

A wireframe model of a car, showing the internal engine, suspension, and wheels, set against a blue background with motion blur.

**ATZ** live

Johannes Liebl  
Christian Beidl *Hrsg.*

# VPC-Simulation und Test

Herausforderungen durch die RDE-Gesetzgebung

Proceedings

 Springer Vieweg

---

# Proceedings

Ein stetig steigender Fundus an Informationen ist heute notwendig, um die immer komplexer werdende Technik heutiger Kraftfahrzeuge zu verstehen. Funktionen, Arbeitsweise, Komponenten und Systeme entwickeln sich rasant. In immer schnelleren Zyklen verbreitet sich aktuelles Wissen gerade aus Konferenzen, Tagungen und Symposien in die Fachwelt. Den raschen Zugriff auf diese Informationen bietet diese Reihe Proceedings, die sich zur Aufgabe gestellt hat, das zum Verständnis topaktueller Technik rund um das Automobil erforderliche spezielle Wissen in der Systematik der Konferenzen und Tagungen zusammen zu stellen und als Buch in Springer.com wie auch elektronisch in SpringerLink und Springer Professional bereit zu stellen.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die aktuelles Fachwissen im Zusammenhang mit Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes suchen. Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik finden hier die Zusammenstellung von Veranstaltungen, die sie selber nicht besuchen konnten. Gutachtern, Forschern und Entwicklungsingenieuren in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie Dienstleistern können die Proceedings wertvolle Antworten auf topaktuelle Fragen geben.

Today, a steadily growing store of information is called for in order to understand the increasingly complex technologies used in modern automobiles. Functions, modes of operation, components and systems are rapidly evolving, while at the same time the latest expertise is disseminated directly from conferences, congresses and symposia to the professional world in ever-faster cycles. This series of proceedings offers rapid access to this information, gathering the specific knowledge needed to keep up with cutting-edge advances in automotive technologies, employing the same systematic approach used at conferences and congresses and presenting it in print (available at Springer.com) and electronic (at SpringerLink and Springer Professional) formats.

The series addresses the needs of automotive engineers, motor design engineers and students looking for the latest expertise in connection with key questions in their field, while professors and instructors working in the areas of automotive and motor design engineering will also find summaries of industry events they weren't able to attend. The proceedings also offer valuable answers to the topical questions that concern assessors, researchers and developmental engineers in the automotive and supplier industry, as well as service providers.

Weitere Bände in dieser Reihe <http://www.springer.com/series/13360>

---

Johannes Liebl · Christian Beidl  
(Hrsg.)

# VPC - Simulation und Test 2016

Herausforderungen durch die  
RDE-Gesetzgebung

*Herausgeber*  
Johannes Liebl  
Moosburg, Deutschland

Christian Beidl  
Darmstadt, Deutschland

ISSN 2198-7432                      ISSN 2198-7440 (electronic)  
Proceedings  
ISBN 978-3-658-16753-0            ISBN 978-3-658-16754-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-658-16754-7

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Vorwort

Das optimale Zusammenwirken virtueller und realer sowie modellgestützter Versuchsdurchführung ist ein entscheidender Aspekt für zukünftig erfolgreiche Entwicklungsabläufe. Ohne Zweifel haben die jüngsten Ereignisse in der Automobilbranche den Umbruch deutlich gemacht. Die große Bedeutung der Realfahremissionen erfordert neue Methoden der Versuchsdurchführung im Rahmen der RDE-Gesetzgebung und darüber hinaus. Die Produktabsicherung muss in einem breiten Spektrum erfolgen. Letztlich ist die gesamte Automobilbranche von der gestiegenen Bedeutung der Emissionen betroffen, weiter verschärft noch durch die Zunahme der Varianten- und Applikationsvielfalt. Die Simulation als Partner des Versuchs gewinnt dabei erneut an Bedeutung, um die eng gesteckten Entwicklungszeiträume einhalten zu können.

Die VPC hat damit spannende Fragen zu diskutieren: Welche neuen Verfahren zur effizienten antriebsstrangspezifischen RDE-Entwicklung sind zielführend? Wie muss modellbasiertes Testen am Motorprüfstand ausgelegt werden, um Hybridantriebssysteme unter Realbedingungen untersuchen zu können? Oder: Mit welchen Modellen können Messabweichungen bei der Effizienzmessung von elektrifizierten Antrieben bestimmt werden?

Über allem schwebt die Frage: Wie weit reicht Simulation? Diese Themen fordern einen intensiven Austausch in der Entwickler-Community. Wir freuen uns auf spannende Vorträge, fruchtbare Diskussionen und auf ein persönliches Treffen im September in Hanau.

Für den Wissenschaftlichen Beirat  
Prof. Dr. Christian Beidl  
Dr. Johannes Liebl

---

# Inhaltsverzeichnis

## **METHODIK FÜR RDE**

### **Neue Verfahren zur effizienten antriebsstrangspezifischen RDE-Entwicklung**

Deborah Schmidt, Hauke Maschmeyer, Christian Beidl und Florian Raß

### **vRDE – Virtual Real Driving Emission**

Markus Wenig, Dominik Artuković und Christian Armbruster

### **Modellbasiertes Testen am Motorprüfstand – Teilvirtuelle Untersuchung von Hybridantriebssystemen unter Realbedingungen**

Christian Donn, Raphael Pfeffer und Martin Elbs

## **METHODIK FÜR HYBRIDANTRIEBE**

### **Analyse und Effizienzoptimierung von Ottomotoren in Hybridantrieben mithilfe der Gesamtfahrzeugsimulation**

Harry Hamann, Daniel Munning, Michael Zillmer und Peter Eilts

### **Integrated Simulation Approach for System Architecture Design for xEV**

Vratislav Ondrak und Tyson Stewart

### **Modellgestützter Messprozess zur Bestimmung von Messabweichungen und Effizienzsteigerung elektrifizierter Fahrzeugantriebe**

Helge Saß, G. Stöhr und L. Brabetz

## **ENGINEERING-PROZESSE**

### **FEV Hybrid System Benchmark: Zusammenspiel von Versuch, Simulation und Systemauslegung**

Edoardo Pietro Morra, Martin Lenz, Felix Glados, Markus Espig, Ali Awarke und Michael Stapelbroek

### **Weiterentwickelte Validierungsansätze für den Powertrain**

Peter Urban und Xaver Tischer

### **Spray Modeling of Multicomponent Fuels in Industrial Time Frames Using 3D CFD**

Marcel Divis, Nick K Tiney und Gwendal Lucas

**NVH****Anforderungen an die virtuelle NVH-Optimierung von Antrieben in Fahrzeugen**

Marcus Hofmann, Christoph Priestner, Torsten Philipp und Bernhard Graf

**CAE-Toolkette zur NVH-Optimierung von Antriebssträngen**

Christof Nussmann und Christoph Steffens

**XIL****Vehicle Thermal Management System Control Strategies – from MiL to HiL (CiL)**

Jianbo Tao, Andreas Ennemoser, Heinz Petutschnig, Günter Lang und Armin Traussnig

**Testen am SiL: Kopplung von HiL-Testautomatisierung und SiL-Umgebung**

Thomas Liebezeit, Jörg Bender, Roland Serway und Lukasz Stasiak

**Simulationsgestützter Funktionsentwicklungsprozess zur Regelung der teilhomogenen Dieselerbrennung**

Philipp Skarke, C. Auerbach, M. Bargende, H.-J. Berner und D. Rether

**MOTORMODELLIERUNG****Methode zur Optimierung von HiL-Modellen mittels einer Offline-Umgebung**

Aras Mirfendreski, Andreas Schmid, Michael Grill, Michael Bargende und Sebastian Grams

**Methode zur modellbasierten Lasterfassungsapplikation von BMW Ottomotoren mit DoE-Einsatz**

Benedikt Raidt

**Elektrifiziert, automatisiert, vernetzt – Herausforderungen und Chancen für die Antriebsentwicklung von morgen**

Tobias Radke

# **Neue Verfahren zur effizienten antriebsstrangspezifischen RDE-Entwicklung**

Deborah Schmidt, M.Sc.; Hauke Maschmeyer, M.Sc.;  
Prof. Dr. techn. Christian Beidl;

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe, TU Darmstadt

Dipl. Ing Florian Raß; Honda R & D Europe GmbH

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Im Zuge der Euro 6d Abgasgesetzgebung wird die Zertifizierungsprozedur zur Erlangung der Typgenehmigung für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge grundlegend reformiert. Zwar wurden infolge der Schadstoffbelastung insbesondere in städtischen Gebieten die Standards der geltenden Euro-Abgasnorm schrittweise erhöht, jedoch konnte bisher kein ausreichend wirksamer Effekt auf die Reduktion der Schadstoffemissionen erzielt werden.[1] Ursächlich für die Diskrepanz von real ausgestoßenen Emissionen des Verkehrssektors und den innerhalb der Typprüfung festgestellten Werten ist vor allem das bislang angewendete standardisierte Testverfahren in einer definierten Testumgebung im Labor, welches für den Realbetrieb repräsentative Fahrzustände sowie strecken- und umweltbedingte Einflüsse nicht vollständig abdecken kann.

