

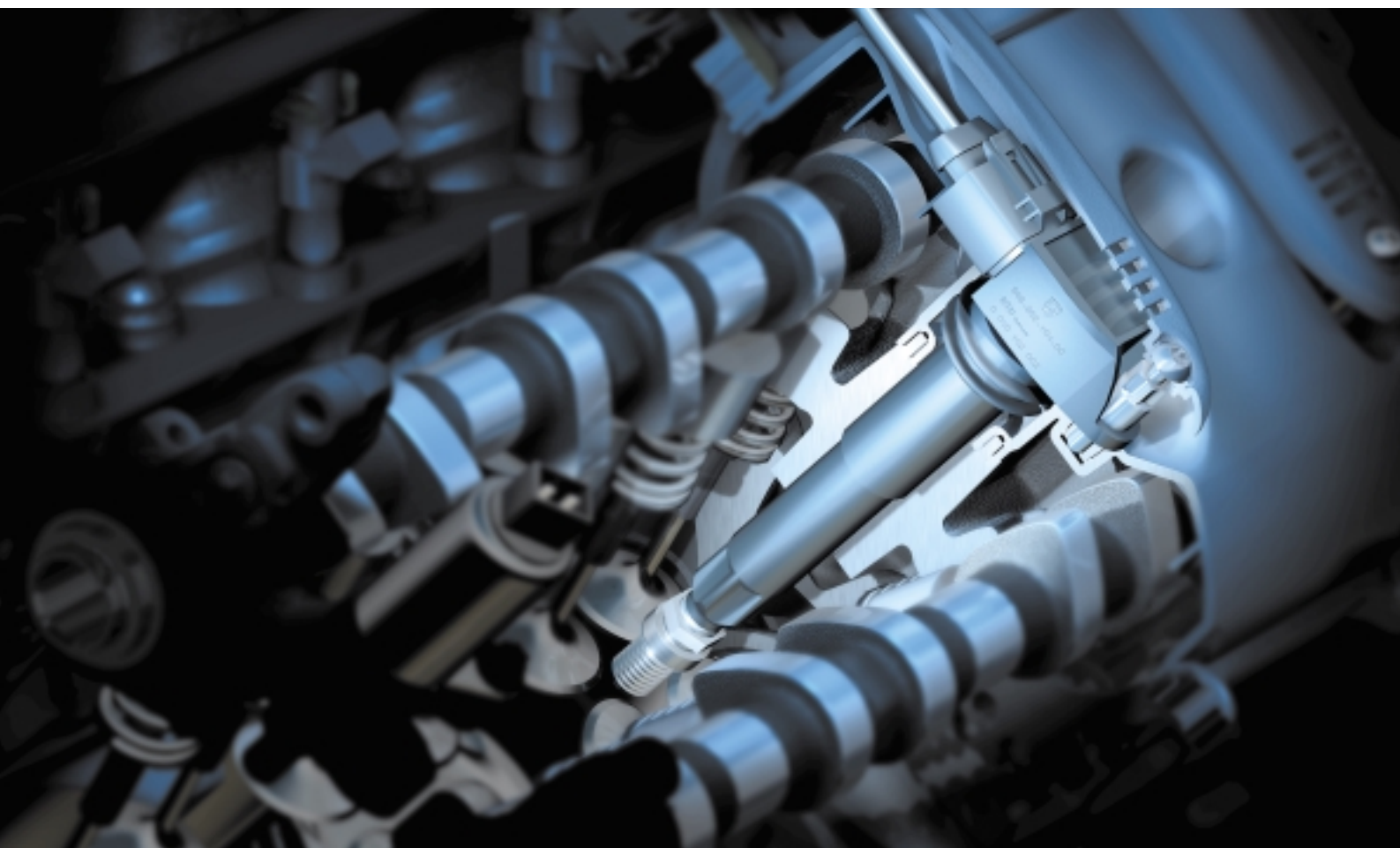
Innovatives Stabzündmodul von Beru für den Porsche V8-Motor

Sonderdruck aus der
Motortechnischen Zeitschrift (MTZ)

