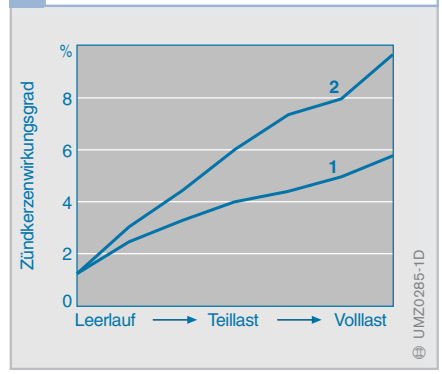


Bild 4
1 Herkömmliche Zündkerze
2 SUPER 4 Zündkerze von Bosch

Umwelt- und Katalysatorschutz

Das verbesserte Kaltwiederholstartverhalten und die größere Entflammungssicherheit auch in der Warmlaufphase senken den Anteil an unverbranntem Kraftstoff und mindern dadurch die HC-Emissionen.

Vorteile

Die SUPER 4 Zündkerze hat gegenüber herkömmlichen Zündkerzen folgende verbesserte Eigenschaften:

- größere Entflammungssicherheit durch acht mögliche Funkenstrecken,
- Selbstreinigung durch Gleitfunkentechnik und
- erweiterter Wärmewertbereich.

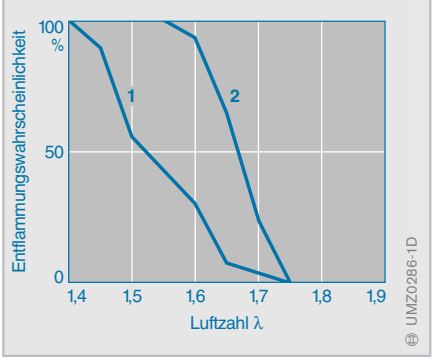
Platin+4 Zündkerze

Aufbau

Die Platin+4 Zündkerze (Bild 6) ist eine Gleitfunken-Zündkerze für längere Wechselintervalle und unterscheidet sich von herkömmlichen Zündkerzen durch

- vier symmetrisch angeordnete Masseelektroden mit Doppelbiegung (9),
- eine eingesinterte dünne Mittelelektrode aus Platin (8),
- einen geometrisch verbesserten Kontaktstift (7) aus einer speziellen Legierung,
- eine Isolatorkeramik (2) mit hoher Durchschlagsfestigkeit und
- eine funktionell verbesserte Form des Isolatorfußes.

5 Einfluss der Gemischzusammensetzung auf die Entflammungswahrscheinlichkeit



Arbeitsweise

Entflammungssicherheit

Der sehr große Elektrodenabstand (EA) von 1,6 mm verschafft der Platin+4 Zündkerze eine hervorragende Entflammungssicherheit. Außerdem sind die vier Masseelektroden im Brennraum des Motors so günstig angeordnet, dass keine „Abdeckung“ des Zündfunkens erfolgt. Dadurch kann sich der Flammenkern nahezu unbehindert in den Brennraum ausbreiten und das gesamte Luft-Kraftstoff-Gemisch vollständig entflammen.

6 Aufbau der Platin+4 Zündkerze

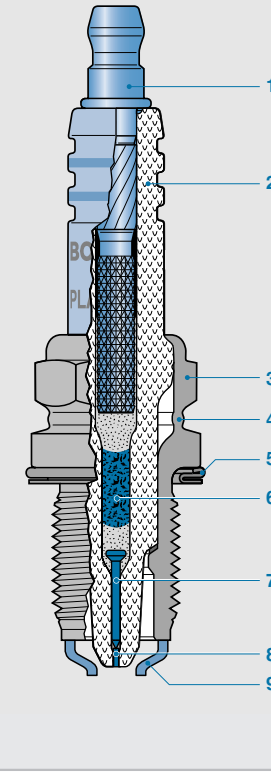


Bild 5
1 Herkömmliche Zündkerze
2 SUPER 4 Zündkerze von Bosch

Bild 6
1 Anschlussbolzen
2 Isolator
3 Gehäuse
4 Warmschrumpfzone
5 Dichtring
6 Glasschmelze
7 Kontaktstift
8 Platinstift (Mittelelektrode)
9 Masseelektroden (nur zwei der vier Elektroden abgebildet)

Kaltwiederholstarteigenschaften
Die Kaltwiederholstarteigenschaften sind durch das Gleitfunkenprinzip gegenüber Zündkerzen mit Luftfunken deutlich verbessert.

Elektrodenverschleiß
Beim Elektrodenverschleiß ergeben sich Vorteile, da sowohl der abbrandfeste Platinstift der Mittelelektrode als auch der verbesserte Werkstoff der vier Masseelektroden zu den hohen Standzeiten beiträgt. Auch der ohmsche Widerstand in der Glasschmelze vermindert die kapazitive Entladung, sodass die Funkenerosion ebenfalls vermindert wird.

Der Vergleich in Bild 7 zeigt, dass der geringe Elektrodenverschleiß der Platin+4 Zündkerzen während einer Motorlaufzeit von 800 h auf einem Motorprüfstand (entspricht über 100 000 km im realen Fahrbetrieb) zu einer weit geringeren Zunahme des Zündspannungsbedarfs führt als bei herkömmlichen Zündkerzen. Die Bilder 8 und 9 zeigen zusätzlich die Zündkerzengesichter der Platin+4 Zündkerze im Neuzustand und nach einer Motorlaufzeit von 800 h, wobei der geringe Elektrodenverschleiß nach Dauerlaufende deutlich erkennbar ist.

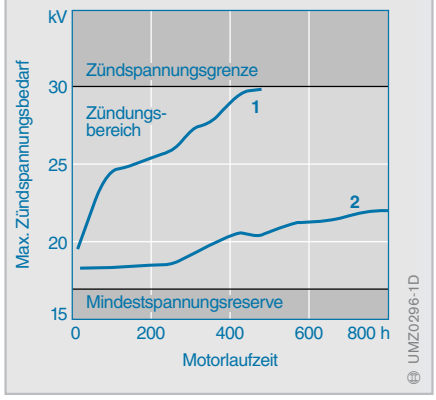
Vorteile der Platin+4 Zündkerze

Die Platin+4 Zündkerze zeichnet sich durch verschiedene Eigenschaften aus, die sie besonders für Langzeitanwendungen geeignet macht:

- Hohe Elektroden- und Keramikstandzeiten verlängern die Zündkerzenwechselintervalle auf bis zu 100 000 km,
- höhere Anzahl von möglichen Startwiederholungen bei Kälte,
- sehr gute Entflammungseigenschaften und daher eine entscheidend verbesserte Laufruhe des Motors.

