

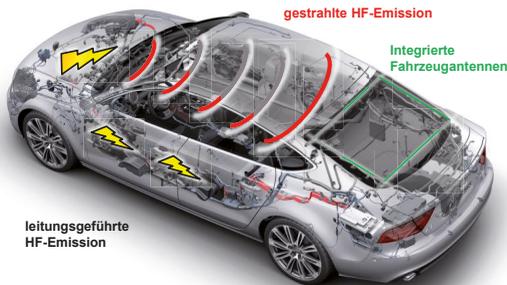
Analyse und Nachbildung komplexer Masseanordnungen bei der EMV-Validierung von Kompaktzündanlagen

Dipl.-Ing. (FH) Norman Müller, Dr.-Ing. Bernd Körber, Prof. Dr.-Ing. Matthias Richter, Westsächsische Hochschule Zwickau, Zwickau, Deutschland;
Dr.-Ing. Axel Sajadatz, AUDI AG, Ingolstadt, Deutschland;
M. Eng. Alexander Skibbe, Telemotive AG, 73347 Mühlhausen, Deutschland;
M. Sc. Duro Mutabdzic, BorgWarner Ludwigsburg GmbH, Deutschland
Dipl.-Ing. Marcus Dombrowski, Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland;

1. Einleitung

1.1. Ausgangspunkt

Durch die immer größere Komplexität von Elektronik im Fahrzeug steigt der Anspruch an die EMV-Qualifizierung. Auslegung und Überprüfung der EMV muss bereits auf Komponentenebene sichergestellt werden, um auf Fahrzeugebene den Anforderungen zu genügen. Da sich verteilte Elektronikkomponenten im Fahrzeug als komplexe Massesysteme darstellen, ist die Korrelation von EMV-Ergebnissen verschiedener Untersuchungsebenen nicht immer gegeben. Bei Fahrzeugsystemen, die funktionsbedingt mehrere Massepotentiale (Motor, Karosserie) nutzen, stellt die Nachbildung dieser Masseverhältnisse auf Komponentenebene eine große Herausforderung dar.



Bei Kraftfahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren kann die HF-Emission und Verkopplung von Zündstörungen mit fahrzeugeigenen Antennensystemen zu deutlichen Empfangsbeeinträchtigungen führen.

Bild 1: Verkopplungspotential gestrahlt / leitungsgeführt – zwischen Zündanlage und integrierten Fahrzeugantennen

Zündspulen als wesentlicher Bestandteil der Zündanlage liefern die erforderliche Hochspannung und Zündenergie zur Erzeugung des Hochspannungsfunkens an der Zündkerze. Für die bisherig eingesetzten Stabzündspulen existieren dazu Labormessaufbauten, die bereits in früheren Ausgaben von CISPR genormt wurden.

Das Zündsystem ist eine wichtige Komponente, um den Verbrennungsprozess optimieren zu können. Höhere Zündspannung und Zündenergie, bei gleichzeitig kompakter, gewichtsparender Bauweise, brachte die sogenannten Kompakt-Zündspulen (engl.: plug top coils) auf den Markt. Im Vergleich zu herkömmlichen Stabzündspulen

(engl.: pencil coils) wird bei den Kompaktzündspulen kein magnetisches Rückflussblech verwendet, das gleichzeitig auch die Hochfrequenzanteile des Sekundärstromes zum Motorblock kurzschließt. Resultierend aus den aufbaubedingten Unterschieden zwischen den Zündspulentypen und den geänderten Randbedingungen bei den Komponentenaufbauten passen die Ergebnisse der Komponentenebene nicht mehr zu denen im Fahrzeug. Es ergibt sich die Schwierigkeit, die Masseverhältnisse im Motorraum, die sich aufbaubedingt ergeben und damit verbundene HF-Stromflüsse adäquat im Laboraufbau nachzubilden.

1.2 Ziele

Im Mittelpunkt des Beitrags wird, basierend auf der Analyse der Koppelpfade, die entsprechende Weiterentwicklung eines Labormessverfahrens dargelegt. Dabei werden Zwischenstufen, verschiedene Massekonzepte und -anordnungen und deren Ergebnisse vorgestellt und bewertet.

Das Fazit des Beitrages stellt die Ergebnislösung als Entwurf eines speziellen, für Kompakt-Zündspulen konzipierten Messaufbaus dar, ohne welchen die Korrelation zwischen den Testebenen nicht ermöglicht werden kann.

