

Deutscher Bundestag

5. Untersuchungsausschuss
der 18. Wahlperiode

Ausschussdrucksache

18(31)42

Anhörung von Sachverständigen zum Thema:
„Funktionsweise und Möglichkeiten von
Abschalteinrichtungen und sonstigen
Manipulationen einer NOX-Abgasreinigung“
Stellungnahme zum Beweisbeschluss SV-3 für die
Sitzung des 5. Untersuchungsausschusses der
18. Wahlperiode des Deutschen Bundestages am
22. September 2016

Sachverständiger:

Felix Domke
Programmierer, Lübeck

Funktionsweise der Abschaltvorrichtungen bei verschiedenen Herstellern

Zunächst einmal ist festzustellen, dass die in den USA von Volkswagen verwendeten Kriterien (Temperatur sowie charakteristisch der Weg-Zeit-Verlauf der gefahrenen Strecke) den von Volkswagen in Europa verwendeten entsprechen; in beiden Fällen sind Weg-Zeit-Kennlinien für den verwendeten Test hinterlegt, und die Abgasreinigung wird dann in den vollumfänglichen Modus geschaltet, wenn der wirklich gefahrene Weg (innerhalb einer definierten Toleranz) der hinterlegten Strecke entspricht. Die Fahrzeuge, insbesondere die Software der Motorsteuerung, sind auf die Abgasnorm im Verkaufsland zugeschnitten, ähneln sich aber zu großen Teilen. Die hinterlegten Strecken entsprechen der in der jeweiligen Gesetzgebung geforderten Tests, also NEDC sowie EUDC für Fahrzeuge in Europa, und SC03 SFTP, UDS/FTP, LA92/UCDS, US06 SFTP, HWFET für Fahrzeuge in den USA.

In den USA hat VW weiterhin eine Erkennung des aktuellen Lenkwinkels hinzugefügt, so dass einige der Strecken nur dann berücksichtigt werden, wenn eine bestimmte Lenkradbewegung nicht überschritten wird. Dies dient wohl der Vermeidung von falsch positiven Erkennungen bei hoher geforderter Toleranz der Weg-Zeit-Erkennung. Diese Lenkwinkelerkennung ist meiner Erkenntnis nach in Europa nicht verwendet worden.

Andere Hersteller verwenden andere Kriterien zur Steuerung der Abgasreinigungssysteme, die im Einzelnen weniger eindeutig einer Testprozedur entsprechen, in der Summe jedoch einen ähnlichen Effekt haben. Die Motorsteuerung eines anderen Herstellers enthält eine Abfrage auf eine NEFZ-typischen Motorbelastung und -Geschwindigkeit, in Kombination mit einem um die NEFZ-typischen Temperaturen zentrierten Temperaturfenster sowie einem gegebenen minimalen Umgebungsdruck (entsprechend einer Begrenzung auf ca. 850mm über NN). Außerhalb dieser gegebenen Grenzen ist das Emissionsverhalten deutlich verschlechtert.

So sind in diesem Fall zwar Fahrsituationen denkbar, die nicht dem NEFZ entstammen, und ebenfalls zu einem optimiertem Emissionsverhalten führen. Längerfristige Beobachtungen im normalen Straßenverkehr zeigen aber, dass diese Situationen in der realen Fahrweise äußerst selten sind, und der Motor im normalen Straßenverkehr, und der dort üblichen Beschleunigungsphasen (auch bei bewusst defensiver Fahrweise) fast ausschließlich in einem für den Stickoxidausstoß nicht optimierten Modus betrieben wird. Ob dies als "Abschaltvorrichtung", als "sonstige Manipulation" oder lediglich als notwendige Optimierung zur Vermeidung von Fahrzeugschäden bzw. zur Optimierung des Fahrverhalten verstanden wird, muss im Einzelfall geklärt werden. Bemerkenswert ist aber die deutliche Nähe der vorgegebenen Grenzen im Vergleich zum NEFZ, die sich teilweise nur schlecht durch eine physikalische Notwendigkeit erklären lassen.