8 Kerzengesicht einer Platin+4 Zündkerze Im Neuzustand

7 Zunahme des Zündspannungsbedarfs während der Motorlaufzeit



9 Kerzengesicht einer Platin+4 Zündkerze nach 800 Stunden Motorlaufzeit

Bild 7
1 Zündkerze mit Luftfunken (EA = 0,7 mm)
2 Platin+4 Zündkerze mit Gleitfunken (EA = 1,6 mm)

Zündkerzen für direkteinspritzende Ottomotoren

Bei den direkteinspritzenden Motoren wird im Schichtbetrieb der Kraftstoff über das Hochdruckeinspritzventil im Kompressionshub direkt in den Brennraum eingebracht. Über die Gestaltung der Ansaugleitung und des Kolbenbodens wird eine Ladungsbewegung in Form eines Swirl oder Tumble erzeugt, mit dem der Kraftstoff zur Zündkerze transportiert wird. Da sich die Strömung in Betrag und Richtung in den verschiedenen Betriebspunkten des Motors ändert, ist eine tief in den Brennraum ragende Funkenlage für die Gemischentflammung sehr vorteilhaft. Nachteilig wirkt sich diese Lage aber auf die Temperatur der Masseelektrode aus, sodass Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Temperatur abzusenken. Durch eine Verlängerung des Gehäuses in den Brennraum hinein kann die Länge der Masseelektrode und damit deren Temperatur wieder reduziert werden, sodass tragfähige Zündkerzenkonzepte möglich sind.

Gleitfunkenkonzepte bieten aufgrund von mehreren möglichen Funkenstrecken eine größere Sicherheit gegenüber Entflammungsaussetzern. Das bessere Freibrennverhalten durch den Gleitfunken prädestiniert dieses Zündkerzenkonzept für die wand- und luftgeführten Brennverfahren.

Wenn die Strömungsgeschwindigkeit am Funkenort nicht zu groß ist, können auch Luftfunkenkerzen gute Entflammungsergebnisse liefern. Denn

- der Funke wird nicht so stark ausgelenkt,
- das Abreißen und Wiederzünden wird vermieden und
- die Zündenergie kann zur Erzeugung eines stabilen Flammenkerns übertragen werden.

Bei den wand- und luftgeführten Brennverfahren ist die geschichtete Gemischbildung eng mit der Kolbenbewegung verbunden, sodass eine Einstellung der Verbrennung auf den besten Wirkungsgrad nicht immer sichergestellt werden kann. Außerdem entsteht durch den intensiven Kontakt des Sprays mit der Zylinderwand und dem Kolben Ruß. Deshalb haben sich in letzter Zeit Brennverfahren durchgesetzt, die diese Nachteile nicht aufweisen. Durch die Einspritzung des Kraftstoffs in den Saughub

10 Zündkerzen für direkteinspritzende Ottomotoren

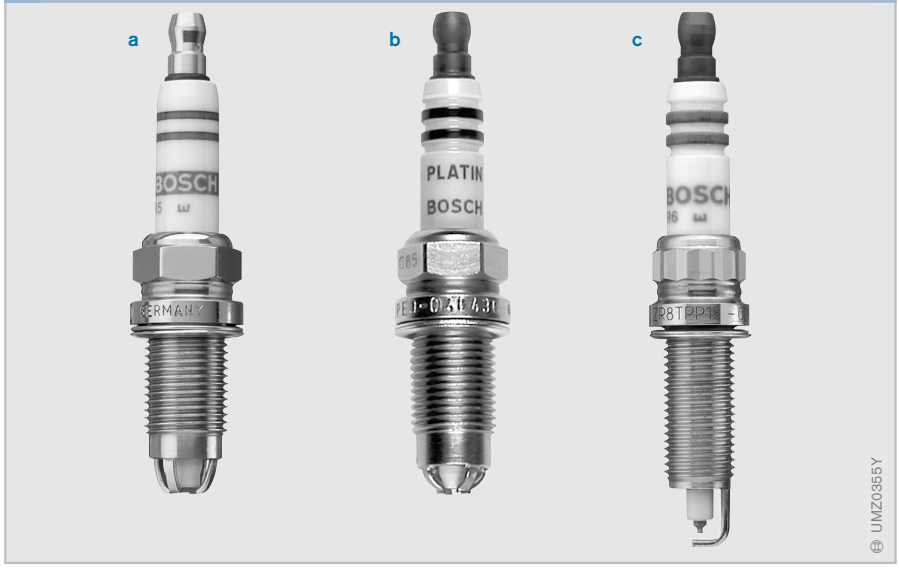


Bild 10
a Gleitfunkenzündkerze ohne Edelmetall
b Gleitfunkenzündkerze mit Platin-Mittelelektrode
c Luftfunkenzündkerze mit Platin auf der Mittelelektrode

wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch auf $\lambda = 1$ eingestellt und der Motor homogen betrieben. Die homogenen Brennverfahren stellen an das Entflammungsverhalten der Zündkerzen ähnliche Anforderungen wie die SRE-Motoren. Allerdings werden diese Motoren häufig mit Abgasturbolader betrieben, um höhere Leistungswerte zu erzielen. Das heißt, zum Zündzeitpunkt hat das Luft-Kraftstoff-Gemisch eine höhere Dichte und damit auch einen höheren Zündspannungsbedarf. In der Regel kommen hier Luftfunkenkerzen mit Edelmetallstiften auf der Mittelelektrode zum Einsatz, um auch die Standzeitforderungen nach 60 000 km und mehr sicher erfüllen zu können.

Strahlgeführte Brennverfahren

Bei den neueren Entwicklungen der strahlgeführten Brennverfahren sind die Anforderungen an die Zündkerzen dagegen deutlich höher. Durch die Anordnung der Zündkerze nahe am Einspritzventil werden lange schlanke Kerzen bevorzugt, da mit dieser Bauform zusätzliche Kühlkanäle zwischen dem Einspritzventil und der Zündkerze untergebracht werden können. Die Ausrichtung der Zündkerze zum Einspritzventil muss in aufwändigen Versuchen ermittelt werden. Damit wird erreicht, dass der Funke durch die Strömung des Einspritzstrahls (Entrainmentströmung) in den Randbereich des Sprays gezogen und so die Entflammung des Gemischs sichergestellt wird.