Perfektion
eingebaut



Stabzündmodul für den V8-Motor von Porsche



**Von Manfred Adolf,
Hans Houben,
Christian Mergentahler,
Francesco Tridico und
Arno Wunderlich**

Für den Cayenne entwickelte Porsche eine neue Motoren- generation, die unterschiedlichsten Anforderungen an einen sportlichen Geländewagen gerecht werden sollte. Die Entscheidung fiel zu Gunsten eines V8-Konzepts, wobei das angestrebte, besonders kompakte Motor-Package auch eine neue Zündspulentechnik nötig machte. Gemeinsam mit Beru wurde ein komplexes Hightech-Bauteil entwickelt: eine Stabzündspule mit integrierter Elektronik, ein neues Konzept in der Beru-Produktlinie „Zündspule“.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung des Porsche Cayenne fiel frühzeitig die Entscheidung, für das Fahrzeug auch ein komplett neu entwickeltes V8-Antriebsaggregat zu realisieren, das den spezifischen Anforderungen an ein SUV nach Porsche-Philosophie besonders hinsichtlich Drehmoment und der angestrebten Neigungsfähigkeit von 45° nach allen Seiten gerecht wird.

Um verschiedene Leistungsvarianten darstellen zu können, wurde das Aggregat als Saug- und Turbomotor konzipiert. Die umgesetzten Lastenheft-Eckwerte liegen bei 4,5 l Hubraum und 250 kW, 420 Nm für den Sauger und 331 kW, 620 Nm bei der Variante mit Turboaufladung, der über zwei Lader (Biturbo) verfügt (siehe dazu auch das ATZ/MTZ extra „Porsche Cayenne“, Juli 2003).

2 Intelligentes Stabzündmodul mit verbesserter Leistung

Der für den SUV-Einsatz ebenfalls neu gestaltete Allradantrieb, das Porsche Traction Management (PTM), die Reduktionsstufe und die Längssperre sowie die Vollvernetzung der Steuergeräte im Antriebsbereich erforderten ein neues Konzept einer komplexen Motorsteuerung mit einer Vielzahl von Endstufen. Um die Verlustleistung im Motorsteuergerät gering zu halten, mussten die üblicherweise integrierten Zündendstufen in die Zündspule verlagert werden. Durch den motornahen Anbau waren deshalb zur sicheren Beherrschung des Wärmemanagements der Elektronik besondere Maßnahmen erforderlich (siehe Kapitel 3.5 und 3.6). Außer einem kostenoptimierten Design, höchster Zuverlässigkeit und SUV-Tauglichkeit sollten noch die folgenden Anforderungen erfüllt werden.

2.1 Die Anforderungen

- 15 % Gewichtsreduktion gegenüber der aktuellen Sportwagen-Zündspule
- Berücksichtigung des Kerzenschacht-Durchmessers von 26 mm
- Umsetzung der optischen Vorstellungen der Porsche-Designabteilung
- Erfüllung der Schwingbeschleunigungsanforderungen für die gesamte Motorenpalette
- zuverlässiges elektrisches Stecksystem für motorfesten Anbau
- SUV-taugliche und ohne Sonderwerkzeug lösbare Befestigung mit sicherer Federkontaktierung der Zündkerze und Toleranzausgleich
- mindestens 25 % höhere Funkenenergie und Brenndauer, bezogen auf die aktuelle Sportwagen-Zündspule

3 Spulenkonzzept



Bild 1: Das Stabzündmodul mit separat dargestellter Elektronik und Power-IC am Kühlkörper

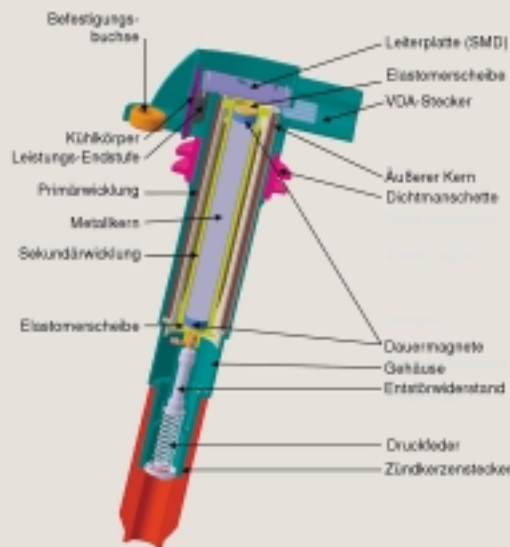


Bild 2: Schnitt durch das Stabzündmodul mit seinen Einzelteilen

- hohe Integration der Elektronik
- zuverlässige Eigendiagnose mit Selbstabschaltung und Statusübertragung an das Motor-Steuergerät
- temperaturrobuste IGBT-Zündendstufe
- im Schlepfbetrieb beim Kalttest des Motors Prüfmöglichkeit der korrekten Funktion des Zündsystems; das heißt Prüfmöglichkeit bereits in der Produktion.