Als zentraler Unterschied zu VW jedoch ist zu bemerken, dass dort die Möglichkeit gegeben ist - zumindest mittelfristig - erneut in den Modus des optimierten Emissionsverhaltens zu schalten, auch wenn die einprogrammierten Grenzen vorher bereits überschritten werden, die Fahrt aber in einer dem NEFZ angelehnten Fahrweise fortgesetzt wird. Eine Abschaltung bzw. Reduktion der Abgasreinigung beim Verlassen der NEFZ-optimierten Kriterien erfolgt nicht endgültig, sondern nur zeitweise. Diese Zeitkonstanten bzw. Hysteresegrenzen (z.B. 120 Sekunden, Leerlauferkennung) sind allerdings so gewählt, dass bei einer typischen Realfahrweise eine Rückschaltung nur sehr selten stattfindet. Auf die

Realemissionen bei üblicher Fahrweise, zumindest bei den mir bekannten Messungen, hat diese Rückschaltmöglichkeit daher kaum einen Einfluss.

Kriterien anderer Hersteller sind teilweise einfacher gestaltet - zum Beispiel als eine rein zeitbasierte Abschaltung, die nach der typischen Dauer des Testzyklus die Effizienz der Abgasreinigung mindert.

Notwendigkeit der Abschaltvorrichtung zur Vermeidung von Schäden

NO_x-Vermeidung im Motor (üblicherweise durch Abgasrückführung, AGR) sowie die Reinigung der Abgase im Abgastrakt mittels einem NO_x-Speicherkatalysators (LNT) oder der selektiven katalytischen Reaktion (SCR) sind durch physikalische Grenzen in vielen Betriebssituationen nur eingeschränkt möglich. Der Übergang von einer allgemeinen Optimierung auf übliche Fahrsituationen, über eine zielgerichtete Optimierung auf spezifische Testsituationen bis hin zu einer bewussten Umschaltung bei einer Erkennung von Testsituationen ist fließend und muss im Einzelfall untersucht werden.

Die Emissionsstrategien sind dem Motorbetriebspunkt angepasst; nicht jede Maßnahme ist in jeder Situation sinnvoll und zielführend. Erhöhte Abgasrückführung zur NO_x-Reduzierung ist zum Beispiel hauptsächlich im Niederlastbetrieb sinnvoll, und führt im Mittel- oder Hochlastbetrieb kaum zu besseren Emissionsergebnissen; im Gegenteil wird das Verbrennungsverhalten unter Umständen massiv verschlechtert. Ein SCR-Katalysator benötigt eine minimale Arbeitstemperatur, unter der keine Thermolyse des Reduktionsmittels stattfindet, und auch gespeichertes Ammoniak kaum umgesetzt wird.

Als beispielhafte Probleme bei zu hohem bzw. ungeeignetem Einsatz dieser Maßnahmen kann die Versottung / eine hohe Partikelbelastung bei zu hoher Abgasrückführungsrate, der NH₃-Schlupf bei hoher Motorlast (und damit hohem Abgasvolumenstrom), Kristallisierung bei zu niedriger Abgastemperatur sowie Schäden an der Reduktionsmittelfördereinheit bei niedrigen Außentemperaturen genannt werden.

Aus diesem Grund gibt eine Vielzahl von technischen Parametern, die es schwer machen, die Frage nach der Zulässigkeit einer vorhandenen Abschaltvorrichtung allgemein zu beantworten.

Zu beobachten ist jedoch, dass die vorhandenen Systeme häufig nicht bis an die physikalischen Grenzen genutzt werden, sondern bereits frühzeitig reduziert eingesetzt werden. Ein übliches Argument seitens der Hersteller ist die Bemühung eine Langlebigkeit der Komponenten auch bei den erwarteten Toleranzen im Feld sicherzustellen. Hier ist im Einzelfall zu überprüfen, ob ein erweiterter Einsatz der Systeme nachweislich zu verfrühten Schäden führen würde.

Die Häufigkeit, in der die vorhandenen Abgasreduktions- bzw. Reinigungssysteme im typischen tagtäglichen Fahrbetrieb reduziert- bzw. deaktiviert werden müssen, hängt außerdem sehr stark von der Auslegung bzw. der Ausführung der Komponenten ab.