Bei diesen Brennverfahren ist es sehr wichtig, dass der Funke immer am gleichen Ort springt. Über die konstruktive Auslegung der brennraumseitigen Geometrie der Zündkerzen kann erreicht werden, dass der Funke nicht im Atmungsraum (Luftraum zwischen Zündkerzengehäuse und Isolator, brennraumseitig) verschwindet und so für die Entflammung nicht zur Verfügung steht. Aber auch die Umkehrung der Zündungspolarität (Mittelelektrode als Anode, Masseelektrode als Kathode) ist eine Maßnahme zur Vermeidung von Gleitfunken in das Kerzengehäuse (Bild 11). Weiterhin muss geprüft werden, ob eingeschränkte axiale/radiale Positionstoleranzen benötigt werden, um die Wechselwirkung zwischen Injektor und Zündkerze zu reduzieren.

Bei zu naher Anordnung der Zündkerze an das Einspritzventil ist die Randzone des Sprays noch nicht so gut aufbereitet, es kann zu Entflammungsproblemen durch zu fette Gemischzonen kommen. Ist die Zündkerze zu weit vom Einspritzventil entfernt angeordnet, kann es in den Randbereichen des Sprays schon zu Ausmagerungseffekten kommen, die wiederum ungünstig für eine stabile Entflammungsphase sind.

Bei einer engen Toleranz des Strahlkegels muss darüber hinaus auch der Funkenort konstant gehalten werden. Bei einer zu tiefen Funkenlage taucht die Zündkerze in das Spray ein und durch die Benetzung mit Kraftstoff kann es zu einer Schädigung der Kerze oder zur Verrußung des Isolators kommen. Wird die Position des Funkenorts zu weit in Richtung Brennraumwand zurückgezogen, kann der Funken durch die sprayinduzierte Strömung nicht mehr in das Gemisch hineingezogen werden, Aussetzer sind die Folge.

Daraus kann man ableiten, dass für eine sichere Funktion der strahlgeführten Brennverfahren eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen der Zündkerzenentwicklung und der Brennverfahrenentwicklung notwendig ist.

11 Luft- und Gleitfunken bei strahlgeführten Brennverfahren

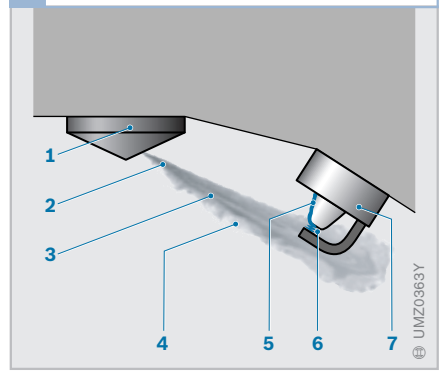


Bild 11
Luftfunke kann das Luft-Kraftstoff-Gemisch entzünden, der Gleitfunke entsteht außerhalb der Gemischwolke

1 Hochdruck-Einspritzventil
2 Kraftstoffspray
3 fetter Bereich
4 magerer Bereich
5 Gleitfunke
6 Luftfunke
7 Zündkerze

Spezialzündkerzen

Anwendung

Für besondere Anforderungen werden Spezialzündkerzen eingesetzt. Diese unterscheiden sich im konstruktiven Aufbau, der von den Einsatzbedingungen und den Einbauverhältnissen im Motor bestimmt wird.

Zündkerzen für den Motorsport

Motoren für Sportfahrzeuge sind wegen des ständigen Volllastbetriebs hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Zündkerzen für diese Betriebsverhältnisse haben meist Edelmetallelektroden (Silber, Platin) und einen kurzen Isolatorfuß. Die Wärmeaufnahme dieser Zündkerzen ist durch den Isolatorfuß sehr gering, die Wärmeabfuhr durch die Mittelelektrode hoch (Bild 12).

Zündkerzen mit Widerstand

Durch einen Widerstand in der Zuleitung zur Funkenstrecke der Zündkerzen kann die Weiterleitung der Störimpulse auf die Zündleitung und damit die Störabstrahlung verringert werden. Durch den geringen Strom in der Bogenphase des Zündfunkens wird auch die Elektrodenerosion verringert. Der Widerstand wird durch die Spezialglasschmelze zwischen Mittelelektrode und Anschlussbolzen gebildet. Der notwendige Widerstand der Glasschmelze wird durch entsprechende Zusätze erreicht.

Vollgeschirmte Zündkerzen

Bei sehr hohen Ansprüchen an die Entstörung (Funkgeräte, Autotelefon) kann eine Abschirmung der Zündkerzen notwendig sein.

Bei vollgeschirmten Zündkerzen ist der Isolator mit einer Abschirmhülse aus Metall umgeben. Der Anschluss befindet sich im Innern des Isolators. Die abgeschirmte Zündleitung wird mit einer Überwurfmutter auf der Hülse befestigt. Vollgeschirmte Zündkerzen sind wasserdicht (Bild 13).

