

Untersuchungen der AGR an einem BMW X3

Felix Domke / November 2021

Inhaltsverzeichnis

Einführung und Ansatz	2
Softwarestand	2
Aufbau der AGR-Regelung	3
Korrelation Einspritzmenge gegenüber Drehmoment	4
Grundkennfeld	5
Korrekturen	7
Korrektur über die Lufttemperatur	7
Korrektur über die Geschwindigkeit	9
Korrektur über die Klimaanlage	10
Zusammenfassung	11
Anhang 1 (Grundkennfeld)	12

Einführung und Ansatz

Im Rahmen der Untersuchung zu einem BMW X3 (EU5) sollte das Abgasverhalten sowohl durch physikalische Messungen auf der Straße als auch durch Analyse der beteiligten Softwarefunktionen eingeordnet werden. Dieses Dokument beschreibt die Analyse der Softwarefunktionen der Motorsteuerung dieses Fahrzeuges, spezifisch den Teil der AGR-Regelung, der die AGR-Rate auf Grund von Umgebungsbedingungen errechnet. Die beschriebene Funktionalität wurde dabei zunächst durch reine Softwareanalyse (Disassemblierung und manuelles Reverse-Engineering) dokumentiert; danach wurden diese Ergebnisse durch Simulation der relevanten Softwareteile verifiziert und dann durch Daten-Protokollierung während der Fahrt validiert. Somit konnte sichergestellt werden, dass die hier beschriebenen Funktionen sich tatsächlich bei einer Realfahrt wie dokumentiert verhalten.

Als Ergebnis dieser Untersuchung steht das Verständnis, nach welchen Kriterien die AGR-Rate innerhalb der Softwaresteuerung geregelt wird. Durch das Fehlen weiterer Einrichtungen der Abgasreinigung (es handelt sich um ein EU5-Fahrzeug) stellt die AGR-Rate den hauptsächlichsten Einfluß auf die NO_x-Emissionen dar. Quantifizierte Emissionswerte allerdings lassen sich nicht direkt errechnen, dazu sei auf die Real-Emissionsmesswerte z.B. durch das PEMS-Verfahren verwiesen.

Softwarestand

Der untersuchte Softwarestand beinhaltet die folgende Versionskennung:

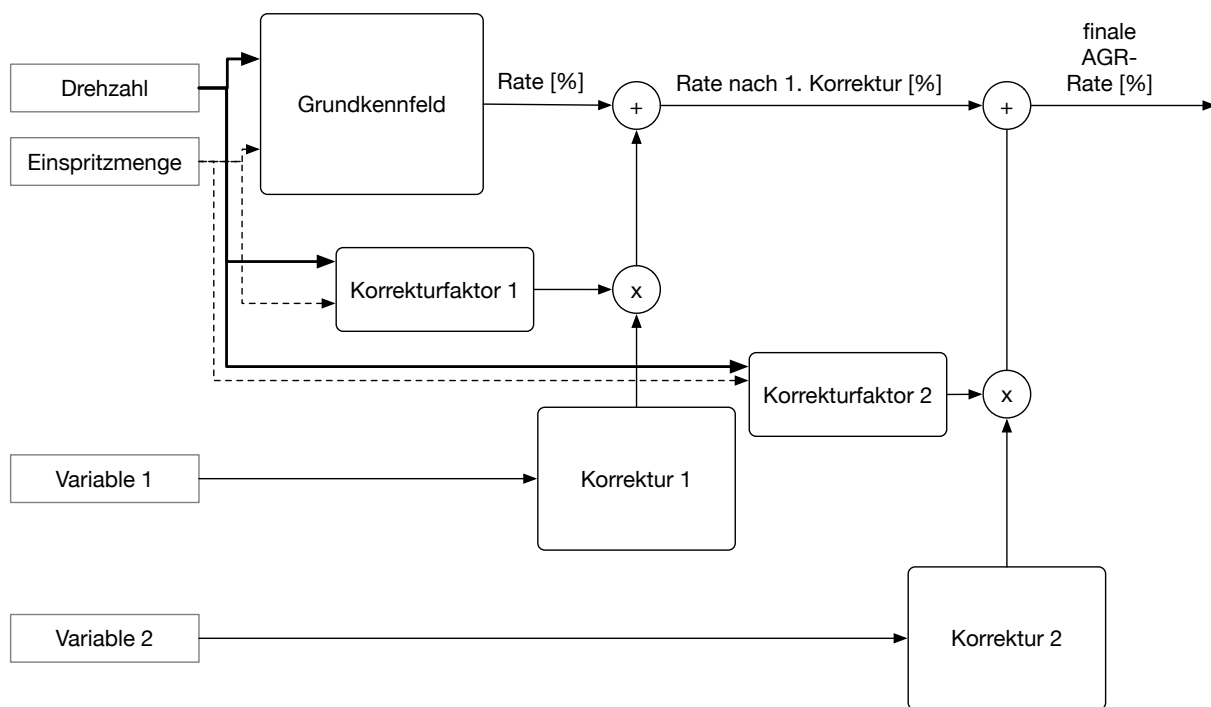
DME__DDE701a#C4#DST#N47D2001-F25N470L_EU5_AT_ATL-neu#P735-
VDU.0#0_7DU0-00000F91-108#F025-13-07-502-FS