Beispielweise erfordern einige Fahrzeuge mit SCR-Technik eine rapide Verringerung der Reduktionsmitteleinspritzmenge bei höheren Abgasmassenströmen, da der Wirkungsbereich im Katalysator bei hoher Abgasgeschwindigkeit nicht ausreicht, um die Reduktion durchzuführen. Die Folge einer nicht-verringerten Einspritzung von Reduktionsmitteln in diesen Betriebsbereichen wäre der Ausstoß von Ammoniak ("NH₃-Schlupf"), welcher dringend zu vermeiden ist. Konstruktiv wäre es möglich, einen Katalysator mit längerer Wirkstrecke, bzw. ein ausreichendes NH₃-Sperrkatalysatorelement vorzusehen, welches eine verbesserte Reduktion der Stickoxide auch bei höherer Motorlast ermöglicht.

Ähnlich sind zur Verbesserung des Verhaltens im Niederlastbereich konstruktive Lösungen möglich (und bei einigen Herstellern auch im Einsatz), die zu einer beschleunigten Erwärmung des Abgastraktes bzw. des SCR-Katalysators führen; dies erlaubt der Einsatz der Reinigung bereits bei niedrigen Temperaturen, die beim Beginn einer Fahrt auftreten.

Viele dieser konstruktiven Verbesserungen sind allerdings mit zusätzlichen Kosten verbunden, die im Endeffekt auf den Kunden umgelegt werden würden.

Notwendigkeit der Abfrage spezifischer Parameter (Drehzahl, Motortemperatur, Außentemperatur, Luftdruck) zur Steuerung der Emissionsstrategie

Pauschal sind alle genannten Parameter zumindest in speziellen Situationen relevant. Es ist üblich, dass bestimmte Motorfunktionen in extremen Betriebsbereichen grundsätzlich mit anderen Algorithmen gesteuert werden, die dann zu einem erhöhten Abgasausstoß führen, da die regulär eingesetzten Algorithmen in diesen Bereichen ungenaue bzw. unbrauchbare Ergebnisse liefern (Überschreiten von Modellgrenzen).

Allerdings müssen die Erfordernisse für diese gesonderten Betriebsbereiche nachvollziehbar sein; beispielsweise sollten ähnliche Betriebssituationen in erster Näherung zu ähnlichen Abgasausstoßen führen. Schlagartige Änderungen, z.B. bei Überschreitung einer Geschwindigkeitsgrenze, einer Temperaturgrenze, oder einer Motorendrehzahl oder -Last deuten darauf hin, dass hier eine verbesserte Regelung möglich wäre, bzw. im Umkehrschluss, dass das Abgasverhalten schlechter als notwendig ist, was einer Verringerung der Wirksamkeit des Emissionskontrollsystems entspricht.

Auch sollte ein Motor bei ähnlichen Betriebssituationen (bei identischer Drehzahl, Last, Temperatur, SCR-Beladungszustand usw.) ein zeitunabhängiges Abgasverhalten zeigen, d.h. ein einmaliges und nur zeitweiliges Überschreiten etwaiger Grenzen sollte nicht zu einer zeitlich unbegrenzten Verschlechterung des Abgasverhaltens führen.

Relevant für die Funktionsfähigkeit der Abgasreinigungssysteme ist weniger die Außentemperatur als die Temperatur des betroffenen Systems. Allerdings hat die Außentemperatur natürlich - insbesondere bei einem Kaltstart - einen Einfluss auf diese Temperatur, und so lässt sich aus der Außentemperatur und weiteren Größen die Temperatur z.B. im Abgastrakt modellieren.