12 Zündkerze für Motorsport

13 Vollgeschirmte Zündkerze

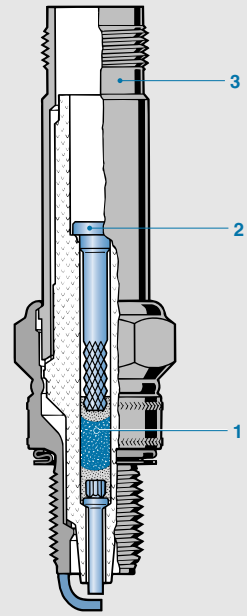


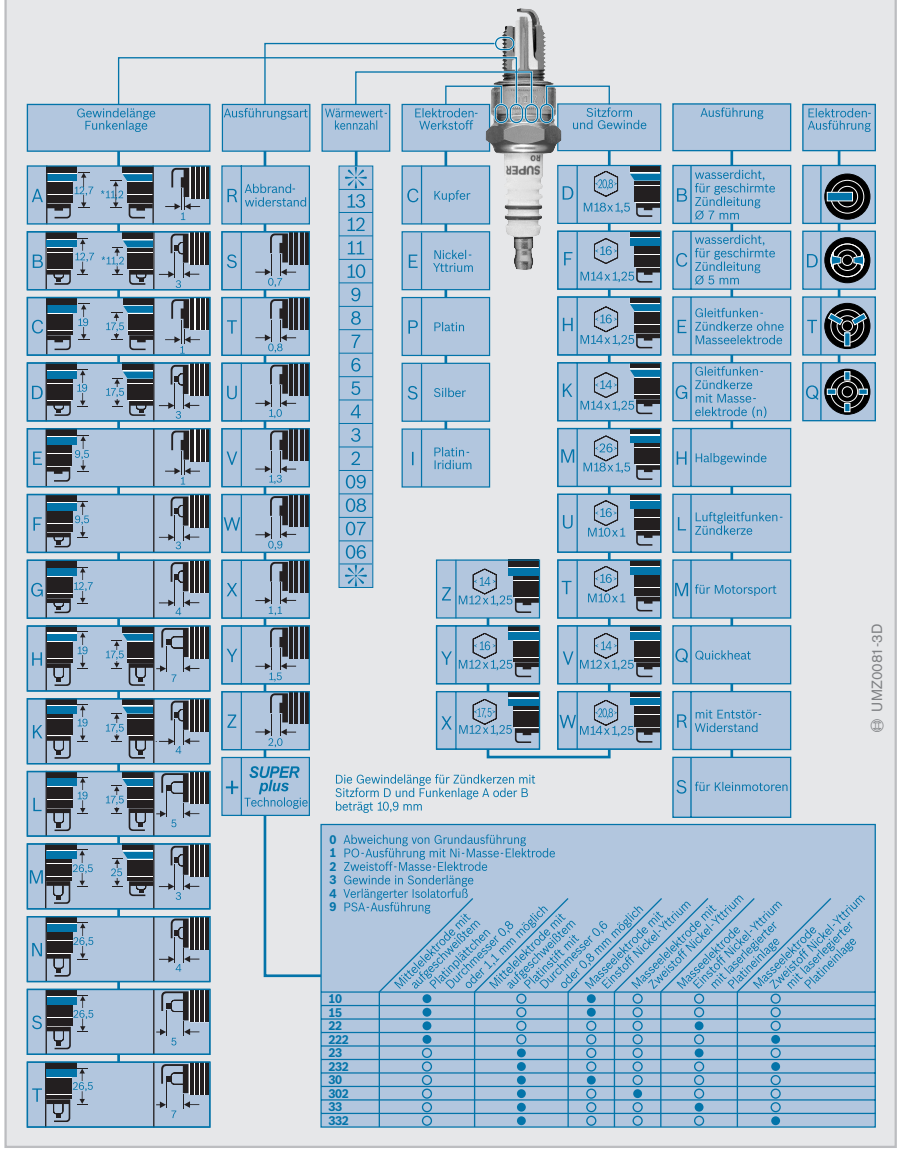
Bild 12
1 Silber-Mittelelektrode
2 kurzer Isolator

Bild 13
1 Spezialglasschmelze (Entstörwiderstand)
2 Zündkabelanschluss
3 Abschirmhülse

Typformel für Zündkerzen

Die Kennzeichnung der Zündkerzentypen wird durch eine Typformel festgelegt (Bild 1). In der Typformel sind alle Zündkerzenmerkmale enthalten – mit Ausnahme des Elektrodenabstands. Dieser wird zusätzlich auf der Verpackung angegeben. Die für den jeweiligen Motor passende Zündkerze ist vom Motorhersteller und von Bosch vorgeschrieben bzw. empfohlen.

1 Typformelschlüssel für Bosch-Zündkerzen



Herstellung von Zündkerzen

Pro Tag verlassen bis zu eine Million Zündkerzen das Bamberger Werk – europaweit die einzige Fertigungsstätte des Unternehmens Bosch für dieses Produkt. Für lokale Märkte und Erstausrüstungskunden fertigen daneben Werke in Indien, Brasilien, China und Russland Zündkerzen nach den weltweit gültigen Bosch-Qualitätsstandards. Insgesamt wurden weit über sieben Milliarden Zündkerzen von Bosch gefertigt.

In drei parallelen Arbeitsgängen entstehen die Einzelteile, die in der Endmontage zu einer Zündkerze zusammengefügt werden.

Isolator

Die hochwertige Keramik besteht im Wesentlichen aus Aluminiumoxid. Zur Herstellung wird die Tonerde mit Zuschlagsstoffen und Bindemitteln versehen und fein gemahlen. Das Granulat wird in Formen gefüllt und unter hohem Druck verpresst. Dabei wird dem Rohling auch schon die innere Form mitgegeben. Durch Schleifen der äußeren Kontur entsteht der Weichstein, der mit dem späteren Stöpsel schon sehr viel Ähnlichkeit hat. Im nächsten Arbeitsgang wird ein nur wenige Millimeter langer Pt-Stift mechanisch im Weichstein verankert. Die Keramikkörper durchlaufen einen Sinterofen und erhalten bei ca. 1600 °C ihre endgültige Form, und der Pt-Stift wird im Keramikkörper fixiert. Die durch den Sinterprozess auftretende Schwindung beträgt ungefähr 20 % und muss bei der Herstellung des Weichsteins mit berücksichtigt werden.

Nachdem die Isolatoren gebrannt sind, wird am Isolatorkopf die Beschriftung aufgebracht und dieser anschließend mit einer bleifreien Glasur überzogen.

Stöpsel

Die elektrische Kontaktierung zum Pt-Stift erfolgt über einen Kontaktstift, der im hintern Bereich angestaucht ist. Dieser Flügel sorgt später für die sichere Verankerung im Stöpsel. Nachdem der Kontaktstift in den Isolator eingefügt ist, wird in die Bohrung *Panat* eingefüllt. Das Panat besteht aus Glaspartikeln, denen leitfähige Teilchen hinzugefügt werden, um nach dem Einschmelzen eine leitfähige Verbindung zu dem Anschlussbolzen herzustellen. Durch Variation der einzelnen Komponenten kann auch der Widerstand des Panates variiert werden. Es sind Widerstandswerte bis zu 10 kΩ erreichbar.

Der *Anschlussbolzen* wird vom Draht gefertigt und erhält über Stauchen und Rändeln seine endgültige Form. Nachdem er mit einer schützenden Nickeloberfläche versehen worden ist, wird er in den Stöpsel eingesetzt. Der Stöpsel durchläuft anschließend einen Ofen und wird auf über 850 °C erhitzt. Bei diesen Temperaturen wird das Panat schmelzflüssig. Es umfließt die Mittelelektrode und der Anschlussbolzen kann in diese Schmelze eingedrückt werden. Nach dem Abkühlen des Stöpsels ist eine gasdichte und elektrisch leitende Verbindung zwischen der Mittelelektrode und dem Anschlussbolzen sichergestellt.