Um die Effektivität der geltenden Abgasnorm zu erhöhen hat die Europäische Kommission ein neues Zertifizierungsverfahren in Form der Real Driving Emissions Homologation verabschiedet, welches zusätzlich zu konventionellen Messungen auf dem Rollenprüfstand in einer konditionierten Prüfumgebung reale Straßenfahrten mit stochastischen Testbedingungen beinhaltet. [2] Schadstoffemissionen, welche innerhalb eines als „normal“ definierten Nutzungsszenarios auftreten, werden mit einem Portable Emission Measurement System erfasst und anschließend unter Bezugnahme der Testbedingungen bewertet.

## 1.2 Problemdefinition

Mit der Straße als neue Bezugsgröße für die Zertifizierung treten eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf, die im konventionellen Prüfumfeld bei Zertifizierungszyklen auf dem Rollenprüfstand keine Rolle gespielt haben. Diese zusätzlichen und stochastischen Einflussfaktoren wie beispielsweise Verkehr und Umgebungsbedingungen sowie der große Variationsraum von Höhen/-Streckenprofilen stellen eine große Herausforderung an die Entwicklung dar und erfordern neue Entwicklungsmethoden. Durch die Einzigartigkeit eines jeden Tests und der fehlenden Reproduzierbarkeit führen bisherige Methoden der Antriebsstrangentwicklung, welche sich auf feste Prüfprofile für diverse Antriebsstränge stützen, zu wenig belastbaren Ergebnissen. Die mit der Einführung der RDE-Gesetzgebung verbundenen Herausforderungen benötigen die Möglichkeit frühzeitig im Entwicklungsprozess eine Bewertung eines jeden Fahrzeugantriebs hinsichtlich der neuen Zertifizierungsprozedur vorzunehmen. Dazu sind neue und erweiterte Entwicklungsumgebungen von Nöten, welche durch die gezielte Vernetzung von Simulationen und deren Einsatz am Motorenprüfstand die Vielfalt realer Einflüsse reproduzierbar darstellen können und durch Parametrierung dennoch stochastische Prüfbedingungen ermöglichen.

### 1.3 RDE – gesetzliche Rahmenbedingungen [3]

Nach aktuellem Stand ist die von der EU Kommission vorgeschlagene RDE Testprozedur nicht abschließend definiert, jedoch sind in ihrer jetzigen Form die Testrandbedingungen sowie das anschließende Post-Processing der Messdaten festgelegt. Die Einführung wird in zwei Phasen unterteilt, beginnend mit einer Monitoring-Phase. Während dieser ersten Phase werden Testfahrten mit PEMS nur zum Zwecke der Beobachtung und des Erfahrungsgewinns durchgeführt. In dem sich anschließenden zweiten Schritt, der eigentlichen Einführung, werden die Zertifizierungsfahrten im realen Straßenverkehr bei allen neuen Typprüfungen inklusive der geltenden Not-to-Exceed Limits gesetzlich verpflichtend angewandt. Die Messung der gasförmigen Abgaskomponenten CO<sub>2</sub>, CO und NO<sub>x</sub> sowie der Partikelanzahl ist verbindlich. Die Rahmenbedingungen der Testfahrt betreffen hauptsächlich Höhe, Temperatur und Nutzlast sowie Vorgaben hinsichtlich der Dynamik. Die Testfahrtanforderungen für einen gültigen RDE-Zertifizierungstest betreffen die Streckenzusammensetzung (Stadt, Land, Autobahn) sowie die innerhalb der Streckenkategorien gefahrenen Geschwindigkeiten.

Die Emissionen während des Kaltstarts werden erfasst, aber von der nachfolgenden Emissionsbewertung ausgeschlossen. Ein normaler Gebrauch der Nebenaggregate und Verbraucher muss sichergestellt werden.

Das Post-Processing bzw. die Bewertung der Rohdaten hat sich im Vergleich zur NEFZ-Zertifizierungsprozedur grundlegend verändert. Da RDE nicht in einer definierten vorkonditionierten Prüfstands Umgebung stattfindet, treten Unterschiede zwischen den Homologationstests verschiedener Fahrzeuge und Fahrer auf, die auf Einflüssen der Realfahrt basieren. Um dies zu neutralisieren und somit „normal conditions of use“ herzustellen, hat die EU zwei Tools zur Datenanalyse eingeführt: „CLEAR“ der TU Graz Quelle und „EMROAD“ des JRC.

EMROAD nutzt das Prinzip der „Moving Averaging Windows“ Methode, bei der die Emissionen in Fenstern eines definierten Zeitraums gemittelt und anschließend anhand einer CO<sub>2</sub>-Referenzkurve gewichtet werden.[4] Das Bewertungstool CLEAR kann als „Power Binning Methode“ beschrieben werden. Die Schadstoffemissionen werden in Leistungsklassen entsprechend ihrer Leistung an den Rädern des getesteten Fahrzeugs eingeteilt und anhand einer Soll-Häufigkeitsverteilung der Leistungsanforderung gewichtet. [5]

Das endgültige streckenspezifische Ergebnis beider Bewertungsmethoden muss einen „Not-to-Exceed“-Grenzwert einhalten. Dieser Grenzwert ist der angewandte Emissionsstandard multipliziert mit einem Konformitätsfaktor. Der Konformitätsfaktor kann für jeden Schadstoff variieren, in der aktuellen Diskussion wird beispielsweise 2,1 einfürend für NO<sub>x</sub> genannt, mit dem Ziel den Faktor langfristig auf 1 unter Berücksichtigung einer Unsicherheit für Messausrüstung zu reduzieren. [6]

## 2 Herausforderungen durch RDE

Die Einführung der Real Driving Emissions Homologation ist mit einer Reihe von Herausforderungen für die Entwicklung und Applikation von Fahrzeugantrieben verbunden. Mit der Umstellung der Zertifizierungsprozedur von einem bekannten Geschwindigkeitsprofil in einer kontrollierten Umgebung hin zu völlig unbekanntem Prüfbedingungen und –profilen gehen notwendige Veränderungen in der gesamten Entwicklungskette einher. Dies betrifft sowohl die eingesetzten Antriebstechnologien an sich als auch die Entwicklungsprozesse und Testmethoden, welche bei der Entwicklung und Validierung eines Fahrzeugantriebs angewandt werden.

### 2.1 Auswirkungen auf Antriebstechnologien

Der erweiterte Kennfeldbereich, welcher bei realen Straßenfahrten angesprochen wird, stellt die Wirksamkeit von bisher angewandten Methoden, welche vor allem auf die Optimierung im Teillastbereich abgezielt haben auf die Probe. Gebräuchliche und anerkannte Maßnahmen für Ottomotoren wie beispielsweise Downsizing oder Gemischanreicherung im Vollastbereich könnten ihre Bedeutung verlieren, wenn der Zeitanteil von Betriebspunkten mit hohen Lasten und Geschwindigkeiten in der Typprüfung steigt und die Wirksamkeit der Abgasreinigung in diesem Bereich durch genannte Maßnahmen eingeschränkt ist. Jedoch stellt nicht nur die teilweise geringere Effektivität von angewandten Technologien eine Herausforderung dar, auch bisher weniger im Fokus stehende Phänomene in den erweiterten Kennfeldbereichen wie beispielsweise die Partikelanzahl gewinnen an Bedeutung für eine Schadstoffreduktion.

Bei Dieselmotoren wird der Fokus auf der Reduktion von Stickoxiden bestehen bleiben, eine Herausforderung werden vor allem die Betriebsgrenzen entstickender Abgasreinigungstechnologien hinsichtlich Temperatur und Volumenstrom darstellen. Auch der effiziente Dosiermittelverbrauch bei SCR-Systemen, welcher nur durch intelligente Dosierstrategien zu realisieren ist, wird eine Kernaufgabe in der Dieselantriebsstrangentwicklung werden. In Anbetracht der Kundenakzeptanz solcher SCR-Systeme erfolgt die Zudosierung idealerweise derart effizient, dass ein Nachfüllen des SCR-Tanks bei normalen Service-Werkstattbesuchen ausreicht.[7]

Hybridantriebe sehen sich vor allem mit der Schwierigkeit von Emissions-Events bei häufigen Motorstarts unter RDE-Bedingungen konfrontiert. Auch ein Auskühlen der Abgasreinigungsanlage bedingt durch lange Phasen mit geringer verbrennungsmotorischer Leistungsanforderung stellt die Fahrzeughersteller vor eine große Herausforderung. Gerade unter dem Aspekt des unbekanntem Betriebsprofils erlangen neue Betriebsstrategien, welche vorausschauend agieren und mit der Umwelt vernetzt sind an Bedeutung.

