

Mercedes E350T Abgassystemanalyse

Felix Domke – 28.09.2020

Inhalt

1	Einführung, Expertise.....	3
2	Abstract.....	3
3	Problemstellung.....	4
4	Methodik.....	4
4.1	Datenerhebung.....	4
4.2	Software-Analyse.....	5
4.3	Verhaltensbasierter Vergleich.....	5
5	Grenzen des beschriebenen Ansatzes.....	5
6	Allgemeines.....	6
6.1	Ammoniaklastmodus.....	6
6.2	Alternativmodus.....	7
7	Illegale Abschalteneinrichtungen.....	8
7.1	Verhalten im Testzyklus.....	9
7.2	Physikalische Grenzen vs. Parametrisierung der illegalen Abschalteneinrichtungen.....	9
8	Illegale Abschalteneinrichtung Nr. 1: Abgasmassenstromgrenze.....	9
8.1	Hintergrund.....	9
8.2	Zusammenfassung.....	9
8.3	Einzelheiten.....	10
8.4	Verhalten im Alternativmodus.....	13
8.5	Änderungen durch das Software-Update.....	14
8.6	Grenzen der Analyse.....	15
9	Illegale Abschalteneinrichtung Nr. 2: Stickoxidmassenstrom.....	16
9.1	Hintergrund.....	16
9.2	Einzelheiten.....	16
9.3	Änderungen durch das Software-Update.....	18
9.4	Grenzen der Analyse.....	18
10	Illegale Abschalteneinrichtung Nr. 3: Ansauglufttemperatur.....	19
10.1	Hintergrund.....	19

10.2	Änderungen durch das Software-Update	19
11	Illegale Abschalt einrichtung Nr. 4: Schutz gegen Neustart.....	19
11.1	Hintergrund.....	19
11.2	Einzelheiten.....	19
11.3	Änderungen durch das Software-Update	20
12	Illegale Abschalt einrichtung Nr. 5: SCR-Temperatur	20
12.1	Hintergrund.....	20
12.2	Einzelheiten.....	21
12.3	Änderungen an den Kalibrierungsdaten durch das Software-Update.....	23
12.4	Zusammenfassung	23
12.5	Grenzen der Analyse	23
13	Illegale Abschalt einrichtung Nr. 6: AdBlue-Durchschnittsverbrauch	24
13.1	Hintergrund.....	24
13.2	Einzelheiten.....	24
13.3	Änderungen durch das Software-Update	24
13.4	Grenzen der Analyse	24
14	Illegale Abschalt einrichtung Nr. 7 (AGR): Starttemperatur des Motors.....	25
14.1	Hintergrund.....	25
14.2	Einzelheiten.....	25
14.3	Zusammenhang mit dem NEFZ-Testzyklus	25
14.4	Änderungen durch das Software-Update	25
15	Illegale Abschalt einrichtung Nr. 8 (AGR): „Hot & Idle“	26
15.1	Änderungen durch das Software-Update	26
16	Verbesserungen in der aktualisierten Version.....	27
16.1	Grenzen der Analyse	27
16.2	Einzelheiten.....	27
16.3	Auswirkungen auf den AdBlue-Verbrauch.....	29
16.4	Grenzen der Analyse	29
16.4.1	Zusammenfassung.....	29
16.4.2	SCR-Katalysator:	29
16.4.3	Abgasrückführung (AGR):.....	29
17	Fazit.....	30

1 Einführung, Expertise

Ich, Felix Domke, wurde beauftragt, auf Grundlage meiner Expertise ein Gutachten zu den unten aufgeführten Fragen zu erstellen.

Meine Berufserfahrung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Dipl.-Ing. FH (Master-Äquivalent) in Elektrotechnik, Fachhochschule Lübeck, 2008
- 20 Jahre Erfahrung in der professionellen Entwicklung von Software für Embedded Devices mit Schwerpunkt auf Sicherheit, Sicherheitsanalyse und Zuverlässigkeit
- 15 Jahre Erfahrung als unabhängiger Sicherheitsexperte
- 5 Jahre Erfahrung in der unabhängigen Analyse emissionsbezogener Funktionen in elektronischen Diesel-Steuergeräten, einschließlich der Veröffentlichung einer von Fachleuten begutachteten Arbeit zu diesem Thema¹ und Vorträgen^{2,3}
- Tätigkeit als Sachverständiger für das deutsche Kraftfahrt-Bundesamt zur unabhängigen Analyse der Software-Implementierung in Bezug auf illegale Abschaltvorrichtungen, Tätigkeit als Sachverständiger und Zeugenaussage im Rahmen des parlamentarischen Untersuchungsausschusses zu Fahrzeugemissionen im Jahr 2017.

2 Abstract

Die Daimler AG ist ein multinationaler Automobilkonzern, der Fahrzeuge unter der Marke Mercedes-Benz herstellt. Da die Autos auf dem europäischen Markt verkauft werden, müssen sie eine Reihe von Abgasvorschriften erfüllen.

Es steht der Verdacht im Raum, dass sich eine beträchtliche Anzahl von Fahrzeugen, die erfolgreich auf die Einhaltung dieser Emissionsvorschriften getestet wurden, im Normalbetrieb ganz anders verhalten und die Grenzwerte um das Zehnfache überschreiten.

Ich wurde mit einem Gutachten darüber beauftragt, ob Mercedes-Fahrzeuge ihr Abgasreinigungssystem im realen Fahrbetrieb absichtlich herabsetzen. Zu diesem Zweck wurden Messdaten an einem modernen (2015, Euro-6-Abgasnorm) Mercedes-Pkw erhoben, der mit einem SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reaction) zur Reduktion der NO_x-Emissionen ausgestattet ist. Zusätzlich wurden die Kalibrierungsdaten des eingebauten Motorsteuergeräts analysiert. Anschließend wurden die Messdaten des Motorsteuergeräts im realen Fahrbetrieb mit den Kalibrierungsdaten korreliert.

Das Ergebnis dieser Studie ist, dass eine Reihe illegaler Abschaltvorrichtungen identifiziert wurden, die die Effizienz der Abgasnachbehandlung im normalen Fahrbetrieb herabsetzen. Diese illegalen Abschaltvorrichtungen werden im Detail besprochen.

¹ M. Contag *et al.*, „How They Did It: An Analysis of Emission Defeat Devices in Modern Automobiles“, *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, San Jose, CA, 2017, pp. 231-250, doi: 10.1109/SP.2017.66.

² Felix Domke, Daniel Lange, „The exhaust emissions scandal („Dieselgate“)“, *The 32nd Chaos Communication Congress*, 2015, Hamburg

³ Felix Domke, „Software Defined Emissions“, *The 33rd Chaos Communication Congress*, 2016, Hamburg

3 Problemstellung

Es steht der Verdacht im Raum, dass in Mercedes-Fahrzeugen der Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 illegale Abschaltvorrichtungen zum Einsatz kommen. Diese Behauptungen wurden z. B. durch Messungen der realen Fahrzeugemissionen mittels PEMS (Portable Emission Measurement System) untermauert.

Diese Messungen zeigen zwar deutlich höhere Stickoxid-Emissionen als bei standardisierten Abgastests (z. B. NEFZ bei der Homologationsprüfung im Labor), können aber – da es sich um externe Messungen handelt – den Unterschied im Verhalten des Fahrzeugs nicht erklären.

Im vorliegenden Gutachten werden dagegen die beobachteten Unterschiede im Emissionsverhalten nicht anhand der Daten externer Sensoren, sondern mit Daten direkt aus der Motorsteuerung (Electronical Control Unit, ECU) untersucht, die die Motorfunktionen und die Abgasreinigung regelt.

Dies ermöglicht eine andere Sicht auf die Daten – anstatt den Motor, die Motorsteuerungssoftware und das Abgasnachbehandlungssystem als Blackbox zu behandeln und nur die Eingangs- (wie Umgebungstemperatur und Fahrzeuggeschwindigkeit) und Ausgangsdaten (von externen Sensoren im PEMS-Gerät gemessene Emissionen) zu betrachten, zeigt dieser Ansatz Zwischendaten auf, die intern im Steuergerät verwendet werden, um das Motorverhalten und die Abgase zu regeln und zu steuern.

Da ein solches internes Verhalten in der Regel vom Fahrzeughersteller nicht dokumentiert ist, wurden für die Erhebung und Auswertung dieser Daten bestehende Diagnosemöglichkeiten mit detaillierten Informationen über die Software kombiniert.

In Anbetracht des hohen Arbeitsaufwands wurde bei dieser Untersuchung nur ein Fahrzeug ausgewertet. Das Kraftfahrt-Bundesamt hat jedoch in einer Vielzahl von Mercedes-Fahrzeugen illegale Abschaltvorrichtungen gefunden. Ich gehe vom technischen Standpunkt davon aus, dass andere Mercedes-Fahrzeuge mit vergleichbaren Motoren und Technologien vergleichbare illegale Abschaltvorrichtungen enthalten dürften.

4 Methodik

Bei diesem Gutachten kommt eine Kombination aus Datenerhebung, Verhaltensanalyse (mit Referenzkalibrierungsdaten) und Auslegung der Ergebnisse zum Einsatz.

Aufgrund der Komplexität und der Menge der vorhandenen Informationskanäle aus der Motorsteuerung (ein Steuergerät verarbeitet intern mehr als 10.000 Signale) wurde ein iterativer Prozess gewählt. In einem ersten Schritt fand eine umfassende Datenerhebung statt, um ein Profil des Fahrzeugs im Regelbetrieb zu erstellen. Nach der Auswertung der gesammelten Daten wurden Datenabschnitte identifiziert, die mit den Abgasreinigungssystemen in Zusammenhang stehen. Die Datenerhebung wurde daraufhin angepasst, um die Datenauflösung weiter zu erhöhen.

4.1 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte über die OBD-2-Buchse. Dieser Anschluss vorne links im Fahrerraum ist eine standardisierte Schnittstelle, über die zu Diagnosezwecken eine Verbindung mit dem Fahrzeug und den eingebauten Steuergeräten hergestellt werden kann. Mit Hilfe steuerungsspezifischer Kommandos („UDS ReadMemoryByAddress“) können interne Daten der ECU kontinuierlich ausgelesen und auf einem Speichermedium protokolliert werden, was im vorliegenden Fall mit Hilfe einer speziell dafür

gebauten Vorrichtung erfolgte. Da die Bandbreite der OBD-2-Schnittstelle begrenzt ist, kann alle paar Minuten (wenn alle verfügbaren Informationen ausgelesen werden) oder alle paar Sekunden (wenn die Datenauswahl auf abgasrelevante Bereiche beschränkt wird) ein vollständiger Datensatz abgerufen werden. Aufgrund des iterativen Prozesses konzentrierte sich die Analyse auf wenige Speicherorte, die dennoch alle notwendigen Informationen für das Verständnis des potenziellen Einsatzes illegaler Abschaltvorrichtungen enthalten.

4.2 Software-Analyse

Die Software der Motorsteuerung (Bosch EDC17CP57) wurde ermittelt, indem das Steuergerät mit dem Tool eines Drittanbieters („FLEX“, entwickelt und verkauft von Magic Motorsports) ausgelesen wurde. Anhand der Firmware und der vorhandenen Dokumentation ähnlicher Bosch-Steuergeräte war es in einem ersten Schritt möglich, die allgemeine Struktur des Abgasnachbehandlungssystems zu verstehen und die genaue Position sowohl der Kalibrierdatenkonstanten als auch der Messpunkte innerhalb der Software abzuleiten. So konnten vorhandene Daten- und Kalibrierungsanalysetools für diese Software verwendet werden.

4.3 Verhaltensbasierter Vergleich

Es wurden zwei Softwareversionen verglichen:

1. Original-Software: Ursprünglich installierte Software („CR61-GDB2-212SA-642LS-EU6OPS_4x4_3S_NAG2-ME10<-> (13.07.2015 08:30:25)“)
2. Aktualisierte Software: Software-Update („CR61-GHB0-212SA-642LS-EU6OPS_4x4_3S_NAG2_VarB-ME21“), das in die Motorsteuerung eingespielt wurde, um das Softwareverhalten nach dem Update 2020 zu analysieren.
Vor der Installation der aktualisierten Software wurde das ursprüngliche Steuergerät geklont, um dessen Integrität zu erhalten. Nachdem die Funktionsfähigkeit des geklonten Steuergeräts überprüft worden war, wurde das geklonte Steuergerät auf die neue Software aktualisiert.

Durch den Vergleich des Verhaltens der Software unter ähnlichen Fahrbedingungen und die Korrelation dieser Verhaltensänderungen mit den beobachteten Änderungen in der Software und den Parametern können die Unterschiede zwischen den Softwareversionen aufgezeigt werden.

5 Grenzen des beschriebenen Ansatzes

Es liegt in der Natur des beschriebenen Ansatzes, dass reale Fahrsituationen nur stichprobenweise zur Verfügung stehen. Alle Daten wurden mit einem einzigen Fahrzeug erhoben. Allgemein wurde nicht versucht, das Fahrverhalten mit einer bestehenden Prüfnorm (wie RDE) zu korrelieren, sondern vielmehr typische Szenarien (innerstädtisch, außerstädtisch, Autobahn) unter verschiedenen Bedingungen abzudecken. Es wurden keine spezifischen Tests auf einem Rollenprüfstand durchgeführt.

