

Übertrag von RDE-Anforderungen in eine modellbasierte Prüfstandumgebung



© APL

Bei der Entwicklung von Antrieben für moderne Pkw wächst der Anspruch an Energieeffizienz und geringe Emissionen. Der Beherrschung von Verbrauch und Schadstoffausstoß kommt deshalb eine elementare Rolle zu. APL hat anhand von RDE-Untersuchungen eine Entwicklungsmethodik erarbeitet, die die Übertragung von Zuständen, wie sie bei einer Straßenfahrt auftreten, in eine Prüfumgebung ermöglicht.

RDE-MESSUNGEN ERWEITERN DIE ZU PRÜFENDEN BETRIEBSZUSTÄNDE

Neben den selbstgesteckten Entwicklungszielen des jeweiligen Herstellers müssen für die Typenabnahme zukünftige Anforderungen der Emissionsgesetzgebung berücksichtigt werden. Mit den

Bestrebungen des Gesetzgebers, Fahrzeugemissionen im realen Fahrbetrieb zu vermessen (Real Driving Emissions – RDE), erweitern sich die zu prüfenden Betriebszustände grundlegend [1, 2], was unter Umständen kritische Auswirkungen auf die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten hat [3]. Aus den schwer vorhersagbaren Zuständen, die sich aus

den Randbedingungen einer RDE-Fahrt ergeben, resultieren neue Anforderungen für die Entwicklung von Verbrennungsmotor und Antriebsstrang, die frühzeitig in die Abstimmung des Gesamtfahrzeugs mit einzubeziehen sind. Zur Übertragung der RDE-Anforderungen in die Fahrzeugentwicklung müssen somit aus den neuen gesetzlichen Randbedingungen entspre-

AUTOREN



Dipl.-Ing. Lutz Faubel
ist Leiter Motor- und Antriebsstrangerprobung der APL GmbH in Landau.



Dipl.-Ing. Christian Lensch-Franzen
ist Leiter Engineering der APL GmbH in Landau.



Dipl.-Ing. André Schuhardt
ist Projektingenieur der APL GmbH in Landau.



Dipl.-Ing. Christoph Krohn
ist Teamleiter Antriebsstrang der APL GmbH in Landau.

chende Zielgrößen abgeleitet werden, die durch eine geeignete Methodik umgesetzt und abgesichert werden können.

RDE-GESETZGEBUNG

Die Einführung der Euro-6c-Abgasnorm für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ab September 2017 [4] und die Erweiterung um die Verordnung 2016/427 der Europäischen Kommission beschreiben im Detail die zukünftig gültige Prozedur der Typgenehmigung [5]. Zur Bewertung der Gültigkeit einer RDE-Fahrt werden die Auswertemethoden Emroad vom JRC der Europäischen Kommission oder Clear von der TU Graz [6] verwendet. Die Evaluierung einer Straßenfahrt sowie die Auswertung der Emissionsmessungen beruhen somit zum Großteil auf den im Gesetzestext vorgegebenen Kriterien für die Streckengestaltung sowie auf der Gewichtung der gemessenen Emissionen, wobei die Auswertemethoden die derzeit geltenden gesetzlichen Vorgaben berücksichtigen. Die so ermittelten Ergebnisse müssen zu einem frühen Zeitpunkt in die Entwicklungsarbeit integriert werden.

Bei APL befindet sich für diesen Zweck eine Werkzeugkette in der Entwicklung (APL-RDE-Auswertemethodik – ARA),

die es ermöglicht, Realfahrtemissionen gemäß der Gesetzesvorgabe zu bewerten sowie kritische Fahr Situationen zu ermitteln und gezielt in eine modellbasierte Prüfstandumgebung zu übertragen, **BILD 1.** Durch das Zusammenwirken aller Bausteine der Werkzeugkette können sowohl die Einflüsse innermotorischer Kenngrößen und Verstellparameter, als auch die Auswirkungen der Fahrstrategie des Triebstrangs hinsichtlich ihrer RDE-Fähigkeit analysiert werden. Nur durch Kenntnis dieser Vorgänge und deren Interaktion kann eine Grundlage gebildet werden, um Optimierungen am Antrieb der Zukunft vornehmen zu können.