2. Funktionsweise und Aufbau von Stab- bzw. Kompaktzündspulen

Eine optimale Zündung des komprimierten Kraftstoff-/Luftgemischs zählt seit Beginn des Motorenbaus zu einer der größten Herausforderungen der Konstrukteure. Beim fremd gezündeten Ottomotor geschieht dies klassischerweise im Verdichtungstakt durch einen elektrischen Funken von der Zündkerze. Damit die Hochspannung zwischen den Elektroden überspringen kann, muss sie zunächst aus dem Niederspannungs-Bordnetz aufgebaut, anschließend gespeichert und zum Zündzeitpunkt an die Zündkerze freigesetzt werden. Dies ist die Aufgabe der Zündspule als einem wesentlichen Bestandteil der Zündanlage. [4]

Aufgrund dieser Funktionsweise stellen Zündsysteme von Kraftfahrzeugen ebenfalls eine Herausforderung sowohl hinsichtlich Nah- als auch Fernentstörung dar. Das Verhältnis von Funkenzahl zur Drehzahl des Motors ist definiert mit:

$$\text{Funkenanzahl } F = \frac{U / \text{min} \times \text{Zylinderzahl}}{2} \quad (2.1)$$

Beispielsweise beträgt dies für einen 4-Zylinder-4-Takt-Motor bei einer Drehzahl von 1000 U / min eine Funkenzahl $F = 2000$.

Es gibt eine Vielzahl von elektrischen, mechanischen, thermischen sowie elektrochemischen Anforderungen, die an Zündspulen gestellt werden. Gerade Kerzenschacht-Zündspulen, die u.a. in diesem Artikel näher beleuchtet werden, sind tief im Motorraum verbaut und müssen extremen thermischen Beanspruchungen ($-40^{\circ}\text{C} - +180^{\circ}\text{C}$) standhalten. Die Zündspannung bei neuartigen, hochaufgeladenen Motoren liegt bei bis zu 40.000 Volt, bei Primärströmen von 6 – 20 A, in Abhängigkeit vom jeweiligen Lastfall. Neben Schwingungen müssen auch Resistenzen gegenüber Öl und Benzin gewährleistet sein.

Zündspulen arbeiten nach dem Transformatorprinzip. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Primärwicklung, einer Sekundärwicklung, dem Eisenkern, einer Steuerelektronik, einem Kunststoffgehäuse und einem Isolationsmaterial, heutzutage einem Zweikomponenten-Epoxydharz.

Sobald der Stromkreis der Primärspule schließt, bildet sich in ihr ein Magnetfeld. Durch Selbstinduktion entsteht in der Spule eine Induktionsspannung. Zum Zündzeitpunkt wird der Spulenstrom durch die Zündendstufe abgeschaltet. Das schlagartig zusammenbrechende Magnetfeld erzeugt in der Primärwicklung eine hohe Induktionsspannung. Diese wird auf die Sekundärseite der Spule transformiert und über das Verhältnis „Anzahl Sekundärwicklungen zu Primärwindungen“ übersetzt. An der Zündkerze entsteht dabei ein Hochspannungsüberschlag, der eine Ionisierung der Funkenstrecke und damit einen Stromfluss zur Folge hat. Dieser dauert so lange, bis die gespeicherte Energie abgebaut ist. Der überschlagende Funke wiederum entzündet das Kraftstoff-/Luftgemisch. [3]

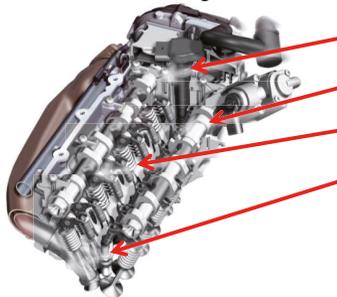
Die maximale Spannung ist abhängig:

- vom Verhältnis der Windungszahlen Sekundär- zu Primärwicklung
- von der Qualität und Ausführung des Eisenkerns
- vom Magnetfeld



Bild 2: Prinzipskizze – Aufbau einer Zündspule [3]

Einzelfunken-Zündspulen können als Stab- oder Kompakt-Zündspulen ausgeführt sein und werden allgemein auch Kerzenschachtzündspulen genannt. Sie werden



