

vRDE – Virtual Real Driving Emission

Markus Wenig, Dominik Artuković, Christian Armbruster
(Gamma Technologies)

Herausforderungen und Chancen

Die Verbrauchs- und Emissionszertifizierung anhand des NEFZ stand bis zuletzt, nicht nur im Zusammenhang mit den sogenannten „Defeat Devices“, in scharfer Kritik – 2017 soll mit der Einführung von WLTP und RDE genau diese Problematik aufgegriffen werden. Europa übernimmt damit eine Pionierrolle auf dem Gebiet der Emissionsgesetzgebung.

Klares Ziel der Real Driving Emissions ist hierbei, die Ermittlung von Schadstoffemissionen deutlich realitätsnäher zu gestalten, was vor allem durch die nun große Unbekannte – den Fahrzyklus – umgesetzt werden soll. Gleichzeitig führt dies natürlich auch zu einer deutlich gestiegenen Komplexität sowohl aus Entwicklungs- als auch aus Zertifizierungssicht.

Doch gerade diese Komplexität stellt für die Zulieferer und Dienstleister der Automobilindustrie auch ein enormes Potential dar. Und das nicht nur im Hinblick auf künftige PEMS Messungen und den zusätzlichen Testaufwand am Rollen- bzw. Motorprüfstand, sondern auch im Hinblick auf die Simulation. Welches teilweise noch unentdeckte Potential hierbei in der 0 bzw. 1D Simulation steckt soll u.a. im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden.

Ansätze zur Adressierung der RDE Herausforderungen

Derzeit existieren zahlreiche Vorschläge zur Adressierung der künftigen RDE Herausforderungen [4,5,6,7]. Diesen Ansätzen gemein ist die Grundidee, früher in den RDE-Entwicklungsprozess einzugreifen (z.B. schon am Motorprüfstand anstatt erst beim Fahrzeugversuch) und dabei Simulation und Versuch intelligent miteinander zu verknüpfen. Der Fokus liegt bisher auf dem Versuch, während die Simulation hierbei unterstützend wirkt. So werden meist Rollen- oder Motorprüfstände mit Modellen verknüpft, um Umgebungsrandbedingungen, das Fahrzeug selbst oder aber auch das Abgasnachbehandlungssystem zu simulieren. Die innermotorische Verbrennung und die entsprechenden Rohemissionen werden bislang weiterhin ausschließlich experimentell ermittelt.

Das unten stehende Schaubild soll diesen Umstand verdeutlichen. Zudem illustriert es über den kompletten Entwicklungszyklus hinweg, wie die Messung (rot) durch die Simulation (grün) unterstützt wird und wie die Simulation sogar für die Messung einspringen kann, sofern noch kein Versuchsträger verfügbar sein sollte.

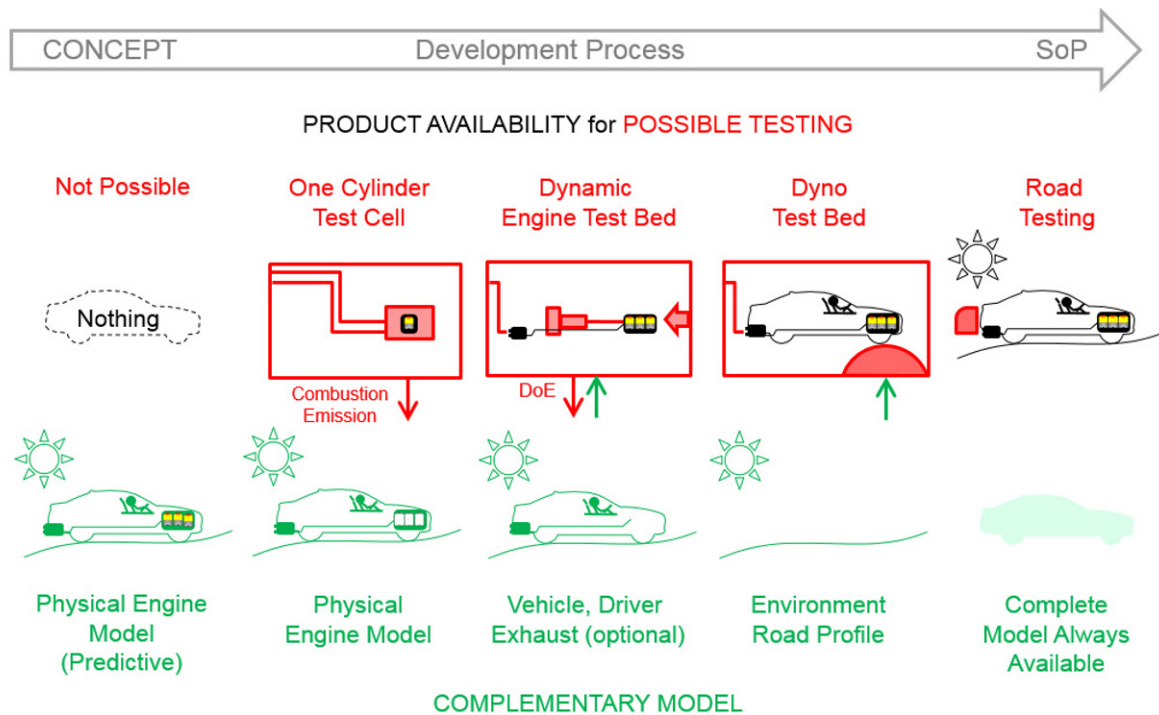


Abbildung 1: Schematischer Überblick über aktuelle Ansätze zur Adressierung von RDE

Das bedeutet, die Simulation wird zum einen als Ergänzung zum klassischen Prüfstands- oder Fahrzeugversuch eingesetzt. Zum anderen aber ermöglicht sie auch bereits in der frühen Entwicklungsphase, in der noch keine Messdaten verfügbar sind, Motor- und Abgasnachbehandlungssysteme im Hinblick auf eine spätere RDE Zertifizierung zu vergleichen und zu bewerten (Anwendungsmöglichkeiten sind zahlreich und wären z.B. die Abwägung einer motornahen Anordnung der Abgasnachbehandlung oder ein Vergleich von NSK und SCR-Katalysator).

Im Verlauf des Entwicklungsprozesses können die erstellten Fahrzeug-, Motor- und Abgasnachbehandlungs-Modelle zudem verfeinert bzw. mit Messdatenunterstützung eine höhere Modellgüte erreicht werden: Auf diese Weise ist es möglich, während des kompletten Entwicklungsprozesses auf die Simulation zurückzugreifen, v.a. immer wenn die Reproduzierbarkeit im Vordergrund steht, Konzeptvergleiche durchzuführen sind oder eine Vielzahl von Motorkonfigurationen/Fahrzyklen abgerastert werden soll (DoE). Ein konkretes Beispiel wäre hier die Einbindung von ersten Prüfstandsdaten wie etwa Druckverlaufs- und Emissions-Messungen des Einzylinderaggregats zur Feinkalibrierung prädiktiver Verbrennungs- und Emissionsmodelle. So können schon bevor der Vollmotor aufgebaut bzw. im Fahrzeug integriert ist, grundlegende Untersuchungen hinsichtlich dessen RDE Fähigkeit unternommen werden.

Dies ist der Inhalt der in dieser Arbeit vorgestellten vRDE Methodik, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden soll.

Die vRDE Methode

Mit Hilfe des unten stehenden Schaubilds soll der modulare Aufbau des vRDE Prozesses beschrieben werden. Hierbei soll festgehalten werden, dass die Prinzipien der vRDE Methode auf jede Plattformsimulation-Software angewandt werden kann, die eine physikalische Modellierung von Motor, Fahrzeug, Regelung und Abgasnachbehandlung ermöglicht.