MODELLBASIERTER ANSATZ UND UNTERSUCHUNGEN AM FALLBEISPIEL

Um den Übertrag aus den Ansprüchen der Gesetzgebung mit gleichzeitiger Analyse der zugrundeliegenden Effekte im Motor und Antriebsstrang zu erreichen, bietet es sich an, die Inhalte in eine abstrakte, simulative Ebene zu überführen und daraus zielgerichtete Erprobungen für den Prüfstand abzuleiten. Bei Untersuchungen auf der Straße zeigt sich, dass die Messungen durch

Randbedingungen wie veränderliche klimatische Zustände, tageszeitabhängiges Verkehrsaufkommen, temporäre Veränderungen der Streckenführung und Fahrerverhalten stark beeinflusst werden. Durch diese Streuung der Ergebnisse ergibt sich eine große Unschärfe für die Identifikation der kritischen Zustände. Die Verlagerung von realen Versuchen auf der Straße hin zur virtuellen Fahrt in einer modellbasierten Prüfumgebung zu einem frühen Zeitpunkt des Produktentwicklungsprozesses garantiert hingegen eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen und ermöglicht damit, gezielt und frühzeitig Maßnahmen zur Emissionsminderung zu treffen. Zudem kann bereits vor dem ersten realen Fahrversuch eine Auswahl an RDE-Strecken erstellt und in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung (HiL) durch modellbasiertes Fahren auf dem Motoren- oder Antriebsstrangprüfstand abgebildet werden. Diese Untersuchungen erlauben bereits frühzeitig eine Abschätzung über das Emissionsverhalten eines Fahrzeugs und durch die automatisierte Testumgebung kann das Emissionsverhalten einer Motor-Fahrzeug-Kombination über den gesamten Produktlebenszyklus reproduzierbar geprüft und bewertet werden.

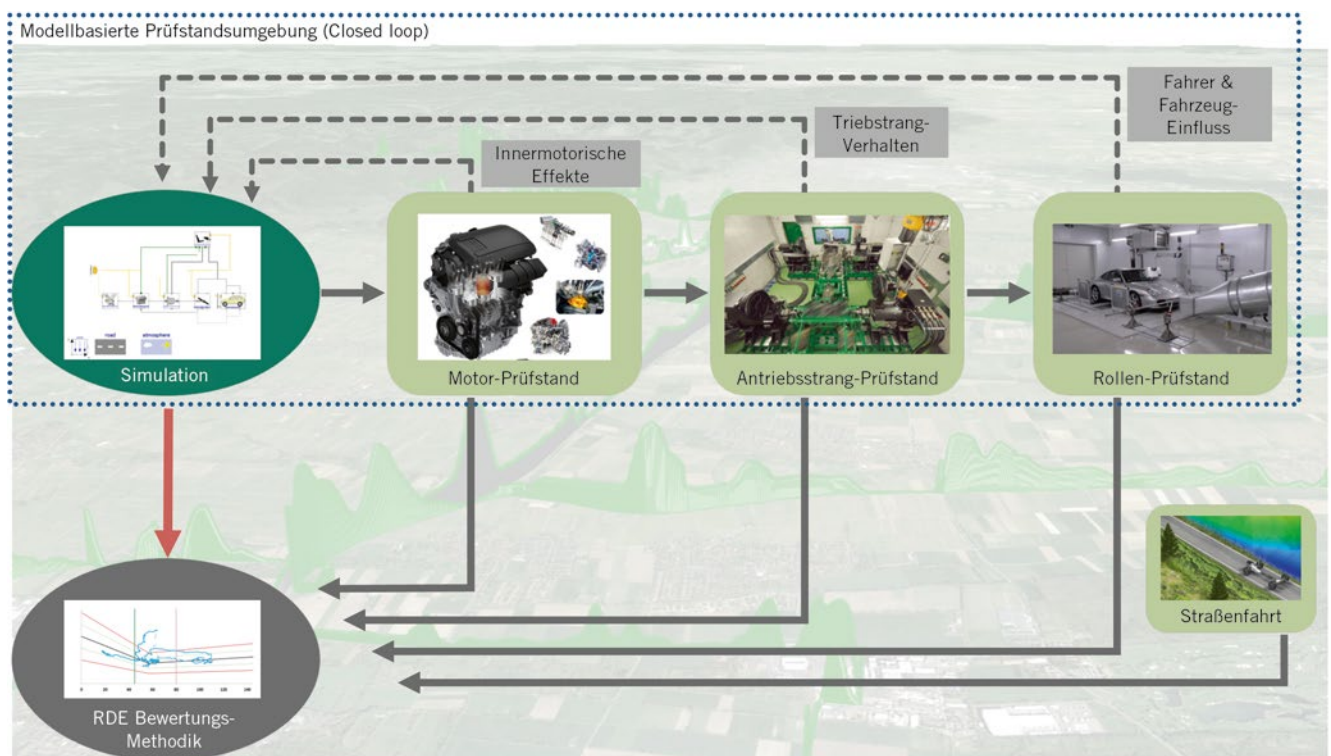


BILD 1 Schematische Darstellung der APL-RDE-Auswertemethodik (ARA) (© APL)

