

Volkswagens Abschalteneinrichtung und wahrscheinliche Auswirkungen potenzieller Korrekturen

David E. Foster, Phil und Jean Myers Professor Emeritus des Engine
Research Center der University of Wisconsin-Madison

Gutachten für die Hausfeld Rechtsanwälte LLP

14. März 2016

1 Einleitung und Zusammenfassung

Dieses Gutachten stellt kurz die Merkmale und grundlegenden Funktionsprinzipien von Dieselfahrzeugen dar und legt dabei einen Schwerpunkt auf die Aspekte, die am wichtigsten sind, um zu verstehen, wie die Abschalteneinrichtungen von Volkswagen hätten eingesetzt werden können und was die wahrscheinlichen Auswirkungen der möglichen Korrekturen dieser Abschalteneinrichtungen sind. Das Gutachten konzentriert sich auf den europäischen Markt.

Das Gutachten zeigt, dass Fahrzeuge heute hoch komplexe Systeme mit zahlreichen miteinander verbundenen Teilsystemen sind. Die Leistung dieser Teilsysteme wird in den Fahrzeugbetrieb über ein Computersystem integriert, das Signale von einer Vielzahl von Sensoren erhält und durch die Analyse dieser Signale die besten Betriebsbedingungen des Motors, des Nachbehandlungssystems und des Antriebsstrangs bestimmt. Das Computersystem implementiert dann diese idealen Bedingungen, indem es Signale an die entsprechenden elektromechanischen Aktoren sendet. Die Komplexität des Kontrollsystems hat die Einführung der Abschalteneinrichtungen möglich gemacht. Durch die Analyse der Signale, die es von Fahrzeug, Motor und Antriebsstrang erhält, kann das Steuersystem feststellen, ob das Fahrzeug gerade einem Emissionszertifizierungstest unterzogen wird. VW programmierte das Steuerungssystem so, dass, wenn das System feststellte, dass das Fahrzeug gerade einem Zertifizierungstest unterzogen wurde, die Konfiguration der Motorbetriebsbedingungen die Emissionen begrenzte. Wenn das Steuersystem erkannte, dass es gerade keinem Test unterzogen wurde, dann wurden diese Betriebsbedingungen geändert, was zu höheren Emissionen führte, als sie gemäß den Ergebnissen des Zertifizierungstests zu erwarten waren.

Basierend auf den operativen Grundlagen, die zu Beginn des Gutachtens beschrieben werden, trifft das Gutachten dann Aussagen zu wahrscheinlichen Auswirkungen potenzieller Korrekturen der Abschalteneinrichtungen. Es erscheint sehr wahrscheinlich, dass die Korrekturen Änderungen an den Motorbetriebsbedingungen mit sich bringen werden, um die durch den Motor produzierten NOx-Emissionen zu reduzieren. Beispiele solcher Änderungen wären

Änderungen am Kraftstoffeinspritzzeitpunkt sowie der Verlaufsformung und Geschwindigkeit der Abgasrückführung. Eine solche Änderung hat, im Ergebnis, wahrscheinlich einen höheren Kraftstoffverbrauch, geringere Leistung und eine Zunahme der Partikelemissionen aus dem Motor zur Folge. Aufgrund der wahrscheinlichen Zunahme der Partikelemissionen aus dem Zylinder, füllt sich der Dieselpartikelfilter (DPF) schneller und muss somit häufiger regeneriert werden. Dies hat den zusätzlichen Verbrauch von Dieselmotorkraftstoff zur Folge. Außerdem setzt die erhöhte Frequenz der Regenerierungen des DPFs den Zylinder erhöhtem Materialbeanspruchung aus, was möglicherweise dazu führt, dass seine Leistung verringert und die Wahrscheinlichkeit von Lebensdauerproblemen erhöht wird.

Abschließend führt das Gutachten noch die jüngsten Entwicklungen in Bezug auf die vorgeschlagenen Korrekturen von VW an den Fahrzeugen in Europa auf. Das Gutachten stellt fest, dass obwohl VW eine erste Genehmigung für seine Korrekturen erhalten hat, Probleme dieser Korrekturen durch unabhängige Tests aufgedeckt wurden und die Umsetzung dieser zunächst einmal gestoppt wurden. Im Rahmen dieser unabhängigen Erkenntnisse, stellt das Gutachten abschließend zusätzlich zu den Fehldarstellungen von VW und den technischen Konzepten, die im Gutachten erläutert werden, fest, dass VWs Angaben zur Leichtigkeit, Preisgünstigkeit, Dauerhaftigkeit und Vollständigkeit der Korrekturen nicht plausibel sind.

2 Hintergrundinformationen zu Fahrzeugsystemen und Volkswagens Abschaltvorrichtung

Die Installation der Abschaltvorrichtung wurde durch eine Manipulation des Motors und der Abgasnachbehandlung durch das Fahrzeugsteuerungssystem, dessen Herz die elektronischen Steuereinheit ist, erreicht.

Es erfordert eine präzise Steuerung des Motors, des Nachbehandlungssystems und des Antriebsstrangs in Fahrzeugen, um die vorgeschriebenen Emissionsnormen zu erfüllen, während der Kraftstoffverbrauch und die Leistung maximiert werden. Von diesen drei Teilsystemen lässt sich der Motor am besten einstellen und spielt somit eine zentrale Rolle bei der optimalen Abstimmung der Zusammensetzung und des thermodynamischen Zustands des Abgases mit dem Nachbehandlungssystem. Bei Dieselmotoren umfassen Motorparameter, die ohne weiteres während des Motorbetriebs geändert werden können: Kraftstoffeinspritzzeiteigenschaften, die Menge der Abgasrückführung, der Druck und die Temperatur der angesaugten Gase, der Abgasdruck, und der Weg den das Abgas zurück zu der Ansaugseite des Motors nimmt. Alle diese Parameter haben einen Einfluss auf die Höhe der Emissionen, die den Motorzylinder verlassen und dann zum Nachbehandlungssystem gelangen. Von all den möglichen Steuerparametern, sind die Änderungen an den Einspritzzeiteigenschaften und der Abgasrückführung am wichtigsten.