Gehäuse

Das Gehäuse besteht aus einem Stahlwerkstoff und wird auch fließpresstechnisch hergestellt. Dazu wird ein wenige Zentimeter großes Stück vom Draht abgeschert und in einer Presse in mehreren Arbeitsgängen kalt umgeformt bis die endgültige Kontur des Zündkerzengehäuses entsteht. Danach sind nur noch wenige spanende Arbeitsgänge (zur Herstellung der Schrumpf- und Gewindeeinstiche) notwendig. Nachdem die Masseelektroden (je nach KE-Typ bis zu vier Masseelektroden) auf das Gehäuse aufgeschweißt worden sind, wird das Gewinde aufgerollt und anschließend das komplette Gehäuse vernickelt, um es so vor Korrosion zu schützen.

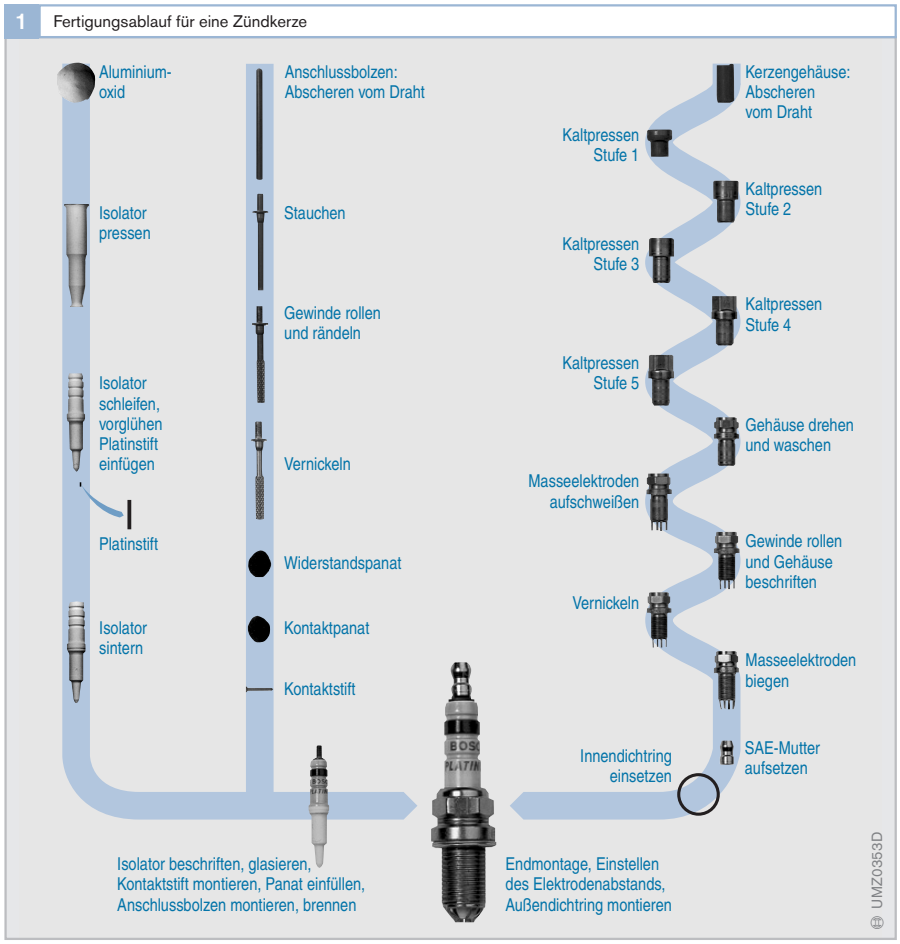
Zündkerzenmontage

Bei der Zündkerzenmontage wird in das Zündkerzengehäuse ein Dichtring eingelegt und der Stöpsel in das Gehäuse eingefügt. Durch Umbördeln des oberen Gehäuseteils wird der Stöpsel im Gehäuse fixiert. Ein anschließender Schrumpfvorgang (hier wird das Zündkerzengehäuse partiell über Induktion auf über 900 °C erwärmt) sorgt für die gasdichte Verbindung zwischen Zündkerzengehäuse und Stöpsel. Abschließend wird bei den Flachdichtsitz-Zündkerzen ein äußerer Dichtring montiert, der unter leichtem Druck verformt und auf diese Art und Weise unverlierbar wird. Dadurch wird bei der späteren Montage in den Zylinderkopf sichergestellt, dass der Brennraum abgedichtet ist.

Bei bestimmten Zündkerzenausführungen muss auf den mit einem M4-Gewinde versehenen Anschlussbolzen noch eine SAE-Mutter aufgeschraubt und zur sicheren Befestigung mehrfach verstemmt werden.

Nach dem Einstellen des Elektrodenabstands auf die Vorgaben des Motorenherstellers ist der Montageprozess beendet. Die Zündkerzen werden dann in markt- und kundenspezifischen Verpackungen zum Versand vorbereitet.

1 Fertigungsablauf für eine Zündkerze



Simulationsbasierte Entwicklung von Zündkerzen

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein mathematisches Näherungsverfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen, die das Verhalten von physikalischen Systemen beschreiben. Die Struktur wird dazu in einzelne Bereiche (finite Elemente) unterteilt.

FEM wird bei der Zündkerze zur Berechnung von Temperaturfeldern, elektrischen Feldern und strukturmechanischen Problemstellungen genutzt. Geometrie- und Werkstoffänderungen an der Zündkerze, oder auch unterschiedliche physikalische Randbedingungen und deren Auswirkungen, können ohne aufwändige Versuche vorab bestimmt werden. Dies ist die Basis für eine gezielte Herstellung von Versuchsmustern, mit denen die Verifizierung der Berechnungsergebnisse exemplarisch erfolgt.

Temperaturfeld

Entscheidend für den Wärmewert der Zündkerze sind die maximalen Temperaturen des Keramikisolators und der Mittelelektrode im Brennraum. Bild 1a zeigt beispielhaft das axialsymmetrische Halbmodell einer Zündkerze und einen Ausschnitt des Zylinderkopfs. Anhand der farbig dargestellten Temperaturfelder ist ersichtlich, dass die höchste Temperatur an der Spitze des Keramikisolators auftritt.

