

ADBLUE BEI DIESEL-PKW

Analyse anhand von chemischen Reaktionen anstatt absurder Vermutungen

ALEXANDER NOÉ

E-Mail: alex@alexander-noe.com

5. September 2023

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	3
2	Begriffe	6
3	Rechtliche Grundlagen	8
3.1	Relevante Verordnungen für Europa	8
3.2	Befüllung des AdBlue-Tanks durch den Fahrer	8
3.3	Niedrige Außentemperaturen	9
3.4	Falsche Befüllung des AdBlue-Tanks	9
3.5	Leerer AdBlue-Tank oder defektes AdBlue-System	10
3.6	Verwendung von Systemen zur Fahrzeugdiagnose	11
4	Prinzipielle Funktionsweise	12
5	Die seltsame Diskussion um die Tankgröße	15
5.1	Europa: Es gab nie zu kleine AdBlue-Tanks	15
5.2	USA: AdBlue-Tanks waren <i>vielleicht</i> tatsächlich zu klein	16
6	Die Abgasrückführung	17
6.1	Die Hochdruck-Abgasrückführung	18
6.2	Die Niederdruck-Abgasrückführung	18
6.3	Die Mehrwege-Abgasrückführung	19
6.4	Die innere Abgasrückführung	19
6.5	Prinzipielle Limitierung	19
6.6	Fahrzeuge ohne Abgasrückführung	20
7	Die chemischen Reaktionen im AdBlue-System	22
7.1	Zusammensetzung von AdBlue	22
7.2	Gewinnung von Ammoniak aus AdBlue	22
7.3	Die SCR-Reaktionen zur Reduktion von Stickoxiden	22
7.4	Weitere mögliche Reaktionen	23
8	AdBlue-Verbrauch und Kosten	25
8.1	Übertragung der Berechnung auf Euro 5 - Fahrzeuge	25
8.2	Abhängigkeit von der Art der Abgasrückführung	26
8.3	Kosten für AdBlue	26
9	Berechnung der NO _x -Masse einer Fahrt	27
10	Untersuchungen an einem Euro 6d-Fahrzeug aus dem VW-Konzern	29
10.1	VCDS	29

10.2	Datenaufzeichnungen mit VCDS	30
10.2.1	Konfiguration der Aufzeichnung	30
10.2.2	Ergebnis einer Aufzeichnung	30
10.3	Vorbetrachtungen für die Untersuchung des AdBlue-Verbrauchs	31
10.4	Auswertung von Aufzeichnungen	32
10.5	Beispiele für Analysen	35
10.5.1	Abhängigkeit der Abgasrückführung von der Last	35
10.5.2	Hohe Geschwindigkeit	36
10.5.3	Dynamische Fahrweise	37
10.5.4	Beschleunigung	38
10.5.5	Bergauffahrt	40
10.5.6	Niedrige Außentemperaturen	41
10.5.7	Standgas	44
10.5.8	Vergleich - 120km/h - flache und bergige Strecke	45
10.5.9	Aufwärmzeit des AdBlue-Systems	46
11	Zusammenfassung der Ergebnisse	48
12	Bewertung der Expertenaussagen im Zusammenhang mit der Bildungsmisere	49

1 EINLEITUNG

Am 31.05.2010 berichtete der Spiegel unter dem Titel „Zweifel an der Abgasnorm“, dass der ADAC drei Diesel-PKW der damals neuen Euro 6-Norm getestet habe, und dass zwei davon sehr schlecht abgeschnitten hätten¹. Im Jahr 2011 forderte der ADAC: „Diesel Euro-6 muss auch off-cycle NO_x und NO₂ wirksam verringern!“[1, Seite 13]. Den Daten und eigenen Testergebnissen zufolge, die dem ADAC vorlagen, war dem nämlich nicht so, und die Ergebnisse ein Jahr zuvor waren offenbar kein Zufall. Nachdem der Diesel-Abgasskandal der breiten Öffentlichkeit im Jahr 2015 bekannt gemacht wurde², war eines der Themen der AdBlue-Verbrauch. In der Berichterstattung dazu wurden jedoch derart groteske Fehler gemacht und derart unplausible Hypothesen ungeprüft als angebliche Tatsache verbreitet, dass kaum zu glauben ist, dass es sich nur um ein Versehen handeln soll.

In den Jahren 2016 und 2017 behaupteten „Experten“, dass der AdBlue-Verbrauch von Diesel-PKW bei 5 Prozent des Kraftstoffverbrauchs liegen müsse, zum Teil wurden sogar Werte von bis zu 8 Prozent in den Raum gestellt[2]. Dabei beriefen sie sich auf den AdBlue-Verbrauch von LKW, so als ob ein LKW-Motor mit 15 Litern Hubraum und 500 PS, der ein Fahrzeug von 40 Tonnen antreibt, vergleichbar wäre mit einem Motor mit 2 Litern Hubraum und 150 PS, der ein Fahrzeug von 1,5 Tonnen antreibt.

Viele Fahrer solcher Diesel-PKW der Abgasnorm Euro 6d-TEMP und Euro 6d, die ja auch im realen Straßenverkehr getestet werden, beobachten nun einen AdBlue-Verbrauch von sehr viel weniger als 5 Prozent des Kraftstoffverbrauchs. Am Beispiel meines eigenen Fahrzeugs³ mit der Abgasnorm Euro 6d zu einem gegebenen Stichtag ergibt sich ein durchschnittlicher AdBlue-Verbrauch von 1,1 % des Kraftstoffverbrauchs:

Fahrleistung bisher:				26.777 km
Kraftstoffverbrauch bisher:		1.549,12 l	≡	5,78 l/100 km
AdBlue-Verbrauch bisher:	18.880 g	=	17,32 l	≡ 0,647 l/1000 km
Verhältnis AdBlue:Diesel-Verbrauch				1,1 %

Nach weiteren 1.691 Kilometern mit sparsamer Fahrweise zeigen sich folgende Daten:

Fahrleistung bisher:				28.468 km
Kraftstoffverbrauch bisher:		1.636,37 l	≡	5,75 l/100 km
AdBlue-Verbrauch bisher:	19.831 g	=	18,19 l	≡ 0,639 l/1000 km
Verhältnis AdBlue:Diesel-Verbrauch				1,1 %

Somit ergibt sich für die letzten 1.691 km:

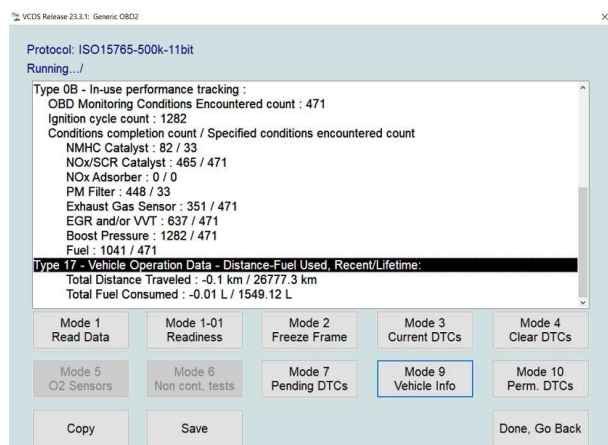
Fahrleistung:				1.691 km
Kraftstoffverbrauch:		87,25 l	≡	5,16 l/100 km
AdBlue-Verbrauch:	951 g	=	0,872 l	≡ 0,515 l/1000 km
Verhältnis AdBlue:Diesel-Verbrauch				1,0 %

Die Daten wurden dabei mittels eines Diagnosesystems aus dem Fahrzeug ausgelesen. Das zeigt Abbildung 1. Die Dichte von AdBlue liegt bei 1,09 g/cm³:

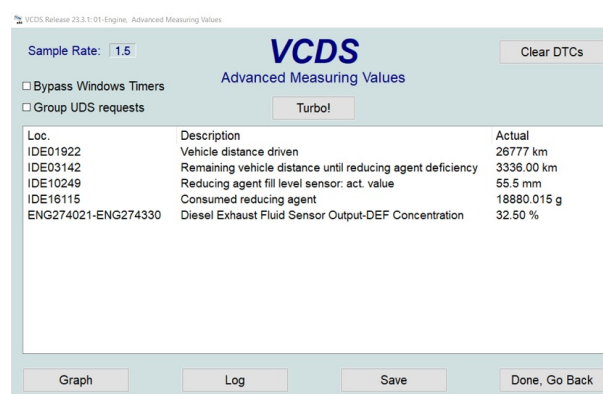
¹ Leider befindet sich der Artikel hinter einer Paywall, weswegen ich ihn nicht verlinke, er kann mit einer Suche nach dem Titel aber leicht gefunden werden

² Zwischen 2010 und 2015 hatten Journalisten offenbar keinerlei Interesse am Thema, und fanden das bereits 2011 bekannte Abgasverhalten wohl auch nicht schlimm

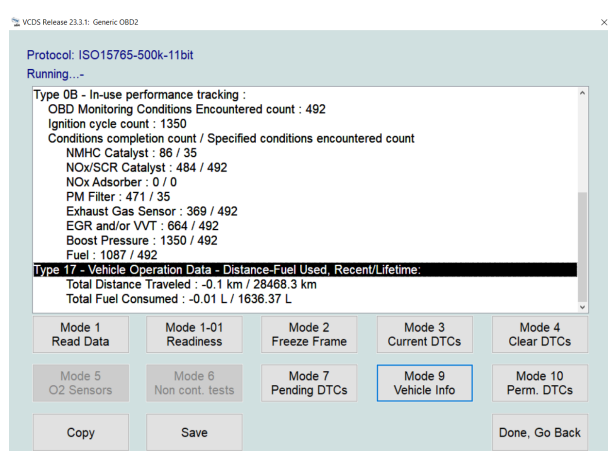
³ Ein Škoda Superb 2.0 TDI mit 147 kW, EA288 evo, Motorkennbuchstabe DTUA, den ich als Neuwagen übernommen habe



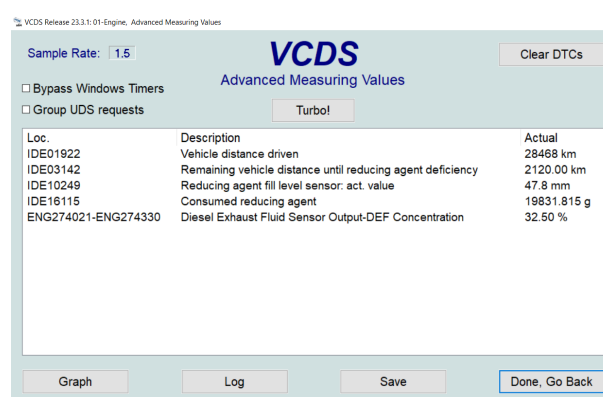
(a) Kraftstoffverbrauch bei 26.777 km



(b) AdBlue-Verbrauch bei 26.777 km



(c) Kraftstoffverbrauch bei 28.468 km



(d) AdBlue-Verbrauch bei 28.468 km

Abbildung 1: Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch bei einem Euro-6d-Fahrzeug

Wie passt das zusammen?

Die Aussagen von damals waren nicht einfach nur falsch. Ein Experte auf diesem Gebiet hätte es damals schon besser wissen müssen, und zwar ohne ein solches Fahrzeug, dass es 2016 noch gar nicht gab, zur Verfügung zu haben. Ein Experte hätte nicht wissen können, dass es auf den konkreten Wert von 1 Prozent hinauslaufen kann⁴, er hätte aber wissen müssen, dass erstens eine pauschale Aussage dieser Art keinen Sinn macht, und dass zweitens ein Wert von 5 Prozent auch für den Flottendurchschnitt zu hoch ist, und auch dann zu hoch gewesen wäre, wenn es keine AdBlue-Sparfunktionen in der Motorsteuersoftware gegeben hätte.

In diesem Artikel zeige ich für AdBlue-Systeme

- wie man anhand der chemischen Reaktionen aus Stickoxiden pro Kilometer auf den notwendigen AdBlue-Verbrauch kommt
- warum ein Experte auch 2016 schon gewusst hätte, dass eine Aussage wie „5 bis 8 Prozent“ keinen Sinn macht

⁴ Bosch hat 2018 demonstriert, dass ein VW Golf mit 0,5 l/1.000 km, also rund 1 Prozent, auskommen kann[3]. Eine Veröffentlichung von 2018 kann aber nicht gegen Aussagen von 2016 und 2017 verwendet werden

- wie hoch der AdBlue-Verbrauch tatsächlich hätte sein müssen, insbesondere auch bei Euro 5 - Fahrzeugen, wenn sie ein AdBlue-System gehabt hätten
- welche Kosten für AdBlue sich daraus tatsächlich ergeben
- warum die Behauptung, AdBlue-Tanks seien zu klein für eine wirksame Abgasreinigung gewesen, für den europäischen Markt keinen Sinn macht
- warum wesentlich größere Tanks für europäische Fahrzeuge eine Scheinlösung gewesen wären, die von niemandem mit etwas mehr Fachkenntnissen ernsthaft in Betracht gezogen wurde
- dass Experten bereits 2002 nicht mehr hätten glauben können, dass es ein festes Verhältnis zwischen AdBlue- und Dieserverbrauch, wie z.B. „5 bis 8 Prozent“, gibt
- wie AdBlue-Systeme Fehlfunktionen erkennen
- wie man allein aus Daten, die sich aus Fahrzeugen auslesen lassen, auf den Soll-AdBlue-Verbrauch kommt

Ich weiß nicht, ob das heute noch so ist, aber eine Zeitlang war es cool, schlecht in Naturwissenschaften zu sein. Falls es sich bei der falschen Berichterstattung nicht um böse Absicht, sondern tatsächlich nur um Fehler gehandelt hat, müssen viele Journalisten extrem cool gewesen sein, und einige „Experten“ ebenso.

In diesem Artikel werde ich nur in wenigen Ausnahmefällen etwas vermuten, glauben oder meinen. An den wenigen Stellen, an denen ich eine Vermutung äußere, verwende ich Worte wie „vermutlich“, „vermuten“ oder „Vermutung“.

2 BEGRIFFE

Bevor wir uns der Funktionsweise von AdBlue-Systemen zuwenden können, müssen wir einige Begriffe klären.

Alle Einrichtungen in einem Fahrzeug, die darauf abzielen, weniger Schadstoffe zu emittieren, heißen **Emissionsminderungseinrichtung** und bilden das **Emissionsminderungssystem**, manchmal auch **Emissionskontrollsystem** genannt. Die neueste Version der Abgasverordnung spricht von der **Abgasreinigungsanlage**, meint damit aber auch das Emissionsminderungssystem. Es gibt solche Einrichtungen, die die Produktion von Schadstoffen bereits bei der Verbrennung senken, und es gibt solche, die entstandene Schadstoffe nachträglich in unschädliche Stoffe umwandeln oder filtern. Für die erste Sorte ist mir kein verbreiteter Fachbegriff bekannt. Man spricht oft von **innermotorischen Maßnahmen**, da sie irgendwo im inneren des Motors liegen. Ein Beispiel dafür ist die Abgasrückführung. Die zweite Sorte gehört zur **Abgasnachbehandlung**, oder umgangssprachlich **Abgasreinigung**. Beispiele dafür sind Partikelfilter oder diverse Katalysatoren.

AdBlue ist eine Markenbezeichnung für **Diesel Exhaust Fluid = DEF**, auf Deutsch also Dieselaabgasflüssigkeit. Eine technischere Bezeichnung ist **AUS 32** (=aqua¹cius urea solution 32, deutsch: wässrige Harnstofflösung 32). Es wird beim aktuellen Stand der Technik für die **Reduktion** von Stickoxiden (NO_x), d.h. **Stickstoffmonoxid** (NO) und **Stickstoffdioxid** (NO₂), aus Dieselaabgasen benötigt. Genaugenommen benötigen Fahrzeuge nicht unbedingt AdBlue, sie benötigen Dieselaabgasflüssigkeit, egal unter welcher Marke sie vertrieben wird. Dennoch hat sich die Bezeichnung AdBlue derart eingebürgert, dass ich dabei bleiben werde.

Der Begriff **Reduktion** bezeichnet nicht Verringerung (=Reduzierung), sondern ist einfach das Gegenteil von **Oxidation**. Stickstoff kann zu Stickoxiden oxidiert werden, Stickoxide können zu Stickstoff reduziert werden. Ein korrekter Satz wäre zum Beispiel: „Durch Reduktion kann die Menge an Stickoxiden in Abgasen um xx Prozent verringert werden.“ Während eine Oxidation von Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlendioxid (CO₂) in einem **Oxidationskatalysator** stattfindet, findet die Reduktion von Stickoxiden zu Stickstoff in einem **Reduktionskatalysator** statt.

Bei Benzinern findet die Reduktion von Stickoxiden im Allgemeinen im Drei-Wege-Katalysator statt. Er ist gleichzeitig Oxidationskatalysator und Reduktionskatalysator. Der Drei-Wege-Katalysator reduziert Stickoxide aber nur, wenn kein oder kaum freier Sauerstoff im Abgas ist. Da bei Dieselmotoren praktisch immer Sauerstoff im Abgas ist, ist bei Dieselmotoren eine andere Lösung erforderlich. Diese andere Lösung ist im Regelfall ein **SCR-Katalysator**. Der SCR-Katalysator bei Dieselmotoren ist ein Reduktionskatalysator, der zum Betrieb Ammoniak (NH₃) benötigt⁵. Da ein Ammoniak-Gastank im Fahrzeug unpraktikabel wäre, wird Ammoniak erst während des Betriebs des Motors aus AdBlue gewonnen. In dieser Funktion wird AdBlue als **Reduktionsmittel** bezeichnet: Es ist ein Mittel, um die Reduktion von Stickoxiden zu Stickstoff in einem Reduktionskatalysator zu ermöglichen. Das eigentliche Reduktionsmittel ist jedoch Ammoniak.

Lange Zeit wurde für AdBlue-System angegeben, dass sie die Stickoxid-Emissionen um 80 bis 90 Prozent verringern können. Dieser Wert ist die **Umwandlungsrate**.

In der Abgasverordnung ist die Rede von Abgasnachbehandlungssystemen, die ein zusätzliches **Reagens** benötigen. Ein Reagens ist einfach ein Stoff, der für eine chemische Reaktion verwendet wird, zum Beispiel das Reduktionsmittel AdBlue.

Stickstoffdioxid ist das Gas, um das es bei Diskussionen um belastete Stadtluft geht. Die Richtlinie 2008/50/EG^[4] aus dem Jahr 2008 schreibt hier einen Jahresdurchschnittsgrenzwert von 40 µg/m³ und einen Stundendurchschnittsgrenzwert von 200 µg/m³ vor. Stickstoffmonoxid wird dabei nicht betrachtet.

⁵ Daher spricht man auch von der NH₃-SCR. Es gab auch Versuche, andere SCR-Katalysatoren zu entwickeln, zum Beispiel H₂-SCR. Für Fahrzeuge ist daraus jedoch nichts geworden

Bei Auspuff-Emissionen wird Stickstoffmonoxid sehr wohl betrachtet. Die Abgasnormen betrachten die Summe aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid. Theoretisch wäre es ja möglich, dass Fahrzeuge zwar viel Stickstoffmonoxid, aber kaum Stickstoffdioxid emittieren. Bei Diesel-PKW von Euro 3 bis inkl. Euro 5 ist jedoch ca. die Hälfte der ausgestoßenen Stickoxide tatsächlich Stickstoffdioxid ([1, Seite 9]). Außerdem reagiert $\text{NO} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$. Das Argument, dass oft Stickoxide und Stickstoffdioxid verwechselt wird, ist zwar eine korrekte Aussage, hilft aber nicht. Des Weiteren gelten die Emissionsgrenzwerte, und zwar aus genau diesem Grund, für Fahrzeuge nicht für die tatsächliche Abgasmasse, sondern für das „NO₂-Äquivalent“. Spricht man von **Stickoxiden**, meint man das **NO₂-Äquivalent**. Dabei werden Stickstoffmonoxid-Emissionen so berechnet, als ob das Stickstoffmonoxid mit Sicherheit noch zu Stickstoffdioxid oxidiert wird. Daher kann man auch annehmen, dass sich alle Angaben über gemessene Realemissionen auf das NO₂-Äquivalent beziehen.

Manchmal wird AdBlue als „Diesel-Zusatz“ bezeichnet, sogar vom ADAC[5]. Das ist falsch. Ein Diesel-Zusatz wäre etwas, das man in den Dieselmotorkraftstoff hineingibt. AdBlue darf nicht in den Kraftstoff gemischt werden.

Statt von „AdBlue-Einspritzung“⁶ wird manchmal von „Harnstoffeinspritzung“ gesprochen. Das ist zumindest eine unglückliche Wortwahl, denn sowohl der Harnstoff, als auch ein Teil des Wassers, in dem er gelöst ist, wird für die chemischen Reaktionen benötigt.

Die Einheit der **Stoffmenge** lautet **Mol** und hat das Einheitenzeichen mol. Ein Mol eines Stoffes besteht aus $6 \cdot 10^{23}$ Atomen oder Molekülen des Stoffes. Die Masse eines Mols eines Stoffes ist seine **molare Masse**. Zum Beispiel beträgt die molare Masse von Wasser 18 g/mol.

Ein **Massenstrom** gibt die Masse pro Zeiteinheit an, zum Beispiel in Kilogramm pro Stunde. Wenn ein Verbrennungsmotor Kraftstoff mit Luft verbrennt, entsteht ein gewisser **Abgasmassenstrom**, der typischerweise in Kilogramm pro Stunde oder Gramm pro Sekunde angegeben wird.

Die Luft besteht zu 78 Prozent aus Stickstoff. Wenn also einzelne Autoren über eine zu hohe Stickstoff-Belastung in der Luft sprechen, zum Beispiel [6], dann kann man nur noch den Kopf schütteln.

⁶ Aus nachvollziehbaren Gründen spricht man nicht von „Dieselabgasflüssigkeitseinspritzung“, auch wenn das noch besser wäre als „AdBlue-Einspritzung“

3 RECHTLICHE GRUNDLAGEN

In diesem Abschnitt gehe ich vor allem auf solchen Aspekte ein, die für die Berichterstattung und Bewertung wichtig gewesen wären, wenn Journalisten und „Experten“ sich mit den rechtlichen Grundlagen ausgekannt hätten.

3.1 Relevante Verordnungen für Europa

Besonders die folgenden Verordnungen sind für europäische Fahrzeuge in diesem Kontext relevant:

- 715/2007
- 692/2008
- 459/2012
- UN/ECE 83 (für PKW und leichte Nutzfahrzeuge)
- UN/ECE 49 (für Nutzfahrzeuge, auch leichte Nutzfahrzeuge)
- 2017/1151 als Nachfolger der 692/2008

Insbesondere die 692/2008[7] aus dem Jahr 2008 enthält einige Punkte, die für die Betrachtung von AdBlue-Systemen relevant sind.

3.2 Befüllung des AdBlue-Tanks durch den Fahrer

Der erste Punkt betrifft die Frage, ob ein AdBlue-Tank tatsächlich von Service zu Service hätte reichen müssen, oder ob Journalisten sich das nur ausgedacht haben. Die Verordnung 692/2008[7] aus dem Jahr 2008 sagt dazu:

ANHANG XVI

VORSCHRIFTEN FÜR FAHRZEUGE, DIE EIN REAGENS FÜR IHR ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEM BENÖTIGEN

...

9. BEREITSTELLUNG VON INFORMATIONEN

...