SCR-Systeme benötigen Temperaturen, die im Niederlastbetrieb nicht oder erst nach längerer Fahrzeit erreicht werden. In dieser Zeit arbeitet die Abgasreinigung nur unvollständig, und auch nur, wenn im vorhergehenden Fahrzyklus eine sog. "Aufladung" des Katalysators erfolgt ist. Eine gezielte Aufheizung des Abgastraktes ist üblich und notwendig, wird aber nicht immer in voller Notwendigkeit umgesetzt, z.B. um Kraftstoff zu sparen. Zusätzlich gibt es, wie erwähnt, konstruktive Möglichkeiten um eine schnellere Erwärmung des SCR-Katalysators zu ermöglichen (motornaher Einbau). Das Problem der zu niedrigen Abgastemperatur bei SCR wird jedoch während der Fahrt hauptsächlich von der abgefragten Motorlast bzw. Abgastemperatur dominiert, weniger von der Außentemperatur.

Zusätzlich wird bei sehr niedrigen Temperaturen die Aufheizung des Reduktionsmittels notwendig; der Gefrierpunkt von AdBlue liegt bei -11.5°C . Diese Aufheizung üblicherweise vorgesehen, aber es müsste überprüft werden, ob die Tauleistung ausreichend ist.

Für die Stickoxidvermeidung mittels Abgasrückführung ist die Temperatur der Ansaugluft relevant, um eine Kondensationsbildung zu vermeiden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Außentemperatur zwar einen Einfluss auf die Emissionskontrolle hat; die Notwendigkeit einer pauschalen Reduzierung z.B. schon bei unter $+15^{\circ}\text{C}$, gerade beim LNT- bzw. SCR-System, lässt sich aber daraus nicht herleiten, und sollte kritisch hinterfragt werden. Notfalls sind konstruktive Veränderungen notwendig, um ein abgasreinigendes System wirksam in der ganzen Bandbreite der in Deutschland üblichen klimatischen Bedingungen einzusetzen.

Momentan erfolgt die Ermittlung der entsprechenden Grenzwerte ausschließlich vom Fahrzeughersteller; öffentlichen Einblick in die Optimierungsstrategien bzw. Begründungen für die ermittelten Grenzwerte gibt es nicht. Die Fahrzeughersteller stützen sich auf ihre eigenen Langzeitbeobachtungen, auch der bereits im Feld vorhandenen Fahrzeuge.

Gerade bei neuartigen Technologien, wie sie z.B. der großflächige Einsatz der SCR vor einiger Zeit noch darstellte, lagen oft - zumindest zum Zeitpunkt der ursprünglichen Implementierung - keine ausreichenden Langzeiterfahrungen vor, so dass oft sehr defensive Grenzwerte verwendet werden. Die Fahrzeughersteller sollten inzwischen in der Lage sein, durch die gesammelten Erfahrungen der EU5+ und EU6-Fahrzeuge die Grenzwerte so zu optimieren, dass ein erweiterter Einsatz der Abgasreinigung möglich ist, ohne Motorschäden zu erwarten.

Verbesserung der Überprüfbarkeit und Transparenz der eingesetzten Emissionsstrategien

Der Hersteller muss mittlerweile den Prüfbehörden ausreichend Dokumentation zur Verfügung stellen, die eine Untersuchung auf unzulässige Abschalteinrichtungen ermöglicht. Prinzipiell haben die Prüfbehörden damit die Möglichkeit, die Zulässigkeit und Qualität der eingesetzten Emissionssysteme zu überprüfen. Der Aufwand einer verdachtsunabhängigen Überprüfung ist jedoch enorm, so dass selbst beim Vorliegen einer vollständigen Dokumentation ein erheblicher personeller und finanzieller Aufwand notwendig ist, um bei allen zuzulassenden Fahrzeugen eine möglicherweise vorhandene Abschaltvorrichtung zu erkennen.

Eine potentielle Lösung wäre es, unabhängigen Dritten (z.B. Kunden der Fahrzeuge, Sicherheitsexperten, Umweltexperten) eine Untersuchung bzw. Bestätigung der Herstellerangaben zu ermöglichen. Es ist mir keine zugängliche Dokumentation bekannt, welche es unabhängigen Dritten ermöglicht, die Funktionsweise der Abgasreinigung aus Softwaresicht zu untersuchen, zu dokumentieren oder zu überprüfen. Mit größerem technischen Aufwand ist es in der aktuellen Generation der Steuergeräte meist möglich, durch "Reverse-Engineering", d.h. der "Rückentwicklung" der im Auto vorhandenen Software in menschenlesbaren Programmtext, auch ohne externe Dokumentation diese Untersuchungen durchzuführen. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass Sicherheitsmerkmale der Steuergeräte in Zukunft so verwendet werden, bzw. so erweitert werden, dass sich eine solche Untersuchung der Steuergeräte technisch sehr verkompliziert, und damit in einem realistischen

Zeitrahmen unmöglich wird. Es kann dann nicht mehr damit gerechnet werden, dass "versteckte" Funktionen, die nicht dokumentiert sind, durch externe Untersuchungen überhaupt gefunden werden.

