
Kurzfassung

Die gestiegene Nachfrage nach Individualverkehr durch den wachsenden Wohlstand führte im vergangenen Jahrhundert zu einer Verbreitung des verbrennungsmotorischen Antriebs in Kraftfahrzeugen. Der damit in Verbindung stehende konsequente Anstieg an Abgasen aus dem Verkehrssektor führte zu einem zunehmenden öffentlichen Druck nach „sauberer Luft“, der den Gesetzgeber zum Handeln forderte. Die erstmalige Gesetzgebung zur Reglementierung des Emissionsausstoßes von neuen Kraftfahrzeugen führte zur Entwicklung und anschließendem erstmaligen serienmäßigen Verbau eines Katalysators im Jahr 1976. Die auf einen Katalysator während eines Fahrzeuglebenszyklus einwirkenden Belastungen führen dauerhaft zu einer irreversiblen Schädigung des eigentlichen Grundsubstrats sowie dessen katalytische Beschichtung zur aktiven Schadstoffreduzierung. Aus der Reduzierung der katalytischen Wirkfähigkeit folgt zwangsläufig ein Ansteigen des Kraftfahrzeug-Emissionsausstoßes über die Fahrzeuglaufleistung. Infolgedessen wurden durch den Gesetzgeber nachfolgend zu stetig sinkenden Emissionsgrenzwerten die On-Board-Diagnose (Abkürzung: OBD) sowie Lebensdaueranforderungen des Katalysators eingeführt, die ein funktionsfähiges Abgasnachbehandlungssystem mit einer ausreichend katalytischen Wirkfähigkeit über den Fahrzeuglebenszyklus sicherstellen soll. Die Berücksichtigung der katalytischen Wirkungsgradverschlechterung, auch Katalysatoralterung genannt, ist bereits während der Hardwareauslegung sowie während des anschließenden Entwicklungsprozesses der Motorsoftware essenziell. Um einer langwierigen realen Katalysatoralterung durch Fahrzeugerprobungen bereits während eines Entwicklungsprozesses vorgreifen zu können, sind synthetische Alterungsverfahren von Abgasnachbehandlungssystemen eine übliche Methodik zur Bereitstellung und Berücksichtigung gealterter Katalysatoren während der Hardware- und Software-Auslegung.

Im Gegensatz zu den bekannten synthetischen Alterungsverfahren zielt die in dieser Arbeit entwickelte Methodik auf die Berücksichtigung zukünftiger und länderspezifischer Emissionsgesetzgebungen. Neben potenziell steigenden Dauerhaltbarkeitsvorgaben beachtet das Verfahren erweiterte Anforderungen, wie zum Beispiel vorgeschriebene Luft/Kraftstoff-Zusammensetzungen, länderspezifische Belastungskollektive sowie individuelle Triebstrang-Fahrzeugkombination, im Hinblick auf verbaute Hardware als auch eingesetzte Software.

Statistische Daten aus Fahrzeugerprobungen dienen der Ermittlung von Schädigungsparametern, welche mit Hilfe von Vorversuchen gezielt in ein thermisches Grundgerüst eines synthetischen Alterungsprozesses integriert werden. Zur Realisierung des Alterungsverfahrens und zur möglichen Integration von Turbomotor-typischen Schädigungsmechanismen durch fahrzeugindividuelle Fahrbarkeits-Charakteristika findet die Umsetzung der eigentlichen synthetischen Alterung mit Hilfe eines Abgasturbolader-aufgeladenen V8-Verbrennungsmotors statt. Um die Prüfstandsversuche auch unter Berücksichtigung hoher Alterungsdauern und somit extremer Anforderungen an die Dauerhaltbarkeit des verwendeten Triebstrangs verlässlich durchführen zu können,

werden im Rahmen dieser Arbeit Modifikationen des Prüfstandsbaus entwickelt. Durch Einführung einer zusätzlichen Sekundärlufteinblasung wird eine Temperaturreduzierung der Aufladungskomponenten bei gleichzeitiger Anreicherung des Luft/Kraftstoff-Gemisches zur Steigerung der Exothermie innerhalb des Katalysators ermöglicht. Eine Validierung des synthetischen Alterungsverfahrens findet im Anschluss anhand einer, zu dieser Arbeit parallel ablaufenden, realen Alterungserprobung im Fahrzeugdauerlauf statt. Die für eine Bewertung notwendigen Abgleiche zeigen unter Zuhilfenahme der aus dem Stand der Technik bekannten Methoden wie Sauerstoffspeicherfähigkeit, Abgasrollentests und Light-Off-Vermessungen eine hohe Übereinstimmung. Eine Erweiterung der Light-Off-Daten in Form eines Kennfeldes zur Darstellung des während eines Kaltstarts üblichen, instationär vorliegenden Abgasmassenstroms runden das entwickelte Verfahren hinsichtlich der synthetischen Alterung sowie der Auswertemethodik ab.