9.3. In den Anweisungen ist anzugeben, ob ein selbstverbrauchendes Reagens vom Fahrzeugbetreiber zwischen den planmäßigen Wartungen nachgefüllt werden muss. Darin muss auch beschrieben werden, wie der Reagensbehälter vom Fahrer zu befüllen ist.

Für den europäischen Markt sind also Behauptungen, nach denen der AdBlue-Tank von Service zu Service reichen *musste*, Fehlinformationen oder Falschinformationen⁷. Die Erkenntnis, dass es in Europa von Anfang an möglich gewesen wäre, Fahrer selbst den AdBlue-Tank befüllen zu lassen⁸, ist einer von mehreren Argumenten gegen die Theorie von Journalisten, dass größere AdBlue-Tanks für ein funktionierendes AdBlue-System nötig gewesen wären.

⁷ Der Begriff der Falschinformation impliziert böse Absicht. Sollten sich die entsprechenden Autoren hier auf eigene Inkompetenz berufen, dann wäre es nur eine Fehlinformation.

⁸ Fahrer schaffen es seit Jahrzehnten schließlich auch, den Kraftstofftank und den Tank für Scheibenwaschwasser zu befüllen

3.3 Niedrige Außentemperaturen

Zum einen wird eine Aufwärmzeit von Stickoxid-Nachbehandlungssystemen von Dieselmotoren von 400 Sekunden bei -7°C gefordert:

Bei der Beantragung einer Typgenehmigung belegen die Hersteller der Genehmigungsbehörde jedoch, dass die NO_x-Nachbehandlungseinrichtung nach einem Kaltstart bei -7°C innerhalb von 400 Sekunden eine für das ordnungsgemäße Arbeiten ausreichend hohe Temperatur erreicht, wie in der Prüfung Typ 6 beschrieben.

Ein weiterer Punkt betrifft den Temperaturbereich, innerhalb dessen ein solches System prinzipiell funktionieren muss, auch wenn bei niedrigen Außentemperaturen mit einer erhöhten Anlaufzeit zu rechnen ist:

10. BETRIEBSBEDINGUNGEN DES ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEMS

Der Hersteller muss gewährleisten, dass das Emissionsminderungssystem unter allen auf dem Gebiet der Europäischen Union regelmäßig anzutreffenden Umgebungsbedingungen und insbesondere bei niedrigen Umgebungstemperaturen seine Emissionsminderungsfunktion erfüllt. Dies umfasst auch Maßnahmen gegen das vollständige Einfrieren des Reagens bei einer Parkdauer von bis zu 7 Tagen bei 258 K (-15°C) und 50 %iger Tankfüllung. Ist das Reagens gefroren, muss der Hersteller gewährleisten, dass es innerhalb von 20 Minuten, nachdem das Fahrzeug bei einer im Reagensbehälter gemessenen Temperatur von 258 K (-15°C) angelassen wurde, zur Verwendung bereitsteht, damit das Emissionsminderungssystem ordnungsgemäß arbeiten kann.

Hier ist also die Rede von -15°C . Bedenkt man, wie klar der Wert angegeben ist, dann ist es zumindest erstaunlich, wie lange über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit von Thermofenstern in AdBlue-Systemen diskutiert wurde, sowohl seitens Autoherstellern, aber auch seitens Kraftfahrtbundesamt und seitens Journalisten. Ein Thermofenster in einem AdBlue-System kann gemäß dieser Vorschrift nur dann zulässig sein, wenn das System bis mindestens -15°C funktioniert. Erst bei Temperaturen unterhalb von -15°C macht die Diskussion darüber Sinn.

3.4 Falsche Befüllung des AdBlue-Tanks

Auch für die Reaktion auf ein falsch befülltes AdBlue-System gibt es klare Vorschriften:

4. ERKENNUNG EINES FALSCHEN REAGENS

4.1. Das Fahrzeug muss mit einer Einrichtung ausgestattet sein, die prüft, ob das im Behälter befindliche Reagens die vom Hersteller angegebenen und in Anhang I Anlage 3 dieser Verordnung aufgeführten Eigenschaften hat.

4.2. Entspricht das im Behälter befindliche Reagens nicht den Mindestanforderungen des Herstellers, muss sich das in Abschnitt 3 beschriebene Warnsystem aktivieren und einen entsprechenden Warnhinweis anzeigen ...

5. ÜBERWACHUNG DES REAGENSVERBRAUCHS

...

6. ÜBERWACHUNG DER NO_x-EMISSIONEN

6.1. Alternativ zu den Überwachungsvorschriften der Abschnitte 4 und 5 dürfen die Hersteller Abgassonden verwenden, um überhöhte NO_x-Mengen in den Auspuffabgasen direkt zu messen.

...

Hierzu ist zu sagen, dass eine direkte Messung der AdBlue-Qualität erst seit wenigen Jahren möglich ist. Die AdBlue-Systeme früherer Fahrzeuge, d.h. Euro 6b und älter, dürften vor allem die Option 6.1 gewählt haben, d.h. das Fahrzeug misst einfach, wie viele Stickoxide sich am Ende noch im Abgas befinden.

3.5 Leerer AdBlue-Tank oder defektes AdBlue-System

Die Reaktion auf einen leeren Tank ist ebenfalls klar definiert:

8. AUFFORDERUNGSSYSTEM FÜR DEN FAHRER

8.1. Das Fahrzeug muss über ein Aufforderungssystem für den Fahrer verfügen, um zu gewährleisten, dass das Fahrzeug jederzeit mit einem funktionsfähigen Emissionsminderungssystem betrieben wird. **Dieses Aufforderungssystem muss so konzipiert sein, dass es den Betrieb des Fahrzeugs mit leerem Reagensbehälter unmöglich macht.**

Damit es nicht dazu kommt, schreibt die Abgasverordnung vor, dass erstmals bei 2.400 km prognostizierter Restreichweite eine Warnung angezeigt werden muss⁹. Desweiteren wird gefordert, dass sich das Warnsignal mit sinkendem Füllstand verstärken muss:

3 WARNSYSTEM FÜR DEN FAHRER

3.1. Das Fahrzeug muss über ein Warnsystem verfügen, das den Fahrer durch ein optisches Signal darauf aufmerksam macht, dass der Reagensfüllstand niedrig ist, der Reagensbehälter bald aufgefüllt werden muss oder das Reagens nicht die vom Hersteller vorgeschriebene Qualität hat. Dieses Warnsystem kann auch ein akustisches Signal zur Warnung des Fahrers abgeben.

...

3.5. Das Warnsystem muss sich aktivieren, sobald noch eine Strecke von mindestens 2.400 km gefahren werden kann, bevor der Reagensbehälter leer wird.

Das Aufforderungssystem muss sich auch aktivieren, wenn das AdBlue-System defekt ist:

Das Aufforderungssystem muss sich spätestens dann aktivieren, wenn der Füllstand im Reagensbehälter einen Pegel erreicht, der der mittleren Reichweite des Fahrzeugs mit vollem Kraftstofftank entspricht. Das System muss sich auch aktivieren, wenn je nach NO_x-Überwachungsmethode die in den Absätzen 4, 5 oder 6 genannten Fehlfunktionen auftreten.

Die UN/ECE Regelungen 49 und 83 definieren hier eine Ausnahme für Fahrzeuge, die als Rettungs- und Einsatzfahrzeuge verwendet werden. Bei diesen Fahrzeugen darf das Aufforderungssystem deaktiviert werden, so dass sie auch mit leerem AdBlue-Tank oder defektem AdBlue-System funktionieren. Das System muss dann so konstruiert sein, dass nur der Fahrzeughersteller in der Lage ist, das Aufforderungssystem zu deaktivieren.

⁹ Diese 2.400 km gelten für Fahrzeuge, die die UN/ECE-Regelung 83 erfüllen, d.h. vor allem PKW. Leichte Nutzfahrzeuge ab 2.610 kg müssen die UN/ECE 49 erfüllen, und dort gilt eine Grenze von 10 Prozent des Tanks

3.6 Verwendung von Systemen zur Fahrzeugdiagnose

Die Verordnung 2017/1151 schreibt vor, dass erstens für RDE-Tests eine tatsächliche Messung der Abgase erforderlich ist. Es reicht nicht, Daten aus dem Motorsteuergerät zu verwenden. Zweitens schreibt die Verordnung vor:

4. ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN

...

Werden bei einem Fahrzeug die Emissionen oder die Leistung durch die Erfassung von ECU-Daten beeinflusst, wird die gesamte PEMS¹⁰-Prüfungsfamilie, zu der das Fahrzeug gemäß der Definition in Anlage 7 gehört, als nicht konform betrachtet. Diese Funktion gilt als „Abschalteinrichtung“ im Sinne von Artikel 3 Absatz 10 der Verordnung (EG) Nr. 715/2007.

Die Vorschrift ist deswegen wichtig, weil sie es interessierten Fahrern neuerer Fahrzeuge ermöglicht, zur Untersuchung des Fahrzeugs eine Diagnosesoftware, die einfach Daten aus dem Motorsteuergerät ausliest, zu verwenden.

¹⁰ Verschiedene Fahrzeuge mit sehr ähnlichem Antrieb dürfen für Tests im realen Straßenverkehr zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Eine solche Gruppe heißt „PEMS-Familie“.

4 PRINZIPIELLE FUNKTIONSWEISE

An dieser Stelle soll zunächst die prinzipielle Funktionsweise eines AdBlue-Systems eingegangen werden, ohne bereits zu tief ins Detail zu gehen.

AdBlue wird in einem separaten Tank im Fahrzeug mitgeführt. Inzwischen ist es üblich, dass sich der Tankstutzen dafür direkt neben dem für Diesel befindet. Es gab jedoch unter den ersten PKW mit AdBlue-Technik auch welche, bei denen der Zugang umständlicher war, z.B. in der Reserveradmulde. Das Verstecken des Tankstutzens hatte dabei keinerlei Vorteil für den Kunden.

Während der Fahrt wird AdBlue in die heißen Abgase eingespritzt und dadurch verdampft. Für die Verdampfung ist eine ausreichend hohe Abgastemperatur notwendig. Bei der ersten Generation von AdBlue-Systemen lag diese bei 220°C, aber bereits 2014 waren Systeme bekannt, die mit 180°C auskamen^[8, Kapitel 1.4.2]. AdBlue verdampft dabei zu Ammoniak. Der Ammoniak muss sich mit den Abgasen durchmischen. Dazu befindet sich ein Mischer im Abgasrohr, der einen Wirbel verursacht.



Abbildung 2: AdBlue-Einfüllstutzen

Anschließend reagiert im SCR-Katalysator Ammoniak mit Stickoxiden zu Stickstoff und Wasser. Auch der SCR-Katalysator muss dazu eine gewisse Mindesttemperatur haben. Üblich ist eine Freigabe der AdBlue-Einspritzung, wenn der SCR-Katalysator 150°C erreicht. SCR-Katalysatoren können auch eine gewisse Menge Ammoniak speichern.

Hat man zu wenig Ammoniak, weil zu wenig AdBlue eingespritzt wird, bleiben zu viele Stickoxide übrig. Hat man zu viel Ammoniak, weil zu viel AdBlue eingespritzt wurde, bleibt Ammoniak übrig, und erzeugt einen unangenehmen Geruch. Heutzutage verfügen daher viele PKW mit AdBlue-System auch über einen sogenannten Ammoniak-Sperrkatalysator, d.h. über eine Abgasreinigung für Ammoniak, obwohl es bis inklusive Euro 6d keinen Grenzwert für Ammoniak-Emissionen bei PKW gibt¹¹. Fahrzeuge mit Ammoniak-Sperrkatalysator können eine Überdosierung im Bereich von einigen Prozent verwenden¹², um die Wirkung des Systems zu verbessern. An meinem eigenen Fahrzeug sehe ich Überdosierungen von bis zu 15 Prozent.

Für die Speicherung von Ammoniak gilt, dass SCR-Katalysatoren bei niedrigen Temperaturen viel mehr Ammoniak speichern können als bei hohen Temperaturen. Speichert man viel Ammoniak, und gibt der Fahrer dann Vollgas, würde sich so viel Ammoniak aus dem Katalysator lösen, dass auch nach der Reaktion mit Stickoxiden noch zu viel Ammoniak übrig bleibt. Speichert man zu wenig Ammoniak, funktioniert das System im Stadtverkehr nicht optimal, denn bei niedrigen Katalysatortemperaturen erreicht man die besten Ergebnisse dann, wenn relativ viel Ammoniak gespeichert ist¹³.

Die maximal erreichbare Umwandlungsrate wird vor allem durch die Katalysatortemperatur und die Raumgeschwindigkeit¹⁴ bestimmt. Dabei ist eine niedrige Katalysatortemperatur schlecht, eine mittlere Katalysatortemperatur gut, eine hohe Katalysatortemperatur wieder schlecht, und eine hohe Raumgeschwindigkeit ebenfalls schlecht.

Frühere Fahrzeuge arbeiteten oft so, dass sie die Menge an Stickoxiden im Rohabgas schätzen, und auf Basis dieser Schätzung bestimmen, wieviel Ammoniak notwendig ist. Die Menge an Stickoxiden, die bei der Verbren-

¹¹ Für LKW gilt ab Euro VI ein Grenzwert von 10 ppmv Ammoniak im Abgas

¹² Die Fachliteratur nannte im Jahr 2013 etwa 5 bis 10 Prozent Überdosierung für Systeme mit hoher Umwandlungsrate^[9]

¹³ Mein Fahrzeug scheint im Stadtverkehr mit etwa 0,3 g/l Ammoniak-Beladung zu arbeiten, bezogen auf das Katalysatorvolumen

¹⁴ Eine hohe Raumgeschwindigkeit bedeutet, dass sich die Abgase nur eine sehr kurze Zeit im Katalysator aufhalten. Macht man den Katalysator größer, dann halten sich Abgase länger im Katalysator auf, d.h. die Raumgeschwindigkeit sinkt

nung entsteht, kann jedoch nur schlecht geschätzt werden, und die Fachliteratur geht davon aus, dass mit dieser Methode Umwandlungsraten von bestenfalls 80 Prozent erreichbar sind^[8, Kapitel 3.7]. Neuere Fahrzeuge, die unter günstigen Umständen, z.B. gleichmäßige moderate Motorlast, nahezu 100 Prozent Umwandlung erreichen, verwenden einen Stickoxid-Sensor, um die Menge an Stickoxiden im Rohabgas zu messen.

Bei den ersten Fahrzeugen mit SCR-Katalysator wurde dieser im Unterflur eingebaut. Dabei ist jedoch die Mindesttemperatur ein Problem, besonders im Stadtverkehr. Dem kann entweder dadurch begegnet werden, dass ein motornaher NO_x-Speicherkatalysator in den ersten Minuten, und bei niedriger Last die Stickoxid-Nachbehandlung übernimmt (vor allem, aber nicht nur, bei BMW), oder dass eine zusätzliche SCR-Beschichtung auf den Partikelfilter aufgebracht wird (z.B. VW beim Passat Modelljahr 2015¹⁵). Im letzteren Fall hat man ein DPF/SCR-Kombigerät, welches motornah verbaut werden kann. Die Varianten können auch kombiniert werden. Vor allem bei Fahrzeugen der Abagsnorm Euro 6d finden sich welche, die motornah eine DPF/SCR-Kombination verwenden, und zusätzlich im Unterflur einen weiteren SCR-Katalysator haben.

Ein Stickoxid-Sensor nach dem SCR-Katalysator überwacht die korrekte Funktion. Misst dieser Sensor ungewöhnlich hohe Werte über eine längere Zeit, liegt eine Fehlfunktion vor. Das gilt auch, wenn der Sensor gar nichts misst, weil er defekt ist, oder unplausible Werte liefert. Eine solche Fehlfunktion kann theoretisch auch dadurch zustande kommen, dass ein Fahrer den AdBlue-Tank falsch befüllt hat. Neuere Fahrzeuge errechnen anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschall und der Temperatur im AdBlue-Tank die Harnstoffkonzentration auf 1 Prozentpunkt genau und bemerken diese Art von Fehlgebrauch sofort. Würde man eine ganz andere Flüssigkeit einfüllen, wäre die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschall außerhalb des vom Motorsteuergerät akzeptierten Bereichs, und es würde eine Fehlermeldung angezeigt. Bei dieser Art von Fehler im AdBlue-System wird die Restreichweite des Fahrzeugs begrenzt. Typisch sind 1.000 km, gesetzlich gefordert ist eine Begrenzung auf nicht mehr als die typische Reichweite mit einem vollen Dieseltank.

Loc.	Description	Actual
ID000075	Vehicle speed	0 km/h
ID003135	Sensor for reducing agent tank temperature: temperature	16.5 °C
ID003142	Remaining vehicle distance until reducing agent deficiency	3177.00 km
ID010049	Reducing agent fill level sensor: act. value	54.3 mm
ID010116	Consumed reducing agent	19009.311 g
ENG274021-ENG274330	Diesel Exhaust Fluid Sensor Output-DEF Concentration	32.75 %

Abbildung 3: Messwert des Sensors für Harnstoff-Konzentration

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, muss ein AdBlue-System so konstruiert sein, dass es bis mindestens -15°C funktioniert. AdBlue gefriert jedoch bei -11°C , und dehnt sich dabei um 7 Prozent aus. Zum einen bedeutet das, dass der Tank so konstruiert sein muss, dass eine Zapfpistole rechtzeitig abschaltet, so dass es beim anschließenden Einfrieren nicht zur Zerstörung des Tanks kommt. Desweiteren muss ein AdBlue-Tank beheizt sein. Es gibt keine Vorgabe dazu, wie diese Heizung aussehen muss, solange die Anforderungen aus Abschnitt 3.3 erfüllt sind. Eine Möglichkeit dazu ist eine elektrische Heizung, die dann nicht nur den Tank, sondern auch die Leitungen und die Fördereinheit beheizt.

Der AdBlue-Tank muss bei Bedarf vom Fahrer nachgefüllt werden. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, müssen Fahrzeuge so konstruiert sein, dass sie bei leerem AdBlue-Tank nicht mehr fahren¹⁶. Frühere Versuche, den AdBlue-Tank nur beim Service nachzufüllen, um den Fahrer nicht mit dem Befüllen eines Tanks zu überfordern, waren von Anfang an zum Scheitern verurteilt. Der Nachweis dazu ist ein wesentlicher Teil dieses Artikels.

Zum Nachfüllen des AdBlue-Tanks eignen sich Zapfsäulen. Hier gibt es welche für PKW und welche für LKW. Bei LKW-Zapfsäulen ist erstens im Tank ein Magnet erforderlich, der die Zapfsäule freischaltet. Dadurch soll verhindert werden, dass ein unaufmerksamer LKW-Fahrer eine größere Menge AdBlue in den Diesel-Tank füllt. Des Weiteren ist die Betankung an einer LKW-Zapfsäule sehr schnell, für viele PKW zu schnell. Es gibt jedoch PKW, die ausdrücklich vom Hersteller dafür freigegeben wurden, an einer LKW-Zapfsäule mit AdBlue betankt zu werden, und in denen sowohl der Magnet vorhanden ist, als auch die Geschwindigkeit der Betankung unproblematisch ist.

¹⁵ siehe VW SSP 540

¹⁶ Der Motor geht nicht während der Fahrt aus, er lässt sich jedoch nicht mehr Starten, wenn er abgestellt wurde

Kanister sind oft mindestens dreimal so teuer wie AdBlue an Zapfsäulen. Die erste PKW-Zapfsäule für AdBlue wurde in Europa im Jahr 2015 in Betrieb genommen[10], LKW-Zapfsäulen gab es jedoch schon deutlich länger. OMV berichtete 2004 darüber, den ersten Autohof mit AdBlue-Versorgung für LKW in Betrieb zu nehmen[11]. Total berichtete 2003 über integrierte AdBlue-Zapfsäulen[12]. PKW-Zapfsäulen hätten ebenfalls viel früher aufgebaut werden können, wenn der Bedarf eher entstanden wäre, zum Beispiel indem man von Anfang an Kunden zugetraut hätte, an einer Zapfsäule eine Flüssigkeit in einen Tank zu füllen. Oder man hätte einfach durchgängig das Tanksystem von LKW für AdBlue übernehmen können. Das Fehlen von Zapfsäulen für PKW vor 2015 ist also keine sinnvolle Ausrede für den falschen Ansatz, AdBlue nur beim Service nachzufüllen. In Abschnitt 5 zeige ich nun, warum man statt „falsch“ eigentlich „idiotisch“ sagen müsste.

5 DIE SELTSAME DISKUSSION UM DIE TANKGRÖSSE

5.1 Europa: Es gab nie zu kleine AdBlue-Tanks

Wie weiter oben schon angedeutet, glauben viele Journalisten, dass europäische Fahrzeuge zu kleine AdBlue-Tanks hatten. Journalisten argumentieren damit, dass größere Tanks notwendig gewesen wären, damit der Tank von einem Service zum nächsten reicht. Es wurde sogar behauptet, mit den „zu kleinen Tanks“ könne die Abgasreinigung nicht richtig funktionieren. Das ist jedoch schon deswegen Unsinn, weil gesetzlich keine nennenswerte Mindestreichweite gefordert wird¹⁷, und die Zwangsbe-füllung des AdBlue-Tanks beim Service ausschließlich Nachteile für den Kunden hat¹⁸.



Abbildung 4: Unerklärliche Faszination für Tankgrößen bei Journalisten

Das von Journalisten definierte Ziel, dass der AdBlue-Tank von Service zu Service reichen muss, ist per se falsch, und wird auch nicht davon richtiger, dass Autohersteller dasselbe für den Kunden nachteilige Ziel verfolgt haben. Folgendes spricht dagegen:

- **Absurde Preise:** Bereits im Jahr 2012 berichtete ein Audi-Fahrer in einem Forum, dass ihm inklusive Arbeitsleistung 125 Euro für 22 Liter AdBlue berechnet wurden^[13], d.h. rund 5,70 €/l. Das ist etwa das Zehnfache (!) des regulären Preises, den man damals beim Selber-Tanken hätte bezahlen müssen
- **Große Schwankungen im AdBlue-Verbrauch:** Der AdBlue-Verbrauch schwankt bei einem korrekt funktionierenden System sehr stark in Abhängigkeit vom Fahrprofil. Warum, dazu kommen wir noch weiter unten. Bei meinem eigenen Fahrzeug ist der AdBlue-Verbrauch bei 200 km/h 6-7x so hoch wie auf Langstrecke bei 120 km/h. Möchte man, dass der Tank von Service zu Service reicht, auch dann, wenn ein Fahrzeug häufig schnell fährt oder als Zugmaschine verwendet wird, müsste der AdBlue-Tank sehr groß ausgelegt werden. So groß, dass bei vielen anderen Fahrern bei jedem Service ein großer Teil des Tanks, den man für einen absurden Preis hat befüllen lassen, wieder abgelassen werden müsste, denn die Haltbarkeit von AdBlue ist begrenzt¹⁹. Müsste zum Beispiel im Schnitt die Hälfte entsorgt werden, nur damit er bei wirklich allen Fahrern von Service zu Service reicht, käme der Audi-Fahrer oben effektiv auf sagenhafte 11,40 € für einen Liter tatsächlich genutztes AdBlue.
- **Fahrzeugmasse:** Ein größerer Tank macht das Fahrzeug schwerer, und ggf. den Kofferraum kleiner
- **„Steinschlag“:** Ein größerer Tank muss sehr robust konstruiert werden. Ist der Inhalt zum Teil gefroren und macht der Fahrer eine Vollbremsung, schlagen gefrorene Brocken gegen die Wand, oder gegen einen der Sensoren im Tank, oder gegen die Pumpe. Der Tank und dessen Bauteile müssen dem widerstehen.
- **Heizung:** Ein größerer Tank benötigt mehr Heizleistung, um die Kaltstartanforderungen erfüllen zu können, oder muss als Zweikammersystem konstruiert sein: eine kleine Kammer, die schnell aufgetaut wird, aber nur für wenige hundert Kilometer reicht, und den Rest, der länger brauchen darf.