Aufbau der AGR-Regelung

Der grundsätzliche Aufbau der AGR-Regelung bei diesem Auto folgt einer Vorgabe der AGR-Rate, die den Anteil der Verbrennungsluft beschreibt, welche nicht aus dem Frischluft- sondern aus dem Abgastrakt entnommen wurde.

Regelkreise steuern dann das AGR-Ventil entsprechend an, um diesen vorgegebenen Anteil zu erreichen. Der Fokus dieser Untersuchung liegt in der Bestimmung der AGR-Rate durch Umgebungs- und Verbrennungsparameter.

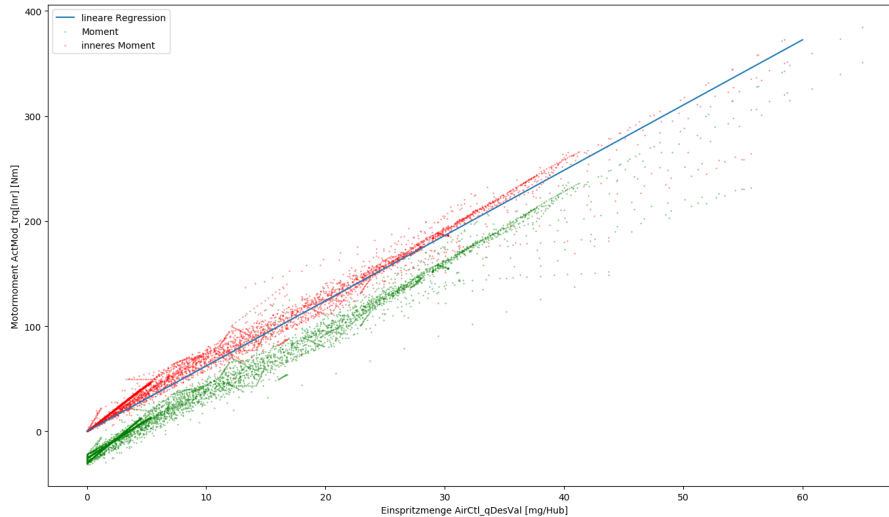
Der Zielwert der AGR-Rate (Sollwert) wird dabei bestimmt durch ein Grundkennfeld welches durch nachfolgende Korrekturen noch in beide Richtungen verändert werden kann. Sowohl das Grundkennfeld als auch die Korrekturen sind dabei vom Arbeitspunkt des Motors abhängig, d.h. von der aktuellen Drehzahl (in rpm) sowie des angeforderten Drehmomentes.



Vereinfachter, genereller Aufbau der AGR-Raten-Berechnung, hier beispielhaft für 2 Korrekturen dargestellt.

Korrelation Einspritzmenge gegenüber Drehmoment

Im Falle der untersuchten Motorsteuerung wird allerdings anstelle des Drehmomentes die Einspritzmenge pro Zylinder pro Umdrehung als Steuergröße verwendet, die stark mit dem inneren Drehmoment korreliert. In der folgenden Darstellung werden diese Größen, basierend auf den gemessenen Daten, gegeneinander gestellt.



Korrelation inneres (rot) bzw. äußeres (grün) Drehmoment (y-Achse) zu Einspritzmenge (x-Achse)