Für die Tests wurde ein einziges Fahrzeug herangezogen:

Fahrzeugtyp: Mercedes E 350 BlueTEC

4MATIC T Motor: OM642, 190 kW, 2987 ccm,

6 Zylinder Fahrgestellnummer:



Modelljahr: 2015 (Erstzulassung: 1/2016)

Beim Fahrzeug wurde überprüft, dass die On-Board-Diagnose keine Fehlermeldungen anzeigt.

6 Allgemeines

Im untersuchten Fahrzeug kommen mehrere Strategien zur Verringerung der Stickoxidemissionen zum Einsatz. Im vorliegenden Fall wurden die Algorithmen und Parameter für die relevantesten Faktoren AGR (Abgasrückführung) und SCR (Selective Catalytic Reaction, selektive katalytische Reaktion) vorrangig untersucht.

Bei der selektiven katalytischen Reaktion zur Verringerung der NO_x-Emissionen ist eine der wichtigsten Steuergrößen die Dosierung von DEF (Diesel Exhaust Fluid, auch unter dem Markennamen *AdBlue* bekannt, oder allgemeiner *Reduktionsmittel*). Bei dem betreffenden Fahrzeug regelt die Motorsteuerung vom Typ Bosch EDC17CP57 in Echtzeit, wie viel DEF dem System (gegebenenfalls) zugeführt wird.

Im SCR-Katalysator wird das DEF in Ammoniak umgewandelt und reagiert mit dem Stickoxid (und Sauerstoff) zu Stickstoff und Wasserdampf.

Das Maß für die Wirksamkeit ist die „SCR-Reduktionsrate“ oder „Umwandlungsrate“, d. h. der Anteil an Stickoxiden, die aus dem Abgas entfernt werden.

Der Wirkungsgrad des SCR-Systems ist durch folgende physikalische Bedingungen nach oben begrenzt:

- Wenn die Temperatur im SCR-Katalysator zu niedrig ist, wird das eingespritzte DEF nicht in Ammoniak umgewandelt.
- Ist die SCR-Temperatur dagegen zu hoch, oxidiert Ammoniak direkt.
- Wenn der Abgasmassenstrom zu groß (d. h. die Abgasgeschwindigkeit zu hoch) ist, hat das Abgas nicht genügend Zeit, mit dem SCR-Katalysator zu reagieren.
- Ist wiederum der Stickoxidmassenstrom zu hoch, kann das SCR-System nicht die gesamten Stickoxide abbauen.

Weitere Einzelheiten finden sich in der spezifischen Literatur zu SCR-Katalysatoren. Diese Auflistung ist nicht abschließend, zeigt aber, dass ein SCR-Katalysatorsystem legitimen physikalischen Grenzen unterworfen ist.

Der SCR-Katalysator des geprüften Fahrzeugs ist so ausgelegt, dass er in einer von zwei Betriebsarten arbeitet:

6.1 Ammoniaklastmodus

Ein SCR-System ist am effizientesten, wenn genügend Ammoniak im SCR-Katalysator vorhanden ist. Ist die Temperatur des SCR-Katalysators zu niedrig, um die Thermolyse von AdBlue zu Ammoniak zu ermöglichen (ca. 150 °C), führt auch mehr AdBlue nicht zu einer Erhöhung der Ammoniakkonzentration.

Der SCR-Katalysator hat jedoch die Fähigkeit, überschüssiges Ammoniak bis zu einer bestimmten Menge zu speichern. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, indem der Katalysator mit Ammoniak gefüllt wird. Dazu wird mehr AdBlue zudosiert, als stöchiometrisch zur Reduktion der aktuellen Stickoxidlast erforderlich wäre. In diesem Fall bleibt Ammoniak übrig, das dann im SCR-Katalysator verbleibt.

Da der SCR-Katalysator nur eine bestimmte Menge Ammoniak speichern kann, würde bei voller Beladung des SCR-Katalysators überschüssiges Ammoniak den Katalysator verlassen und Ammoniak schlupf erzeugen, was zu vermeiden ist. Um den SCR-Katalysator nicht zu überfüllen, ihn aber dennoch ausreichend gefüllt zu halten, muss die Software der Motorsteuerung den Zustand des SCR-Katalysators (Ammoniakmenge, Reduktionsrate usw.) kennen. Da es keine Sensoren gibt, die diesen Zustand direkt messen können, wird stattdessen eine Modellierung vorgenommen. Die Motorsteuerung wurde sorgfältig darauf abgestimmt, das Verhalten des SCR-Katalysators auf Grundlage mehrerer Eingangsvariablen zu berechnen. Im Regelbetrieb wird ein NO_x-Sensor am Ausgang des SCR-Katalysators zur Überprüfung und Feinabstimmung dieses Modus verwendet, wodurch ein sehr genaues Modell für die richtige Dosierung von AdBlue entsteht.

Im Ammoniaklastmodus kann der SCR-Katalysator die meiste Zeit gefüllt gehalten werden, was zu einer sehr effizienten NO_x-Reduktion von häufig über 95 % führt (d. h. mehr als 95 % der Stickoxide werden entfernt), wie es den Abgasnormen entspricht.

Wie jedes andere Modell stellt auch dieses nur eine Annäherung an das tatsächliche physikalische Verhalten dar. Innerhalb der bekannten Grenzen funktioniert dieser Modus nachweislich sehr genau. In extremeren Fällen, z. B. bei hohen Betriebstemperaturen, hohem Abgasmassenstrom und hoher NO_x-Konzentration, reicht die Genauigkeit dieses Modells jedoch nicht aus. Würde man sich in diesem Fall auf den Ammoniaklastmodus verlassen, bestünde die Gefahr einer Über- oder Unterdosierung von AdBlue, was entweder zu Ammoniak schlupf oder einer unzureichenden NO_x-Reduktion führen würde.

Die On-Board-Diagnose eines Fahrzeugs muss diese Bedingungen erkennen und die Motorkontrollleuchte aktivieren. Je nach Schwere des Problems bleibt das Fahrzeug dann möglicherweise sogar liegen. Wenn zum Beispiel statt AdBlue Wasser in den AdBlue-Tank gefüllt wird, muss die On-Board-Diagnose dies erkennen und verhindern, dass der Motor gestartet wird.

Im Zusammenhang mit potenziellen illegalen Abschaltvorrichtungen würde nach dem Modell der Ammoniaklast eine programmierte absichtliche Abweichung von der „Idealdosierung“ (z. B. durch eine illegale Abschaltvorrichtung, die den AdBlue-Verbrauch zu begrenzen versucht) zu einer solchen festgestellten Über- oder Unterdosierung führen. Dieser Überwachungsprozess könnte zwar theoretisch ebenfalls manipuliert werden, dies hätte jedoch erhebliche Auswirkungen auf den Gesamtbetrieb. Beim vorliegenden Fahrzeug wurde kein Einsatz von illegalen Abschaltvorrichtungen im Ammoniaklastmodus beobachtet.

6.2 Alternativmodus

Wie beschrieben, kann das Überschreiten bestimmter physikalischer Grenzen die Genauigkeit des Ammoniaklastmodus so weit beeinträchtigen, dass eine Über- oder Unterdosierung droht. Um dieses Problem zu beheben, hat Bosch (wie viele andere Steuergerätehersteller auch) einen erheblich vereinfachten alternativen Steuerungsmodus entwickelt. Diese alternative Steuerung wird in diesem Gutachten als „Alternativmodus“ bezeichnet, ist aber auch unter den Begriffen „Vorregelung“, „Online-Dosierung“, „Feed-Forward“ usw. bekannt.

In diesem Modus wird nicht versucht, den SCR-Katalysator auf hohen Ammoniakwerten zu halten. Stattdessen wird AdBlue nur in der Menge dosiert, die zur Reduktion der aktuellen Stickoxidlast erforderlich ist. Die Berechnung der AdBlue-Dosis erfolgt stöchiometrisch auf Basis der geschätzten Stickoxidlast, reduziert auf den „erwarteten Wirkungsgrad“.

Der „erwartete Wirkungsgrad“ ist ein Faktor (zwischen 0 und 1), der angibt, welcher Anteil der Stickoxide entfernt werden kann. Unter idealen Bedingungen wird ein sehr hoher Wert ($> 0,95$) erreicht, aber je nach Fahrbetrieb errechnet das Steuergerät möglicherweise auch einen viel niedrigeren „erwarteten Wirkungsgrad“. Eine zentrale Beobachtung bei dem untersuchten Fahrzeug ist, dass dieser „erwartete Wirkungsgrad“ – im Folgenden treffender „Zielwirkungsgrad“ genannt – in vielen Fahrsituationen auf einem relativ niedrigen Wert gehalten wird.

Im Alternativmodus versucht das Steuergerät nicht, die Stickoxide stärker zu reduzieren als durch den Zielwirkungsgrad vorgegeben, da die zudosierte AdBlue-Menge entsprechend reduziert wird.

Intern hängt der „Zielwirkungsgrad“ von vielerlei Faktoren ab. Die Berechnung beginnt mit dem Faktor „1“ (was bedeutet, dass theoretisch alle Stickoxide reduziert werden können), danach kommen aber eine Reihe von Korrekturfaktoren (jeweils zwischen 0 und 1) zur Anwendung, die miteinander multipliziert werden. Diese Korrekturfaktoren beruhen auf der Bewertung einer Reihe von Bedingungen, die die mögliche Reduktionsrate verringern könnten.

Bei diesem Fahrzeug fällt auf, dass zusätzliche Faktoren herangezogen werden, die nichts mit physikalischen Grenzen zu tun haben – d.h. der „Zielwirkungsgrad“ wird absichtlich auf einen niedrigeren Wert herabgesetzt, der von Größen abhängt, die sich nicht direkt auf die NO_x-Reduktion im SCR-Katalysator auswirken sollten – Faktoren also, die nicht auf physikalischen Grenzen, sondern eher auf bestimmten Vorgaben beruhen. Diese Reduziervorrichtungen, die als illegale Abschalteneinrichtungen bezeichnet werden können, sind im Folgenden beschrieben.

7 Illegale Abschalteneinrichtungen

In dem untersuchten Fahrzeug kommen mehrere illegale Abschalteneinrichtungen zum Einsatz. Beim SCR-Katalysator haben diese illegalen Abschalteneinrichtungen Folgendes gemeinsam:

1. Sie sprechen auf physikalische Eigenschaften an, die im Allgemeinen unter extremen Betriebsbedingungen überwacht werden müssen, wie Temperatur, Massenstrom usw.
2. Allerdings lösen sie auch routinemäßig bei Bedingungen aus, die als „normaler Fahrbetrieb“ gelten können.
3. Sie sind so konzipiert, dass sie erst eine Weile nach dem „Auslösen“ wirksam werden, z. B. durch eine hohe Hysterese oder einen „Schutz gegen Neustart“ (siehe unten).
4. Sie setzen den intern errechneten Wirkungsgrad des SCR-Systems erheblich herab, was zu einer drastischen Reduzierung der AdBlue-Dosierung führt, die wiederum einen wesentlich höheren NO_x-Ausstoß nach sich zieht.

Insgesamt wurden im Zusammenhang mit dem SCR-System sechs illegale Abschalteneinrichtungen entdeckt. Drei davon hängen von einem „Alterungsfaktor“ ab, der die Schwellenwerte, bei denen diese illegalen Abschalteneinrichtungen anspringen, deutlich absenkt. In zwei Fällen geschieht dies bereits ab einer Alterung von 1 % (d. h. sehr früh bezogen auf die Lebensdauer des Fahrzeugs), in einem weiteren bei 20 %.

Darüber hinaus wurden zwei illegale Abschalteneinrichtungen im Zusammenhang mit dem AGR-System des Fahrzeugs entdeckt, die ohne physikalischen Grund auslösen und dadurch den Betrieb der Abgasrückführung erheblich beeinträchtigen.

In der aktualisierten Software kommen optimierte Schwellenwerte zur Anwendung, die zu einer deutlich besseren NO_x-Reduktionsleistung führen und zeigen, dass die Hardware des Fahrzeugs tatsächlich viel leistungsfähiger ist. Durch das Software-Update werden die illegalen Abschalteneinrichtungen entweder neutralisiert oder vollständig beseitigt.

7.1 Verhalten im Testzyklus

Mit dem untersuchten Fahrzeug wurden keine spezifischen Tests auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. Anhand der Beobachtung realer Fahrmuster, die den im NEFZ getesteten nachempfunden sind, können aber bestimmte Annahmen über das Verhalten des Fahrzeugs während eines Testzyklus getroffen werden.

Bei einigen illegalen Abschalteneinrichtungen, wie z. B. auf Basis der Ansauglufttemperatur, ist klar, dass sie während eines Testzyklus nicht auslösen, weil die Prüfvorschriften eindeutige Grenzwerte vorgeben oder weil der auslösende Alterungsfaktor zum Zeitpunkt der Prüfung vermutlich noch nicht erreicht ist.