2.1 Kraftstoffeinspritzung und Abgasrückführung

Das Kraftstoffeinspritzsystem ist für die Einführung des Kraftstoffs in den Motorzylinder verantwortlich. Der Einspritzvorgang kann verwendet werden, sowohl um den Zeitpunkt des Verbrennungsbeginns im Zylinder als auch die Intensität der Vermischung zwischen dem Brennstoff und der Luft in dem Zylinder und die Dauer des Verbrennungsprozesses zu steuern. Der Zeitpunkt des Beginns der

Verbrennung und die Verbrennungsdauer bestimmen weitgehend den Leistungsgrad des Motors. Für jeden Motorbetriebszustand gibt es eine optimale Zeit für den Beginn der Verbrennung und die Verbrennungsdauer. Die optimale Verbrennung führt zum geringsten Kraftstoffverbrauch und die größte Leistung. Sie liefert auch die höchsten Temperaturen, was für die NO_x-Emissionen problematisch ist, weil NO_x-Emissionen sehr empfindlich gegenüber Verbrennungstemperaturen reagieren. Die NO_x-Emissionen, die im Zylinder gebildet werden, nehmen exponentiell mit den Verbrennungstemperaturen zu. Um die NO_x-Emissionen, die im Zylinder gebildet werden, zu minimieren, müssen die Spitzentemperaturen so niedrig wie möglich gehalten werden, was der Erreichung maximaler Leistung im Weg stehen kann. Eine einfache Methode, um die Spitzentemperaturen zu reduzieren, ist den Beginn der Kraftstoffeinspritzung zu verzögern. Dies verzögert den Beginn der Verbrennung, was zu einem geringeren Spitzendruck und einer geringeren Temperatur führt. Es verlängert auch die Verbrennungsdauer. Folglich nehmen die gebildeten NO_x-Emissionen im Zylinder ab, allerdings trifft dies auch auf die Leistung zu. Dies hat zur Folge, dass sich der Kraftstoffverbrauch erhöht und sich die Leistung verringert, wenn der optimale Injektionszeitpunkt verzögert wird.

Zusätzlich zu NO_x-Emissionen werden Partikel während des Dieselvebrennungsprozesses gebildet. Die Partikel, die den Zylinder verlassen, sind das Ergebnis der Differenz zwischen zwei großen Prozessen: der Bildung und der Oxidation. Die Bildung der Partikel erfolgt während der frühen Phase des Verbrennungsvorgangs, wenn die Verbrennungsprozesse noch weitgehend von der Kraftstoffeinspritzung gesteuert werden. Während der frühen Phase des Verbrennungsvorgangs, ist die Menge an Sauerstoff, die durch den Einspritzvorgang in den Kraftstoffstrahl aufgenommen wird, ein kritischer Faktor, um die Bildung der Partikel zu beeinflussen. Je größer die Menge an Sauerstoff im Strahl, desto kleiner ist die Partikelbildungsgeschwindigkeit, und umgekehrt. Der Oxidationsvorgang, der Partikelmaterial entfernt, tritt gegen Ende des Verbrennungsvorgangs ein und wird weitgehend durch die Intensität der Durchmischung der Zylinderluft mit dem brennenden Kraftstoff, sowie durch die Temperatur während des Expansionstakts, gesteuert.¹ Die Partikelbildung wird minimiert und die Partikeloxidation wird maximiert, wenn die Menge, mit der der Kraftstoff eingespritzt wird, maximiert wird und die Temperaturen im Zylinder hochgehalten werden. Allerdings stimmt dies eng mit den Bedingungen für eine optimale Verbrennung überein, die, wie oben beschrieben, auch die Bedingungen für maximale NO_x-Emissionen darstellen.

Da das Injektionssystem sehr anpassungsfähig ist, ist es möglich, das Injektionssystem zu verwenden, um die Verbrennung so zu ändern, dass die Partikeloxidation erst später im Expansionstakt gefördert wird. Eine Möglichkeit, dies zu tun, ist durch die Änderung der sogenannten Einspritzverlaufsformung. Durch diesen Prozess kann die Motorsteuerung den Einspritzzeitpunkt soweit verzögern, dass die Verbrennung zu einem späteren Zeitpunkt beginnt, wodurch die Spitzentemperaturen und die Bildung der NO_x-Emissionen verringert werden. Jedoch würden die niedrigeren Temperaturen im Expansionstakt zu einer langsameren Partikeloxidation führen, was bedeutet, dass sich die

¹ Der Expansionstakt bezieht sich auf die Kolbenbewegungen, durch die ein zyklischer Motor die Arbeit (Leistung) von der Kraft auf den Kolben, die durch den Verbrennungsprozess generiert wurde, extrahiert. Diese Kraft wird durch die Verbrennung des verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemischs erzeugt.

Partikelemissionen in Folge der Einspritzzeitverzögerung erhöhen würden. Um dem entgegenzuwirken, kann der Kraftstoffeinspritzvorgang so verändert werden, dass er aus mehreren Kraftstoffimpulsen, oder Mehrfacheinspritzungen, besteht. Bei mehreren Kraftstoffimpulsen, könnte die letzte Kraftstoffrate so verzögert werden, dass sie später im Expansionstakt stattfindet, damit die späte Verbrennung des Kraftstoffs die Temperatur später im Expansionstakt höher hält, wodurch die Oxidation der Partikel verbessert wird. Die verzögerte Injektion mit einer Einspritzverlaufsformänderung könnte zu einem niedrigeren Ausstoß von NO_x-Emissionen ohne einen großen Anstieg der Partikelemissionen führen. Jedoch würde der Leistungsgrad des Motors weiter verringert, da die verzögerte Kraftstoffeinspritzung von der Mehrfachimpulseinspritzung weiter die Verbrennungsdauer verlängern würde, was einen größeren Anstieg des Kraftstoffverbrauchs relativ zur Verzögerung des Einspritzzeitpunkts zur Folge hätte, während eine herkömmliche Einspritzverlaufsform erhalten wird.

