Bewertung der in der Öffentlichkeit diskutierten Anhaltspunkte für unzulässige Abschalteinrichtungen bei den Fahrzeugen Opel Zafira und Opel Astra sowie der zu diesem Thema vorliegenden Stellungnahme der Fa. Adam Opel AG

Stand: 16.05.2016

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Datum: 16.05.2016

1. Einleitung

Auf Basis eigener Messungen vertritt die Deutsche Umwelthilfe e.V. die Meinung, dass an den Fahrzeugen Opel Zafira Tourer 1.6 CDTi und Opel Astra Tourer 1.6 CDTi illegale Abschalteinrichtungen unter folgenden Bedingungen aktiviert werden:

- bei einer Geschwindigkeit über 140 km/h
- bei einer Motordrehzahl über 2.400 1/min
- bei einem Außenluftdruck von über 915 hPa (ca. 850 Meter über NN)
  Anmerkung: bei „über" muss ein Schreibfehler vorliegen, es ist sicherlich „unter" gemeint
- bei einer Außentemperatur von unter 17 und über 33 °C

Zu diesen Feststellungen liegt eine Stellungnahme der Fa. Adam Opel AG vor.

Diese zur Verfügung gestellten Unterlagen bilden die Basis der Begutachtung. Ferner fließen die Aussagen eines Schriftstückes von Felix Domke in die Bewertung ein.

Es wird darauf hingewiesen, dass zum Zeitpunkt der Erstellung des Gutachtens (16.05.2016) noch keine umfassende Wissensbasis vorliegt. Somit sind die nachfolgenden Aussagen als hinsichtlich Allgemeingültigkeit für den vorliegenden Fall „Adam Opel AG" als vorläufig zu betrachten. Ändert sich an den derzeitigen Fakten nichts, so sind nachfolgende Aussagen mit sehr hoher Wahrscheinlich auch allgemeingültig für den Fall Adam Opel AG zutreffend.

Aufgabe des Gutachtens ist, die aus den unterschiedlichen Quellen vorliegenden Aussagen zu beurteilen und eine Bewertung der vorliegenden Eingriffe in die Emissionskontrolle hinsichtlich Begründbarkeit durch Motorschutz zu erarbeiten.

2. Eingriff in die Emissionskontrolle ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit über 140 km/h

Abbildung 2.1 wurde der Unterlage „Felix Domke" entnommen. Gemäß dieser Messung sieht es sogar danach aus, dass die AdBlue-Zudosierung bereits bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 130 km/h und höher abgeschaltet wird, siehe Kennzeichnung A. Das Einsetzen der AdBlue-Zudosierung erfolgt wieder ab 130 km/h bei abfallendem Geschwindigkeitsgradienten (Kennzeichnung B).

Dazu liegt folgende Stellungnahme der Adam Opel AG vor, welche im Folgenden bewertet wird:

> *Die Fähigkeit des SCR, Ammoniak zu speichern ist primär eine Funktion der Substrattemperatur und des Abgasmassenstroms. Oberhalb von 400°C kann der Ammoniak oxidieren, was zu Ammoniakschlupf aus dem Auspuff führen kann. Die Geschwindigkeitswerte wurden als repräsentativ für eine*

kritische Kombination aus Abgasmassenstrom und Abgastemperatur von ungefähr 350°C bei 140km/h und von ungefähr 400°C bei 145km/h angenommen. Da der SCR-Katalysator bei hohen Abgastemperaturen seine Speicherfähigkeit verliert, wird bei Temperaturen oberhalb von 400°C die AdBlue-Dosierung reduziert, um den genannten Ammoniakschlupf und dessen Freisetzung in die Umwelt zu vermeiden.