Die Manipulationsvorgänge der Vergangenheit zeigen, dass Hersteller die vorhandene Komplexität der Motorsteuerung ausnutzen, um Funktionen zu integrieren, über deren Existenz nicht aufgeklärt wird.

Eine teilweise oder vollständige Offenlegung der Software gegenüber Dritten wird von den Herstellern aus vielerlei Gründen abgelehnt; primär argumentiert wird mit der Notwendigkeit, das enthaltene geistige Eigentum zu schützen (z.B. vor Konkurrenten), sowie aus Gründen der Manipulationssicherheit ("Tuning") bzw. des Diebstahlschutzes (Implementation und Schlüssel einer Wegfahrsperrereinrichtung).

Der Schutz des geistigen Eigentums erscheint zunächst notwendig, damit andere Hersteller nicht die mit hohen Kosten entwickelte Software in eigenen Produkten verwenden, ohne sich an den Entwicklungskosten beteiligen zu müssen. Dabei sind viele Bereiche der Motorsteuerung üblicherweise bereits durch (öffentlich zugängliche) Patente abgesichert. Weiterhin ist ein rechtlicher Schutz des geistigen Eigentums auch bei Veröffentlichung möglich. Dies funktioniert natürlich nur in Märkten, in denen entsprechende Gesetze auch durchgesetzt werden können. Aber auch ohne eine Offenlegung besteht immer die Gefahr, gerade wenn es sich nur um einige wenige, aber besonders wichtige schützenswerte Softwareteile handelt, dass mit höherem personellen Aufwand "Reverse-Engineering" betrieben wird.

Die Manipulationen der Vergangenheit zeigen, dass es notwendig ist, Transparenz und Überprüfbarkeit für Steuerungssoftware zu schaffen; eine freiwillige Selbstverpflichtung der Hersteller erscheint nicht ausreichend. Dabei muss das öffentliche Interesse an der Sicherstellung der Einhaltung der Gesetze und dem Schutz der Umwelt mit dem geschäftlichen Interesse der Hersteller abgewogen werden.

Eine Möglichkeit wäre es z.B., einen kontrollierten Einblick berechtigter Dritter unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen und unter Aufsicht des Herstellers zu ermöglichen, oder eine Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten. Solche Maßnahmen sind in anderen Bereichen, z.B. der Informationstechnik, durchaus üblich: Als Beispiel sei die "Shared Source"-Initiative von Microsoft angeführt, die autorisierten Dritten die Möglichkeit bietet, den Quelltext von Microsoft Windows zu untersuchen, der mit ähnlichen Argumenten ebenso schützenswert ist wie eine im Auto verwendete Software.

Aus informationstechnischer Sicht kann das Argument der Manipulationssicherheit weitgehend entkräftet werden: Es ist technisch sehr wohl möglich und oft sogar bereits vorgesehen, die Möglichkeit eines rein lesenden Zugriffes zu ermöglichen, der - durch entsprechende Vorrichtungen der Software - keinen aktiven Eingriff in die Funktionalität der Software erlaubt. Entsprechende Datenregionen, welche den Diebstahlschutz betreffen, können vom Zugriff ausgeklammert werden. Diese Vorkehrungen sind momentan Stand der Technik. Bei korrekter Implementierung ist nicht zu erwarten, dass ein rein lesender Zugriff auf die für die Abgasreinigung relevanten interne Daten des Motorsteuergerätes die Manipulationssicherheit bzw. den Diebstahlschutz schwächen.

Felix Domke

Lübeck, den 26.8.2016