Ein weiterer Ansatz zur Verringerung der im Zylinder gebildeten NO_x-Emissionen ist die Temperatur durch Zugabe von Abgas zurück in den Zylinder, die sogenannte Abgasrückführung (englische Abkürzung EGR [Exhaust Gas Recirculation]), zu senken. Das Abgas wirkt als inaktives Verdünnungsmittel, das zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Zylinder führt, wodurch die Energie, die bei der Verbrennung entsteht, über eine größere Anzahl von Molekülen verteilt wird und somit zu niedrigeren Temperaturen der Produktgase führt. Wie oben erläutert, führen niedrigere Temperaturen der Produktgase zu geringeren NO_x-Emissionen. Jedoch erhöht die EGR die Tendenz des Motors, Partikel auszustoßen, weil die EGR die Sauerstoffkonzentration im Zylinder verringert und somit die Bildung der Partikel erhöht. Auch weil die Verbrennungstemperaturen durch die EGR zusammen mit der Sauerstoffkonzentration verringert werden, wird die Oxidation der Partikel später während des Expansionstakts ebenfalls reduziert. Deshalb reduziert die Zugabe von Abgasen zum Zylinder die NO_x-Bildung, aber erhöht die Partikelemissionen.

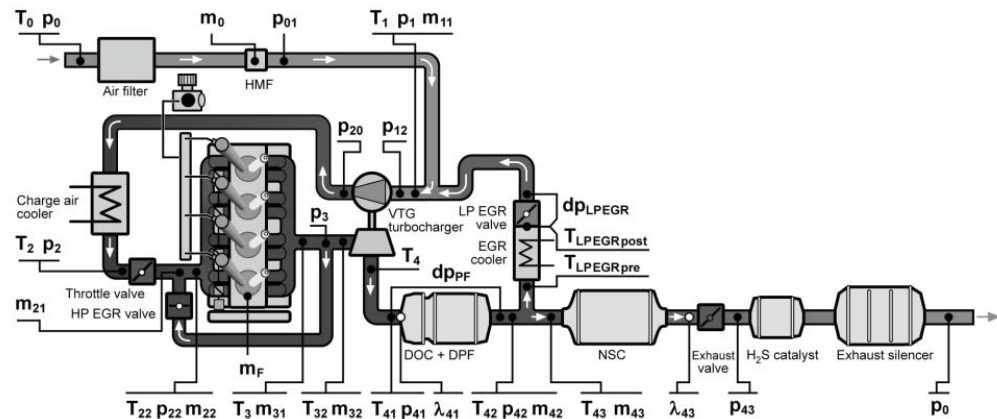
Die obige Darstellung liefert Beispiele der widersprüchlichen Bedingungen zur Minimierung von sowohl NO_x und Partikelemissionen. Typischerweise verursachen Maßnahmen, die zur Steuerung der Verbrennung ergriffen werden, um NO_x-Emissionen zu reduzieren, einen Anstieg der Partikelemissionen und umgekehrt. Das Phänomen wird allgemein als "Ruß-NO_x-Trade-Off" in Dieselmotoren bezeichnet. Die Erfüllung der Emissionsnormen bei dieselbetriebenen Fahrzeugen erfordert einen geeigneten Kompromiss zwischen NO_x-Emissionen und Partikeln, damit die einzelnen Komponenten des Nachbehandlungssystems effektiv die Emissionen, die den Zylinder verlassen, angehen können, d.h. in diesem Fall die NO_x und Dieselpartikelfilter-Teilsysteme (weiter unten beschrieben in Abschnitt 1.3). Je nach Leistung des Nachbehandlungssystems des Motors, umfassen diese Kompromissbedingungen auch Kompromisse bei Kraftstoffverbrauch und Leistung.

2.2 Das Fahrzeugsteuersystem

Der Zweck des Fahrzeugsteuersystems ist, optimal die Betriebseigenschaften der verschiedenen Komponenten des Fahrzeugantriebsstrang durch Erfassen und Manipulieren von Motorbetriebsparametern zu integrieren, wie beispielsweise: angesaugte Luftmasse, Druck und Temperatur; Masse und Temperatur der EGR und der Weg, dem es vor Wiedereinführung in den Motor folgt;

Kraftstoffeinspritzdruck, Einspritzzeitpunkt und die Anzahl der Einspritzungen pro Verbrennungsereignis (Rate-Shaping); die Temperatur und der Druckabfall über den Dieselpartikelfilter (DPF) und seine Regenerationsnotwendigkeit; und der Betrieb des NO_x-Reduktionssystems. Eine schematische Darstellung eines Motors, Nachbehandlungssystems und viele der wichtigen Betriebsparameter, die typischerweise gemessen werden, sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 2.1 Beispiel eines Motor- und Abgasmanagementsystems mit Temperatur, Druck und Betriebsparameterbewertungspunkten für die notwendige Steuerung²