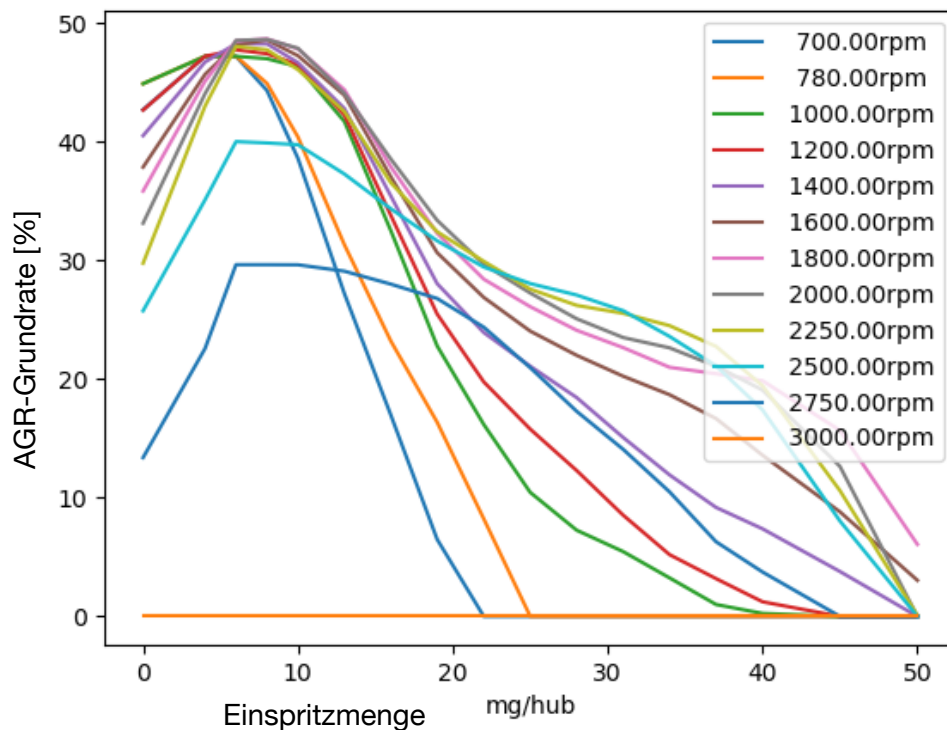
Es ist eine deutliche Korrelation zwischen innerem Drehmoment und der Einspritzmenge zu erkennen. Zur vereinfachten Darstellung in diesem Dokument wird daher die Einspritzmenge zu einem äquivalentem Drehmoment linear umgerechnet, hier mit einem Faktor von $\frac{6.1Nm}{1 \frac{mg}{Hub}}$. Für die

AGR-Ratenberechnung zu Grunde liegt innerhalb der Motorsteuerung aber immer die Einspritzmenge.

Abweichung zu einer ideal linearen Korrelation erklären sich auch durch die beschränkte Sample-Rate während der Messung, durch welche die Größen nicht zum exakt gleichen Zeitpunkt aufgenommen werden konnten.

Grundkennfeld

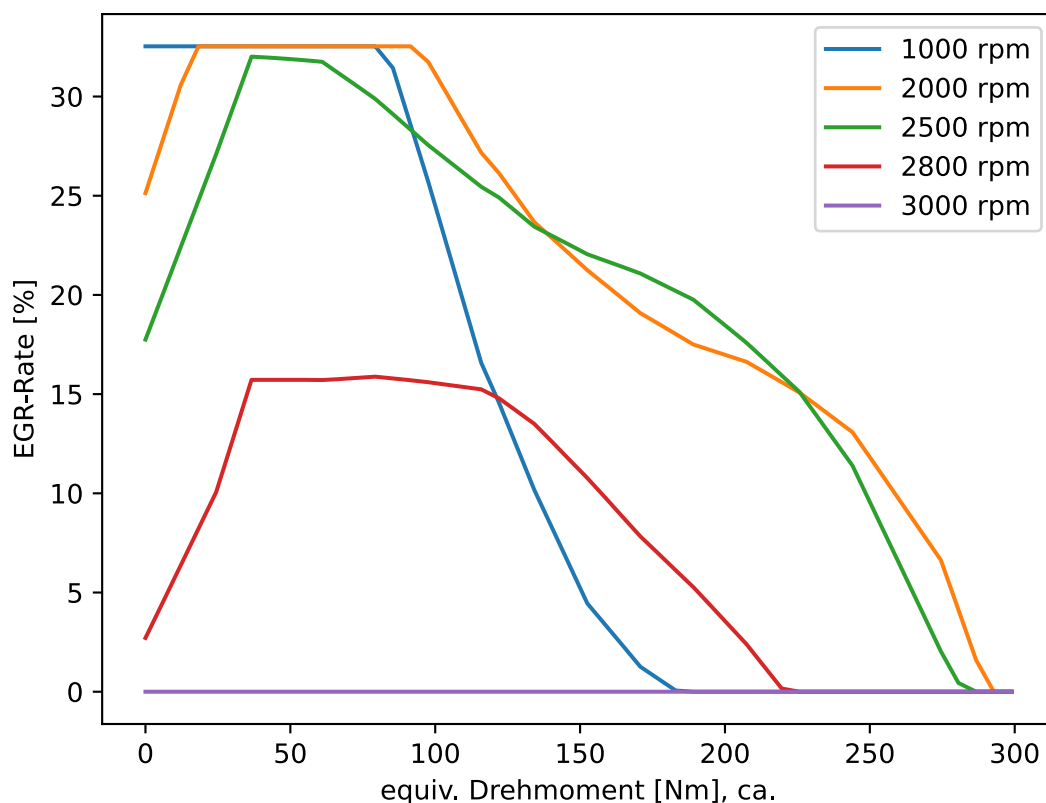
Das Grundkennfeld der Motorsteuerung gibt die AGR-Rate vor den Korrekturen vor. Das Kennfeld ist so aufgebaut, dass abhängig von der Drehzahl und der Einspritzmenge (bzw. Drehmoment) eine AGR-Rate gewählt wird. Durch die Parameter des Kennfeldes ergibt sich, dass die AGR-Rate ein Maximum von ca. 50% erreicht, bei höheren Drehmomenten sich diese aber stark reduziert. Das Grundkennfeld definiert die Basis-AGR-Rate durch Stützstellen bei 12 verschiedenen Drehzahlen je 17 Einspritzmengen, zwischen denen interpoliert wird. Das Grundkennfeld ist im Anhang in Tabellenform dargestellt. Für das Grundkennfeld existiert noch eine Korrektur abhängig vom Umgebungsdruck (äquivalent der Höhe über Meeresspiegel). Da die dieser Untersuchung zugrundeliegenden Messungen aber in einer relativ niedrigen Höhe (ca. 35m über NN) stattgefunden haben, wurden diese Korrekturen hier nicht weiter beachtet.