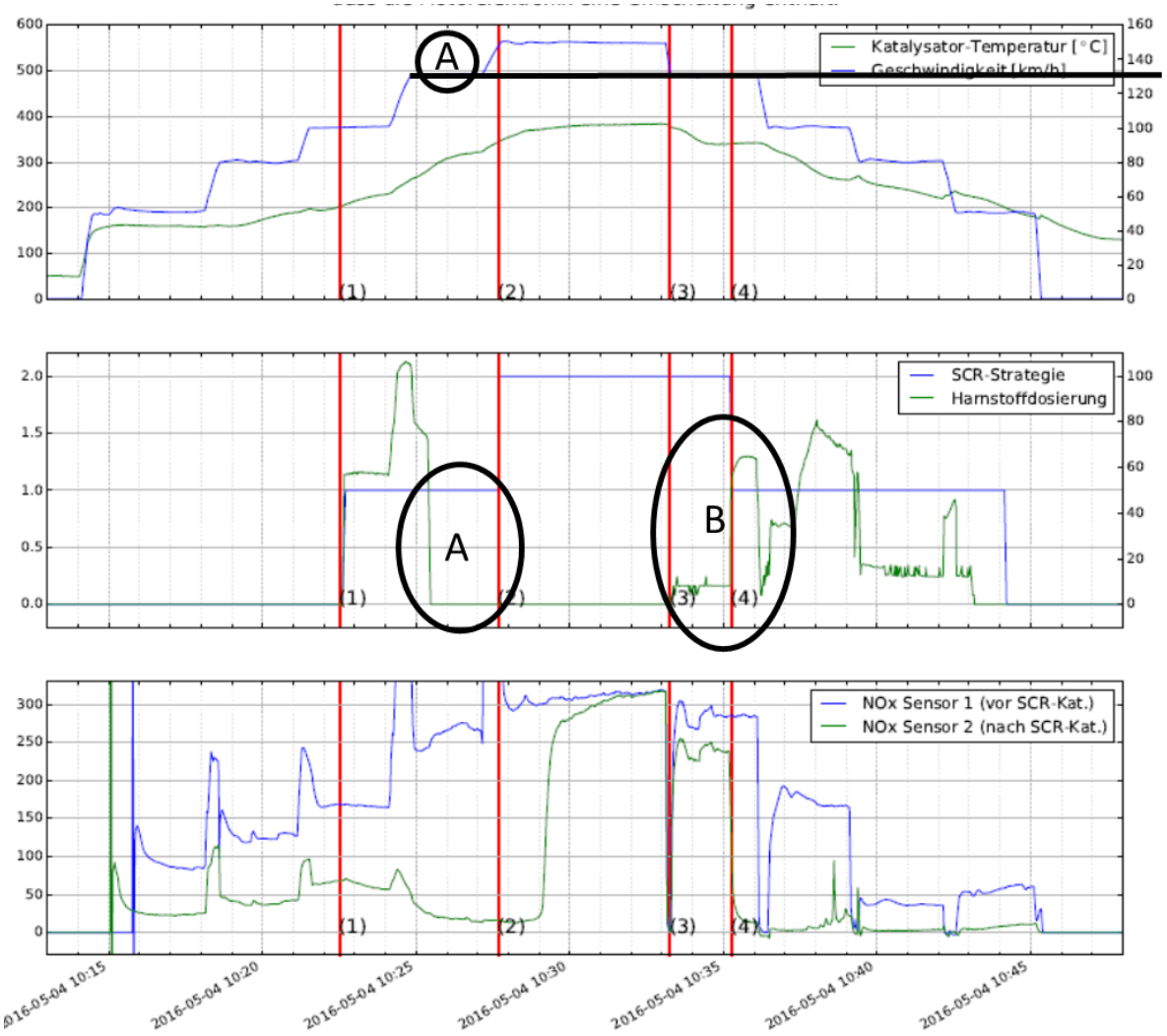

Abbildung 2.1 Messung der AdBlue-Zudosierung nach Quelle „Felix Domke“

Es ist zutreffend, dass die Ammoniakspeicherfähigkeit bei Temperaturen über 400°C langsam abnimmt. Allerdings ist die Speicherfähigkeit von Ammoniak keine Grundfunktion von SCR-Katalysatoren. Diesen Nebeneffekt nutzt man bei der Warmlaufphase und bei dynamischen Betriebszuständen, d.h. bei einem Anstieg der NOx-Rohemission kann dadurch eine verzögerte AdBlue-Zudosierung ausgeglichen werden. Das Risiko eines Ammoniakschlupfes besteht, wenn beispielsweise die NOx-Rohemission sinkt und die AdBlue-Zudosierung verzögert nachregelt. Damit dennoch

Ammoniak nicht in die Umgebung gelangt, wird im letzten Abschnitt eines SCR-Katalysators eine Beschichtung verwendet, an der NH_3 in N_2 und H_2O gewandelt wird.

Ferner ist festzuhalten, dass der optimale Betriebsbereich eines SCR-Katalysators zwischen 350 °C und 450 °C liegt. Gerade in diesem Temperaturfenster befürchtet Adam Opel AG Probleme und schaltet die AdBlue-Zudosierung ab. Bei Lkw treten noch deutlich höhere Abgastemperaturen auf, dennoch wird bei diesen Fahrzeugen AdBlue weiterhin und ohne Probleme zu dosiert.

Das Problem bei Adam Opel AG liegt offensichtlich an einer Unterdimensionierung des SCR-Katalysators. Damit sind bei höheren Motordrehzahlen die Raumgeschwindigkeiten im SCR-Katalysator zu hoch, wodurch die chemischen Reaktionen unvollständig ablaufen. Treten dazu noch hohe Abgastemperaturen auf, wirken sich diese auf die Raumgeschwindigkeit zusätzlich