1 Einleitung und Motivation

Der in den vergangenen Jahrzehnten gestiegene allgemeine Wohlstand führte zu einer Zunahme des Individualverkehrs durch die Verbreitung des Kraftfahrzeuges. Der für dessen Antrieb verwendete Verbrennungsmotor trug aufgrund seines Schadstoffausstoßes einen großen Teil zu der stetig wachsenden Belastung durch freigesetzte Abgaskomponenten in der Umgebungsluft und innerhalb der Atmosphäre bei. Besonders in den Metropolen führte der anwachsende Straßenverkehr zu ausgeprägtem Smog, dessen Begriff sich aus „Smoke“ und „Fog“ zusammensetzen lässt und seitdem als Synonym für die Anwesenheit von Luftschadstoffen in gesundheitsschädlichen und sichtbeeinträchtigenden Konzentrationen bekannt ist. Der daraufhin steigende öffentliche Druck nach „sauberer“ Luft drängte den Gesetzgeber zu einer Reglementierung des Abgasausstoßes von Kraftfahrzeugen, welche in den 70er Jahren in Form des „US Clean Air Act“ in Kalifornien erstmalig umgesetzt wurde. Ein einfaches Justieren der damals hauptsächlich mechanisch gesteuerten Motorentechnik reichte im Folgeschritt nicht zur Erfüllung der geforderten Grenzwerte aus. Als Ergebnis aufwendiger Forschung und Entwicklung wurde erstmals im Jahre 1976 der zur Erfüllung der Schadstoffnorm erforderliche Dreiwege-Katalysator in einem Personenkraftwagen mit Ottomotor eingeführt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung im Bereich der Motorentechnik und vor allem der Abgasnachbehandlung rechtfertigte eine fortlaufend steigende Verschärfung der Emissionsgesetzgebungen. So wurde nachfolgend neben der weiteren Reduktion des eigentlichen Ausstoßes von gasförmigen Schadstoffen, wie beispielsweise Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x), sowie Partikelemissionen auch eine fahrzeugintegrierte Überwachung der Funktionsfähigkeit des Katalysators durch ein On-Board-Diagnosesystem, welches Fehlfunktionen während des Fahrbetriebs aufzeigt und speichert, gefordert. Die dem Diagnosesystem zugrundeliegenden Forderungen basieren auf der Erkennung der Wirkungsgradverschlechterung eines Katalysators während des Fahrzeuglebenszyklus. Durch fahrzeugspezifische Randbedingungen verringert sich die katalytische Aktivität, welches ein Ansteigen des Emissionsausstoßes über die Lebensdauer mit sich führt. Der sogenannten Katalysatoralterung liegen unterschiedliche Alterungsmechanismen zugrunde, deren Ausprägung neben der fahrzeugspezifischen Hard- und Softwareauslegung auch von der fahrerindividuellen Belastung abhängt. In Europa wurde mit der Einführung der Euro III Norm im Jahr 2000 parallel zur geforderten Unterschreitung der Grenzwerte im Neuzustand erstmals eine Anforderung hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit definiert. Die in Euro III vorgeschriebene Laufleistung von 80.000 km wurde über die vergangenen Jahre bis auf aktuell 160.000 km angehoben und mit der Einführung der Euro V-Gesetzgebung eine zusätzliche zeitliche Komponente ergänzt. In den darauffolgenden Jahren wurden kontinuierlich die Grenzwertvorgaben verschärft und gleichzeitig die Anforderungen an die Dauerhaltbarkeit gesteigert, sodass diese ein entscheidend kritischer Designparameter des Abgasnachbehandlungssystems geworden ist.