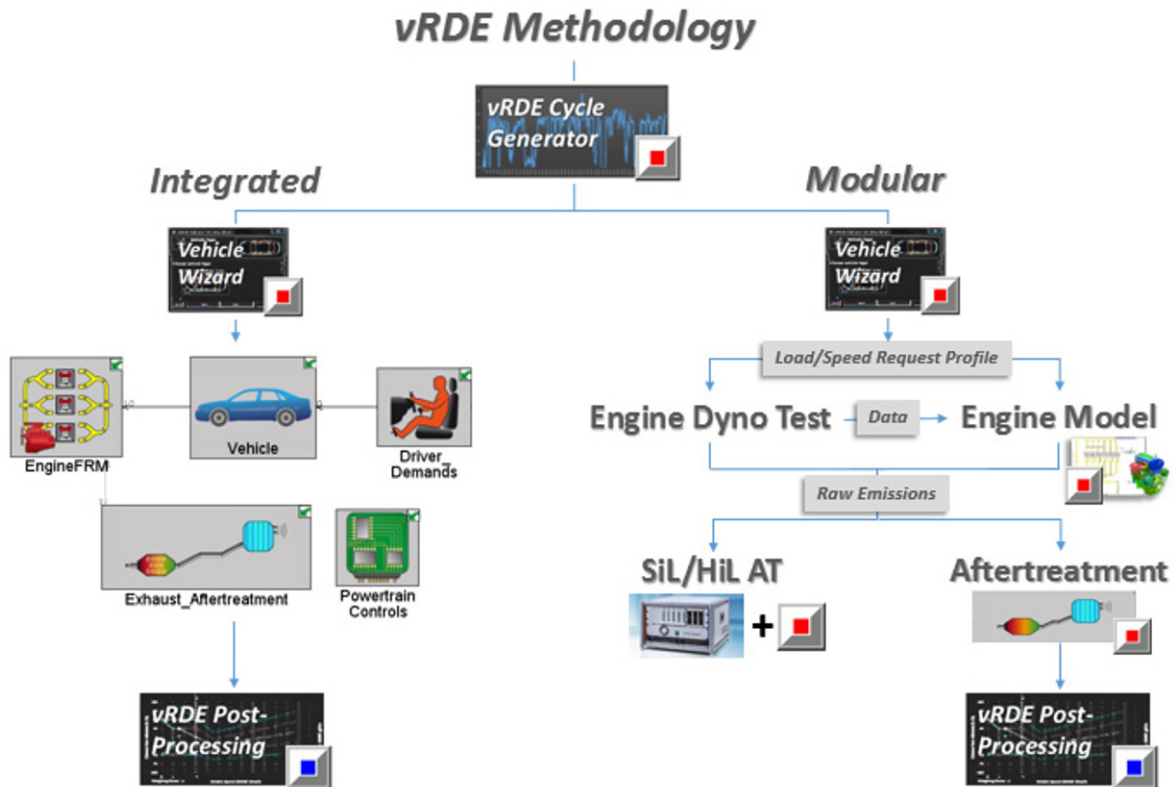


Abbildung 2: Darstellung der integrierten und modularen vRDE Methode

Zunächst lässt sich die vRDE Methode in eine integrierte und eine modulare Lösung unterteilen. Beiden Ansätzen gemein ist das Pre- bzw. Post-Processing, welche sozusagen den Rahmen der vRDE Methode bilden. Ersteres besteht aus einem automatisierten RDE-Zyklus-Generator, der Fahrprofile gemäß den EU Bestimmungen¹ aus [3] erstellt, und diversen Features zur Unterstützung des Prozesses (z.B. Fahrzeugmodellgenerator, Import von gpx-Daten etc.). Das Post-Processing umfasst die anschließende Datenauswertung mit

¹ Basierend auf einer Datenbasis aus (mit GPS gemessenen) Fahrprofilen wird in randomisierter Weise ein Geschwindigkeitsprofil zusammengestellt, das den Anforderungen der RDE Gesetzgebung genügt.

Hilfe der „Moving Averaging Windows“ (MAW) und „Power Binning“ (PB) Methode – wie sie bereits in existierenden Evaluationstools EMROAD und CLEAR implementiert ist. Da die vollständig integrierte Lösung des Post-Processings in GT-SUITE V2017 noch nicht vorgestellt wird, soll sie im Rahmen dieser Arbeit noch nicht behandelt werden.

Nach entsprechender Vorbereitung – d.h. insbesondere nach Generierung bzw. Einbindung der RDE Fahrprofile in GT-SUITE – kann, wie schon erwähnt, prinzipiell zwischen zwei Ansätzen gewählt werden – der integrierten und der modularen Methode. Sofern die komplette Untersuchung ausschließlich virtuell durchgeführt werden soll, empfiehlt sich der integrierte Ansatz. Ziel hierbei ist es, das komplette Fahrzeug inkl. Motor und Abgasnachbehandlung mit Hilfe physikalischer Modelle bei gleichzeitig vertretbarem Rechenaufwand abzubilden. Ein vertretbarer Rechenaufwand wird in diesem Fall durch die Autoren derart definiert, dass eine RDE-Simulation von 90 bis 120 Minuten Länge auf einer CPU eines herkömmlichen Desktoprechners über Nacht – also in einem Zeitfenster von weniger als 12 Stunden – erfolgen kann.

Da hierbei üblicherweise das 1D-Luftpfadmodell des Motors mit Rechenschrittweiten im niedrigen Mikrosekundenbereich den Flaschenhals bildet, muss zunächst aus dem bereits existierenden, detaillierten Motormodell ein so genanntes „Fast Running Modell“ (FRM) erstellt werden. Durch die geschickte Zusammenfassung der Luftpfadkomponenten werden sowohl Rechenschrittweite erhöht als auch die Anzahl der zu berechnenden Subvolumina im Modell reduziert (siehe Abbildung 3). Die Informationen, die im Zuge dieser Vereinfachung verloren gehen, werden über geschickte Rekalibrierung semi-empirisch in das Modell zurückgeführt. Oder anders ausgedrückt: Man tauscht einen kleinen Teil Physik gegen einen großen Teil Rechengeschwindigkeit.

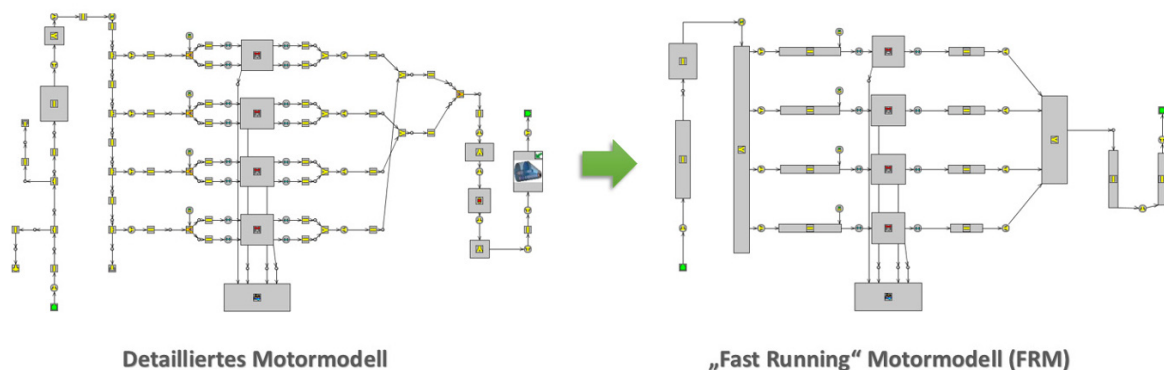


Abbildung 3: Ein Vergleich von detailliertem und Fast Running Motormodell (FRM)

Mit Hilfe eines solchen FRMs können Rechengeschwindigkeiten von 5 bis 10 mal langsamer als Echtzeit erreicht werden, bei Genauigkeiten von etwa $\pm 3\%$ im Vergleich zum Originalmodell (dies z.B. im Hinblick auf Luftmassenstrom, effektivem Mitteldruck, Verbrauch oder mittleren Drücken und Temperaturen). Die Generierung solcher

FRMs ist wesentlicher Bestandteil der vRDE Methode, da diese andernfalls für den Anwender aufgrund der Rechenzeitnachteile detaillierter Motormodelle nicht attraktiv genug ist und stattdessen auf weniger physikalische Ansätze wie z.B. DoE basierte Mean-Value-Modelle zurückgegriffen wird.