AGR-Grundkennfeld; bei 12 verschiedenen Drehzahlen ist für 17 verschiedene Einspritzmengen die Grundrate der AGR festgelegt.

Im folgenden wurden Simulationen der AGR-Steuerung bei verschiedenen Umgebungswerten errechnet. Stichprobenartig wurden gemessene Betriebssituationen auf der Straße mit entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen, um sicherzustellen, dass eine Äquivalenz zwischen Simulation und normalem Betrieb gegeben ist. Bei den folgenden beispielhaften Darstellungen wurden die folgenden Parameter fest angenommen:

- Geschwindigkeit 30 km/h
- Klimaanlage deaktiviert
- Temperatur Kühlflüssigkeit: 91.8°C
- Ansaug-Lufttemperatur: 28.5°C



Auswirkung des Grundkennfeldes

Wie erwähnt wurde die Einspritzmenge zum Zwecke einer einfacheren Darstellung in einen äquivalenten inneren Drehmoment umgerechnet. Hierbei wird ein erzeugtes Drehmoment von 6.1 Nm pro mg/hub angenommen, welches durch Auswertung der Korrelation von Einspritzmenge zu errechnetem Drehmoment errechnet wurde. Diese Darstellung ist natürlich vereinfacht, in der Motorsteuerung wird immer die Einspritzmenge als Leitgröße verwendet.

Es ist zu erkennen, dass bei höheren Drehzahlen eine negative Korrektur der AGR-Rate bereits bei kleineren Drehmomenten stattfindet, weiterhin wird die maximale Rate auf kleinere Werte begrenzt. Bei 2800 rpm z.B. beträgt die AGR-Rate bereits bei niedrigen Drehmomenten weniger als die Hälfte des Maximums.