Stabzündspule

Nockenwelle

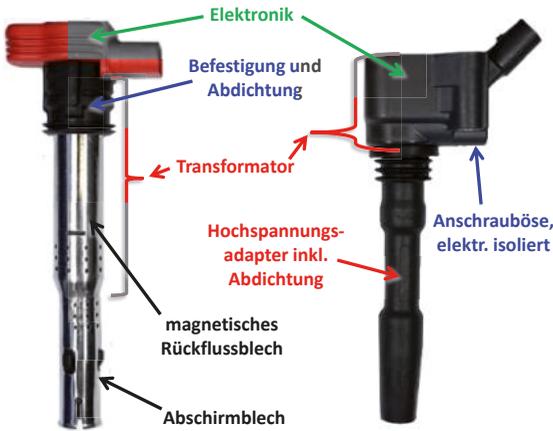
Ventile

Zündkerze

Bild 3:
 Einbausituation von
 Stab-Zündspulen
 im Motorblock [4]

direkt auf der Zündkerze montiert. Dazu sind in der Regel keine Zündleitungen erforderlich, jedoch Hochspannungsstecker. Bei dieser Bauart ist jeder Zündkerze eine eigene Zündspule zugeordnet, die direkt über dem Isolator der Zündkerze sitzt. Diese Konstruktion ermöglicht besonders filigrane Abmessungen.

Stab- und Kompakt-Zündspulen können die gleichen Steuerelektroniken nutzen. Dabei ist bei den Stabzündspulen nur die Elektronik im Zündspulenkopf verbaut, die Spulenwicklungen sind im darunterliegenden Schaft untergebracht. Diese Aufbauweise ist zwar kompakter, jedoch an einen schlechteren Wirkungsgrad als bei Kompakt-Zündspulen geknüpft. Bei den Kompakt-Zündspulen sind sowohl die Elektronik als auch die Trafo-Wicklungen gemeinsam im Zündspulenkopf integriert, wodurch dieser voluminöser ausgeführt ist als bei Stabzündspulen.

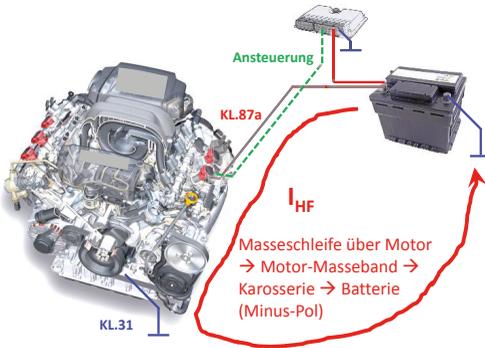


Durch das fehlende magnetische Rückflussblech bei Kompakt-Zündspulen ergeben sich andere Masseverhältnisse, die einen wesentlichen Einfluss auf das HF-Abstrahlungsverhalten haben.

Bild 4: Vergleich Aufbau von Stab-Zündspulen und Kompakt-Zündspulen

3. Störaussendungspotential

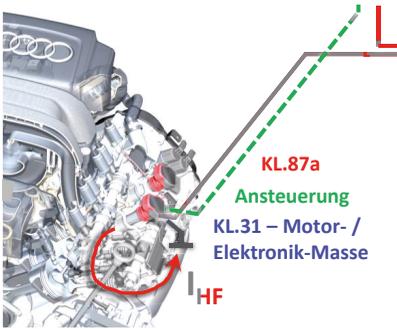
In der Sekundärwicklung der Zündspule wird die notwendige Spannung induziert, die zur Erzeugung des Zündfunken an der Zündkerze benötigt wird. Durch Ionisierung der Funkenstrecke fließt ein Strom in Richtung Motorblock. Je nach Massekonzept schließt sich der Stromkreis mit entweder großer oder möglichst kleiner Masseschleife. Diese Masseschleife ist ursächlich für das Verkopplungspotential von hochfrequenten Störanteilen mit den integrierten Antennen des Fahrzeugs bzw. mit der elektromagnetischen Umwelt.



Die Abbildung zeigt das Beispiel eines einfachen Massekonzeptes, ohne lokale Anbindung der Motor-Masse an die Zündspule. Dadurch wird eine große Masseschleife aufgespannt, wobei sich der Stromkreis über die Motormasse, das angeschlossene Motor-Masseband und die Karosserie schließt. Die HF-Störkopplung wird dadurch maximal.