Elektrisches Feld

Zum Zündzeitpunkt soll die angelegte Hochspannung zum Funkenüberschlag an den Elektroden führen. Funkendurchschläge in der Keramik oder das Ableiten des Funkens über den Keramikisolator zum Zündkerzengehäuse können zu verschleppten Verbrennungen oder Entflammungsaussetzern führen. Bild 1b zeigt ein axialsymmetrisches Halbmodell mit den entsprechenden Feldstärkevektoren zwischen der Mittelelektrode und dem Gehäuse. Das elektrische Feld durchdringt die Nichtleiter Keramik und das dazwischenliegende Gas.

Strukturmechanik

Bei der Verbrennung treten im Brennraum hohe Drücke auf, die einen gasdichten Verbund des Zündkerzengehäuses mit dem Keramikisolator erfordern. Bild 1c zeigt ein axialsymmetrisches Halbmodell einer Zündkerze nach dem Bördeln und Warmschrumpfen des Zündkerzengehäuses. Berechnet wurden die Einspannkraft und die mechanischen Spannungen des Zündkerzengehäuses.

1 FEM-Anwendung bei der Zündkerze

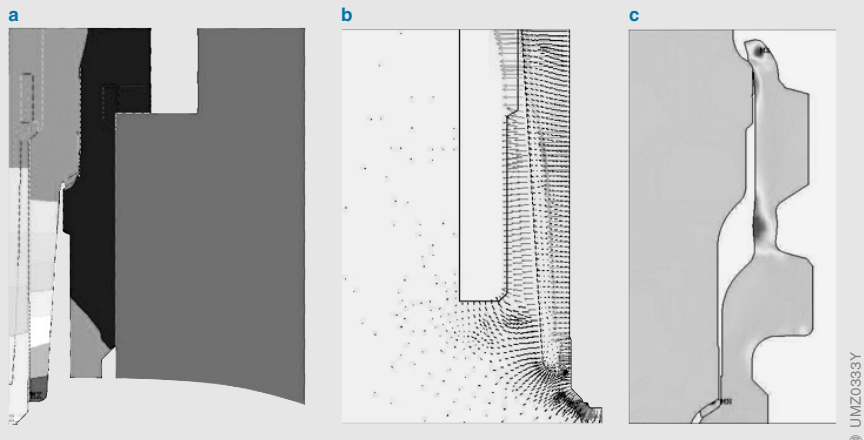


Bild 1
Axialsymmetrische Halbmodelle einer Zündkerze
a Temperaturverteilung im Keramikisolator und in der Mittelelektrode
b Elektrische Feldstärke im Bereich Mittelelektrode und Gehäuse
c Einspannkraft und mechanische Spannungen des Zündkerzengehäuses

Zündkerzen-Praxis

Zündkerzenmontage

Bei richtiger Montage und bei richtiger Typauswahl ist die Zündkerze ein zuverlässiger Bestandteil der Zündanlage.

Ein Nachjustieren des Elektrodenabstands wird nur bei Zündkerzen mit Dachelektroden empfohlen. Bei Gleitfunken- und Luftgleitfunken-Zündkerzen dürfen die Masseelektroden nicht nachjustiert werden, da sonst das Zündkerzenkonzept verändert wird.

Ausbau

Beim Ausbau schraubt man die Zündkerze zunächst einige Gewindegänge heraus. Dann wird die Zündkerzenmulde mit Druckluft oder einem Pinsel gereinigt, damit keine Schmutzteilchen in das Gewinde des Zylinderkopfs oder in den Verbrennungsraum gelangen können. Erst dann wird die Zündkerze ganz herausgeschraubt.

Schwergängige Zündkerzen schraubt man nur wenig heraus, um eine Beschädigung des Gewindes im Zylinderkopf zu vermeiden. Dann lässt man Öl oder ein ölhaltiges Lösungsmittel auf die Gewindegänge tropfen, dreht die Zündkerze wieder hinein und versucht, sie nach kurzer Einwirkungszeit vollständig herauszuschrauben.

Einbau

Beim Einbau der Zündkerze im Motor ist folgendes zu beachten:

- Die Auflageflächen an der Zündkerze und am Motor müssen sauber sein.
- Bosch-Zündkerzen sind mit einem Korrosionsschutzöl behandelt, sodass kein zusätzliches Schmiermittel notwendig ist. Ein Festbrennen ist nicht möglich, weil die Gewindegänge vernickelt sind.

Zündkerzen sollen möglichst mit einem Drehmomentschlüssel festgezogen werden. Das Drehmoment wird beim Anziehen der Zündkerze vom Sechskant ausgehend auf Dichtsitz und Gewinde übertragen. Wenn wegen eines zu starken Anziehdrehmoments oder wegen Verkanten eines Zündkerzenschlüssels das Zündkerzengehäuse verzogen wird, kann sich der Isolator lockern. Dadurch ist der Wärmehaushalt der Zündkerze gestört, und es kann zu Motorschädigungen kommen. Deshalb darf das Anziehdrehmoment einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Die festgelegten Anziehdrehmomente gelten für Zündkerzen im Neuzustand, also für leicht eingeölte Zündkerzen.

In der Praxis wird oftmals ohne Drehmomentschlüssel gearbeitet. Dadurch werden die Zündkerzen meistens viel zu stark angezogen. Bosch empfiehlt deshalb, nach folgenden Faustregeln vorzugehen:

Erstens: Die Zündkerze von Hand in das gesäuberte Gewinde einschrauben, bis es von Hand nicht mehr weitergeht, dann Zündkerzenschlüssel aufsetzen, wobei nun unterschieden wird zwischen:

- Neuen Zündkerzen mit Flachdichtsitz, die nach erster Drehhemmung um ca. 90° weiterzudrehen sind,
- gebrauchten Zündkerzen mit Flachdichtsitz, die um ca. 30° weiterzudrehen sind,
- Zündkerzen mit Kegeldichtsitz, die um ca. 15° weiterzudrehen sind.

Zweitens: Steckschlüssel sollen beim Festziehen oder Lösen der Zündkerze nicht schräg gehalten werden; der Isolator wird sonst abgedrückt oder zur Seite gedrückt, und die Zündkerze wird unbrauchbar.

Drittens: Bei Steckschlüsseln mit losem Dorn muss das Loch für den Dorn oberhalb der Zündkerze liegen, damit der Dorn voll durch den Steckschlüssel geschoben werden kann. Bei tiefer liegendem Loch und nur kurz eingestecktem Dorn wird die Zündkerze beschädigt.