erhöhend aus. Deshalb spricht Adam Opel AG von einer ungünstigen Kombination aus Abgasmassenstrom und Abgastemperatur. Ein Eingriff in die AdBlue-Zudosierung nur in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit ist aufgrund hoher Raumgeschwindigkeiten ohnehin nicht schlüssig, da hohe Motordrehzahlen auch bei niedrigeren Gängen z.B. im Anhängerbetrieb auftreten. Wenn schon ein Eingriff erfolgt, müssten Abgasmassenstrom und Abgastemperatur die regelnden Parameter sein.

Eine weitere Ursache für das ungenügende Betriebsverhalten des SCR-Katalysators kann auf einen Mangel von katalytischem Material zurückgeführt werden. In diesem Fall spielen Kostengesichtspunkte eine Rolle.

Die Abschaltung der AdBlue-Zudosierung, wie sie im vorliegenden Fall erfolgt, kann aus meiner Sicht nicht mit Motor- oder Bauteilschutz begründet werden. Die Dimensionierung der Größe und des katalytischen Materials eines SCR-Katalysators war bereits zum Zeitpunkt der Entwicklung des 1.6 CDTi-Motors Stand der Technik. Spätestens während der Prototyperprobung des Motors einschließlich Abgasanlage – also noch vor der Fahrzeugerprobung – hätte diese Problematik erkannt werden und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssen. Möglicherweise erfolgte die SCR-Auslegung unter bewusster Nutzung der vorhandenen Eingriffe in die Emissionskontrolle.

Die Adam Opel AG muss aufgefordert werden, ihre SCR-Auslegungsstrategie im Detail offen zu legen. Ferner sind alle Validierungs- und Freigabeschritte während der Entwicklung bis hin zum SOP darzulegen.