Im Hinblick auf die Simulation der Real Driving Emissions spielt die Wahl der Verbrennungs- und Emissionsmodelle eine besondere Rolle. Da sich aus einem RDE-Zyklus ein hochgradig transientes Lastprofil ergeben kann, ist es sinnvoll nicht nur das Luftpfadmodell, sondern auch Verbrennungs- und Emissionsmodelle so physikalisch wie möglich zu gestalten. Heutige prädiktive Verbrennungsmodelle (sowohl für fremd-gezündete als auch für selbstzündende Motoren) aber auch entsprechende NO_x-Emissionsmodelle zeigen ein zufriedenstellendes Maß an Genauigkeit (siehe z.B. [10, 11, 12]). Trends und Tendenzen werden gut wiedergeben, wodurch ein qualitativer Vergleich ermöglicht wird.

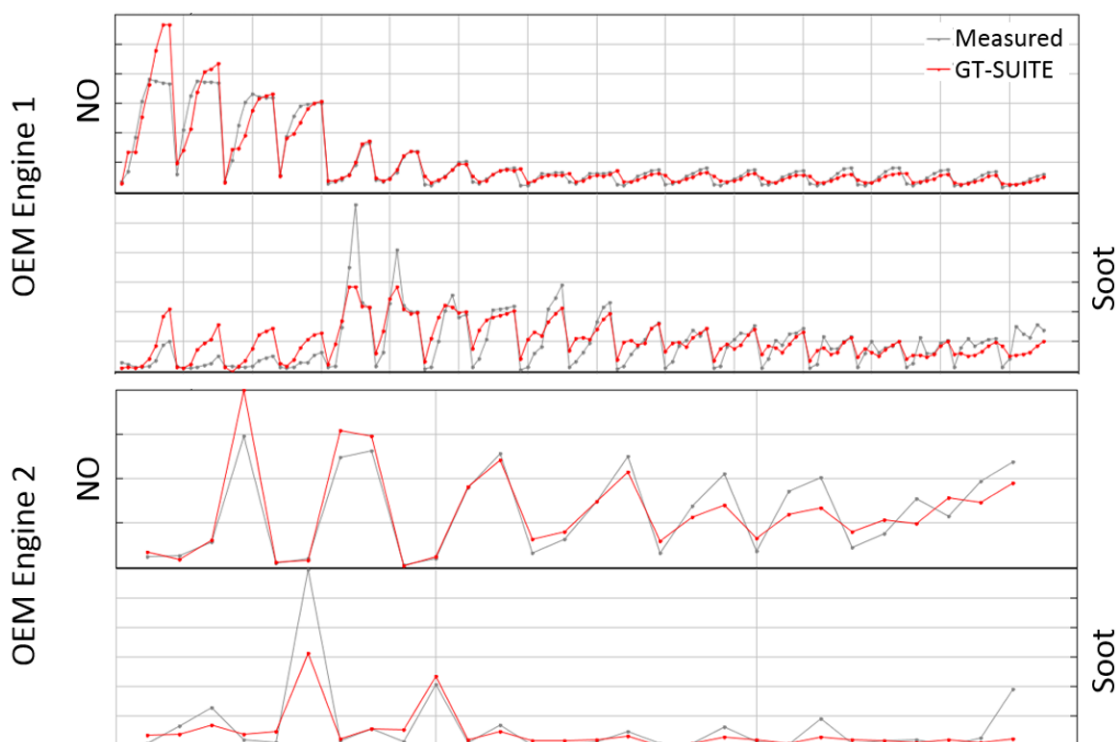


Abbildung 4: Ein Vergleich von simulierten und gemessenen NO- und Ruß-Rohemissionen

Abbildung 4 illustriert exemplarisch den Sachverhalt – Tendenzen werden gut abgebildet, beim NO_x-Modell passen zum großen Teil auch die Absolutwerte sehr gut, das Rußmodell zeigt ein im Vergleich etwas schlechteres Ergebnis, scheint jedoch für qualitative Aussagen geeignet. Ebenso ist aber auch denkbar, dass für die Vorhersage der Rohemissionen Kennfelder verwendet werden, sofern entsprechende Messdaten bereits vorliegen oder aus Vorgängermodellen übernommen werden können.

Gerade in der Konzeptphase bietet es sich an Modelle vom Vorgängermotor für eine erste Abschätzung heranzuziehen, sofern Brennverfahren oder Geometrie keine größeren Änderungen erfahren haben. Dass dies prinzipiell möglich ist, soll in folgendem Vergleich gezeigt werden: Im Rahmen einer internen Studie wurden 15 Dieselmotoren von 10 verschiedenen Herstellern und Zylinder-Hubvolumina von 0.4 bis 4.8 Liter untersucht. Die Betriebsbedingungen umfassten dabei nahezu das komplette Last- und Drehzahlspektrum inklusive diverser Variationen von AGR, Einspritzparameter, Lade- und Raildruck. Für jeden Motor wurde ein individuell kalibrierter Satz und ein allgemeiner Satz an Verbrennungsmodellparametern² verwendet und anschließend der über alle Betriebspunkte gemittelte Fehler im Vergleich zur Messung berechnet. Das unten stehende Diagramm zeigt hierzu einen Auszug für indizierten Mitteldruck, Verbrennungsschwerpunkt und Spitzendruck. Gut zu erkennen ist, dass für die Mehrzahl der Motoren beispielsweise der gemittelte Fehler des Mitteldrucks nur unwesentlich höher ist als für die individuell kalibrierten Modelle. Mit anderen Worten das Verbrennungsmodell zeigt eine Robustheit, die annehmen lässt, dass in Konzeptphasen in erster Näherung mit dem Verbrennungsmodellstand des Vorgängermotors gerechnet werden kann. Diese Untersuchung wurde exemplarisch für den Dieselmotor durchgeführt, wobei in GT-POWER ebenfalls prädiktive Verbrennungsmodelle für andere typische Brennverfahren, wie z.B. die ottomotorische Verbrennung, vorhanden sind.

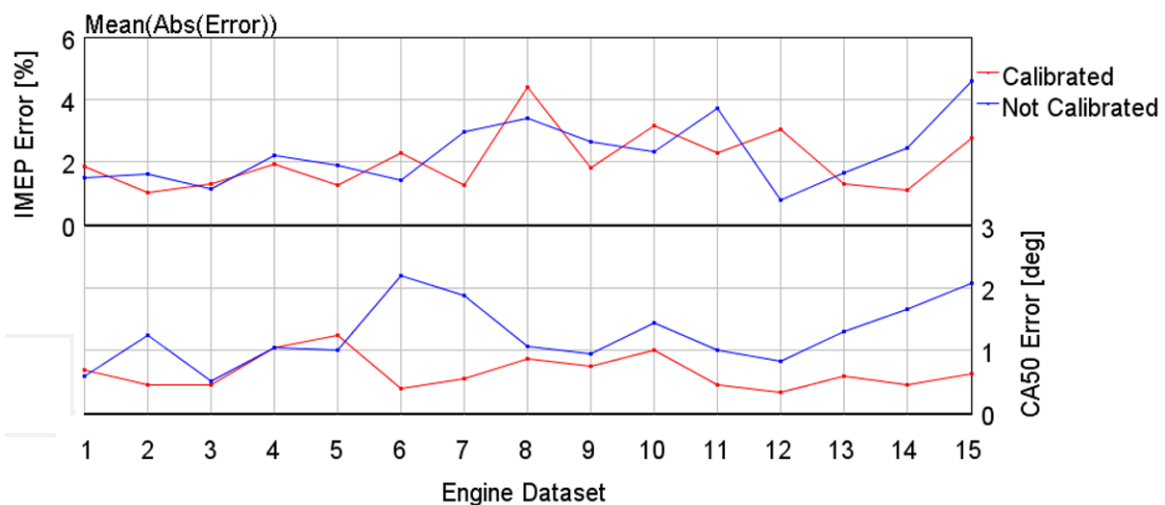


Abbildung 5: Fehler indizierter Mitteldruck und Verbrennungsschwerpunkt für kalibriertes und nicht-kalibriertes DIPulse-Verbrennungsmodell

² Auf Anfrage gibt GT eine Empfehlung für die Wahl der DIPulse Verbrennungsmodellparameter.