Die individuellen Herausforderungen eines jeden Antriebsstrangkonzpts zeigen, dass es einer antriebsstrangspezifischen Entwicklungsstrategie bedarf, um die jeweiligen Problemstellen zu identifizieren und diesen zu begegnen. Vor allem dynamische Emissions-Events sind unter Umständen nur zu erkennen, wenn diese auch durch entsprechende Manöver angeregt werden. Zusätzlich zum untersuchten Antriebsstrang sind auch für jeden Schadstoff infolge unterschiedlicher Entstehungsmechanismen und Arbeitsbereiche von Abgasreinigungstechnologien individuelle Tests zur Identifikation von kritischen Events und zur Bewertung hinsichtlich der Gesetzgebung von Nöten.

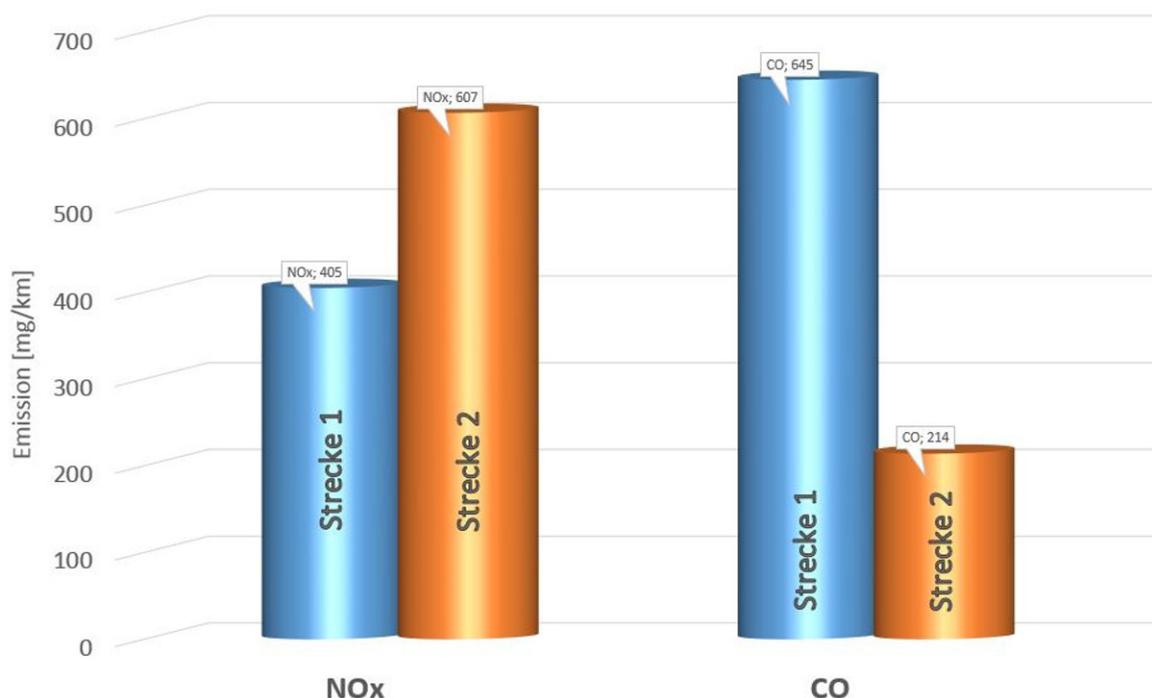


Abbildung 1: Vergleich EMROAD Ergebnis für unterschiedliche Schadstoffe bei unterschiedlichen Strecken

In Abbildung 1 ist das EMROAD-Ergebnis zweier RDE-Strecken eines Euro 5 Dieselmotors in einem C-Segment Fahrzeug für verschiedene Schadstoffe dargestellt. Beide Strecken genügen den Rahmenbedingungen der Gesetzgebung und sind nach aktuellem Stand des EMROAD-Auswerteverfahrens als gültig zu werten. Szenario 1 ist hauptsächlich durch ein ebenes Gebiet und eine moderate Fahrweise gekennzeichnet. Szenario 2 zeichnet sich durch viele Steigungen, regen Verkehr und eine wenig vorausschauende Fahrweise aus. Auffallend ist, dass bei Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 die NO<sub>x</sub>-Emission deutlich zunimmt, der CO-Ausstoß hingegen jedoch bei einer in Bezug auf energetische Gesichtspunkte anspruchsvolleren Fahrt drastisch abnimmt.

Eine Fahrt, die bezüglich des NO<sub>x</sub>-Ausstoßes als anspruchsvoll und kritisch zu werten ist, ist demnach nicht automatisch auch kritisch für andere Schadstoffe, da diesen unterschiedliche Entstehungsmechanismen zugrunde liegen. Eine Festlegung auf ein Test-szenario, das besonders dynamisch und anspruchsvoll hinsichtlich der Stickoxide ist, ist demnach nicht zielführend für eine Gesamtbewertung des vorliegenden Antriebsstrangs.

## 2.2 Auswirkungen auf die Antriebsstrangentwicklung [8]

Nicht nur die eingesetzten Technologien werden mit der Einführung von Straßenmes-sungen als Zertifizierungsgrundlage einen Wandel erfahren, auch die Prozesse, um eben diese Technologien zu entwickeln und zu applizieren, müssen auf die neue Situation angepasst werden. Der Verlust eines festen Testzyklus, auf den Entwicklungsprozesse viele Jahre aufgebaut haben, geht mit der Frage einher, was oder welcher Test zukünftig als Bewertungsgrundlage für eine hinsichtlich des Streckenprofils und der Umgebungsbedingungen weitgehend unbekannte Typprüfung dienen kann.

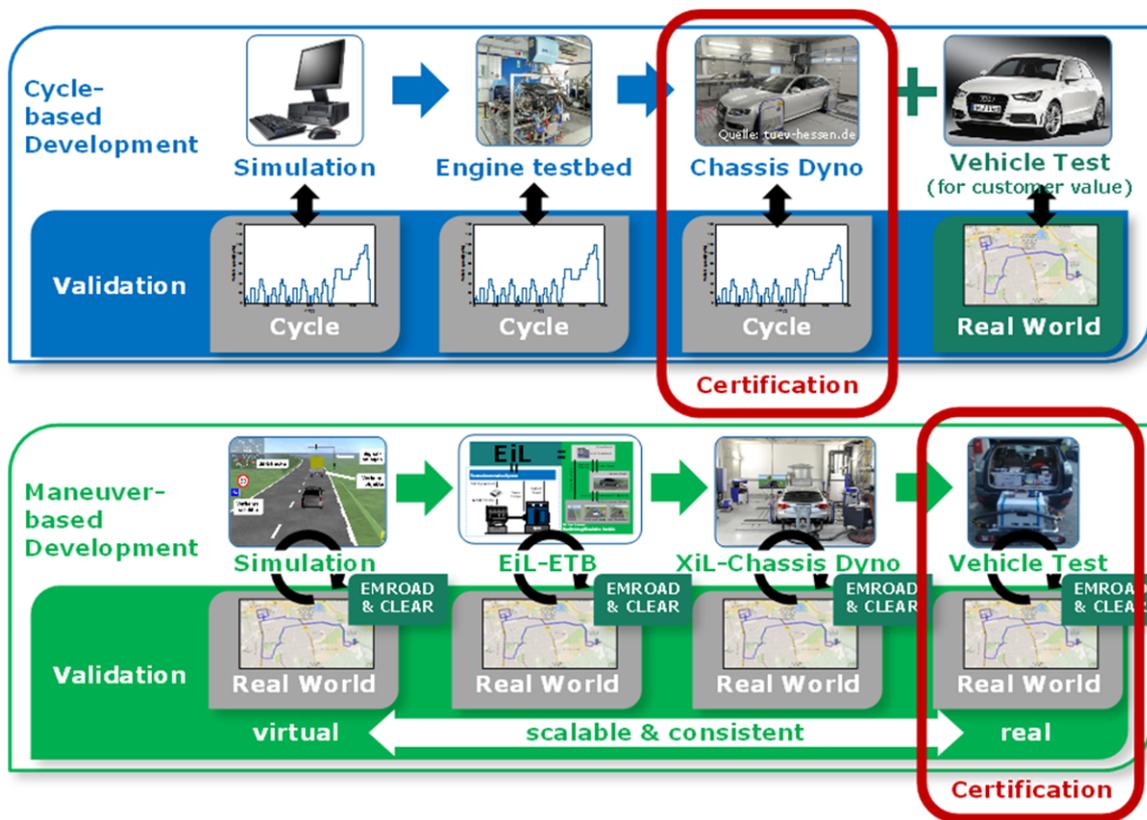


Abbildung 2: Paradigmenwechsel in der Entwicklung: konventionelle zyklusbasierte Entwicklung versus manöverbasierte In-the-Loop-RDE Entwicklung

Wird ein konventioneller Entwicklungsprozess angewandt (dargestellt in Abbildung 2 oben), werden Analysen zu realen Betriebsprofilen- und -bedingungen erst am Ende der Entwicklungskette an einem Prototypenfahrzeug durchgeführt. Treten in diesem Entwicklungsstadium Betriebszustände auf, welche hinsichtlich des Zertifizierungsverfahrens als kritisch eingestuft werden, kann eine Anpassung der Systeme und Funktionen aufgrund der bereits fortgeschrittenen Entwicklung des Zielobjekts nur unter großem Aufwand erfolgen. Eine Bewertung des Antriebsstrangverhaltens unter realen Betriebsbedingungen zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung ist daher unerlässlich.