Die konsequente Einhaltung des eng gesteckten Zeitplans und die Umsetzung der technischen Vorgaben bei gleichzeitiger

Erfüllung der Porsche-Qualitätsforderungen war dabei eine besondere Herausforderung für alle Beteiligten.

2.2 Die Marktsituation

Nach intensiven Recherchen der auf dem Markt angebotenen sowie verschiedener in Entwicklung befindlicher Zündsysteme ließ sich kein Zündmodul finden, das die hohen Vorgaben bezüglich Funktion, Qualität und Preis erfüllte. Daher wurde bei Porsche die Entscheidung ge-

3.1 Äußerer Aufbau

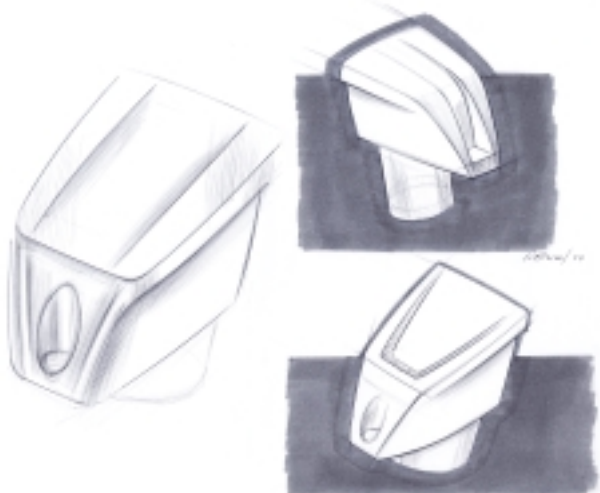


Bild 3: Designskizzen für den sichtbaren Spulenkopf

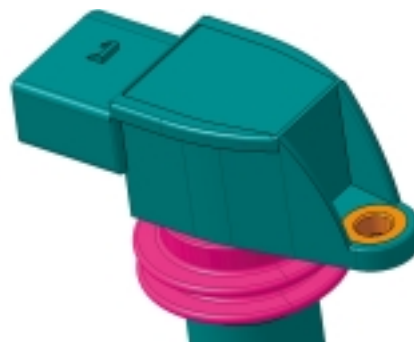


Bild 4: Der Spulenkopf mit Befestigungsbuchse

troffen, das Zündmodul für die neue Motorenbaureihe mit einem geeigneten Partner komplett neu zu entwickeln.

Nach Bewertung mehrerer in- und ausländischer Zulieferer fiel die Wahl auf die Firma Beru als Entwicklungspartner für ein aktives Stabzündmodul. Das in Ludwigsburg bei Stuttgart ansässige Unternehmen bot sowohl die nötige fachliche Kompetenz als auch die zeitliche Flexibilität für dieses anspruchsvolle Projekt.

2.3 Simultaneous Engineering

Zuerst erfolgte die Einrichtung eines mit Beru- und Porsche-Ingenieuren besetzten Simultaneous-Engineering-Teams (SE), das die Themen Planung, Entwicklung, Bauteilqualifikation und Erprobung bearbeitete. Dadurch konnten bereits lange vor dem Serienstart des Cayenne Serienteile zur Dauererprobung geliefert werden.

3 Spulenkonzep

Die Zündspule ist als so genannte „Pencil Coil“ (Stabzündspule) mit integrierter Elektronik ausgelegt, **Bild 1** und **Bild 2**.

3.1 Äußerer Aufbau

Die Kopfform des Stabzündmoduls entstand in engerer Zusammenarbeit zwischen dem SE-Team und der Porsche-Designabteilung, **Bild 3**.

Sehr viel Wert wurde auf die vollständige Kapselung der Zündspule mit Kunststoff gelegt, so dass in verbautem Zustand kein Metallteil sichtbar ist. Damit lassen sich die Forderungen nach höchster Korrosionsbeständigkeit und Berührungsschutz optimal erfüllen, **Bild 4**.