Die Robustheit des NO_x-Rohemissionsmodells wurde in ähnlicher Weise untersucht. Im unten stehenden Diagramm ist anhand verschiedener Betriebspunkte eines ausgewählten Motors ein Vergleich von nicht-kalibriertem (blau) und kalibriertem Modell (rot) dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Ergebnisse voneinander abweichen. Allerdings zeigt eine lineare Skalierung der Ergebnisse des nicht-kalibrierten Modells (grün), dass die Tendenz hingegen sehr schön übereinstimmt. Somit mag zwar unter Umständen die Verwendung eines NO_x-Modellstandes des Vorgängermotors hinsichtlich der quantitativen Ergebnisgüte nicht ausreichend sein – wohl aber, wenn qualitative oder vergleichende Aussagen getroffen werden sollen.

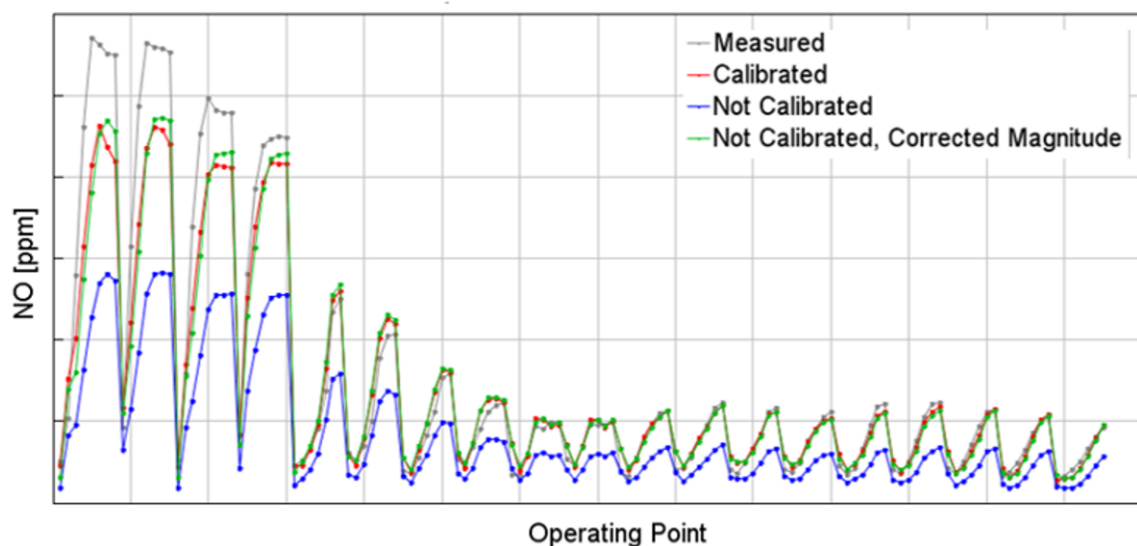


Abbildung 6: Vergleich von gemessenen und simulierten NO Emissionen für kalibrierter und nicht-kalibriertes NO_x-Emissionsmodell

Rohemissionen, Massenstrom und Fluidtemperatur aus dem Motormodell bilden anschließend die Eingangsparameter für das Abgasnachbehandlungsmodell. Die erfolgreiche Integration von Motor-, Fahrzeug- und Abgasnachbehandlungsmodell wurde bereits in verschiedenen Arbeiten belegt (siehe z.B. [8, 12, 13]). Im Zusammenhang mit dem integrierten vRDE Ansatz soll zunächst angemerkt werden, dass die Einbindung eines Abgasnachbehandlungsmodells die Gesamtrechnenzeit nur unwesentlich beeinflusst, da über einen so genannter Circuit Splitter die Nutzung des quasi-stationären Löfers erlaubt und somit Zeitschritte im Bereich von 0.1 bis 1 Sekunde ermöglicht werden.

Zudem können mit Hilfe einer umfangreichen Modellbibliothek alle aktuell gängigen Abgasnachbehandlungskomponenten dargestellt werden, so dass im Zuge von RDE spezifischen Konzeptauslegungen unterschiedlichste Systemkonfigurationen (motornahe Anordnung, Anordnung vor Turbine, elektrische Zusatzheizer etc.) betrachtet werden können.

Abgesehen von Motor- und Abgasnachbehandlungsmodell wird zur vollständig integrierten Lösung noch ein Fahrzeugmodell zur Generierung der Randbedingungen (wie z.B. Lastanforderung) benötigt. Im Rahmen des vRDE Prozesses unterstützt hierbei der GT Vehicle Wizard, über den vordefinierte Fahrzeug- und Getriebemodelle zusammengestellt und bei Bedarf anschließend entsprechend angepasst werden können.

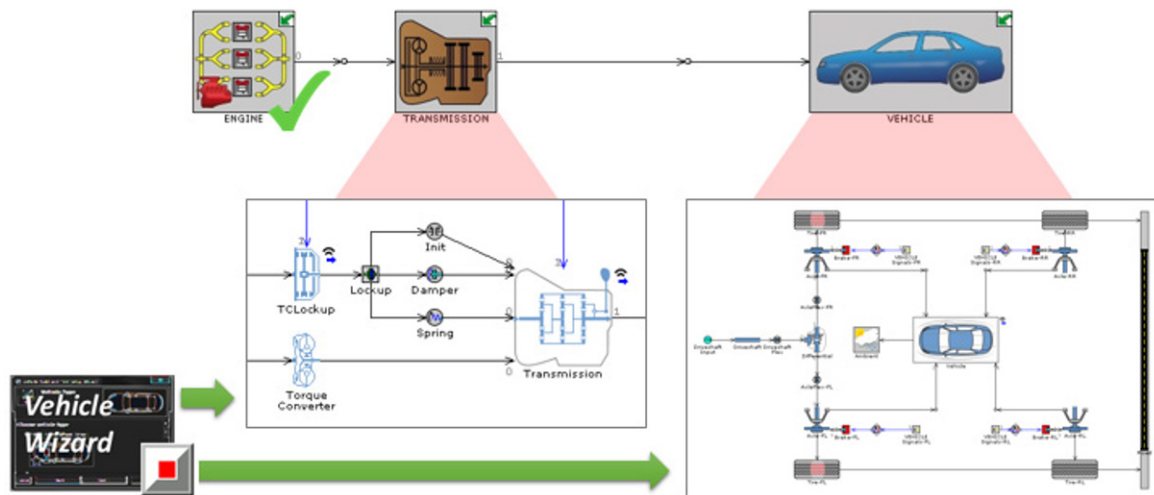


Abbildung 7: Übersicht über die integrierte vRDE Methode

Der Fahrer wird dabei über modellbasierte Regler dargestellt, die einem vorgegebenen RDE-Geschwindigkeitsprofil folgen. Die simulative Abbildung eines „echten“ Fahrer-verhaltens in GT-SUITE (z.B. gemäß [9]) ist grundsätzlich möglich (siehe [7]). Da ein Großteil der Regelungsmodellentwicklung in Simulink stattfindet, könnte ebenso auch eine Kopplung an ein entsprechendes Simulink-Fahrermodell erfolgen. Treibt man diesen Gedanken weiter und erweitert das Prinzip der Austauschbarkeit auf die restlichen Subsysteme, so gelangt man automatisch zu dem eingangs angesprochenen *modularen* Ansatz der vRDE Methode.