Fehler und ihre Folgen

Für einen bestimmten Motortyp dürfen nur die vom Motorhersteller freigegebenen oder von Bosch empfohlenen Zündkerzen verwendet werden. Um eine falsche Auswahl von vornherein auszuschließen, sollte ein Kraftfahrer den Fachmann eines Bosch Service zur Beratung heranziehen. Außerdem geben Kauf- und Orientierungshilfen wie Kataloge, Warenträger mit Informationstafeln oder Verwendungsübersichten die gewünschten Auskünfte.

Bei Verwendung ungeeigneter Zündkerzentypen können schwere Motorschäden entstehen. Die am häufigsten vorkommenden Fehler sind:

- falsche Wärmewertkennzahl,
- falsche Gewindelänge oder
- Manipulation am Dichtsitz.

Falsche Wärmewertkennzahl

Die Wärmewertkennzahl muss unbedingt mit der Zündkerzenvorschrift des Motorherstellers oder der Empfehlung von Bosch übereinstimmen. Glühzündungen können die Folge sein, wenn Zündkerzen mit einer anderen als für den Motor vorgeschriebenen Wärmewertkennzahl verwendet werden.

Falsche Gewindelänge

Die Gewindelänge der Zündkerze muss der Gewindelänge im Zylinderkopf entsprechen. Ist das Gewinde zu lang, dann ragt die Zündkerze zu weit in den Verbrennungsraum. Mögliche Folgen:

- Beschädigung des Kolbens,
- das Verkoken der Gewindegänge der Zündkerze kann ein Herausschrauben unmöglich machen oder
- Überhitzen der Zündkerze.

Ist das Gewinde zu kurz, so ragt die Zündkerze nicht weit genug in den Verbrennungsraum. Mögliche Folgen:

- schlechtere Gemischentflammung,
- Zündkerze erreicht ihre Freibrenntemperatur nicht und
- die unteren Gewindegänge im Zylinderkopf verkoken.

Manipulation am Dichtsitz

Bei Zündkerzen mit Kegeldichtsitz darf weder eine Unterlegscheibe noch ein Dichtring verwendet werden. Bei Zündkerzen mit Flachdichtsitz darf nur der an der Zündkerze befindliche „unverlierbare“ Dichtring verwendet werden. Er darf nicht entfernt oder durch eine Unterlegscheibe ersetzt werden.

Ohne Dichtring ragt die Zündkerze zu weit in den Verbrennungsraum. Deshalb ist der Wärmeübergang vom Zündkerzengehäuse zum Zylinderkopf beeinträchtigt und der Zündkerzensitz dichtet schlecht.

Wird ein zusätzlicher Dichtring verwendet, so ragt die Zündkerze nicht tief genug in die Gewindebohrung, und der Wärmeübergang vom Zündkerzengehäuse zum Zylinderkopf ist ebenfalls beeinträchtigt.

Zündkerzengesichter

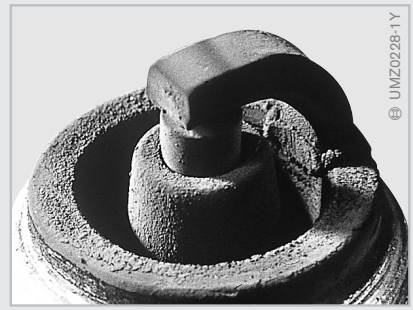
Zündkerzengesichter geben Aufschluss über das Betriebsverhalten von Motor und Zündkerze. Das Aussehen von Elektroden und Isolatoren der Zündkerze – des „Zündkerzengesichts“ – gibt Hinweise auf das Betriebsverhalten der Zündkerze sowie auf die Gemischzusammensetzung und den Verbrennungsvorgang des Motors (Bilder 1 bis 3, folgende Seiten).

Das Beurteilen der Zündkerzengesichter ist damit ein wesentlicher Bestandteil der Motordiagnose. Eine verlässliche Aussage ist allerdings an die folgende wichtige Voraussetzung gebunden: Bevor die Zündkerzengesichter beurteilt werden können, muss man das Kraftfahrzeug fahren. Ein vorausgehender längerer Leerlauf, insbesondere dann, wenn der Motor kalt gestartet wurde, kann dazu führen, dass sich Ruß niederschlägt und so das „wahre Zündkerzengesicht“ verdeckt. Das Fahrzeug sollte über eine Strecke von 10 km gefahren werden. Dabei muss der Motor mit wechselnden Drehzahlen im mittleren Leistungsbereich betrieben werden. Ein längerer Leerlauf vor dem Abstellen des Motors ist zu vermeiden.

1 Zündkerzengesichter, Teil 1

① **Normal.**
Isolatorfuß von grauweißer-graugelber bis rehbrauner Farbe. Motor in Ordnung. Wärmewert richtig gewählt. Gemischeinstellung und Zündeinstellung sind einwandfrei, keine Zündaussetzer, Kaltstarteinrichtung funktioniert.
Keine Rückstände von bleihaltigen Kraftstoffzusätzen oder Legierungsbestandteilen vom Motoröl. Keine thermische Überlastung.

② **Verrußt.**
Isolatorfuß, Elektroden und Zündkerzengehäuse mit samtartigem, stumpfschwarzem Ruß bedeckt.
Ursache: Fehlerhafte Gemischeinstellung (Vergaser, Einspritzung): Gemisch zu fett, Luftfilter stark verschmutzt, Startautomatik nicht in Ordnung oder Starterzug (Choke) zu lang gezogen, überwiegend Kurzstreckenverkehr, Zündkerze zu kalt, Wärmewertkennzahl zu niedrig.
Auswirkung: Zündaussetzer, schlechtes Kaltstartverhalten.
Abhilfe: Gemisch und Starteinrichtung richtig einstellen, Luftfilter prüfen.



③ **Verölt.**
Isolatorfuß, Elektroden und Zündkerzengehäuse mit ölglänzendem Ruß oder Ölkohle bedeckt.
Ursache: Zu viel Öl im Verbrennungsraum. Ölstand zu hoch, stark verschlissene Kolbenringe, Zylinder und Ventilführungen.
Bei Zweitakt-Ottomotoren zu viel Öl im Gemisch.
Auswirkung: Zündaussetzer, schlechtes Startverhalten.
Abhilfe: Motor überholen, richtiges Öl-Kraftstoff-Gemisch, neue Zündkerzen.