Bei anderen illegalen Abschalteneinrichtungen, die vom dynamischen Verhalten des Fahrzeugs abhängen, wird davon ausgegangen, dass sie aufgrund der Annahmen für den Regelbetrieb während des Testzyklus nicht ausgelöst werden.

7.2 Physikalische Grenzen vs. Parametrisierung der illegalen Abschalteneinrichtungen

Es fällt auf, dass einige illegale Abschalteneinrichtungen so parametrisiert sind, dass sie ab einem bestimmten Schwellenwert einen „Wechsel“ in einen weniger effizienten Emissionsmodus erzwingen.

8 Illegale Abschalteneinrichtung Nr. 1: Abgasmassenstromgrenze

8.1 Hintergrund

Der Abgasmassenstrom entspricht der Menge an Abgasen (verbrannter und unverbrannter Kraftstoff sowie Luft) über ein bestimmtes Zeitintervall. Die in diesem Gutachten verwendete Einheit ist kg/h. Der Abgasmassenstrom hängt mit der Durchgangsgeschwindigkeit der Abgase durch den Katalysator zusammen und somit unmittelbar mit der Zeit, die im SCR-Katalysator zur Verfügung steht, um die NO_x-Reduktionsreaktion zu bewirken. Die Motorsteuerung muss den Abgasmassenstrom überwachen, um einen Effizienzverlust des SCR-Katalysators wegen zu kurzer Reaktionszeiten zu erkennen und eine Überdosierung von Ammoniak zu verhindern. Der Abgasmassenstrom ist also eine legitime physikalische Größe, die modelliert (oder gemessen) und bei der Berechnung des SCR-Wirkungsgrads berücksichtigt werden muss.

Der SCR-Katalysator sollte so bemessen sein (d. h. eine ausreichend große Reaktionskammer haben), dass der SCR-Wirkungsgrad im Regelbetrieb auf einem zufriedenstellenden Niveau gehalten werden kann. Wird der SCR-Katalysator zu klein ausgelegt, ist eine Verringerung des SCR-Wirkungsgrads bei höheren Motordrehzahlen zu erwarten.

8.2 Zusammenfassung

Die illegale Abschalteneinrichtung erzwingt den Alternativmodus, sobald der Abgasmassenstrom einen vorher festgelegten (von der Alterung des SCR-Systems abhängigen) Wert überschreitet. Im Praxisbetrieb wurde beobachtet, dass dieser Grenzwert in der Regel bei 100 km/h überschritten wird. Bei aktiviertem Alternativmodus begrenzt ein Mechanismus den Zielwirkungsgrad für die meisten Betriebsbedingungen auf unter 60 %.

8.3 Einzelheiten

Wenn der Abgasmassenstrom die Kapazität des SCR-Katalysators wie oben erläutert übersteigt, können die Abgase den SCR-Katalysator ohne vollständige Stickoxid-Reduktion verlassen. Ohne Gegenmaßnahmen würde so der SCR-Wirkungsgrad zu hoch angesetzt, was eine Überdosierung von AdBlue/Ammoniak zur Folge hätte und zu viel Ammoniak im Katalysator zu Ammoniakslupf führen würde. Es scheint eine sinnvolle Strategie zu sein, den Massenstrom zu überwachen und den geschätzten SCR-Wirkungsgrad nach unten zu korrigieren, sobald ein zu großer Massenstrom festgestellt wird. Außerdem ist davon auszugehen, dass der SCR-Wirkungsgrad für den Ammoniaklastmodus in diesem Fall nicht mehr präzise genug geschätzt werden kann, was den Wechsel in den Alternativmodus erforderlich macht. Ein solcher Mechanismus kann selbst bei modernen Abgasreinigungssystemen notwendig sein und wird im Allgemeinen nicht als illegale Abschalteneinrichtung betrachtet, da er sich unmittelbar aus dem Überschreiten einer physikalischen Grenze ergibt.

Im Falle des getesteten Fahrzeugs wurde diese Grenze jedoch bei 170 kg/h ermittelt, was bedeutet, dass der Alternativmodus erzwungen wird, sobald dieser gefilterte (d. h. geglättete) Abgasmassenstrom, gemessen in Kilogramm Abgase pro Stunde, überschritten wird. Außerdem wird eine hohe Hysterese (von -80 kg/h) angewandt, so dass ein Wechsel zurück in den Ammoniaklastmodus einen Massenstrom von unter 90 kg/h erfordert, was selbst bei niedrigeren Geschwindigkeiten um 60 km/h nur schwer zu erreichen ist.

Die genaue Grenze hängt von einem „SCR-Alterungsfaktor“ ab. Dieser Alterungsfaktor wird in Prozent angegeben – wobei 100 % einem neuen Katalysator entsprechen – und sinkt im Laufe der Zeit kontinuierlich ab (bis auf 0 %). Zu diesem Zweck überwacht die Motorsteuerung die Temperaturen, denen der SCR-Katalysator ausgesetzt war, und modelliert dessen Alterung. Das getestete Fahrzeug weist einen internen Alterungsfaktor von ca. 69 % auf.

Es fällt auf, dass der Wechsel von 200 kg/h auf 170 kg/h bereits bei einem SCR-Alterungsfaktor von 99 % erfolgt, d. h. dass der Grenzwert von 200 kg/h nur für fabrikneue SCR-Katalysatoren zutrifft.

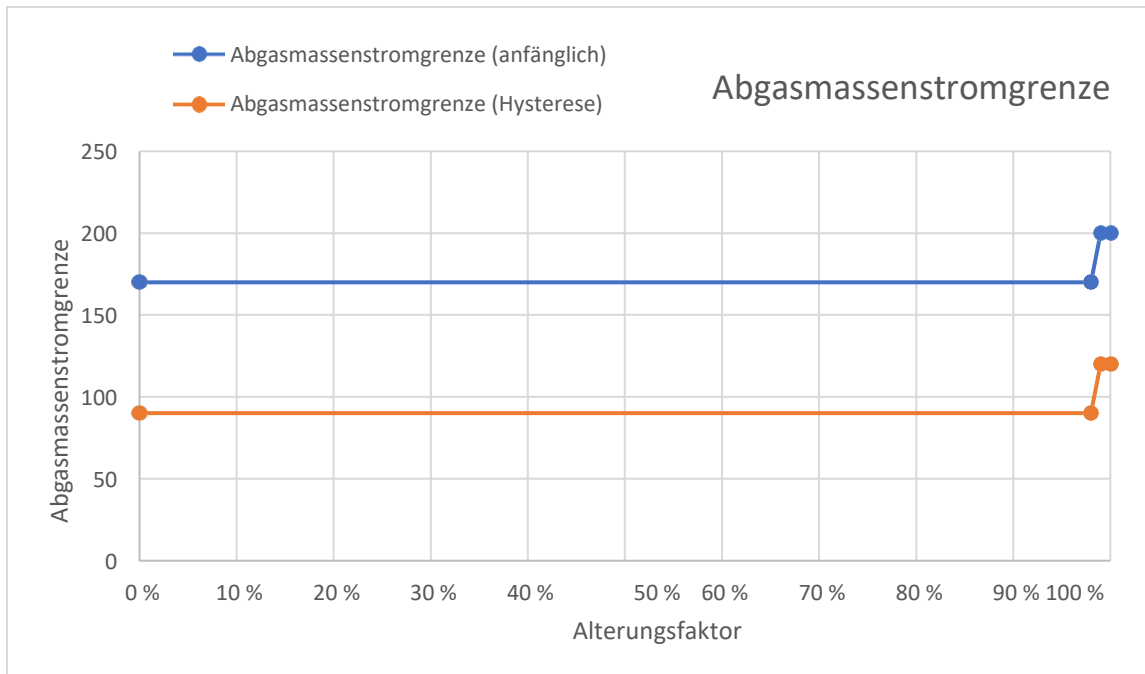
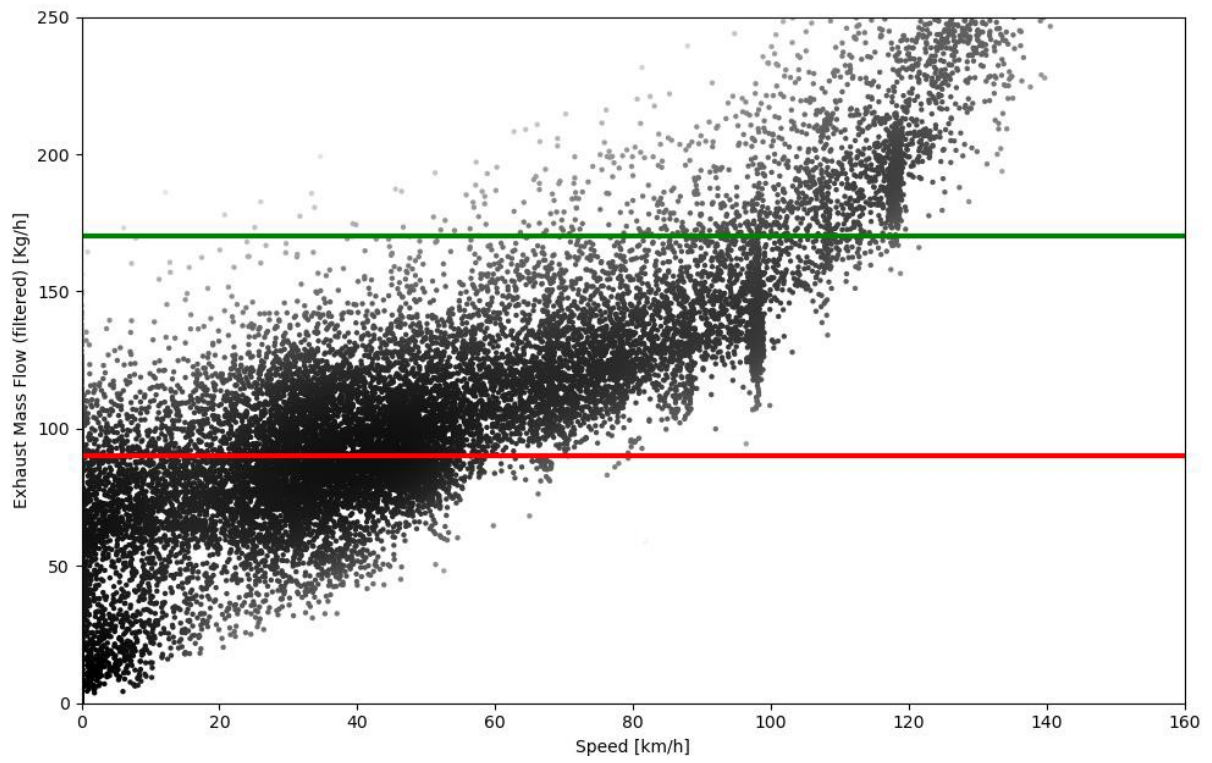


Abbildung 1 – Abgasmassenstromgrenze in Abhängigkeit vom SCR-Alterungsfaktor, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware. Bei einem Alterungsfaktor von 99 % wird der Schwellenwert von 200 kg/h auf 170 kg/h abgesenkt. Die untere Linie zeigt die Hysterese­grenze, d. h. wenn die ursprüngliche Grenze einmal überschritten ist, muss der Massenstrom erst wieder unter 90 kg/h (bzw. 120 kg/h bei neuen SCR-Katalysatoren) fallen. (Der intern überwachte Alterungsfaktor hängt von den Betriebsbedingungen ab, denen der SCR-Katalysator ausgesetzt war, und nicht ausschließlich von der Zeit.)

Da der Massenstrom gefiltert wird, führt ein kurzer Leerlauf des Motors nicht unmittelbar zum Zurückschalten in den ursprünglichen Modus.

Der Abgasmassenstrom hängt in hohem Maße von den Fahrbedingungen ab. Um die Auswirkungen im Regelbetrieb abschätzen zu können, zeigt das nachstehende Diagramm typische (d. h. in normalen Fahr­szenarien, in der Regel auf ebenen Straßen, beobachtete) Abgasmassenströme in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Da der Abgasmassenstrom aber je nach Beschleunigung, Fahrbahnneigung und Fahrzeuggewicht auch stark vom erforderlichen Drehmoment abhängt, handelt es sich hier nur um eine Schätzung. Zu erkennen ist jedoch, dass der obere Grenzwert ab rund 100 km/h mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten und damit der Alternativmodus erzwungen werden dürfte. In diesem Fall wird der untere Grenzwert aktiv, was eine Rückkehr in den Regelbetrieb erschwert.