Der modulare Ansatz ergibt sich dabei fast selbstständig, da im Laufe des Entwicklungsprozesses immer mehr Informationen zur Verfügung stehen. Während in der Konzeptphase das RDE Modell mehr oder weniger auf dem Vorgängermotor bzw. -fahrzeug aufbaut, können mit den ersten Versuchen am Einzylinderaggregat bereits prädiktive Verbrennungs- und Emissionsmodelle kalibriert oder feinjustiert werden. Zudem können Übergabeparameter wie z.B. Lastprofil oder Rohemissionen durch Versuchsdaten ersetzt werden und lediglich Motor- oder Abgasnachbehandlungsmodell eingebunden werden.

Je mehr Hardware und Messdaten verfügbar sind, desto genauer können die entsprechenden Simulationsmodelle abgestimmt werden. Gleichzeitig steigt mit zunehmendem Fortschritt im V-Zyklus aber auch der Versuchsaufwand. Und gerade hier soll der mo-

dule vRDE Ansatz unterstützen: Aufgrund der Unsicherheiten bzgl. Fahrzyklus oder Fahrerverhalten bzw. aufgrund der zahlreichen Einflussparameter (z.B. Umgebung, Motorsteuerung, Abgasnachbehandlung etc.) wird der Entwicklungsaufwand sehr sicher zunehmen. Anstatt diesen Mehraufwand künftig ausschließlich versuchsseitig abzudecken, kann es beispielsweise sinnvoll sein, zunächst einen größeren Bereich simulativ abzurastern und so die Versuchsmatrix schon im Vorfeld zielgerichtet auszudünnen. Dies kann sehr gut mit den hier vorgestellten Simulationsmodellen erfolgen.

Somit kann zusammengefasst werden: Der Vorteil des vRDE Ansatzes liegt zum einen in der virtuellen Entwicklung noch bevor die erste Hardware bzw. die ersten Messdaten vorhanden sind, in der hohen Flexibilität (was z.B. die Variation von Randbedingungen aber auch die Einsatzmöglichkeiten betrifft) und – speziell beim integrierten Ansatz – in der Berücksichtigung von Rückkoppelungseffekten unter den einzelnen Teilsystemen.

Die Möglichkeit dabei einen RDE-Zyklus in weniger als 12 Stunden zu simulieren, schafft daher einen neuen Baustein in der RDE-Entwicklungskette, da umfangreiche Sensitivitätsanalysen oder DoE-Studien nun praktisch über Nacht simuliert werden können und so schon frühzeitig Aussagen über Motorkonfiguration oder -topologie getroffen werden können. Die Anzahl der parallelen Rechnungen wird dabei lediglich durch die Anzahl an verfügbaren CPUs bzw. Rechenlizenzen limitiert, was sich allerdings vor dem Hintergrund, dass OEMs heutzutage über Rechenpools mit teils deutlich mehr als 100 Solverlizenzen verfügen, etwas relativiert.

Exemplarische Untersuchungen

In diesem Kapitel soll anhand ausgewählter exemplarischer Studien anschaulich gezeigt werden, wie sich der integrierte vRDE Ansatz z.B. im Rahmen einer Konzeptstudie, in der noch keine Messdaten vorhanden sind, umsetzen ließe. Es wurde hierfür ein Simulationsmodell eines typischen Versuchsträgers aufgebaut. D.h. Motor- und Fahrzeugspezifikationen entsprechen einem Mittelklassefahrzeug mit einem 2 Liter Dieselmotor. Das Modell wurde dabei auf Basis verschiedener Veröffentlichungen [17,18].

Der Fokus der Studie liegt auf dem Einfluss von Aggressivität und Höhenprofil einer RDE-Fahrt auf die NO_x-Emissionen. Hierzu wurde zunächst das Beispielmmodell anhand des NEFZ Fahrzyklus dahingehend validiert, dass es in etwa im Bereich des aktuellen EURO6 NO_x-Grenzwerts liegt. Mangels Messdaten soll somit geprüft werden, ob das Modell realistische Ergebnisse liefert und somit eine qualitative Aussage möglich ist.

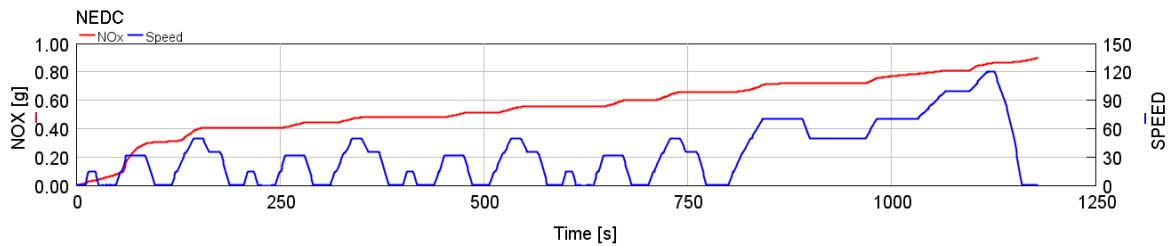
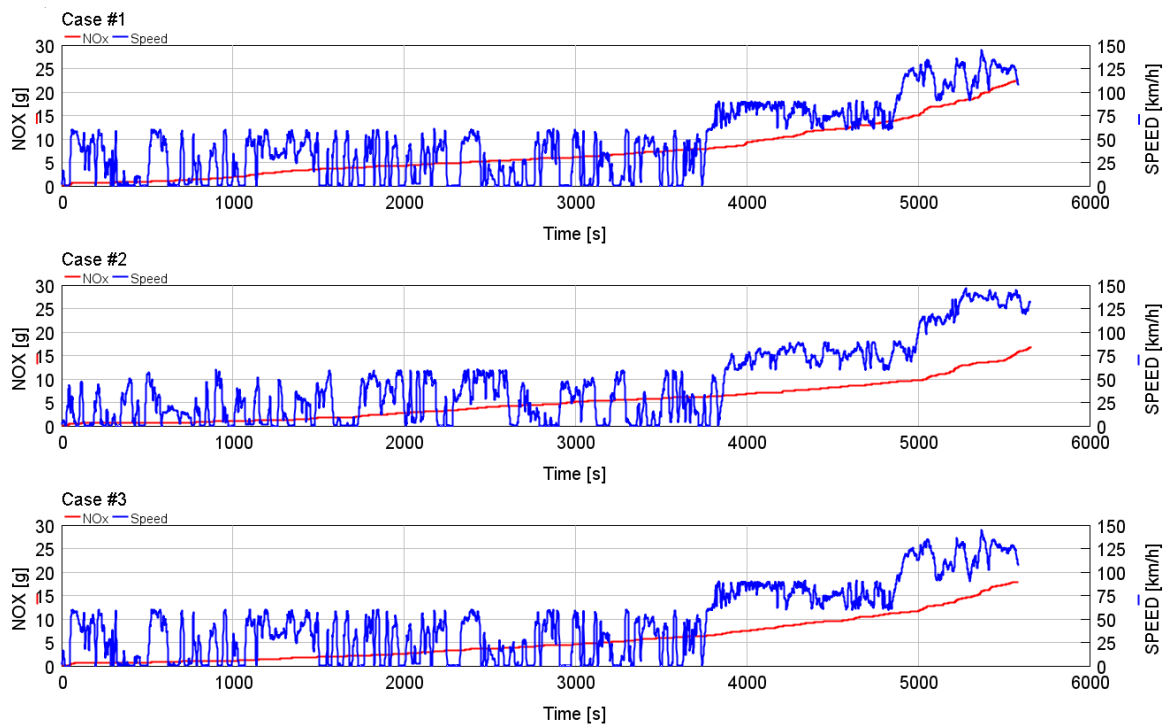