Das Steuersystem des Fahrzeugs erhält Informationen über den Motorbetriebszustand und den Zustand des Abgasnachbehandlungssystems von den Sensoren, wie sie zum Beispiel schematisch in Abbildung 1 mit Buchstaben oder Symbolen – etwa T, p, oder λ – dargestellt werden, die Sensormessungen repräsentieren. Das Steuersystem empfängt auch Signale, die die Befehle anzeigen, die auf das Fahrzeug vom Nutzer ausgeübt werden, wie beispielsweise der Beschleunigung oder der Anforderung nach einer Zusatzleistung wie beim Einschalten der Klimaanlage. Die Informationen von den Sensoren werden durch einen (oder mehrere) Computer innerhalb des Fahrzeugs verarbeitet, anhand derer die notwendigen Anpassungen am Motor, der Auspuffanlage und dem Fahrzeugsteuerparameter ermittelt werden, um einen optimalen Betrieb des Fahrzeugs zu erzielen. Beispielsweise kann das Steuersystem nach der Verarbeitung der Informationen von den Sensoren und den Befehlen des Nutzers, feststellen, dass der Einspritzzeitpunkt geändert werden soll, der Turbolader angepasst werden muss, damit der Ansaugkrümmerdruck erhöht wird oder die EGR-Strömungsrate durch Einstellen des Abgasgedrucks angepasst werden soll. Zusätzlich kann das Steuersystem basierend auf den Daten der Sensoren bestimmen, dass der DPF regeneriert werden muss. Entsprechende Signale werden dann an elektromechanische Aktoren gesendet, die den Motor, die Auspuffanlage und Fahrzeugbetriebsparameter wie Einspritzzeitpunkt, Menge der EGR, Nachbehandlungssystem und Übertragungsschichten anpassen.

² Quelle: Dr.Ing. J. Hadler, Dipl.-Ing. F. Rudolph, Dipl.-Ing. R. Dorenkamp, Dipl.-Ing. H. Stehr, Dr.Ing. T. Düsterdiek, Dipl.-Ing. J. Hilzendege, Dipl.-Ing. D. Mannigel, Dr. rer. nat. S. Kranzusch, Dipl.-Ing. B. Veldten, Dr. M. Kösters, Dipl.-Ing. A. Specht, Volkswagen AG, Wolfsburg, *Volkswagen's New 2.0l TDI Engine Fulfills the Most Stringent Emission Standards*, vorgestellt beim Internationalen Wiener Motorensymposium 2008.

Um die Einstellungen zu bestimmen, die an den Motorbetriebsparametern vorgenommen werden sollen, verwendet das Computersystem, auch bezeichnet als elektronische Steuereinheit (englische Abkürzung ECU [Electronic Control Unit]), eine Kombination von Modellen (sowohl analytische als auch empirische) und Nachschlagetabellen, die im Voraus anhand von Kalibrierungstests im Labor bestimmt werden. Der Fortschritt in der Rechenleistung, bei den Sensoren und elektromechanischen Aktuatoren, erleichtert den präzisen und nahtlosen Betrieb extrem komplizierter, miteinander verbundener Fahrzeugteilsysteme, damit das Fahrzeug den gestellten Anforderungen gerecht wird, während es gleichzeitig eine Vielzahl von Betriebsbedingungen einhält. Diese Betriebsbedingungen umfassen Leistungsmetriken, die vom Nutzer angefordert, Emissionskriterien, die von Aufsichtsbehörden auferlegt und Funktionen, die von Kunden bevorzugt werden, wie beispielsweise den Kraftstoffverbrauch. Es überrascht nicht, dass Kompromisse gemacht werden müssen, während man versucht, eine akzeptable Leistung, die durch den Bediener angefordert wird, zu erzielen und gleichzeitig gewünschte Eigenschaften, wie die Erzielung eines bestmöglichen Kraftstoffverbrauchs, zu bieten, während man die erforderlichen Emissionsvorschriften einhalten muss. Darüber definiert sich der Wettbewerb für die Fahrzeughersteller.

2.3 Abgasnachbehandlungssysteme

Die Nachbehandlungssysteme in Dieselmotoren bestehen üblicherweise aus einem Dieseloxydationskatalysator, einem Dieselpartikelfilter und einem NO_x-Reduktionssystem. Jedoch installierte VW die NO_x-Reduktionssysteme in ihren europäischen Fahrzeugen bis zur Einführung der Euro-6-Normen nicht.³

Die Nachbehandlungssysteme verwenden Sensoren, die innerhalb des Systems installiert sind, um Daten aufzuzeichnen, die erforderlich sind, um den Status der Nachbehandlungskomponenten und den Betriebszustand des Motors zu beurteilen. Wenn eine Änderungsoperation im Motor angeordnet wird, verwendet die ECU die Daten von den Sensoren, um den aktuellen Zustand der Nachbehandlung und der Motorsysteme zu bestimmen, und verwendet dann Motorkennfelder und -modelle, um zu bestimmen, wie die neuen Eingaben am Motor lauten sollen, und sendet Befehle an die elektromechanischen Aktoren, um den neuen Betriebszustand herzustellen.

Für Dieselmotoren gehören NO_x- und Partikel-Vorschriften zu den größten Herausforderungen in Bezug auf die Nachbehandlungsanforderungen. Wie oben erläutert, führen Maßnahmen, die ergriffen werden, um die Partikel zu reduzieren, die den Zylinder verlassen, zum Anstieg der NO_x-Emissionen beim Verlassen des Zylinders und umgekehrt. Folglich sind moderne Dieselfahrzeuge im Allgemeinen sowohl mit NO_x-Nachbehandlungssystemen als auch Dieselpartikelfiltern ausgestattet, obwohl VW keine NO_x-Nachbehandlungssysteme in ihren Euro 5 Fahrzeugen verwendet.

³ Siehe Mitschrift der Anhörung im britischen Parlament, 25. Januar 2016, Aussage von Oliver Schmidt bei 19, <http://data.parliament.uk/writtenevidence/committeeevidence.svc/evidencedocument/transport-committee/volkswagen-group-emissions-violations/oral/27791.pdf>. Dies kann den VW-Dieselfahrzeugen in den Vereinigten Staaten gegenübergestellt werden, die NO_x-Speicherkatalysatoren bei älteren Fahrzeugen und selektive katalytische Reduktionssysteme in neueren Fahrzeugen verwendeten.