3. Reduzierung der Emissionskontrolle (AGR) ab einer Motordrehzahl von 2250 1/min und ein signifikanter Eingriff bei 2400 1/min

Die Verbrennung benötigt im absoluten Zeitmaßstab betrachtet (z.B. in Sekunden) für einen bestimmte Last (zugeführte Kraftstoffmasse) immer die gleiche Zeit. Es gibt zwar

einen leichten Drehzahleinfluss, da mit zunehmender Drehzahl die Luftturbulenz im Brennraum zunimmt, wodurch die Brenngeschwindigkeit etwas erhöht wird. Grundsätzlich steht dennoch der Verbrennung nun gemessen in Grad-Kurbelwinkel mit steigender Drehzahl weniger Zeit zur Verfügung. Dieser Effekt beinhaltet das Risiko einer unvollständigen Verbrennung mit Partikel im Abgas bei höheren Drehzahlen. Kommt AGR noch hinzu, wird dieses Risiko verstärkt. Daraus lässt sich demnach eine Motivation einer AGR-Reduzierung/Abschaltung bei höheren Drehzahlen ableiten.

Allerdings liegt die Drehzahl 2400 1/min im mittleren Bereich der Drehzahlspanne eines Pkw-Dieselmotors. Gerade in diesem Drehzahlbereich sollte die Verbrennung sehr gut funktionieren, so dass eine AGR-Verträglichkeit des Brennverfahrens gegeben sein muss. Mit dem 1.6 CDTi-Motor liegen darüber hinaus weitreichende Möglichkeiten einer Verbrennungsregelung vor. Mit Common-Rail kann die