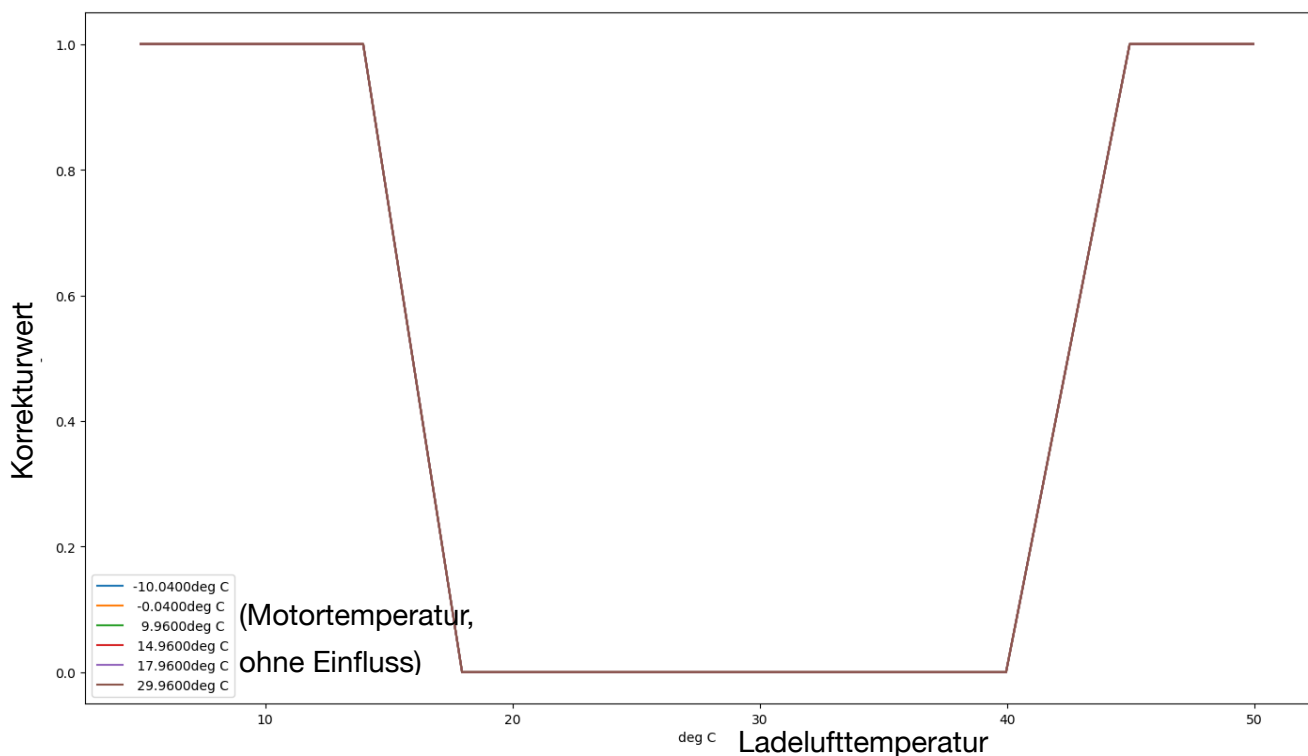
Korrekturen

Auf den vom Grundkennfeld ermittelten AGR-Raten werden nun weitere Korrekturen angewendet, welchen diesen Wert teils erheblich verändern. Diese Korrekturen werden additiv angewendet, d.h. jede Korrektur kann die AGR-Rate absolut erhöhen bzw. erniedrigen. In der Regel wird die AGR-Rate durch die Korrekturen aber nur verringert.

Auch bei diesen Korrekturen wird zunächst eine arbeitspunktspezifische Korrekturmenge ermittelt, d.h. ausgehend von der Einspritzmenge und Drehzahl. Diese Korrektur wird mit einem Faktor multipliziert, der über eine Kurve durch den Korrektur-Steuerwert (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit etc.) gegeben wird. Drei dieser Korrekturen werden im folgenden dokumentiert.