Dieselpartikelfilter arbeiten nach einem sehr einfachen Prinzip. Ein Kanister mit einer Art porösem Filtersubstrat wird in den Abgasstrom eingeführt. Wenn das Abgas durch das Filtersubstrat strömt, werden die Partikel in dem Filter auf die gleiche Weise aufgefangen, wie der Luftfilter in dem Einlasssystem den Schmutz und die Ablagerungen aus der Luft beim Eintritt in die Motoren filtert. Wenn sich der DPF mit Partikeln füllt, wird die Strömung durch den Filter beschränkt, und der Druckabfall im Filter erhöht. Wenn der Druckabfall zu groß wird, verschlechtert es den Motorbetrieb, indem es den Abgasstrom aus dem Motor beschränkt. Auf die gleiche Weise, wie der Luftfilter regelmäßig gewechselt werden muss, muss der DPF periodisch regeneriert, d.h. sauber gebrannt werden. Es gibt zwei Möglichkeiten, anhand derer der DPF einer Regeneration unterzogen werden kann, die passive und die aktive Regeneration. Die passive Regeneration tritt auf, wenn die Motorsteuerung nicht spezifisch eine Regeneration anordnet. Die aktive Regeneration tritt auf, wenn die Motorsteuerung die Regeneration über Befehle an die/den entsprechenden elektromechanischen Aktor(en) initiiert.

Die passive Regeneration kann während des normalen Betriebs des Fahrzeugs auftreten, wenn das Abgas heiß genug wird und die Oxidation der Partikel in dem DPF startet. Dies kann passieren, wenn beispielsweise das Fahrzeug eine lange Zeit bei hoher Last in Betrieb ist. Die passive Regeneration kann auch mithilfe von NO₂ erfolgen, das als Oxidationsmittel der Partikel in dem DPF dient. Dies wird mithilfe des Dieseloxydationskatalysators durchgeführt. Der Dieseloxydationskatalysator oxidiert das NO beim Verlassen des Zylinders in NO₂. Der zusätzliche Sauerstoff im NO₂ wird dann zum Oxidationsmittel für die Partikel in dem DPF. Die Regeneration des DPF durch NO₂ tritt bei einer niedrigeren Temperatur als die Regeneration unter Verwendung von O₂ als Oxidationsmittel auf. Da jedoch die DPF-Regeneration mit NO₂ bei einer niedrigeren Temperatur auftritt, erfolgt diese langsamer und weniger vollständig, als die Regeneration bei höherer Temperatur mit O₂ als Oxidationsmittel.

Die passive Regeneration ist eine beliebte Art der Ausführung der DPF Reinigung, da kein zusätzlicher Dieseldieselkraftstoff benötigt wird, um die Temperatur der Abgase zu erhöhen und die Regeneration zu bewirken.

Die aktive Regeneration tritt auf, wenn die Fahrzeugsteuersysteme ein Regenerationsereignis anordnen. Dies wird durch das Einspritzen von etwas Dieseldieselkraftstoff in die Abgasanlage erreicht, die dann vor dem DPF in dem Dieseloxydationskatalysator oxidiert, wodurch die Temperatur des Abgases beim Eintreten in den DPF angehoben wird. Das heiße Abgas, das in den DPF eintritt, bewirkt, dass die Partikel in dem DPF mit dem zusätzlichen O₂ im Abgas oxidieren. Normalerweise sind Temperaturen von 500° C bis 600° erforderlich, um eine Regeneration mit diesem Ansatz zu erreichen. Die aktive Regeneration ist eine vollständigere Regeneration als die passive Regeneration mit NO₂, aber sie benötigt die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff, wodurch die Abgastemperatur und die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des DPFs durch entweder eine unkontrollierte Regeneration oder Temperaturgradienten, die durch lokale Hot Spots innerhalb des DPFs während der Regeneration verursacht werden, erhöht werden.

Wenn der DPF eine Regenerierung durchläuft, ist es üblich, dass ein Anstieg der Partikelemissionen stattfindet. Während der DPF sauber gebrannt wird, können die Gase, die den DPF verlassen, sich wieder hinter dem DPF zu Partikeln verdichten

und eine Steigerung in der Partikelzahl, die den DPF verlassen, bewirken. Sobald der DPF sauber gebrannt ist und beginnt, die Partikel einzufangen, kann es zu einem Partikeldurchbruch kommen. Der Partikeldurchbruch tritt auf bis der DPF seinen optimalen Fangzustand erreicht hat.

2.4 Abschalteneinrichtung von Volkswagen

Die Sensoren, Steuergeräte und elektromechanische Aktuatoren haben den Herstellern ermöglicht, die Leistung zu verbessern und die Nachfrage des Fahrzeugs zu erhöhen während sie gleichzeitig die Emissionsvorschriften erfüllen. Sie haben es allerdings auch möglich gemacht, zu betrügen.

Weil das Steuergerät ständig eine Vielzahl von Informationen empfängt, die sich auf die Betriebsbedingungen des Motors und des Fahrzeugs beziehen, und weil die Emissionszertifizierungsprüfzyklen einer bestimmten Abfolge von Betriebsbedingungen entsprechen, ist es nicht schwierig, ein Programm zu schreiben, was es dem Steuergerät ermöglichen würde, zu bestimmen, ob das Fahrzeug einer Zertifizierungsprüfung unterzogen wird oder nicht. Dies kann so einfach sein wie zu bestimmen, ob alle vier Räder des Fahrzeugs sich bewegt haben oder nicht, ob das Lenkrad verwendet wurde, oder welche Abfolge der Fahrbedingungen des Fahrzeugs beabsichtigt wurden. Wenn das Steuergerät bestimmt, dass das Fahrzeug keiner Zertifizierungsprüfung unterzogen wurde, dann könnte das Steuergerät ein anderes Programm aufrufen, dass dem Motor und der Auspuffanlage befiehlt, in Modi zu arbeiten, die für den Bediener oder Fahrzeughersteller wünschenswert sein könnten, die aber gegen die Emissionsvorschriften verstoßen.