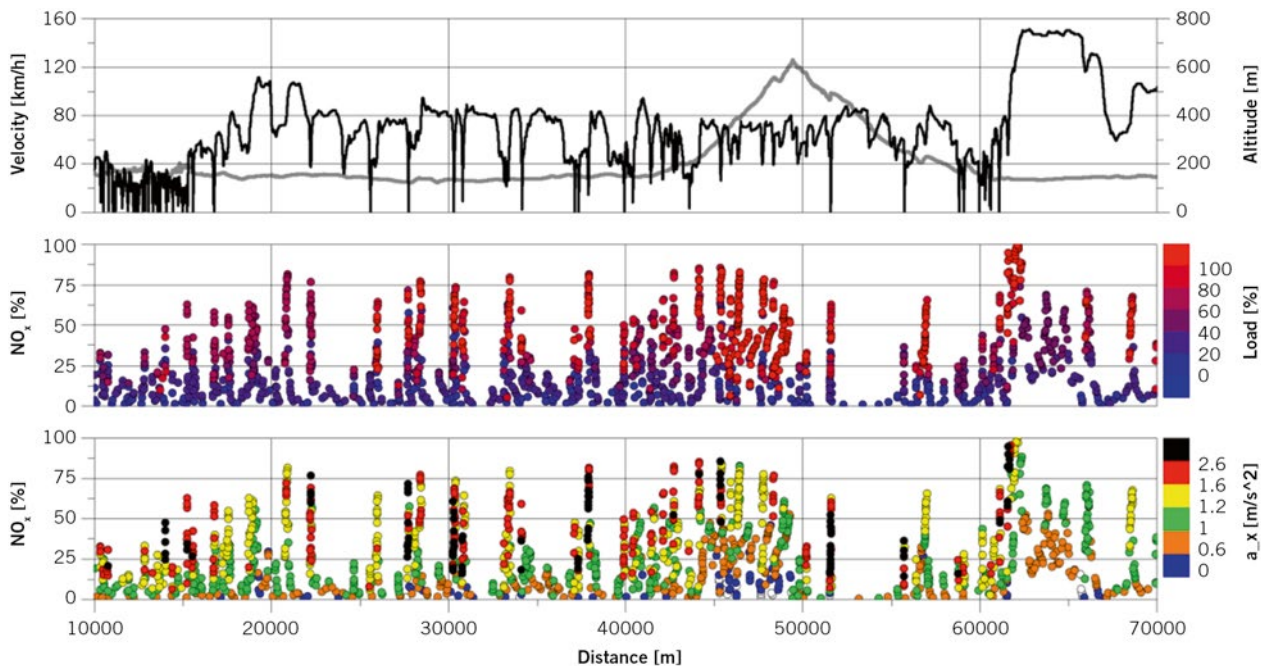


BILD 2 NO_x-Emissionen von realen Straßen- und Prüfstandfahrten (© APL)

Aus allen durchgeführten Untersuchungen werden bevorzugt die ungünstigen und grenzwertigen Messungen im Detail auf ungünstige Zustände hinsichtlich des Emissionsausstoßes analysiert, wobei durch den Übertrag auf die modellbasierte Prüfsumgebung Freiheitsgrade wie Fahrer, Umwelt und Verkehr entfallen und sich bei jeder beliebigen RDE-Fahrt eine weitgehend unbeeinflusste Grundbelastung auf den Gesamtemissionsausstoß ergibt. Realfahrten, die diese Standardbelastung zu häufig abrufen, führen ebenso zu einer Überschreitung der zulässigen Grenzwerte wie Messfahrten, die durch häufige Emissionsspitzen charakterisiert sind. Bei den durchgeführten Messfahrten handelt es sich dabei vermehrt um Beschleunigungsphasen beziehungsweise Zustände mit hoher Motorbelastung, die beispielsweise bei einem Diesel-Pkw maßgeblich die Strategie der Abgasrückführung (AGR) beeinflussen und in Abhängigkeit der Luftmodellgüte zunächst zu einer höheren Stickoxidemission führen können. Dies ist in **BILD 2** exemplarisch für einen Ausschnitt aus einer RDE-Fahrt dargestellt. Neben der Geschwindigkeit sind die normierten Stickoxidemissionen (NO_x) jeweils in Abhängigkeit von der Motorbelastung und von der Höhe der Fahrzeugbeschleunigung aufgetragen. Zu diesen Fahrmanövern kommen bei

jeder Messung Extremsituationen mit höchster Motorlast hinzu, die zu großen Emissionsspitzen führen und gesondert untersucht werden müssen.