In Kapitel 2.1 wurde gezeigt, dass für verschiedene Antriebsstränge ggf. kritische Emissions-Events in unterschiedlichen Betriebszuständen auftreten und deren Anregung ebenfalls unterschiedlichen Fahrsituationen unterliegt. Folglich müssen Entwicklungs- und Testmethoden geschaffen werden, die gezielt und antriebsstrangspezifisch diese Fahrsituationen identifizieren und in nachfolgenden Tests zur Validierung der Applikation ansprechen. Dies lässt eine aussagekräftige Bewertung hinsichtlich der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften zu.

Um ein Testumfeld zu schaffen, welches möglichst repräsentativ für die spätere Zertifizierungsfahrt ist, ist es anzustreben die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die anschließende Bewertung der Messdaten zu einem möglichst frühen Zeitpunkt miteinzubeziehen. Idealerweise folgen Testläufe für einen zu untersuchenden Antriebsstrang allen gesetzlichen Vorgaben. Testläufe, welche ein unrealistisches Betriebsprofil aufweisen, welches außerhalb der „normal conditions of use“ liegt, sind aus zweierlei Gründen nicht empfehlenswert. Zum einen kann unter Umständen keine Aussage über das Verhalten innerhalb des relevanten Betriebsbereichs getroffen werden, zum anderen kann ein solches Testen zu einer kostenintensiven Entwicklung führen.

Ein Vergleich zwischen dem Stickoxid-Ergebnis nach EMROAD-Bewertung mit und ohne Wichtung ist beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt.

Das zugrunde liegende Streckenprofil beinhaltet einen sehr anspruchsvollen Überlandteil mit Abschnitten, die durch große und langanhaltende Steigungen gekennzeichnet sind. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, wird die Bergfahrt, welche zu einer Emissionsüberhöhung des ungewichteten, grünen Verlaufs führt, mit Null gewichtet und liefert keinen Beitrag zum finalen Ergebnis. Es besteht demnach die Möglichkeit, dass eine moderatere Steigung, welche innerhalb des relevanten Energiebereichs läge, zu einem höheren Gesamtergebnis geführt hätte.

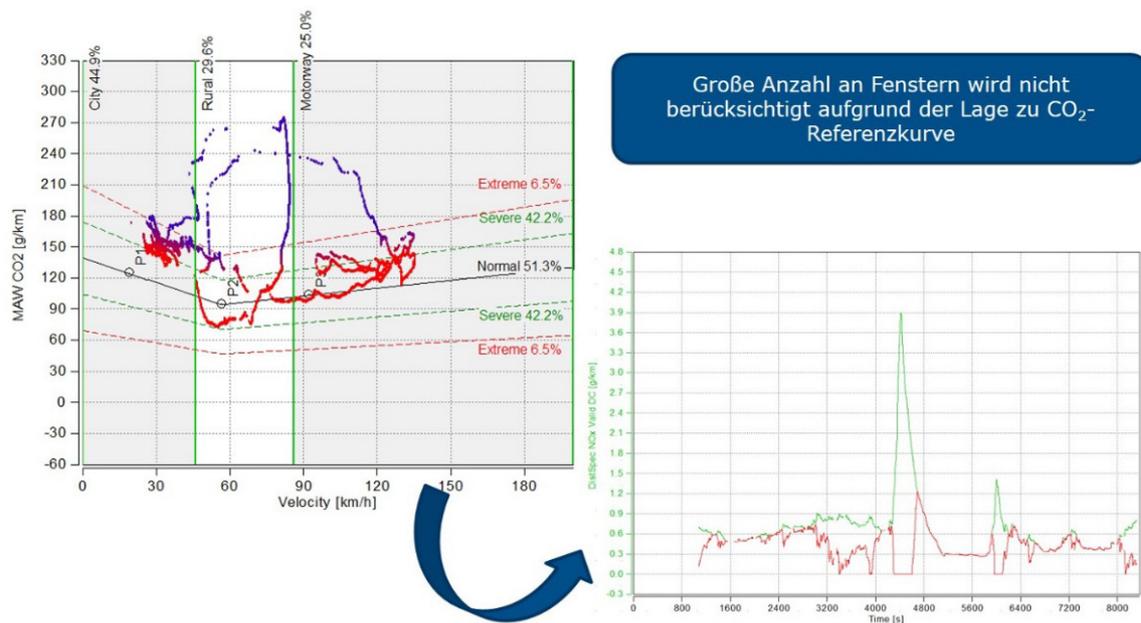


Abbildung 3: EMROAD-Fensterlage & Vergleich mittlere Fensteremission ungewichtet (grün) und gewichtet (rot)

Um den genannten Anforderungen, die sich aus der neuen Gesetzgebung ergeben, möglichst gut zu entsprechen, ergeben sich im Wesentlichen zwei Entwicklungsansätze:

Einerseits ist es möglich RDE von einem traditionellen, kennfeldbasierten Blickwinkel aus zu betrachten. Ein Verbrennungsmotor, welcher im gesamten Kennfeld für jeden Schadstoff unter allen möglichen Randbedingungen (Temperaturen, Drücke, Feuchte...) den Grenzwert einhalten kann, wird auch in einem realen Betriebsumfeld die Vorgaben erfüllen. Dies beinhaltet explizit nicht nur stationäre Betriebspunkte sondern auch beliebige Übergänge zwischen diesen mit unterschiedlichen Richtungen, Dynamiken oder Gradienten.

Der zweite Ansatz ist in Kapitel 3.2 beschrieben und bildet die Grundlage der Entwicklung anhand von repräsentativen und in Bezug auf den zu untersuchenden Antriebsstrang kritischen Tests, welche als neues Bezugssystem anstelle der bisher verwendeten festen Zyklen dienen. Diese Tests stellen eine virtuelle Repräsentation der Straße auf dem Prüfstand dar und konzentrieren antriebsstrangspezifisch kritische und im Sinne des Post-Processing relevante Fahrsituationen und -bedingungen in einem Prüfstandstest.

Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels von einem stationären Motorkennfeldkontext ergänzt um bekannte Zyklusdynamiken etc. hin zu einem vollständig transienten Manöveransatz und dementsprechend von zyklus- hin zu manöverbasiertem Testen und der Eliminierung von kritischen Events [9]. Daher sind die transiente Applikation und die Notwendigkeit der Darstellbarkeit von Fahrszenarien mittels systemzustands- und manöverbasiertem Testen Schlüsselanforderungen für die Entwicklung.

### 3 Simulations- und Testmethodik

#### 3.1 Entwicklungsumgebung

Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe hat einen Entwicklungsprozess auf Basis des bekannten V-Prozesses definiert [10], der vor allem für die zeit- und kosteneffiziente Entwicklung von komplexen Antriebskonzepten unter realen Randbedingungen geeignet ist. Der Prozess und seine Eigenschaften sind in Abbildung 4 dargestellt. Detailliertere Informationen über das Verfahren und die eingeführte Entwicklungsumgebung sind in [10] zu finden.