Abbildung 8: NEFZ Fahrzyklus des Beispielsmodells

Nachdem die Simulation des NEFZ einen NO_x-Emissionswert von 82 mg/km ermittelt hat, welcher in der Größenordnung des aktuellen NO_x-Grenzwerts für PKW-Dieselmotoren von 80 mg/km liegt, wurden insgesamt drei RDE Fahrzyklusvarianten untersucht – dabei wurde ausgehend von einem vergleichsweise aggressiven Geschwindigkeits- und Höhenprofil (Case #1) jeweils die Geschwindigkeits- (Case #2) bzw. die Höhencharakteristik (Case #3) abgemildert (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9: Vergleich der NO_x-Emissionen unterschiedlicher RDE-Zyklen

Für das aggressive Geschwindigkeits- und Höhenprofil ergeben sich NO_x-Emissionen von 308 mg/km. Der gleiche Zyklus bei abgemildertem Geschwindigkeitsprofil zeigt schon eine deutliche Reduzierung der Emissionen auf 236 mg/km. Interessanterweise zeigt bei dieser Konstellation auch das moderatere Höhenprofil eine deutliche Verringerung der NO_x-Emissionen auf 246 mg/km. Nach Anwendung der MAW-Methode belau-

fen sich die NO_x-Emissionen für Case #2 und #3 etwa auf das 2,3-fache des erlaubten Grenzwerts und liegen damit ungefähr in der Größenordnung des Übereinstimmungsfaktors von 2,1. Dahingegen übersteigen in Case #1 die NO_x-Emissionen das Limit um mehr als Faktor 3. Die Simulation deutet also daraufhin, dass für diesen Motor bzw. für das entsprechende Abgasnachbehandlungssystem die RDE Grenzwerte nicht eingehalten werden können und somit eine detailliertere Untersuchung sinnvoll wäre. Zudem könnten im Anschluss nun simulativ verschiedene Lösungsansätze, wie z.B. eine motornahe Anordnung der Abgasnachbehandlungssysteme, untersucht werden.

Validierung anhand einer OEM Fallstudie

Zur Validierung des vRDE Prozesses wurde in Kollaboration mit einem größeren Hersteller der vRDE Prozess auf einen realen Versuchsträgers angewandt. Der Schwerpunkt lag in dieser Arbeit auf der Motorseite bzw. den Rohemissionen. So wurde zunächst ausgehend von dem detaillierten Motormodell eines aufgeladenen 2,0 Liter Vierzylinder-Ottomotors ein so genanntes Fast-Running-Modell mit einem maximalen Echtzeitfaktor von 7,25 erstellt. Dieser wird üblicherweise für den Betriebspunkt mit der höchsten, untersuchten Motordrehzahl angegeben – in diesem Fall 6000 U/min. Für niedrige Drehzahlen ergeben sich deutlich schnellere Rechenzeiten so dass sich z.B. für die im Folgenden vorgestellte Simulation des WLTP im Mittel ein Echtzeitfaktor von kleiner als 5 ergab³. Zur Illustration ist in Abbildung 10 ist der Echtzeitfaktor über Last und Drehzahl für alle untersuchten Betriebspunkte aufgetragen.

3 Getestet auf einem herkömmlichen Desktop-PC (Intel® Core™ i5-4570 CPU, 8 GB RAM)

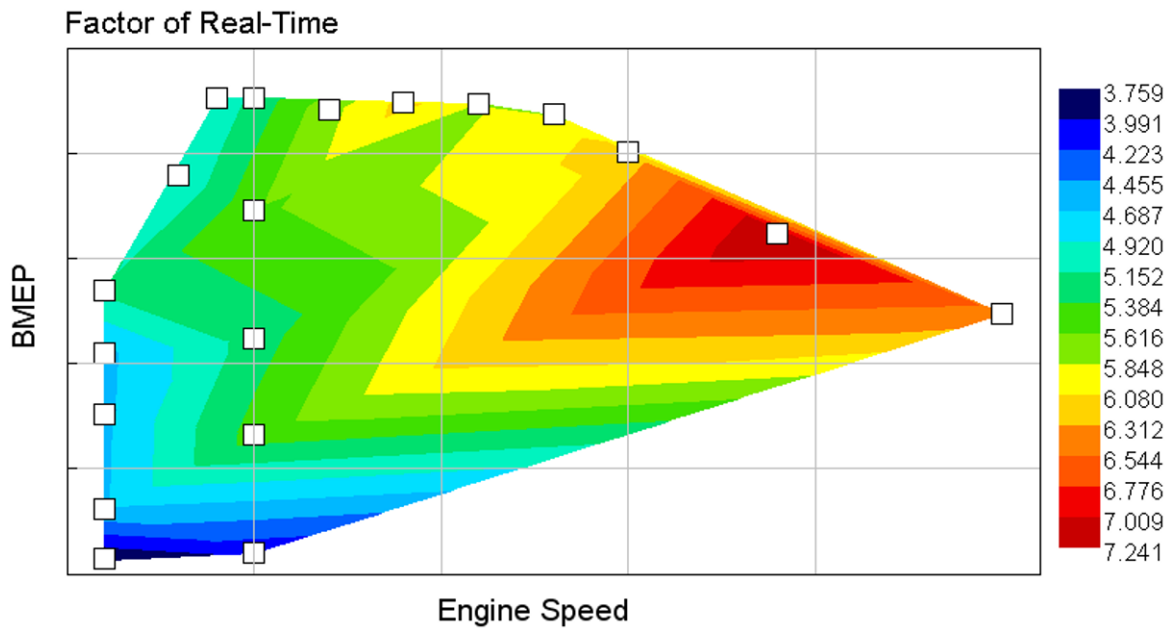


Abbildung 10: Echtzeitfaktor der untersuchten Betriebspunkte

Das FRM zeigt größtenteils eine Abweichung von unter 3% im Vergleich zum Originalmodell. In Abbildung 11 sind hierzu exemplarisch einige Ausgabegrößen dargestellt. Untersucht wurden Betriebspunkte an der Volllast über einen Drehzahlbereich von 1200 bis 6000 U/min und zwei Lastschnitte bei 1200 und 2000 U/min. Gut zu erkennen ist, dass generelle Motorkenngrößen wie Luftmassenstrom, effektiver Mitteldruck, Turboladerdrehzahl oder Verbrauch sehr gut wiedergegeben werden. Da in diesem Rahmen auch die Emissionen bzw. die Abgasnachbehandlung von großer Bedeutung ist, wurde zusätzlich die Temperatur vor dem ersten Katalysator verglichen. Mit Ausnahme eines Ausreißers weicht diese um maximal 30 K vom Originalmodell ab. Der große Vorteil eines FRMs wird dabei durch den stark reduzierten Echtzeitfaktor verdeutlicht.