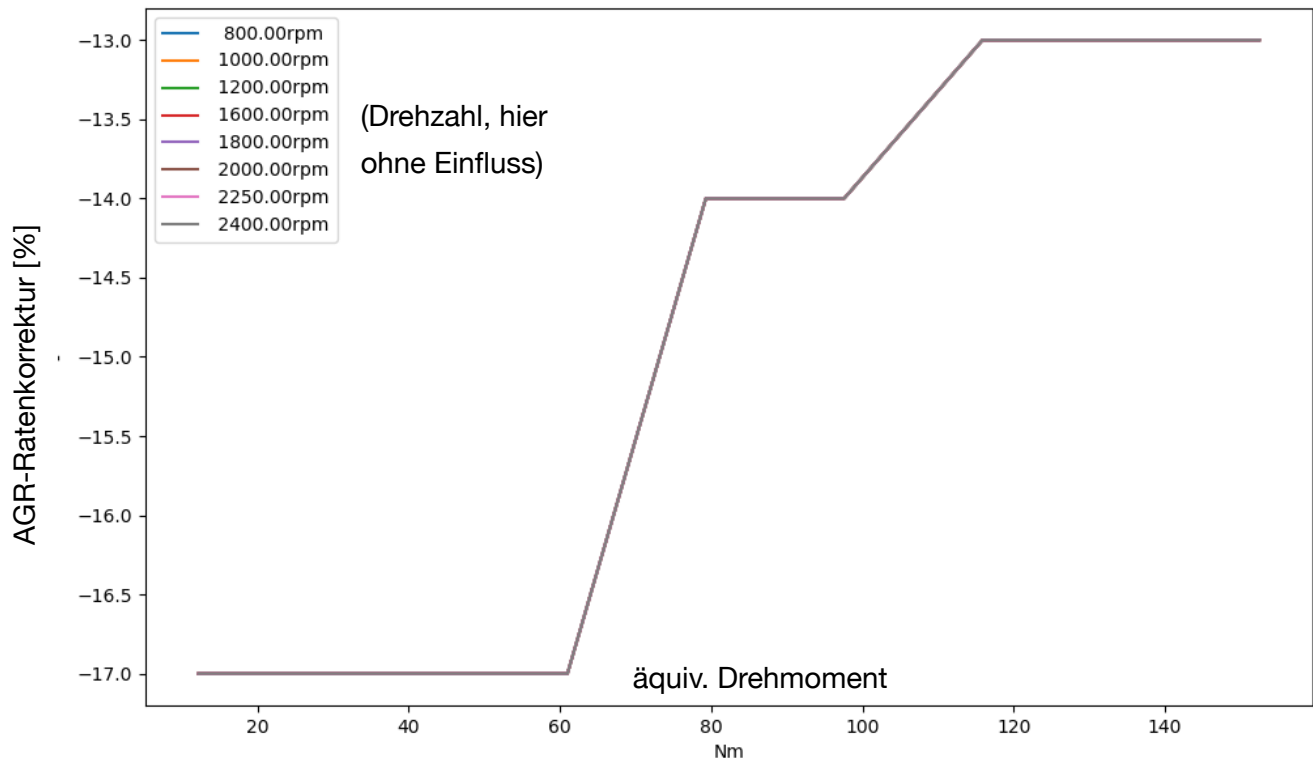
Korrektur über die Lufttemperatur

Eine der Korrekturen wertet die Ladelufttemperatur aus. Zunächst wird hier ein Korrekturwert abhängig von der Ladelufttemperatur ermittelt. Unter 14°C sowie über 45°C ist dieser Wert „1“, d.h. die Korrektur ist voll aktiv. Zwischen 18°C und 40°C ist dieser Wert „0“, d.h. die Korrektur hat keinen Einfluss auf die AGR-Rate. In den Zwischenbereichen ist eine Rampe aktiv.



Korrekturwert abhängig von der Lufttemperatur. (Der Einfluss der Motortemperatur ist durch entsprechende Wahl der Parameter deaktiviert)

Dieser Korrekturwert wird nun multipliziert mit einem Faktor, der von der Einspritzmenge (bzw. Drehmoment) abhängig ist.