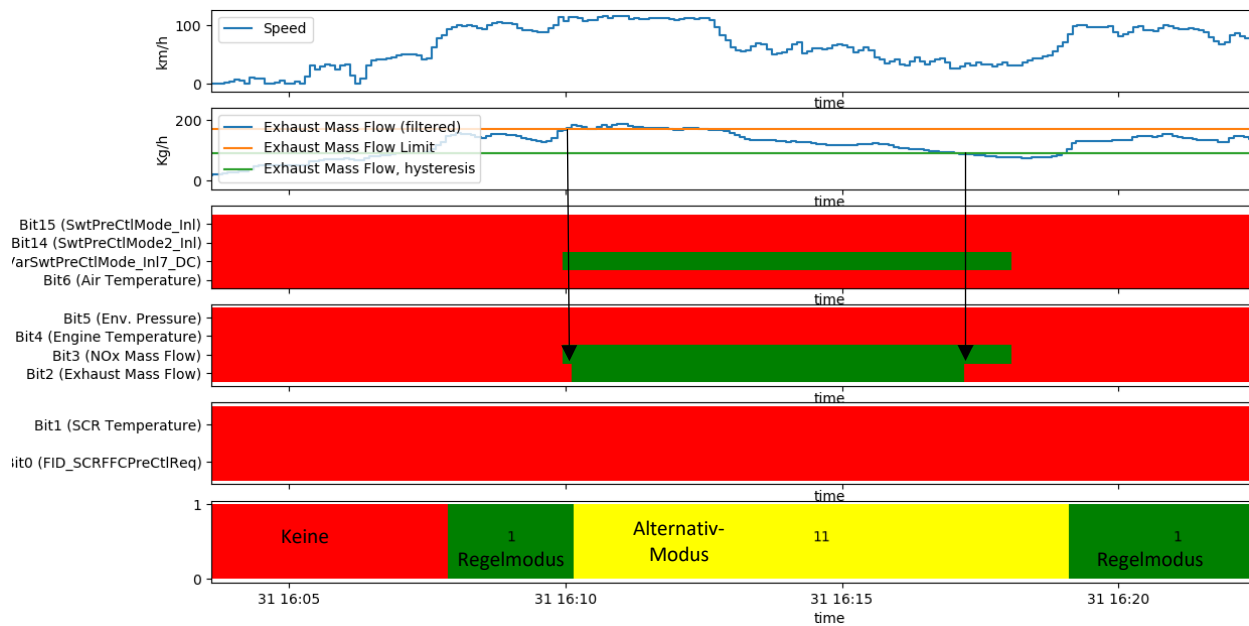


Abbildung 3 – Messdaten mit Originalsoftware; zwei Ereignisse sind sichtbar: Um etwa 16:10 Uhr (linker schwarzer Pfeil) überschreitet der Abgasmassenstrom den Grenzwert von 170 kg/h, wodurch die illegale Abschalteneinrichtung aktiviert und ein Wechsel in den Alternativmodus erzwungen wird. Um etwa 16:17 Uhr (rechter schwarzer Pfeil) wird die Abschalteneinrichtung wieder deaktiviert, so dass in den Regelmodus zurückgewechselt werden kann. (Andere illegale Abschalteneinrichtungen, z. B. anhand der Stickoxidmassenstromgrenze, lösen zur gleichen Zeit aus.) Die Bitnamen beziehen sich auf die Bitpositionen im „prectl2“-Modus, anhand dessen die Motorsteuerungssoftware bestimmt, wann in den Alternativmodus gewechselt wird.

8.4 Verhalten im Alternativmodus

Nach dem Wechsel in den Alternativmodus wird der geschätzte Wirkungsgrad um einen Faktor aus einer Tabelle reduziert, die den Abgasmassenstrom und die SCR-Temperatur darstellt. Die Korrektur des Wirkungsgrads erfolgt durch Multiplikation – d.h. wenn der geschätzte Wirkungsgrad zuvor 80 % betrug und die Tabelle einen Faktor von 60 % zeigt, errechnet sich der resultierende Wirkungsgrad als 60 % von 80 % = 48 % usw. In der nachstehenden Tabelle ist zu erkennen, dass der geschätzte Wirkungsgrad unter den meisten Betriebsbedingungen höchstens 60 % erreicht. Das bedeutet, dass selbst unter perfekten Bedingungen kein Versuch unternommen wird, mehr als 60 % der Stickoxide zu entfernen.

		Massenstrom [kg/h]											
		50	75	100	150	180	200	225	250	300	500	600	700
SCR-Temperatur [°C]	130	9 %	9 %	9 %	8 %	8 %	8 %	8 %	7 %	7 %	6 %	6 %	5 %
	160	18 %	18 %	17 %	17 %	17 %	16 %	15 %	15 %	14 %	14 %	11 %	8 %
	180	25 %	24 %	23 %	23 %	22 %	21 %	20 %	19 %	18 %	17 %	15 %	11 %
	200	34 %	33 %	33 %	32 %	32 %	31 %	29 %	29 %	27 %	24 %	19 %	14 %
	225	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	58 %	45 %	38 %	33 %	25 %
	250	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	58 %	55 %	51 %	41 %	32 %
	280	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	55 %	45 %	36 %
	300	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	55 %	45 %	65 %
	380	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	55 %	45 %	65 %
	400	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	55 %	45 %	40 %
	480	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	55 %	45 %	40 %
	500	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	60 %	45 %	40 %

Abbildung 4 – Korrekturtabelle für den Wirkungsgrad nach SCR-Temperatur und Massenstrom, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware. Lesebeispiel: Bei einem Massenstrom von 150 kg/h und einer SCR-Katalysatortemperatur von 250 °C würde sich der geschätzte Wirkungsgrad auf 60 % des ursprünglichen Wertes verringern (d. h. um den Faktor 0,6).

Beschneidet der Alternativmodus die Effizienz des SCR-Systems bereits dadurch, dass nicht versucht wird, überschüssiges Ammoniak für den Bedarfsfall im Katalysator zu speichern, so reduziert sich der Zielwirkungsgrad durch diese Tabelle weiter bis auf 60 % (außer für Fahrbedingungen mit sehr hoher Last bei hohen Temperaturen, für die 75 % hinterlegt sind). **Das bedeutet, dass die Motorsteuerung nach einem Wechsel in den Alternativmodus – für den diese Tabelle ausschließlich gilt – niemals versucht, genügend AdBlue zuzuführen, um die Stickoxidlast um mehr als 60 % zu reduzieren** (abgesehen von dem diskutierten Sonderfall eines sehr hohen Massenstroms).

Auch wenn die SCR-Leistung nach dieser Effizienzkorrekturtabelle im Alternativmodus am stärksten beschnitten wird, gibt es noch andere Korrekturen, die den Wirkungsgrad weiter beeinträchtigen können.

8.5 Änderungen durch das Software-Update

Der Mechanismus wurde in folgenden Punkten verändert:

1. Bei Überschreiten einer bestimmten Massenstromgrenze wird nicht mehr in den Alternativmodus geschaltet.
2. Die Korrekturtabelle für den Wirkungsgrad – die auch zum Tragen kommt, wenn der Alternativmodus nach einem anderen Kriterium aktiviert wird – wurde folgendermaßen aktualisiert:

		Massenstrom [kg/h]											
		25	50	100	150	175	200	225	300	400	500	600	800
SCR-Temperatur [°C]	100	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
	150	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	10 %	10 %	10 %	5 %
	175	45 %	45 %	45 %	45 %	45 %	45 %	45 %	25 %	15 %	10 %	10 %	5 %
	200	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	35 %	20 %	12 %	10 %	5 %
	225	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	60 %	50 %	40 %	37 %	33 %	25 %	10 %
	250	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %	70 %	58 %	55 %	50 %	40 %	20 %
	275	85 %	85 %	85 %	85 %	85 %	85 %	85 %	75 %	63 %	55 %	50 %	25 %
	300	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %	85 %	65 %	60 %	60 %	30 %
	350	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	75 %	60 %	60 %	30 %
	450	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	95 %	90 %	75 %	60 %	60 %	30 %
	550	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	50 %	40 %	40 %	20 %
	650	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	40 %	20 %	10 %	10 %	10 %

Abbildung 5 – Korrekturtabelle für den Wirkungsgrad nach SCR-Temperatur und Massenstrom, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der aktualisierten Software.

8.6 Grenzen der Analyse

Der Abgasmassenstrom ist die Summe aus Kraftstoff und Luft, die den Motor verlässt. Die Menge des eingespritzten Kraftstoffs hängt vom Drehmomentsollwert und sonstigen Anforderungen an die Abgastemperatur und damit von der genauen Fahrsituation ab. Auch wenn ein enger Zusammenhang mit der Fahrzeuggeschwindigkeit besteht, spielen auch viele weitere Faktoren, wie z. B. die Beschleunigung des Fahrzeugs, die Fahrbahneigenschaften und auch die Umgebungsbedingungen mit hinein. Bei den im Rahmen dieses Gutachtens beobachteten Abgasmassenströmen handelt es sich um Stichproben, die nicht unbedingt die Situation bei anderen Fahrzeugen, anderen Fahrsituationen oder anderen Umgebungsbedingungen widerspiegeln.

Die Auswirkungen der Alterung des SCR-Katalysators konnten bei dem untersuchten Fahrzeug nicht gemessen werden, da der Alterungsfaktor des SCR-Katalysators beim Kauf des Fahrzeugs bereits unter dem kodierten Umschaltwert lag. Daher wurde in der ursprünglichen Software nur der niedrigere Schwellenwert verwendet. Der Schwellenwert für den Alterungsfaktor liegt bei 99 %, was darauf hindeutet, dass der Wechsel zur niedrigeren Massenstromgrenze in der Lebensdauer des Katalysators bereits sehr früh erfolgt; im Rahmen des Gutachtens konnte dies jedoch nicht nach Zeit oder Laufleistung quantifiziert werden.

Der Alterungsfaktor ist eine interne Darstellung und spiegelt nicht unbedingt das tatsächliche Alter des Katalysators (nach Zeit oder Laufleistung) wider, sondern ist vielmehr ein Maß für die Abnutzung des Katalysators auf Basis der äußeren Bedingungen, denen der SCR während seiner Lebensdauer ausgesetzt war.

9 Illegale Abschalteinrichtung Nr. 2: Stickoxidmassenstrom

9.1 Hintergrund

Der SCR-Katalysator hat eine bestimmte Kapazität zur Reduktion von Stickoxiden. Ein zu hoher Stickoxidmassenstrom führt dazu, dass der Katalysator irgendwann nicht mehr in der Lage ist, das NO_x vollständig zu reduzieren. Ähnlich wie bei der Diskussion über den Abgasmassenstrom muss dieser Effekt berücksichtigt werden, um das Risiko einer Überdosierung von AdBlue und damit von Ammoniakslupf zu vermeiden.

Die Menge an Stickoxiden, die „vorgelagert“, d. h. vor dem SCR-Katalysator, erzeugt wird, hängt – sofern keine anderen nachgelagerten Verfahren zur NO_x-Reduktion zur Anwendung kommen – direkt von den Betriebsbedingungen des Motors ab. Abgasrückführung, Einspritzzeitpunkt, Raildruck und andere Faktoren werden eingesetzt, um die NO_x-Emissionen angesichts anderer Aspekte wie Partikelfilterung, Kraftstoffeffizienz und subjektivem Fahrverhalten auf niedrigem Niveau zu halten.

9.2 Einzelheiten

Das nachstehende Diagramm zeigt, dass der Stickoxidausstoß des Motors stark vom Fahrverhalten und vom Einsatz der AGR (und anderer NO_x-Reduktionsverfahren) im Motor abhängt. Dennoch besteht ein Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und NO_x-Emissionen, auch wenn andere Faktoren (wie z. B. das Beschleunigungsprofil) letztere ebenfalls stark beeinflussen. Die nächste Abbildung zeigt die beobachteten NO_x-Emissionen, gemessen in mg/s, in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit.

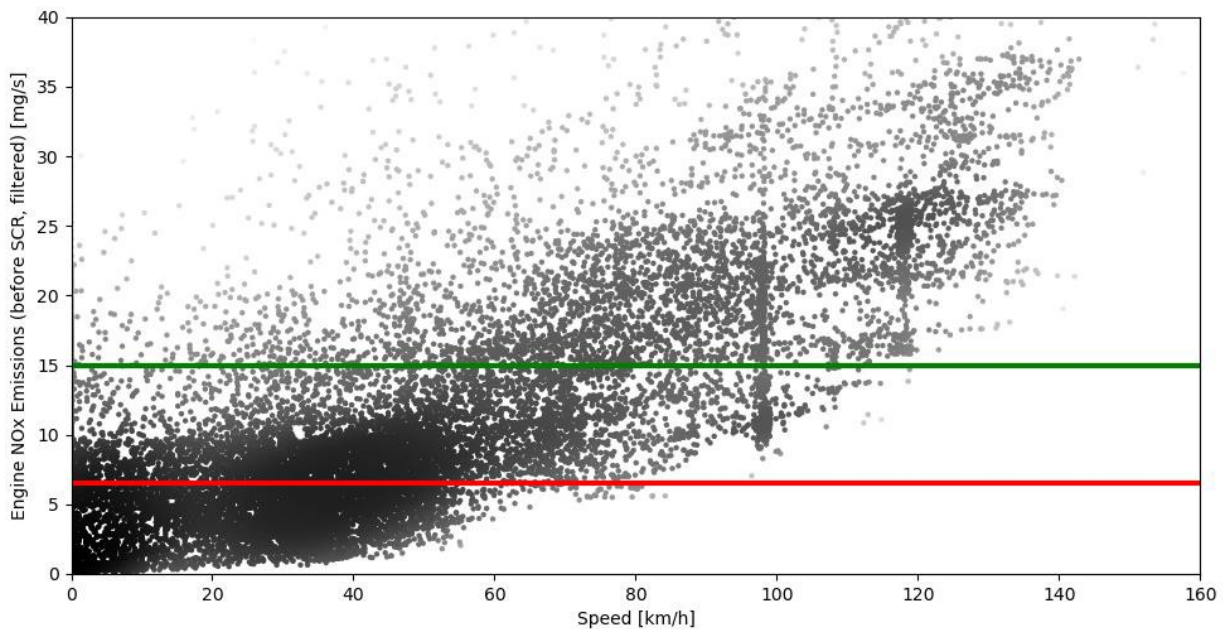


Abbildung 6 – Messdaten mit Originalsoftware: beobachtete NO_x-Emissionen im Regelbetrieb; der anfängliche Schwellenwert ist grün markiert, bei Überschreitung wird der untere Schwellenwert (rot) aktiv (Hysterese).