Vorteile gibt es dagegen gar keine, wenn man annimmt, dass ein Fahrer, der ohne fremde Hilfe Kraftstoff in den Kraftstofftank füllen kann, und der ohne fremde Hilfe Scheibenwaschwasser in den Tank für das Scheibenwasch-

¹⁷ Indirekt werden 2.400 km Mindestreichweite gefordert, weil sich ein Fahrzeug nach der Selbstdeaktivierung wegen leerem AdBlue-Tank erst wieder aktivieren darf, wenn AdBlue für 2.400 km eingefüllt wurde

¹⁸ Die rechtliche Situation dazu wurde bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt

¹⁹ Im Handbuch meines Fahrzeugs sind 4 Jahre angegeben, es gibt aber auch Fahrzeuge, bei denen 2 Jahre angegeben sind. Bei hohen Temperaturen sinkt die Haltbarkeit.

wasser füllen kann, auch AdBlue in den AdBlue-Tank füllen kann. Das gilt umso mehr, da Fahrer von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ohnehin regelmäßig an eine Tankstelle fahren müssen.

Der ADAC vertritt auch im Jahr 2023 noch die Einschätzung, dass ein solches System im Idealfall so ausgelegt sei, dass der Tank *im Regelfall* von Service zu Service reicht, und nur bei der Inspektion in der Werkstatt nachgefüllt werden muss^[14]. Im Regelfall heißt dann vermutlich: Entschiedene Gegner eines Tempolimits sowie Wohnwagen-Urlauber müssten selber nachfüllen, durchschnittliche Fahrer nicht. Allerdings ist mir auch hier der Vorteil nicht klar, denn das Ergebnis davon ist wiederum, dass eine Werkstatt absurde Kosten dafür in Rechnung stellt. Im Jahr 2023 berichtete der Fahrer eines Škoda Octavia IV, dass ihm über 90 € für 10 Liter berechnet wurden^[15].

Die ohne Zweifel beste Lösung, und technisch einzig sinnvolle Lösung, ist die, die in den Wartungsanweisungen meines Fahrzeugs angegeben ist:

Reduktionsmittel (AdBlue®): Nachfüllen; **nur auf Kundenwunsch**

Denn, um das nochmal klar zu stellen, es geht darum, eine Flüssigkeit in einen Tank zu füllen.

5.2 USA: AdBlue-Tanks waren *vielleicht* tatsächlich zu klein

Es gibt nur eine einzige mögliche Rechtfertigung dafür, tatsächlich zu versuchen, mit einer AdBlue-Füllung von Service zu Service zu kommen. Das ist dann der Fall, wenn es gesetzlich bzw. von Behörden vorgeschrieben ist, so wie das in den USA der Fall war. In solchen Fällen muss man einfach alle oben genannten Nachteile in Kauf nehmen.

In den USA gab es keine *explizite* Vorschrift zu dem Thema, stattdessen hat die EPA in dieser Sache Einzelfallentscheidungen getroffen. Für PKW hatte die EPA zunächst argumentiert, dass ein AdBlue-System aufhört zu funktionieren, wenn der AdBlue-Tank leer ist, dass demzufolge die Befüllung des AdBlue-Tanks eine kritische Wartungsmaßnahme am AdBlue-System ist, und dass kritische Wartungsmaßnahmen am Abgassystem nicht dem Endkunden auferlegt werden dürfen. Erst im Juli 2014 hat die EPA dann grundsätzlich eine Mindestreichweite von nur noch 4.000 Meilen vorgeschrieben^[16]. Die Änderung hat die EPA damit begründet, dass die Verfügbarkeit von AdBlue bis dahin ausreichend hoch geworden ist, und man daher die bisherige Einschätzung ändern könne.

Unabhängig davon heißt das noch lange nicht, dass die Tanks zu klein waren. Man könnte genauso gut sagen, dass die innermotorischen Maßnahmen zur Vermeidung von Stickoxid-Produktion nicht ausreichend gut waren. Anders als in Europa ist es in den USA unüblich, mit einem PKW einen Anhänger zu ziehen, der genauso schwer ist wie der PKW, und die Tempolimits verhindern lang anhaltende hohe Last. Dennoch kann man sagen, dass für die USA die Aussage, die AdBlue-Tanks seien zu klein gewesen, zumindest deutlich mehr Sinn macht als für Europa.

Wie die Motorlast, die Stickoxid-Produktion im Motor und der AdBlue-Bedarf zusammenhängen, sehen wir noch in den Abschnitten 6 und 7.

6 DIE ABGASRÜCKFÜHRUNG

An dieser Stelle müssen wir die Abgasrückführung (AGR) einschieben. Ohne zu stark vorgreifen zu wollen, hängt der AdBlue-Verbrauch davon ab, wie viele Stickoxide bei der Verbrennung entstehen, und genau da kommt die Abgasrückführung ins Spiel. Sie dient dazu, sauerstoffarmes Abgas in den Motor zu leiten. Dadurch sinkt der Sauerstoffgehalt im Motor unter das Niveau von 21 Prozent, und die Verbrennungstemperatur sinkt. Als Folge entstehen weniger Stickoxide bei der Verbrennung von Kraftstoff.

Viele Journalisten scheinen zu glauben, dass dabei Stickoxide erneut verbrannt werden. Ein Beispiel dafür ist unter [17] zu finden:

Diese Mechanismen setzen die Abgasreinigung in Dieselfahrzeugen aus, bei der ein Teil der Abgase in den Motor zurückgeführt und erneut verbrannt wird. Die Fahrzeuge stoßen dann mehr Stickoxide aus.

Das ist jedoch Unsinn, denn bei Verbrennungsvorgängen werden den verbrannten Stoffen Sauerstoffatome hinzugefügt. Könnte man Stickoxide noch einmal verbrennen und beim Verbrennen von Stickoxiden (NO und NO₂) den Sauerstoff wieder von den Stickstoffatomen lösen, dann wäre das die einzige Verbrennung im Universum, bei der Sauerstoffatome entfernt werden.

Die Darstellung, dass die Abgasrückführung Abgase von Stickoxiden reinige, ist eine Falschinformation²⁰. Sie verringert die Neuentstehung, sie reinigt aber nicht. Damit ist auch die Darstellung, dass Euro 5 - Diesel-PKW ihre Abgasreinigung abschalten, eine Falschinformation, denn bei den allermeisten Euro 5 - Diesel-PKW basiert die Stickoxid-Minderung nur auf der Abgasrückführung. Aus der Falschinformation, dass „die Abgasreinigung“ abgeschaltet wird, wurde von einigen Interessensverbänden eine weitere Falschinformation generiert, nämlich dass angeblich auch der Partikelaustritt zu hoch wäre. Diese Falschinformation wurde in ausführlichen Tests, die auch die Regeneration des Partikelfilters mit einschlossen, widerlegt[18, siehe auch 'English version'].

Viele Journalisten lassen sich auch nicht dadurch von dieser Behauptung abbringen, dass Richter es besser wissen[19]. Man beachte die korrekte Verwendung der Begriffe „Emissionskontrollsystem“ oder „Nachbehandlung“, die hier im Urteil zu sehen ist. Bei dieser Textstelle geht es um die Fragestellung, ob die Abgasrückführung zum Emissionsminderungssystem gehört:

Mit seiner zweiten Frage möchte das vorliegende Gericht wissen, ob Art. 3 Nr. 10 der Verordnung Nr. 715/2007 dahin auszulegen ist, dass unter den Begriff „Emissionskontrollsystem“ im Sinne dieser Bestimmung nur die Technologien und die Strategie der Nachbehandlung von Abgasen fallen, mit denen die Emissionen im Nachhinein, d. h. nach ihrer Entstehung, verringert werden, oder dahin, dass darunter auch diejenigen fallen, mit denen – wie mit dem AGR-System – die Emissionen im Vorhinein, d. h. bei ihrer Entstehung, verringert werden.

Einleitend ist darauf hinzuweisen, dass es zwei Strategien gibt, die von den Herstellern in ihren Dieselfahrzeugen eingesetzt werden können, um die Schadstoffemissionen zu verringern. Zum einen handelt es sich dabei um die sogenannte „motorinterne Strategie“ wie das AGR-System, die darin besteht, die Entstehung von Schadstoffen im Motor selbst zu verringern, und zum anderen um die sogenannte „Nachbehandlung von Abgasen“, die darin besteht, auf die Abgasemissionen nach ihrer Entstehung einzuwirken.

...

Insoweit ergibt sich aus der Vorlageentscheidung, dass das AGR-System eine Einrichtung ist, die allein zur Verringerung und damit zur Kontrolle der NO_x-Emissionen dient. Infolgedessen kann aus

²⁰ Eine Fehlinformation wäre es nur dann, wenn die Autoren nicht wissen, dass bei einer Verbrennung Sauerstoff hinzugefügt wird

Art. 3 Nr. 10 der Verordnung Nr. 715/2007 nicht geschlossen werden, dass eine solche Einrichtung technisch nicht zum Emissionskontrollsystem gehören könnte, weil sie es ermöglicht, die Menge der NO_x-Emissionen anhand im Voraus festgelegter Parameter zu kontrollieren.

Denkt man sich die doppelte Verneinung im letzten Absatz weg, dann hat das Gericht entschieden, dass die Abgasrückführung zum Emissionskontrollsystem gehört. Journalisten schlussfolgern daraus, dass sie Abgase reinigt. Die Schlussfolgerung ist jedoch falsch, da Abgasreinigung nur eine von zwei Formen der Emissionskontrolle darstellt (siehe Abschnitt [2 Begriffe](#)).

6.1 Die Hochdruck-Abgasrückführung

Die Hochdruck-Abgasrückführung (HD-AGR) ist die älteste Form der Abgasrückführung. Die Abgase werden direkt am Abgaskrümmern, noch vor der Turbine des Turboladers, entnommen und in den Motor zurückgeleitet. Diese Abgase enthalten eine große Menge Feinstaub, die mit der Zeit das Ventil der HD-AGR, aber auch die Ansaugbrücke verkoken lässt. Der Feinstaubgehalt ist auch der Grund, warum das Abgas nicht in den Verdichter des Turboladers geleitet werden darf, denn dadurch würde das Verdichterrad beschädigt. Dadurch, dass die Abgase noch vor der Turbine des Turboladers entnommen werden, fehlt dem Turbolader dann Abgasdruck. Das Fahrzeug spricht schlecht an, während das Ventil der HD-AGR geöffnet ist. Und dadurch, dass die Abgase erst kurz vor dem Brennraum eingeleitet werden, ist die Durchmischung der Abgase mit Frischluft schlecht.

Der Vorteil der Hochdruck-Abgasrückführung liegt vor allem daran, dass ihre Konstruktion relativ einfach ist, und durch den kurzen Weg des Abgases eine schnellere Reaktion möglich ist.

Eine ungekühlte Hochdruck-Abgasrückführung wird heute vor allem verwendet, um gezielt Warmluft zuzuführen, zum Beispiel, um den Motor schneller aufzuwärmen, oder um bei niedriger Last das Temperaturniveau insgesamt etwas zu erhöhen, und so ein Auskühlen der Abgasnachbehandlung zu vermeiden. Für das Ziel, die Stickoxid-Produktion zu verringern, wird die Hochdruck-Abgasrückführung nur noch begrenzt verwendet.

6.2 Die Niederdruck-Abgasrückführung

Die Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR) entnimmt das Abgas erst hinter der Turbine des Turboladers und hinter dem Partikelfilter, so dass dem Turbolader kein Abgasdruck genommen wird, und das zurückgeführte Abgas fast feinstaubfrei ist. Dadurch verkockt die ND-AGR nicht, und sie lässt auch die Ansaugbrücke nicht verkoken.

Außerdem kann das Abgas, anders als bei der HD-AGR, in den Verdichter des Turboladers geführt werden. Insgesamt wird dadurch eine bessere Durchmischung mit der Frischluft erreicht, so dass mit höherer Rückführrate als bei einer HD-AGR gearbeitet werden kann. Da die zurückgeführten Abgase kälter sind, wäre bereits bei gleicher Rückführrate die Wirkung deutlich besser. Dazu kommt, dass die Abgase nicht nur durch den ND-AGR-Kühler, sondern zusätzlich auch durch den Ladeluftkühler gekühlt werden.

Durch die längeren Wege des Abgases reagiert die ND-AGR viel langsamer als die HD-AGR. Außerdem gibt es zusätzlich technische Herausforderungen, wie die Bildung von Kondensat. Von der Konstruktion her ist eine ND-AGR deutlich aufwendiger und deutlich teurer als eine HD-AGR.

6.3 Die Mehrwege-Abgasrückführung

Wird eine HD-AGR mit einer ND-AGR kombiniert, spricht man von einer Mehrwege-Abgasrückführung. Dabei ist die ND-AGR gekühlt. Die HD-AGR kann gekühlt oder ungekühlt sein. Ist die HD-AGR ebenfalls gekühlt, kann eine zusätzliche Bypass-Klappe die Möglichkeit schaffen, zwischen gekühlter und ungekühlter HD-AGR hin- und herzuschalten²¹.

Durch diese Kombination von HD-AGR und ND-AGR kann man die Vorteile beider Abgasrückführungen kombinieren. Wird die HD-AGR insgesamt nur wenig verwendet, bleibt die Verkokung im akzeptablen Rahmen.

Spätestens bei Diesel-PKW der Abgasnorm Euro 6d-TEMP ist die Mehrwege-Abgasrückführung der Stand der Technik, sie kam jedoch auch schon bei Fahrzeugen mit Euro 6b zum Einsatz.

6.4 Die innere Abgasrückführung

Anstatt einer Hochdruck-Abgasrückführung kann auch eine innere Abgasrückführung verwendet werden. Dabei wird die Rate der zurückgeführten Abgase nicht über ein AGR-Ventil gesteuert, sondern die Steuerzeiten werden über die Nockenwellenverstellung so verändert, dass die Auslassventile etwas später schließen. Beim nächsten Ansaugtakt wird dann ein Teil der Abgase, die gerade aus dem Zylinder ausgestoßen wurden, zurückgesaugt. Die innere Abgasrückführung ist bei Benzinern deutlich verbreiteter als bei Diesel-Fahrzeugen, wird aber zum Beispiel von Mazda auch in Dieselmotoren verwendet^[20], bei ca. 37:00].

6.5 Prinzipielle Limitierung

Viele Journalisten, und auch manche Experten, behaupteten, dass die Abgasrückführung auch bei hoher Last genauso arbeiten muss wie bei geringer Motorlast, oder dass sie auch in großer Höhe genauso arbeiten muss wie auf Höhe des Meeresspiegels. Am Beispiel der hohen Last unter ^[21]:

„Wir haben festgestellt, dass nicht nur die Drehzahl, sondern auch das Drehmoment, also die Last, dafür entscheidend ist, ob die Abgasrückführung ein- oder ausgeschaltet ist. Wenn sie ausgeschaltet ist, steigen die Emissionen an Stickoxiden drastisch an. Und das ist nach meiner Einschätzung von der europäischen Richtlinie nicht gedeckt“, erklärt der internationale Verkehrsexperte Axel Friedrich und Leiter der Abgasmessungen im EKI-Projekt.

Die Einschätzung ist falsch. Zunächst einmal ist die Darstellung der Umwelthilfe, dass 3.500 Umdrehungen pro Minute eine normale Betriebsbedingung für Dieselmotor seien, falsch. Es handelt sich um eine Drehzahl, die bei starken Beschleunigungen wie dem Auffahren auf eine Autobahn vorkommen kann²², aber keine, die man unter normalen Umständen länger als ein paar Sekunden hält. Das ändert sich auch nicht dadurch, dass in dem Artikel aufgezählt wird, welche Geschwindigkeit man bei 3.500 Umdrehungen pro Minute im dritten, vierten und fünften Gang hat, aber die höheren Gänge vergisst zu erwähnen.

Aber auch die Einschätzung zum Einfluss der Last ist falsch. Das Ziel der Abgasrückführung besteht, wie oben erwähnt, darin, den Sauerstoffanteil im Motor zu senken. Wird aber vom Motor eine hohe Leistung abgefordert,

²¹ Laut VW SSP 581 gibt es im Motor EA897 der 2. Generation eine gekühlte HD-AGR mit Kühler-Bypass und eine gekühlte ND-AGR. Laut VW SSP 595 ist im EA288 evo nur die ND-AGR gekühlt.

²² Mein Škoda Superb hat im 7. Gang bei Tacho 210 km/h, etwa echten 200 km/h, ziemlich genau 3.000/min. Um 3.500/min zu erreichen, müsste man Tacho 245 km/h fahren. Mein vorheriges Fahrzeug, ein Seat Ibiza 6J 1.9 TDI, wäre im 5. Gang bei 3.500/min echte 196 km/h gefahren, also 10 km/h über der angegebenen Höchstgeschwindigkeit

muss er viel Kraftstoff verbrennen. Um viel Kraftstoff verbrennen zu können, benötigt er aber viel Sauerstoff. Wenn er viel Sauerstoff benötigt, darf aber nicht so viel sauerstoffarmes Abgas zugemischt werden.

Ähnliches gilt in großer Höhe. Ist die Luft dünner und generell weniger Sauerstoff vorhanden, darf auch nur weniger Abgas zugemischt werden. Gerichte haben entschieden, dass die Abgasgrenzwerte auch in 1.000 Metern über dem Meeresspiegel gelten, es ist und bleibt aber Unsinn, daraus die technische Forderung herzuleiten, dass die Abgasrückführung bei dünnerer Luft genauso arbeiten muss wie auf Höhe des Meeresspiegels. Das war auch bereits 2013 bekannt. Zum Beispiel sagt [22], dass der AdBlue-Verbrauch in großer Höhe oder bei niedrigen Außentemperaturen bei den vorgestellten LKW-Motoren mit Abgasrückführung steigt, und das kann nur daher kommen, dass die Abgasrückführung dort luftdruckabhängig und temperaturabhängig arbeitet.

Bei niedriger Drehzahl gilt eine ähnliche logisch zwingende Folge wie in großer Höhe. Da ein Abgasturbolader erst ab einer gewissen Mindestdrehzahl arbeitet, und die Aufgabe eines Abgasturboladers darin besteht, Luft in den Brennraum zu pressen, ist bei sehr niedriger Drehzahl zu wenig Luft und zu wenig Sauerstoff im Motor, um Leistung abzurufen. Folglich muss, wenn man bei niedriger Drehzahl Gas gibt, die Abgasrückführung komplett, oder zumindest nahezu komplett, deaktiviert werden.

Für das Verhalten bei hoher Last einerseits und bei Beschleunigungen bei niedriger Drehzahl andererseits zeige ich weiter unten in Abschnitt 10, vor allem in Abschnitt 10.5.1 [Abhängigkeit der Abgasrückführung von der Last](#) und in Abschnitt 10.5.4 [Beschleunigung](#), dass sich daran auch bei meinem modernen Fahrzeug der Abgasnorm Euro 6d nichts geändert hat. Das ist auch nicht verwunderlich, denn es hat sich nichts daran geändert, dass Sauerstoff benötigt wird, um etwas zu verbrennen.

Hierzu noch eine allgemeine Bemerkung: die Abgasverordnung enthält keine Pflicht zur Verwendung eines AdBlue-Systems. Die Abgasverordnung sagt jedoch auch nicht, dass es technisch möglich sei, einen Euro 5 - oder gar Euro 6 - Diesel-PKW ohne AdBlue-System zu konstruieren. Anhand der beschränkten Möglichkeiten, die die Abgasrückführung bietet, hätten die Autohersteller die Schlussfolgerung ziehen müssen, dass ein AdBlue-System die beste technische Lösung ist, um die geltenden Abgasgrenzwerte zumindest bei durchschnittlicher Fahrweise einzuhalten. Das gilt umso mehr, als dass zur Zeit der ersten Euro 5 - Fahrzeuge im Jahr 2007 auch die Niederdruck-Abgasrückführung noch nicht serienreif war.

6.6 Fahrzeuge ohne Abgasrückführung

Auf Grund der vielen Probleme, die es vor allem mit der Hochdruck-Abgasrückführung bei Fahrzeugen ohne Niederdruck-Abgasrückführung gibt, kam zumindest in Foren immer mal wieder die Frage auf, ob man die Abgasrückführung nicht einfach weglassen könnte, wenn man ein AdBlue-System hat.

Es gibt hier zwei Herausforderungen. Die eine ist die generelle Umwandlungsrate. In der Fachliteratur wurde 2014 geschätzt, dass ein AdBlue-System im Durchschnitt 98 Prozent Umwandlungsrate erreichen muss, damit man die Abgasrückführung für LKW der Abgasnorm Euro VI weglassen kann[8, Kapitel 1.3.1]. Zumindest Scania und Iveco bieten tatsächlich solche Fahrzeuge an, und Scania gibt an, dass diese Fahrzeuge einen AdBlue-Verbrauch von 6 Prozent des Kraftstoffverbrauchs haben[23]. Iveco gibt an, dass die Umwandlungsrate des SCR-Systems bei 97 Prozent liegt[24]. Scania spricht bei den V8-Motoren mit 16 Litern Hubraum von 3 parallelen SCR-Katalysatoren und 3 parallelen Ammoniak-Sperrkatalysatoren[25]. Bei der Anzahl der Katalysatoren geht es um die Raumgeschwindigkeit. Verteilt man den Abgasstrom auf mehrere Katalysatoren, halten sich die Abgase deutlich länger in einem Katalysator auf, und die maximal bei ausreichender AdBlue-Dosierung erreichbare Umwandlungsrate steigt.

Die Werte von 3 Prozent (mit Abgasrückführung) und 6 Prozent (ohne Abgasrückführung) bei Scania aus dem Jahr 2014 sind deswegen interessant, weil das bedeutet, dass Journalisten, aber auch „Experten“, noch Jahre danach ver-

sucht haben, den AdBlue-Verbrauch von Euro VI-LKW ohne Abgasrückführung auf PKW mit Abgasrückführung zu übertragen.

Die andere ist das Kaltstartverhalten. Fahrzeuge dürfen in einem Abgastest, der eine gewisse Strecke andauert, eine gewisse maximale Menge an Stickoxiden ausstoßen. Der WLTP beinhaltet zum Beispiel eine Strecke von 23 Kilometern, was bei einem Grenzwert von 80 mg NO_x/km für PKW mit Euro 6 bedeutet, dass auf der gesamten Fahrt maximal 1.840 mg Stickoxide ausgestoßen werden dürfen. Ein Fahrzeug, das dieses Budget bereits auf dem ersten Kilometer überschreitet, kann den Test nicht mehr bestehen, und kann auch nicht damit argumentieren, dass danach die Umwandlungsrate des AdBlue-Systems sehr hoch ist. Würde ein Fahrzeug auf dem ersten Kilometer die Hälfte dieses Budgets aufbrauchen, müsste es auf dem Rest der Strecke einen Wert von 42 mg NO_x/km einhalten, was bei Rohemissionen von 1 g NO_x/km immer noch einer Umwandlungsrate von 96 Prozent entspricht. Für einen PKW ohne Abgasrückführung wäre dieser Wert von 1 g NO_x/km in den Rohemissionen aber eine sehr vorsichtige Schätzung. Wahrscheinlich würden wir hier auf die gleichen 98 Prozent kommen, die ich oben für LKW mit Euro VI ohne Abgasrückführung erwähnt habe.