1.1 Problemstellung

Das Abgasnachbehandlungssystem eines Ottomotors muss in der Lage sein, die länderspezifisch gesetzlich geforderten Schadstoffgrenzen in allen notwendigen Abgaszyklen auf der Fahrzeugrolle, sowie bedingt durch die Anforderung der „Real-Drive-Emissions“, auch im Realbetrieb zu unterschreiten. Die zusätzlich geforderte Dauerhaltbarkeit des Systems erfordert eine fahrzeugtyp-spezifische Auslegung der Hard- und Software, damit neben dem Neuzustand die geforderten Grenzwerte auch bei hoher Fahrzeuglaufleistung oder hohem Alter der Abgasanlage unterschritten werden können. Die der Schadstoffreduzierung des Katalysators eines Ottomotors zugrundeliegenden funktionellen Elemente sind Edelmetallpartikel, welche feinstverteilt auf dessen Oberfläche als chemische Katalysatoren der Umwandlungsreaktionen wirken. Die im üblichen Fahrbetrieb auftretenden Betriebszustände führen zwangsläufig zu einer Schädigung der Katalysatorbeschichtung und deren Edelmetalle, sodass die Wirksamkeit zur Katalyse von oxidativen und reduktiven Reaktionen zur Umwandlung der Schadstoffe in weniger schädliche Verbindungen über die Zeit abnimmt. Auftretenden Schädigungsmechanismen, wie beispielsweise thermische Sinterung oder mechanische Abrasion, müssen über Maßnahmen der Motor- und Abgasnachbehandlungs-Software ausgeglichen werden. Um diese Maßnahmen bereits in der Entwicklungsphase eines Kraftfahrzeuges und dessen Antriebstranges berücksichtigen zu können, muss eine über die vom Gesetzgeber geforderte Laufleistung betriebene Abgasanlage frühzeitig zur Untersuchung zur Verfügung stehen. Das Problem dieser Methodik liegt in der zur Verfügung stehenden Zeit: Die reale Alterung eines Abgasnachbehandlungssystems mit Hilfe von Fahrzeugerprobungen über eine Laufleistung von bis zu 250.000 km erfordert einen erheblichen Zeitraum, welcher während der üblichen Entwicklungsphasen eines Kraftfahrzeuges in der Regel nicht zur Verfügung steht.

1.2 Zielstellung dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik bzw. eines Verfahrens zur synthetischen Katalysatoralterung, mit dessen Hilfe die zur Entwicklung notwendige Wirkungsgradverschlechterung innerhalb eines deutlich verkürzten Zeitraumes auf Basis eines Motorprüfstands realitätsnah hervorgerufen werden kann. Der Fokus liegt im Vergleich zu bereits vorhandenen synthetischen Alterungsverfahren auf der Berücksichtigung länderspezifischer Gesetzgebung bzw. der geforderten Laufleistung, der dort vorliegenden spezifischen Fahrzeug-Belastungskollektive als auch auf der Kombination des Fahrzeug-Triebstrang-Entwicklungsprojektes. Mit Hilfe einer Analyse bestehender, während der realen Fahrzeugerprobung auftretenden Alterungsmechanismen, einer anschließenden Validierung und der Übertragung auf einen synthetischen Zyklus wird eine hohe Übereinstimmung zwischen der synthetischen Katalysatoralterung und der nachgelagerten realen Fahrzeugerprobung angestrebt. Bedingt durch die mit einer synthetischen Alterung in Verbindung stehenden hohen Prüfstands-Betriebskosten wird ein weiterer Fokus auf die Optimierung der benötigten Durchlaufzeit gelegt. Zudem muss sichergestellt werden, dass mit Hilfe des zur Verfügung stehenden

Prüfstandsaufbaus alle notwendigen Alterungsmechanismen unter Berücksichtigung eines zuverlässigen und hardware schonenden Betriebes auch für zukünftige Anforderungen besteht.

1.3 Aufbau dieser Arbeit

Das **Kapitel 2** beschreibt die Historie der europäischen gesetzlichen Emissionsanforderungen für Personenkraftwagen sowie die zur Erfüllung der Gesetze erforderlichen Emissionszyklen. Neben der Erläuterung zukünftiger Herausforderungen bezüglich der anstehenden Euro VII Gesetzgebung wird der Fokus im Rahmen des „Standes der Technik“ auf den Ursprung der ottomotorischen Schadstoffe, des für den Ottomotor angewendeten Abgasnachbehandlungssystems „Dreiwegekatalysator“, mögliche Schädigungsmechanismen und der eigentlichen Wirkungsgradabsenkung gelegt.

Das **Kapitel 3** befasst sich mit möglichen Testverfahren zur Bestimmung der katalytischen Aktivität, die im späteren Verlauf der Arbeit zur Validierung der synthetischen Alterung Anwendung finden. Zusätzlich zu den erläuterten Methodiken wird ein innerhalb dieser Arbeit entwickeltes Verfahren zur verbesserten Darstellung von Abgasanlagen-spezifischen Konvertierungskennfeldern vorgestellt.

Die Bestimmung des Alterungsverhaltens eines Abgasnachbehandlungssystems unter realen Fahrzeugbedingungen und die daraus resultierenden Vorteile einer synthetischen Komponentenalterung werden in **Kapitel 4** erläutert.

Das **Kapitel 5** befasst sich mit den während der Fahrzeugerprobung auftretenden Schädigungsarten einer Abgasanlage als auch der Identifikation relevanter Parameter hinsichtlich eines möglichen Übertrags in einen synthetischen Alterungszyklus. Auf Basis von Vorversuchen werden Schädigungsmechanismen gezielt selektiert und ermöglichen die nachfolgende Definition eines prüfstandgestützten Alterungs-Zyklus.