3.2 Innerer Aufbau

Das Schnittbild, Bild 2, zeigt den Aufbau des Stabzündmoduls und seine Einzelteile.

Um den zentralen Metallkern bauen sich radial nach außen die Sekundärwicklung, die Primärwicklung sowie die Rückschlussbleche als äußerer Teil des Magnetkreises auf. Dazwischen liegt jeweils eine Isolationsschicht aus Kunststoff oder Gießharz.

Die gewählte Wicklungsanordnung um den Kern hat folgende Vorteile:

- Die mittig angeordnete Hochspannungsspule vereinfacht die Isolation.
- Die Primärwicklung wirkt als Abschirmung für die sekundäre Hochspannungswicklung und verhindert eine kapazitive Aufladung des Außenblechs.

Eine Linearisierung des Magnetkreises wird durch zwei Dauermagnete erreicht. Diese sind an den beiden Enden des Innenkerns angeordnet.

An den Stirnseiten der Dauermagnete sind Elastomerscheiben angebracht. Sie haben die Aufgabe, thermische sowie magnetostatische Ausdehnungen des Kerns auszugleichen.

Die in der Sekundärwicklung erzeugte Hochspannung wird über einen Entstörwiderstand und eine wegen der benötigten Ozonbeständigkeit aus Edelstahl gefertigte Druckfeder an die Zündkerze weitergeleitet.

Der Zündkerzenstecker besteht aus hochwertigem Silikon mit einer Temperaturfestigkeit von über 200 °C.

Unterhalb des Zündspulenkopfs ist eine Dichtmanschette montiert. Sie verhindert, dass im eingebauten Zustand Feuchtigkeit in den Kerzenschacht eindringt.

3.3 Einbau im Zylinderkopf

Der Einbau erfolgt im Kerzenschacht direkt auf der Zündkerze. Mit einer M6-Schraube durch die Befestigungsbuchse am Spulenkopf wird das Stabzündmodul am Ventildeckel befestigt. Es stützt sich dabei zum einen durch die Manschette an der Innenwand des Kerzenschachts und zum anderen durch den Silikon-Zündkerzenstecker auf der Zündkerze ab und ist somit gedämpft gelagert.

3.4 Elektrische Schnittstellen

Die Kontaktierung des Stabzündmoduls erfolgt über einen vierpoligen normierten VDA-Stecker mit 2,8-mm-Flachkontakten. Dieser ist Bestandteil des Zündspulenkopfs.

Zündkerzenseitig wird die Kontaktierung mittels der bereits erwähnten Druckfeder hergestellt. Sie sitzt im Hochspannungsdom und ist so dimensioniert, dass sie Gesamt-Höhentoleranzen von ± 2 mm vollständig ausgleichen kann. In Abhängigkeit vom Federweg stellt sich die Druckkraft zwischen 4 N und 12 N ein.

3.5 Einbau der Elektronik

Die komplette Elektronik ist im Zündspulenkopf untergebracht. Sie besteht aus einer mit SMD-Bausteinen (Surface Mounted Devices) bestückten Leiterplatte, einer Leistungsendstufe sowie einer Aluminiumplatte als Kühlkörper. Die einzelnen Bauteile sind selektiv mit einem Weichverguss beschichtet und damit von mechanischen Spannungen durch Temperaturwechselbelastung entkoppelt. Die Bauteil-Bestückungsseite und die Lötseite für die Kontaktierung der Spule und Verbindung zum Stecker sind getrennt.

Aufgrund der Wärmeentwicklung des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) wurden dieser und der benötigte Kühlkörper an der Außenwand des Steckerteils angeordnet, womit die Wärmeabfuhr verbessert wird.

3.6 Aufbau der Elektronik

Die eingesetzte Platine enthält einen ASIC (Application Specific Integrated Circuit, siehe Kapitel 4), verschiedene EMV-Kondensatoren sowie Hochspannungsdioden zur Einschaltfunken-Unterdrückung.

Der als Schalter eingesetzte spezielle Zündungs-IGBT ist ein Hochspannungs-Leistungsschalter in einem TO 220-Gehäuse mit ESD-Schutz (Electro Static Discharge) und integrierter Zener-Diode zur Spannungsbegrenzung im Primärkreis.

Die Leistungsendstufe ist räumlich von der Platine getrennt, zusätzlich wird eine Aluminium-Kühlplatte zur Wärmedissipation am Kollektor des IGBT bei Spitzenbelastungen eingesetzt.