In dem getesteten Fahrzeug wurde eine illegale Abschalteinrichtung vorgefunden, die den Alternativmodus erzwingt, sobald der Stickoxidmassenstrom einen berechneten Schwellenwert überschreitet. Dieser beobachtete Schwellenwert von 15 mg/s ist in der Abbildung grün markiert. Eine Rückkehr zum Ammoniaklastmodus ist erst möglich, wenn die untere Grenze von 6,5 mg/s unterschritten wird (Hysterese).

Dieser Schwellenwert ist von dem dargestellten „SCR-Alterungsfaktor“ abhängig. Auffällig ist auch hier, dass der Schwellenwert zunächst bei 25 mg/s liegt, aber bereits bei einem Alterungsfaktor von 99 %, d. h. nach sehr geringer rechnerischer „Alterung“, auf 15 mg/s absinkt.

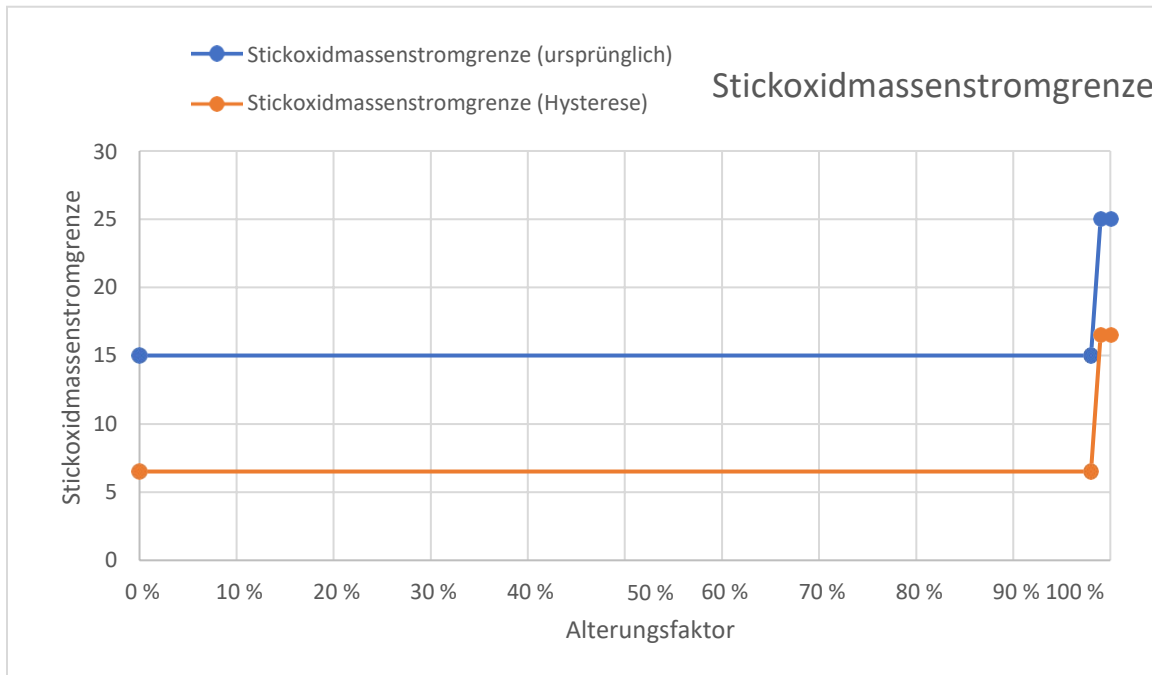


Abbildung 7 – Stickoxidmassenstromgrenze in Abhängigkeit von der Alterung des SCR-Katalysators, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware. Die obere (blaue) Linie zeigt die anfängliche Schwelle für den Wechsel zum Alternativmodus, die untere Grenze beschreibt die Schwelle, die einen Wechsel zurück in den Regelmodus erlaubt (Hysterese).

Das bedeutet, dass das SCR-System bei übermäßiger NO_x-Produktion durch den Motor diese Emissionen nur zu einem *noch* geringeren Prozentsatz reduzieren kann, was die Emissionen insgesamt erhöht.

Es fällt auf, wie oft die Hysterese zum Tragen kommt – wenn der Grenzwert von 15 mg/s einmal überschritten ist, muss zuerst der sehr niedrige Grenzwert von 6,5 mg/s unterschritten werden, um wieder in den Regelmodus zurückzukehren, was in typischen Fahrsituationen oft schwierig ist. Wenngleich die Fahrzeuggeschwindigkeit den Stickoxidmassenstrom beeinflusst, wirken sich auch andere Bedingungen (z. B. das Beschleunigungsprofil) erheblich auf die NO_x-Emissionen aus, so dass dieser Grenzwert nicht allein in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt werden kann. Die Verteilung der beobachteten Stickoxidmassenströme in obiger Abbildung kann zur Bewertung solcher Wechselvorgänge herangezogen werden.

Sobald der Alternativmodus erzwungen wird, ist der SCR-Wirkungsgrad schon allein aufgrund der diskutierten Korrekturtabelle „Abgasmassenstrom/SCR-Temperatur“ begrenzt, die im Alternativmodell unabhängig von den Umschaltkriterien aktiv ist. Im Alternativmodus wird auf Grundlage des gefilterten Stickoxidmassenstroms ein zusätzlicher Korrekturfaktor errechnet. Diese Kurve ist so konfiguriert, dass der Zielwirkungsgrad ab 40 mg/s NO_x noch dramatischer reduziert wird.

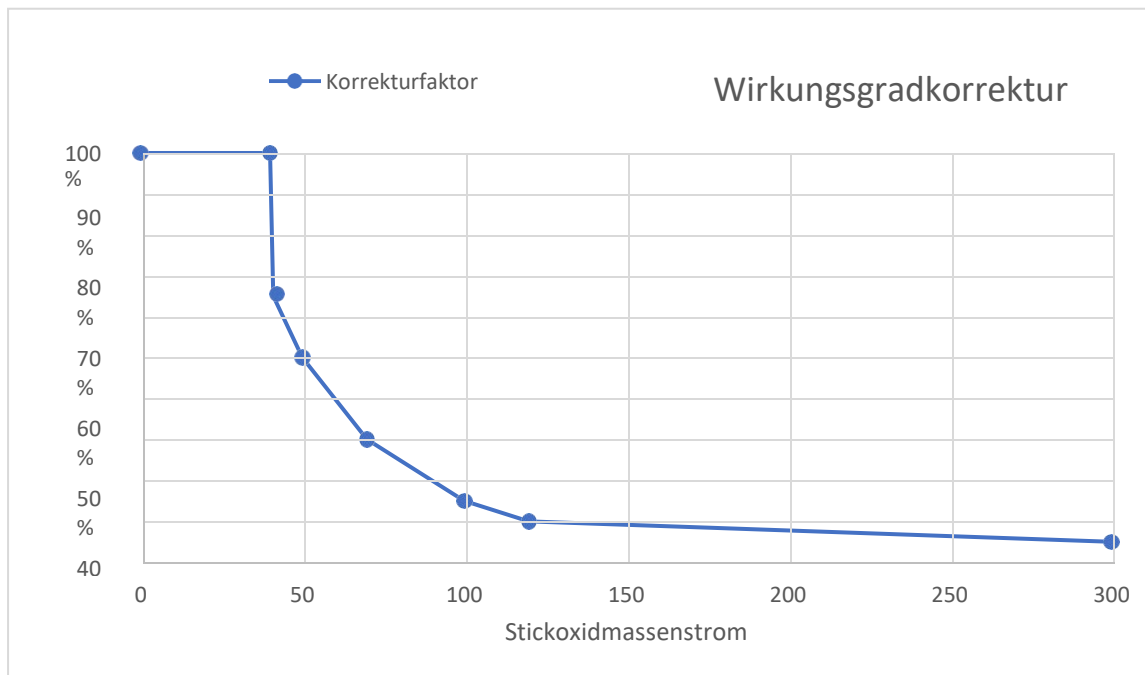


Abbildung 8 – Korrekturfaktor für den SCR-Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Stickoxidmassenstrom, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware.

9.3 Änderungen durch das Software-Update

- Der durch den Stickoxidmassenstrom erzwungene Wechsel in den Alternativmodus wurde vollständig beseitigt. Bei der Berechnung des erwarteten SCR-Wirkungsgrads (und damit der AdBlue-Dosierung) wird der Stickoxidmassenstrom zwar weiterhin berücksichtigt, der Alternativmodus wird aber bei Überschreiten einer bestimmten NO_x-Grenze nicht mehr erzwungen.

9.4 Grenzen der Analyse

Die im Motor erzeugte Stickoxidmenge hängt von der Menge des verbrannten Kraftstoffs sowie von den Motorbedingungen wie Abgasrückführrate (AGR), Raildruck und Einspritzzeitpunkt ab.

Bei den im Rahmen dieses Gutachtens beobachteten Stickoxidmassenströmen handelt es sich um Stichproben, die nicht unbedingt die Situation bei anderen Fahrzeugen, anderen Fahrsituationen oder anderen Umgebungsbedingungen widerspiegeln.

Die Auswirkungen der Alterung des SCR-Katalysators konnten bei dem untersuchten Fahrzeug nicht gemessen werden, da der Alterungsfaktor des SCR-Katalysators bereits beim Kauf des Fahrzeugs unter dem kodierten Umschaltwert lag. Daher wurde in der ursprünglichen Software nur der niedrigere Schwellenwert verwendet.

10 Illegale Abschalteinrichtung Nr. 3: Ansauglufttemperatur

10.1 Hintergrund

Die Umgebungs- oder Ansauglufttemperatur sollte den SCR-Betrieb nicht wesentlich beeinflussen. Dennoch wird sie bei dem untersuchten Fahrzeug als ein Kriterium für den Wechsel in den Alternativmodus verwendet. Ein Temperaturschalter vergleicht die Ansauglufttemperatur mit 12 °C und erzwingt den Wechsel in den Alternativmodus, sobald die Ansauglufttemperatur unter dieser Schwelle liegt. Eine Rückkehr in den Ammoniaklastmodus ist erst möglich, wenn die Temperatur wieder über 15 °C liegt (Hysterese).

Wird aufgrund der Ansauglufttemperatur oder eines anderen Kriteriums in den Alternativmodus umgeschaltet, sinkt der Wirkungsgrad weiter ab.

10.2 Änderungen durch das Software-Update

Der Mechanismus wurde in folgenden Punkten geändert:

- Der Mechanismus für den Wechsel in den Alternativmodus auf Grundlage der Ansauglufttemperatur wurde vollständig beseitigt.

11 Illegale Abschalteinrichtung Nr. 4: Schutz gegen Neustart

11.1 Hintergrund

Der intensive Einsatz der Hysterese bewirkt, dass das SCR-System nach dem Wechsel in den Alternativmodus durch eine der illegalen Abschalteinrichtungen im Regelbetrieb nur schwer wieder in den Ammoniaklastmodus zurückkehren kann.

Bei häufigem Anfahren (wie bei Taxis) wäre die Hysterese nicht wirksam, da diese beim Abstellen des Motors zurückgesetzt wird. In solchen Fällen würde der SCR-Katalysator ständig in den Ammoniaklastmodus zurückschalten. In der analysierten Software wird dies auch in solchen Szenarien mit einem „Schutz gegen Neustart“ wie unten beschrieben verhindert.

11.2 Einzelheiten

Eine zusätzliche illegale Abschalteinrichtung überwacht die SCR-Temperatur in den ersten 20 Sekunden. Übersteigt diese zu irgendeinem Zeitpunkt 50 °C, wird für die nächsten 240 Sekunden der Alternativmodus erzwungen, sofern die Gesamtmenge der NO_x-Emissionen unter 1800 mg bleibt.

In der Praxis bedeutet dies, dass bei Aus- und Wiedereinschalten des Motors 4 Minuten lang der Alternativmodus erzwungen wird.