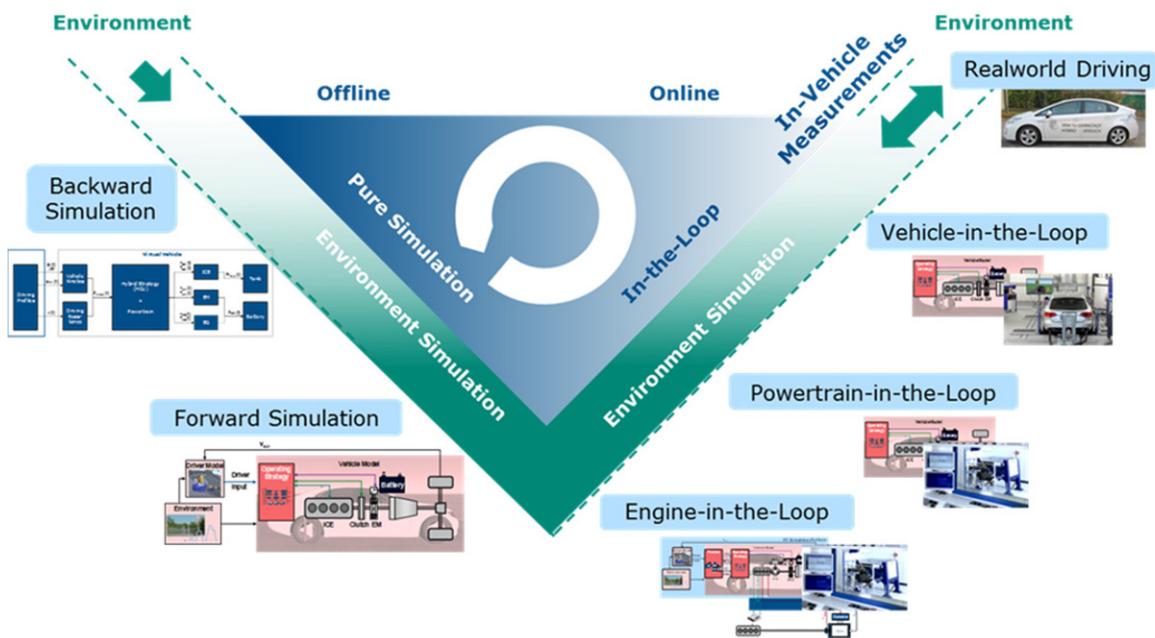


Abbildung 4: Durchgängiger VKM-Realfahrt-Entwicklungsprozess

Das V symbolisiert die Phasen der Entwicklung, auf der linken Seite befinden sich Phasen der Konzeptfindung, wohingegen Testphasen auf der rechten Seite des V angeordnet sind. Am Anfang der Entwicklung werden Antriebsstrangkonzepete mit einer sogenannten "Rückwärtssimulation" bewertet. Schwerpunkt in dieser Phase ist die energetische Analyse, die in einer quasi-stationären Art und Weise berechnet wird. Um vielversprechende Konzepte detaillierter zu analysieren, wird die Ergebnisqualität der Simulation in einem nächsten Schritt verbessert, welcher als "Vorwärtssimulation" bezeichnet wird.

Das Modell der Vorwärtssimulation hat aufgrund des virtuellen Fahrers eine "closed-loop"-Struktur. Änderungen im Modell (größere Straßensteigung, erhöhte Fahrzeugmasse, ...) werden durch das Fahrermodell kompensiert. Auf diese Weise wird die Darstellung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug, Strecke und Umwelt ermöglicht.

Allerdings liefert die Simulation gar keine oder nur mit viel Aufwand generierbare Informationen hinsichtlich der Emissionen. Daher wird für die folgenden Entwicklungsphasen teilweise reale Hardware zu der Vorwärtssimulation hinzugefügt und ersetzt die entsprechende virtuelle Komponente. In einem ersten Schritt wird der virtuelle Motor durch einen realen Motor auf einem Motorprüfstand ersetzt. Dies wird Engine-in-the-Loop (EiL) genannt. Das virtuelle Fahrzeug und der Fahrer werden immer noch verwendet und generieren die Lastprofile für den realen Motor. Mit diesem Setup werden die Vorteile einer Simulation von geringen Kosten, hoher Flexibilität und Verfügbarkeit mit der hohen Genauigkeit von realen Tests verbunden. Das Konzept für einen RDE Motorenprüfstand, wie er bei VKM der TU Darmstadt entwickelt wurde, ist in Abbildung 5 dargestellt.

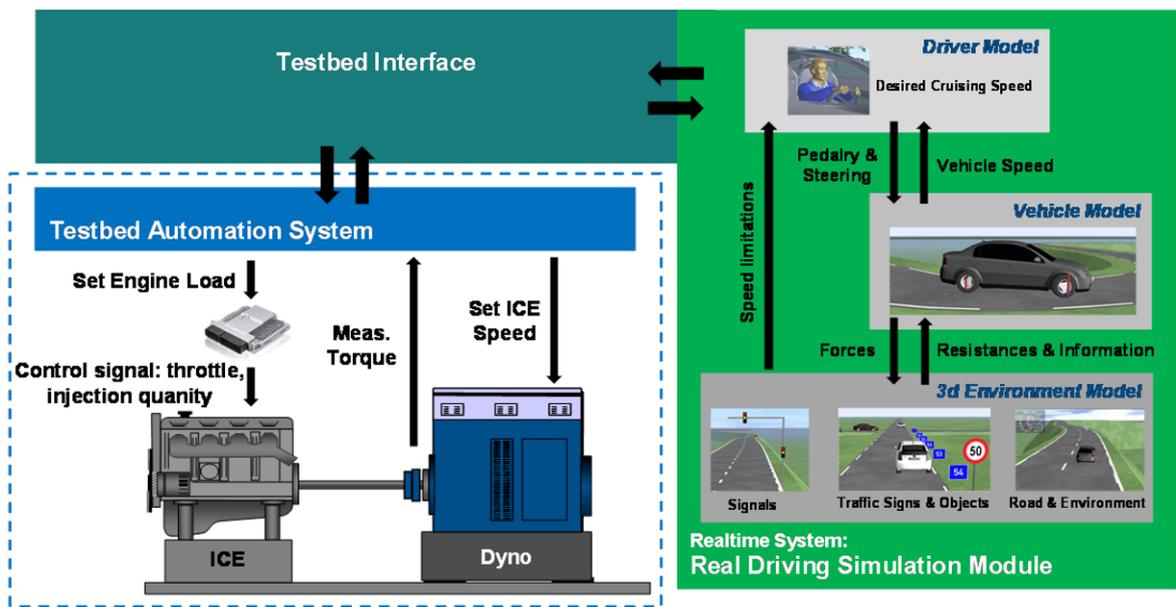


Abbildung 5: Motorenprüfstand erweitert um eine In-the-Loop-RDE-Simulation [8]

In der Regel wird eine Antriebsstrangträgheit als Schnittstelle zwischen Simulation und Prüfstand gewählt. Die simulierte Drehzahl an dieser Position wird als Solldrehzahl ( $n$ ) an die Prüfstandsbremse übertragen. Der Gaspedal-Sollwert ( $\alpha$ ) des virtuellen Fahrers wird an die reale ECU weitergeleitet. Das sich einstellende Drehmoment wird als Messsignal an die Schnittstellenträgheit in der Simulation zurück geleitet: Engine-in-the-Loop (EiL) [11].

Je mehr Komponenten im Laufe des V-Prozesses definiert und ausgewählt sind, desto mehr werden virtuelle Komponenten durch echte auf einem Prüfstand ersetzt. Wenn der gesamte Antriebsstrang in Form von Hardware vorliegt, wird dies als Powertrain-in-the-Loop bezeichnet. Das komplette Prototypenfahrzeug auf einem Rollenprüfstand wird Vehicle-in-the-Loop genannt. Der Hauptbegriff für diese Methode ist X-in-the-Loop (XiL).

Der letzte Schritt im vorgestellten Entwicklungsprozess ist die Substitution der restlichen virtuellen Teile der Vorwärtssimulation (Straße und Umgebung). Dies entspricht der Validierung im realen Fahrzeug auf der Straße.

### **3.2 Erweiterter RDE-Entwicklungsprozess**

Die RDE-Homologationsprüfung ist wie in Kapitel 1.3 im Vorhinein nicht bekannt und hängt von verschiedensten Einflüssen ab. Daher ist es eine Entwicklungsaufgabe für jedes Antriebskonzept sicherzustellen, dass die Zertifizierung dennoch bestanden wird. Ein generischer Zyklus ist denkbar, allerdings in der Regel nicht vollständig genug, um auf antriebsstrangkonzepthängige Herausforderungen einzugehen. Nachteilig ist das diese ggf. nicht identifizierten und gelösten Probleme in einem entsprechend größerem Sicherheitsabstand zum gesetzlichen Grenzwert Berücksichtigung finden müssen. Die Definition eines deutlich weniger konservativen RDE Engineering Targets ermöglicht ein strukturierterer, zielorientierter und effizienter Ansatz: die Definition einer individuellen Entwicklungsbasis für jedes Antriebskonzept. Ziel ist sicherzustellen, dass alle konzeptabhängigen kritischen Situationen enthalten sind und alle unkritischen eliminiert werden. Das ermöglicht Vollständigkeit in der Validierung und dennoch Effizienz, da ein Test so kurz wie möglich verwendet wird. Dieser Test wird als "Most-Relevant Testszenario" bezeichnet. Die Idee ist, dass bei Bestehen dieses Tests, alle möglichen anderen Zertifizierungstestfahrten in der Realität auch bestanden werden.

„Most-Relevant“ im Namen berücksichtigt dabei den Einfluss der RDE-Post-processing Verfahren. Diese gewichten wie oben beschrieben bestimmte Situationen unterschiedlich stark und führen dazu, dass ein kritischer Emissionspeak nach diesen evtl. nicht mehr relevant ist. Die pauschale Eliminierung aller Peaks würde somit unter Umständen zu Over-Engineering führen. Das folgende Kapitel beschreibt einen erweiterten Prozess, wie konzeptindividuell das Most-Relevant Testszenario auf eine zeit- und kosteneffiziente Art und Weise definiert wird. Eine Übersicht über den Prozess ist in Abbildung 6 dargestellt. Ergebnis laufender Forschungsarbeiten ist die Umsetzung dessen in einem Programm, das automatisch einen Most-Relevant Test in Bezug auf das betrachtete Antriebsstrangkonzepth definiert. Ergebnisse werden am Ende dieses Kapitels gezeigt.