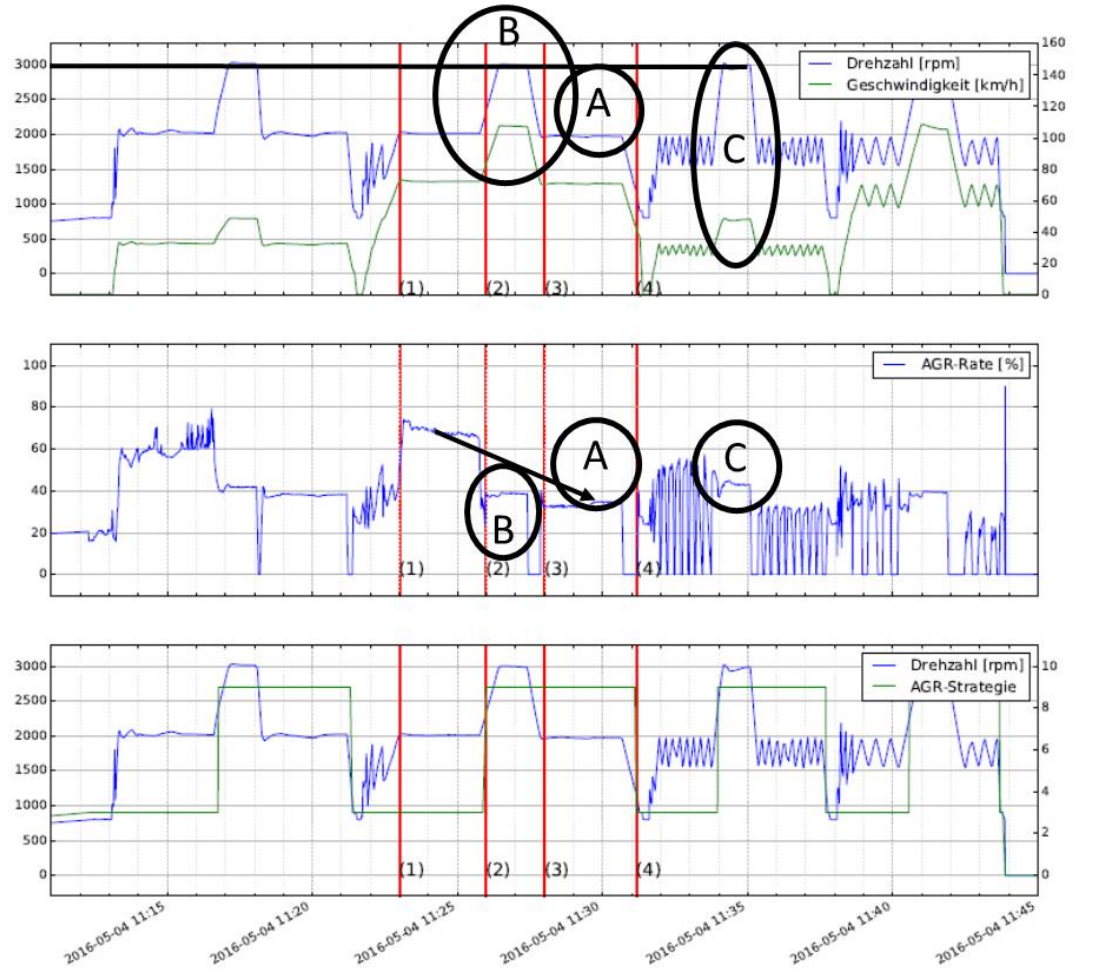

Abbildung 3.1 AGR-Raten Messung nach Quelle „Felix Domke“

Einspritzstrategie den Anforderungen von Drehzahl und Last angepasst werden. Mit dem variablen Querschnitt der Turbine des Abgasturboladers existiert die Möglichkeit der Luftmengenanpassung. Hier gilt allerdings die Einschränkung, dass bei dynamischen Lastwechseln Totzeiten für das Nachführen des Ladedruckes vorliegen.

Wie Adam Opel AG bereits dargelegt hat, erfolgt eine Reduzierung von AGR nicht allein Drehzahl basiert, sondern Kennfeld gesteuert. Ein Eingriff allein abhängig von der Drehzahl, so wie es von der DUH postuliert wird, ist aus meiner Sicht ohnehin nicht vernünftig umsetzbar. Stellt man sich einen Beschleunigungsvorgang über mehrere Gänge vor, dann würde die Drehzahlschwelle mehrfach überschritten und AGR zu- und abgeschaltet werden. Dies würde dann bevorzugt zu Verbrennungsinstabilitäten führen, welches eigentlich vermieden werden soll.

Eine Analyse der Messung der AGR-Rate nach Unterlagen von „Felix Domke“ zeigt, dass die AGR-Rate beim Anfahren einer hohen Motordrehzahl mit der entsprechenden Fahrzeuggeschwindigkeit sprunghaft reduziert wird (Kennzeichnung B). Daraus kann jedoch nicht eindeutig auf eine alleinige Drehzahlabhängigkeit der AGR-Regelung geschlossen werden, da mit der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit auch der Motorlastpunkt steigt. Somit kann auch eine Umschaltung in ein anderes AGR-Kennfeld die Ursache sein, so wie es Adam Opel AG bereits erklärt hat. Befremdlich ist allerdings, dass bei einer Rückkehr zum vorherigen Betriebszustand mit gleichen Fahrparametern (Kennzeichnung A) die AGR-Rate nun deutlich niedriger ist. Allerdings geht auch eine Schubphase voraus, welche einen Einfluss haben kann. Allerdings würde dieser Einfluss sehr lange aufrechterhalten werden. Kennzeichnung C zeigt nun, dass bei hoher Drehzahl und geringerer Fahrzeuggeschwindigkeit (niedriger Gang), also auch niedrigere Last, die AGR-Rate dennoch niedrig ist. Dies widerspricht der Strategie, die AGR-Rate mit zunehmender Last zu reduzieren. Da die NOx-Emission für diese Messung unbekannt ist, ist keine Aussage möglich, ob es sich

- um einen Eingriff in die Emissionskontrolle
- niedrige NOx-Rohemission bei diesem Lastpunkt (damit wenig AGR-Bedarf)
- verstärkte SCR-Konvertierung

handelt. Die Vermutung verstärkt durch den vorliegenden Softwareausdruck liegt allerdings nahe, dass es sich hier um einen Eingriff in die Emissionskontrolle handelt. Zweifel können nur durch KBA-Messungen ausgeschlossen werden.