Betrachtet man die Auswertung von repräsentativen RDE-Fahrten, **BILD 3**, so zeigen sich Fahr Situationen, die für eine Abnahmemessung unter Umständen weniger relevant sind, da sie außerhalb der Toleranzgrenzen liegen und somit den auszuwertenden Bereich verringern. Diese Herangehensweise stellt einen ersten Schritt einer mehrstufigen Klassierung von Realfahrten dar und erlaubt bei Bedarf eine Reduzierung der durchzuführenden Messumfänge für den Prüfstand und damit einer Prüflaufauffung auf Fahr Situationen mit vermehrten Emissionsausstoßen. Die Messfahrt RDE-N2 aus **BILD 3** repräsentiert das bei einer RDE-Messung auftretende Grundemissionsniveau relativ gut, da bewusst auf eine konservative Routenführung mit möglichst wenig Einfluss durch den erweiterten Parameterraum geachtet wurde. Auffallend ist auch, dass eine Gleichverteilung nach der Methode der CO₂-Mittelwertfenster nicht automatisch einer normalen Verteilung bei der Klassierung nach der normierten Radleistungsklasse entspricht. Dies ist durch das erhöhte Vorkommen der Radleistungsklasse 3 bei der Messfahrt RDE-N2 dargestellt, **BILD 3**.

Für den Übertrag von RDE-Anforderungen in die Prüfsumgebung müssen somit zuerst die vermehrt vorkommenden Betriebsbereiche gefunden werden. Diese bilden das Emissionsniveau, das bei einer RDE-Fahrt generell entsteht und dessen Höhe in erster Linie vom Fahrzeugtyp abhängt, **BILD 4**. Die RDE-typischen Zustände bilden den Emissionsanteil, der sich zusätzlich zum Grundniveau durch erweiterte Randbedingungen wie zum Beispiel einer höheren Motorbelastung ergibt und von Messfahrt zu Messfahrt variiert. Die Analysen von normierten RDE-Fahrten legen die Streckenanteile beziehungsweise Fahrmanöver offen, die den größten Einfluss auf die Höhe der Gesamtemissionen einer idealen Standardfahrt haben, **BILD 4**. Aus diesen Ergebnissen lässt sich als zweite Stufe für die Entwicklung ein RDE-Zyklus generieren, der die für die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte kritischen Zustände für das untersuchte Fahrzeug bei einer Fahrt mit einem standardisierten Fahrermodell beinhaltet und abprüft sowie eine Grundlage für die gezielte Ableitung von Maßnahmen gegen eine Grenzwertverletzung bildet. Diese Untersuchungen werden zunächst bevorzugt am Rollen- oder Antriebsstrangprüfstand durchgeführt.