4 Der ASIC

Nach der Festlegung aller Funktionen und dem Nachweis der Funktionalität mit einer diskret aufgebauten Schaltung wurden die „Smart Features“ in einen ASIC integriert. Dadurch ließ sich die Zahl der Bauteile von 33 auf 11 reduzieren, **Bild 5**. Dies ist mechanisch günstiger und EMV-optimiert; der Aufbau ist kompakter, stabiler und damit zuverlässiger.

In weniger als einem Jahr gelang die Entwicklungsumsetzung des ASIC vom Auftrag bis zur Erstbemusterung einschließlich einer Optimierung und einem Anpassungs-Redesign.

4.1 Ansteuerung des ASIC

Die Ansteuerung des ASICs erfolgt über ei-

ne Stromschnittstelle, siehe Blockschaltbild, **Bild 6**. Die internen Stromsenken $I_{PD0} + I_{PD1}$ übernehmen den Quellenstrom vom Steuergerät in der Höhe, bei der das Steuergerät keinen Lastabwurf registriert.

Im Normalbetrieb sind beide Stromquellen I_{PD0} und I_{PD1} parallel geschaltet, der Schalter S ist geschlossen.

Das Steuergerät muss zum Ansteuern der Spule für den logischen Pegel „H“ einen Strom von $I_{IH \text{ min}} = 18 \text{ mA}$ liefern können, da die Stromsenken im Bereich zwischen $I_{PD} = 9 \text{ mA} \dots 18 \text{ mA}$ arbeiten.

Der Wert von I_{IH} ergibt sich aus der Summe beider Stromsenken. $I_{IH} = I_{PD0} + I_{PD1}$. Durch die internen Stromquellen ist nur die Einschaltsschwelle $I_{IH \text{ min}}$ von Bedeutung.

Der logische Pegel „L“ wird bei $I_{IL \text{ max}} = 0,1 \text{ mA}$ erkannt.

4.2 Diagnosefunktion im Fehlerfall

Durch eine Absenkung des Eingangsstroms I_{IN} erfolgt die Meldung eines Fehlerfalls an das Motorsteuergerät. Dieser kann nur drei mögliche Ursachen haben:

- die integrierte Soft-Shutdown-Funktion ist aktiv
- die Schnittstelle ist hochohmig
- die Betriebsspannung fehlt.

In diesen Fällen wird der Schalter S geöffnet und dadurch die Stromsenke I_{PD1} abgeschaltet. Damit ist nur noch die Stromsenke I_{PD0} aktiv. Sie reduziert den Ein-

4 Der ASIC

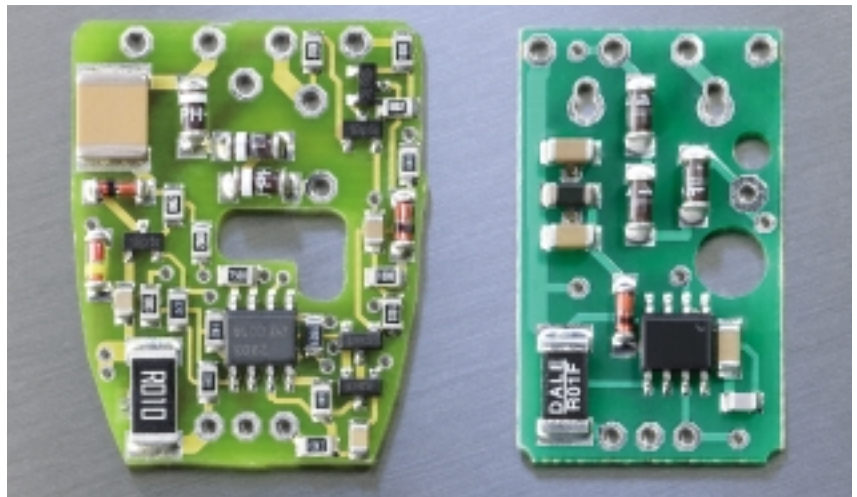


Bild 5: Erprobungsplatine mit diskretem Aufbau (links) und Serienversion mit ASIC (rechts)