Es scheint, dass, wenn das Steuergerät der betroffenen VW-Fahrzeuge erkennt, dass sie einem Zertifizierungstest unterzogen wurden, die Betriebsbedingungen des Motors angepasst wurden, um sicherzustellen, dass die NOx-Emissionen, die den Motor verlassen, den NOx-Vorschriften entspricht. Dies erreicht man am leichtesten, indem der Einspritzzeitpunkt verzögert und die EGR-Rate erhöht wird. Das Ergebnis wäre eine Reduktion der NOx-Emissionen, aber auf Kosten eines erhöhten Partikelaustoßes, die im DPF eingefangen werden würden, was zu einem schnelleren Auffüllen führen würde. Ferner wäre die Verbrennung weiter von ihrem optimalen Zeitpunkt abgewichen. Solche Bedingungen wären für Verbraucher in nicht-Testbedingungen nicht wünschenswert, da die Fahrzeugleistung geringer als erwünscht, während der Kraftstoffverbrauch und die DPF-Regenerationshäufigkeit größer als erwünscht wäre. Um diese Bedingungen zu vermeiden, wenn die Fahrzeuge nicht getestet werden, wurden sie auf eine Art und Weise betrieben, um die Leistung zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch und den Partikelaustoß zu verringern, was aber letztendlich zu einer Erhöhung der NOx-Emissionen führte. Das Nettoergebnis war ein Anstieg der NOx-Emissionen in der Atmosphäre.

VW erreichte zwei Ziele, indem es Software verwendete, die identifizieren konnte, wann das Fahrzeug einer Zertifizierungsprüfung unterzogen wird, um folglich die Motorbetriebsbedingungen so anzupassen, um dem Zertifizierungsstandard gerecht zu werden, und dann den Betrieb des Motors anzupassen, um eine bessere Leistung zu erzielen, sobald das Fahrzeug sich im tatsächlichen Fahrbetrieb befindet. Erstens konnten die Fahrzeuge von den Aufsichtsbehörden "zertifiziert" werden. Zweitens erhielten die Fahrzeugbesitzer auch eine gute Leistung und einen

guten Kraftstoffverbrauch im tatsächlichen Fahrbetrieb wegen der besser getakteten Kraftstoffeinspritzung und der geringeren Mengen an EGR. Jedoch emittieren die Fahrzeuge im tatsächlichen Fahrbetrieb auch große Mengen an NOx.

Durch die Fortschritte beim Kraftstoffeinspritzzeitpunkt und der Verringerung der EGR-Rate, die unter nicht-Zertifizierungsbedingungen erhalten sind, d.h. im tatsächlichen Fahrbetrieb verwendet werden, würde der Fahrer eine Zunahme der Leistung aufgrund der optimierten Verbrennungsphaseneinstellung und Dauer wahrnehmen. Die optimale Verbrennungsphaseneinstellung und Dauer ermöglichen auch einen geringeren Kraftstoffverbrauch. Darüber hinaus würde diese Bedingung die geringsten Menge von Partikelemissionen herbeiführen, was bedeutet, dass der DPF sich nicht so schnell füllen würde. Je weniger der DPF gefüllt ist, desto weniger Regenerationen sind erforderlich, was bedeutet, dass weniger Kraftstoff verwendet wird, um den DPF sauber zu halten, was einen sekundären Vorzug in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch darstellt.

Bei allen Fahrzeugen, bei denen die Abschaltvorrichtungen aktiv waren, war ein erheblicher Anstieg der NOx-Emissionen zu verzeichnen. Die Fahrer erhielten einen Vorteil durch einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch, und während noch keine genauen Daten verfügbar sind, führte der *Consumers Reports* einige Messungen durch und zeigte, dass Fahrzeuge mit Abschaltvorrichtung schneller beschleunigen und einen geringeren Kraftstoffverbrauch haben.⁴

3 Herausforderungen der potenziellen Korrekturen

3.1 Was derzeit über die vorgeschlagenen Korrekturen bekannt ist

In Deutschland hat VW seine Pläne angekündigt, um die betroffenen europäischen Motoren zu korrigieren.⁵ Bei den angekündigten Korrekturen für die Fahrzeuge mit 1,2 und 2,0-Liter-Motoren handelt es sich um eine Software-Lösung. Die Software-Änderungen an der Steuereinheit wurden nicht näher erläutert, aber man kann vermuten, dass es sich hierbei wahrscheinlich um Änderungen am Einspritzzeitpunkt, Einspritzdruck, an den Einspritzverlaufsformen und den EGR-Raten handelt. Für Fahrzeuge mit 1,6 Liter-Motoren, wird zusätzlich zu einem Software-Update ein Strömungsübertragungsrohr vor dem Luftmassenstromsensor (englische Abkürzung MAF [Mass Air Flow]) installiert werden. Es wird behauptet, dass das Strömungsübertragungsrohr vor dem MAF zu genaueren Messungen des Luftstroms im Motor führt, wodurch eine präzisere Dosierung des Kraftstoffs für eine bessere Emissionssteuerung ermöglicht wird. Auch hier ist nicht klar, welche Änderungen an der Steuereinheit-Software gemacht werden, aber sie umfassen wahrscheinlich Einspritzzeitpunkt, Verlaufsformung oder EGR-Raten. VW bestätigt darüber hinaus, dass das Update am Amarok-Kleintransporter - die einzige Korrektur, die bisher umgesetzt wurde - tatsächlich Änderungen am EGR und an der Kraftstoffeinspritzung umfassen.⁶

⁴ *Consumers Reports*, „How Volkswagen Diesels Perform in "Cheat Mode"“, verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=zUPnAA_Y3XI.