④ **Verbleiung.**
Isolatorfuß weist stellenweise braungelbe Glasur auf, die auch ins Grünliche gehen kann.
Ursache: Bleihaltige Kraftstoffzusätze. Die Glasur entsteht bei hoher Motorbelastung nach längerem Teillastbetrieb.
Auswirkung: Bei höherer Last wird Belag elektrisch leitend und bewirkt Zündaussetzer.
Abhilfe: Neue Zündkerzen, Reinigung ist zwecklos.

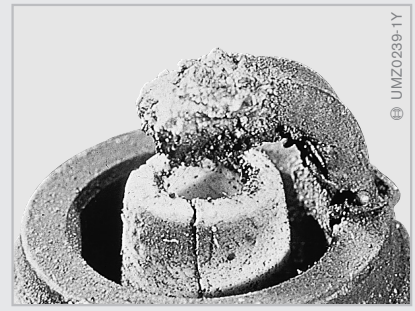
2 Zündkerzengesichter, Teil 2

⑤ **Starke Verbleiung.**
Isolatorfuß weist stellenweise dicke braungelbe Glasur auf, die auch ins Grünliche gehen kann.
Ursache: Bleihaltige Kraftstoffzusätze: Die Glasur entsteht bei hoher Motorbelastung nach längerem Teillastbetrieb.
Auswirkung: Bei höherer Last wird Belag elektrisch leitend und bewirkt Zündaussetzer.
Abhilfe: Neue Zündkerzen. Reinigung ist zwecklos.

⑥ **Aschebildung.**
Starker Aschebelag aus Öl- und Kraftstoffzusätzen auf dem Isolatorfuß, im Atmungsraum (Ringspalt) und auf der Masseelektrode. Lockerer bis schlackenähnlicher Aufbau.
Ursache: Legierungsbestandteile insbesondere aus Öl können diese Asche im Brennraum und auf dem Kerzengesicht hinterlassen.
Auswirkung: Kann zu Glühzündungen mit Leistungsverlust und zu Motorschäden führen.
Abhilfe: Motor in Ordnung bringen. Neue Zündkerzen, eventuell anderes Öl verwenden.

⑦ **Angeschmolzene Mittelelektrode.**
Mittelelektrode angeschmolzen, blasige, schwammartige, erweichte Isolatorfußspitze.
Ursache: Thermische Überlastung aufgrund von Glühzündungen. Zum Beispiel wegen zu früher Zündeinstellung, Verbrennungsrückständen im Brennraum, defekter Ventile, schadhafter Zündverteiler und unzureichender Kraftstoffqualität. Eventuell Wärmewert zu niedrig.
Auswirkung: Zündaussetzer, Leistungsverlust (Motorschäden).
Abhilfe: Motor, Zündung und Gemischaufbereitung überprüfen. Neue Zündkerze mit richtigem Wärmewert.

⑧ **Abgeschmolzene Mittelelektrode.**
Mittelelektrode abgeschmolzen, Masseelektrode gleichzeitig stark angegriffen.
Ursache: Thermische Überlastung aufgrund von Glühzündungen. Zum Beispiel wegen zu früher Zündeinstellung, Verbrennungsrückständen im Brennraum, defekter Ventile, schadhafter Zündverteiler und unzureichender Kraftstoffqualität.
Auswirkung: Zündaussetzer, Leistungsverlust, eventuell Motorschaden. Isolatorfußriß wegen überhitzter Mittelelektrode möglich.
Abhilfe: Motor, Zündung und Gemischaufbereitung überprüfen. Neue Zündkerzen.

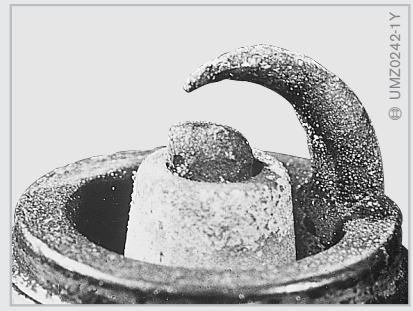
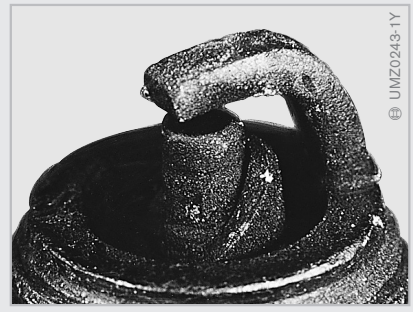


3 Zündkerzengesichter, Teil 3

⑨ **Angeschmolzene Elektroden.**
Blumenkohlartiges Aussehen der Elektroden. Eventuell Niederschlag von kerzenfremden Materialien.
Ursache: Thermische Überlastung aufgrund von Glühzündungen. Zum Beispiel wegen zu früher Zündeinstellung, Verbrennungsrückständen im Brennraum, defekter Ventile, schadhafter Zündverteiler und unzureichender Kraftstoffqualität.
Auswirkung: Vor Totalausfall (Motorschaden) tritt Leistungsverlust auf.
Abhilfe: Motor, Zündung und Gemischaufbereitung überprüfen. Neue Zündkerzen.

⑩ **Starker Verschleiß der Mittelelektrode.**
Ursache: Zündkerzen-Wechselintervall nicht beachtet.
Auswirkung: Zündaussetzer, besonders beim Beschleunigen (Zündspannung für großen Elektrodenabstand nicht mehr ausreichend). Schlechtes Startverhalten.
Abhilfe: Neue Zündkerzen.

⑪ **Starker Verschleiß der Masseelektrode.**
Ursache: Aggressive Kraftstoff- und Ölzusätze. Ungünstige Strömungseinflüsse im Brennraum, eventuell aufgrund von Ablagerungen. Motorklopfen. Keine thermische Überlastung.
Auswirkung: Zündaussetzer, besonders beim Beschleunigen (Zündspannung für großen Elektrodenabstand nicht mehr ausreichend). Schlechtes Startverhalten.
Abhilfe: Neue Zündkerzen.



⑫ **Isolatorfußbruch.**
Ursache: Mechanische Beschädigung (z. B. Schlag, Fall oder Druck auf die Mittelelektrode bei unsachgemäßer Handhabung). In Grenzfällen kann aufgrund von Ablagerungen zwischen Mittelelektrode und Isolatorfuß und durch Korrosion der Mittelelektrode der Isolatorfuß (besonders bei überlanger Betriebsdauer) gesprengt werden.
Auswirkung: Zündaussetzer. Zündfunke springt an Stellen über, die durch Frischgemisch nicht sicher erreicht werden.
Abhilfe: Neue Zündkerzen.