Bild 5: einfaches Massekonzept → große Masseschleife

Wird bei Stabzündspulen das magnetische Rückfluss- und Abschirmblech als ein gemeinsames Bauteil bis zur Zündkerze ausgeführt sowie im Inneren der Zündspulen mit der Motormasse verbunden, ist somit bereits eine kurze Motormasseanbindung gegeben.



Bei Kompakt-Zündspulen wird der Hochspannungsadapter im Allgemeinen aus Gummi gefertigt. Ist die Befestigungsöse (Schrauböse, siehe Bild 4) isoliert, muss die Motormasseanbindung über den Kabelbaum realisiert werden. Deren Länge hat entscheidenden Einfluss auf die Störaussendung. Je kürzer die Motormasseanbindung gewählt wird, desto besser und breitbandiger ist die Entstörwirkung.

Bild 6: kurzes Massekonzept – deutlich kleinere Masseschleife

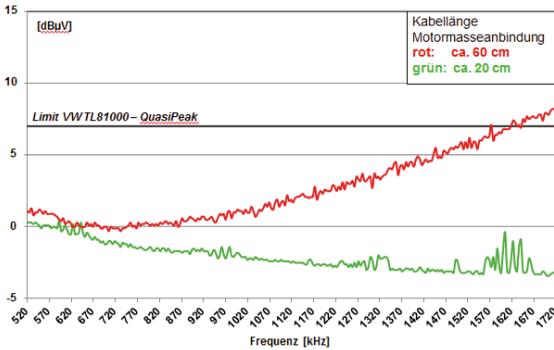


Bild 7: Eigenentstörung im Fahrzeug – Mittelwelle

Die nachfolgenden Diagramme zeigen Vergleichsmessungen der Eigenentstörung in einem Fahrzeug mit Kompaktzündspulen. Für Analysezwecke sind Leitungen zur Anbindung der Motormasse mit unterschiedlichen Längen (20 cm / 60 cm) verbaut, die wahlweise abgeschlossen wurden.

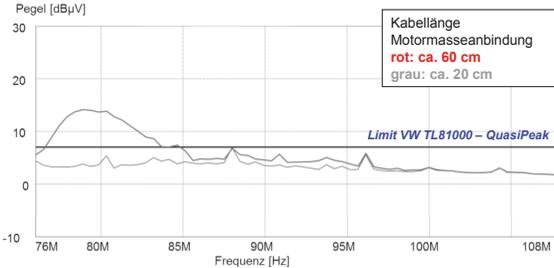


Bild 8: Eigenentstörung im Fahrzeug – Ultra-Kurzwellen

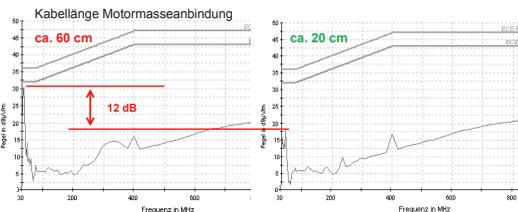
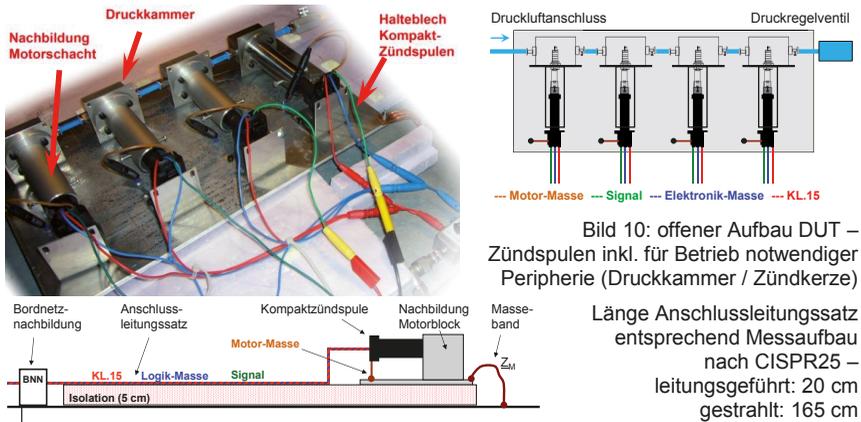


Bild 9: Störaussendungsanalyse nach ECE-R10 – unterschiedliche Kabellänge Motormasse

Dieser Unterschied spiegelt sich ebenfalls bei der Fernentstörung wider. Dazu sind 2 Messreihen nach ECE-R10 gegenübergestellt, bei denen die Kabellänge der Motormasse variiert ist (20 cm / 60 cm). Der Pegelunterschied liegt hier bei bis zu 12 dB.