Die Logik hinter diesem Verhalten ist komplex und kann so konfiguriert werden, dass sie zusätzliche Kriterien berücksichtigt. So wird z. B. die Gesamtmenge der NO_x-Emissionen überwacht und bei Überschreiten eines vorher festgelegten Wertes die Rückkehr in den Ammoniaklastmodus zugelassen, sofern eine Mindestlaufzeit des Motors überschritten wurde, die von dem im SCR-Katalysator gespeicherten Ammoniak abhängen kann. Andere Elemente dieser Logik sind (unter Verwendung der Kalibrierungsdaten) so konfiguriert, dass sie keine Auswirkungen auf das untersuchte Fahrzeug haben.

11.3 Änderungen durch das Software-Update

- Dieser Mechanismus wurde vollständig beseitigt.

12 Illegale Abschaltvorrichtung Nr. 5: SCR-Temperatur

12.1 Hintergrund

Die Abgase strömen durch den SCR-Katalysator und erwärmen ihn dabei. Die Temperatur des SCR-Katalysators hängt also unmittelbar vom Wärmestromvolumen der Abgase ab. Bei höheren Geschwindigkeiten, Abgastemperaturen und Massenströmen sind auch höhere SCR-Temperaturen zu erwarten. Nach dem Anlassen des Motors wird der SCR-Katalysator wärmer als die Umgebungstemperatur. Die Umgebungsluft hat aber auch einen Kühleffekt, so dass bei niedrigeren Umgebungstemperaturen im Allgemeinen etwas niedrigere SCR-Temperaturen zu erwarten sind.

Das nachstehende Diagramm zeigt typische SCR-Temperaturen unter normalen Fahrbedingungen. Nach dem Anlassen des Motors erwärmt sich der SCR-Katalysator nach und nach durch die Abgase bis auf Betriebstemperatur. Die Erwärmung kann durch zusätzliche Kraftstoffeinspritzungen beschleunigt werden, um Abgase mit höherer Temperatur zu erzeugen.

Zur Regeneration des Dieselpartikelfilters sind hohe Temperaturen erforderlich. Diese werden durch die Erwärmung der Abgase mit drehmomentneutralen Kraftstoffeinspritzungen erreicht. Dadurch erhitzt sich auch der (nachgelagerte) SCR-Katalysator, so dass bei der Regeneration des Partikelfilters hohe Temperaturen (in der Regel bis zu 550 °C) erreicht werden. Bei so hohen Temperaturen ist eine NO_x-Reduktion im SCR-Katalysator jedoch nicht möglich, da eingespritztes AdBlue direkt oxidieren und noch mehr Stickoxide erzeugen würde. Der Dieselpartikelfilter wird jedoch relativ selten (alle paar hundert Kilometer und nur für wenige Minuten) regeneriert.

Im normalen Fahrbetrieb sind im SCR-Katalysator Temperaturen zwischen 180 °C und 350 °C zu erwarten.

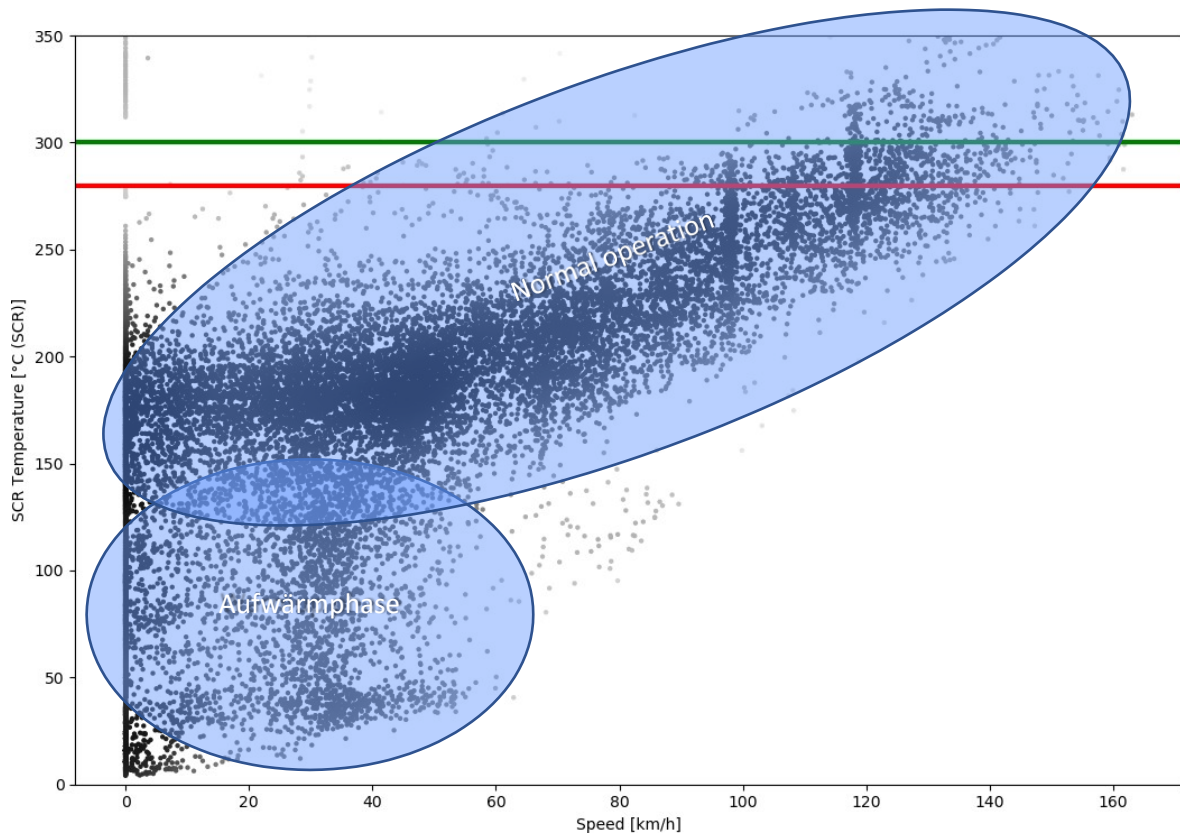


Abbildung 9 – SCR-Temperatur im Normalbetrieb. Hohe SCR-Temperaturen liegen bei der Regeneration des Partikelfilters an, niedrige Temperaturen nach dem Anlassen des Motors (Aufwärmphase). Die grüne Linie zeigt die anfängliche Temperaturschwelle. Wird diese Temperatur überschritten, wird der Alternativmodus erzwungen, bis die rote Linie (Hysterese) erneut unterschritten wird.

12.2 Einzelheiten

Die Motorsteuerung berechnet den Schwellenwert in Abhängigkeit von dem zuvor beschriebenen „Alterungsfaktor des SCR-Katalysators“, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

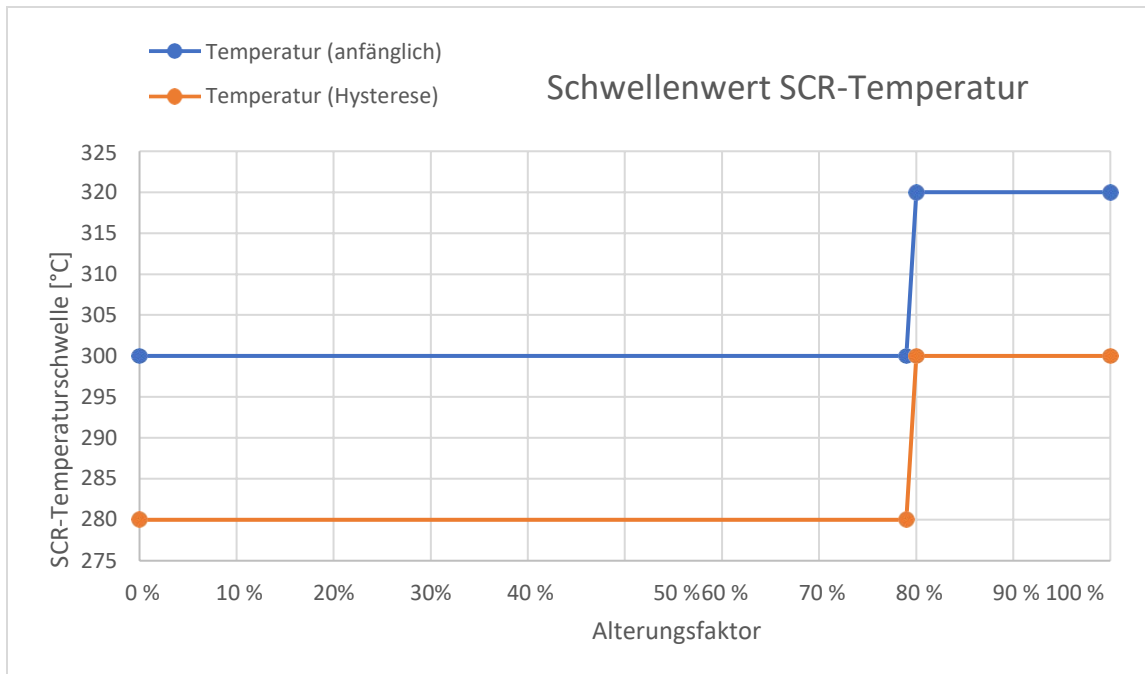


Abbildung 10 – SCR-Temperaturschwelle in Abhängigkeit vom Alterungsfaktor, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Motorsteuerung. Es fällt auf, dass die SCR-Temperaturschwelle sich schnell ändert, wenn der Alterungsfaktor einen bestimmten Wert erreicht (intern auf „80 %“ modelliert).

Das untersuchte Fahrzeug weist einen internen Alterungsfaktor von ca. 69 % auf. Das bedeutet, dass sich der SCR-Katalysator im Normalbetrieb nach einer ausreichenden Aufwärmzeit bei etwa 120 km/h typischerweise auf ca. 300 °C erwärmt, so dass die illegale Abschalteneinrichtung mittels SCR-Temperatur einen Wechsel in den Alternativmodus erzwingt.

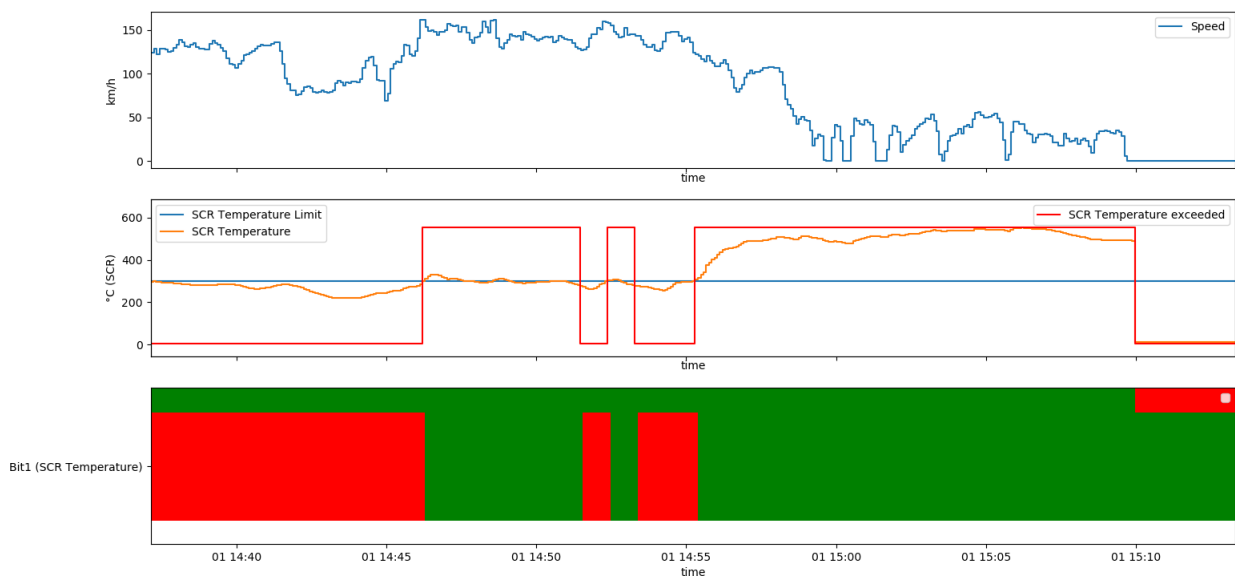


Abbildung 11 – Beobachtete Messdaten während eines Ereignisses, bei dem eine hohe SCR-Temperatur (über 300 °C) einen Wechsel in den Alternativmodus erzwingt. (Zu beachten ist, dass andere Abschalteneinrichtungen gleichzeitig aktiv sind und bereits den Alternativmodus erzwingen). In der zweiten Hälfte (ab ca. 14:47 Uhr) sieht man eine Regeneration des Dieselpartikelfilters, die trotz moderater Fahrzeuggeschwindigkeit zu sehr hohen Abgastemperaturen führt.

12.3 Änderungen an den Kalibrierungsdaten durch das Software-Update

1. Der Schwellenwert wurde von 320 %/300 °C auf 275 °C geändert; die Alterung des SCR-Katalysators hat keine Auswirkung mehr.
2. Die Hysterese wurde von 20 K auf 15 K und damit die untere Schwelle von 280 °C auf 265 °C abgesenkt.