Kapitel 6 beinhaltet die Auslegung des innerhalb dieser Arbeit entwickelten motorprüfstandgestützten synthetischen Alterungszyklus. Es greift die zur Realisierung der Alterung notwendigen Hauptpunkte der vorherigen Kapitel auf, und erläutert anhand dieser die theoretische und praktische Umsetzung. Zudem wird die eigentliche Motorsteuerung und -regelung zur Realisierung der synthetischen Alterung erläutert.

Kapitel 7 beschreibt die Durchführung der synthetischen Katalysatoralterung und die anschließende Validierung anhand einer zur Prüfstandsalterung parallel absolvierten realen Fahrzeugerprobung am Beispiel des Abgasnachbehandlungssystems des M139 Triebwerkes unter Berücksichtigung der aktuell herrschenden Euro VI Gesetzgebung.

Kapitel 8 fasst die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammen.

Der Aufbau des innerhalb dieser Arbeit entwickelten Motorprüfstandes sowie die experimentelle Umsetzung des Alterungszyklus werden im **Anhang** beschrieben. Es wird

gesondert auf die notwendigen Maßnahmen und Modifikationen zur Umsetzung einer synthetischen Alterung eingegangen.

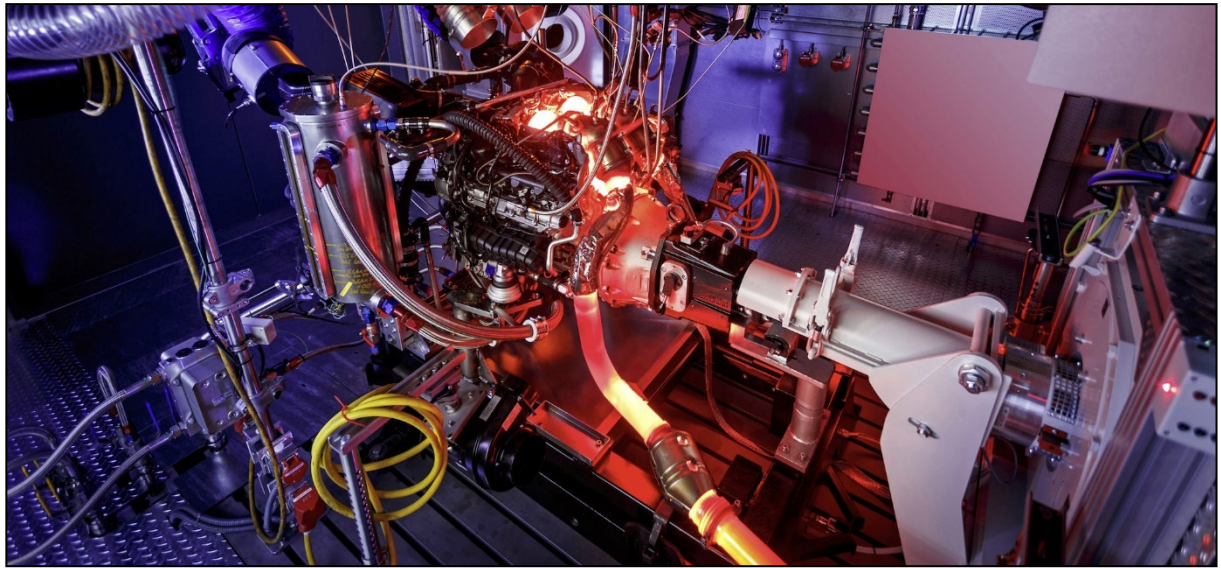


Abbildung 1: V8-Motor (M178 LS1.5) des AMG GTR (BR190) auf dem Motorenprüfstand unter hoher Lastanforderung und somit hohen Abgas- & Katalysatortemperaturen

2 Forschungsstand

2.1 Europäische KFZ-Abgasgesetzgebung

Mit dem Anstieg des Wohlstandes im zwanzigsten Jahrhundert wurde das Kraftfahrzeug (KFZ) für die breite Masse der Bevölkerung erschwinglich. Die Folge war eine Zunahme des Individualverkehrs auf dem Land, und vor allem in den Städten. Bedingt durch die kontinuierlich wachsende Anzahl an Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor stiegen die Abgasemissionen, welche neben anthropogenen Emissionsquellen wie Heizung, Industrieanlagen und Klimaanlagen einen deutlichen Teil zur Belastung der Umwelt beitrugen. Die durch den Verbrennungsprozess im Verbrennungsmotor freigesetzten Abgaskomponenten gelangen in die Umgebungsluft und Atmosphäre, in der sie anschließend chemische Reaktionen eingehen. Die entstehenden chemischen Verbindungen bilden zum Teil toxische Substanzen, die sich besonders in den Knotenpunkten des Verkehrs in den Großstädten anreichern. Mit der Zunahme der städtischen „schlechten“ Luft entwickelte sich aus den USA heraus ein Begriff, welcher die Worte „Rauch“ (engl. Smoke) und „Nebel“ (fog) kombinierte und als „Smog“ weltweit Verwendung als Synonym für toxische, schlechte Luftverhältnisse Anwendung findet [Hag16, S. 27].