Sollte es aber tatsächlich so sein, dass allein die Drehzahl ausschlaggebend für eine Reduzierung/Abschaltung von AGR ist, dann stellt dies einen unzulässigen Eingriff in die Emissionskontrolle dar.

Hysterese nach Aktivierung einer drehzahlabhängigen AGR-Kontrolle

Vermutung:

Wird der (obere) Schwellwert (2400 1/min) für die AGR-Rücknahme/Abschaltung überschritten, so wird bei nachfolgender Unterschreitung dieses oberen Schwellwertes die AGR dennoch nicht wieder zugeschaltet. Erst bei Erreichen eines unteren Schwellwertes (1250 1/min) wird AGR wieder aktiv.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass für eine belastbare Beurteilung dieses Sachverhaltens noch weitere Informationen benötigt werden. Dennoch wird im Folgenden dieses mögliche Verhalten in Form von Hypothesen diskutiert.

Unterschreitet die Motordrehzahl den oberen Schwellwert wieder, dann kann dies zwei Ursachen haben:

- Es kommt zu einer zusätzlichen Lastanforderung z.B. durch eine höhere Steigung. Der Motor hat nicht mehr das Potential, diese zu erfüllen und es kommt zu einer sogenannten Drehzahldrückung.

  Unter diesen Randbedingungen macht es tatsächlich Sinn, AGR nicht aktiv zu schalten. Der Motor arbeitet an seine Lastgrenze und AGR würde die Verbrennung unzulässig verschlechtern.

- Der Fahrer nimmt das Gaspedal zurück, um die Fahrzeuggeschwindigkeit zu reduzieren.

  In diesem Fall geht der Motor in den Schubbetrieb d.h. die Einspritzung wird abgeregelt. Wenn nun die Verbrennung wiedereinsetzen muss, weil der Fahrer wieder eine Lastanforderung hat oder die minimal zulässige Motordrehzahl ansonsten unterschritten wird, dann besteht tatsächlich die Gefahr von Instabilitäten für die ersten Verbrennungen (hier ist mit erste Verbrennungen eine Zahl größer hundert gemeint). Also auch in diesem Fall ist eine spätere Zuschaltung von AGR durchaus sinnvoll.

Man kann sich vorstellen, dass die Grenze der minimal zulässigen Drehzahl für die Schubabschaltung bei den genannten 1250 1/min liegt.

4. Eingriff in die Emissionskontrolle unter einem Umgebungsluftdruck von 915 hPa

Es besteht kein Zweifel, dass der Umgebungsluftdruck einen signifikanten Einfluss auf die Luftmassenversorgung eines Verbrennungsmotors hat. Dies gilt insbesondere für Saugmotoren, bei Motoren mit Abgasturboaufladung ist dieser Einfluss nicht so stark ausgeprägt.

Ferner ist auch bekannt, dass die AGR-Menge mit zunehmender Motorlast grundsätzlich reduziert wird. Hier spielt der Umgebungsluftdruck in den AGR-Kennfeldern eine gewisse Rolle, dessen Einfluss für die AGR-Regelung wird in Richtung Volllast jedoch zunehmend geringer bewertet.

Deshalb wird für die nachfolgende Betrachtung ein mittlerer Lastpunkt eines Motors herangezogen. Der Einfachheit halber wird ein Saugmotor zugrunde gelegt, wohl wissend, dass es sich beim Motor 1.6 CDTi um einen Motor mit Abgasturboaufladung handelt.

Geht man von einem Umgebungsluftdruck von 955 hPa (Chieming am 15.05.2016) aus und nimmt ferner an, dass der Ansaugvorgang ideal erfolgt, so erhält ein Zylinder folgende Luftmasse für die Verbrennung zur Verfügung gestellt:

$m_{L\ 955hPa} = 0{,}444\ [g]$ (T_{Umg} = 25 °C, $m_{Kr} = 0{,}016\ [\frac{g}{Asp}]$)

Es wird nun weiter angenommen, dass für die Darstellung des geforderten Motorbetriebspunktes eine Kraftstoffmasse $m_{Kr} = 0{,}016\ [\frac{g}{Asp}]$ verbrannt wird.