In Anbetracht dessen, dass die Niederdruck-Abgasrückführung das Hauptproblem früherer Abgasrückführungssysteme, nämlich die Verkokung, löst, gehe ich davon aus, dass Diesel-PKW mit Euro 6- oder gar Euro 7 ohne Abgasrückführung ein unverhältnismäßig kompliziertes und großes AdBlue-System hätten. Die Variante, eine Mehrwege-Abgasrückführung einzusetzen, ist hier vermutlich besser bzw. ausreichend gut und ausreichend haltbar.

7 DIE CHEMISCHEN REAKTIONEN IM ADBLUE-SYSTEM

In diesem Abschnitt geht es nun um die chemischen Reaktionen. Aus den chemischen Reaktionen, die in einem AdBlue-System stattfinden, lässt sich berechnen, wieviel AdBlue für eine bestimmte Menge an Stickoxiden benötigt wird.

7.1 Zusammensetzung von AdBlue

AdBlue ist gemäß DIN 70070 bzw. ISO 22241 eine Lösung aus 32,5 Masseprozent Harnstoff $((\text{NH}_2)_2\text{CO})$ und 67,5 Masseprozent demineralisiertem Wasser (H_2O). Die molaren Massen betragen 60 Gramm für Harnstoff und 18 Gramm für Wasser. Um also 32,5 Masseprozent Harnstoff und 67,5 Masseprozent Wasser zu haben, muss 1 Mol Harnstoff (60 Gramm) in 6,92 Mol Wasser (124,6 Gramm) gelöst sein.

7.2 Gewinnung von Ammoniak aus AdBlue



Wie man sieht, erhält man aus 1 mol Harnstoff (60 g) und 1 mol Wasser (18 g) hier 2 mol Ammoniak. Die übrigen 5,92 mol Wasser (106,6 g) reagieren nicht, sondern sind einfach so da. Ammoniak hat eine molare Masse von 17 g/mol, d.h. man erhält 34 g Ammoniak aus 184,6 g AdBlue. Somit erhält man $\frac{34}{184,6}$ g Ammoniak aus 1 g AdBlue. Mit einer Dichte von 1,09 g/cm³ ergibt sich, dass man 1 g Ammoniak aus 4,98 ml AdBlue erhält. Wir können also festhalten:

Satz 1. *Man benötigt 4,98 ml AdBlue für die Gewinnung von 1 g Ammoniak.*

Für die meisten Betrachtungen, vor allem, wenn man sowieso nur schätzen will, genügt es, dies auf 5 ml zu runden.

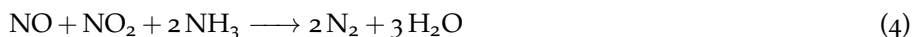
Da AdBlue erstmals im Jahr 2005 normiert wurde, hätte ein Experte dies spätestens 2005 ausrechnen können. Da AdBlue jedoch schon einige Jahre vorher praktisch verwendet wurde, kann man im Prinzip auch sagen, dass ein Experte dies bereits 2002 gekonnt hätte.

7.3 Die SCR-Reaktionen zur Reduktion von Stickoxiden

In Fahrzeugen sind folgende Reaktionen relevant²³:



²³ Vom Prinzip her lässt sich diese Aussage mindestens bis 2002 zurückverfolgen^[26]. Damals war die wesentliche Erkenntnis, dass eine Erhöhung des NO_2 -Anteils im Rohabgas notwendig ist, um die Technik für Fahrzeuge wesentlich zu verbessern. Zu dieser Zeit kamen gerade die ersten LKW mit AdBlue-Technik auf den Markt



Die Reaktion 4 läuft dabei sehr viel schneller ab als 3. Dieselmotoren produzieren jedoch fast nur NO, und fast kein NO₂. Je nachdem, welcher Katalysatortyp genau eingesetzt wird, muss ein mehr oder weniger großer Anteil des NO zu NO₂ oxidiert werden. Mehr oder weniger, weil, je nach Katalysatortyp, auch im SCR-Katalysator selbst ein Teil des NO zu NO₂ oxidiert werden.

Da sowohl Sauerstoff für die Oxidation von NO zu NO₂, als auch für die Reaktion 3 notwendig ist, funktioniert die AdBlue-Technik nur, wenn Sauerstoff im Abgas vorhanden ist.

In beiden Fällen wird 1 mol Ammoniak (17 g) pro 1 mol Stickoxide (46 g) benötigt:

Satz 2. *Man benötigt 17 g Ammoniak für 46 g Stickoxide.*

Da man 4,98 ml AdBlue benötigt, um 1 g Ammoniak zu gewinnen (Satz 1), benötigt man 84,66 ml AdBlue für 17 g Ammoniak, also 84,66 ml AdBlue für 46 g Stickoxide, und somit 1 l AdBlue für 543 g Stickoxide. Wir können also festhalten:

Satz 3. *Man benötigt 1 Liter AdBlue für 543 Gramm Stickoxide.*

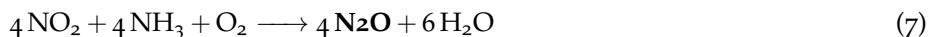
Meist reicht es, diesen Wert auf 540 g zu runden.

Und daraus folgt: Der AdBlue-Verbrauch kann für zukünftige Abgasnormen nur dann nennenswert steigen, wenn die Stickoxid-Produktion nennenswert steigt. Es gibt jedoch keinen vernünftigen Grund, warum sie das tun sollte. Man hätte aus den Emissionen schlussfolgern können, wie viel AdBlue „eingespart“ wurde, und hätte gemerkt, dass man so nie und nimmer auf 5 Prozent des Kraftstoffverbrauchs kommt, erst recht nicht auf 8 Prozent.

Da sowohl die chemischen Reaktionen als auch die Zusammensetzung von AdBlue bis 2002 zurückverfolgt werden können, kann man sagen, dass der Verbrauch von 1 Liter AdBlue für 543 Gramm Stickoxide für einen Experten bereits im Jahr 2002 ermittelbar gewesen wäre.

7.4 Weitere mögliche Reaktionen

Würde man den NO₂-Anteil zu weit erhöhen, dann würden auch folgende Reaktionen stattfinden:



Da Lachgas (N₂O) ein sehr starkes Treibhausgas ist, muss die Entstehung von Lachgas vermieden werden. Das erreicht man dadurch, dass man von vornherein verhindert, dass mehr NO₂ als NO im Rohabgas ist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, findet weder 5 noch 6 noch 7 statt. Ohne Überschuss von NO₂ ist die Menge an Lachgas, die entsteht, vernachlässigbar gering.

Die folgende Reaktion kommt zwar ohne Sauerstoff aus, ist aber so langsam, dass sie in Fahrzeugen nicht verwendet werden kann:



Folgende Reaktion nennt man „Ammoniak-Oxidation“. In diesem Fall wird Ammoniak verbraucht, ohne dass Stickoxide dabei reduziert werden:



Es gibt weitere Reaktionen der Ammoniak-Oxidation, die sogar noch unerwünschtes Lachgas produzieren, aber in Fahrzeugen kommen schon lange SCR-Katalysatoren zum Einsatz, bei denen Ammoniak-Oxidation zumindest keine unerwünschten Nebenprodukte bildet[8, Kapitel 14.2.2]. Ammoniak-Oxidation ist nur bei höheren Temperaturen ein Problem.

8 ADBLUE-VERBRAUCH UND KOSTEN

8.1 Übertragung der Berechnung auf Euro 5 - Fahrzeuge

Das Umweltbundesamt berichtete im Jahr 2017, dass Diesel-PKW der Abgasnorm Euro 5 im Durchschnitt etwa 900 mg NO_x/km ausstoßen[27]. Zwei Jahre später erhöhte es den Wert auf 950 mg/km[28], vermutlich, weil die Fahrzeuge zwei Jahre älter geworden sind und gewisse Verschlechterungen im Laufe der Zeit nicht ungewöhnlich sind. Aber auch vor 2017 gab es solche Daten bereits, nur hat das Umweltbundesamt sie nicht in Pressemeldungen der breiten Öffentlichkeit leicht zugänglich gemacht.

In Abschnitt 5 hatte ich angekündigt, auf die Schwankungsbreite einzugehen. Tests am selben Fahrzeug bei sommerlichen und winterlichen Bedingungen, oder auf gerader Strecke und bergauf, zeigen die angekündigte hohe Schwankungsbreite. Mit einem Eisbeutel am Temperatursensor konnte die Umwelthilfe die Emissionen eines Volvo XC60 von 736 mg/km auf 2.148 mg/km erhöhen[29]. Der letztere Wert bezieht sich auf eine Temperatur, bei der das Fahrzeug die Abgasrückführung komplett abschaltet. Bei einem BMW 525d ermittelte die Umwelthilfe einen Wert von 5.847 mg NO_x/km an einer Steigung[30]. Selbst, wenn auf der anschließenden Gefällestrecke (d.h. im Sinne einer Hin- und Rückfahrt) gar kein Kraftstoff verbraucht wird und gar keine Schadstoffe entstehen, käme ein Durchschnitt von gut 2.900 mg/km heraus. Und während man bei der Temperaturabhängigkeit noch argumentieren kann, dass eine technisch bessere Lösung vielleicht möglich gewesen wäre, ist eine solche Argumentation bei Fahrten mit hoher Last nicht möglich. Eine Verringerung der Stickoxid-Produktion unter solchen Bedingungen erfordert eine Niederdruck-Abgasrückführung, die bei der Einführung der ersten Euro 5 - PKW im Jahr 2007 noch gar nicht serienreif war. Ein Experte hätte also gewusst, dass bei Fahrzeugen ohne Niederdruck-Abgasrückführung schon bei etwas höherer Last die Stickoxid-Produktion stark ansteigt.

Nun gibt es nur sehr wenige Euro 5-PKW mit AdBlue-System, und auch nur sehr wenige mit einem Speicherkatalysator. Das heißt einfach, dass die Emissionen von Euro 5 - Fahrzeugen etwa genauso hoch sind wie die Stickoxid-Produktion im Motor. Man kann sich also sehr leicht überlegen, wie viel AdBlue die Fahrzeuge hätten verbrauchen müssen, wenn sie ein AdBlue-System eingesetzt hätten, um die Menge an produzierten Stickoxiden auf die erlaubten 180 mg/km zu verringern.

Wie oben gezeigt, braucht man 1 Liter AdBlue für 543 Gramm Stickoxide (siehe Satz 3). Wenn wir also annehmen, dass die Technik zur Verringerung der NO_x-Produktion bei Euro 5 nicht besser war als das, was wir in den in Umlauf befindlichen Fahrzeugen sehen, dann hätte ein AdBlue-System im Schnitt 1,4 l pro 1.000 km verbrauchen müssen, um die Emissionen von den beobachteten 950 mg auf die erlaubten 180 mg zu verringern. Gleichzeitig wird auch klar, dass der Verbrauch bei Minusgraden sehr viel höher hätte sein müssen, rechnerisch beim Volvo rund 3,6 l pro 1.000 km. Beim oben erwähnten BMW 525d im Gebirge wären schon Werte oberhalb von 5 l/1000 km herausgekommen. Bei solchen Werten muss man aber berücksichtigen, dass eine Umwandlungsrate von 92 Prozent notwendig wäre, um die Emissionen von 2.148 mg/km auf 180 mg/km zu verringern, und 92 Prozent Umwandlungsrate wäre zu Euro 5 - Zeiten ein sehr anspruchsvolles Vorhaben gewesen. Die notwendigen 81 Prozent, um von 950 mg/km auf 180 mg/km zu kommen, wären aber auch zu Euro 5 - Zeiten technisch machbar gewesen.

Damit ist klar: Die Vorstellung von „Experten“, es könne es festes Verhältnis zwischen AdBlue- und Diesel-Verbrauch geben (z.B. 5 %, oder gar 8 %), aus dem man eine Tankgröße ermitteln kann, die sicherstellt, dass Werkstätten absurde Preise beim Service für das Befüllen des AdBlue-Tanks verlangen können, entbehrt jeder Grundlage. Schließlich gibt es Fahrer, die im Flachland pendeln, Fahrer, die im Gebirge pendeln, und Fahrer, die häufiger mit einem Wohnwagen Urlaub machen. Und auch wenn viele dieser konkreten Messungen im Jahr 2016 noch gar nicht vorlagen, so war das Grundprinzip durchaus klar. Ein Experte hätte gewusst, dass unter hoher Last, zum Beispiel bergauf, die Stickoxid-Produktion im Motor massiv ansteigt, d.h. viel stärker als der Kraftstoffverbrauch.

8.2 Abhängigkeit von der Art der Abgasrückführung

Wie in Abschnitt 6.2 erklärt, lässt sich mit der Niederdruck-Abgasrückführung eine wesentlich geringere Stickoxid-Produktion erreichen als mit einer reinen Hochdruck-Abgasrückführung. Da man 1 Liter AdBlue für 543 Gramm Stickoxide benötigt (siehe Satz 3), folgt daraus unmittelbar, dass Fahrzeuge, die nur eine Hochdruck-Abgasrückführung haben, viel mehr AdBlue verbrauchen müssen als Fahrzeuge, die eine Niederdruck-Abgasrückführung haben²⁴. Im Jahr 2017, als „Experten“ behauptet haben, der AdBlue-Verbrauch müsse bei 5 Prozent des Kraftstoffverbrauchs liegen, war das Konzept der Niederdruck-Abgasrückführung seit mindestens 9 Jahren bekannt, zum Beispiel wurde unter [31] darüber berichtet. Über die Mehrwege-Abgasrückführung wurde unter [32] 5 Jahre vorher berichtet. Ein tatsächlicher Experte hätte gewusst, dass der AdBlue-Verbrauch allein schon aus diesem Grund von Fahrzeugmodell zu Fahrzeugmodell stark schwanken muss, und dass pauschale Angaben wie „5 Prozent“ keinen Sinn machen - ganz unabhängig davon, dass selbst bei gleicher Technik der Abgasrückführung bei verschiedenen Lastanforderungen sehr große Unterschiede herauskommen.

8.3 Kosten für AdBlue

Vereinzelt wurde die Behauptung verbreitet, dass bei einem AdBlue-System mit korrektem Verbrauch die Kosten für AdBlue zu hoch gewesen wären. Man kann jedoch leicht sehen, dass das frei erfunden ist, erst recht dann, wenn man akzeptiert, dass die meisten Fahrer selbst in der Lage sind, AdBlue in den AdBlue-Tank zu füllen.

Für die oben genannten 1,4 l/1.000 km hätten sich bei einem Preis von 1,85 €/l ein Preis von 2,59 €/1.000 km ergeben. Der Preis von 1,85 €/l ist dabei der Höchstwert, der an AdBlue-Zapfsäulen in München im Sommer 2022 verlangt wurde. Ende 2021 lagen die Preise im Bereich 0,70 €/l bis 1,00 €/l²⁵. Für ein aktuelles Fahrzeug, das im Durchschnitt 0,6 l/1.000 km verbraucht, würden sich Kosten von 0,42 €/1.000 km bis 1,11 €/1.000 km ergeben. Nimmt man nun einen Verbrauch von 5 l/1000 km für ein leistungsfähiges Fahrzeug im Gebirge an, liegen wir bei 3,50 € bis 9,25 €/1000 km.

Zum Vergleich: Der ADAC macht Angaben zu Fahrzeugkosten für Neuwagen, die bis auf wenige Ausnahmen im Jahr 2023 bei mehr als 400 €/1.000 km liegen. Bei einem Kraftstoffverbrauch von 5 Litern Diesel pro 100 Kilometer ergeben sich 49,20 € bis 107,00 €/1.000 km²⁶ allein für den Kraftstoff. Ein leistungsfähiges Fahrzeug im Gebirge läge bei den Kraftstoffkosten erheblich darüber. Die reinen AdBlue-Kosten spielen folglich keine Rolle, wenn man annimmt, dass Fahrer es selbst schaffen, AdBlue in den AdBlue-Tank zu füllen.

²⁴ Bei LKW mit Hochdruck-Abgasrückführung und AdBlue-System kann das Gesamtsystem auch so ausgelegt sein, dass die Abgasrückführung auf der Autobahn gar nicht verwendet wird, und dass die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte für Stickoxide mittels sehr viel AdBlue eingehalten werden

²⁵ gerundet auf ganze Cent pro Liter

²⁶ Der ADAC gibt für März 2022 einen durchschnittlichen Preis von 2,140 €/l an, für Februar 2016 sind es 0,984€/l[33]

9 BERECHNUNG DER NOX-MASSE EINER FAHRT

Wir wissen nun aus Abschnitt 7, wie viel AdBlue wir für wie viele Stickoxide benötigen. Die nächste Frage ist, wie man die Masse an Stickoxiden berechnen kann, die während einer Fahrt entstehen. Einstiegspunkt für die Berechnung der NOx-Masse m_{NOx} für eine Fahrt anhand der fahrzeugeigenen Sensoren ist die *thermische Zustandsgleichung idealer Gase*:

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad (10)$$

Dabei sind

- p der Druck
- T die Temperatur
- n die Stoffmenge
- R_m die universelle Gaskonstante
- V das Volumen

R_m ist eine Naturkonstante. Sind nun der Druck p und die Temperatur T konstant, dann ist das Volumen V proportional zur Stoffmenge n , oder anders ausgedrückt, das Volumen von einem Mol Gas ist immer gleich. Die molare Masse von Stickoxiden beträgt 46 g/mol, die von Dieselabgas liegt bei ca. 29 g/mol[34]²⁷. Das heißt, dass das Volumen von 46 g Stickoxiden genauso groß ist wie das Volumen von 29 g Dieselabgas.

Stickoxid-Sensoren von Fahrzeugen messen den Volumenanteil φ_{NOx} von Stickoxiden im Abgas. Die typische Skalierung dafür ist ppm = parts per million, also Teile pro Million. Möchte man explizit sagen, dass der Volumenanteil gemessen wird, und nicht zum Beispiel der Masseanteil, schreibt man auch ppmv. Typische Werte für NOx in Dieselabgas liegen im Bereich 50 bis 1.000 ppmv.

Der Masseanteil ω_{NOx} von Stickoxiden im Abgas beträgt dann einfach:

$$\omega_{\text{NOx}} = \varphi_{\text{NOx}} \cdot \frac{46}{29} \quad (11)$$

Hat man also den Abgasmassenstrom $\dot{m}$ und den Messwert φ_{NOx} eines NOx-Sensors, dann beträgt der NOx-Massenstrom $\dot{m}_{\text{NOx}}$:

$$\dot{m}_{\text{NOx}} = \dot{m} \cdot \omega_{\text{NOx}} = \dot{m} \cdot \varphi_{\text{NOx}} \cdot \frac{46}{29} \quad (12)$$

Integriert man den NOx-Massenstrom nach der Zeit, erhält man die NOx-Masse für den Ausschnitt von Zeitpunkt t_1 bis t_2 einer Fahrt:

$$m_{\text{NOx}} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_{\text{NOx}}(t) dt \quad (13)$$

also

²⁷ Würden wir stattdessen 30 g/mol annehmen, lägen alle Ergebnisse für NOx-Massen um 3,4 Prozent niedriger

$$m_{\text{NOx}} = \frac{46}{29} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}(t) \cdot \varphi_{\text{NOx}}(t) dt \quad (14)$$

Das Motorsteuergerät ermittelt sowohl $\dot{m}(t)$ als auch $\varphi_{\text{NOx}}(t)$. Da wir beides auch aus dem Motorsteuergerät auslesen können, können wir offensichtlich die NOx-Masse berechnen. Bei Fahrzeugen, bei denen wir Messwerte für NOx vor SCR und für NOx nach SCR auslesen können, können wir also sowohl Rohemissionen als auch Auspuffemissionen ermitteln, und damit auch die erreichte Umwandlungsrate.

Das heißt:

Satz 4. *Die NOx-Masse kann anhand von Kenngrößen, die mittels Diagnosesystem aus dem Fahrzeug ausgelesen werden können, berechnet werden.*

Wie wir solche Werte aus dem Motorsteuergerät bekommen sehen wir in Abschnitt 10, und insbesondere auch in Abschnitt 10.4.

10 UNTERSUCHUNGEN AN EINEM EURO 6D-FAHRZEUG AUS DEM VW-KONZERN

Die folgenden Untersuchungen wurden an einem Škoda Superb mit Motor EA288 evo, 147 kW, Modelljahr 2022, Motorkennbuchstabe DTUA gemacht. Das Abgassystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Mehrwege-Abgasrückführung aus ungekühlter Hochdruck-Abgasrückführung und gekühlter Niederdruck-Abgasrückführung
- Dieseloxydationskatalysator
- motornahe DPF/SCR-Kombination (wenn es im Folgenden um die SCR-Funktion geht, bezeichne ich diesen als „SCR1“)
- SCR-Katalysator im Unterflur (im Folgenden „SCR2“)
- Ammoniak-Sperrkatalysator
- 2 AdBlue-Injektoren (einen vor SCR1, einen weiteren vor SCR2)
- 3 Stickoxid-Sensoren (einen vor SCR1, einen zwischen SCR1 und SCR2, einen nach SCR2)

10.1 VCDS

VCDS ist ein Diagnosesystem der Firma Ross-Tech (siehe <https://www.ross-tech.com/>), das sich besonders an Fahrzeuge aus dem VW-Konzern richtet. Ross-Tech führt eine Liste von Distributoren unter <https://www.ross-tech.com/distributors.php>. Alle Momentaufnahmen und alle Datenaufzeichnungen, die in diesem Artikel gezeigt werden, wurden mit VCDS erstellt. Zur automatischen Erzeugung von Screenshots während einer Fahrt verwende ich „Automatic Screen Shooter“ von <https://www.donationcoder.com/software/mouser/popular-apps/automatic-screenshotter>.

An dieser Stelle drängt sich die Frage auf, ob es nicht sein kann, dass ein Fahrzeug das angeschlossene Diagnosesystem erkennt, und sich dann anders verhält. Im Prinzip ist das möglich. Angenommen, ein Fahrzeug würde eine AdBlue-Sparfunktion verwenden, diese Sparfunktion aber abschalten, sobald ein Diagnosesystem angeschlossen ist, würde man zumindest sehen, wie hoch der Verbrauch wäre, wenn es keine Sparfunktion gäbe. Dann aber würde der Fahrer feststellen, dass der AdBlue-Verbrauch laut Diagnosesystem bei normaler Fahrweise viel höher ist als das, was er sonst so beobachtet. Außerdem wäre dann für jeden leicht erkennbar gewesen, dass der AdBlue-Verbrauch bei hoher Last übermäßig steigt, und dass die Vorstellung von Journalisten, man könnte den AdBlue-Tank so groß machen, dass Fahrern beim Service zuverlässig absurd hohe Preise für AdBlue abgenommen werden können, keinen Sinn macht.

Oder er würde feststellen, dass das Fahrzeug mit angeschlossenem Diagnosesystem weniger Leistung oder ein schlechteres Ansprechverhalten hat, falls mit angeschlossenem Diagnosesystem eine höhere AGR-Rate verwendet wird.