Eine große Herausforderung liegt in der Beherrschung der untypischen Zu-

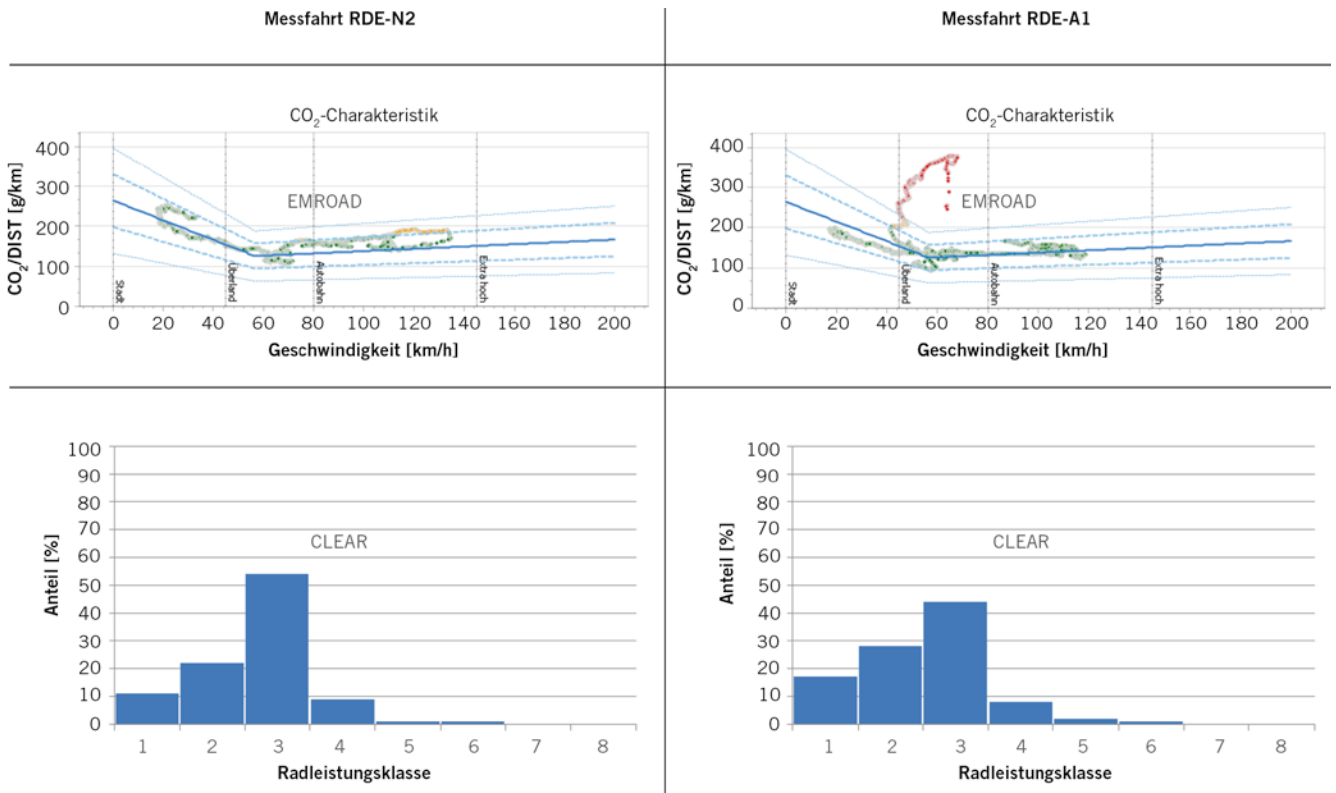


BILD 3 Bewertung von zwei Realfahrten nach der Methode der gleitenden Mittelwertfenster (MAW) und Gegenüberstellung mit der Bewertungsmethode nach den Radleistungsklassen (© APL)

stände, die das Emissionsniveau zusätzlich erhöhen und deren Vorkommen nicht vorhersagbar ist, **BILD 4**. Für die Entwicklung ist es deshalb von Vorteil, wenn zusätzlich die Emissionen des Motors für den ungünstigsten Fall abgeschätzt werden können. Dies ermöglicht, die erforderliche Höhe der Reserve zu bestimmen, um bei einer Messung in jedem Fall unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts zu bleiben. Die Abbildung dieser Worst-Case-Szenarien erfolgt durch Umwandlung der untypischen Zustände durch einen Algorithmus in Lastsprünge und Übertragung dieser Lastsprünge auf den Motorenprüfstand. Für die gezielte Übertragung der Realfahrten in eine modellbasierte Prüfumgebung werden die normierten Fahrsituationen jedoch zunächst in elementare Geschwindigkeitssprünge zerlegt. Das bedeutet, der in Schritt 2 generierte, geraffte und normierte Straßendauerlauf wird durch eine geeignete Methode in Rampen mit einer Start- und Endgeschwindigkeit überführt [7]. Die Umsetzung in der Simulation beziehungsweise in der modellbasierten Prüfumgebung erfolgt dabei durch das Anfahren defi-

nierter Zielgeschwindigkeiten mit konstanten Beschleunigungswerten. Für die Untersuchungen am Motorenprüfstand erfolgt aus der Simulation heraus eine Drehzahl-Alpha-Vorgabe, wodurch unter anderem eine Bewertung bezüglich der

Auswirkungen auf den Schadstoffausstoß ermöglicht wird. Anhand dieser elementaren Geschwindigkeitssprünge lassen sich unter Laborbedingungen mit entsprechender Messtechnik gezielt Maßnahmen für die Emissionsreduzierung