4. Validierung von Randbedingungen der Messaufbauten

Die Bewertung der einzusetzenden Zündspulen muss vor ersten Fahrzeugmessungen auf Komponentenebene sichergestellt werden. Dafür sind beispielsweise in technischen Lastenheften Messaufbauten definiert, mittels derer sowohl die leitungsgeführten als auch die gestrahlten Störanteile bewertet werden können. Für die bisher eingesetzten Stabzündspulen korrelierten die Ergebnisse aus den Komponentenmessungen mit denen aus Fahrzeuganalysen. Für die neuartigen Kompakt-Zündspulen ist diese Korrelation mit den herkömmlichen Messaufbauten nicht gegeben. Die nebenstehende Abbildung zeigt einen etablierten Messaufbau für Stabzündspulen, in dem bis zu 4 Zündspulen analysiert werden können. Durch ein spezielles Halteblech besteht ebenfalls die Möglichkeit Kompakt-Zündspulen zu untersuchen.



Um den Einfluss der kapazitiven Masseverhältnisse im Motorzündspulenschacht näher zu untersuchen, wurde eine Kompakt-Steckerzündspule mit HF-Dichtungsmesh umwickelt. Die Ergebnisse der Messreihen bestätigen den deutlichen Einfluss durch Veränderung der Masseverhältnisse, wobei sich das Emissionsspektrum reduziert hat.

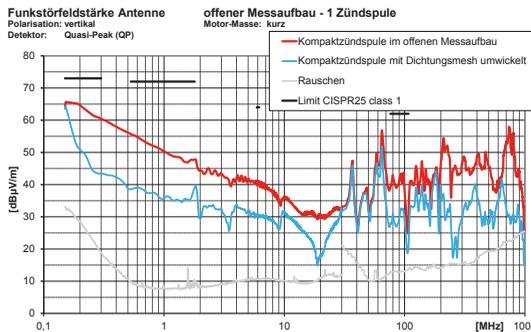


Bild 11: gestrahlte Störaussendung Kompakt-Zündspulen im offenen Messaufbau – Einfluss Masse im Zündspulenschacht

Die Unterschiede zum Aufbau mit HF-Dichtungsmesh, welches niederohmig an das Rohr im Messaufbau angebunden ist, liegt bei 10 – 15 dB. Ähnlich wie das Masseblech bei Stabzündspulen verändert das leitende Dichtungsband die Masseschleife, wodurch die Störaussendungscharakteristik stark beeinflusst wird. Dieses Ergebnis veranlasste dazu, die Randbedingungen durch Modifizierung eines Zylinderblocks herauszustellen. Durch Abdichtung von nicht benötigten Öffnungen konnten vergleichbare Druckverhältnisse wie in der Druckkammer des offenen Messaufbaus hergestellt werden. Weiterhin konnten die vorgesehenen Massepunkte zur Anbindung der Massepins an den Zündspulen verwendet werden. Der Aufbau ist



durch die geometrischen Gegebenheiten nur für Kompakt-Zündspulen geeignet. Die Abbildung zeigt den Messaufbau für leitungsgebundene Störaussendungsuntersuchungen. In Abwandlung – längerer Leitungssatz – wird dieser Aufbau auch für gestrahlte Störaussendungsanalysen verwendet. Die Ergebnisse bei leitungsgebundenen Emissionsmessungen sind dabei messaufbauunabhängig und nicht relevant für den Korrelationsvergleich.

Bild 12: modifizierter Zylinderblock

Die Messwerte mit dem modifizierten Zylinderblock korrelieren dabei sehr gut mit den Ergebnissen im Fahrzeug. Daher wurde, auf Basis des Zylinderblocks, in einem weiteren Untersuchungsschritt mittels der geometrischen Randbedingungen eine modulare Zylinderblocknachbildung erstellt. Diese ist ähnlich dem offenen Messaufbau konstruiert, bildet aber die Massebedingungen im Motorblock besser nach.