Für neuere Fahrzeuge würde hier eine Regelung in der Verordnung 2017/1151 greifen, wonach dies als unzulässige Abschalteneinrichtung gewertet wird und die gesamte PEMS-Familie als nicht konform bewertet würde, siehe dazu Abschnitt 3.6.

Desweiteren habe ich ja weiter oben gezeigt, wie man allein aus Diagnosedaten aus dem Fahrzeug berechnen kann, wie viel AdBlue notwendig wäre. Hätte man bei Abgastests, wie sie der ADAC schon sehr lange durchführt, bei

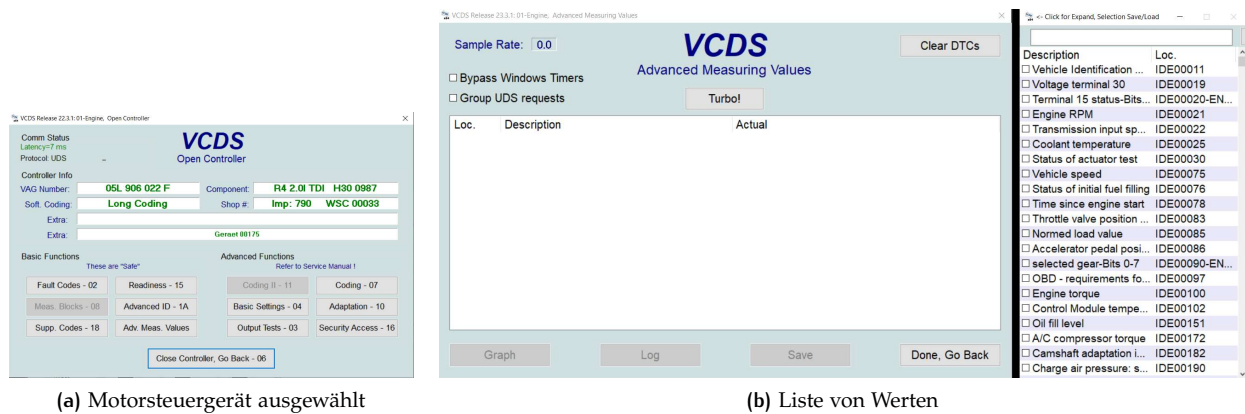


Abbildung 5: Auswahl von Messwerten in VCDS

schlechten Ergebnissen eine weitere Fahrt mit angeschlossenem Diagnosesystem gemacht, um das AdBlue-System zu verstehen, wäre eines der folgenden beiden Ergebnisse herausgekommen:

- die Messergebnisse bei angeschlossenem Diagnosesystem fallen viel besser aus als ohne angeschlossenes Diagnosesystem.
- der AdBlue-Verbrauch laut Fahrzeug wäre laut den hier vorgestellten Gleichungen erstaunlich niedrig gewesen

In beiden Fällen wäre das Gesamtbild höchst verdächtig gewesen.

10.2 Datenaufzeichnungen mit VCDS

10.2.1 Konfiguration der Aufzeichnung

Wie in Abbildung 5 gezeigt, kann man unter „Adv. Meas. Values“ aus der Liste aller verfügbarer Elemente²⁸ eines Steuergeräts diejenige Elemente auswählen, die man braucht. VCDS hat eine Beschränkung auf 12 gleichzeitig ausgewählte Elemente. Viele dieser Elemente liefern einen Messwert oder einen berechneten Wert, es gibt aber auch Elemente, bei denen mehrere Werte enthalten sind. Ein Beispiel ist „Exhaust Temperatur Bank 1“, wo alle 4 Temperatursensoren in einer Zeile geliefert werden.

Bezugnehmend auf Gleichung 14 erhält man $\dot{m}(t)$ als „Engine Exhaust flow rate“, oder beim EA288 als „Cylinder mass flow“, und $\varphi_{\text{NOx}}(t)$ entspricht den Messwerten der NOx-Sensoren.

10.2.2 Ergebnis einer Aufzeichnung

Bei einer Datenaufzeichnung erhält man eine CSV-Datei, die etwa so aussieht wie in der folgenden Tabelle.

²⁸ Bei meinem Fahrzeug umfasst die Liste im Motorsteuergerät gut 1.200 auswählbare Elemente

Marker	TIME	Loc. IDE00021	TIME	Loc. IDE00075	TIME	Loc. IDE00371	TIME	Loc. IDE03140	TIME	Loc. IDE13597	TIME	Loc. IDE16115	...
	STAMP	Engine RPM	STAMP	Vehicle speed	STAMP	Fuel consumption	STAMP	NOx sensor 1: NOx concentration	STAMP	NOx sensor 3: NOx concentration	STAMP	Consumed reducing agent	...
		/min		km/h		l/h		ppm		ppm		g	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	497	1878	497	124	497	6,3	497	74	497,2	3	497,2	18692,879	...
	497,35	1878	497,35	124	497,35	6,3	497,35	74	497,56	3	497,56	18692,879	...
	497,71	1880	497,71	124	497,71	6,31	497,71	74	497,92	2	497,92	18692,879	...
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	500,04	1874	500,04	123	500,04	6,63	500,04	77	500,33	3	500,33	18692,945	...
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Für einzelne Spalten muss man wissen - oder durch Experiment herausfinden - in welcher Genauigkeit die Werte geliefert werden. Zum Beispiel wird der Wert für Consumed reducing agent, also dem AdBlue-Verbrauch seit Inbetriebnahme, in einer Schrittweite von ca. 65 mg erhöht, was etwa 60 µl entspricht (Vermutung: die Schrittweite beträgt fast immer $2^{16} \mu\text{g} = 65.536 \mu\text{g}$, mit vereinzelt Sprüngen anderer Größe). Es gibt auch einen Wert für den AdBlue-Verbrauch der aktuellen Fahrt, der wird aber nur in einer Schrittweite von 0,5 ml erhöht, und ist daher für Untersuchungen zum AdBlue-Verbrauch deutlich weniger geeignet. Beim EA288 gibt es „Used reducing agent since last service“ statt „Consumed reducing agent“, und wird mit einer Schrittweite von 1 g gemeldet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist sehr nahe an der GPS-Geschwindigkeit, und deutlich unter der Tacho-Geschwindigkeit. In meinem Fall entsprechen die 124 km/h aus der Tabelle einem Wert von 130 km/h auf dem Tacho. Bei Tacho 210 km/h meldet das Motorsteuergerät genau 200 km/h.

10.3 Vorbetrachtungen für die Untersuchung des AdBlue-Verbrauchs

Die Analyse des vom Fahrzeug gemeldeten AdBlue-Verbrauchs klingt zunächst ganz einfach. Die zurückgelegte Strecke ist in einer Datenaufzeichnung leicht zu ermitteln, und für den AdBlue-Verbrauch kann sowohl der aktuelle Verbrauch in Milligramm pro Sekunde, als auch der Gesamtverbrauch seit Inbetriebnahme des Motorsteuergeräts abgefragt werden. Der aktuelle Verbrauch ist auf 0,1 mg/s genau abfragbar, der Gesamtverbrauch erhöht sich in Schritten von rund 65 mg. Indem man letzteren verwendet, vermeidet man natürlich, dass sich viele kurzfristige starke Schwankungen zu Fehlern aufsummieren. Außerdem *vermute* ich, dass der aktuelle Verbrauch zwar mit mg/s beschriftet ist, aber eigentlich µl/s darstellt.

Es ist aber nicht so einfach. Wie in Abschnitt 4 beschrieben, speichern SCR-Katalysatoren Ammoniak, und im Stadtverkehr muss mit hoher Ammoniak-Beladung gearbeitet werden, auf der Autobahn mit niedriger Ammoniak-Beladung. Möchte man nun über eine kurze Messstrecke den AdBlue-Verbrauch bewerten, um daraus Schlussfolgerungen für lange Strecken zu ziehen, d.h. man misst über 1 Kilometer, um eine Aussage über den Verbrauch pro 1.000 Kilometer zu treffen, dann muss man berücksichtigen, dass möglicherweise ein Teil des AdBlues verbraucht wurde, um Ammoniak einzulagern, oder dass der notwendige Ammoniak zum Teil aus dem gespeicherten Vorrat genommen wurde, so dass weniger AdBlue verbraucht wurde. Vor allem beim Übergang von Autobahn- zu Stadtverkehr wird die Ammoniak-Beladung erhöht, was bedeutet, dass für eine kurze Zeit viel mehr AdBlue verbraucht wird, als eigentlich momentan notwendig wäre. Umgekehrt kann nach dem Auffahren auf die Autobahn für einige Kilometer gar kein AdBlue verbraucht werden.

Im Falle des Škoda Superb mit EA288 evo - Motor liegt die verwendete Speicherkapazität bei mindestens 0,3 Gramm Ammoniak pro Liter Katalysatorvolumen. Wahrscheinlich liegt sie sogar weit höher, allerdings wird nicht die gesamte Speicherkapazität genutzt, da dies unter bestimmten Umständen zu hohem Ammoniak-Ausstoß führen würde. Dass 0,3 Gramm pro Liter genutzt werden, erkennt man daran, dass man die aktuelle Ammoniak-Beladung vom Motorsteuergerät abfragen kann, und solche Werte durchaus normal sind. Die Volumina der Katalysatoren liegen bei 3,4 Litern für SCR1 bzw. 2,5 oder 3,0 Litern für SCR2[35]. Damit kommen wir auf 2 Gramm Ammoniak, die gespeichert werden können, was 10 Millilitern AdBlue entspricht.

Loc.	Description	Actual
IDE00021	Engine RPM	1392 1/min
IDE00075	Vehicle speed	70 km/h
IDE00371	Fuel consumption	5.29 l/h
IDE00356	Outside temperature	10 °C
IDE03140	NOx sensor 1: NOx concentration	151 ppm
IDE03141	NOx sensor 2: NOx concentration	0 ppm
IDE11219	Reducing agent (j): quantity spec. value	5.4 mg/s
IDE13597	NOx sensor 3: NOx concentration	0 ppm
IDE16115	Consumed reducing agent	19011.981 g
MA516542	NOx catalytic converter of Bank 1: NH3 reducing agent fill level	0.2937 g/l
MA520408	NOx catalytic converter 2: NH3 reducing agent loading	0.3252 g/l
ENG247045	Engine Exhaust Flow Rate	115.4 kg/h

Abbildung 6: Aufnahme mit hoher Ammoniak-Beladung

Man könnte nun auf die Idee kommen, anhand der Veränderung der Ammoniak-Beladung auf einem Testabschnitt auszurechnen, wie viel Ammoniak, und damit wie viel AdBlue, eingelagert oder entnommen wurde, und dann auszurechnen, wie viel AdBlue hätte verbraucht werden müssen, wenn sich die Ammoniak-Beladung nicht geändert hätte. Davon würde ich aber abraten. Vor allem dann, wenn die Ammoniak-Beladung schnell sinkt, ist für einen Betrachter von außen völlig unklar, wie viel Ammoniak durch Ammoniak-Schlupf oder Ammoniak-Oxidation verloren geht²⁹. Ammoniak-Schlupf bedeutet, dass Ammoniak nicht mit Stickoxiden reagiert, sondern aus dem SCR-Katalysator austritt und im Ammoniak-Sperrkatalysator in unschädliche Stoffe umgewandelt wird. Ammoniak-Oxidation ist in Gleichung 9 definiert.

Da die Ammoniak-Beladung der Katalysatoren anhand theoretischer Modelle berechnet wird, aber nicht gemessen werden kann, muss man hier sowieso etwas vorsichtig sein. Eine größere Veränderung der Ammoniak-Beladung zeigt also nur, dass man nicht einfach den gemessenen AdBlue-Verbrauch weiterverwenden kann.

10.4 Auswertung von Aufzeichnungen

In diesem Abschnitt können wir nun beispielhaft sehen, wie Satz 3 und Gleichung 14 praktisch angewendet werden können. Die entsprechenden Daten sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

Man hat für jeden Messwert einen Zeitstempel mit einer Genauigkeit von 10 Millisekunden. Da man eine permanente Aufzeichnung der Geschwindigkeit hat, kann man für jede Zeile die zurückgelegte Strecke berechnen. Ähnliches gilt für den Kraftstoffverbrauch, der in Litern pro Stunde protokolliert werden kann. Beim AdBlue-Verbrauch ist es das beste, den Gesamtverbrauch seit Inbetriebnahme des Motorsteuergeräts zu verwenden, um den Gesamtverbrauch für eine Fahrt oder einen Streckenabschnitt zu ermitteln.

Um Graphen aus den Rohdaten zu erstellen, habe ich mir eigene Software programmiert. Diese funktioniert so, dass sie die Daten einliest, dann *virtuelle Spalten* berechnet, und daraus schließlich Dateien für gnuplot erzeugt. Die eigentlichen Graphen werden dann mittels gnuplot erzeugt.

Eine virtuelle Spalte ist eine, die aus anderen Spalten errechnet werden kann. Ein Beispiel ist die zurückgelegte Strecke in Metern seit Beginn der Fahrt, oder der AdBlue-Verbrauch seit Beginn der Fahrt in Millilitern, oder die akkumulierte NOx-Masse für jeden der drei NOx-Sensoren seit Beginn der Fahrt³⁰.

Virtuelle Spalten können auch andere virtuelle Spalten als Quelle verwenden. Hat man eine virtuelle Spalte für die insgesamt zurückgelegte Strecke, und eine weitere für die auf der Fahrt verbrauchte Menge an AdBlue, und eine dritte für die auf der Fahrt verbrauchte Menge an Kraftstoff, dann kann man auch in jeder Zeile eine Umgebung beliebiger Größe suchen, zum Beispiel 5 Kilometer, und dann die zugehörigen Verbrauchswerte pro Kilometer berechnen. Genau so funktionieren die Auswertungen hier, die einen Durchschnitt über eine gewisse Strecke angeben.

Nun schauen wir uns zwei Fahrten an, eine mit 160 km/h und eine mit 180 km/h³¹, auf denen sich die Ammoniak-Beladung nicht merklich verändert. Die aufgezeichneten Daten überprüfen wir auf Konsistenz, indem wir mittels Gleichung 14 berechnen, wie viele Stickoxide entstanden sind, dann mittels Satz 3 berechnen, wie viel AdBlue dann notwendig sein sollte, und vergleichen das mit dem AdBlue-Verbrauch, den das Fahrzeug selbst gemeldet hat. Beide Fahrten fanden auf dem gleichen Autobahnabschnitt in gleiche Fahrtrichtung statt.

²⁹ Das Motorsteuergerät schätzt diese Werte, das hilft uns aber nicht, da wir nicht auf diese Schätzungen zugreifen können

³⁰ Genauer: seit der Sensor betriebsbereit geworden ist

³¹ Mit Geschwindigkeiten unter 160 km/h wäre es deutlich mühsamer, einen Test mit konstanter Ammoniak-Beladung machen. Zur Überprüfung der Gleichungen sind also solche Geschwindigkeiten hilfreich. Sind die Gleichungen einmal überprüft, kann man sie natürlich auch auf Stadtverkehr anwenden. Ein Experte auf dem Gebiet hätte die Gleichungen aber gekannt, und nicht erst sicherheitshalber im Experiment mit einem Fahrzeug überprüfen müssen.

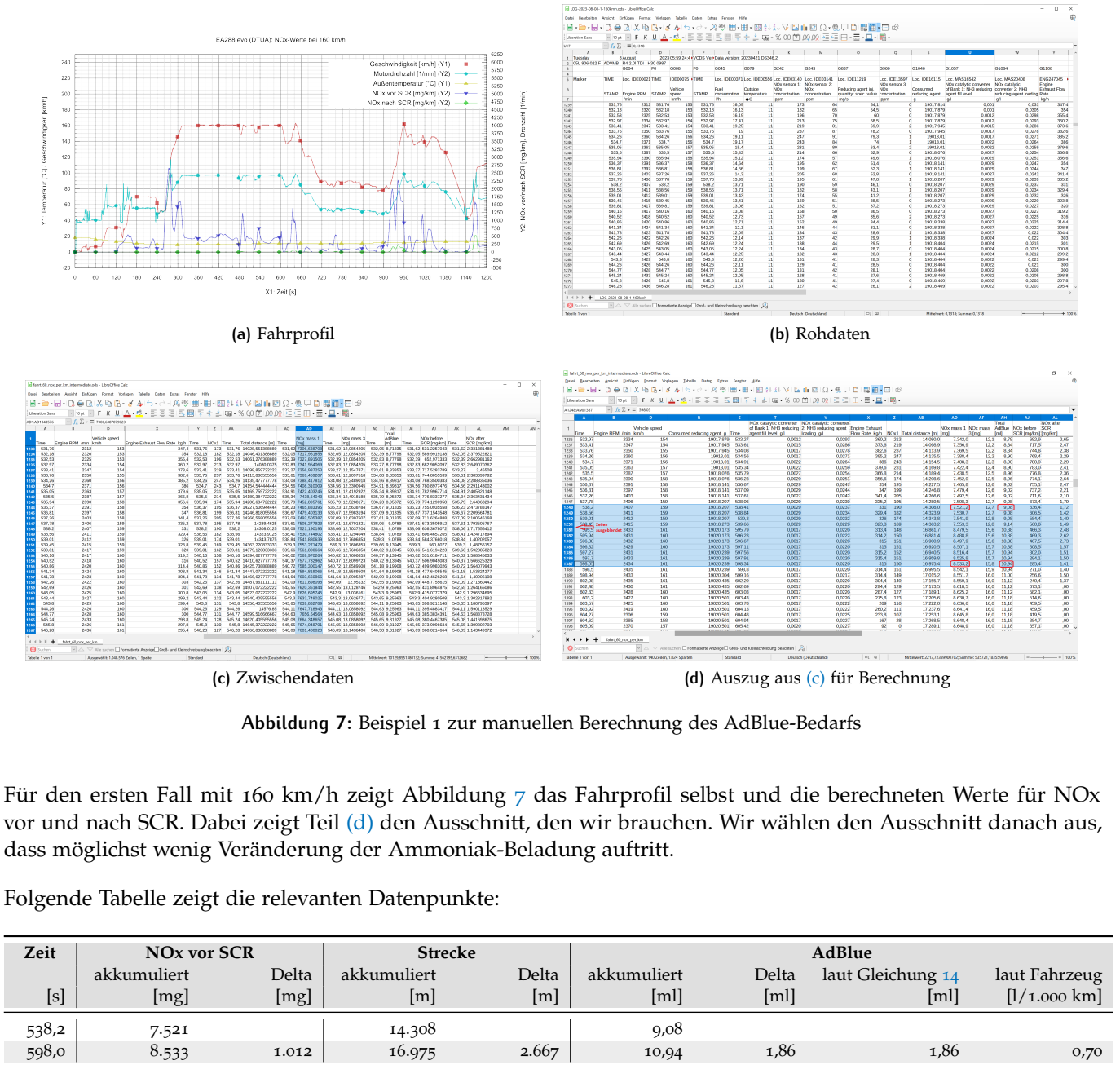


Abbildung 7: Beispiel 1 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs

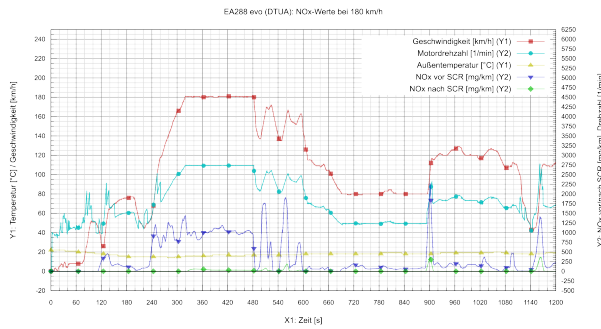
Für den ersten Fall mit 160 km/h zeigt Abbildung 7 das Fahrprofil selbst und die berechneten Werte für NOx vor und nach SCR. Dabei zeigt Teil (d) den Ausschnitt, den wir brauchen. Wir wählen den Ausschnitt danach aus, dass möglichst wenig Veränderung der Ammoniak-Beladung auftritt.

Folgende Tabelle zeigt die relevanten Datenpunkte:

Zeit [s]	NOx vor SCR		Strecke		AdBlue		laut Fahrzeug [l/1.000 km]
	akkumuliert [mg]	Delta [mg]	akkumuliert [m]	Delta [m]	akkumuliert [ml]	Delta [ml]	
538,2	7.521		14.308		9,08		
598,0	8.533	1.012	16.975	2.667	10,94	1,86	0,70

Für den zweiten Fall mit 180 km/h zeigt Abbildung 8 das Fahrprofil und die berechneten Werte für NOx vor und nach SCR. Dabei zeigt Teil (b) den Ausschnitt, den wir für die Berechnung brauchen. Folgende Tabelle zeigt wieder die relevanten Datenpunkte:

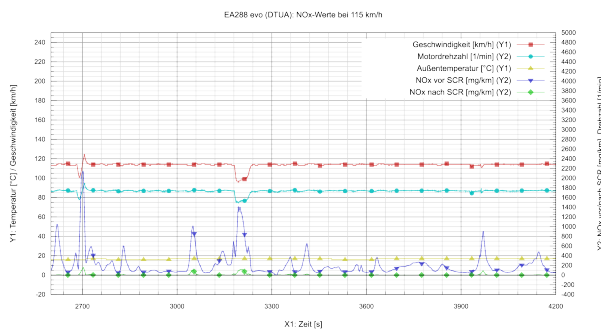
Zeit [s]	NOx vor SCR		Strecke		AdBlue		laut Fahrzeug [l/1.000 km]
	akkumuliert [mg]	Delta [mg]	akkumuliert [m]	Delta [m]	akkumuliert [ml]	Delta [ml]	
419,7	8.463		10.667		8,42		
479,7	11.518	3.055	13.681	3.014	14,31	5,89	1,96



(a) Strecke

(b) Auszug aus Zwischendaten für Berechnung

Abbildung 8: Beispiel 2 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs



(a) Strecke

(b) Auszug aus Zwischendaten für Berechnung

Abbildung 9: Beispiel 3 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs

Die sehr hohe Übereinstimmung im ersten Fall ist Zufall. Eine so genaue Übereinstimmung erhält man nur, wenn sich während des Testabschnitts die Ammoniak-Beladung nicht verändert, und wenn keine Ammoniak-Oxidation (siehe Gleichung 9) und kein Ammoniak-Schlupf auftritt. Tritt auf einer Fahrt Ammoniak-Schlupf auf, dann müsste der AdBlue-Verbrauch etwas höher liegen als nach der hier vorgestellten Methode berechnet. Zwar lässt sich Ammoniak-Schlupf nicht messen, es gibt jedoch theoretische Modelle, anhand derer das Motorsteuergerät Ammoniak-Schlupf schätzen kann.

Desweiteren können wir den AdBlue-Verbrauch nur in Vielfachen von 0,06 ml auslesen. Wie in der Markierung in Abbildung 7d zu sehen ist, haben wir jeweils mehrere Zeilen mit dem gleichen Wert für den AdBlue-Verbrauch. Hätten wir einen Abschnitt gewählt, der 1 Sekunde länger oder kürzer ist, hätte es einen Unterschied gegeben.

Im zweiten Fall sieht man eine leichte Überdosierung. Vermutlich versucht das Motorsteuergerät hier, beginnende Ammoniak-Oxidation und Ammoniak-Schlupf auszugleichen. Insgesamt zeigen die beiden Anwendungsfälle aber, dass die Übereinstimmung zwischen der theoretischen Ermittlung des AdBlue-Verbrauchs und des tatsächlich vom Fahrzeug gemeldeten AdBlue-Verbrauchs hinreichend gut ist.