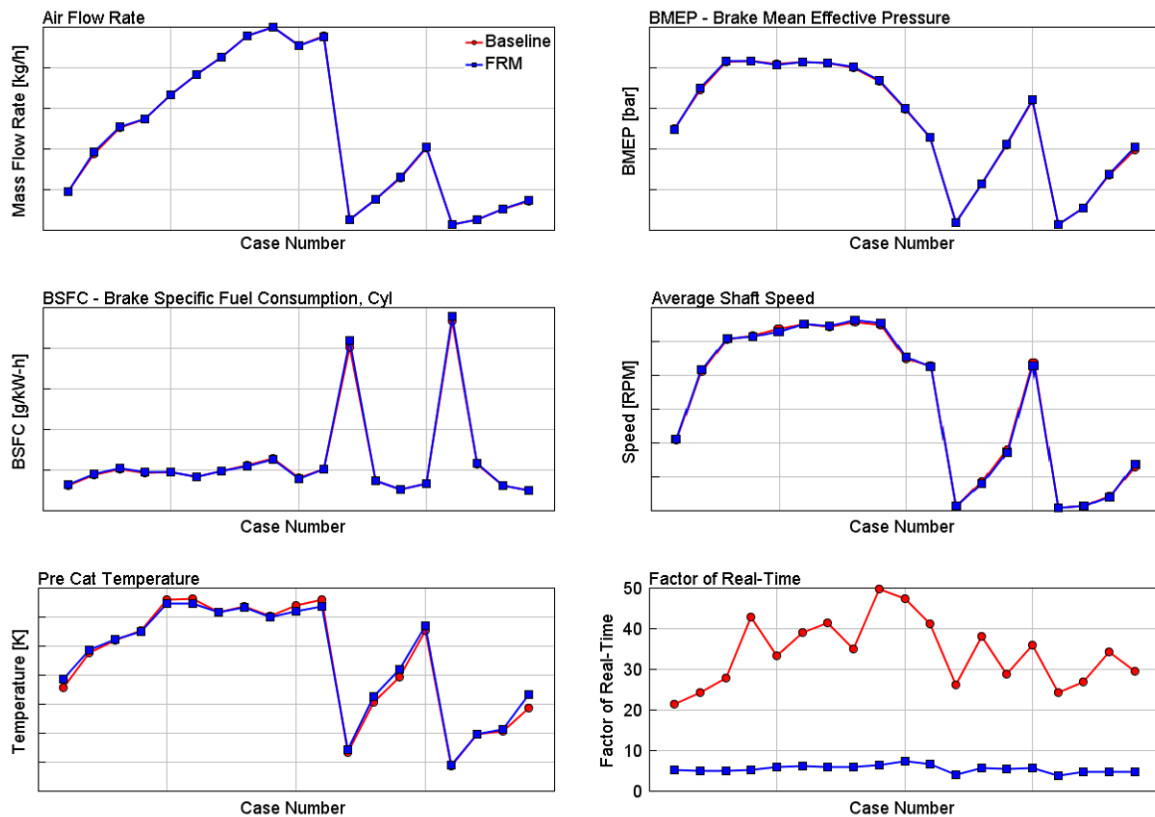


Abbildung 11: Vergleich ausgewählter Ergebnisse von detailliertem und Fast-Running Modell

Anhand dieses FRMs wurden anschließend NO_x-, HC- und CO-Modell abgestimmt. Alle Modelle basieren auf einem Mix aus Phänomenologie und Reaktionskinetik. So wurde für das NO_x-Modell ein klassischer Zeldovich-Ansatz [14] verwendet, zudem aber auch eine Schichtung der verbrannten Zone vorgesehen, welche eine detailliertere Auflösung der Temperaturen ermöglicht. Das HC Modell hingegen basiert in erster Linie auf dem Luftkraftstoffgemisch, dass während der Kompressionsphase in den Feuersteg geschoben wird. In der Expansionsphase strömt das Gemisch wieder in den Brennraum und wird zum Teil von der Flamme erfasst. Alles, was nach Brennende in den Brennraum eintritt, wird über ein entsprechendes Reaktionskinetikmodell in HC umgewandelt [15]. Die Berechnung der CO Emissionen erfolgt hauptsächlich anhand des Luftkraftstoffgemisches, wobei allerdings im stöchiometrischen Bereich auch auf Reaktionskinetik zurückgegriffen wird [16].

Die Validierung des Simulationsmodells fand anhand von Rollenprüfstandsdaten eines WLTP Tests statt. Um die Verwendung oder den Aufbau eines Regelungsmodells zu vermeiden bzw. um mögliche Unsicherheiten bzgl. der Regelung zu minimieren, wurden im FRM in diesem Fall Motorkenngrößen wie Luftmassenstrom, Drehzahl oder Luftverhältnis direkt vorgegeben. Bei der Untersuchung von transienten Phänomenen sind zudem zwei Punkte von großer Bedeutung: Zum einen sollten die Initialisierungs-

bedingungen des Simulationsmodells den Bedingungen am Prüfstand entsprechen und zum anderen sollte neben der Berücksichtigung von korrekten Massenträgheitsmomenten vor allem auch auf die Transient-Fähigkeit des Wandtemperaturmodells geachtet werden – m.a.W. initiale Wandtemperaturen, Masse der Wand und Stoffeigenschaften des Wandmaterials müssen berücksichtigt werden.

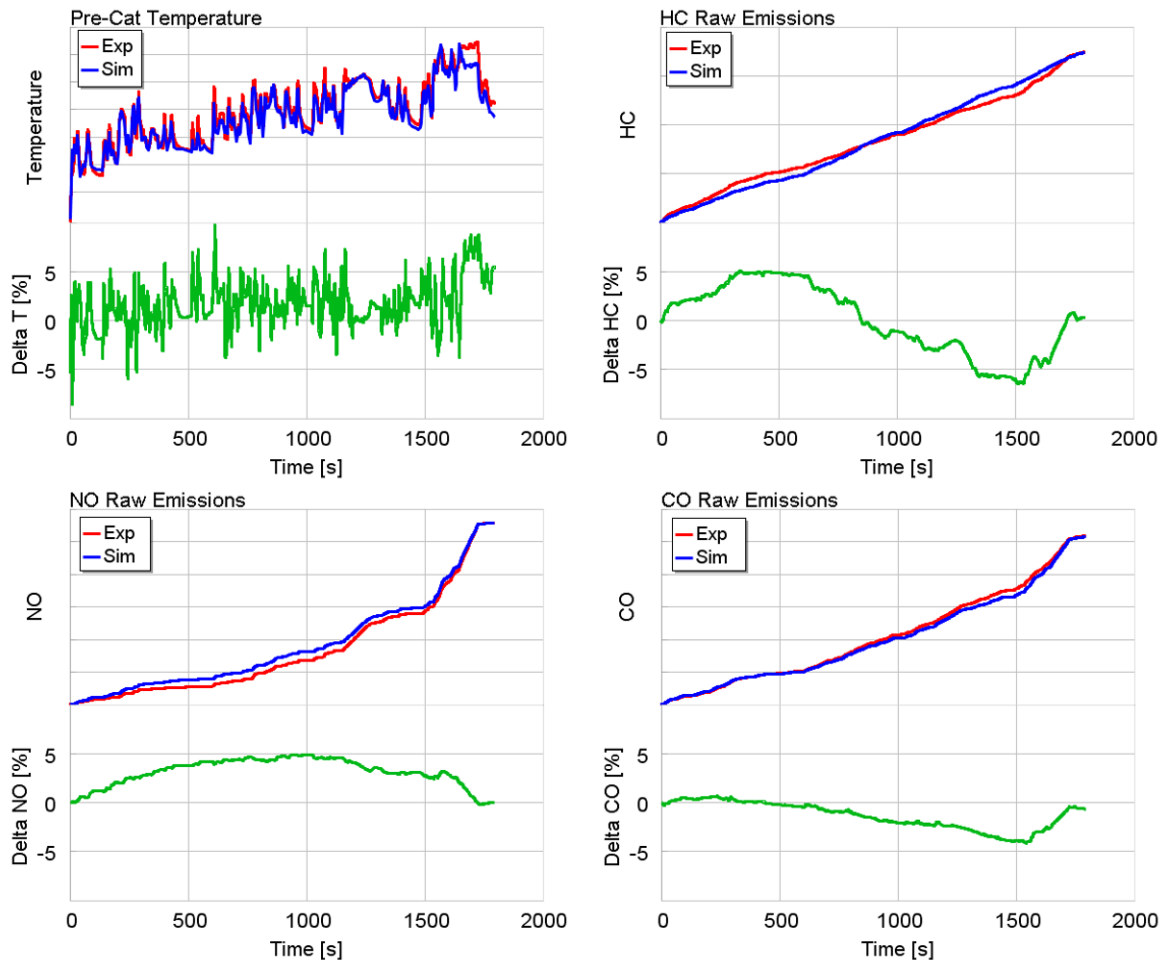


Abbildung 12: Vergleich von simulierten und gemessenen Rohemissionen im WLTP

Die Ergebnisse der Validierung sind in Abbildung 12 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass die Temperaturen vor Katalysator relativ gut getroffen werden. Darüber hinaus werden HC-, NO_x- wie auch CO-Emissionen sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr schön wiedergegeben, was auch durch eine maximale prozentuale Abweichung der kumulierten Emissionswerte von kleiner 1 % unterstrichen wird.