12.4 Zusammenfassung

Die Betrachtung der SCR-Temperatur ist für die Beurteilung der NO_x-Reduktionsleistung entscheidend. Im Allgemeinen ist der Betrieb des SCR-Katalysators bei Temperaturen oberhalb eines Schwellenwerts eingeschränkt, was bei normalen Fahrten bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten häufig der Fall ist. Mit dem Software-Update wurde diese Schwelle sogar weiter abgesenkt, was darauf hindeutet, dass es physikalische Gründe für einen eingeschränkten SCR-Betrieb gibt.

Die aktualisierte Software hält den SCR-Wirkungsgrad jedoch zwischen 70 % und 90 %, obwohl der Ammoniaklastmodus in diesem Fall nicht zum Tragen kommen kann.

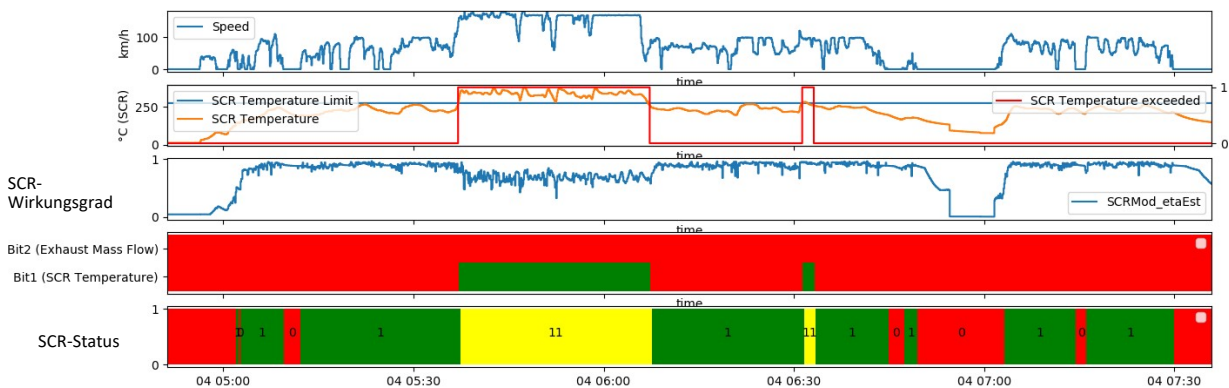


Abbildung 12 – Messdaten während eines Ereignisses, bei dem in der aktualisierten Software eine hohe SCR-Temperatur einen Wechsel in den Alternativmodus verursacht. SCR-Zustand: Rot – keine Dosierung, Grün – Ammoniaklastmodus, Gelb – Alternativmodus. Die SCR-Effizienz ist zwar geringer als beim Betrieb im Ammoniaklastmodus, liegt aber im Alternativmodus immer noch zwischen 60 % und 80 %.

12.5 Grenzen der Analyse

Die Temperatur des SCR-Katalysators ist das Ergebnis des Wärmeeintrags aus dem Abgas in den Katalysator. Es besteht daher eine Korrelation mit dem Abgasmassenstrom und dem Temperaturverlauf. Ein wichtiger Faktor für diese Größen – neben vielen anderen – ist dabei die Fahrzeuggeschwindigkeit. Der dargestellte Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Temperatur des SCR-Katalysators ist daher nur als beispielhaft zu betrachten und stellt keine Definition für die SCR-Temperatur dar. Die SCR-Temperaturen, die im Rahmen dieses Gutachtens beobachtet wurden, sind nur Stichproben und spiegeln nicht unbedingt die Situation bei anderen Fahrzeugen, anderen Fahrsituationen oder anderen Umgebungsbedingungen wider.

Die Auswirkungen der Alterung des SCR-Katalysators konnten bei dem untersuchten Fahrzeug nicht gemessen werden, da der Alterungsfaktor des SCR-Katalysators bereits beim Kauf des Fahrzeugs unter dem kodierten Umschaltwert lag. Daher wurde in der ursprünglichen Software nur der niedrigere Schwellenwert verwendet.

13 Illegale Abschaltvorrichtung Nr. 6: AdBlue-Durchschnittsverbrauch

13.1 Hintergrund

Der AdBlue-Verbrauch ist direkt proportional zur Menge an Ammoniak, die für die Reduktion der Stickoxide zur Verfügung steht. Der durchschnittliche AdBlue-Verbrauch ist somit das Ergebnis der Regelmechanismen für die AdBlue-Dosierung.

Eine zu hohe AdBlue-Dosierung kann auf eine Fehlfunktion in der Abgasnachbehandlung hindeuten; daher könnte man argumentieren, dass eine zu hohe AdBlue-Dosierung an sich verhindert werden sollte, um bei Systemstörungen eine Überdosierung von AdBlue zu vermeiden. Zum Erkennen von Fehlfunktionen kann die Überwachung des AdBlue-Verbrauchs jedoch nicht herangezogen werden, da es sich um einen sehr langsamen Indikator handelt.

Daher sollte der durchschnittliche AdBlue-Verbrauch keinen Einfluss auf die Berechnung des SCR-Wirkungsgrads haben.

13.2 Einzelheiten

Die Motorsteuerung überwacht den durchschnittlichen AdBlue-Verbrauch und schaltet automatisch in den Alternativmodus, sobald der durchschnittliche AdBlue-Verbrauch 820 ml/1000 km überschreitet.

Außerdem wird der Zielwirkungsgrad des SCR-Katalysators nach dem Wechsel in den Alternativmodus auf Grundlage des Durchschnittsverbrauchs (und der kumulierten NO_x-Masse im aktuellen Fahrzyklus) abgesenkt. Der maßgebliche Faktor ist hierbei der Durchschnittsverbrauch – ab ca. 800 ml/1000 km sinkt der Wirkungsgrad deutlich, insbesondere bei höherem Verbrauch. Dies belastet naturgemäß den AdBlue-Verbrauch, unabhängig von der physikalischen Notwendigkeit einer höheren Dosierung.

		Kumulierte NO _x -Masse in diesem Fahrzyklus					
		5,0 g	6,0 g	20,0 g	30,0 g	31,0 g	35,0 g
Durchschnittlicher AdBlue-Verbrauch [mg/1000 km]	400	100,0 %	100,0 %	110,0 %	110,0 %	120,0 %	120,0 %
	650	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	800	95,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	95,0 %	90,0 %
	1000	70,0 %	95,0 %	95,0 %	95,0 %	70,0 %	65,0 %
	1200	40,0 %	90,0 %	90,0 %	60,0 %	40,0 %	35,0 %
	1400	17,0 %	85,0 %	22,0 %	22,0 %	17,0 %	13,0 %
	1600	8,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %	8,0 %	5,0 %
	3000	3,0 %	5,0 %	5,0 %	5,0 %	3,0 %	1,0 %

Abbildung 13 – Korrektur des SCR-Wirkungsgrads auf Grundlage des AdBlue-Durchschnittsverbrauchs, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware.

13.3 Änderungen durch das Software-Update

Dieser Mechanismus wurde vollständig beseitigt.

13.4 Grenzen der Analyse

Aufgrund der vielen illegalen Abschaltvorrichtungen war es überraschend schwierig, das Auto so zu fahren, dass genügend AdBlue dosiert wurde, um auf den AdBlue-Durchschnittsverbrauch zu kommen; das Auto fuhr die meiste Zeit im Alternativmodus. Die physikalische Wirkung der AdBlue-basierten illegalen Abschaltvorrichtung konnte also nur sehr begrenzt beobachtet werden. Die Auswirkung der

Korrektur des SCR-Wirkungsgrads war jedoch in den betrachteten Daten erkennbar.

14 Illegale Abschalteneinrichtung Nr. 7 (AGR): Starttemperatur des Motors

14.1 Hintergrund

Die Motortemperatur beim Anlassen des Motors kann eine nützliche Größe für zusätzliche Maßnahmen sein, die das Verhalten des Motors in der Anlassphase verbessern können.

Sobald der Motor jedoch warmgelaufen ist, sollte das Verhalten des Motors und der Abgasreinigung nicht mehr von der Motorstarttemperatur abhängen.

Ebenso sollte die maximale Motortemperatur, die während eines bestimmten Fahrzyklus beobachtet wurde, keinen direkten Einfluss auf das Motorverhalten haben.

14.2 Einzelheiten

Eine weitere illegale Abschalteneinrichtung reduziert die AGR-Rate in Abhängigkeit von der maximalen im Fahrzyklus beobachteten Motortemperatur und der Starttemperatur des Motors. In vielen Fällen spiegeln diese beiden Werte keine Eigenschaft des aktuellen Motorbetriebs wider, sondern wirken sich jederzeit auf die Abgasrückführung aus.

Dieses thermische Fenster ist so ausgelegt, dass der volle AGR-Betrieb nur möglich ist, wenn der Motor zwischen 18 °C und 35 °C gestartet wurde und die Motortemperatur zu keinem Zeitpunkt 86 °C überschritten hat.

		Maximale Motortemperatur							
		0 °C	20 °C	40 °C	50 °C	60 °C	84 °C	86 °C	95 °C
Motorstart- temperatur	-50 °C	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	17 °C	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	18 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %
	35 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %
	36 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	70 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	85 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	90 °C	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Abbildung 14 – Relative AGR-Absenkung in Abhängigkeit von der im Fahrzyklus beobachteten maximalen Motortemperatur und der Motorstarttemperatur, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware. Rot markiert sind die Betriebsbedingungen, die im NEFZ-Testzyklus zu erwarten sind.

14.3 Zusammenhang mit dem NEFZ-Testzyklus

Es fällt auf, dass die Bedingungen im NEFC-Testzyklus jederzeit zuzutreffen scheinen, insbesondere im wiederholten ECE-15-Teil, bei dem nur eine geringe Motorleistung abgerufen wird – im Regelbetrieb sind sie dagegen nicht erfüllt.

14.4 Änderungen durch das Software-Update

Während die Logik an sich im Software-Update beibehalten wurde, ist das Kennfeld nun komplett auf Null gesetzt, was bedeutet, dass keine AGR-Absenkung auf Grundlage der Starttemperatur und der maximalen Motortemperatur mehr erfolgt.

15 Illegale Abschaltvorrichtung Nr. 8 (AGR): „Hot & Idle“

Eine weitere Abschaltvorrichtung reduziert die AGR, wenn der Motor warmgelaufen ist (> 80 ... 90 °C) und sich im Leerlauf befindet. Dieses Szenario tritt häufig auf, wenn man erst mit mittlerer bis hoher Geschwindigkeit (z. B. auf einer Autobahn) fährt und dann weiter im Stadtverkehr. In diesem Fall würde die Abgasrückführung in den späteren Abschnitten des Fahrzyklus herabgesetzt.

		Aktuelle Motortemperatur											
		-40 °C	-30 °C	0 °C	20 °C	40 °C	55 °C	75 °C	80 °C	90 °C	100 °C	103 °C	110 °C
min ⁻¹	800	100,0 %	100,0 %	50,0 %	4,7 %	2,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	80,0 %	80,0 %	100,0 %	100,0 %
	1000	100,0 %	100,0 %	50,0 %	5,0 %	1,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1200	100,0 %	100,0 %	50,0 %	5,0 %	1,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1400	100,0 %	100,0 %	50,0 %	10,0 %	3,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1600	100,0 %	100,0 %	50,0 %	10,0 %	3,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1800	100,0 %	100,0 %	50,0 %	10,0 %	3,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	2000	100,0 %	100,0 %	50,0 %	15,0 %	6,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	2200	100,0 %	100,0 %	60,0 %	20,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	2400	100,0 %	100,0 %	70,0 %	20,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	2800	100,0 %	100,0 %	70,0 %	20,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	3200	100,0 %	100,0 %	70,0 %	20,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
3600	100,0 %	100,0 %	70,0 %	20,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	

Abbildung 15 – Relative AGR-Reduzierung in Abhängigkeit von der aktuellen Motortemperatur und Motordrehzahl, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der Originalsoftware. Die grünen Bereiche zeigen eine rein temperaturabhängige Absenkung, wahrscheinlich um ein Verstopfen der AGR zu verhindern. Rote Bereiche weisen auf eine illegale Abschaltvorrichtung hin, die die Abgasrückführung reduziert, wenn der Motor auf Betriebstemperatur gekommen ist und dann in den Leerlauf geht.

15.1 Änderungen durch das Software-Update

Das Software-Update behält die Logik an sich bei, aber das Kennfeld wurde erheblich verändert. Der Betriebsbereich wurde so erweitert, dass die AGR bei niedrigen Temperaturen (< 35 °C) nicht so stark abgesenkt wird, ähnlich im Hochtemperaturbereich.

Vor allem wurden die Einträge entfernt, die dazu führen, dass der Motor die AGR im Leerlauf herabsetzt.