Aufgrund des stetig wachsenden öffentlichen Interesses nach sauberer, frischer Luft entstand vor allem bei Kraftfahrzeugen die Motivation zur Reduzierung des Ausstoßes von gas- und partikelförmigen Emissionen. Wachsender öffentlicher Druck drängte den Gesetzgeber dazu, Reglementierungen des Abgasausstoßes zu fordern, sodass der Grundstein der heutigen Abgasgesetzgebung, der sogenannte „US Clean Air Act“, in den 70er Jahren die Regulierung der Abgaswerte für Automobile einführte. Die geforderten Grenzwerte konnten damals nur mit Hilfe der neu eingeführten Katalysatortechnologie eingehalten werden [Hag16, S. 27]. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Emissionsgrenzwerten inklusive der begleitenden Prüfmethoden sorgten in den Folgejahren für stetig verringerte Abgasemissionen. Industrienationen agieren bei der Abgasgesetzgebung entweder als Einzelnation (bspw. Japan) oder im Zusammenschluss (bspw. ECE, englisch: Economic Commission for Europe) oder UN (englisch: United Nations) als Wirtschaftsverbund. So wird beispielsweise der Emissionsausstoß von Automobilen im amerikanischen Raum durch die CARB/U.S. EPA (englisch: California Air Resolution Board/United States Environmental Protection Agency) und im europäischen Bereich durch die UN-Gesetzgebung reglementiert. Die genannten Gesetzgebungen dienen den einzelnen Nationen als Vorlage, welche länderspezifisch adaptiert und entsprechend umgesetzt werden. Die Europäische Union (EU) hat sich als Ziel gesetzt, die Luftqualität fortwährend durch kontinuierlich verschärfende Gesetzgebungen und somit sinkenden Kraftfahrzeugemissionen zu steigern und somit dem Wunsch der Bevölkerung zu folgen [Eic24] [Rei15, S. 112] [Eur07, S. L171/1-L171/4].

2.1.1 Entwicklung Europäischer Kraftfahrzeug-Abgasgesetzgebung

Seit der Einführung der EU-Richtlinie 0/220/WG im Jahr 1970 hat sich der durch Kraftfahrzeuge hervorgerufene Emissionsausstoß deutlich reduziert [Rei15, S. 121]. Durch die Wechselwirkung zwischen der notwendigen Weiterentwicklung der Motorentechnik, verbesserter Abgasnachbehandlungssysteme (Abkürzung: AGN-Systeme) zur kontinuierlichen Emissionsreduzierung und weiter verschärfter Reglementierung durch den Gesetzgeber konnten nachweislich Erfolge hinsichtlich der Verringerung des Emissionsausstoßes erzielt werden. Die Einführung der Katalysatortechnik kombiniert mit einer permanenten Überwachung der Betriebsfähigkeit der Abgasnachbehandlungsanlagen, erforderten eine Anpassung der Betriebs- und Kraftstoffe und befähigten den Motor zu einem geringeren Rohemissionsausstoß. Ausgehend von der ersten Stufe der Gesetzgebung im Jahre 1993 (Euro I) folgten die Stufen Euro II im Jahr 1996 und die Euro III-Gesetzgebung im Jahr 2000, welche erstmals Zertifizierungsbedingungen für Neufahrzeuge festlegte [Hag16, S. 4]. Folgend auf die Stufen Euro IV (2005), V (2009) und Euro VI (2014) befindet sich aktuell die Euro VII-Gesetzgebung in finaler Diskussion. Neben Bemühungen zur Reduzierung von Schadstoffen wie Kohlenstoffmonoxide (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) steht aktuell die Verringerung des Ausstoßes des treibhausschädlichen Gases Kohlenstoffdioxid (CO_2) im Fokus. Der Trend zur Dekarbonisierung führte in der Vergangenheit zu einer freiwilligen Selbstverpflichtung des europäischen Automobilverbandes (ACEA, englisch: European Automobile Manufacturers Association) den Kohlenstoffdioxidausstoß von Neufahrzeugen so gering wie möglich zu gestalten [Eic24] [Hag16, S. 5].