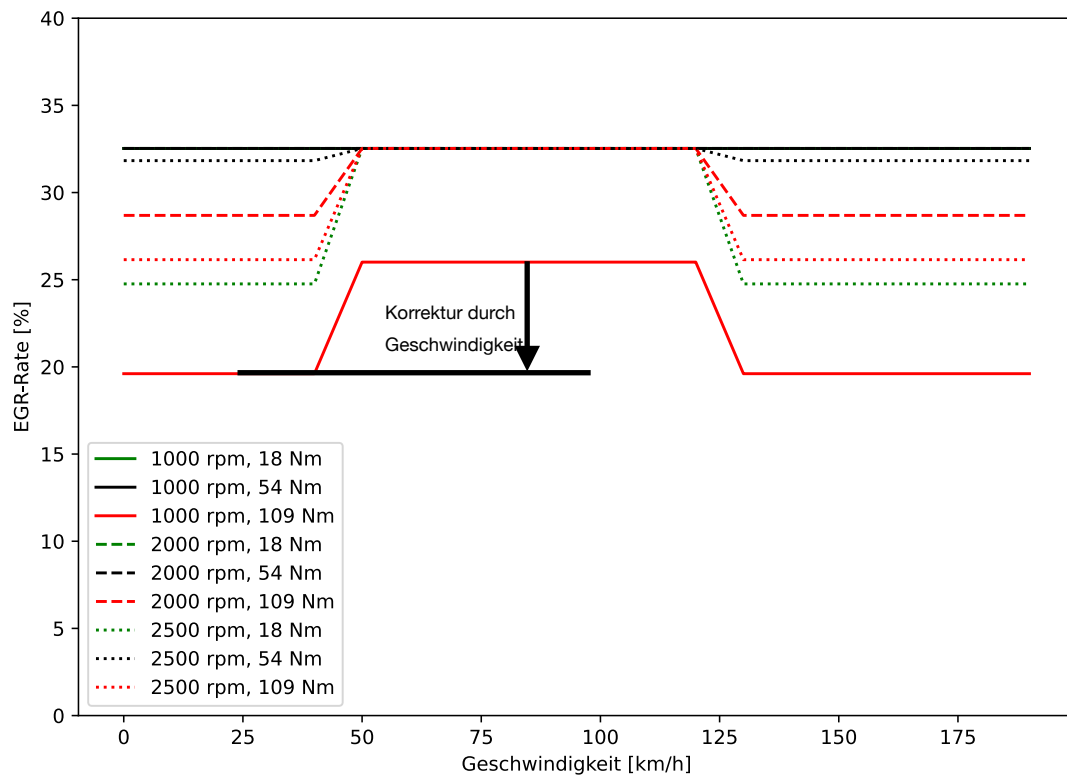


Korrekturfaktor der Lufttemperatur-abhängigen Korrektur

Dies bedeutet, dass die AGR-Rate, je nach Drehmoment, bei Temperaturen unter 14°C (oder über 45°C) um bis zu 17 Prozentpunkte reduziert wird; bei höheren Drehmomenten (und damit generell niedrigeren AGR-Raten aus dem Grundkennfeld) ist die Korrektur schwächer. Im Bereich von 14°C-18°C bzw. 40°C-45°C findet eine Korrektur anteilig ebenfalls statt.

Korrektur über die Geschwindigkeit

Eine weitere Korrektur reduziert die AGR-Rate im Bereich unter 50 km/h sowie über 125 km/h, allerdings nur wenn die Kühlwassertemperatur mindestens 90°C beträgt. Die Korrektur beträgt abhängig vom aktuellen Arbeitspunkt bis zu 8 Prozentpunkte, um welche die AGR-Rate reduziert wird.

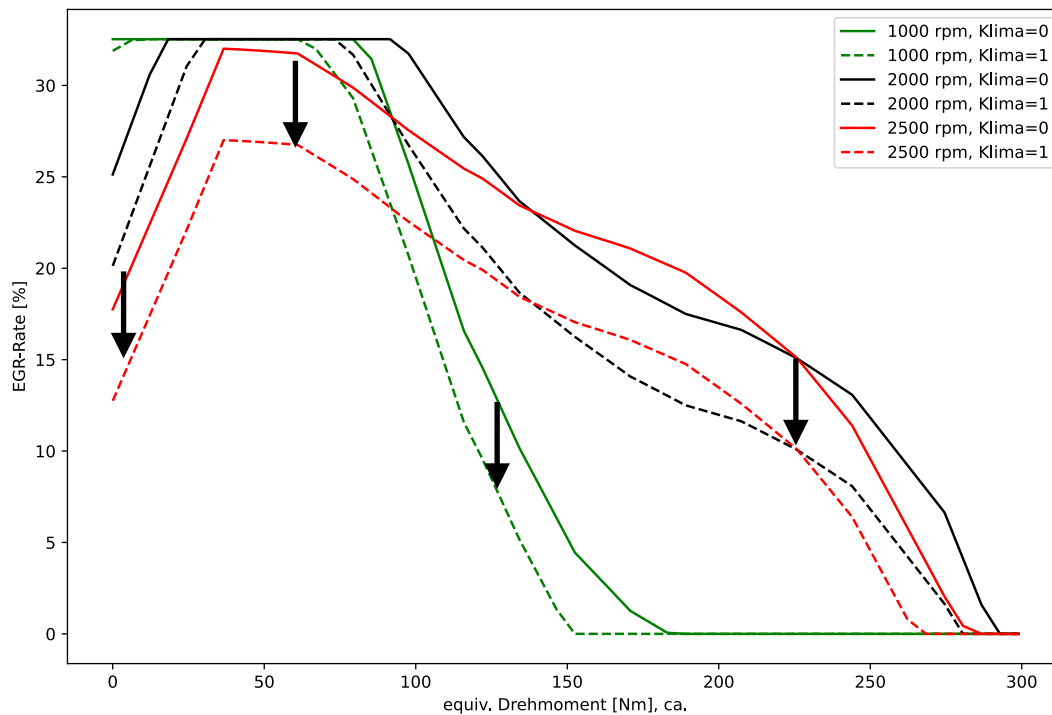


Korrektur der AGR-Rate bei Fahrten ausserhalb des Geschwindigkeitsfensters

Wie zu sehen, ist die Korrektur bei niedrigen Drehzahlen und niedrigen Drehmomenten stärker. Zwischen 50 km/h und 125 km/h findet keine Korrektur statt, unter 43 km/h bzw. über 125 km/h ist die Korrektur maximal. Dazwischen findet ein Übergang (Rampe) statt.