4.1 Ansteuerung des ASIC

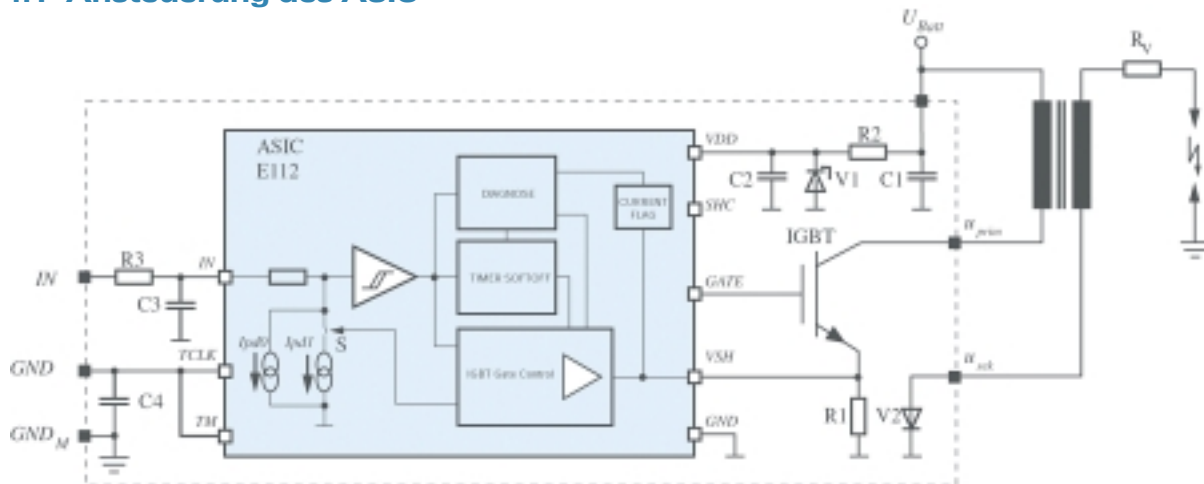


Bild 6: Blockschaltbild der kompletten Elektronik

4.3 Strombegrenzung

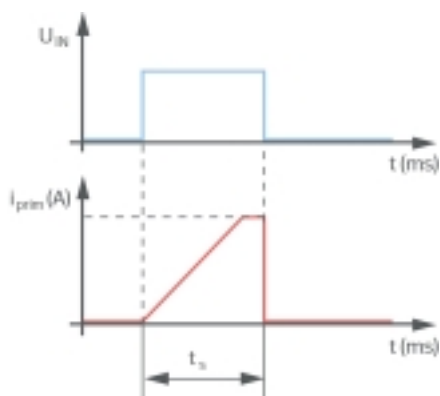


Bild 7: Kurven a (oben) und b (unten) der „Strombegrenzung“

gangssteuerstrom auf den Wert von $I_{PDD} = 0,12...1$ mA, womit die Diagnoserückmeldung an das Steuergerät erfolgt.

4.3 Strombegrenzung

Die Kurven a und b in **Bild 7** zeigen die Funktion der Strombegrenzung: Mit Hilfe des Spannungsabfalls am Shunt-Widerstand $R1$ wird der Primärstrom im Primärkreis der Zündspule detektiert und auf $I_{prim} = 18$ A begrenzt.

4.4 Soft-Shutdown-Timer

Die Kurven c und d in **Bild 8** zeigen die Funktion des Soft-Shutdown-Timers. Er realisiert im Fehlerfall bei zu langer Einschaltzeit durch das Motorsteuergerät eine funkenfreie Abschaltung des Primärkreises.

Der Timer für die Auslösung besteht aus einem Zähler, der mit der L/H-Flanke vom aktiven Eingangssignal gestartet und mit der H/L-Flanke zurückgesetzt wird. Bleibt das Eingangssignal inaktiv auf „H“ stehen und überschreitet die maximale Impulsdauer, so läuft der Timer ab und erzeugt ein Signal zur langsamen, kennliniengesteuerten Abschaltung des Primärkreises.

5 Leistungsdaten der Spule

Primärstrom [A]	9	15
Stromanstiegszeit [ms]	1,75	2,4
Sekundärspannung [kV] 1 MOhm // 25 pF	26	31
Energiedaten (Sekundärbelastung 1000-V-Zener entspr. ISO 6518-2)		
Brenndauer [ms]	1,7	1,85
Brennstrom [mA]	60	80
Funkenenergie [mJ]	45	65

Tabelle:
Wesentliche
Daten des Stab-
zündmoduls

4.5 Zusatzfunktionen

Optional lässt sich mit dem ASIC ein Stromflag für eine Closed-Loop-Regelung des Schließwinkels erzeugen und über die Rückmeldung auf der Ansteuerleitung auswerten. Der ASIC ist überdies gegen Überspannungen, Verpolung und gegen Kurzschluss abgesichert.