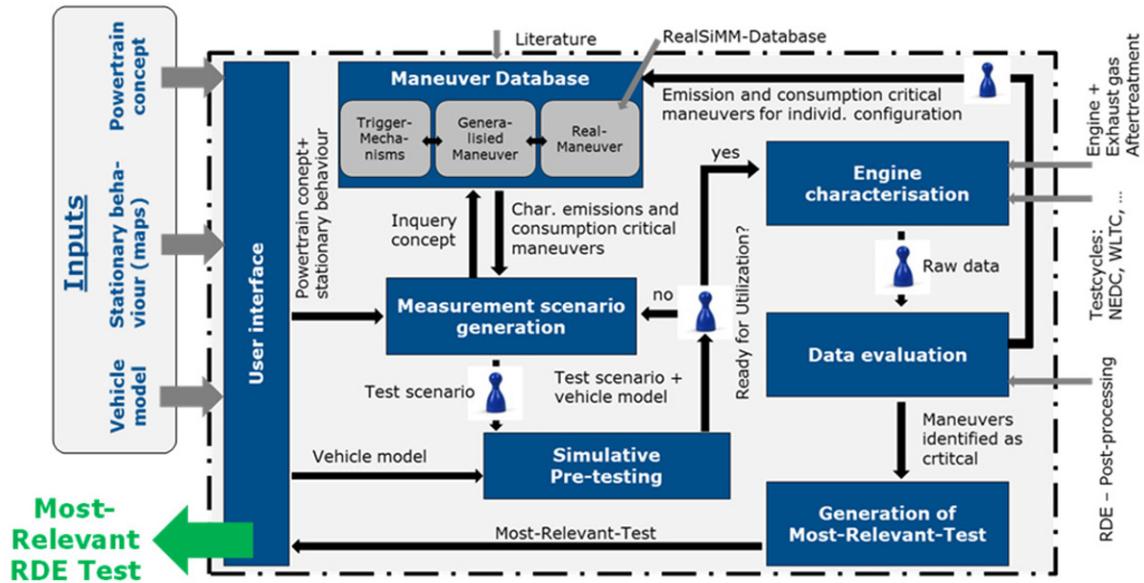


Abbildung 6: Erweiterter RDE-Most-Relevant Entwicklungsprozess [12]

Dem Most-Relevant Prozess werden als Eingänge Informationen über das Antriebsstrangkonzept (Leistungsverhältnisse, Komponenten etc.), das stationäre Verhalten (Emissions- und Verbrauchskennfelder) und ein passendes Fahrzeugmodell übergeben. Das Fahrzeugmodell lässt sich in einer beliebigen bzw. im Unternehmen vorhandenen Simulationssoftware umsetzen. Am VKM wird AVL InMotion powered by IPG Car-Maker verwendet. Das Ergebnis des Prozesses ist ein Testszenario, das direkt mit dieser Software auf XiL Prüfständen verwendbar ist. Szenariobestandteile sind alle relevanten RDE Fahrsituationen bzw. Manöver, die wichtig für das betrachtete Antriebsstrangkonzept sind. Das Testszenario kann direkt die neue Entwicklungsbasis für den Antriebsstrang im fortgeführten Entwicklungsprozess bilden.

Der Prozess ist in sieben Module gegliedert. Vorteilhaft ist die damit verbundene Funktionstrennung, die einen einfachen Austausch von Modulen nach etwaigen Änderungen wie beispielsweise bei den Post-processing Verfahren usw. ermöglicht. Jedes Modul wird im Folgenden kurz vorgestellt. Für weiterführende Informationen sei auf [12] verwiesen.

Die *Benutzerschnittstelle* bildet keine technisch relevanten Inhalte ab, sondern ist wichtig für die Benutzerfreundlichkeit des entwickelten Programms. So wird der Benutzer bei der Arbeit mit dem RDE-Most-Relevant Ansatz unterstützt und die zugrunde liegenden komplexen Module maskiert. Es stellt außerdem das erstellte Most-Relevant Testszenario als Prozessergebnis dem Benutzer dar.

Das Modul *Testszenario-Generierung* erstellt einen Test, der direkt in der VKM Realfahrt Entwicklungsumgebung ausführbar ist. Als Test wird ein umfangreiches Testszenario inklusive aller eventuell kritischen Fahrmanöver definiert, die aus der Theorie abgeleitet

wurden. Jenes wird als Messszenario bezeichnet und enthält Definitionen für die Straßengeometrie, Verkehrsobjekte, Schilder, Ampeln, ein Fahrzeug- und ein Fahrermodell für die jeweils verwendete Simulationssoftware. Die Information, welche Fahrmanöver kritisch sind, wird von dem Modul Manöver-Datenbank zur Verfügung gestellt.

Das Modul *Manöver-Datenbank* ist eines der beiden Kernmodule in dem RDE-Most-Relevant Prozess. Es gibt die Beschreibung aller möglichen kritischen Systemzustände oder Emissionsevents, deren Ursache, Intensität und Auftretenswahrscheinlichkeit sowie die möglichen Fahrmanöver, die zu dem jeweiligen kritischen Systemzustand führen können aus. Dieses strukturierte Archiv für Antriebsstrangwissen ist zurzeit auf Emissionen und Verbrauch fokussiert. Die logische Struktur erlaubt aber eine Erweiterung auf z.B. NVH, Fahrverhalten und Haltbarkeit. Mit allen kritischen Manövern sind in diesem Zusammenhang, alle in der Datenbank gespeicherten Manöver gemeint, was die Wichtigkeit des Moduls verdeutlicht. Die Datenbank besteht präziser aus drei Teilmodulen. Das erste ist ein Archiv technischer Triggermechanismen. D.h. hier sind a priori-Wissen, Testerfahrungen und theoretischen Erkenntnissen aus der Literatur abgelegt. Es lassen sich aus diesem Archiv kritische Systemzustände in Abhängigkeit von den Antriebsstrangkomponenten und -funktionen auslesen. Systemzustände werden nach Verbrennungsprozess (z.B. Diesel, Otto homogen, Otto DI ...), Funktionen (z.B. Getriebevarianten und Hybridisierungsmöglichkeiten (wie Boosten, Rekuperation, Lastpunktverschiebung, etc.), AGR, DI, Abgasnachbehandlungstypen, Aufladung, ...) und entsprechende Varianten (z.B. Nieder- & Hochdruck-AGR,...) strukturiert. Die Struktur unterstützt auch den Anwender beim Archivieren zusätzlicher Technischer Trigger. Doch die Testszenario Generierung bedarf Fahrmanöver. Dazu werden den Triggermechanismen aus dem zweiten Submodul synthetische Manöver oder aus dem dritten Submodul - einer VKM-Realfahrt-Datenbank - z.B. ein echtes gemessenes 3D Manöver zugeordnet.

Das Modul *Simulative Voruntersuchung* dient der Überprüfung der Ausführbarkeit des Testszenarios in der Simulationsumgebung. Diese Offline-Analyse vor der eigentlichen Fahrt auf einem XiL-Motorenprüfstand hat das Ziel, eine einwandfreie Ausführung in der Software sicherzustellen und z.B. fehlerhafte Sollwerte für den Prüfstand zu identifizieren, um Schäden zu vermeiden. Darüber hinaus wird der Testlauf mit drei vordefinierten Fahrermodellen (defensiv, normal und aggressiv) ausgeführt. Es gilt das Verhalten des Fahrers zu identifizieren, welches am besten die definierten Fahrmanöver aus der Manöver-Datenbank anregt.

Bisher im Messszenario definierte Manöver sind nur theoretisch kritisch. Ob diese beim vorliegenden Prüfling auch real kritisch sind, wird durch das konkrete Messen am Prüfstand überprüft. Das ermöglicht das Modul *Motorcharakterisierung* und meint schlicht die Ausführung des definierten Messszenarios in einer XiL-Testumgebung mit realem

Motor. Zusätzliche legislative Testzyklen wie NEFZ oder WLTC werden in dieser Phase ebenfalls analysiert.

Die Messdaten des vorherigen Prozessschritts werden in dem Modul *Datenauswertung* analysiert und für die Generierung eines Most-Relevant Testszenarios vorbereitet. Dies ist das zweite Kernmodul in dem RDE Most-Relevant Prozess. Die Datenauswertung besteht grundsätzlich aus fünf Phasen: Auswertung der Testlaufgesamtergebnisse, segmentweise Auswertung, RDE Post-processing, Event Identifikation und zuletzt die entsprechende Manöverextraktion.

Es werden gemessene Emissionsereignisse als kritisch definiert, wenn sie ein Kriterium erfüllen, z.B. den Vergleich mit dem gesetzlichen Emissionsgrenzwert, und wirklich Emissionsmasse zum Endergebnis beitragen (z.B. mehr als 10% der Segmentmasse). Hohe, aber sehr kurze Peaks entfallen dadurch. Kapitel 1.3 beschreibt, wie die RDE Nachbearbeitungsverfahren EMROAD und CLEAR funktionieren. Ob ein Motorzustand oder entsprechendes Emissionsereignis zu bearbeiten ist oder ignoriert werden darf, ist insbesondere auch von diesen abhängig. Dies ist aber keine triviale Frage mehr, da das Post-processing durch Gewichtung und Mittelung über Distanz, Fenster oder Leistungsklassen sowie Straßentypen großen Einfluss auf die Emissionswerte hat. Ein Emissionsmaximum bei nicht relevanten Systemzuständen muss nach diesen "Datenkorrekturen" nicht im Mittelpunkt der Entwicklung stehen.