Korrektur über die Klimaanlage

Bei eingeschalteter Klimaanlage wird die AGR-Rate fest um 5 Prozentpunkte reduziert. Diese Reduktion ist unabhängig vom aktuellen Arbeitspunkt, Aufnahmeleistung der Klimaanlage, Innen- oder Außentemperatur.



Korrektur der AGR-Rate bei Aktivierung der Klimaanlage bei drei verschiedenen Drehzahlen (1000, 2000 und 2500 rpm)

Zusammenfassung

Durch Testfahrten mit gleichzeitiger Erfassung der internen Variablen der Motorsteuerung sowie Analyse der Software der Motorsteuerung konnte die Wirkungsweise der AGR-Regelung eines BMW X3 genauer untersucht und dokumentiert werden.

Neben einem Grundkennfeld, welches die AGR-Rate abhängig von (äquiv.) Drehmoment und Drehzahl reduziert, wurden Korrekturen über die Außenlufttemperatur, die Geschwindigkeit und den Status der Klimaanlage dokumentiert.

Anhang 1 (Grundkennfeld)

	0.0000mg/hub	4.0000mg/hub	6.0000mg/hub	8.0000mg/hub	10.0000mg/hub	13.0000mg/hub	16.0000mg/hub	18.5000mg/hub	22.0000mg/hub	25.0000mg/hub	28.0000mg/hub	31.0000mg/hub	34.0000mg/hub	37.0000mg/hub	40.0000mg/hub	45.0000mg/hub	50.0000mg/hub
700.00ppm	1 42.7000-	47.2000-	47.2000-	44.3200-	38.6000-	27.2000-	16.5600-	6.4900-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-
750.00ppm	1 44.8000-	47.2000-	47.2000-	44.9200-	40.0000-	31.3200-	23.2000-	16.3600-	8.2200-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-
1000.00ppm	1 44.8000-	47.2000-	47.2000-	47.0000-	46.3200-	41.7100-	32.5000-	22.7900-	16.1700-	10.4500-	7.2600-	5.1600-	3.2400-	1.0000-	0.2200-	0.0000-	0.0000-
1200.00ppm	1 42.6700-	47.2000-	47.2000-	47.4200-	46.5000-	42.2500-	33.7900-	25.4800-	19.7600-	15.7800-	12.2300-	8.5300-	5.2000-	3.1800-	1.2300-	0.0000-	0.0000-
1400.00ppm	1 40.5100-	46.7200-	48.2500-	48.2500-	46.6700-	42.0800-	35.4200-	28.0400-	23.9200-	21.0800-	18.4400-	15.0800-	11.9200-	9.1800-	7.3800-	3.7800-	0.0000-
1600.00ppm	1 37.6600-	45.6800-	48.1700-	48.5800-	47.2500-	43.9200-	37.6400-	30.6500-	26.8800-	24.0400-	20.0000-	20.2400-	18.6800-	16.6700-	13.5800-	8.8100-	3.0400-
1800.00ppm	1 35.6400-	45.1000-	48.1000-	48.6700-	47.6300-	44.3800-	37.8800-	32.2900-	28.4200-	26.1000-	24.1100-	22.6500-	20.9300-	20.4500-	19.8600-	15.6700-	6.0700-
2000.00ppm	1 33.1300-	44.0500-	48.1000-	48.6300-	47.8000-	44.0800-	38.5400-	33.3800-	29.6700-	27.2500-	25.0800-	23.5000-	22.6300-	21.0800-	19.6000-	12.6400-	0.0000-
2250.00ppm	1 29.7600-	43.0000-	48.0400-	47.7500-	46.8800-	42.5400-	36.5400-	32.4200-	29.9200-	27.5800-	26.2100-	25.5400-	24.5000-	22.7500-	21.4400-	10.6000-	0.0000-
2500.00ppm	1 25.7500-	35.1000-	40.0100-	39.9900-	39.7500-	37.2800-	34.3500-	31.6500-	29.4400-	28.0500-	27.0800-	25.7600-	24.5900-	22.1100-	17.4000-	8.0400-	0.0000-
2750.00ppm	1 13.3800-	22.5700-	29.6400-	29.6400-	29.6300-	29.0900-	28.0000-	26.7900-	24.3700-	20.9600-	17.2800-	14.0800-	10.4500-	6.2500-	3.7400-	0.0000-	0.0000-
3000.00ppm	1 0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-	0.0000-