2.1.2 Testverfahren und Fahrzyklen der Europäischen Gesetzgebung

Für die Herstellung und das Inverkehrbringen eines Kraftfahrzeuges ist in den meisten Ländern eine Typgenehmigung notwendig. Durch die fahrzeugspezifische Genehmigung erhält der Fahrzeughersteller (Abkürzung: OEM; englisch: Original Equipment Manufacturer) die Erlaubnis zur Einführung des zertifizierten Fahrzeuges in den öffentlichen Straßenverkehr. Einen Teil der gesetzlich erforderlichen Typgenehmigung diverser fahrzeugspezifischer Merkmale stellen die Anforderungen an die On-Board-Diagnose (Abkürzung: OBD) sowie die an das Emissionsminderungssystem dar [Eur07, S. L171/4]. Die Konformitäts-Überprüfung der genannten Diagnose- und Abgasnachbehandlungssysteme erfolgt nach gesetzlicher Vorgabe mit Hilfe von definierten Testprozeduren inklusive Messtechnikanforderungen. Standardisierte Verfahren sichern hierbei eine fahrzeugübergreifende Vergleichbarkeit und ermöglichen erst die Definition von einzuhaltenden Grenzwerten. So wurde von der Europäischen Union 1992 der Neue Europäische Fahrzyklus (Abkürzung: NEFZ; englisch: NEDC) ins Leben gerufen, der bis 2017 als standardisiertes Verfahren zur vergleichenden Ermittlung des Emissionsausstoßes von Kraftfahrzeugen mit Ottomotor diente.

Der NEFZ schreibt neben dem eigentlichen Fahrzyklus mit seiner Fahrkurve auch die Vorkonditionierung des Fahrzeuges und mit der dazugehörigen Auswertung und Analyse der Ergebnisse vor. In seiner Dauer von 1180 Sekunden wird eine zweiphasige

Fahrstrecke von 11 Kilometern absolviert. Beginnend mit einem sich mehrfach wiederholten Stadt-Zyklus von 780 s erfolgt anschließend ein Überland-Zyklus mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h; die über den Zyklus gemittelte Geschwindigkeit beträgt 34 km/h [Eur83, S. L 197/15]. Die Durchführung des Fahrzyklus erfolgt auf einer Fahrzeugrolle in einem Emissionslabor bei einer Umgebungstemperatur zwischen 20 °C und 30 °C, wobei eine Fahrzeugvorkonditionierung von mindestens sechs Stunden eine maximale Abweichung der Betriebsmitteltemperatur von zwei Grad Celsius sicherstellen muss [PL14, S. 99-105]. Die durch das Fahrzeug während der vorgegebenen Fahrkurve erzeugten Abgasemissionen werden gesammelt und analysiert. Nach Summation der Ergebnisse erfolgt die Mittelung über die absolvierte Strecke. In der Regel wird im Nachgang das Ergebnis des Ausstoßes der Emissionen in Gewicht pro Kilometer ausgegeben. Einzig die Ausgabe der Partikelanzahl erfolgt in entsprechender Anzahl. Die kontinuierliche Verschärfung der Emissionsgrenzwerte führte zwangsläufig zu einer stetigen Weiterentwicklung der Fahrzeug- und Antriebstechnologie und dadurch zur substantiellen Reduktion der Fahrzeugemissionen. Der reale Emissionsausstoß unterschied sich dabei wohlwissend von den im Abgaslabor gemessenen Werten, da der Fokus auf einer verhältnismäßigen Verringerung lag. Eine Reduktion des Ausstoßes auf der Abgasrolle im Abgaslabor führte zwangsläufig zu einer proportionalen Reduktion der Abgasemissionen im öffentlichen Straßenverkehr. Die Weiterentwicklung von Motorsteuergeräten ermöglichte den Herstellern, den Emissionsausstoß einsatzbezogen zu optimieren. Sie führte aber auch dazu, dass zunehmend eine Diskrepanz zwischen den Messergebnissen im Abgaslabor und auf öffentlicher Straße auftrat, sodass der Gesetzgeber 2017 eine Überarbeitung des Test-Zyklus sowie des Test-Verfahrens vornahm. Mit der Definition des "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures" (englische Abkürzung: WLTP) erfolgte die Einführung einer angepassten Prozedur zur Überprüfung der Emissionen als gesetzliche Vorgabe [MT19, S. 49] [UN01, S. 31-77]. Das Verfahren beinhaltet aktuell neben dem eigentlichen Zyklus „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle“ (englische Abkürzung: WLTC) auch Emissionsmessungen im realen Straßenverkehr (englisch Abkürzung: RDE; englisch: Real Driving Emissions). Der WLTC ist analog dem NEFZ ein Fahrzyklus auf einer Fahrzeugrolle im Emissionslabor. Sein Geschwindigkeitsprofil bzw. seine einzuhaltende Fahrkurve basiert auf Realfahrten mit einer Gesamtlänge von ca. 700.000 km. Die dadurch bedingte größere Realitätsnähe führt zwangsläufig zu steigenden Emissionen und Verbräuchen im Vergleich zum NEFZ. Der Zyklus beinhaltet vier Phasen, die sich deutlich in Ihrer Geschwindigkeit unterscheiden. Zusätzlich wurden weitere Bedingungen, wie zum Beispiel die vorher genannte Vorgabe hinsichtlich des Temperaturfensters, strenger reglementiert. So muss während des Absolvierens des Zyklus eine konstante Umgebungstemperatur von 23°C eingehalten werden.