Der Identifikation kritischer Events folgend gilt es dazugehörige Fahrmanöver für die Generierung eines Most-Relevant Testszenario-Modul zu extrahieren. D.h. ihre technische Ursache muss analysiert werden, sodass die notwendige System-, Lastprofil- und Zustandshistorie ausgeschnitten und zum Most-Relevant Szenario übertragen werden kann. Vorteilhaft ist, dass viele technische Trigger bereits aus der Manöver-Datenbank bekannt sind.

Das Modul *Generierung eines Most-Relevant Testszenarios* erzeugt einen gerafften Referenztest, in dem alle real kritischen, also durch Messung nachgewiesenen Emissions-events enthalten sind, aber in viel kürzerer Zeit und somit auch erhöhte distanzspezifische Emissionen als bei dem zuerst betrachteten, langen Messszenario der Motorcharakterisierung entstehen. Die zu verwendenden Events hat das Modul *Datenauswertung* bereits extrahiert. Der Test enthält alle RDE-relevanten technischen Trigger jedoch sinnvollerweise nur zweimal, sodass eine gewisse statistische Varianz gewährleistet ist, jedoch das Szenario möglichst kurz bleibt. Dieses neue, kompakte Most-Relevant Testszenario wird idealerweise als Entwicklungsgrundlage für sich anschließende RDE-Optimierungen des Systems verwendet. Währenddessen sich ändernde Systemeigenschaften erfordern jedoch, dass ggf. der Gesamtprozess nach großen Design-Änderungen oder Abschluss bestimmter Entwicklungsphasen iterativ wiederholt wird.

Ein Ergebnis des Teilmoduls *Testszenario-Generierung* mit anschließender Datenauswertung des angewandten Prozesses für einen EURO 5 Dieselmotor ist in Abbildung 7 zu sehen. Insgesamt werden Fahrten aus drei Kategorien miteinander verglichen: Unter Realfahrten sind Streckenprofile zu verstehen, die tatsächlich in der Realität gefahren wurden. Der mittlere Balkenblock bezeichnet Fahrten, die im allgemeinen Sinne als kritisch eingestuft werden können, d.h. einen hohen Steigungs- und Beschleunigungsanteil aufweisen. Antriebsstrangspezifische Fahrten, welche speziell für den vorliegenden Antriebsstrang mit Hilfe des Prozesses generiert wurden, um innerhalb der Gesetzgebung ein möglichst emissionskritisches Ergebnis zu erzeugen, sind im Balkendiagramm ganz rechts zu sehen. Über die jeweiligen Fahrten in jeder Kategorie wurde jeweils ein Durchschnittswert gebildet.

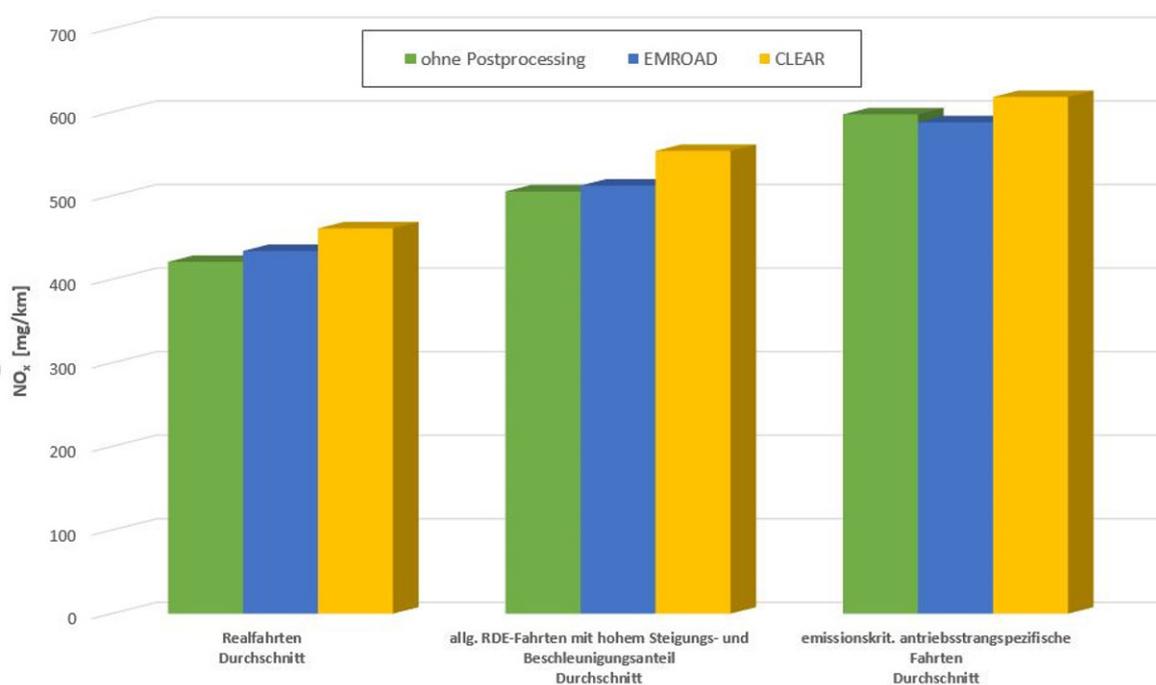


Abbildung 7: Vergleich NO<sub>x</sub>-Ergebnis in Abhängig von Streckentyp & Auswertungsverfahren

Vor allem bei den antriebsstrangspezifischen NO<sub>x</sub>-emissionskritischen Fahrten ist eine deutliche Steigerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vergleich zu beliebigen Streckenprofilen zu verzeichnen. Auch im Vergleich zu RDE-Fahrten, die nach allgemeinen dynamischen Kriterien erstellt wurden, ist eine Zunahme des Stickoxidaustoßes zu erkennen. Die nicht spezifischen Tests decken somit einige NO<sub>x</sub>-kritische Fahrsituationen nicht oder nicht ausreichend ab, was den Vorteil eines antriebsstrangspezifischen Testszenarios ersichtlich macht.

## 4 Zusammenfassung

Die kommende RDE-Homologation führt zu neuen Herausforderungen, welche nicht effizient durch traditionelle Entwicklungsprozesse bewerkstelligt werden können. Mit dem Schritt die Zertifizierung von einem Rollenprüfstand auf die Straße zu verlagern, verändern sich die Betriebspunkte und vor allem Betriebszustände, innerhalb derer Fahrzeuge zertifiziert werden. Damit einhergehend müssen bisherige Technologien auf ihre Wirksamkeit hin überprüft und neue Technologien entwickelt werden, um den gestiegenen Anforderungen zu genügen.

Zusätzlich zu der Technologiefrage ergibt sich mit dem Verlust des bekannten NEFZ als Bezugssystem die Notwendigkeit neuer Entwicklungsprozesse und deren Umgebungen. Die Entwicklung in Prototypen auf der Straße ist aufgrund der schlechten Reproduzierbarkeit und der hohen Kosten wenig empfehlenswert. Eine Überführung der Testreferenz, d.h. der Straße und dazugehörigen möglichen Fahrszenarien sowie Umgebungsbedingungen, auf den Prüfstand ist daher zielführend. Die Verwendung von In-the-Loop Entwicklungsumgebungen ermöglicht durch die Kombination von realem und virtuellem Testen frühzeitige Validierungsmöglichkeiten von stochastischen Realfahrtszenarien bei gleichzeitiger Reproduzierbarkeit.

Der Einsatz einer 3D-Simulationsumgebung ermöglicht die konsequente Anwendung gemeinsamer, manöverbasierter Realfahrt-Testszenarien von der reinen Simulation über die Eil-Testumgebung bis zu PEMS-Fahrzeugtests und berücksichtigt damit die neue Gesetzgebung in jeder Entwicklungsphase. Eine frühzeitige Identifikation von kritischen Emissionseigenschaften ermöglicht kurze Entwicklungs- und Adaptionsschleifen und vermeidet hohe Entwicklungskosten.

Zur Reduktion des großen Variationsraums möglicher Fahrszenarien und zugehöriger Umgebungsbedingungen hat das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe einen RDE-Prozess entwickelt, der spezifisch für das entsprechende Antriebskonzept ein Most-Relevant Testszenario definiert. Damit wird für jeden Antriebsstrang individuell ein emissionskritisches Testszenario gefunden, welches mögliche Problembereiche identifiziert und innerhalb des Tests gezielt anregt. Das identifizierte Testszenario kann in jedem Entwicklungsschritt von der Simulation bis zu XiL-Testumgebungen direkt verwendet werden und bildet zugleich die neue Entwicklungsgrundlage für die Entwicklung anstatt des konventionellen zyklusbasierten Ansatzes.