5 Leistungsdaten der Spule

Die Spule erzeugt bei einer maximalen Primärstromaufnahme von 15 A eine Hochspannung > 29 kV bei einer Last von $1\text{ M}\Omega // 25\text{ pF}$ und eine Funkenenergie von ≥ 60 mJ. Vor allem der hohe Primärstrom führt zu einer starken Wärmeentwicklung im Spulenbereich, dem durch die Auswahl der verwendeten Werkstoffe und Bauteile Rechnung getragen wird.

Die **Tabelle** zeigt die wesentlichen Daten des Stabzündmoduls.

5.1 Elektromagnetische Verträglichkeit

Durch den integrierten Entstörwiderstand und die Entstörkondensatoren auf der Pla-

4.4 Soft-Shutdown-Timer

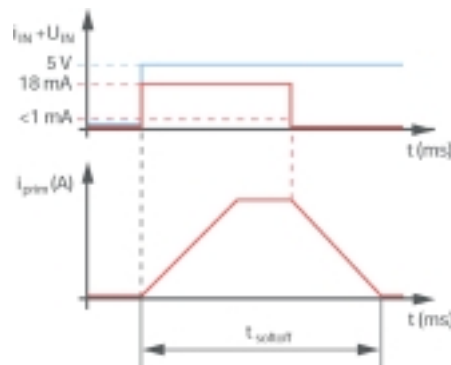


Bild 8: Kurven c (oben) und d (unten) des „Soft-Shut-Down“

tine werden die von Porsche vorgeschriebenen Entstörgrade erreicht.

Untersucht wurden dazu die Einflüsse:

- leitungsgeführte Störgrößen auf Versorgungsleitungen
- kapazitiv eingekoppelte Störgrößen auf allen Leitungen
- Einfluss der Bordnetzwelligkeit
- Störfestigkeit in der Stripline-Anordnung.

Nachgeprüft wurden ferner:

- Funkstörspannung
- ESD-Festigkeit der Spule mit integrierter Elektronik.

Alle Tests fanden zunächst als reine Komponentennmessungen bei Beru statt. Im nächsten Schritt wurden bei Porsche Messungen im Fahrzeug durchgeführt. Die Optimierung des Gesamtaufbaus erfolgte dann in weiteren Schritten im Beru-EMV-Labor. Vor der abschließenden Beurteilung und der Freigabe der Serienteile durch Porsche fanden sowohl Fahrzeugmessungen in der EMV-Halle als auch Messfahrten unter extremen EMV-Bedingungen (Sendernähe) statt.

6 Komponenten-Qualifikation

Die Qualifizierung der Komponenten erfolgte gemäß der Leistungsbeschreibung. Für den Nachweis der Dauerhaltbarkeit wurden Temperaturwechsel- und Temperaturschock-Prüfungen unter nachgebildeten Betriebsbedingungen durchgeführt.

Wesentliche Erkenntnisse lieferten dabei die Tests mit hohen Temperaturgradienten. Bei ihnen fand der Wechsel zwischen unterer und oberer Haltetemperatur (hier zwischen -40 °C und $+150$ °C) in weniger als einer Minute statt. Wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der verschiedenen Bauteile und Materialien wurde dabei das Stabzündmodul durch mechanische Spannungen extremen Belastungen

ausgesetzt. Damit konnten schon in der Entwicklungsphase mögliche Schwachstellen erkannt und behoben werden.

Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Haftungsfähigkeit der Bauteile aneinander und der Wirkungsweise aller eingesetzten mechanischen Entkoppelungshilfen.

7 Erprobung

Bis zur Serienfreigabe der Stabzündspule fanden innerhalb der Gesamtfahrzeug-Erprobung umfangreiche Fahrversuche unter verschiedenen, teilweise extremen Bedingungen statt. So absolvierten die Testfahrzeuge über rund 250.000 km so genannte Kaltland-Fahrten und ebenso viele Testkilometer Heißland-Fahrten, **Bild 9**. Ergänzt wurden diese Prüfungen durch rund 30.000 km spezielle Sanderprobung.