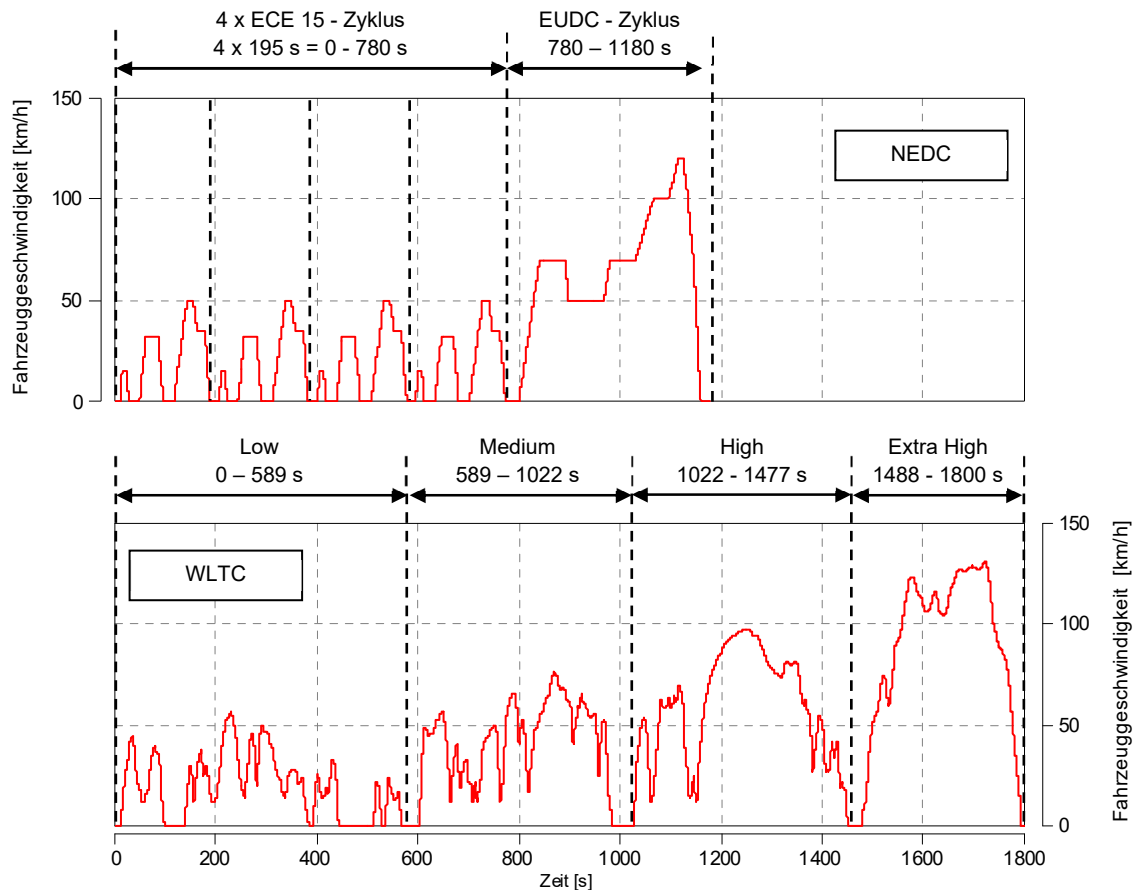


Abbildung 2: Vergleich der Fahrkurven der Test-Zyklen NEDC und WLTC auf der Abgasrolle [EIC24] [Eur70, S. L 76/8] [Goß20, S. 213] [UN01, S. 32-76]

Durch die bereits angesprochene Messung der Real Driving Emissions (englische Abkürzung: RDE) wird durch den Gesetzgeber versucht, die Lücke zwischen den Messergebnissen aus dem Abgaslabor und dem Realbetrieb zu schließen. Messungen im öffentlichen Straßenverkehr ermöglichen die Aufweitung der Testbedingungen, sodass neben dem eigentlichen Fahrzeug nun auch variierende Verkehrsdichte sowie die Umweltbedingungen Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Somit findet die Integration des „Zufalls“ in der eigentlichen Testprozedur statt, die die Signifikanz der gemessenen Werte für spätere Fahrzeugnutzer erhöhen soll. RDE-Tests bzw. –Zyklen obliegen vordefinierten Randbedingungen, wie z. B. Testdauer, Streckenaufteilung und topografischen Gegebenheiten [Tsc19, S. 1]. Im Gegensatz zum NEFZ und WLTC obliegen im RDE nach aktueller Euro VI d Gesetzgebung nur NO_x - und Partikelemissionen der gesetzlichen Vorgabe, die durch eine Auswertung nach einem definierten Verfahren in sogenannten Konformitätsfaktoren (englische Abkürzung: CF; englisch: Conformity Factor) umgewandelt werden. Die Messung der Abgasemissionen erfolgt mit Hilfe eines portablen Messsystems PEMS (englische Abkürzung: Portable Emission Measurement System), das im Regelfall auf der Anhängerkupplung montiert wird, sodass es ohne größeren Einfluss auf Fahrzeugfahrwiderstände mit dem Auto befördert werden kann [EIC24].