⁵ *Volkswagen Gruppe*, „Technical measures for the EA 189 diesel engines affected,“ verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=jKN8danplfE>; Jack Ewing, „Volkswagen Reveals Emissions Fix for Diesel Cars in Europe“, *New York Times*, 25. November 2015.

⁶ *Auto Motor und Sport* „Wie fahren die VW-Dieselmodelle nach dem Update?“ Nr. 5/2016.

3.2 Mögliche Probleme, die durch die Korrekturen verursacht werden könnten

Wenn VW seine Fahrzeuge gemäß der NO_x-Emissionsnormen im tatsächlichen Fahrbetrieb anpassen will und diese wirklich zu "grünen", "sauberen Diesel-" Fahrzeugen machen will, dann gibt es keine einfachen Korrekturen. Änderungen an den Betriebsparametern des Motors, die im Zusammenhang mit potenziellen Korrekturen stehen, können Auswirkungen auf die Leistung, den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen, die vom Motor ausgestoßen werden, haben, was wiederum Auswirkungen auf die Leistung des Abgasmachungssystems hat. Während die Interaktionen kompliziert sind, so dass genaue Vorhersagen ohne die Einzelheiten einer vorgeschlagenen Korrektur zu kennen, unmöglich sind, ist es jedoch möglich, bestimmte Probleme vorherzusagen, die wahrscheinlich von einer Korrektur verursacht werden. Das Fehlen eines NO_x-Reduktionssystems bedeutet, dass der Verbrennungsprozess verändert werden muss, um NO_x-Emissionen aus dem Motor zu erhalten, die im Einklang mit der Auspuffzertifizierung stehen. Basierend auf den Grundlagen, die die Motor- und Nachbehandlungssystemleistung regeln, können allgemeine Aussagen hinsichtlich der Aussichten für die Entwicklung der Fahrzeugleistung, den Kraftstoffverbrauch und die Lebensdauer der Komponenten, gemacht werden, nachdem die Abschaltvorrichtungsfahrzeuge Abgaskonform über diese breite Palette von Fahrzeugbetriebsbedingungen gemacht wurden.

Der wahrscheinlichste Ansatz die NO_x-Emissionen, die der Motor emittiert gemäß dem Zertifizierungsniveau zu reduzieren, umfasst die Erhöhung der EGR-Rate und die Manipulation der Kraftstoffeinspritzung, wie die Verzögerung des Einspritzzeitpunkts, Mehrfacheinspritzungen und / oder die Einspritzdruckänderungen. Die Manipulation der Kraftstoffeinspritzung und der erhöhte EGR wird nicht nur die NO_x-Emissionen aus dem Motor verringern, sondern auch die Partikelemissionen und den Kraftstoffverbrauch erhöhen und die Motorleistung verschlechtern.

Aus diesen Gründen hat der Versuch die nicht konformen Fahrzeuge mit einem reinen Software-Update zu korrigieren das Potenzial, sich erheblich auf die Leistung des Fahrzeugs, sowohl unmittelbar als auch langfristig, auszuwirken. Die unmittelbaren Auswirkungen wären der Anstieg des Kraftstoffverbrauchs von den verschiedenen Motorkalibrierungen, um die NO_x-Emissionen aus dem Motor zu reduzieren. Zusammen mit dem erhöhten Kraftstoffverbrauch, der aus dem verzögerten Kraftstoffeinspritzzeitpunkt und erhöhten EGR-Raten resultiert, kommt es zu einer Kraftstoffverbrauchserhöhung aufgrund der häufigeren DPF-Regenerationen. Da die Änderung der Betriebsbedingungen des Motors, um den NO_x-Ausstoß aus dem Motor zu verringern, den Partikelaustritt aus dem Motor erhöht, muss der DPF häufiger regeneriert werden. Der Dieseldieselkraftstoff wird verwendet, um die Abgastemperatur zu erhöhen und die DPF-Regeneration zu initiieren, was bedeutet, dass mehr Kraftstoff durch häufigere DPF-Regenerationen verbraucht werden würde.

Für europäische Fahrzeuge kann die häufigere DPF-Regeneration im Fahrzeug bewirken, dass die Partikelzahlnorm nicht eingehalten wird. Während der DPF-Regeneration gibt es eine begleitende Erhöhung der Anzahl der emittierten Partikel.

Übermäßige DPF-Regenerationen könnte das europäische Fahrzeug hinsichtlich seiner Partikelzahlnorm nicht konform machen.

Schließlich gibt es noch Bedenken hinsichtlich der Langlebigkeit der DPFs der Fahrzeuge, sobald diese korrigiert wurden. Mit einer höheren Partikelkonzentration, die vom Motor emittiert wird, wird der DPF vielen weiteren aktiven Regenerationszyklen während der Lebensdauer des Fahrzeugs unterzogen. Somit könnte die DPF-Lebensdauer ein Problem darstellen.

Zusammenfassend führt ein Verständnis der grundlegenden Funktionsprinzipien der Motor- und Nachbehandlungssysteme zu dem Schluss, dass die Korrekturen wahrscheinlich unmittelbare Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Fahrzeugleistung haben werden und zu einer erhöhten Emission der Anzahl kleiner Partikel und möglicherweise langfristigen Problemen der Lebensdauer des Nachbehandlungssystems führen.