Im dritten Beispiel sehen wir in Abbildung 9 das Problem bei der Auswertung bei niedrigerer Last mit der Ammoniak-Beladung.

Folgende Tabelle zeigt wieder die relevanten Datenpunkte:

Zeit [s]	NOx vor SCR		NOx nach SCR		Strecke		akkumuliert		Delta		AdBlue	
	akkumuliert [mg]	Delta [mg]	akkumuliert [mg]	Delta [mg]	akkumuliert [m]	Delta [m]	akkumuliert [ml]	Delta [ml]	akkumuliert [ml]	Delta [ml]	laut Gleichung 14 [ml]	laut Fahrzeug [l/1.000 km]
2.600	22.304		1.922		65.900		39,02					
4.200	33.290	10.986	2.210	288	116.346	50.446	60,47	21,45			20,23	0,425

Zusätzlich hat sich die Ammoniak-Beladung der Katalysatoren um 0,0777 g/l bzw. 0,0481 g/l verringert. Bei Katalysatorvolumina von 3,4 l und 3,0 l sind das 0,41 g Ammoniak, also 2,03 ml AdBlue. Diese 2,03 ml AdBlue müssen auf den Verbrauch noch addiert werden, womit wir bei 23,48 ml sind, was eigentlich eine 16-prozentige Überdosierung im Durchschnitt wäre. Wir wissen aber nicht, wie viel davon durch Ammoniak-Schlupf vor allem beim Übergang von bergab zu bergauf verloren gegangen ist. Ebenso könnte es sein, dass in diesem Lastbereich immer mit einer gewissen Überdosierung gearbeitet wird. Zielt man auf Umwandlungsraten von ca. 80 Prozent ab, was für Euro 5 - Fahrzeuge ausreichend gut gewesen wäre, ist keine Überdosierung nötig, schon gar nicht von 15 Prozent. Insofern hat die Erkenntnis, dass eine Überdosierung absichtlich stattfinden kann, keinen Einfluss auf die Berechnungen aus Abschnitt 8.1. Aber selbst dann, wenn eine solche Überdosierung schon damals notwendig gewesen wäre, würden sich die AdBlue-Verbräuche nur um maximal 15 Prozent erhöhen, zum Beispiel von 1,4 l/1.000 km auf 1,55 l/1.000 km.

Schaut man sich nun NOx nach SCR an, dann wurden laut den fahrzeugeigenen Sensoren 288 mg NOx auf den gesamten 50 km ausgestoßen, also 6 mg/km. Von diesen 288 mg sind wiederum ca. 100 mg zwischen Sekunde 3.150 und 3.250 entstanden. Da insgesamt knapp 11 g produziert wurden, ergibt das eine Umwandlungsrate von über 97 Prozent - bei Tacho 120 km/h auf der Autobahn, ohne nennenswerte Überholvorgänge, ohne das Auffahren auf die Autobahn, aber mit einigen Steigungen.

10.5 Beispiele für Analysen

10.5.1 Abhängigkeit der Abgasrückführung von der Last

Wie in Abschnitt 6.5 angekündigt, zeige ich hier die Abhängigkeit der Abgasrückführung von der Last. Abbildung 10 zeigt entsprechende Momentaufnahmen. Die folgende Tabelle fasst die dabei wirklich relevanten Werte zusammen. Der Kraftstoffverbrauch pro Stunde ist dabei ein gutes Maß für die Motorlast.

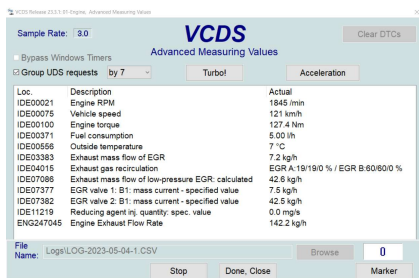
	Stadt	120 km/h	180 km/h	200 km/h	Vollgas
Verbrauch [l/h]	1,61	5,00	17,81	23,88	33,19
Drehzahl [1/min]	1.681	1.845	2.716	3.003	3.207
Abgasmassenstrom [kg/h]	80,0	142,2	395,8	497,0	589,6
HD-AGR [kg/h]	18,7	7,2	0	0	0
HD-AGR-Rate [%]	23,4	5,1	0	0	0
ND-AGR [kg/h]	21,5	42,6	66,5	66,6	22,5
ND-AGR-Rate [%]	26,9	30,0	16,8	13,4	3,8

Einige Erkenntnisse:

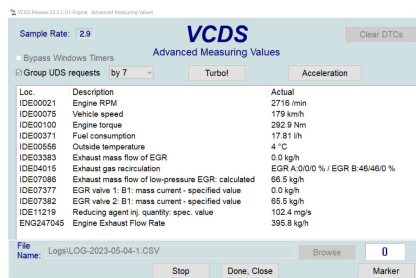
- Beim Mitschwimmen im Stadtverkehr wird die Hochdruck-Abgasrückführung in nennenswertem Umfang verwendet. Im Stadtverkehr ist also mit einer gewissen Verkokung zu rechnen.
- Bereits bei 120 km/h, auf gerader oder minimal abschüssiger Straße, bei 5 l/h, also 4,2 l/100 km, wird die Hochdruck-Abgasrückführung kaum noch verwendet. Auf der Autobahn ist daher nicht mit von der Hochdruck-Abgasrückführung verursachter Verkokung zu rechnen

- Bei konstanter hoher Geschwindigkeit von 200 km/h arbeitet die Niederdruck-Abgasrückführung immer noch etwas
- Bei einer Vollgasbeschleunigung bei hoher Drehzahl ist die Abgasrückführung so gut wie abgeschaltet

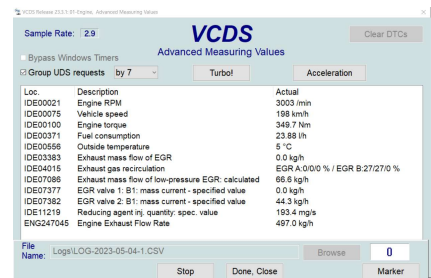
Das ganze ist auch im AdBlue-Verbrauch sichtbar. Während bei konstanten 120 km/h auf gerader Strecke etwa 0,5 % des Kraftstoffverbrauchs und im Durchschnitt bei normaler Fahrweise und den üblichen Autobahnsteigungen 1 % ausreichen, sind bei 180 km/h etwa 2 %, bei 200 km/h etwa 2,5 %, und bei Vollgas etwa 3 % des Kraftstoffverbrauchs nötig.



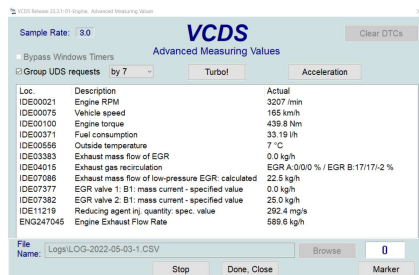
(a) AGR bei 120 km/h, niedrige Last



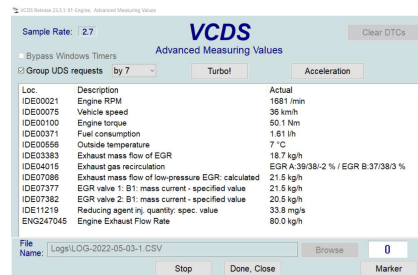
(b) AGR bei 180 km/h, höhere Last



(c) AGR bei 200 km/h, höhere Last



(d) AGR bei Vollgasbeschleunigung

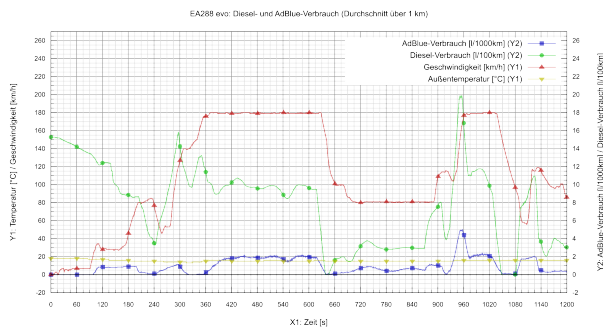


(e) AGR im Stadtverkehr, sehr niedrige Last

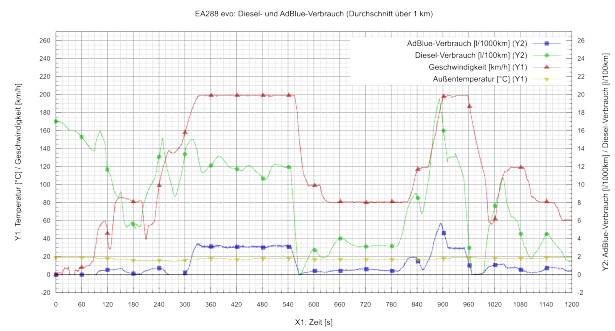
Abbildung 10: Verhalten der Abgasrückführung bei verschiedenen Situationen

10.5.2 Hohe Geschwindigkeit

Abbildung 11 zeigt den Kraftstoff- und den AdBlue-Verbrauch bei 180 km/h und bei 200 km/h auf einigermaßen gerader Strecke. Hierbei fällt auf, dass der Kraftstoffverbrauch bei 200 km/h mit 12 l/100 km etwa 20 Prozent höher ist als bei 180 km/h, während der AdBlue-Verbrauch mit 3,2 l/1000 km etwa 60 Prozent höher liegt als bei 180 km/h mit ca. 2,0 l/1000 km. Außerdem sieht man auch hier den Effekt, dass der AdBlue-Verbrauch bei Vollgas noch einmal deutlich steigt, zum Beispiel auf fast 6 l/1000 km in Bild (b) bei der Beschleunigung von 120 km/h auf 200 km/h zwischen Sekunde 870 und 900.



(a) Verbrauch bei 180 km/h



(b) Verbrauch bei 200 km/h

Abbildung 11: Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch bei 180 und 200 km/h

10.5.3 Dynamische Fahrweise

Abbildung 12 zeigt den Kraftstoff- und den AdBlue-Verbrauch bei sehr dynamischer Geschwindigkeit mit einer Durchschnittsbildung über 5 Kilometer. Die aufgezeichnete Strecke war 347 km lang, der Kraftstoffverbrauch lag im Durchschnitt bei 8,6 l/1.000 km, der AdBlue-Verbrauch bei 1,89 l/1.000 km. Damit liegt der AdBlue-Verbrauch bei 2,2 Prozent des Kraftstoffverbrauchs. Wie in der Einleitung erwähnt, liege ich im Durchschnitt bei 1,1 Prozent.

Der Höchstwert liegt bei ca. 4.300 Sekunden mit einem Kraftstoffverbrauch von 14,4 l/100 km und einem AdBlue-Verbrauch von 4,3 l/1.000 km, was einem AdBlue-Verbrauch in Höhe von 3 Prozent des Kraftstoffverbrauchs entspricht.

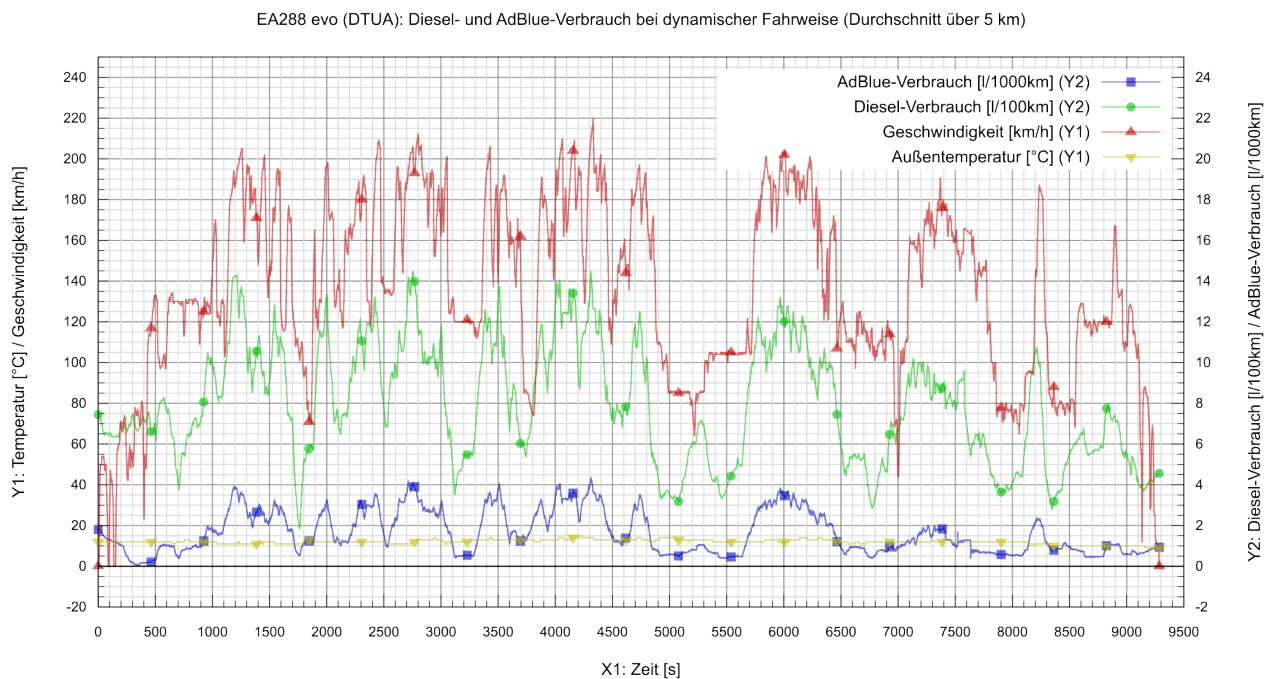


Abbildung 12: Verbrauch bei hoher variabler Geschwindigkeit

10.5.4 Beschleunigung

In Abbildung 13 sieht man die Messwerte der NO_x-Sensoren und die Umrechnung in Milligramm pro Kilometer während einer Beschleunigung. Die eigentliche Beschleunigung ist zwischen Sekunde 400 und 440 zu sehen. Zu Beginn der Beschleunigung liegt die Ammoniakbeladung bei 0,1 g/l für SCR1 und 0,2 g/l für SCR2. Dadurch ist die Umwandlungsrate überdurchschnittlich gut³². Zu sehen ist, dass die Werte für NO_x vor SCR auf mehr als 3.500 mg/km steigen. Das ist praktisch die logische Folge dessen, was in Abschnitt 6.5 angekündigt und in Abschnitt 10.5.1 anhand des Verhaltens der Abgarrückführung unter Last erklärt ist.

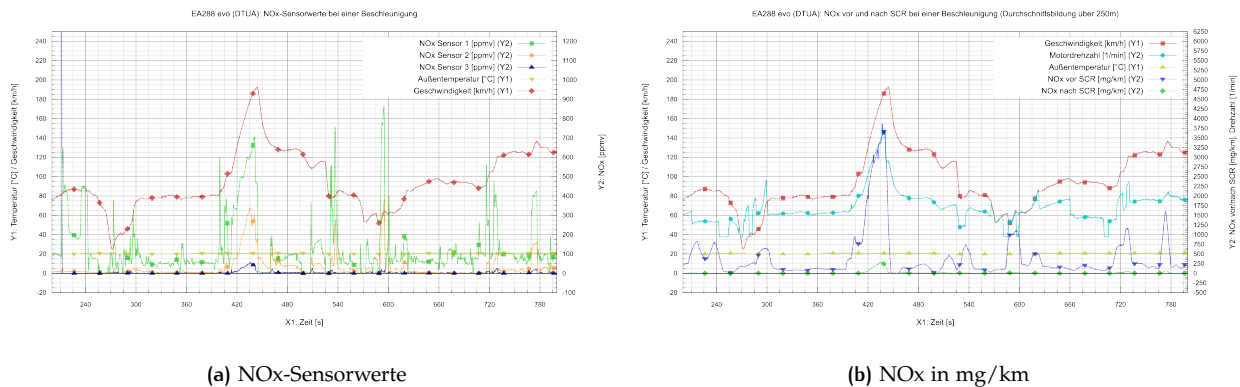


Abbildung 13: NO_x-Werte bei einer Beschleunigung im 6. Gang

In Abbildung 14 sieht man die Werte der NO_x-Sensoren bei zwei Vollgasbeschleunigungen, einmal nach einigen Minuten Stadtverkehr und einmal nach einer Autobahnfahrt. In Bild (a) sieht man dabei zwischen Sekunde 1.600 und 1.610 eine Vollgasbeschleunigung nach der Ausfahrt aus einem Kreisverkehr, der wiederum mit dem Ortsausgang und dem Ende einer 30er Zone zusammenfällt. Man sieht hier, dass die niedrige Last in der 30er Zone davor selbst noch kein Problem darstellt, denn das AdBlue-System funktioniert weiterhin mit hoher Umwandlungsrate. Die Kombination aber aus hoher Raumgeschwindigkeit der Abgase und niedriger Katalysatortemperatur während der anschließenden Vollgasbeschleunigung führt dazu, dass SCR2 überhaupt nicht funktioniert.

Bild (b) zeigt zwischen Sekunde 2.620 und 2.640 eine ähnliche Beschleunigung am Ende einer Autobahnfahrt nach dem anschließenden Abbiegen auf eine Landstraße. Dort sieht man eine Umwandlungsrate von ca. 85 Prozent. Der Sensor vor SCR meldet etwa 800 ppmv, der Sensor nach SCR meldet ca. 120 ppmv.

³² „Überdurchschnittlich gut“ bezieht sich hier auf eine Vollgasbeschleunigung. Unter günstigen Bedingungen ist die Umwandlungsrate meistens noch besser

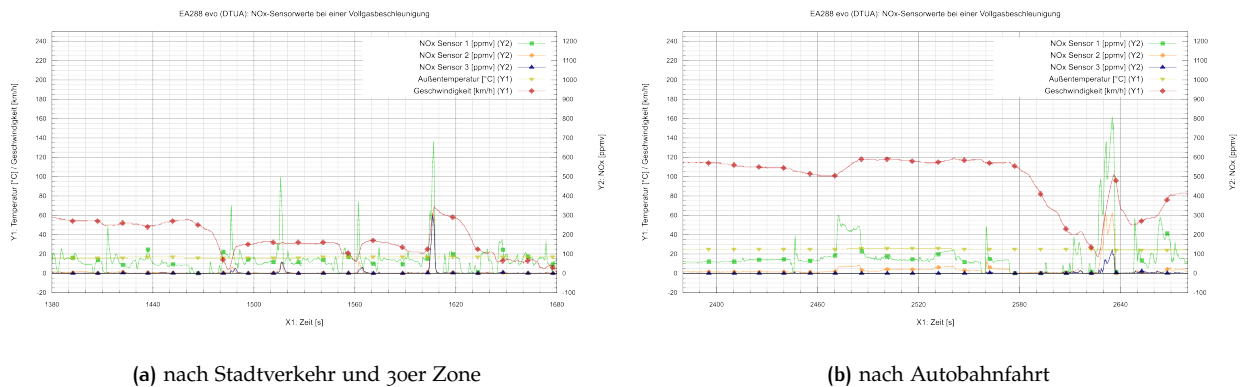


Abbildung 14: Vergleich: NOx-Werte bei einer Vollgasbeschleunigung nach Stadtverkehr und nach Autobahn

Im Abschnitt 6.5 über die Abgasrückführung habe ich erklärt, dass bei niedriger Drehzahl die Abgasrückführung nicht arbeiten kann, wenn man Leistung abrufen will, da ohnehin zu wenig Sauerstoff im Motor ist. Das zeigt die Abbildung 15. Auf dem Straßenabschnitt geht es leicht bergauf, wodurch es möglich ist, diesen Betriebszustand ein paar Sekunden aufrecht zu erhalten. Man sieht hier Werte für NOx vor SCR im Bereich von 900 ppmv. Solche Werte sind bei normalen Drehzahlen mit diesem Fahrzeug unerreichbar. Die Werte für NOx nach SCR, die dabei entstehen, hängen stark von der Ammoniakbeladung und der Katalysatortemperatur ab, mit der der Test gestartet wird. In diesem Beispiel hier steigt NOx nach SCR auf bis zu 100 ppmv, was im Mittelfeld dessen liegt, was ich bei mehrfachem Testen gesehen habe.

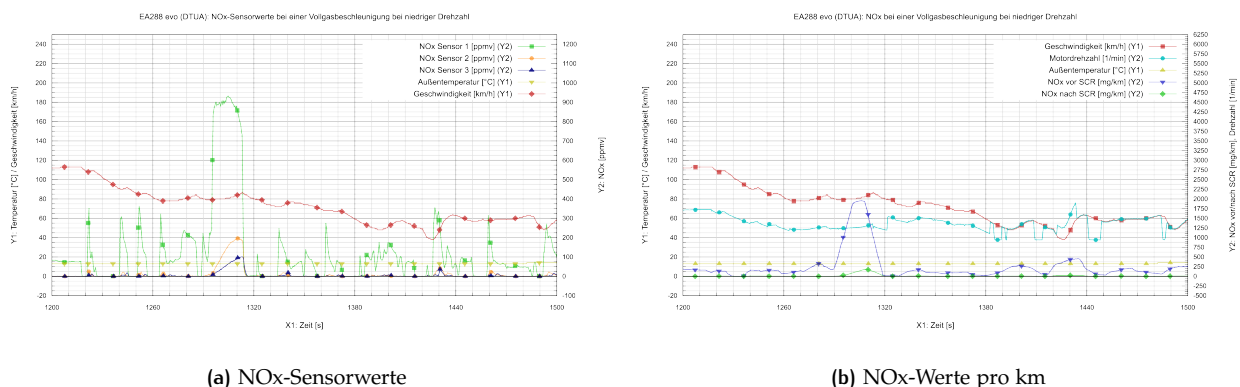


Abbildung 15: NOx-Werte bei einer Vollgasbeschleunigung bei niedriger Drehzahl

Schaut man in die Rohdaten, dann sieht man während des eigentlichen Tests um Sekunde 1.300 einen Kraftstoffverbrauch von etwa 7,0 l/h, was bei 80 km/h etwa 8,75 l/100 km entspricht. Gleichzeitig liegt NOx vor SCR bei bis zu 1,95 g/km, was einem AdBlue-Bedarf von 3,6 l/1000 km entspricht. Der AdBlue-Bedarf hier liegt also bei 4 % des Kraftstoffverbrauchs.

Für diesen Test bei niedriger Drehzahl war es nötig, das Automatikgetriebe in den manuellen Modus zu schalten. Andernfalls schaltet es bei solchen Drehzahl schon bei leichtem Antippen des Gaspedals zurück.

10.5.5 Bergauffahrt

In Abbildung 16 sind die Messwerte der NO_x-Sensoren sowie der Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch bei einer Fahrt bergauf dargestellt. Laut Verkehrszeichen war eine Steigung von 10 Prozent für 8 Kilometer angekündigt. Es handelt sich um den Feldberg-Pass aus Richtung Todtnau.