2.1.3 Euro VII-Gesetzgebung

Die Euro VII-Gesetzgebung stellt den nächsten Schritt der Regulierung von Abgasemissionen und entsprechenden OBD-Systemen in Europa dar. Es liegt derzeit noch keine finale Version der Gesetzgebung vor, sodass die aktuelle Prognose Gegenstand der Diskussion ist. Nach derzeitigem Stand wird voraussichtlich keine Änderung der limitierenden Grenzwerte für Emissionsmessungen auf der Fahrzeugrolle im Abgaslabor im Vergleich zur Euro VI-Gesetzgebung stattfinden. Zusätzlich zu den bisher gültigen Regulierungen wird mit der Einfuhr eines Grenzwertes für Ammoniak (NH_3) gerechnet. Zudem wird eine Reduktion des Größenspektrums für Partikelemissionen von bisher 23 auf 10 Nanometer erweitert, welches nun auch für Ottomotoren ohne Direkteinspritzung zu erfüllen ist. Der Hauptfokus der Änderungen zur Euro VII-Gesetzgebung liegt vor allem im Bereich der RDE-Vorgaben. Die Konformitätsfaktoren für RDE-Fahrten werden von 1,6 auf 1,0 reduziert und stellen somit die Angleichung zwischen Abgaslabor und Realfahrt sicher. Die zu erfassenden Emissionsspezies werden hierbei im RDE auf alle üblichen im Abgaslabor messbaren Schadstoffe ausgeweitet. Neben der Erweiterung der Umgebungstemperatur auf ein Temperaturfenster von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird die maximale atmosphärische Höhe auf 1800 m und die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 160 km/h erhöht. Die Mindestlänge einer RDE-Messung wird um 70 Prozent von 10 auf 3 km reduziert. Bedingt durch den damit steigenden prozentualen Anteil des Kaltstarts mit seinem erhöhten Ausstoß an Emissionen kann dieser bei Fahrten mit einer Länge von unter 10 km durch einen zehnfachen Grenzwert bewertet werden [Eur22, S: 1-45] [Eur22 – II, S. 3-13].

Wie bereits vorab erwähnt, liegt keine direkte zyklusspezifische Begrenzung für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid vor. Aufgrund der politisch geforderten Dekarbonisierung wird jedoch im Vergleich zu vorherigen Gesetzgebungen den Fahrzeugherstellern ein definiertes Ziel hinsichtlich eines sogenannten Flottenverbrauchs vorgegeben. Jedem verkauften PKW eines Herstellers wird der im WLTC ermittelte CO_2 -Ausstoß zugeteilt und über sein gesamtes Verkaufsvolumen gemittelt. Dieser herstellerindividuelle Durchschnittswert muss unter der sich stetig verringernden gesetzlichen Zielvorgabe liegen. Sofern die Vorgabe nicht erreicht wird, sind Strafzahlungen von aktuell 95 € pro Gramm Überschreitung und pro verkauftes Fahrzeug abzuführen. Während der Einführungsphase in Europa zwischen den Jahren 2012 und 2015 wurde der Wert des Flottenverbrauchs auf 130 Gramm CO_2 /km reguliert [Rei15, S. 124-125]. Die derzeit sich in Kraft befindliche EU-Verordnung 2019/631 zur Festlegung von CO_2 -Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen sieht eine weitere, zweistufige Senkung des Zielwertes ab dem Jahr 2025, bzw. 2030 vor [Eur19, S. L 111/13–L 111/17]. Aktuell liegt der Zielwert bei 95 g CO_2 /km mit dem Ziel, diesen um weitere 15 Prozent im Jahr 2025 zu senken. In den darauffolgenden Jahren soll eine zusätzliche Reduzierung um 37,5 Prozent erfolgen [BfU21, S. 1-2] [MT19, S. 53-54].

Darüber hinaus sieht der Gesetzesentwurf eine Pflicht für das „On-Board Monitoring“ (englische Abkürzung: OBM) sowie das „On-Board Fuel Consumption Monitoring System“ (englische Abkürzung: OBFCM) vor. Das OBM stellt eine direkte Überwachung