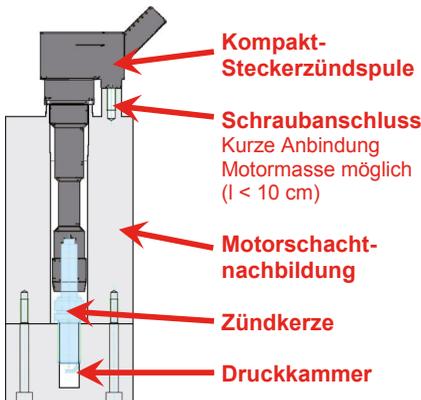
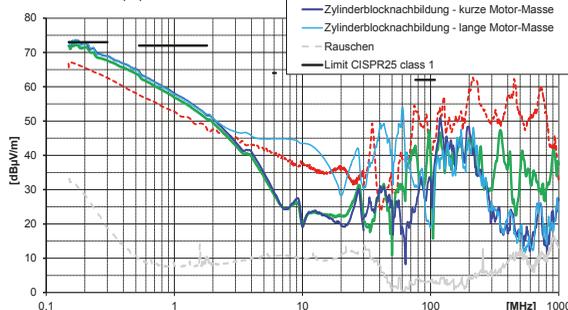


Bild 13: modular aufgebaute Zylinderblocknachbildung (kurze Motor-Masse)
links: schematischer Aufbau
oben: Reihenschaltung von 4 einzelnen Blöcken als 4-Zylindernachbildung

Im nachfolgenden Diagramm sind sowohl die Emissionsmesswerte für die verschiedenen Messaufbauten, als auch der Vergleich verschieden umgesetzter Motor-Masseanbindungen gegenübergestellt. Durch die Motor-Masseanbindung wird die Masseschleife und damit ursächlich das Emissionspotential verändert. Konventionell wird die Anbindung der Motormasse der Zündspulen auf einen gemeinsamen

Splicepunkt geführt und von dort an einen zentralen Massepunkt am Motorblock. Je kürzer die Anbindung, beispielsweise an die Verschraubung der Zündspule, desto

Funktstörfeldstärke Antenne
 Polarisation: vertikal
 Detektor: Quasi-Peak (QP)



geringer fällt das Emissionsspektrum aus. Diese Erkenntnisse könnten direkt für die Auslegung der Motorraumverkabelung genutzt und neue Masseanbindungsvarianten überprüft werden.

Bild 14:
 gestrahlte Störaussendung
 Kompakt-Zündspulen –
 Vergleich Messaufbauten /
 Anbindung Motor-Masse

5. Ausblick

Der neu entstandene Messaufbau für Kompakt-Zündspulen eignet sich, durch die an die Fahrzeugumgebung angepassten Randbedingungen, für die entwicklungsbegleitende Analyse und Validierung der HF-Emission auf Komponentenebene außerhalb des Fahrzeuges. Der weiterentwickelte Messaufbau wird in die Technische Liefervorschrift des VW-Konzerns integriert.

6. Fazit

Ziel des Beitrags war die Vorstellung von Analyseuntersuchungen zu Masseanordnungen bei Zündsystemen mit Kompakt-Zündspulen, bei denen die Ergebnisse von HF-Emissionen auf Komponentenebene und Fahrzeugebene nicht korrelierten. Als Ergebnis entstand ein an die Randbedingungen im Fahrzeug angepasster Komponentennessaufbau, sowohl für leitungsgebundene, als auch gestrahlte Störaussendungsuntersuchungen. Basierend auf dem Messaufbau konnten Anbindungsvarianten von Masseanschlüssen untersucht werden, bei denen sich unterschiedliche Masseschleifen ergeben. Somit kann die Auslegung von Motorleitungssätzen sowie der Verkabelungsanordnung besser bestimmt werden.

7. Literatur

- [1] EMV-Kraftfahrzeugrichtlinie ECE-R10, Ed. 5
- [2] IEC-Norm CISPR25, Ed. 3
- [3] Beru – Federal-Mogul: „Alles über Zündspulen – Technische Information Nr. 07“, Federal-Mogul Aftermarket GmbH, Ludwigsburg 2013
- [4] AUDI AG: „Selbststudienprogramme, divers“