Dazu kamen zahlreiche Dauerläufe auf verschiedenen Prüfgeländen, Offroad-Kursen, Autobahnen, Land- und Stadtstraßen sowie den Hochgeschwindigkeits-Strecken Nürburgring und Nardo/Italien. Alle Test- und Prüffahrten belaufen sich bis heute auf zusammen etwa 5,5 Millionen Kilometer.

8 Fertigung

Die Elektronik-Komponenten des Stabzündmoduls werden auf hochmodernen, vollautomatisierten SMD-Fertigungslinien hergestellt und geprüft. Die Endmontage erfolgt in einem auf die Stabzündspulen-Fertigung spezialisierten Beru-Werk. Hier werden die Spulen in anspruchsvoller Technik (Pilgerschritt) gewickelt. Nach der Montage werden die Oberflächen der Kunststoffteile zur besseren Haftung plasmabehandelt. Ab-

schließend erfolgt das Vergießen unter Vakuum in einem speziell für die Stabzündspulen-Herstellung optimierten Prozess.

8.1 Herstellung des Innenkerns

Besondere Fertigkeiten erfordert die Herstellung des Innenkerns. Die vorgegebene Form der Zündspule bedingt einen runden Kern, der gleichzeitig aufgrund der elektromagnetischen Eigenschaften aus einem lamellierten Blechpaket bestehen muss, **Bild 10**. Um dieses Problem zu lösen, wurden unterschiedliche Fertigungsvarianten angedacht und getestet. Die beste Lösung fand sich mit der Anfertigung eines ausgeklügelten Stanz-Paketier-Werkzeugs. Dieses ist in der Lage, auf das Hundertstel genau verschiedene Blechbreiten zu stanzen und zu einem Blechpaket zu formen. Dabei werden die verschiedenen Bleche mit nur einer Stanzmatrize gestanzt. Diese ist in der Breite verstellbar, so dass trotz der Komplexität dieser Aufgabe das Werkzeug sehr kompakt gebaut werden konnte. Die benötigte runde Form des Kerns entsteht durch die Anordnung der verschiedensten Blechbreiten, wobei eine Fixierrille die Lage der Einzelbleche definiert.

9 Fazit und Ausblick

Das dank des gut funktionierenden Simultaneous Engineerings ebenso schnell konzipierte wie entwickelte Stabzündmodul wurde inzwischen über 430.000 Mal in Serie produziert.

Nach seiner ersten Bewährung im Cayenne hat es nun auch in den leistungsstärksten Porsche Motor, den V10 (450 kW) des Carrera GT, Einzug gehalten. Hier entzündet das Stabzündmodul zusammen mit einer platinieren, doppelt-lasergeschweißten Beru-Zündkerze das Gemisch.

Als Optionen für die weitere Entwicklung bleiben eine noch höhere Integration der Elektronik sowie eine Erweiterung ihrer intelligenten Funktionen. ■

7 Erprobung

Bild 9: Zur ausgiebigen Erprobung des Porsche Cayenne gehörten auch Testfahrten in der Wüste



8.1 Herstellung des Innenkerns

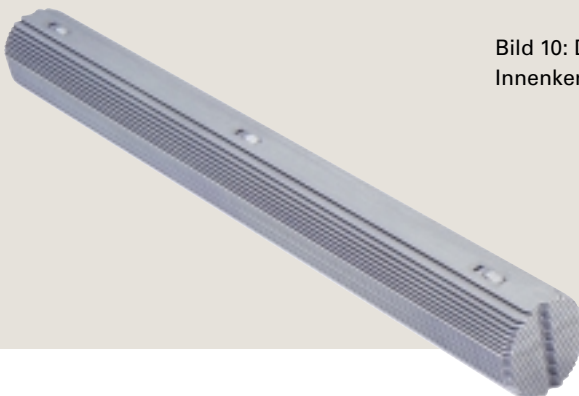


Bild 10: Der lamellierte Innenkern mit Fixierrille



BERU Aktiengesellschaft
Mörkestrasse 155,
D-71636 Ludwigsburg
Postfach 229,
D-71602 Ludwigsburg
Telefon: ++49/7141/132-693
Telefax: ++49/7141/132-220
info@beru.de
www.beru.com