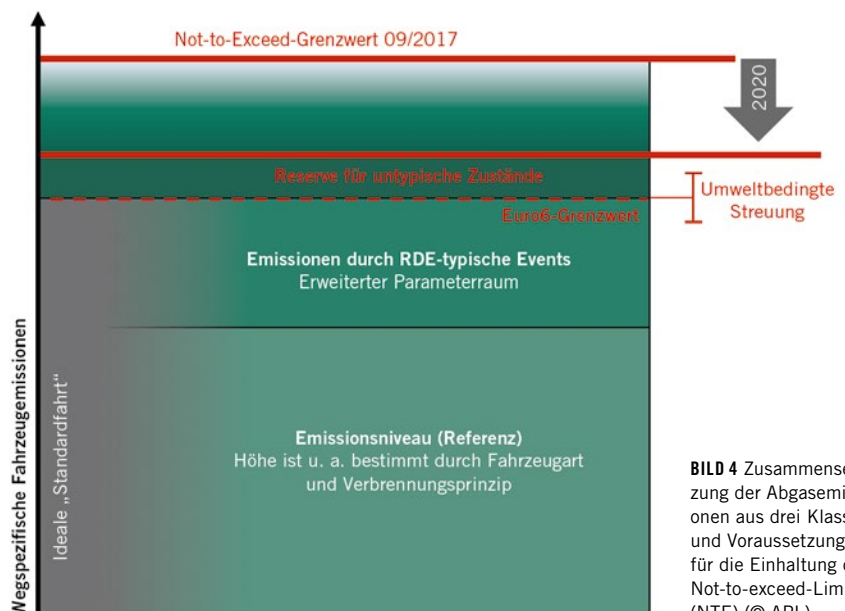


BILD 4 Zusammensetzung der Abgasemissionen aus drei Klassen und Voraussetzungen für die Einhaltung des Not-to-exceed-Limits (NTE) (© APL)

EMISSIONEN RDE

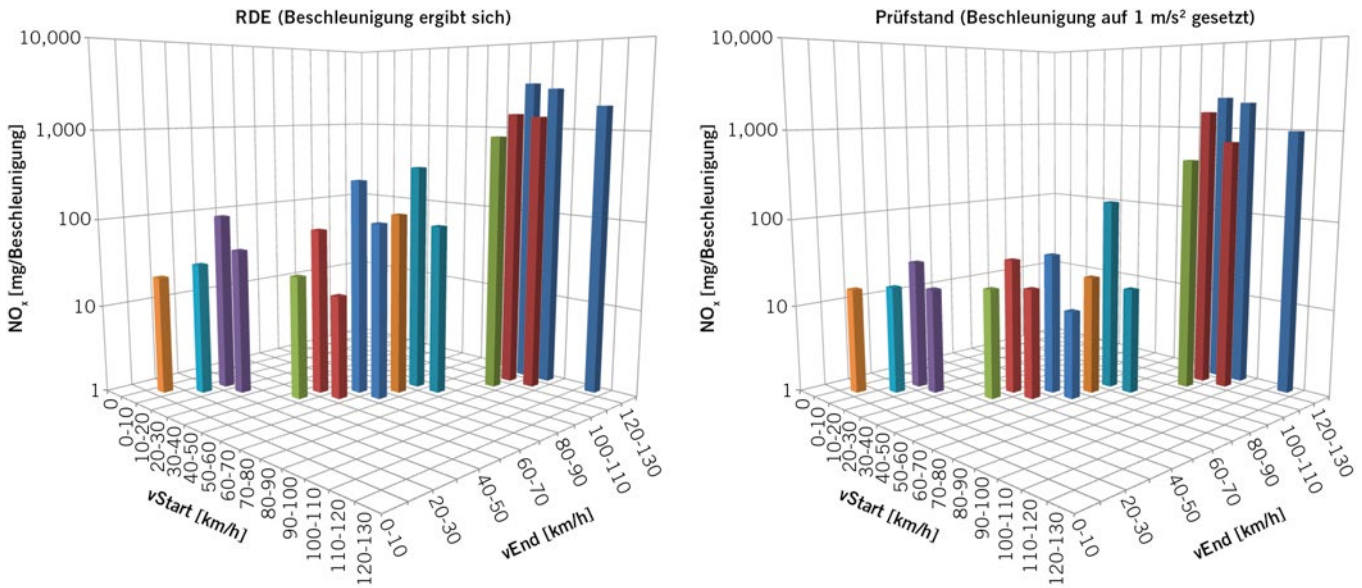


BILD 5 NO_x-Emission über elementare Geschwindigkeitssprünge von vStart nach vEnd bei realer und konstant gehaltener Beschleunigung (© APL)

durchführen, wie etwa Eingriffe ins Motormanagement oder Strategien zur Hybridisierung.