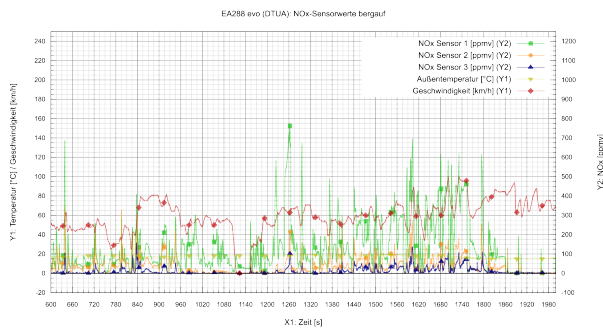
Bei dieser Datenaufzeichnung habe ich den Abgasmassenstrom nicht, so dass es nicht möglich ist, direkt Milligramm pro Kilometer zu berechnen, aber anhand des AdBlue-Verbrauchs lässt sich NO_x vor SCR abschätzen, und anhand der Umwandlungsrate dann auch NO_x nach SCR. Im 1-Kilometer-Durchschnitt ergeben sich auf dem oberen Stück Werte zwischen 5 und fast 5,5 l AdBlue/1000 km, was Werte von 2,7 g bis 3,0 g NO_x/km vor SCR nahe legt. Im 5-Kilometer-Durchschnitt zeigt ein Blick in die Rohdaten, dass der AdBlue-Verbrauch auf maximal 3,37 l/1000 km steigt, was etwa 1,8 g NO_x/km vor SCR bedeutet. Mit einer Umwandlungsrate von ca. 85 % laut den NO_x-Sensorwerten heißt das, dass der NO_x-Ausstoß im Bereich von 270 mg/km gelegen haben muss, im oberen Bereich eher bei 450 mg/km - bei knapp 100 km/h bei 10 % Steigung bei einem Kraftstoffverbrauch im Bereich 18-20 l/100 km.

Wir sehen also, in welchem Bereich die Stickoxid-Produktion bergauf trotz moderner Niederdruck-Abgasrückführung liegt. Bei einem Fahrzeug ohne Niederdruck-Abgasrückführung wäre in einem solchen Test mit viel höheren Werten zu rechnen. In diesem Licht kann man auch sagen, dass die 5.847 mg/km, von denen die Umwelthilfe bei einem BMW 525d mit Euro 5 bergauf berichtet hatte, zwar hoch, aber durchaus möglich erscheinen.

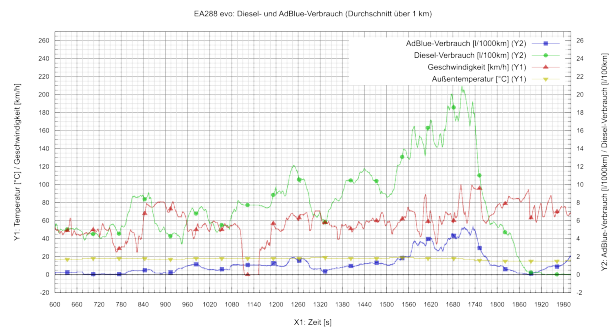
An dieser Stelle muss ich noch auf ein Detail in den Fahrzeugdaten hinweisen:

Leermasse	1.735 kg
Zulässige Gesamtmasse:	2.279 kg
Zulässige Gesamtmasse des Zuges bei 12 % Steigung:	4.479 kg

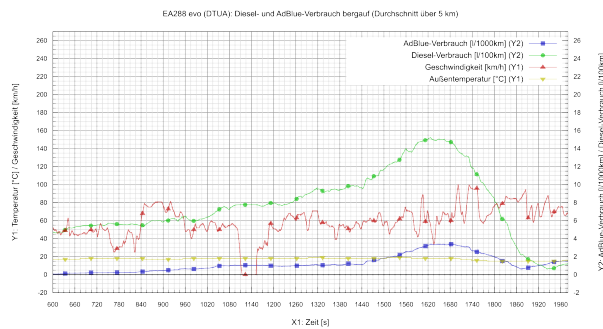
Man kann davon ausgehen, dass bei gleicher Teststrecke bei Ausnutzung der zulässigen Gesamtmasse des Zuges AdBlue-Verbräuche deutlich oberhalb von 10 l/1000 km entstehen würden, denn die Motorlast wäre ähnlich, der Verbrauch pro Stunde wäre ähnlich, aber die Geschwindigkeit wäre viel niedriger.



(a) NOx-Sensorwerte



(b) Verbrauch im 1-km-Durchschnitt



(c) Verbrauch im 5-km-Durchschnitt

Abbildung 16: NOx-Werte und Verbrauch bergauf

10.5.6 Niedrige Außentemperaturen

Die Wetterlage im Dezember 2022 hat es mir ermöglicht, mein Fahrzeug auch bei niedrigen Außentemperaturen zu untersuchen. Die folgenden Daten enthalten nicht den Abgasmassenstrom, so dass es nicht möglich ist, direkt NOx-Werte in Milligramm pro Kilometer zu berechnen. Dennoch können einige Aussagen getroffen werden. Abbildung 18 zeigt zwei Testfahrten, bei gleicher Teststrecke, ähnlicher Fahrweise, aber verschiedenen Außentemperaturen.

Die Startbedingungen waren für die beiden Fahrten leicht verschieden. Bei Testfahrt (a) war das Fahrzeug in der Nacht vorher in der Tiefgarage geparkt, bei Testfahrt (b) dagegen im Freien. Zu Testbeginn lag bei Fahrt (b) die Katalysatortemperatur bei -11°C , die Temperatur im AdBlue-Tank beim Einschalten der Zündung bei -9°C , nach einigen Sekunden bei -8°C .

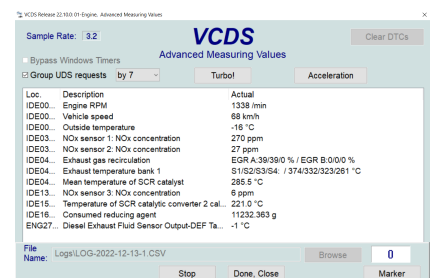


Abbildung 17: Momentaufnahme bei niedrigen Außentemperaturen

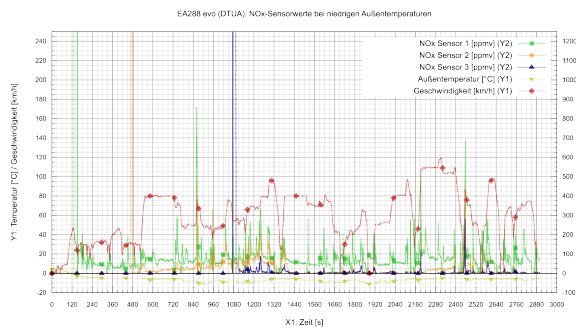
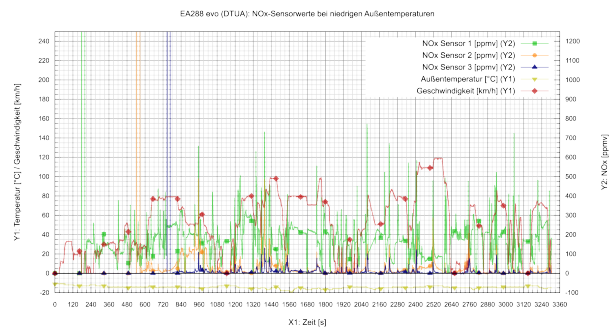
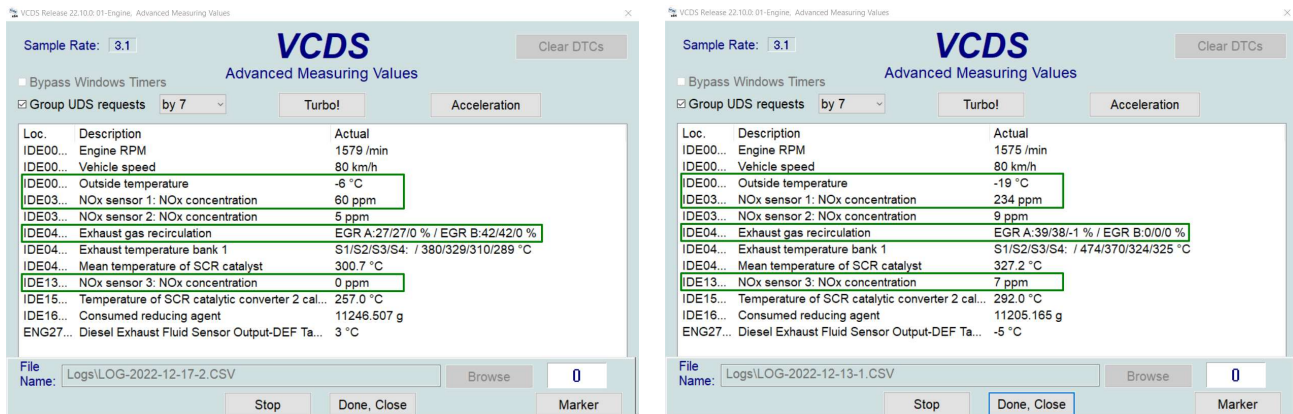

 (a) Testfahrt bei -5 bis -11°C

 (b) Testfahrt bei -14 bis -19°C

Abbildung 18: Vergleich: NOx-Sensorwerte bei ähnlicher Fahrweise, aber verschiedenen Außentemperaturen

Bei höherer Last, vor allem beim Beschleunigen und bei Geschwindigkeiten ab 100 km/h, unterscheiden sich die Werte für NOx vor SCR nicht. Bei niedriger Last dagegen sind die Werte bei sehr niedrigen Temperaturen viel höher. Schaut man sich die Werte bei der Abgasrückführung, die hier jetzt nicht für die ganze Strecke abgebildet sind, an, dann fällt folgendes auf: bei Temperaturen von -11°C und höher arbeitet die Abgasrückführung ähnlich wie im Sommer. Bei Temperaturen von -14°C und darunter dagegen arbeitet die Niederdruck-Abgasrückführung erst ab einer gewissen Last. Die Konsequenz daraus ist genau das, was der Sensor für NOx vor SCR anzeigt: NOx vor SCR ist viel höher als sonst. Da die Werte für NOx nach SCR weiterhin niedrig bleiben, heißt das auch, dass der AdBlue-Verbrauch deutlich steigen muss. Über die gesamte Testfahrt war der AdBlue-Verbrauch bei Testfahrt (b) doppelt so hoch wie bei (a). Schaut man nur Abschnitte mit niedriger Last an, dann liegt der Faktor eher bei drei.

Punktell lag der Faktor sogar bei vier. Beide in Abbildung 19 dargestellten Momentaufnahmen verdeutlichen den Unterschied. Sie zeigen eine Situation bei 80 km/h auf gerader Strecke mit Tempomat auf dem gleichen Streckenabschnitt in gleicher Fahrtrichtung. Der einzige Unterschied ist die Außentemperatur, die einmal bei -6°C , und einmal bei -19°C liegt. Im zweiten Fall ist das Ventil der Niederdruck-Abgasrückführung geschlossen, und der Wert am erste Stickoxid-Sensor ist mit 237 ppmv rund viermal so hoch wie bei -6°C mit 60 ppmv. Geht man davon aus, dass in beiden Fällen der Abgasmassenstrom etwa gleich groß war, dann heißt das, dass auch der AdBlue-Verbrauch viermal so hoch war³³.

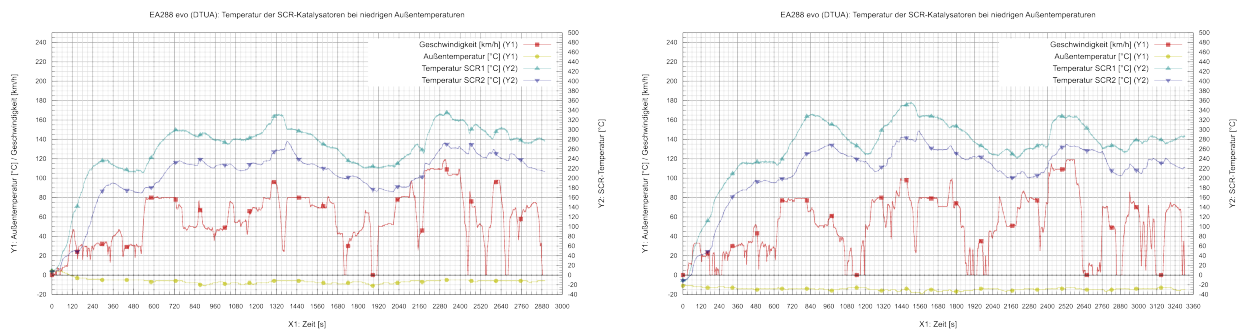
³³ Der Testabschnitt war zu kurz, um etwas über den vom Motorsteuergerät gemeldeten AdBlue-Verbrauch sagen zu können. Die Werte am dritten Stickoxid-Sensor zeigen aber eindeutig, dass das AdBlue-System auch bei -19°C funktioniert hat


 (a) 80 km/h bei -6°C .

 (b) 80 km/h bei -19°C

Abbildung 19: Vergleich: 80 km/h auf gerader Strecke bei verschiedenen Temperaturen.

Abbildung 20 zeigt die Katalysatortemperaturen. Dabei fällt auf, dass die Katalysatortemperaturen bei niedrigeren Außentemperaturen *höher* sind. Es fällt auch auf, dass die Temperatur von SCR1 in Bild (b) nicht mehr unter 230°C fällt, nachdem sie diesen Wert einmal erreicht hat. Bei normalen Außentemperaturen ist die Minimaltemperatur, die hier durch das Motorsteuergerät erzwungen wird, deutlich niedriger.


 (a) Testfahrt bei -5 bis -11°C

 (b) Testfahrt bei -14 bis -19°C

Abbildung 20: Vergleich: SCR-Katalysator-Temperaturen bei ähnlicher Fahrweise, aber verschiedenen Außentemperaturen

Für den Temperaturbereich zwischen -11°C und -14°C habe ich keine Daten. Auch wenn die Schlussfolgerung nur auf einer einzigen Testfahrt bei Außentemperaturen von -14°C und darunter basieren, gehe ich davon aus, dass es sich in der Abgasrückführung um ein Thermofenster handelt: bei -11°C verhält sich die Abgasrückführung genauso wie im Sommer, bei -14°C dagegen ist das veränderte Verhalten zu beobachten. Im Gegensatz zu früheren Fahrzeuggenerationen reagiert das Abgassystem aber durch einen höheren AdBlue-Verbrauch auf die höheren Werte am ersten Stickoxid-Sensor.

Ein weiterer im Winter interessanter Aspekt ist die Funktion der AdBlue-Heizung. In Abbildung 21 sieht man die Heizleistung im AdBlue-System. Bei -13°C werden zwei Heizkreise mit jeweils ca. 2 V und 6 A betrieben, bei $+6^{\circ}\text{C}$ sind beide Heizkreise praktisch abgeschaltet. Die Heizung des AdBlue-Systems wird, was auch zu erwarten war, nur bei Kälte benötigt. Auch das ist natürlich ein Thermofenster.

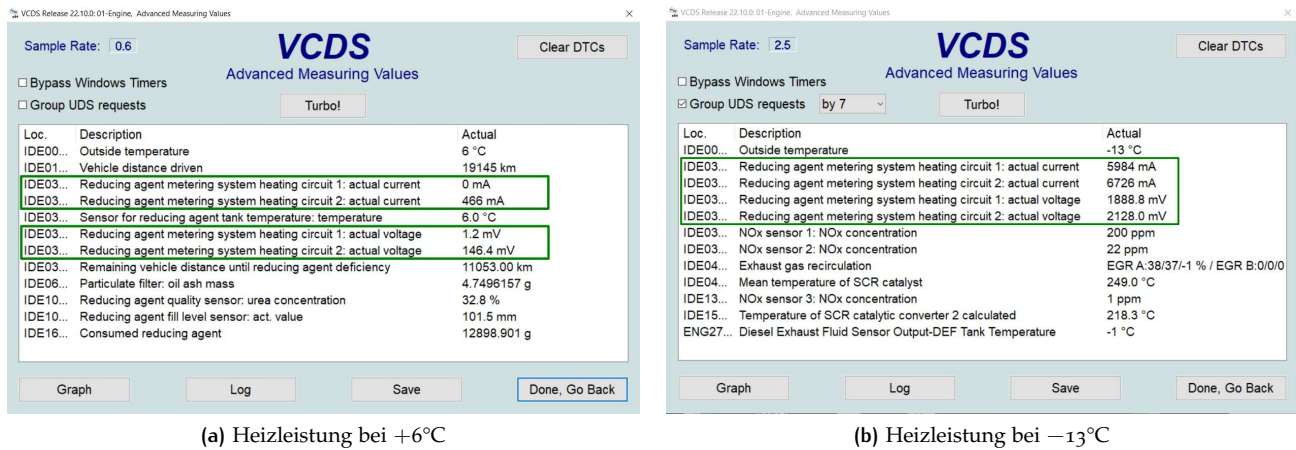


Abbildung 21: Vergleich: Heizleistung im AdBlue-System bei verschiedenen Temperaturen

10.5.7 Standgas

Abbildung 22 zeigt Momentaufnahmen im Standgas. Für die Aufnahme bei +14°C musste ich die Start/Stop-Automatik über den entsprechenden Knopf ausschalten, um Daten zu bekommen. Bei den anderen beiden Aufnahmen hat das Fahrzeug von sich aus die Start/Stop-Automatik nicht verwendet.

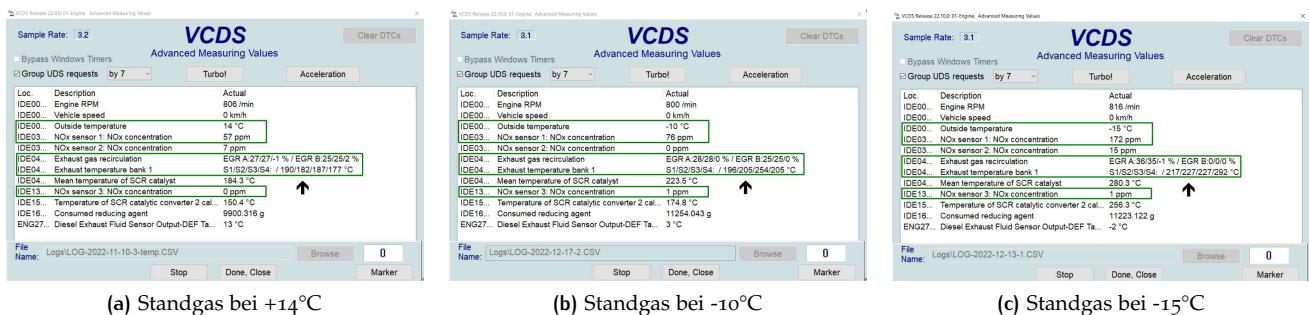


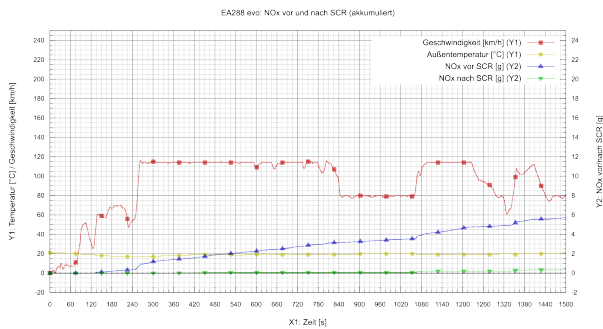
Abbildung 22: Temperaturen im Abgassystem bei Standgas

Eine wesentliche Zeile ist hier „Exhaust Temperature Bank 1“, in der die Messwerte der Temperatur aller vier Temperatursensoren zu sehen ist. Der erste Wert zeigt dabei die Temperatur an, mit der die Abgase direkt aus dem Motor herauskommen. Der dritte Temperatursensor ist derjenige, der die Abgastemperatur zwischen dem Oxidationskatalysator und dem ersten SCR-Katalysator am ersten AdBlue-Injektor misst. Wir sehen dort Werte von 187°C, 254°C und 227°C. Der dritte Sensor zeigt dann einen höheren Wert als der erste, wenn der Oxidationskatalysator noch so warm ist, dass die Abgase beim Durchgang aufgewärmt werden.

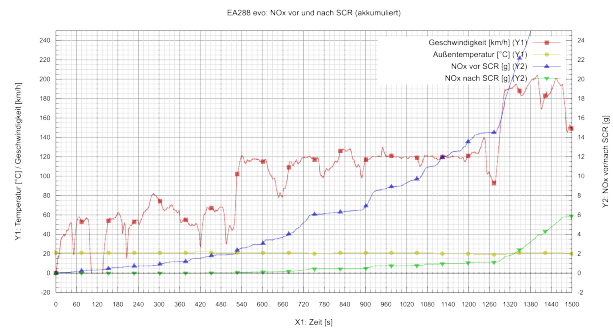
Bei diesen Aufnahmen fällt auf, dass die Abgastemperatur im Standgas bei -15°C deutlich höher ist als bei -10°C oder +14°C. Was man hier sieht, ist die Fähigkeit des Motorsteuergeräts, die Abgastemperatur zu regeln. Die Abgastemperatur wird bei niedrigen Außentemperaturen erhöht. Diese aktive Regelung der Abgastemperatur ist nötig, um das AdBlue-System auch im dichten Stadtverkehr bei niedrigen Außentemperaturen betriebsfähig zu halten.

Desweiteren sieht man, dass sowohl bei $+14^{\circ}\text{C}$ als auch bei -10°C die Ventile der Abgasrückführung ähnlich geöffnet sind. Bei -15°C im Standgas ist dagegen das Ventil der Niederdruck-Abgasrückführung geschlossen, und der Messwert für NOx vor SCR ist mit 172 ppmv viel höher als bei höheren Temperaturen.

10.5.8 Vergleich - 120km/h - flache und bergige Strecke



(a) NOx vor und nach SCR bei 120 km/h auf gerader Strecke



(b) NOx vor und nach SCR bei 120 km/h auf bergiger Strecke

Abbildung 23: NOx im Bergland und auf flacher Strecke bei 120 km/h

Abbildung 23 zeigt zwei Ausschnitte aus zwei Fahrten, eine bei ca. 120 km/h auf gerader Strecke (A99), und eine auf einer besonders bergigen Strecke (A72 ab Plauen in Richtung Hof). Der viel höhere Verbrauch auf bergiger Strecke legt nahe, dass das Ende der Auswertungstrecke wahrscheinlich höher lag als der Anfang. Das spielt jedoch keine Rolle, es geht ja darum zu zeigen, dass bei höherer Last *übermäßig* viel mehr Stickoxide produziert werden, auch dann, wenn man gemäßigt fährt und keine hohen Drehzahlen hat.

Ein Blick in die Rohdaten, aus denen die Graphen erzeugt wurden, zeigt folgende Werte:

- Für die Bergstrecke, wenn man den Bereich von 540 bis 1200 Sekunden auswertet, d.h. ohne die Auffahrt auf die Autobahn:

Zeit [s]	Distanz [m]	Kraftstoff [ml]	NOx vor SCR [mg]	NOx nach SCR [mg]
540	7.834	536	2.591	100
1200	28.897	1.923	13.633	1.071
Differenz	21.063	1.387	11.042	971
pro km		66	524	46

- Für die gerade Strecke, wenn man den Bereich von 330 bis 775 Sekunden auswertet, d.h. ohne die Auffahrt auf die Autobahn:

Zeit [s]	Distanz [m]	Kraftstoff [ml]	NOx vor SCR [mg]	NOx nach SCR [mg]
330	5.146	359	1.304	0
775	19.189	957	2.943	81
Differenz	14.043	598	1.639	81
pro km		43	116	6

Im Bergland war also der Kraftstoffverbrauch 1,5x so hoch, NOx vor SCR pro Kilometer war jedoch 4,5x so hoch. Der gleiche Faktor 4,5 gilt somit auch für den AdBlue-Verbrauch.