		Aktuelle Motortemperatur											
		-30 °C	0 °C	20 °C	35 °C	55 °C	105 °C	107 °C	110 °C	121 °C	124 °C	132 °C	135 °C
min ⁻¹	800	100,0 %	45,0 %	4,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1000	100,0 %	45,0 %	5,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
	1200	100,0 %	45,0 %	5,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %
	1400	100,0 %	45,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	1800	100,0 %	45,0 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	2000	100,0 %	40,0 %	15,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	2200	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	2400	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	3000	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	3500	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	4000	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
4500	100,0 %	35,0 %	20,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	

Abbildung 16 – Relative Herabsetzung der AGR in Abhängigkeit von der aktuellen Motortemperatur und Motordrehzahl, entnommen aus den Kalibrierungsdaten der aktualisierten Software. Grün zeigt Bereiche mit Verbesserungen; die Einträge, die die AGR im Leerlauf nach der Nutzung absenken, wurden vollständig entfernt. (Beachten Sie die Veränderungen in der Temperaturskala.)

16 Verbesserungen in der aktualisierten Version

16.1 Grenzen der Analyse

Um die Unterschiede zwischen der ursprünglichen Software aus dem Jahr 2016 und der aktualisierten Software von Ende 2019 auszuwerten, war eine Methode erforderlich, bei der zwischen zwei Softwareversionen gesprungen wird, die Betriebsbedingungen aber ansonsten unverändert bleiben. Dazu wurde zunächst das ursprüngliche Motorsteuergerät mit einem Tool eines Drittanbieters auf ein zweites Steuergerät geklont und dann die aktualisierte Software auf dieses Steuergerät übertragen. Damit sollte die Integrität des ursprünglichen Steuergeräts für weitere Untersuchungen erhalten bleiben.

Nach Einbau des aktualisierten Steuergeräts wurden keine On-Board-Diagnosefehler mehr angezeigt.

16.2 Einzelheiten

Die in der Originalsoftware enthaltenen illegalen Abschalteneinrichtungen hebeln den SCR-Katalysator im Regelbetrieb aus. Dies lässt sich anhand der Verteilung des angestrebten SCR-Wirkungsgrads quantifizieren. Die X-Achse zeigt die beobachteten Effizienzbereiche (0...1 für 0 %...100 %), die Y-Achse, wie oft dieser Effizienzbereich im Laufe der Zeit beobachtet wurde (ohne Einheit). Höhere Balken zeigen an, dass diese Effizienzbereiche häufiger auftraten. Im Vergleich zur aktualisierten Software sind niedrige Wirkungsgradbereiche (die höhere NOx-Werte verursachen) viel häufiger anzutreffen; es gibt fast keine Zeiten, in denen der Motor mit einem SCR-Wirkungsgrad von > 80 % betrieben wurde.

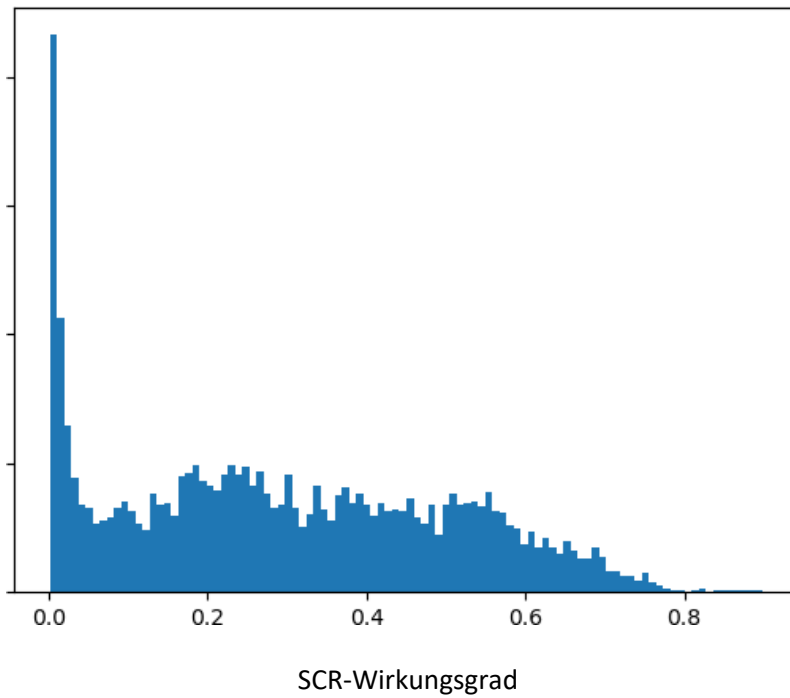


Abbildung 17 – Messdaten: Verteilung der SCR-Effizienz mit der Originalsoftware. Höhere Balken bedeuten eine höhere relative Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter SCR-Wirkungsgrad im realen Fahrbetrieb auftritt.

Die aktualisierte Software zeigt ein deutlich anderes Bild. Es kommt zwar immer noch vor, dass der SCR-Wirkungsgrad zu niedrig ist, meist läuft der Motor jedoch zwischen 80 % und dem oberen 90 %-Bereich.

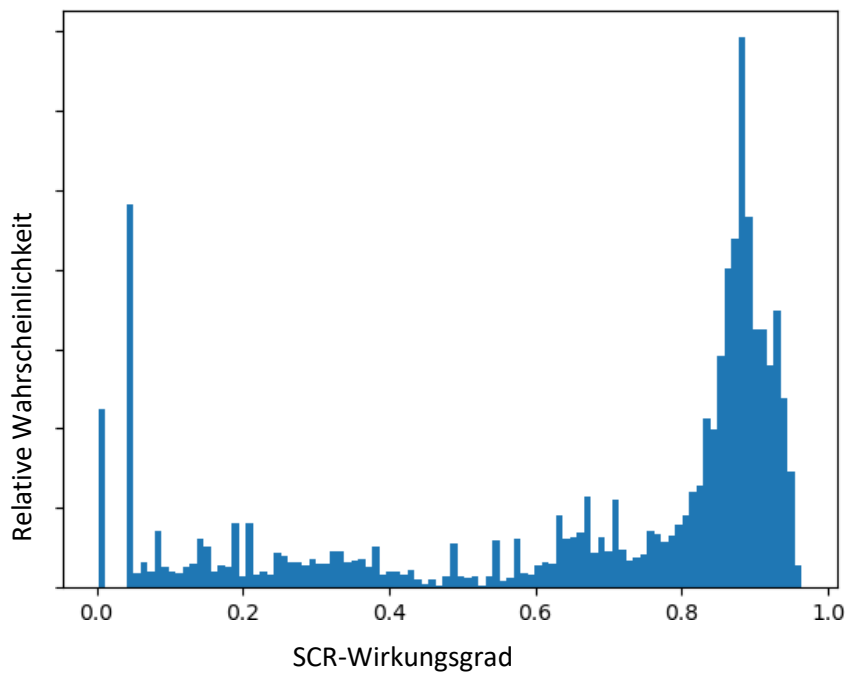


Abbildung 18 – Messdaten, Verteilung des SCR-Wirkungsgrads mit der aktualisierten Software. Höhere Balken bedeuten eine höhere relative Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter SCR-Wirkungsgrad im realen Fahrbetrieb auftritt.

16.3 Auswirkungen auf den AdBlue-Verbrauch

Die höhere Effizienz wird jedoch durch einen höheren AdBlue-Verbrauch erkauft. Der durchschnittliche AdBlue-Verbrauch mit der alten Software wurde mit 0,75 l/1000 km ermittelt, bei der aktualisierten Software werden viel höhere Werte von 1,61 l/1000 km (> 2 x) beobachtet.

16.4 Grenzen der Analyse

Wie bei einer Datenerhebung im Praxisbetrieb zu erwarten war, stimmen die Fahrzyklen, die mit der ursprünglichen Software beobachtet wurden, nicht vollständig mit denen der aktualisierten Software überein. Obwohl derselbe Fahrstil und dasselbe Fahrmuster zugrunde liegen, wurde nicht versucht, systematisch spezifische Fahrbedingungen auszutesten. Daher ist beim Vergleich der Werte vor und nach der Aktualisierung Vorsicht geboten.

Aufgrund der Untersuchung der Softwareänderungen und der beobachteten Auswirkungen auf die AdBlue-Dosierung ist jedoch davon auszugehen, dass diese Werte für den Langzeitbetrieb repräsentativ sind und sich zum Vergleich eignen.

16.4.1 Zusammenfassung

Insgesamt wurden in der aktualisierten Software folgende Änderungen an den illegalen Abschalteneinrichtungen festgestellt:

16.4.2 SCR-Katalysator:

- Die SCR-Temperaturgrenze ist aufgehoben, die SCR-Alterungsabhängigkeit wurde entfernt, die effektive Grenze wurde von 300 °C auf 275 °C gesenkt.
- Der Grenzwert für den Abgasmassenstrom wurde als Wechselkriterium vollständig entfernt, das Kennfeld für die Wirkungsgradkorrektur wurde verbessert, um den Betrieb im Alternativmodus bei weiterhin hohem SCR-Wirkungsgrad zu ermöglichen.
- Der Grenzwert für den Stickoxidmassenstrom wurde als Wechselkriterium entfernt, die Wirkungsgradkorrektur im Alternativmodus auf Grundlage des Stickoxidmassenstroms ist aufgehoben.
- Die Abhängigkeit von der Lufttemperatur wurde beseitigt.
- Der Schutz gegen Neustart wurde entfernt.
- Sowohl der Wechsel in den Alternativmodus als auch die Effizienzkorrektur auf Basis des AdBlue-Verbrauchs wurden entfernt.

16.4.3 Abgasrückführung (AGR):

- Die AGR-Absenkung in Abhängigkeit von Start- und Höchsttemperatur des Motors wurde entfernt.
- Die AGR-Absenkung bei warmgelaufenem Motor im Leerlauf („Hot & Idle“) wurde beseitigt; die AGR-Rate ist zwar weiterhin bei sehr hohen oder niedrigen Temperaturen begrenzt, es gibt aber keine Sonderfälle mehr für den Leerlauf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle illegalen Abschalteneinrichtungen, die identifiziert wurden, in der aktualisierten Software entfernt sind.

17 Fazit

Die allgemeine Beobachtung im Testfahrzeug ist, dass der angestrebte Wirkungsgrad der SCR- und AGR-Systeme absichtlich herabgesetzt wird, und zwar aufgrund von Faktoren, die nicht auf physikalischen Zwängen, sondern auf Herstellervorgaben beruhen.

Bei dieser Untersuchung wurden acht illegale Abschalteneinrichtungen festgestellt, von denen sechs mit dem SCR-System und zwei mit dem AGR-System zusammenhängen. Drei der SCR-bezogenen illegalen Abschalteneinrichtungen sind von einem „Alterungsfaktor“ abhängig. Dieser Faktor führt dazu, dass zwei dieser Einrichtungen (Nr. 1 und 2, Abgas- und Stickoxidmassenstrom) bei einem Alterungsgrad von 1 %, d. h. sehr früh in der Lebensspanne des Fahrzeugs, und eine dritte (Nr. 5, SCR-Temperatur) bei 20 % Alterung aktiviert werden. Über den größten Teil der Lebensspanne eines Fahrzeugs sind die SCR-relevanten illegalen Abschalteneinrichtungen also aktiv.

Beim SCR-System haben die illegalen Abschalteneinrichtungen Folgendes gemeinsam:

- Sie sprechen auf physikalische Eigenschaften an, die im Allgemeinen unter extremen Bedingungen überwacht werden müssen, wie Temperatur, Massenstrom usw.
- Sie lösen jedoch routinemäßig schon im normalen Praxisbetrieb aus.
- Sie sind so konzipiert, dass sie erst eine gewisse Zeit nach dem „Auslösen“ wirken, zum Beispiel durch eine hohe Hysterese und/oder einen „Schutz gegen Neustart“.
- Sie verringern den prognostizierten internen Wirkungsgrad des SCR-Systems erheblich, was zu einer drastischen Reduzierung der AdBlue-Dosierung führt, die wiederum einen wesentlich höheren NO_x-Ausstoß zur Folge hat.

Im Zusammenhang mit dem AGR-System wurde ein thermisches Fenster sowie eine illegale Abschalteneinrichtung festgestellt, die die AGR absenkt, wenn der warmgelaufene Motor im Leerlauf ist.

Aufgrund der zahlreichen illegalen Abschalteneinrichtungen lief das Fahrzeug während der meisten Fahrten mit gemäßigter Fahrweise im Alternativmodus.

Bei einigen illegalen Abschalteneinrichtungen ist klar, dass sie bei der NEFZ-Prüfung nicht auslösen, weil die Testvorschriften eindeutige Grenzwerte vorgeben oder der auslösende Alterungsfaktor zum Zeitpunkt der Prüfung vermutlich noch nicht erreicht ist. Bei anderen illegalen Abschalteneinrichtungen wird davon ausgegangen, dass sie im erwarteten Normalbetrieb nicht auslösen.

Die aktualisierte Software wendet optimierte Schwellenwerte an, die ohne weitere Hardwareveränderungen zu einer deutlich besseren NO_x-Reduktion führen. Sämtliche identifizierten illegalen Abschalteneinrichtungen wurden in der aktualisierten Software entfernt, was die Systemgesamtleistung erheblich steigert.

Die verbesserte Effizienz geht jedoch zu Lasten eines wesentlich höheren AdBlue-Verbrauchs, der auf mehr als das Doppelte des Ausgangswertes steigt. Mögliche weitere Auswirkungen des Software-Updates waren nicht Gegenstand dieser Untersuchung.