In **BILD 5** ist exemplarisch das Ergebnis einer Untersuchung der Geschwindigkeitssprünge (rechts) den Beschleunigungsvorgängen aus der Realfahrt (links)

gegenübergestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit ist nur eine Auswahl der Sprünge gezeigt. Es ist ersichtlich, dass hinsichtlich der absoluten Höhe der Emissionen die Dynamik erwartungsgemäß einen entscheidenden Einfluss darstellt, jedoch das Normieren der

Beschleunigung auf einen mittleren Beschleunigungswert am Prüfstand die Verhältnisse der NO_x-Emissionen der Realfahrt in Abhängigkeit der Beschleunigungslänge widerspiegeln. Dies zeigt, dass das Vorgehen für den Übertrag einer RDE-Fahrt auf eine modellbasierte

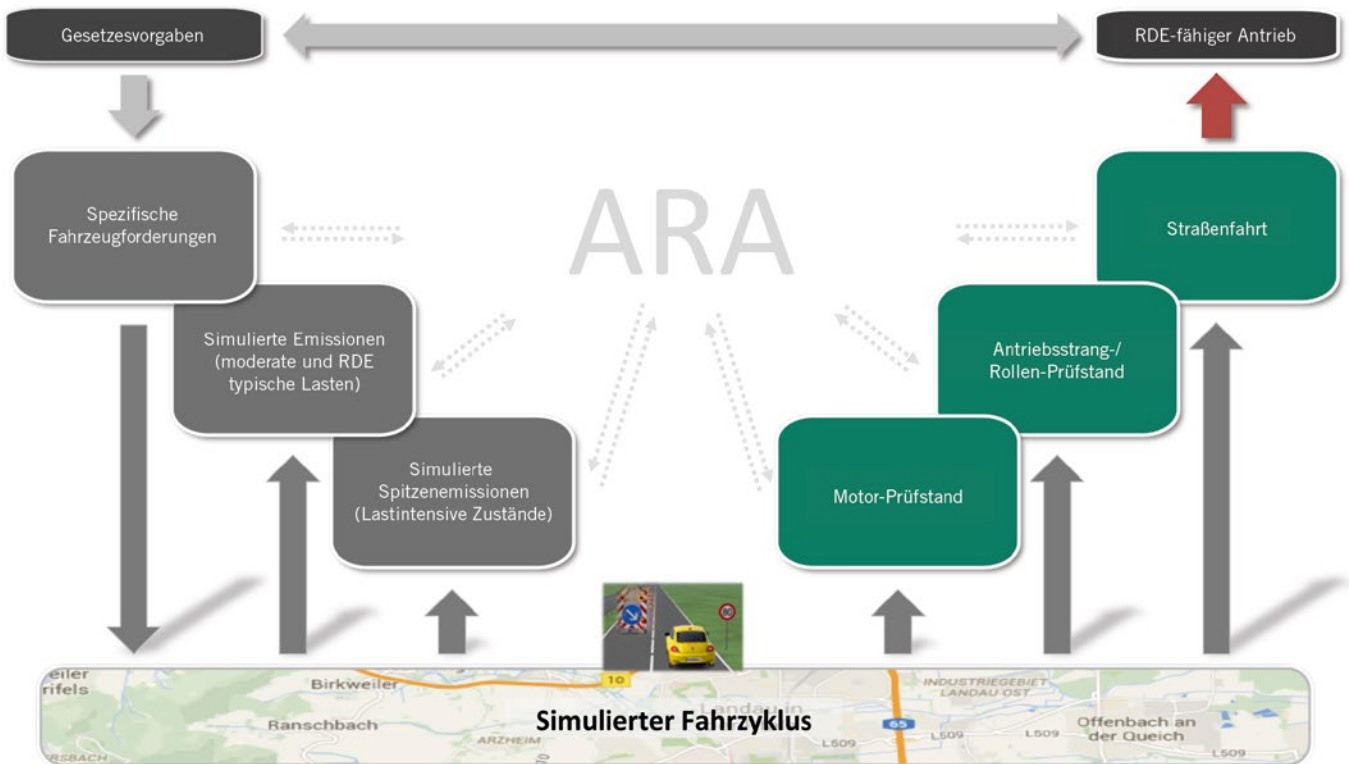


BILD 6 Simulation als zentrales Prüfstandvorgabewerkzeug in der APL-RDE-Auswertemethodik (ARA) (© APL)

Prüfstandumgebung unter anderem durch Reduktion auf elementare Geschwindigkeitssprünge zielführend ist, um bei der Optimierung des Antriebs den Aufwand erheblich zu reduzieren. Zur antriebspezifischen Optimierung des Emissionsverhaltens werden die gewonnenen Erkenntnisse wieder in eine hochdynamische Prüfstandumgebung übertragen und im gewohnten Entwicklerumfeld bearbeitet.