Auf Langstrecke bei 120 km/h sehe ich durchschnittliche Werte im Bereich 250 mg NO_x/km vor SCR, d.h. einen AdBlue-Verbrauch von ca 0,5 l/1000 km. Auch dieser Wert hängt jedoch davon ab, ob die lange Strecke eher bergig oder eher flach ist.

10.5.9 Aufwärmzeit des AdBlue-Systems

Für die folgende Analyse dienen die selben zwei Testfahrten wie in Abschnitt 10.5.6 als Grundlage. Dieses Mal schauen wir uns aber nicht nur die Katalysatortemperaturen an, sondern auch den AdBlue-Verbrauch, aber nicht in Litern pro 1.000 Kilometer, sondern den Gesamtverbrauch seit Fahrtbeginn. Dadurch kann man sehen, wie lange es nach Beginn der Fahrt gedauert hat, bis AdBlue verbraucht wurde, dargestellt in Abbildung 24. Dabei muss man berücksichtigen, dass zu Beginn der Fahrt, wenn das SCR-System Betriebstemperatur erreicht, zunächst die Ammoniak-Beladung erhöht wird. Da bei diesen Datensätzen die Ammoniak-Beladung nicht enthalten ist, kann man das nicht direkt visualisieren. Der steile Anstieg, wenn nach Fahrtbeginn erstmals AdBlue-Verbraucht wird, ist also mehr oder weniger Zufall, und hängt vor allem davon ab, wie viel Ammoniak nach Ende der vorherigen Fahrt gespeichert war. Der flachere Anstieg danach wäre aber reproduzierbar, wenn es in Deutschland möglich wäre, Tests bei solchen Temperaturen gezielt mehrfach auszuführen.

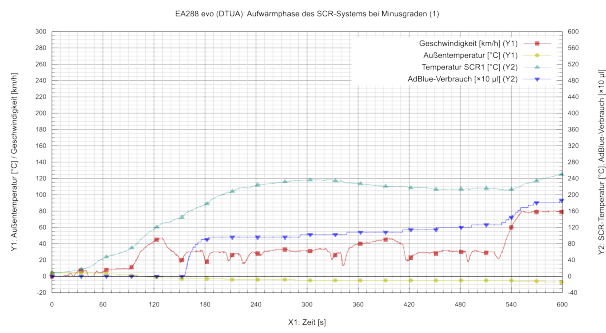
Die Aufwärmzeit liegt im ersten Fall bei 150 Sekunden. Dabei war das Fahrzeug in der Tiefgarage geparkt, die Außentemperatur lag zu Beginn bei ca. -5°C. Der Temperatursensor hat eine gewisse Hysterese, d.h. nach Verlassen der Tiefgarage dauert es etwas, bis er die korrekte Außentemperatur anzeigt.

Im zweiten Fall lag die Aufwärmzeit bei ca. 6 Minuten. Dabei war das Fahrzeug über Nacht draußen bei -11°C geparkt. Nach dem Verlassen des geschützten Bereichs vor dem Wohngebäude ist die Temperatur auf -14°C gesunken. Die Warmfahrphase wurde im Wesentlichen bei 20 bis 30 km/h und -14°C absolviert.

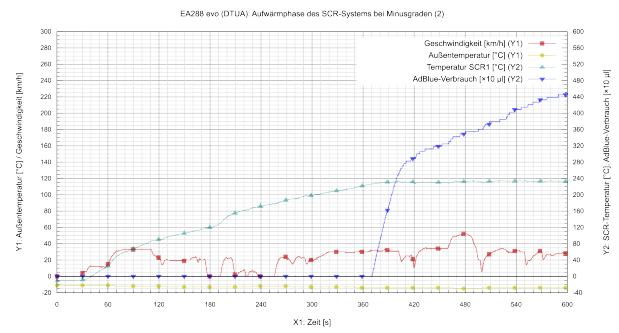
Es gibt nun mindestens zwei mögliche Erklärungen, warum die Aufwärmzeit hier so viel länger war. Hier liegen wir aber tatsächlich im Bereich von Vermutungen:

- **Katalysatortemperatur:** Möglicherweise wird das AdBlue-System bei solchen Temperaturen erst bei 230°C Katalysatortemperatur statt bei 150°C freigegeben
- **AdBlue-Temperatur:** Möglicherweise wird das System erst freigegeben, wenn die AdBlue-Temperatur mindestens -7°C beträgt. Sie lag beim Einschalten der Zündung zunächst bei -9°C, nach einigen Sekunden bei -8°C.

Um dies genauer zu prüfen, ist ein weiterer Test erforderlich. Dabei muss das Fahrzeug bei ähnlichen Außentemperaturen in der Tiefgarage geparkt sein, um den gleichen Test mit höherer AdBlue-Temperatur wiederholen zu können. Gesetzlich ist hier, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, eine Aufwärmzeit von maximal 400 Sekunden bei -7°C erlaubt.



(a) Aufwärmzeit bei -5°C



(b) Aufwärmzeit bei -14°C

Abbildung 24: Aufwärmzeit des AdBlue-Systems im Winter

11 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die Berichterstattung zum Thema der Abgasrückführung, die eben keine Abgase reinigt, und des AdBlue-Verbrauchs war größtenteils nicht nur wirklich grober Unfug, sondern kann nicht den tatsächlichen Wissensstand von Experten dargestellt haben, auch nicht in den Jahren 2016 und 2017, als das Thema vor allem behandelt wurde.

Alles bis einschließlich Abschnitt 9 hätte einem Experten auch damals klar sein müssen:

- Man braucht 1 Liter AdBlue pro 543 Gramm Stickoxide
- Die Abgasrückführung kann keine Abgase von Stickoxiden reinigen
- Die Art der Abgasrückführung hat einen großen Einfluss auf die Stickoxid-Produktion, und damit auf den notwendigen AdBlue-Verbrauch
- Unter hoher Last nimmt der AdBlue-Verbrauch stark zu, viel stärker als der Kraftstoff-Verbrauch
- Es gab in Europa keinen vernünftigen Grund, den AdBlue-Tank beim Service, und erst recht nicht *nur* beim Service zu befüllen. Behauptungen, die Abgasreinigung hätte auf Grund zu kleiner AdBlue-Tanks nicht funktionieren können, entbehren jeder Grundlage.

An einem Euro 6d-Fahrzeug konnte dann gezeigt werden, dass sich an den aufgezählten Punkten bis heute nichts geändert hat. Der AdBlue-Verbrauch lag beim Testfahrzeug bei normaler Fahrweise um die 1 Prozent, bei Vollgas bei 3 Prozent des Kraftstoffverbrauchs.

12 BEWERTUNG DER EXPERTENAUSSAGEN IM ZUSAMMENHANG MIT DER BILDUNGSMISERE

Behauptungen, laut denen der AdBlue-Verbrauch von LKW auf Diesel-PKW übertragbar sei, und dass Diesel-PKW daher einen AdBlue-Verbrauch von 5 Prozent des Kraftstoffverbrauchs haben müssen, habe ich zweifelsfrei widerlegt. Dass die damaligen Aussagen falsch waren ist jedoch nicht das eigentliche Problem. Das eigentliche Problem ist, dass die Aufgabenstellung leicht war. Es handelt sich ausdrücklich nicht um einen unvermeidbaren Irrtum bei einem schwierigen Thema, da das Thema für einen Experten nicht schwierig gewesen wäre.

Bereits der Ansatz, den „Experten“ gewählt haben, mit *Glauben* und *Meinen* arbeiten zu wollen, wäre eines Ingenieurs unwürdig. Hypothesen, wie die, dass der AdBlue-Verbrauch von LKW auf PKW übertragbar sei, hätten allein schon dadurch überprüft werden können, dass die „Experten“ die chemischen Reaktionen im AdBlue-System nachrechnen, und dann eins und eins zusammenzählen. Das Rechnen mit Gleichungen wäre der Weg gewesen, den ein Ingenieur zuerst versucht hätte.

Falls das, was „Experten“ hier in den Jahren 2016 und 2017 gezeigt haben, tatsächlich normale MINT-Kenntnisse und -Fähigkeiten von Experten in ihrem jeweiligen Gebiet darstellen, dann gibt es die Bildungsmisere bereits seit langer Zeit, und dann sind wir wesentlich näher am Film „Idiocracy“, als die Macher im Jahr 2005 wohl dachten. Ein Kommentator schrieb auf Youtube unter <https://www.youtube.com/watch?v=86ixwN3lbZA&lc=UgzF78qvzrWljeyHnXV4AaA> wenn auch ohne Bezug zu einem konkreten Thema:

Idiocracy – Der einzige Film, der als Komödie begann und sich zu einem Dokumentarfilm entwickelt

Dem ist nichts hinzuzufügen.

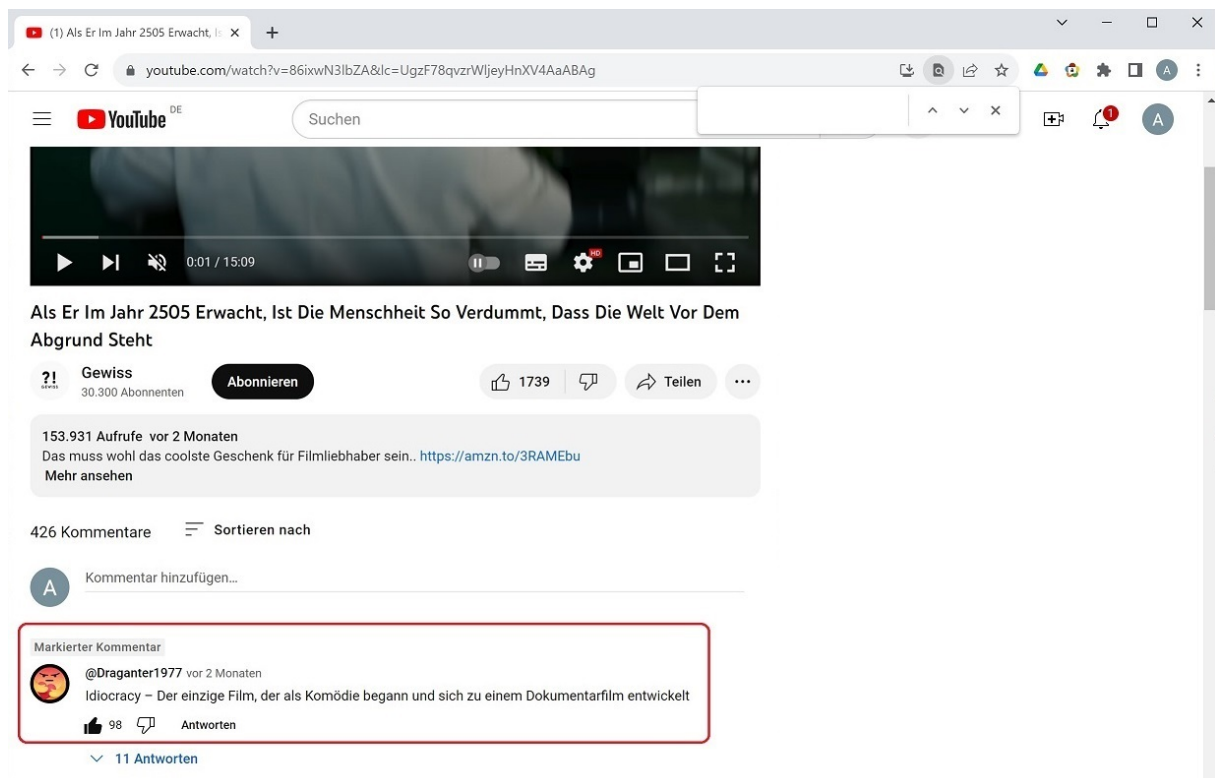


Abbildung 25: Kommentar zu Idiocracy auf Youtube

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch bei einem Euro-6d-Fahrzeug	4
Abbildung 2	AdBlue-Einfüllstutzen	12
Abbildung 3	Messwert des Sensors für Harnstoff-Konzentration	13
Abbildung 4	Unerklärliche Faszination für Tankgrößen bei Journalisten	15
Abbildung 5	Auswahl von Messwerten in VCDS	30
Abbildung 6	Aufnahme mit hoher Ammoniak-Beladung	31
Abbildung 7	Beispiel 1 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs	33
Abbildung 8	Beispiel 2 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs	34
Abbildung 9	Beispiel 3 zur manuellen Berechnung des AdBlue-Bedarfs	34
Abbildung 10	Verhalten der Abgasrückführung bei verschiedenen Situationen	36
Abbildung 11	Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch bei 180 und 200 km/h	37
Abbildung 12	Verbrauch bei hoher variabler Geschwindigkeit	37
Abbildung 13	NOx-Werte bei einer Beschleunigung im 6. Gang	38
Abbildung 14	Vergleich: NOx-Werte bei einer Vollgasbeschleunigung nach Stadtverkehr und nach Autobahn	39
Abbildung 15	NOx-Werte bei einer Vollgasbeschleunigung bei niedriger Drehzahl	39
Abbildung 16	NOx-Werte und Verbrauch bergauf	41
Abbildung 17	Momentaufnahme bei niedrigen Außentemperaturen	41
Abbildung 18	Vergleich: NOx-Sensorwerte bei ähnlicher Fahrweise, aber verschiedenen Außentemperaturen	42
Abbildung 19	Vergleich: 80 km/h auf gerader Strecke bei verschiedenen Temperaturen.	43
Abbildung 20	Vergleich: SCR-Katalysator-Temperaturen bei ähnlicher Fahrweise, aber verschiedenen Außentemperaturen	43
Abbildung 21	Vergleich: Heizleistung im AdBlue-System bei verschiedenen Temperaturen	44
Abbildung 22	Temperaturen im Abgassystem bei Standgas	44
Abbildung 23	NOx im Bergland und auf flacher Strecke bei 120 km/h	45
Abbildung 24	Aufwärmzeit des AdBlue-Systems im Winter	47
Abbildung 25	Kommentar zu Idiocracy auf Youtube	49

REFERENZEN

- [1] ADAC. Messungen an Euro 5- und Euro 6-Pkw im ADAC EcoTest. <https://docplayer.org/21066677-Messungen-an-euro-5-und-euro-6-pkw-im-adac-ecotest.html>, 2011. Accessed: 2023-07-22.
- [2] Stuttgarter Nachrichten. Für saubere Abgase sind große Mengen Adblue nötig. <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.diesel-skandal-fuer-saubere-abgase-sind-grosse-mengen-adblue-noetig.6d7ccfa9-1f35-4818-a9f5-ac99f37168fa.html>, 2017. Accessed: 2023-07-18.
- [3] Dr.-Ing. Andreas Kufferath und Dr.-Ing. Michael Krüger und Dipl.-Ing. Dirk Naber und Dipl.-Ing. Ellen Mailänder und Dr.-Ing. Rudolf Maier. The path to a negligible no₂ immission contribution from the diesel powertrain. <https://www.autonews.com/assets/pdf/bosch-nox-report.pdf>, 2018. Accessed: 2023-08-12.
- [4] EG. RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0050&from=DE>, 2008. Accessed: 2023-07-22.
- [5] ADAC. AdBlue - Preis für Dieselzusatz steigt weiter. <https://www.adac.de/news/adblue-preis-gestiegen/>, 2022. Accessed: 2023-07-22.
- [6] BR24. DUH: Enorme Stickstoff-Belastung in München und Passau. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/duh-enorme-stickstoff-belastung-in-muenchen-und-passau,Qn1PC9h>, 2018. Accessed: 2023-07-22.
- [7] EU. VERORDNUNG (EG) Nr. 692/2008 DER KOMMISSION. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008R0692>, 2008. Accessed: 2023-07-23.
- [8] Isabella Nova und Enrico Tronconi. *Urea-SCR Technology for deNO_x After Treatment of Diesel Exhausts*. Springer Science & Business Media, 2014.
- [9] M. Nahavandi. Selective Catalytic Reduction (SCR) of NO by Ammoniak over V₂O₅/TiO₂ Catalyst in a Catalytic Filter Medium and Honeycomb Reactor: A Kinetic Modeling Study. 2015.
- [10] AutoBild. AdBlue aus der Zapfsäule - BMW und Total starten Feldversuch. <https://www.autobild.de/artikel/bmw-und-total-starten-feldversuch-5565551.html>, 2015. Accessed: 2023-08-15.
- [11] OMV. OMV: AdBlue gegen LKW Abgase nun auch in Bayern. https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20041015_OTS0106/omv-adblue-gegen-lkw-abgase-nun-auch-in-bayern, 2004. Accessed: 2023-08-15.
- [12] Autosieger. Erste AdBlue-Zapfsäule an Autobahn in Betrieb genommen. <https://www.autosieger.de/erste-adblue-zapfsaeule-an-autobahn-in-betrieb-genommen-article5383.html>, 2003. Accessed: 2023-08-15.
- [13] anonym. Ad Blue selber nachfüllen??? <https://www.pkw-forum.de/threads/ad-blue-selber-nachfuellen.35428/>, 2023. Accessed: 2023-07-25.
- [14] ADAC. Sauber durch AdBlue: So filtern SCR-Systeme giftige Autoabgase. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/benzin-und-diesel/funktion-scr-system-adblue/>, 2023. Version von 2023-05-30, Accessed: 2023-07-22.
- [15] anonym. Garantiereparatur + Adblue. <https://www.skodacommunity.de/threads/garantiereparatur-adblue.144822/>, 2023. Accessed: 2023-08-02.

- [16] EPA. EPA Sets Standards for Diesel Fluid Systems; Adopts Relief Measures for Nonroad Equipment. <https://www.auto.de/magazin/neue-motoren-fuer-die-a-klasse-sparsamer-und-staerker/>, 2014. Accessed: 2023-07-29.
- [17] NTV. Umwelthilfe schlägt wegen BMW-Abgaswerten Alarm. <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Umwelthilfe-schlaegt-wegen-BMW-Abgaswerten-Alarm-article24188113.html>, 2023. Accessed: 2023-07-23.
- [18] IFPEN. ÉMISSIONS DES VOITURES ESSENCE ET DIESEL RÉCENTES : PUBLICATION DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR IFPEN. <https://www.ifpennergiesnouvelles.com/node/1163>, 2020. Accessed: 2023-08-07.
- [19] EuGH. Urteil zur rechtssache c 693/18. <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?docid=235722&mode=req&pageIndex=1&dir=&occ=first&part=1&text=&doclang=DE&cid=346157>, 2020. Accessed: 2023-08-10.
- [20] Auto Motor Sport. Spinnt Mazda? 6 Irrtümer zum Reihensechszylinder-Diesel im CX-60 - Bloch erklärt. <https://www.youtube.com/watch?v=LtHqX6if9nI>, 2003. Accessed: 2023-08-21.
- [21] DUH. Dieselgate erreicht BMW: Abgasmessungen bei einem BMW 320d zeigen klare Indizien für Abschaltvorrichtungen. <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/dieselgate-erreicht-bmw-171205/>, 2017. Accessed: 2023-08-05.
- [22] GreenCarCongress. New scania heavy-duty truck series offers up to 8 consumption. <https://www.greencarcongress.com/2013/03/scania-20130322.html>, 2013. Accessed: 2023-08-13.
- [23] DieselNet. Scania introduces Euro VI engine without EGR. <https://dieselnet.com/news/2014/06scania.php>, 2014. Accessed: 2023-08-12.
- [24] Iveco. Das IVECO HI-SCR System: Die effizienteste Euro VI-Technologie. <https://www.iveco.com/germany/presse/pressekit/pages/das-iveco-hi-scr-system.aspx>, 2015. Accessed: 2023-08-12.
- [25] Scania. Neue V8-Generation von Scania: SCR-only und die anderen Technologien hinter dem großen Fortschritt. https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/ch/experience-scania/news/2017/06/20170608_Neue_V8-Generation_von_Scania_SCR-only_und_andere_Technologien.pdf, 2017. Accessed: 2023-08-12.
- [26] Martin Elsener Manfred Koebel, Giuseppe Madia. Selective catalytic reduction of NO and NO₂ at low temperatures. 73, 2002.
- [27] UBA. Stickoxid-Belastung durch Diesel-Pkw noch höher als gedacht. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/stickoxid-belastung-durch-diesel-pkw-noch-hoher>, 2017. Accessed: 2023-07-23.
- [28] UBA. Reale Stickoxid-Emissionen von Diesel-Pkw nach wie vor zu hoch. Diesel-Pkw der neuesten Generation (6d-TEMP) unterschreiten Grenzwerte im Realbetrieb allerdings deutlich. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/reale-stickoxid-emissionen-von-diesel-pkw-nach-wie>, 2019. Accessed: 2023-07-23.
- [29] DUH. Dieselgate erreicht Volvo: Abgasmessungen der Deutsche Umwelthilfe zeigen illegale Abschaltung der Abgasreinigung bei einem Euro 5 Diesel-Volvo XC60. <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/dieselgate-erreicht-volvo-abgasmessungen-der-deutsche-umwelthilfe-zeigen-illegale-abschaltung-der-a/>, 2023. Accessed: 2023-07-23.

- [30] DUH. Deutsche Umwelthilfe überführt BMW der Verwendung von Abschalteinrichtungen: Höchste bisher von Emissions-Kontroll-Institut gemessene Stickoxidemissionen bei BMW-Diesel-Pkw. <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/deutsche-umwelthilfe-ueberfuehrt-bmw-der-verwendung-von-abschalteinrichtungen-hoechste-bisher-von-emis>, 2023. Accessed: 2023-07-29.
- [31] Borg Warner Turbo and Emissions Systems. Kaum Schadstoff aus dem Diesel. <https://automobilkonstruktion.industrie.de/allgemein/kaum-schadstoff-aus-dem-diesel/>, 2008. Accessed: 2023-07-25.
- [32] auto.de. Neue Motoren für die A-Klasse: Sparsamer und stärker. <https://www.auto.de/magazin/neue-motoren-fuer-die-a-klasse-sparsamer-und-staerker/>, 2012. Accessed: 2023-07-25.
- [33] ADAC. Spritpreis-Entwicklung: Benzin- und Dieselpreise seit 1950. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoffpreisentwicklung/>, 2023. Accessed: 2023-07-29.
- [34] Anton Schweizer. Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau. <https://www.schweizer-fn.de/motor/verbrennung/verbrennung.php/>, 2023. Accessed: 2023-08-02.
- [35] dieselnet. Volkswagen 2.0 TDI diesel engine ready for Euro 6d. <https://dieselnet.com/news/2020/12vw.php>, 2020. Accessed: 2023-08-05.

VERSIONSHISTORIE

Version	Datum	Autor(en)	Änderungen
1.00	2023-08-15	AN	Erste Version
1.01	2023-09-05	AN	Innere Abgasrückführung hinzugefügt; Betrachtung von Fahrzeugen ohne Abgasrückführung erweitert; Korrektur von 3.5: die Ausnahme für Einsatzfahrzeuge gilt nicht nur nach UN/ECE 49, sondern auch nach UN/ECE 83; Erweiterung von 6.3 um Bypass bei gekühlter HD-AGR; 10.4: Beispiel mit 120 km/h hinzugefügt; Abschnitt 10.5.3 Informationen über Verbrauchsdaten der Gesamtfahrt hinzugefügt; Abschnitt 10.5.7: relevant ist der dritte Sensor, nicht der zweite. Der zweite Sensor befindet sich zwischen der Abgasturbine des Turboladers und dem Oxidationskatalysator