Durch diesen Vergleich konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von phänomenologischen bzw. prädiktiven Simulationsmodellen genaue Eingangsbedingungen für die anschließende Abgasnachbehandlung geliefert werden können. In einem nächsten Schritt, der in die-

ser Arbeit noch nicht vorgestellt werden soll, wird ein Abgasnachbehandlungssystem modelliert und kalibriert, um damit eine RDE-Zyklus nachzufahren und im Zuge dessen zu validieren, dass auch die Endemissionen simulativ im RDE abgebildet werden können.

Zusammenfassung

Mit der Einführung der Real Driving Emissions Ende 2017 werden die Automobilhersteller vor eine große Herausforderung gestellt. Um diese bzw. den dadurch entstehenden Mehraufwand zu bewältigen, scheint die Unterstützung des Versuchs durch die Simulation unausweichlich.

Die in dem vorliegenden Paper vorgestellte vRDE Methodik profitiert dabei von dem Besten aus beiden Welten. Zum einen kann die Lösung komplett simulativ erfolgen, d.h. basierend auf bereits existierenden, prädiktiven Vorgängermodellen (z.B. Luftpfad-, Verbrennungs-, Emissions- oder Abgasnachbehandlungsmodelle) können erste qualitative bzw. vergleichende Aussagen getroffen werden. Zum anderen können mit Hilfe von Versuchsdaten bestehenden Simulationsmodelle ersetzt oder aber stetig weiterentwickelt werden. So kann für den Fall, dass bereits ein repräsentativer RDE Zyklus z.B. am Rollenprüfstand ermittelt wurde, dieser direkt einem Motormodell als Eingabeparameter vorgegeben werden – eine Modellierung von Fahrzeug oder Regelung sind hier nicht notwendig. Im Motor- oder Abgasnachbehandlungsmodell können anschließend verschiedenste Variationen und Konfigurationen simuliert werden ohne hierfür wertvolle Prüfstandszeit opfern zu müssen⁴. Ein solches Potential lässt sich auf vielfältige Weise nutzen, wobei in diesem Paper lediglich ein Auszug der möglichen Einsatzgebiete der vRDE Ansatzes dargestellt wurde.

Anhand eines GT eigenen Beispielmodells, welches auf einem „Fast Running“ Dieselmotormodell mitsamt Fahrzeug- und Abgasnachbehandlungsmodell basiert, wurden Konzeptuntersuchungen hinsichtlich Geschwindigkeits- und Höhenprofil verschiedener RDE Zyklen durchgeführt. Insbesondere wurde der Fokus auf die NO_x-Emissionen gelegt. Hierbei konnte ein starker Einfluss des Fahrprofils aber auch des Höhenprofils identifiziert werden. Dass eine solche Vorgehensweise auch valide Ergebnisse liefert, wurde anschließend in einer Fallstudie am Beispiel eines „realen“ 4-Zylinder Ottomotors demonstriert. Die wesentlichen Schritte waren zunächst die Reduktion des Motormodells zu einem FRM, die Abstimmung der Emissionsmodelle und die anschließende Validierung anhand eines gemessenen WLTP-Zyklus. Die Ergebnisse sind sehr zufriede-

4 Um dieses oft zitierte Kostenargument an dieser Stelle einmal zu konkretisieren: Während sich Prüfstandskosten für eine Woche etwa in einem fünfstelligen Euro-Bereich bewegen, wäre ein entsprechendes Softwarerechenpaket um Faktor 100 günstiger.

denstellend und bilden somit eine belastbare Ausgangsbasis für eine anschließende Simulation der Abgasnachbehandlung im RDE-Zyklus.

Als Fazit dieser Arbeit soll somit festgehalten werden, dass die 0D/1D Simulation mit- samt ihrer prädiktiven Verbrennungs- und Emissionsmodelle nicht nur unterstützend, sondern zum Teil auch alleinstehend (z.B. in der frühen Konzeptphase) und ohne Mess- datenunterstützung im RDE Entwicklungsprozess eingesetzt werden kann.

Literatur

- [1] Verordnung Nr. 692/2008 der Kommission vom 18. Juli 2008
- [2] Verordnung (EG) Nr. 715/2007, 20. Juni 2007
- [3] Anhang IIIa der Verordnung (EG) Nr 692/2008
- [4] Gerstenberg J., Hartlief, H., Tafel, S.: “Introducing a method to evaluate RDE demands at the engine test bench”, Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 2016
- [5] Zellbeck, H., Walter, R., Stiegler, M., Roß, T.: „RDE – Real Driving at the High Dynamic Engine Test Bench“, MTZ 02/2015
- [6] Steinbach, M., Neumann, D., Kutzner, T., Lehmann, A., Kassem, V., Dreiser, M.: „Model supported calibration process for future RDE requirements“, Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 2016
- [7] Baumgarten, H., Scharf, J., Thewes, M., Uhlmann, T., Balazs, A., Böhmer, M.: „Simulation-Based Development Methodology for Future Emission Legislation“, 37. Internationales Wiener Motorensymposium, 2016
- [8] Brown, J., Gu, T., Artukovic, D., Blint, R.: “Simulation of Various SCR Technologies Applied to a 2.0 L Diesel Engine Model to Evaluate DeNOx Performance”, CLEERS Workshop 2015
- [9] Bösch, P.: „Der Fahrer als Regler“, Dissertation, TU Wien, 1991.
- [10] Mirzaeian, M., Millo, F., and Rolando, L., "Assessment of the Predictive Capabilities of a Combustion Model for a Modern Downsized Turbocharged SI Engine," SAE Technical Paper 2016-01-0557, 2016.
- [11] Kikusato, A., Jin, K., and Daisho, Y., "A Numerical Simulation Study on Improving the Thermal Efficiency of a Spark Ignited Engine --- Part 1: Modeling of a Spark Ignited Engine Combustion to Predict Engine Performance Considering Flame Propagation, Knock, and Combustion Chamber Wall ---," *SAE Int. J. Engines* 7(1):96-105, 2014.

- [12] Forsthuber, F., Krennek, T., Marinitsch, F., Lauer, T. et al., "Investigations on the Tail-Pipe Emissions of Commercial Engines with Advanced One-Dimensional Simulation Methods," SAE Technical Paper 2013-01-1117, 2013.
- [13] Pautasso, E., Servetto, E., Artukovic, D., Brown, J., Wang, W.: "Emissions and Fuel Consumption Trade-Offs of a Turbocharged Diesel Engine Equipped with Electrically Heated Catalyst", SIA Conference 2012
- [14] Heywood, J. B.: "Internal Combustion Engine Fundamentals", Chapter 11.2 "Nitrogen Oxides", McGraw-Hill Book Company, 1988
- [15] Lavoie, G.: "Correlations of Combustion Data for S. I. Engine Calculations - Laminar Flame Speed, Quench Distance and Global Reaction Rates," SAE Technical Paper 780229, 1978
- [16] Heywood, J. B.: "Internal Combustion Engine Fundamentals", Chapter 11.3 "Carbon Monoxide", McGraw-Hill Book Company, 1988
- [17] Robinson, K., Ye, S., Yap, Y., Kolaczowski, S.T. : "Application of a methodology to access the performance of a full-scale diesel oxidation catalyst during cold and hot start NEDC drive cycles", Chemical Engineering Research and Design 91 (2013) 1292-1306
- [18] Ye, S., Yap, Y. H., Kolaczowski, S. T., Robinson, K., Lukyanov, D.: "Catalyst 'light-off' experiments on a diesel oxidation catalyst connected to a diesel engine – Methodology and techniques", Chemical Engineering Research and Design 90 (2012) 834-1306

VPC – Simulation und Test 2016

Herausforderungen durch die RDE-Gesetzgebung

Liebl, J.; Beidl, C. (Hrsg.)

2017, VIII, 283 S. 168 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-16753-0