TRANSFER AUF DIE MODELLBASIERTE PRÜFSTANDUMGEBUNG

Zentrales Werkzeug für die Simulation stellt ein modellbasiertes Vorgabewerkzeug wie beispielsweise der IPG-CarMaker und eine eigens entwickelte Methodik zur Emissionsbewertung von RDE-Fahrten dar, **BILD 6**. Die Auswertemethodik greift die Thematik bereits früh in der Werkzeugkette auf, indem Messfahrten sowohl auf der Straße als auch auf dem Prüfstand hinsichtlich ihrer gesetzlichen Konformität bewertet werden können. Grenzwertverletzungen können dadurch schnell lokalisiert und bei der Übertragung in die modellbasierte Prüfsumgebung berücksichtigt werden. Bei der weiteren Betrachtung auf dem Prüfstand dient die Methodik zur schnellen Bewertung von getroffenen Maßnahmen, indem jederzeit innerhalb der Werkzeugkette und somit bereits früh in der Entwicklung des Antriebs Abschätzungen und Untersuchungen über die Effizienz und RDE-Konformität aufgezeigt werden. Der IPG-CarMaker dient bei den Untersuchungen unter anderem als Werkzeug für die Erstellung der Vorgabepprofile. Dabei kann auch zu jeder Zeit im Entwicklungsvorgang eine simulierte RDE-Fahrt auf dem Motoren-, Antriebsstrang- oder Rollenprüfstand erfolgen, um gegebenenfalls weitere Optimierungsschleifen zu durchlaufen. Die Anzahl an Messfahrten auf der Straße kann somit entscheidend reduziert werden und dient nur noch zur Validierung des simulierten Fahrversuchs.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine zentrale Herausforderung beim Übertrag der RDE-Anforderungen in den Entwicklungsprozess ist die Beherrschung des Aufwands und des Umfangs an durchzuführenden Untersuchungen.

Der vorgestellte Ansatz stellt dieses Ziel in den Mittelpunkt, indem Referenzzyklen für Prüfstanduntersuchungen abgeleitet werden. Dabei wird nicht eine allgemeingültige Vorgabe angestrebt, sondern vielmehr eine Methodik, die zentrale Parameter in der Simulation berücksichtigt.

Dieser Referenzansatz lässt einen Vergleich zwischen den untersuchten Antrieben hinsichtlich ihres Emissionsniveaus bei gleichzeitig freier Wahl der geeigneten Prüfsumgebung zu. So können aus der Simulation Vorgaben für applikative Aufgaben am Motorprüfstand ebenso abgeleitet und erstellt werden, wie auch Gesamtantriebsbetrachtungen an Rollen- oder Antriebsstrangprüfständen. Die übergeordnete Methodik stellt dabei sicher, dass RDE-spezifische Punkte bearbeitet werden, sodass die Verbesserungen auf Aggregatebene auch tatsächlich in das Zielfahrzeug übertragen und dort unter realen Fahrbedingungen nachweisbar werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Hadler, J.: Die Forschungs- und Förderungslandschaft sollte paritätischer sein. In: MTZ 76 (2015), Nr.1, S. 22-25
- [2] Hadler, J.; Lensch-Franzen, C.; Gohl, M.; Guhr, C.: Methoden für die Entwicklung eines RDE-fähigen Antriebs. In: MTZ 78 (2015), Nr. 7-8, S. 58-63
- [3] May, J.; Bosteels, D.; Favre, C.: An Assessment of Emissions from Light-Duty Vehicles using PEMS and Chassis Dynamometer Testing. In: SAE International Journal of Engines 7 (2014), Nr. 3, S. 1326-1335, doi: 10.4271/2014-01-1581
- [4] Hofacker, A.: Abgasnorm und Wirklichkeit – Eine Annäherung. In: MTZ 76 (2015), Nr. 2, S. 8-13
- [5] Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)
- [6] Maschmeyer, H.; Kluin, M; Beidl, C.: Real Driving Emissions – Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung. In: MTZ 76 (2015), Nr. 2, S. 36-41
- [7] Friedmann, M.; Kollmeier, H.-P.; Gindele, J.; Schmid, J.: Synthetische Fahrzyklen im Triebstrangprobungsprozess. In: ATZ 117 (2015), Nr. 6, S. 70-75



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/ATZextra