4 Aktuelle Entwicklungen hinsichtlich der vorgeschlagenen Korrekturen von VW

VW erhielt erste Genehmigung für Korrekturen an seinen 2.0, 1.6, und 1.2-Liter-Fahrzeugen im Dezember 2015.⁷ Am 27. Januar 2016 genehmigte die KBA die Umsetzung der Korrekturen an einer geringen Anzahl dieser Fahrzeuge, bestehend aus VW Amarok Kleintransportern.⁸ Es scheint, dass VW mit dieser Korrektur ausschließlich die Emissionstests bestehen wollte und keine Bedenken hinsichtlich des Emissionsniveaus bei tatsächlichen Fahrbetrieb hatte.⁹ VW hat bestätigt, dass es die vorgeschlagene Korrektur nicht bei tatsächlichen Fahrbetrieb getestet hat.¹⁰

Und in der Tat zeigte ein Test bei späterem tatsächlichen Fahrbetrieb, dass das Update Probleme beim Amarok verursacht. Unabhängige Tests der Korrekturen am Amarok stellten fest, dass die Software-Änderung den Kraftstoffverbrauch erhöhten - zusätzlich zu der Nichteinhaltung der NOx-Emissionen gemäß den europäischen Emissionsstandards.¹¹ Berichten zufolge, wurde in der Folge die Genehmigung der weiteren Umsetzung der Korrektur vom KBA ausgesetzt.¹² Darüber hinaus zeigte eine unabhängige Untersuchung der Abschaltvorrichtung, dass wenn die Fahrzeuge im emissionsmindernden Modus länger als von VW beabsichtigt betrieben wurden, ein höherer Verschleiß des DPFs vorlag.¹³ Daraus folgt, dass, weil das Update es erforderlich macht, dass die Fahrzeuge auf eine bestimmte Art und Weise betrieben

⁷ Jay Ramey, „VW's Fix for European Diesels Greenlit by German Authorities“ Autoweek, 17. Dezember 2015, <http://autoweek.com/article/vw-diesel-scandal/vws-fix-european-diesels-greenlit-german-authorities>.

⁸ Pressemitteilung Nr. 03/2016: Kraftfahrt-Bundesamt erteilt Volkswagen (VW) die Freigabe der technischen Lösung für das Fahrzeugmodell Amarok, 2,0 Liter, 27. Januar 2016, http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2016/Allgemein/pm03_16_vw.html.

⁹ Mitschrift der Anhörung im britischen Parlament, 25. Januar 2016, Aussage von Oliver Schmidt bei 9, 30, <http://data.parliament.uk/writtenevidence/committeeevidence.svc/evidencedocument/transport-committee/volkswagen-group-emissions-violations/oral/27791.pdf>.

¹⁰ Id. bei 4.

¹¹ *Der Spiegel*, „VW-Abgasskandal: Passat-Rückruf droht Verzögerung“, 19. Februar 2016, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/vw-abgasskandal-passat-rueckruf-droht-verzoegerung-a-1078382.html>; *Auto Motor und Sport*, „Wie fährt der VW - Diesel nach dem Update“? Nr. 5/2016.

¹² *Der Spiegel*, „VW-Abgasskandal: Passat-Rückruf droht Verzögerung“, 19. Februar 2016, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/vw-abgasskandal-passat-rueckruf-droht-verzoegerung-a-1078382.html>.

¹³ *Tagesschau*, „Software-Update - obwohl VW gewarnt war“? 11. März 2016, <http://www.tagesschau.de/wirtschaft/vw-skandal-125.html>.

werden müssen, um die NOx-Emissionen effektiver zu reduzieren, wahrscheinlich ein höherer Verschleiß des DPFs einhergeht.

Im Rahmen der vorherigen Fehldarstellung von VW und den neuesten unabhängigen Erkenntnissen, zusätzlich zu den oben erläuterten technischen Konzepten, sind VWs Darstellungen über die Leichtigkeit, Preisgünstigkeit, Dauerhaftigkeit und Vollständigkeit einer Korrektur nicht plausibel.

5 Schlussfolgerung

Diesel-Pkws zu produzieren, die die Komfort-Erwartungen des Fahrers erfüllen und gute Leistung und niedrigen Kraftstoffverbrauch erbringen und gleichzeitig die strengen Emissionsvorschriften einhalten, erfordert die Herstellung eines Gleichgewichts zwischen der Maximierung der Motorleistung und der Sicherstellung, dass das Nachbehandlungssystem in der Lage ist, die Emissionen im Abgas auf ein Niveau zu reduzieren, das ausreichend ist, um den Vorschriften zu entsprechen. Mit modernen Fahrzeugen müssen die Hersteller ein komplexes System von vielen interagierenden, hoch technischen Teilsystemen, kontrollieren. Um die sich kontinuierlich ändernden Kompromisse zwischen Motorleistung, Begrenzung des Kraftstoffverbrauchs und Einhaltung der Emissionsstandards zu bewältigen, müssen die Interaktionen dieser komplexen Teilsysteme durch das Fahrzeugsteuerungssystem gehandhabt werden. Es ist möglich, die Steuereinheit so zu programmieren, dass es erkennt, wenn ein Zertifizierungstest durchgeführt wird und dann auf den emissionskonformen Betrieb zu verzichten, sobald das Fahrzeug keinem Zertifizierungstest unterzogen wird. Dies würde die Anpassung des Motorbetriebs für eine bessere Leistung bei geringerem Kraftstoffverbrauch erlauben und auch den Kraftstoff einsparen, der bei der Kontrolle der Partikelemissionen verwendet werden würde, um das Fahrzeug konform zu halten. Es würde auch den Verschleiß des Nachbehandlungssystems minimieren.

Sobald die Fahrzeuge mit Abschaltvorrichtungen korrigiert wurden, würde man erwarten, dass deren Kraftstoffverbrauch sich erhöht und sich ihre Leistung aufgrund der notwendigen Anpassungen im Motorbetrieb verringern. Es wird wahrscheinlich auch weitere Erhöhungen des Treibstoffverbrauchs aufgrund der häufigeren DPF-Regenerationen geben. Schließlich wird die Verkürzung der Lebensdauer des DPFs von großer Bedeutung sein, da es häufiger aktive Regenerationen durchläuft.