## Literaturverzeichnis

- [1] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Verordnung über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge* (in Kraft getr. am 20. 6. 2007) (2007-06-20)
- [2] DR. NIKOLAUS STEININGER: *Completing European Emission Targets with RDE test procedures for light duty vehicles* (International Conference on Real Driving Emissions). Bonn, 02.12.2013 – Überprüfungsdatum 2014-07-31
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Commission Regulation (EC) No 692/2008 forthcoming 2016* (idF v. Draft 15. 6. 2015) (2015-06-15) – Überprüfungsdatum 2015-08-13
- [4] STEFAN HAUSBERGER ; NIKOLAUS FURIAN ; SILKE LIPP: *Real Drive Emissions Evaluation for a Future Legislation* (International Conference on Real Driving Emissions). Bonn, 02.12.2013 – Überprüfungsdatum 2014-08-04
- [5] MARTIN WEISS, PIERRE BONNEL, THEODOROS VLACHOS: *RDE – Challenges in developing an on-road test procedure for light-duty vehicles* (International Conference on Real Driving Emissions). Bonn, 03.12.2013 – Überprüfungsdatum 2014-08-04
- [6] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Annex to RDE 2nd Package* (idF v. Draft vom 28. 10. 2015) (2015-10-28)
- [7] CHRISTIAN BEIDL: *Realfahremissionen : Herausforderungen und Chancen für zukünftige Fahrzeugantriebe* (ÖVK-Vorträge 2014/2015). Steyr, 19.03.2015
- [8] HAUKE MASCHMEYER ; MATTHIAS KLUIN ; CHRISTIAN BEIDL: *Real Driving Emissions - : Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung*. In: *MTZ* (2015), Nr. 02
- [9] HELMUT LIST: *Zukünftige Antriebsentwicklung : Bewältigung kurzer Entwicklungszeiten und hoher Komplexität* (35. Internationales Wiener Motorensymposium). Wien, 08. - 09.05.2014
- [10] HAUKE MASCHMEYER ; MATTHIAS KLUIN ; CHRISTIAN BEIDL: *Durchgängiger Entwicklungsprozess für Real-Driving-Emissions-Untersuchungen – : Von der Simulation bis zur PEMS-Messung auf der Straße* (VPC.Plus). Hanau, 30.09.2014
- [11] MAXIMILIAN BIER ; DAVID BUCH ; MATTHIAS KLUIN ; CHRISTIAN BEIDL: *Entwicklung und Optimierung von Hybridantrieben am X-in-the-Loop-Motorenprüfstand*. In: *MTZ* 2012, Nr. 03 – Überprüfungsdatum 2014-08-20

- [12] HAUKE MASCHMEYER ; DEBORAH SCHMIDT ; CHRISTIAN BEIDL: *Simulations- und Testmethoden für die Entwicklung von Fahrzeugantrieben unter Real Driving Emissions Randbedingungen* (Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik). Wiesbaden, 10.-11.11.2015 – Überprüfungsdatum 2016-03-14

# **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.

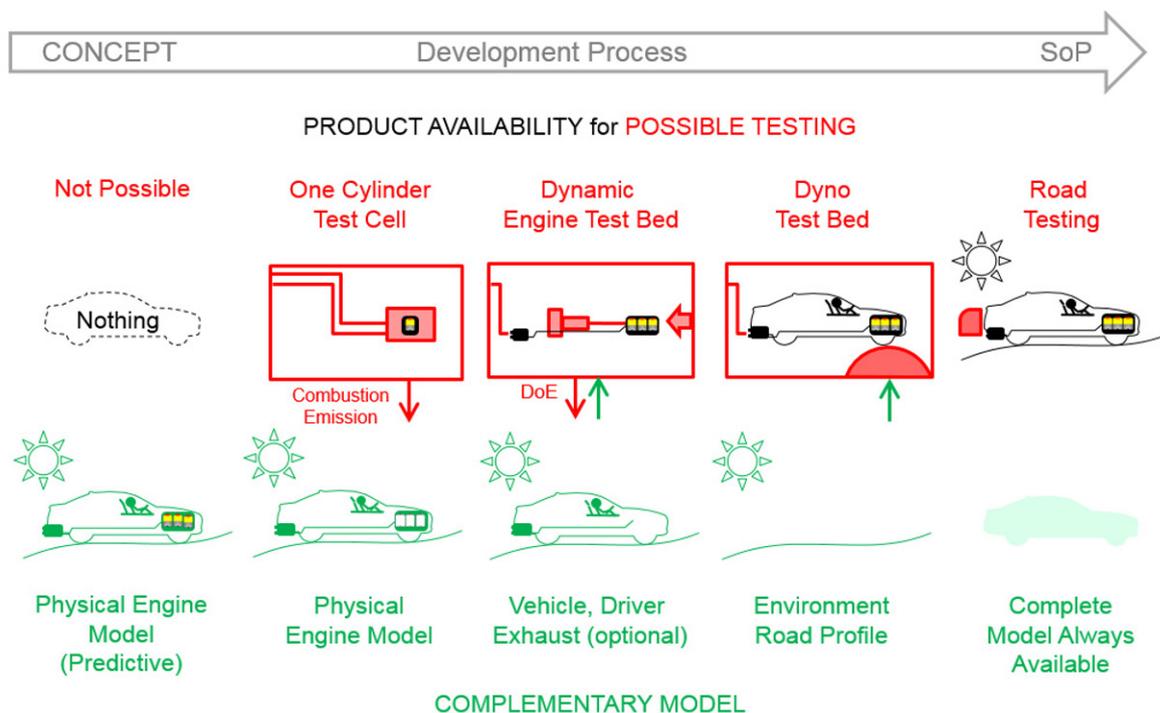


Abbildung 1: Schematischer Überblick über aktuelle Ansätze zur Adressierung von RDE

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.

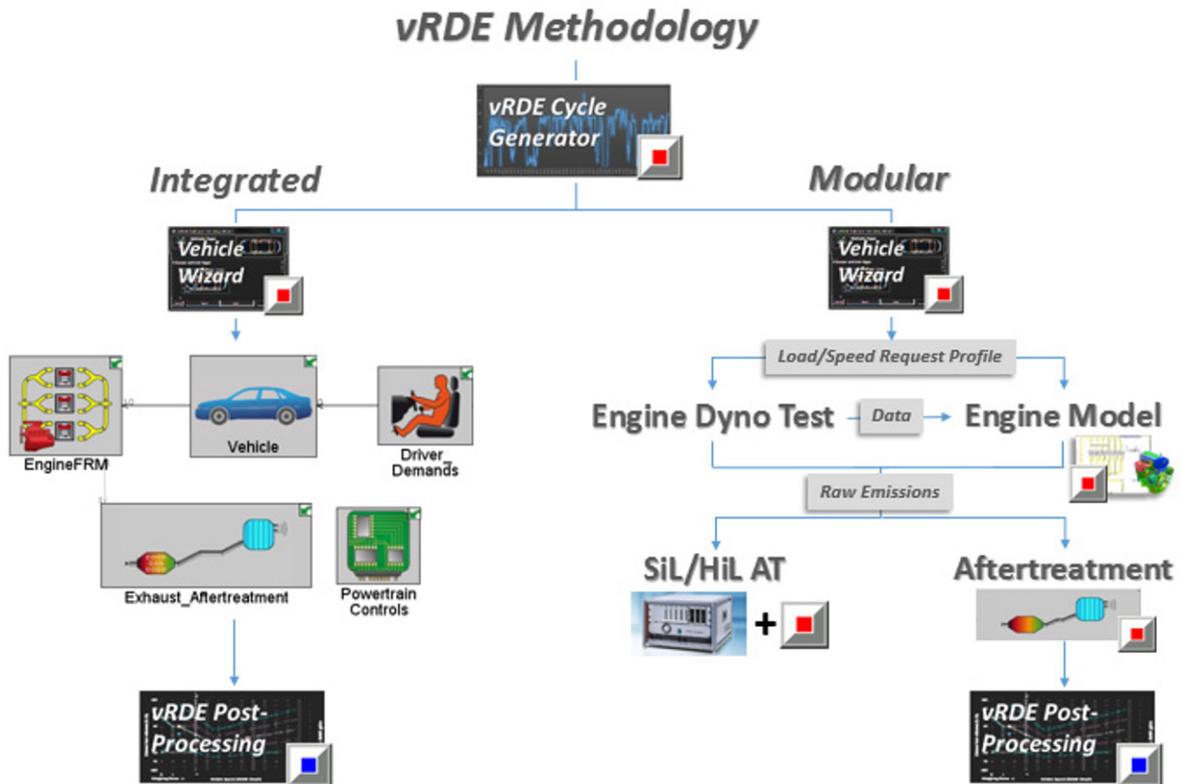


Abbildung 2: Darstellung der integrierten und modularen vRDE Methode

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 Bestimmungen<sup>1</sup> 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

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