Damit ergibt sich ein Verbrennungsluftverhältnis $\lambda_{955\ hPa} = 1{,}937$.

Jetzt wird dieser Motor bei gleicher Umgebungstemperatur (T_{Umg} = 25 °C) und gleicher eingesetzter Kraftstoffmasse ($m_{Kr} = 0{,}016\ [\frac{g}{Asp}]$) beispielsweise bei einer Bergfahrt bei einem Umgebungsluftdruck von 915 hPa betrieben.

Die nun der Verbrennung zur Verfügung stehende Luftmasse ist $m_{L\ 915hPa} = 0{,}428\ [g]$. Die Luftmasse ist nun um 4% geringer, wodurch das Verbrennungsluftverhältnis auf $\lambda_{915\ hPa} = 1{,}856$ absinkt. Dies ist jedoch weiterhin eine Größenordnung, mit der eine dieselmotorische Verbrennung problemlos funktionieren muss, also eine AGR-Reduzierung/Abschaltung nicht erforderlich sein sollte.

Wenn auch dieses Beispiel sehr vereinfacht ist, so zeigt es dennoch, dass eine Grenze von 915 hPa für einen Eingriff in die Emissionskontrolle zu eng gewählt ist. Dazu kommt noch, dass der Motor 1.6 CDTi mit einer Abgasturboaufladung einschließlich einer variablen Turbinengeometrie (VTG) ausgerüstet ist. Durch Einstellen der VTG kann innerhalb gewisser Grenzen eine Änderung des Umgebungsluftdruckes ausgeglichen werden. Selbstverständlich stößt man bei geringem Luftdruck auf Grenzen der AGR-Verträglichkeit, aber im vorliegenden Fall – soweit die Informationen zutreffen – sind diese noch nicht erreicht. Damit ist ein Eingriff in die Emissionskontrolle unterhalb eines Grenzwertes von 915 hPa, welcher ausschließlich auf dieser Grenze basiert, als unzulässig zu bewerten. Anders verhält es sich, wenn der Umgebungsluftdruck in verwendete AGR-Kennfelder (insbesondere Lastabhängigkeit) Eingang findet.

5. Eingriff in die Emissionskontrolle bei einer Außentemperatur von unter 17 °C und über 33 °C

Dieser Sachverhalt wurde in der Untersuchungskommission und auch mit Adam Opel AG ausführlich diskutiert und bewertet. Deshalb wird an dieser Stelle diese Thematik nicht noch einmal aufgegriffen.

6. Abschließende Bemerkung

Bei der Bewertung der vorliegenden Informationen drängt sich der Eindruck auf, dass bei der Adam Opel AG die SCR-Technik in einem nicht ausreichenden Reifezustand eingeführt wurde. Die Größe des SCR-Katalysators ist offensichtlich unterdimensioniert. Damit stößt er sehr schnell an seine Konvertierungsgrenzen. Verschärft wird diese Problematik durch Alterungsprozesse des SCR-Katalysators, welche insbesondere durch die hohen Abgastemperaturen während der Regenerierung des Partikelfilters verursacht werden. Damit war die Adam Opel AG offensichtlich gezwungen, die Anzahl dieser Regenerierungsvorgänge so niedrig wie nur möglich zu halten. Um nun die Partikelbeladung des Filters zu vermindern, wurde eine Rückführung von Abgas weitestgehend vermieden. Zusätzlich stellt die bekannte Ablagerungsbildung im AGR-System ein weiteres Problem dar.

Eine intensive Diskussion mit Vertretern der Adam Opel AG und eigen KBA-Messungen sind für die Klärung der Emissionskontrolle erforderlich.

Chieming, 16.05.2016

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister