

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)  
Rintheimer Querallee 2  
76131 Karlsruhe



# **Untersuchung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung im transienten Betrieb an einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung**

## **Abschlussbericht**

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

**Az. 30369/02**

eingereicht von

Alexander Heinz, M.Sc. & Dipl.-Ing. Christian Disch & Dr.-Ing. Heiko Kubach

Karlsruhe, Oktober 2017

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30369/02</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>121.120 EUR</b>
----	-----------------	---------	-------------	-------------	--------------------

**Antragstitel**      **Untersuchung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung im transienten Betrieb an einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung**

**Stichworte**      Energie, Motor

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>22 Monate</b>	<b>16.03.2015</b>	<b>31.12.2016</b>	<b>2</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Karlsruher Institut für Technologie Institut für Kolbenmaschinen Rintheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe	Tel	0721 608 42433
		Fax	0721 608 48578
		Projektleitung	
		Dr.-Ing. Heiko Kubach	
		Bearbeiter	
		Dipl.-Ing. Christian Disch	
		Alexander Heinz, MSc	

**Kooperationspartner**      La Vision GmbH  
Anna-Vandenhoeck-Ring 19  
D-37081 Göttingen

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Diese Forschungsarbeit verfolgt das Ziel, emissionskritische Phasen des realen Fahrverhaltens bei Einsatz eines Verbrennungsmotors zu identifizieren und die zugrundeliegenden Mechanismen im Detail zu untersuchen. Dadurch können Teilprozesse gezielt optimiert und Emissionen und Kraftstoffverbrauch im transienten Betrieb gesenkt werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Um transiente emissionskritische Betriebsphasen ausgehend von der Betrachtung des gesamten Fahrprofils bis hin zur Analyse individueller Verbrennungszyklen zu untersuchen, bedarf es einer Entwicklungsmethodik in der bereits Simulationsumfänge in der experimentellen Prüfstands Umgebung integriert sind und somit das Testen im virtuellen Fahrversuch möglich ist. Für Untersuchungen mit einem realen Verbrennungsmotor ist dies der sogenannte Engine-in-the-Loop-Ansatz. Dieser Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass der reale Verbrennungsmotor in einer virtuellen Umgebung, bestehend aus Restfahrzeug, Fahrercharakteristik und Fahrprofil betrieben wird. Die in diesem Vorhaben entwickelte Methodik beschreibt in Ihrem Ansatz eine Top-Down-Vorgehensweise, in der eine Analyse des Gesamtfahrprofils die Ausgangsbasis bildet. Auf dieser Grundlage werden dann die emissionskritischen Fahrmanöver identifiziert und in den beiden folgenden Detaillierungsstufen zeitlich hochaufgelöster analysiert. Die Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen ausgehend vom Fahrzyklus bis hin zum Verbrennungszyklus finden in ein und derselben Entwicklungsumgebung statt. Die experimentell ermittelten Daten werden zeitsynchron zur Simulation im Echtzeitsystem verarbeitet. Im virtuellen Gesamtfahrzeug können auf diese Weise die Emissionen des Motors in verschiedenen Fahrzeugen, auf unterschiedlichen Strecken und mit wechselnden Betriebsstrategien iterativ untersucht werden. Die Methode bietet insbesondere für Untersuchungen von Hybridantriebskonzepten den Vorteil, dass diese in der Simulation (Matlab/Simulink) abgebildet werden können. Somit können die Emissionen und der Verbrauch des virtuell elektrifizierten Gesamtfahrzeugs am Motorprüfstand analysiert werden, ohne dass ein aufwändiger Fahrzeugprototyp erforderlich ist.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die vorgestellten Versuchsergebnisse der ersten Projektphase (DBU AZ:30369/01) zeigen das Potential, elementare Prozesse des Transientbetriebs mit hoher zeitlicher Auflösung an einem Engine-in-the-Loop Prüfstand zu untersuchen. Der kombinierte Einsatz der verschiedenen Sondermesstechniken ermöglicht eine durchgängige Untersuchung der emissionskritischen Zustände und die Identifikation der relevanten Einflussgrößen, angefangen vom Fahrzyklus bis hin zum individuellen Verbrennungszyklus. Auf diese Weise konnten Parameteränderungen und deren Auswirkungen auf das reale Fahrverhalten frühzeitig im Gesamtfahrzeugkontext ermittelt werden (Applikationsstrategie). Im Hinblick auf die zunehmende Elektrifizierung im Antriebsstrang bietet dieser Ansatz zudem die Möglichkeit, die Abstimmung der verschiedenen Energiequellen effizient zu koordinieren (Betriebsstrategie).

Während des Projektes wurde der Einsatz diverser Sondermesstechnik und deren Nutzen für die Untersuchung des transienten Motorbetriebs untersucht. Es gelang, die optische Untersuchung auf Einzelzyklenebene mit der Emissionsmessung des Motors zu verknüpfen umso emissionskritische Einzelzyklen zu identifizieren und die Emissionsentstehung zu erklären. Eine weitere Besonderheit stellt den Einsatz der Infrarotabsorptionsspektroskopie zur Ermittlung des Verbrennungsluftverhältnisses dar. Mit dem ICOS-Sensor der Firma LaVision konnte die Gemischbildung auch für Einzelzyklen im Detail untersucht werden.

Für die Untersuchung des Verbrennungsmotors im Hybridkontext wurde ein eigener Fahrzyklus unter Ausnutzung der Möglichkeiten des eIL-Prüfstandes entwickelt. Anhand dieses Prüflaufs wurden dann Maßnahmen zur Vermeidung von Partikelemissionen unter Ausnutzung der Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors untersucht. Schon mit einer einfachen Regelstrategie zur Vermeidung von starken Lastsprüngen konnten so Partikelemissionen reduziert werden.

Mit der entwickelten Untersuchungsmethodik wurden alternative Kraftstoffe mit erhöhtem Ethanolgehalt als Ressourcenstrategie hinsichtlich der Partikelemissionen untersucht. In den generischen Prüfläufen zeigten sich Reduktionen der Partikelemissionen durch eine Erhöhung des Ethanolgehalts.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

[1] DISCH, C., PFEIL, J., KUBACH, H., KOCH, T. et al., Experimental Investigations of a DISI Engine in Transient Operation with Regard to Particle and Gaseous Engine-out Emissions, SAE Int. J. Engines 9(1):262-278, 2015

[2] DISCH, C., KUBACH, H., PFEIL, J., KOCH, T., SPICHER, U., THIELE, O., DONN, C. und SCHYR, C.: Zyklus aufgelöste Verbrennungsprozessanalyse des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung. (English: Cycle-resolved combustion diagnostics of a direct injection gasoline engine in transient operation) 11. Internationales Symposium Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, Juli 2014

[3] DISCH, C., KOCH, T., SPICHER, U. und DONN, C.: Engine-in-the-Loop als Entwicklungswerkzeug für die Emissionsoptimierung im Hybridkontext. MTZ Motortech Z (2014) 75: 70.

[4] DISCH, C., KOCH, T., SPICHER, U. und DONN, C.: Engine-in-the-Loop as a development tool for emission optimisation in the hybrid context. MTZ Worldw (2014) 75: 40.

[5] DISCH, C., THIELE, O., KUBACH, H., PFEIL, J., KOCH, T. und SPICHER, U.: Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses im Transientbetrieb eines Ottomotors mit Direkteinspritzung. 7. MTZ-Fachtagung – Ladungswechsel im Verbrennungsmotor 2014, Stuttgart, 22. und 23. Oktober 2014

## **Fazit**

Die Ziele des Projekts konnten erreicht werden. Für die Untersuchung transienter Vorgänge wurde eine Methodik entwickelt, die spezialisierte Sondermesstechnik aus dem Forschungsumfeld für die Untersuchung am Vollmotor im eIL-Ansatz nutzbar macht. Diese Konzentration von Messtechnik auf den Vollmotorkontext wurde bisher nur an Einzylindermotoren verwendet. Hierdurch wird es möglich vorher nicht in diesem Umfang zur Verfügung stehende Informationen zur Emissionsentstehung an einem Vollmotor für die Applikation nutzbar zu machen und damit bereits in den Rohemissionen kritische Schadstoffe zu vermeiden. Der Einsatz der Methodik für die Untersuchungen bezüglich Applikations-, Betriebs- und Ressourcenstrategie war erfolgreich. In der Diskussion um einen „emissionsoptimierten“ Fahrzeugantrieb wird letztlich erst die Summe bzw. die Kombination aller drei Strategien das maximale Potenzial zur Ressourcen- und Umweltschonung ausschöpfen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Projektkennblatt .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Vorüberlegung und Anforderungen .....</b>	<b>6</b>
3.1 Entwicklungsmethodik zur Ermittlung der Zusammenhänge des transienten Motorbetriebs.....	6
3.2 Architektur der experimentellen Versuchsumgebung.....	6
3.3 Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik zur Untersuchung des transienten Motorbetriebs.....	7
3.4 Optische Indizierung mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie .....	8
<b>4 Versuchsvorbereitung und Definition der Prüfläufe .....</b>	<b>10</b>
4.1 Untersuchung realer Fahrprofile .....	10
4.2 Untersuchung des transienten Motorbetriebs – elementare transiente Prozesse ..	11
4.3 Virtueller Fahrversuch – Engine-in-the-Loop Transient Zyklus .....	12
4.4 Versuchsvorbereitung und -auswertung .....	13
4.5 Auswertung der Highspeed Aufnahmen bezüglich Partikelquellen .....	13
<b>5 Versuchsergebnisse .....</b>	<b>15</b>
5.1 Partikelemissionen .....	15
5.2 Messung der zyklus aufgelösten gasförmigen Rohemissionen.....	18
5.3 Messung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses .....	19
<b>6 Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse – Umweltnutzen.....</b>	<b>24</b>
6.1 Anwendungsbeispiel Applikationsstrategie.....	25
6.1.1 Variation des Einspritzzeitpunktes.....	25
6.1.2 Variation des Kraftstoffeinspritzdruckes.....	27
6.2 Anwendungsbeispiel Betriebsstrategie .....	30
6.3 Anwendungsbeispiel alternativer Kraftstoff.....	36
<b>7 Druckverlaufsanalyse .....</b>	<b>40</b>
<b>8 Fazit.....</b>	<b>41</b>
<b>Projektbezogene Publikationen .....</b>	<b>43</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>44</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zurückgelegte Personenkilometer in Deutschland [VDA2014] .....	3
Abbildung 2: Kategorisierung der PKW-Weglängen [BMVI2014] .....	3
Abbildung 3: Auszug aus einem realen Fahrprofil – Beschleunigungsvorgang .....	10
Abbildung 4: Beschreibung der aufeinanderfolgenden Einzelphasen eines Lastsprungs.....	11
Abbildung 5: Beschreibung des Engine-in-the-Loop Transient Zyklus (ET-Zyklus) [DIS2017] .....	12
Abbildung 6: Beschreibung der Ablaufsequenzen eines Lastsprungprüflaufs .....	13
Abbildung 7 Ermittlung der projizierten Fläche aus dem Rußeigenleuchten für ein Einzelarbeitsspiel <sup>Ⓐ</sup> und in Form der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für zehn Arbeitsspiele <sup>Ⓑ</sup> [DIS2017] .....	14
Abbildung 8: Zeitlicher Fahrpedalverlauf für vier verschiedener Lastsprungversuche (Tip-in) .....	15
Abbildung 9: Mittlere Partikelanzahlkonzentration für vier verschiedene Lastsprungmanöver .....	16
Abbildung 10: Mittelwertbetrachtung für die Partikelemissionen verschiedener Lastsprünge (Tip-in).....	17
Abbildung 11: Differenz der verschiedenen Lastsprungversuche mit Bezug auf das Partikelgrößenspektrum .....	18
Abbildung 12: Messung der gasförmigen Rohemissionen und der eingespritzten Kraftstoffmasse von Zylinder 6 .....	19
Abbildung 13: Vergleich des gemittelten lokalen Brennraumluftverhältnisses für die ersten 40 Zyklen der vier verschiedenen Lastsprungvarianten.....	20
Abbildung 14: Lokales Brennraumluftverhältnis als Mittelwert und als Einzelzyklusanalyse für zwei verschiedene Lastsprungvarianten.....	21
Abbildung 15: Verlauf des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für die ersten beiden Arbeitsspiele bei einem SOI = 340°KW v. ZOT.....	22
Abbildung 16: Detektion des Mie-Streulicht-Signals zur Visualisierung der Kraftstoffeinspritzung und Aufzeichnung des Rußeigenleuchtens für zwei aufeinanderfolgende Arbeitsspiele aus dem Versuch mit einem SOI = 340°KW v. ZOT .....	23
Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse optischer Messtechnik und der Partikelanzahlkonzentration.....	24
Abbildung 18: Vergleich des lokalen Brennraumluftverhältnisses für das dritte Arbeitsspiel (AS 3) im Lastsprungversuch 2 unter Variation des Einspritztimings (SOI).....	26
Abbildung 19: Partikelgrößenverteilung (rechts)und Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Rußstrahlung im Brennraum (links) für SOI Variation .....	27

Abbildung 20: Einfluss eines erhöhten Kraftstoff-Einspritzdruckes auf die Partikelanzahlkonzentration während eines Lastsprungs als Mittelwert aus zehn Wiederholungen .....	28
Abbildung 21: Einfluss des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf das lokale Brennraumluftverhältnis im fünften Arbeitsspiel (AS 5) unter Variation des Einspritztimings (SOI).....	29
Abbildung 22: Oben: Partikelemissionen in Abhängigkeit des SOI für die Lastsprungvariante 2, gemessen am Auslassventil des Einzelzylinders (Zylinder 6). Unten: Beispielaufnahmen zur innermotorischen Entwicklung des Rußeigenleuchtens für verschiedene SOI. ....	30
Abbildung 23: Abkühlung der Brennraumoberfläche (Zylinderkopf) im Schubbetrieb, gemessen mit einem oberflächenbündigen NiCrNi-Mantelthermoelement.....	31
Abbildung 24: Einfluss der Momentenformung auf die Emissionen während des Lastsprungs .....	32
Abbildung 25: Schematisches Ablaufdiagramm zur Beschreibung der regelbasierten Betriebsstrategie für die Momentenverlaufsformung in Beschleunigungsphasen [DIS2017]	34
Abbildung 26: Phlegmatisierung während der Slalomfahrt. Vergleich der Fahrpedalverläufe aus der regelbasierten Betriebsstrategie ①, der Drehmomentverläufe ②, der CO-Rohemissionen (Linie 1, nach Auslassventil) ③, der NO-Rohemissionen (Linie 1) ④, der Partikelrohmissionen ⑤ + ⑥ und der Fahrzeuggeschwindigkeit ⑦ [DIS2017] .....	35
Abbildung 27: Gesamtpartikelanzahlkonzentrationen während Lastsprüngen für E25 (links) und E50 (rechts) Lastsprungvariante 2 bei 25,5% Fahrpedal und 150 bar Raildruck .....	36
Abbildung 28: Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Rußstrahlung über je 10 Zyklen bei E50 Kraftstoff und 150 bar Raildruck. ....	37
Abbildung 29: Gesamtpartikelanzahlkonzentrationen während Lastsprüngen für Lastsprungvariante 2 mit 25,5% Fahrpedal, 150 bar Raildruck und Einspritzzeitpunkt 320 °KW v.ZOT .....	38
Abbildung 30: Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Rußstrahlung für die untersuchten Kraftstoffe im Vergleich (Lastsprung 0-25% Fahrpedal SOI320 und 150 bar Raildruck) .....	39
Abbildung 31: Temperaturverläufe des 2-Zonen-Modells der TPA im Vergleich mit optischer Sondermesstechnik (Zwei-Farben-Pyrometrie (2FP) und Infrarotabsorptionsspektroskopie (IAS)) [DIS2017] .....	40

## **Abkürzungsverzeichnis**

<b>2FP</b>	Zwei-Farben-Pyrometrie, Zwei-Farben-Methode
<b>CLD</b>	Chemilumineszenz Detektor
<b>DVA</b>	Druckverlaufsanalyse
<b>EiL</b>	Engine-in-the-Loop
<b>ET</b>	Engine-in-the-Loop Transient Zyklus
<b>FID</b>	Flammenionisationsdetektor
<b>NDIR</b>	Nichtdispersive Infrarotspektroskopie
<b>NVH</b>	Noise Vibration Harshness
<b>ICOS</b>	Internal Combustion Optical Sensor der Firma LaVision
<b>IAS</b>	Infrarotabsorptionsspektroskopie.
<b>KW</b>	Kurbelwinkel
<b>SOI</b>	Start of Injection, Einspritzbeginn
<b>TPA</b>	engl. Three Pressure Analysis
<b>ZOT</b>	Zünd-OT (oberer Totpunkt, zwischen Kompressions- und Arbeitstakt)

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde in zwei Projektphasen das Emissionsverhalten eines Ottomotors mit strahlgeführter Direkteinspritzung untersucht. Hierfür wurden zunächst in Phase 1 die versuchstechnischen Rahmenbedingungen hergestellt. Im Rahmen dieser Vorbereitung ergaben sich neuartige Ansätze zur Untersuchung des transienten Motorbetriebs im Allgemeinen und der Untersuchung fundamentaler Betriebsituationen im Speziellen. Dies bezieht sich unter anderem auf den Einsatz von Sondermesstechnik aus den Bereichen Abgasanalyse und optischer Messtechnik. Die Übertragung von üblicherweise am Forschungseinzylinder angewendeten Untersuchungsmethoden auf den Gesamtmotor und dessen Betrieb in einem Engine-in-the-Loop (EiL) Ansatz für die Untersuchung synthetischer und realer Fahrprofile wurden im Rahmen des Projekts durchgeführt.

Mithilfe der entwickelten Prüfläufe wurde dann in Phase 2 das Betriebs- und Emissionsverhalten des Versuchsträgers in transienten Phasen untersucht. Mithilfe bildgebender Verfahren konnte der Zusammenhang zwischen verschiedenen Einspritzzeitpunkten, diffusiver Verbrennung als Rußquelle und Partikelanzahlkonzentration in den Rohemissionen des Versuchsträgers nachgewiesen werden. Hierzu wurden Variationen der Einspritzparameter Zeitpunkt und Einspritzdruck durchgeführt.

Im Rahmen einer Ressourcenstrategie wurde der Einsatz von Kraftstoffen mit hohem Ethanolgehalt als regenerative Komponente untersucht. Ethanolgehalte von 25 bis 75 Vol.-% kamen zum Einsatz. Das Potential dieser Kraftstoffe bezüglich geringerer Partikelemissionen konnte aufgezeigt werden. Neben dem Vorteil der CO<sub>2</sub>-Emissionsveringerung bei der Gewinnung von Ethanol aus regenerativen Quellen, zeigt sich in Lastsprüngen auch eine Reduktion von Diffusionsverbrennung, so dass sich durch den Einsatz von hohen Ethanolanteilen auch der Partikelausstoß reduzieren lässt.

In einer Betriebsstrategie wurde der Motor am EiL-Prüfstand mit einer virtuellen Hybridisierung versehen. Dadurch ließ sich das Potential für die Emissionsverringerung in hochtransienten Phasen aufzeigen. Bei schnellen Laständerungen wird der Verbrennungsmotor hierbei von einem elektrischen Antrieb unterstützt, um emissionskritische Zustände zu vermeiden. Hierdurch konnte selbst bei geringer Hybridisierung mit kleinen Batterien ein signifikantes Potenzial zur Partikelemissionsreduktion aufgezeigt werden.

Die entwickelte Untersuchungsmethodik – die Konzentration von Sondermesstechnik am Vollmotor in Kombination mit transienten Prüfläufen am EiL-Prüfstand inklusive simuliertem Restfahrzeug mit hybridem Antriebsstrang – leistet einen Beitrag für die gezielte Untersuchung und Optimierung der Betriebsstrategie von Verbrennungsmotoren hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens. In Zukunft sind hierdurch bereits in frühen Entwicklungsphasen emissionskritische Fahrsituationen identifizierbar und Vermeidungsstrategien entwickelbar. Insbesondere hinsichtlich der Partikelemissionen lässt sich so der Umwelteinfluss von Motoren weiter reduzieren.

Eine Besonderheit stellt der Einsatz des Internal Combustion Optical Sensors (ICOS, Fa. LaVision) dar. Mithilfe von IR-Absorption kann die Gemischbildung bezüglich des Luftverhältnisses  $\lambda$  beurteilt werden. Dieses Verfahren wurde für die Untersuchung und Beurteilung einzelner Verbrennungszyklen herangezogen.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden umfangreich auf Fachtagungen vorgestellt und in Fachzeitschriften sowie in anderer Form veröffentlicht. [DIS2014a] [DIS2014b] [DIS2014c] [DIS2014d] [DIS2014e] [DIS2015]. Dadurch werden die Methodik sowie die konkreten Untersuchungsergebnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich. Die Ergebnisse des Projekts flossen zusätzlich in eine veröffentlichte Dissertation ein [DIS2017].

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Forschungsprojektes unter AZ 30369 und bei der LaVision GmbH für die gewährte Unterstützung.

## 2 Einleitung

Die Individualmobilität ist ein globaler Wirtschaftsfaktor mit großem Einfluss. Unabhängige Studien haben gezeigt, dass sich Volkswirtschaften unabhängig ihrer Größe im besonderen Maße in Abhängigkeit der Individualmobilität entwickeln. Erfolgreiche Volkswirtschaften zeichnen sich durch besonders hohe Aktivität im Sektor des Individualverkehrs aus.

Es zeichnet sich ab, dass sich in Deutschland die gefahrenen Personenkilometer von heute ca. 970 Mrd. bis ins Jahr 2025 auf über 1.000 Mrd. erhöhen werden [VDA2014].

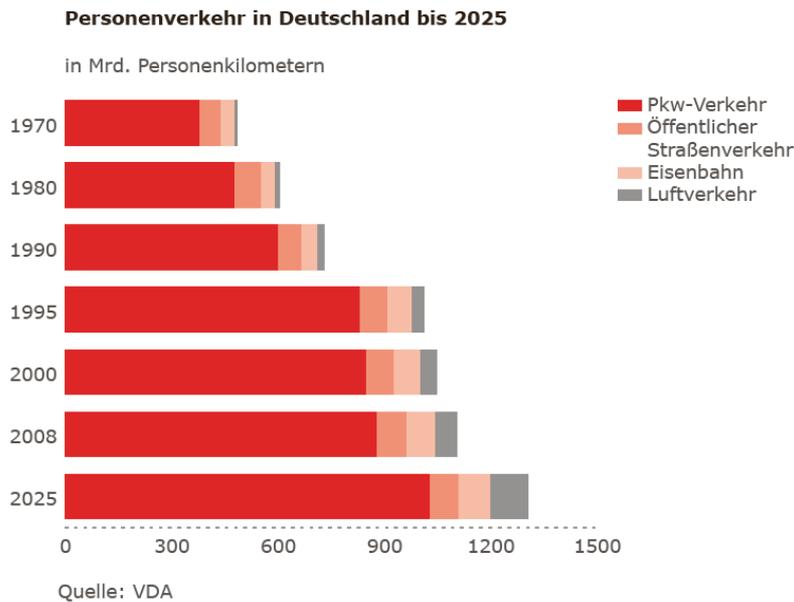


Abbildung 1: Zurückgelegte Personenkilometer in Deutschland [VDA2014]

Dabei zeigt sich allerdings, dass der größte Anteil der Einzelfahrten im Kurzstreckenbereich unter 25 km Länge zurückgelegt wird. Bei diesen Fahrten ist von einem hohen innerstädtischen Anteil auszugehen. Dies bedeutet, dass der Motor aufgrund der häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen in instationären Zuständen betrieben wird [BMVI2014].

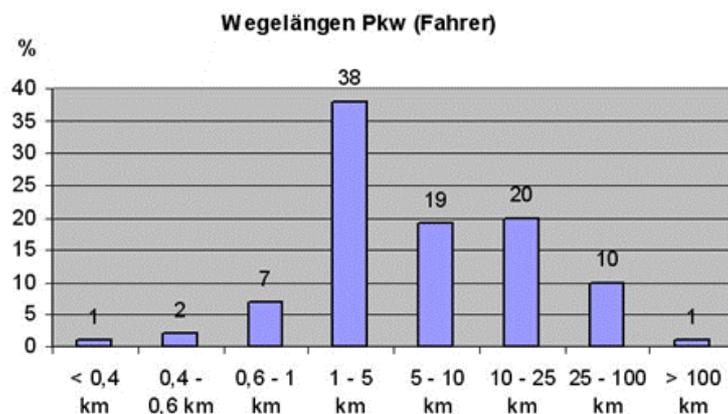


Abbildung 2: Kategorisierung der PKW-Weglängen [BMVI2014]

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

Bei solchen stark instationär geprägten Fahrten treten tendenziell deutlich höhere Emissionswerte und Kraftstoffverbräuche auf als bei entsprechenden Konstantfahrten. Dies liegt zum einen an der Vorgehensweise bei der Applikation von Motorparametern zum anderen auch an der Orientierung an gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzyklen. Gerade der momentan gültige NEFZ weist sehr moderate Gradienten bei Beschleunigungsvorgängen auf, die nicht die durchschnittliche reale Kundenfahrweise abbilden. Folglich sind Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Alltagsbetrieb meist deutlich höher als im Zertifizierungszyklus. Dieser Tatsache soll zukünftig mit der Einführung neuer Fahrzyklen wie beispielsweise dem WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) begegnet werden, die sich näher an realen Fahrzuständen bewegen. Eine Optimierung der Motorapplikationsparameter im hochtransienten Betrieb wird daher kurzfristig an Bedeutung gewinnen. Ein detailliertes Verständnis der tatsächlichen Vorgänge im Zylinder während dieses Betriebs wird künftig helfen oder sogar unabdingbar sein, um strenge zukünftige Grenzwerte einhalten zu können.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffbildung an einem modernen Ottomotor mit strahlgeführter Benzin-Direkteinspritzung in ausgewählten transienten Betriebszuständen zu untersuchen. Mittels Hoch- und Niederdruckindizierung, schneller Abgasanalyse, optischer Messtechnik und „shot-to-shot“-Kraftstoffmessung werden die Zustände im Brennraum und die Schadstoffzusammensetzung im Abgas kurbelwinkel- bzw. zyklus aufgelöst erfasst und analysiert. Daraus werden innermotorische Maßnahmen abgeleitet, mit denen sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen gezielt reduziert werden können.

Auf Basis der beschriebenen Situation und der definierten Zielsetzung lässt sich die Aufgabenstellung wie folgt ableiten. Ausgangspunkt des Projektes ist die strategische Implementierung einer Methodik, die es erlaubt, das reale Fahrverhalten möglichst detailliert zu untersuchen und abzubilden. Dazu wird der Motor zunächst in einer Engine-in-the-Loop-Prüfstandsumgebung aufgebaut, die transientes Fahrverhalten nachbilden kann. Das Verhalten des Gesamtfahrzeuges, die Fahrercharakteristik und die Fahrstrecke kann dabei in der Simulation abgebildet werden. Der Motor verhält sich dann unter Laborbedingungen so, wie er sich auch im entsprechenden Fahrzeug auf der Straße verhalten würde. Damit ist eine hohe Reproduzierbarkeit bei sehr guter messtechnischer Zugänglichkeit gegeben. Diese Bedingungen sind bei Realfahrten auf der Straße nicht gegeben.

Der Motor ist in der Prüfstandsumgebung und mit der Messtechnik in Betrieb zu nehmen. In einer Grundvermessung wird ein Basisdatensatz als Referenz generiert. Der Einsatz der Sondermesstechnik wird erprobt und bewertet. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die hochtransiente Betriebsweise dar. In kürzester Zeit ändern sich sehr viele Prozessgrößen gleichzeitig, weshalb sämtliche relevanten Messwerte mit ausreichend hoher Messfrequenz aufgenommen werden müssen. Die erhaltenen Messwertdateien aus unterschiedlichen Systemen müssen zeitlich exakt synchronisiert werden.

Um mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse Prozessoptimierungen implementieren und testen zu können, ist es notwendig, in Echtzeit auf die Applikationsparameter zugreifen und diese ändern zu können, um so beispielsweise auf Messwerten basierend und modellgestützt Motorparameter Vorsteuern zu können. Eine entsprechende Prüfstandsperipherie um die Motorsteuerung ist aufzubauen.

Verschiedene selbst definierte Fahrzyklen müssen am Prüfstand vermessen werden. Dabei werden transiente Manöver identifiziert, die maßgeblich zur Emissionsbildung beitragen.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

Solche Manöver können beispielsweise Lastwechsel, Tip-in oder Schaltvorgänge sein. Um möglichst allgemeingültige Aussagen zu erhalten, ist es sinnvoll, zunächst nur die ausgewählten standardisierten Manöver (elementare transiente Prozesse) zu betrachten und nicht den gesamten Fahrzyklus. Diese Teilprozesse werden mit den zur Verfügung stehenden Messtechniken detailliert analysiert. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera werden Gemischbildungsprozesse sowie die Rußbildung sichtbar gemacht. Die Erkenntnisse aus dem Brennraum werden mit den sehr hochfrequent gemessenen Abgaswerten vor und auch nach Turbolader korreliert.

Die gewonnenen Erkenntnisse über Zusammenhänge von Vorgängen im Zylinder und den im Abgastrakt gemessenen Emissionen dienen als Grundlage für Abhilfemaßnahmen zur Emissionsvermeidung. Diese Abhilfemaßnahmen sind am Prüfstand zu implementieren und auf deren Wirksamkeit zu testen.

Viele dieser Maßnahmen zeigen motorspezifische Wirksamkeit, da beispielsweise die Lastregelung bei einem Motor mit Turboaufladung und variablem Ventiltrieb natürlich anders erfolgt wie bei einem Saugmotor mit festen Steuerzeiten und konstantem Ventilhub. Daher ist es besonders wichtig, die Emissionsmessung nicht nur mit Applikationsparametern zu korrelieren, sondern die dadurch zustande kommenden Mechanismen im Brennraum, die zur Schadstoffentstehung beitragen zu verstehen. In der zweiten Projektphase sollen diese Erkenntnisse in eine möglichst motorunabhängige Modellierung einfließen. Dies wird in einer ersten Stufe eher empirisch oder phänomenologisch erfolgen. An den Stellen, an denen solch eine Modellierung nicht ausreichend ist, wird untersucht werden, inwieweit eine Modellierung auf physikalischer Ebene machbar und zielführend ist.

### **3 Vorüberlegung und Anforderungen**

#### **3.1 Entwicklungsmethodik zur Ermittlung der Zusammenhänge des transienten Motorbetriebs**

Um die Inhalte der verschiedenen Arbeitspakete ausgehend von der Betrachtung des gesamten Fahrprofils bis hin zur Analyse individueller Verbrennungszyklen zu bearbeiten, bedarf es einer Entwicklungsmethodik in der bereits Simulationsumfänge in der experimentellen Prüfstands Umgebung integriert sind und somit das Testen im virtuellen Fahrversuch möglich ist. Für Untersuchungen mit einem realen Verbrennungsmotor ist dies der sogenannte Engine-in-the-Loop-Ansatz. Dieser Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass der reale Verbrennungsmotor in einer virtuellen Umgebung bestehend aus dreidimensionalem Fahrzeugmodell, Fahrercharakteristik und Fahrprofil betrieben wird.

Die in diesem Vorhaben entwickelte Methodik beschreibt in Ihrem Ansatz eine Top-Down-Vorgehensweise in der eine Analyse des Gesamtfahrprofils die Ausgangsbasis bildet. Auf dieser Grundlage werden dann emissionskritische Fahrmanöver identifiziert und in den beiden folgenden Detaillierungsstufen zeitlich hochaufgelöster analysiert. Mit dem Detaillierungsgrad steigt auch die Anforderung an die Aufnahmefrequenz der verschiedenen Messsysteme. Beispielsweise werden gasförmige Rohemissionen während der Analyse des Gesamtfahrprofils mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet und in den Detaillierungsstufen 1 und 2 dann jeweils mit 1 kHz.

Die Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen ausgehend vom Fahrzyklus bis hin zum Verbrennungszyklus finden in ein und derselben Entwicklungsumgebung statt. Die experimentell ermittelten Daten werden zeitsynchron zur Simulation im Echtzeitsystem verarbeitet. Im virtuellen Gesamtfahrzeug können auf diese Weise die Emissionen des Motors in verschiedenen Fahrzeugen, auf unterschiedlichen Strecken und mit wechselnden Betriebsstrategien iterativ untersucht werden. Die Methode bietet insbesondere bei der Untersuchung von Hybridantriebskonzepten den Vorteil, dass diese in der Simulation (Matlab/Simulink) abgebildet werden können. Somit können die Emissionen und der Verbrauch des virtuell elektrifizierten Gesamtfahrzeugs am Motorprüfstand analysiert werden, ohne dass ein aufwändiger Fahrzeugprototyp erforderlich ist.

#### **3.2 Architektur der experimentellen Versuchsumgebung**

Die Erfassung der transienten Betriebszustände definiert grundlegende Anforderungen an die experimentelle Versuchsumgebung. Insbesondere die zeitliche Ablaufsteuerung des Prüfstandsautomatisierungssystems und die zeitlich exakte Synchronisation gekoppelter Messsysteme stellt eine zentrale Herausforderung zur zyklusaufgelösten Untersuchung der transienten Betriebsphasen dar. Die Basis der Versuchsumgebung bildet ein hochdynamischer Motorprüfstand mit Automatisierungssystem (AVL Puma Open), mit der Möglichkeit, den Verbrennungsmotor in einer Engine-in-the-Loop (EiL) Umgebung zu betreiben. Für diesen Zweck wurde das Automatisierungssystem um eine offene Hardware-in-the-Loop-Integrationsplattform (IPG CarMaker) ergänzt. Diese Kopplung ermöglicht die virtuelle Modellierung eines dreidimensionalen Fahrzeugmodells und einer individuellen Fahrerparametrierung sowie der Implementierung beliebiger Fahrprofile. Der Engine-in-the-Loop-Ansatz bietet die Möglichkeit, das Fahrzeugverhalten und das sich daraus ableitende Betriebsprofil des Verbrennungsmotors realitätsnah am Prüfstand abzubilden, wobei im Gegensatz zur Fahrzeugerprobung auf der Straße, der simultane Einsatz aller

Sondermesstechniken im Laborumfeld möglich ist. Darüber hinaus können die Versuche mit höchster Reproduzierbarkeit und Wiederholrate durchgeführt werden. Im Hinblick auf die geplante Einführung von mobilen Emissionsmessungen (Portable Emission Measurement Systems (PEMS)) zur Ermittlung der Real Driving Emissions bietet der EIL-Prüfstand die Möglichkeit, realistische Szenarien bereits am Prüfstand vorab zu untersuchen [Sch2013]. In Ergänzung zur Untersuchung konventioneller Antriebe bietet der verwendete Prüfstand auch die Möglichkeit, hybride Antriebskonzepte virtuell zu implementieren. Somit kann frühzeitig die Wechselwirkung verschiedener Antriebseinheiten im Gesamtfahrzeugkontext untersucht und bewertet werden. Der eingesetzte Versuchsträger basiert auf einem seriennahen Sechszylinder-Reihenmotor mit Abgasturboaufladung, vollvariablem Ventiltrieb und strahlgeführter Direkteinspritzung. Diese Kombination bietet eine hohe Flexibilität für die Applikation und stellt eine entsprechende Anzahl an Freiheitsgraden für Maßnahmen im Transientbetrieb zur Verfügung. Der Zylinderkopf des Versuchsträgers wurde für die Integration der thermodynamischen und optischen Indizierung modifiziert. Hierfür wurden Bohrungen für die Zylinderdruckquarze in allen Zylindern untergebracht und am Zylinder 6 auch drei optische Zugänge realisiert. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit am Vollmotor ist die Sondermesstechnik mit dem Fokus auf einen Einzelzylinder (Zylinder 6) adaptiert. Ziel dieser Anordnung ist es, innerhalb des Vollmotors einen Zylinder in der Art und Weise untersuchen zu können, wie es gewöhnlich nur bei Forschungs-Einzelzylinderaggregaten möglich ist.

### **3.3 Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik zur Untersuchung des transienten Motorbetriebs**

Die Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik lassen sich aus der Begriffsdefinition des transienten Betriebs ableiten. Generell können transiente motorische Vorgänge zur Beschreibung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung nur dann hinreichend detailliert untersucht werden, wenn die Messtechnik eine Aufzeichnung der Messdaten mit hoher zeitlicher Auflösung und für eine größere Anzahl aufeinanderfolgender Arbeitsspiele gewährleistet. Aus diesem Grund wurde das Setup derart angepasst, dass alle kurbelwinkelbezogenen Daten mit einem 32-Kanal-Indiziersystem (Dewetron DeWe 5000) aufgezeichnet werden können. Für die Ermittlung der gasförmigen Emissionen wurden drei Fast-Response-Gas-Analyser (Cambustion) verwendet. Die Ermittlung der HC-Emissionen wurde mittels Fast-FID (Flammenionisationsdetektor (HFR500)), die CO und CO<sub>2</sub>-Emissionen mittels NDIR (Nichtdispersiver Infrarotsensor (NDIR500)) und die NO-Emissionen mittels CLD (Chemilumineszenzdetektor (CLD500)) realisiert. Aufgrund des schnellen Ansprechverhaltens (FID < 0,9 ms, NDIR < 8 ms und CLD < 2 ms) sind die Messgeräte im untersuchten Drehzahlbereich in der Lage, zyklus aufgelöste Emissionswerte zu ermitteln. Alle Systeme verfügen über zwei getrennte unabhängige Messlinien. Für die durchgängige Analyse und Bewertung eines Einzelzylinders wurde die jeweilige Linie 1 im Auslasskanal zwischen den beiden Ventilen des Zylinders 6 platziert. Somit können für diesen Zylinder die gasförmigen Rohemissionen zyklus aufgelöst gemessen werden. Die Einzelentnahmestellen der Linie 2 wurden hinter dem Abgasturbolader und vor dem Drei-Wege-Katalysator positioniert. Somit lassen sich die Messwerte der zylinderselektiven Ergebnisse mit dem Verhalten des Gesamtaggregate an dieser Stelle vergleichen.

Zur Ermittlung der Partikelemissionen kam ein Partikelgrößen-Spektrometer (Transient Engine Particle Analyzer, Cambustion DMS500 MkII) zum Einsatz. Dieses System ist in der

Lage, die Partikelanzahl und -größenverteilung für einen Durchmesserbereich von 5 nm bis 1  $\mu\text{m}$  mit einer Frequenz von 10 Hz aufzuzeichnen. Die Aufnahme­frequenz ist für eine zyklusaufgelöste Betrachtung nicht ausreichend, hat aber den Vorteil, dass das Messsystem aufgrund des geringeren Datenvolumens einen längeren Zeitraum aufzeichnen kann. Auf diese Weise lassen sich relevante Bereiche aus vollständigen Fahrprofilen identifizieren. In [Pec2011] sind die Analyse­möglichkeiten des Systems anhand des NEFZ-Profiles unter Verwendung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung beschrieben. Anhand der beschriebenen Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Partikelanzahl insbesondere in den transienten Phasen deutlich höher ist, als dies in stationären Phasen der Fall ist. Aufgrund der eingeschränkten Messfrequenz ist eine zyklus- bzw. zylinderselektive Zuordnung der gemessenen Werte nicht möglich. Eine Entnahme des Abgases wurde sowohl an der Entnahmestelle direkt nach Zylinder 6 und an der Entnahmestelle vor Katalysator direkt nach dem Turbolader für Untersuchungen verwendet. Die Entnahme direkt am Auslass von Zylinder 6 hat den Nachteil, dass das Ergebnis nur für Zylinder 6 mit Quereinflüssen von Zylinder 4 und 5 repräsentativ ist. Gerade im Vergleich mit der am Zylinder 6 eingesetzten Sondermesstechnik ist dies jedoch ein Vorteil. Zur Beurteilung der gesamten Motorrohmissionen wurde die Entnahmestelle nach Turbolader verwendet. Die Einflüsse der verschiedenen Entnahmemöglichkeiten entlang des Abgasstrangs sind in [Eri2009] beschrieben. Die Arbeit zeigt die Notwendigkeit, Partikel-Rohmissionen vor dem Katalysator zu messen, da dieser eine deutliche Reduktion von Partikeln mit kleinem Durchmesser (Nukleationsmodus) begünstigt. Die dynamische Kraftstoffmessung wurde ebenfalls am Zylinder 6 integriert. Zu diesem Zweck wurde in die Hochdruckleitung zwischen der Hochdruckrail und dem Injektor eine Kraftstoffmessanlage (STS131 von AVL) integriert. Dieses System ist in der Lage, die eingespritzte Kraftstoffmenge und den Ratenverlauf für den Zylinder 6 kurbelwinkelaufgelöst zu messen.

### **3.4 Optische Indizierung mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie**

Als einer der zentralen Prozessparameter für den dynamischen Motorbetrieb steht das Luftverhältnis in direktem Zusammenhang mit den Entstehungsmechanismen verschiedener gasförmiger Rohmissionen sowie der Partikelemissionen. Aus diesem Grund greift die serienmäßige Motorsteuerung in der Regel auf die gemessenen Lambdawerte aus mindestens einer Breitband-Lambdasonde (nach Turbolader) und in der Regel auch auf eine weitere Sprung-Lambdasonde nach dem Drei-Wege-Katalysator zu. Durch diese Positionierung ist es nicht möglich, die Luftverhältnisse uneingeschränkt einzelnen Zylindern zuzuordnen. Dies könnte unter Berücksichtigung der Abgasgegendrücke durch Einzellambdasonden im Abgastrakt realisiert werden. Die Information, die auf diese Weise ermittelten Luftverhältnisse gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, wie sich das Luftverhältnis im Kompressionshub bis hin zur Zündung der Zylinderladung entwickelt hat. Eine Aussage etwa über den Homogenisierungsgrad kann somit nicht getroffen werden. Außerdem unterscheiden sich die Luftverhältnisse aus Brennraum und Abgasstrecke z.B. aufgrund von Scavenging unter Umständen deutlich. Für diesen Zweck bieten LIF-Verfahren Möglichkeiten, die räumliche Entwicklung des Brennraumluftverhältnisses zu bestimmen. Der Einsatz der LIF-Messtechnik ist für die beschriebene Fragestellung allerdings nur dann hinreichend, wenn die Messungen mit einer hohen Aufnahme­rate ablaufen können. Außerdem sind bei LIF-Verfahren meist Anpassungen bei der Kraftstoffauswahl zu treffen, welche letztlich Einfluss auf das Gemisch­bildungsverhalten haben [Bus2010]. Unter den genannten Aspekten bietet der Einsatz der als Internal Combustion Optical Sensor (LaVision ICOS) bezeichneten Sondermesskerze die Möglichkeit, das lokale Luftverhältnis nahe zum

Zündkerzenspalt zu messen [Ber2013, Gro2007, Lie2012]. Um dessen Potenzial für die zweite Projektphase zu ermitteln wurden im Rahmen einer Leihgabe verschiedene Vorversuche durchgeführt. Grundsätzlich wird der ICOS-Sensor anstelle der Serienzündkerze am Motor adaptiert und ist in der Lage, das Luftverhältnis kurbelwinkelaufgelöst für hunderte aufeinanderfolgende Zyklen zu ermitteln. Das optische Messprinzip beruht auf der Absorption von Licht durch Kraftstoffmoleküle im infraroten Wellenlängenbereich. Die Abschwächung des Lichtes durch die Absorption ist dabei nach dem Lambert-Beer-Gesetz proportional zur Kraftstoffdichte im Messvolumen an der Zündkerze. Durch die optische Messtechnik reagiert das System in-situ ohne Zeitverzögerung auf die Dichteschwankungen, da keine Gasentnahme notwendig ist. Mit einer Zeitauflösung von bis zu 30 kHz kann mit Hilfe eines mathematischen Modells das Luftverhältnis im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst ermittelt werden. Der ICOS-Sensor wurde während der Messreihen am Zylinder 6 appliziert, so dass ein Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der an der auslassnahen Abgasentnahmestelle betriebenen Abgasanalysatoren möglich wird.

Eine weitere Ausführung des ICOS-Systems bietet die Möglichkeit anstelle der Gaszusammensetzung die Gastemperatur in der Nähe der Zündkerze zu bestimmen. Die Temperaturbestimmung durch Infrarotabsorptionsspektroskopie basiert auf der Absorption von Infrarotstrahlung durch Wassermoleküle. Für die Versuche wurde die relative Feuchte der angesaugten Luft auf 50% konditioniert um ein gutes Signal zu Rauschverhältnis zu erhalten. Die Ergebnisse wurden dann mit den Ergebnissen der Druckverlaufsanalyse und den Ergebnissen der Zwei-Farben-Methode verglichen

## 4 Versuchsvorbereitung und Definition der Prüfläufe

### 4.1 Untersuchung realer Fahrprofile

Der Projektteil zur Untersuchung der Gesamtfahrprofile umfasst sowohl die Aspekte der gesetzlichen Fahrprofile als auch der realen Fahrprofile. Die in Abbildung 3 dargestellten Ergebnisse zeigen einen Ausschnitt aus einem realen Fahrprofil. Nach dem Schaltvorgang führt die kurzzeitige Beschleunigung zu vergleichsweise hohen CO- und Partikelemissionen. Die Zeitverzögerung der erhöhten Partikelemissionen ist auf die Laufzeit des Abgases hin zum Partikelgrößenspektrometer zurückzuführen. Zur Analyse transientser Übergangsprozesse sind Untersuchungen vollständiger Fahrprofile aufgrund der langen Versuchszeiten und der damit einhergehenden großen Datenmengen nicht zielführend. Aus diesem Grund wurden Teilprozesse extrahiert und in der Folge als elementare transiente Prozesse in einem Vorgabeprofil (z.B. als Drehzahl/Fahrpedal-Vorgabe ( $n/\alpha$ )) mit hoher zeitlicher Auflösung ausgeführt. Dies hat den Vorteil, dass bestimmte Teilaspekte mit höchster Reproduzierbarkeit und hoher Wiederholrate untersucht werden können. Darüber hinaus kann die Aufnahmezeit für die gemessenen und simulierten Daten im kHz-Bereich ausgeführt sein, so dass sich die Prozesse auch zyklusauflöst bewerten lassen.

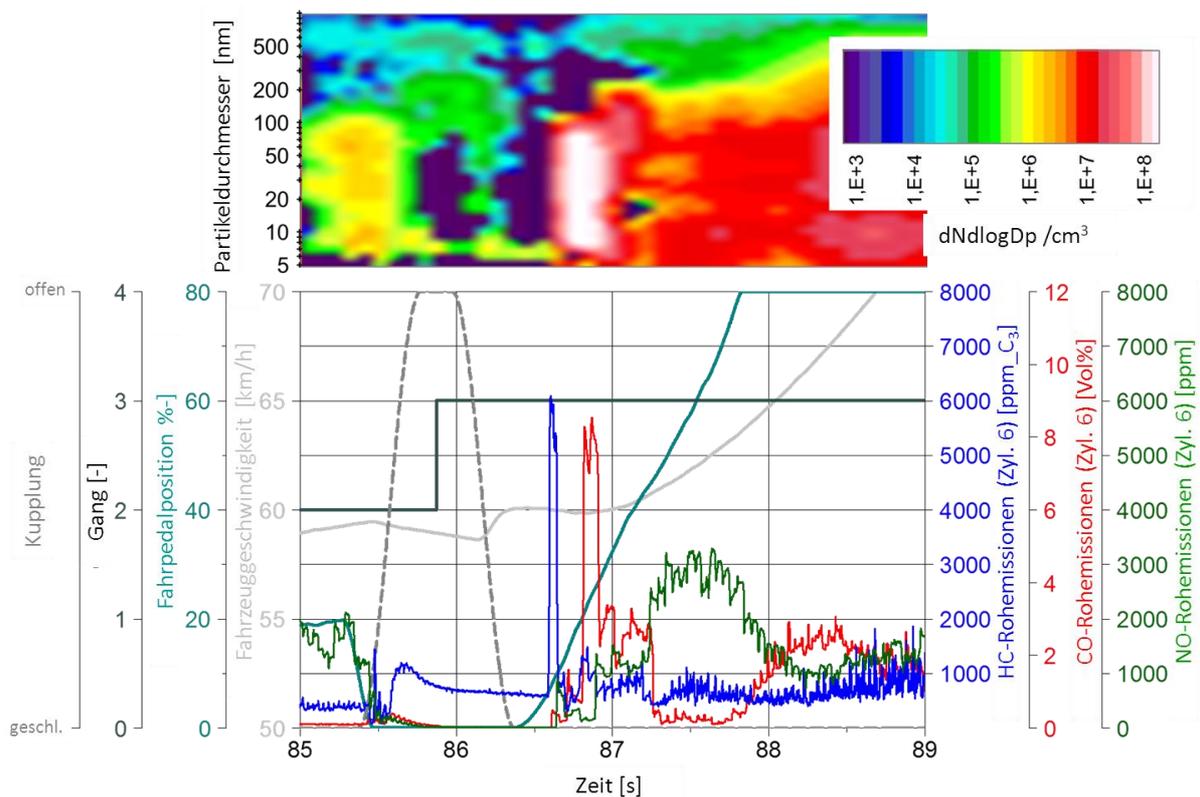


Abbildung 3: Auszug aus einem realen Fahrprofil – Beschleunigungsvorgang

## 4.2 Untersuchung des transienten Motorbetriebs – elementare transiente Prozesse

Ausgehend von den Ergebnissen aus der Abbildung 3 ist zu erkennen, dass ein Lastsprung Bedingungen schafft, welche zu erhöhten Rohemissionen führen. Um diese elementaren transienten Prozess im Detail zu analysieren, wurden eigens Lastsprungprüfläufe definiert, welche in ihrer Abfolge durch zehn identische Lastsprünge charakterisiert sind. Als Sonderfall des positiven Lastsprungs ist der Tip-in – Lastsprung ausgehend vom Schubbetrieb – aufgrund der ungünstigen Temperaturverhältnisse in besonderem Maße emissionskritisch. Der Verlauf eines beliebigen Tip-in-Manövers lässt sich zeitlich durch vier aufeinanderfolgende Einzelphasen beschreiben (siehe Abbildung 4). Die erste Phase beschreibt die Zeitdauer, über welche der Motor zuvor im Schubbetrieb oder in der vergleichsweise geringeren Last betrieben wurde ( $t_1$ ). In Bezug auf die Rohemissionen spielen hier vor allem die Abkühlung der Brennraumwände und des Kolbens eine zentrale Rolle. Die zweite Phase beschreibt die zeitliche Veränderung des Pedalwertgebers und in dessen Folge den Wunsch zur entsprechenden Anhebung des Motordrehmoments. Der Verlauf des Momentengradienten hat hier erheblichen Einfluss auf die Rohemissionen. Dies ist auf die besonderen Herausforderungen der sich stetig ändernden Bedingungen sowohl zur Gemischbildung (z.B. Entwicklung der Zylinderinnenströmung) als auch auf die Zumessung der eingespritzten Kraftstoffmasse als Anpassung auf die zeitliche Veränderung des Luftpfades zurückzuführen. Die dritte Phase beschreibt die Haltedauer und Höhe des Lastzustands, mit welcher der Motor nach dem Lastsprung betrieben wird ( $t_3$ ), bevor in der vierten Phase ( $t_4$ ) zwischen erneuter Schubabschaltung bzw. Lastwegnahme unterschieden werden kann. Auf Basis dieser Nomenklatur wurden verschiedene Lastsprünge bei einer konstanten Motordrehzahl von  $2000 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Zwei grundsätzliche Varianten sind in diesem Zusammenhang zu unterscheiden. Fall 1 beschreibt die Lastanhebung aus dem Schubbetrieb (Tip-in) und Fall 2 die Lastanhebung aus einer vergleichsweise geringeren Last. Der Einfluss einer sich verändernden Motordrehzahl über den Lastsprung hinweg wurde in den dargestellten Versuchen bewusst vernachlässigt, um deren mögliche Quereinflüsse zu eliminieren. In der Praxis ist die Drehzahländerung bei einer sehr schnellen Lastanforderung für die ersten Arbeitsspiele ohnehin vergleichsweise gering.

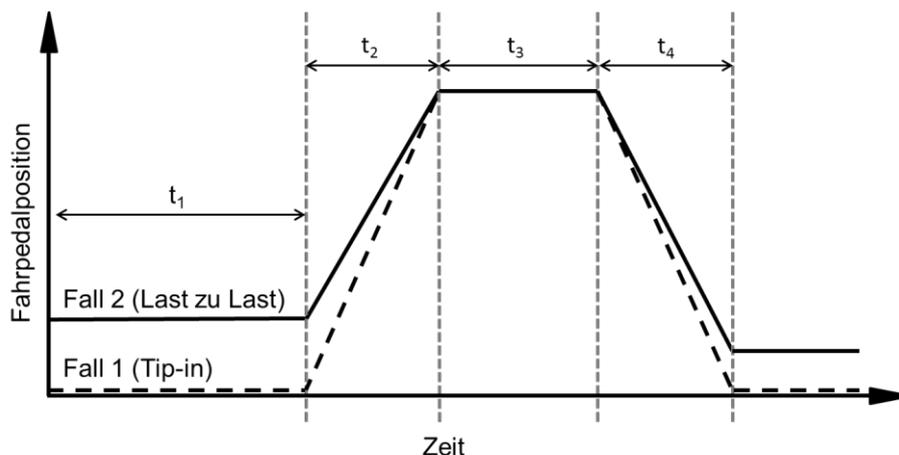


Abbildung 4: Beschreibung der aufeinanderfolgenden Einzelphasen eines Lastsprungs

### 4.3 Virtueller Fahrversuch – Engine-in-the-Loop Transient Zyklus

Mit der in Kapitel 3 beschriebenen Versuchsumgebung ist es möglich, sowohl konventionelle Fahrprofile (Zertifizierungszyklen, Testzyklen oder auch reale Fahrprofile) als auch künstliche Fahrprofile zu integrieren. Diese Möglichkeit wurde genutzt, um einen neuen transienten Testzyklus zu generieren. Ziel war es, eine Vielzahl emissionskritischer Manöver in möglichst kurzer Prüflaufzeit auf einer realitätsnahen Strecke abzubilden. Die dreidimensionale Modellbildung ermöglicht sowohl längs- als auch querdynamische Fahrmanöver. Auf diese Weise kann eine Slalomfahrt als sich wiederholendes Tip-in-Manöver integriert werden. In Abbildung 5 ist das als Engine-in-the-Loop Transient Zyklus („ET“) bezeichnete Fahrprofil in voller Länge dargestellt. Der mit **A** hervorgehobene Abschnitt beschreibt die Slalomfahrt. Die Motordrehzahl erfährt in dieser Phase aufgrund der konstanten Gangwahl und dem Ziel, die Geschwindigkeit zu halten, nur eine geringfügige Änderung. Die Last (Fahrpedal) muss während der Slalomfahrt jedoch deutlich angepasst werden, um die höheren Fahrwiderstände der Kurvenfahrt auszugleichen. Die instantane Laständerung führt zu erkennbaren Maximalwerten für die Rohemissionen. [DIS2017]

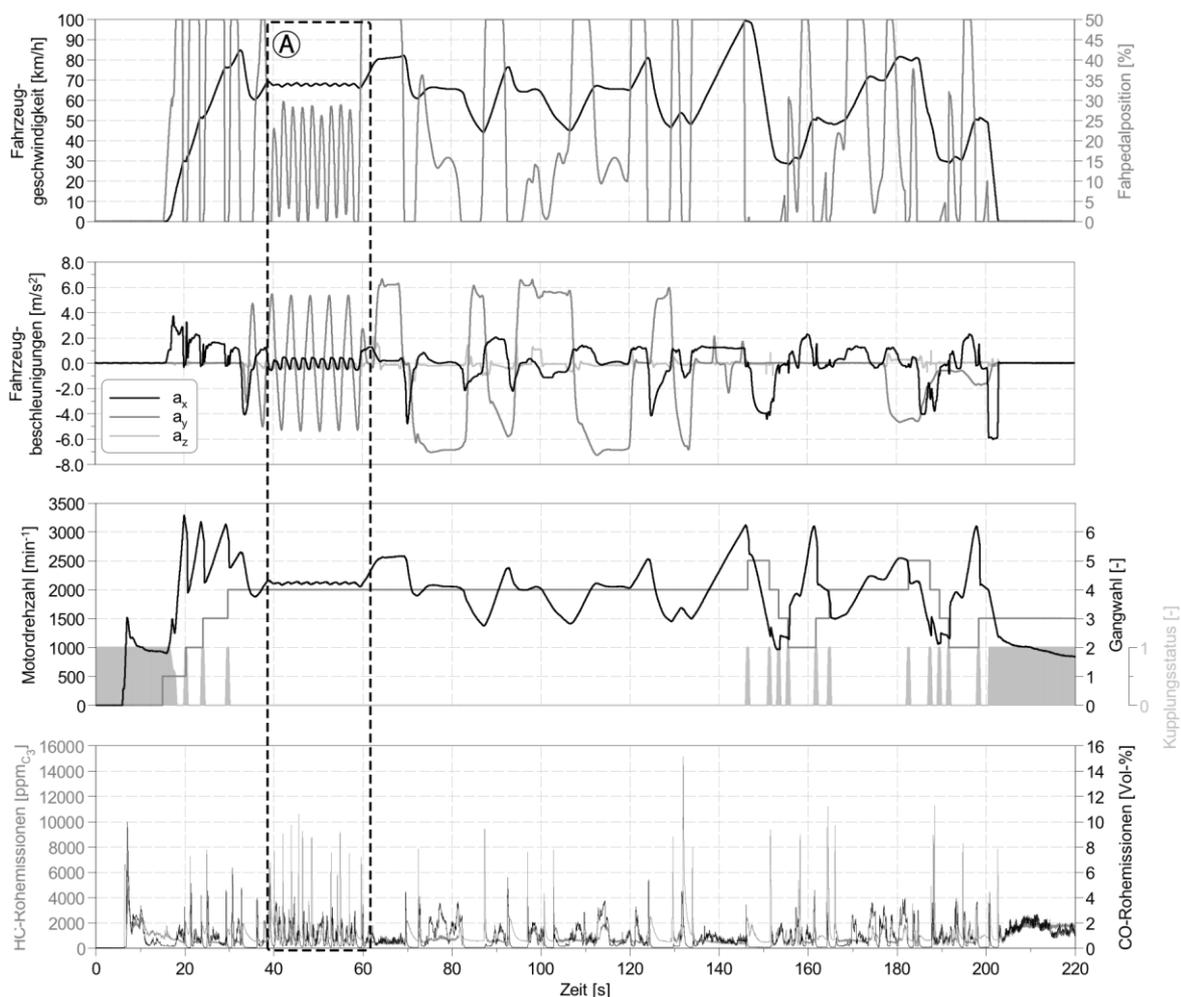


Abbildung 5: Beschreibung des Engine-in-the-Loop Transient Zyklus (ET-Zyklus) [DIS2017]

#### 4.4 Versuchsvorbereitung und -auswertung

Die Vorbereitung des Versuchsträgers auf dem Transientprüfstand erfordert Anpassungsmaßnahmen zur Sicherstellung des vergleichbaren Motorbetriebs, wie er im Fahrzeugeinsatz ablaufen würde. In der Regel kann dies durch eine passende Restbus-Simulation mit Anbindung an das Motorsteuergerät gewährleistet werden. Dadurch ergeben sich jedoch aus der Fahrzeugapplikation Einschränkungen, welche eine detaillierte Untersuchung der Transientprozesse erheblich beeinflussen können. Vor allem Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrbarkeit und des NVH-Verhaltens verursachen unter Umständen deutliche Quereinflüsse, die vermieden werden sollten. Aus diesem Grund sind fahrzeugspezifische Abstimmungen über das freiprogrammierbare Steuergerät auszubeden. Mit der resultierenden „Rohapplikation“ können eventuelle Quereinflüsse im Laborumfeld vermieden werden. Diese Veränderung der Motorapplikation erleichtert in der Folge die Identifikation der Einflussgrößen im dynamischen Betrieb.

Im Gegensatz zu stationären Messungen verändern sich im Transientbetrieb die Kühlwasser- und Öltemperaturen (transiente Prozesse dritter Ordnung) kontinuierlich. Aus diesem Grund werden die Medien des Versuchsträgers auf 85°C zwangskonditioniert. Somit kann der Einfluss veränderlicher Kühlwasser- und Öltemperaturen ausgeschlossen werden. Für eine statistische Aussage der einzelnen Lastsprungversuche, wurden alle Prüfläufe gemäß Abbildung 6 aus zehn einzelnen aufeinanderfolgenden Lastsprüngen (L2-L11) generiert. Dies ermöglicht, die Effekte des Temperatureinflusses ebenso zu berücksichtigen wie auch den Quervergleich verschiedener Lastsprünge ausgehend von identischen Temperaturniveaus.

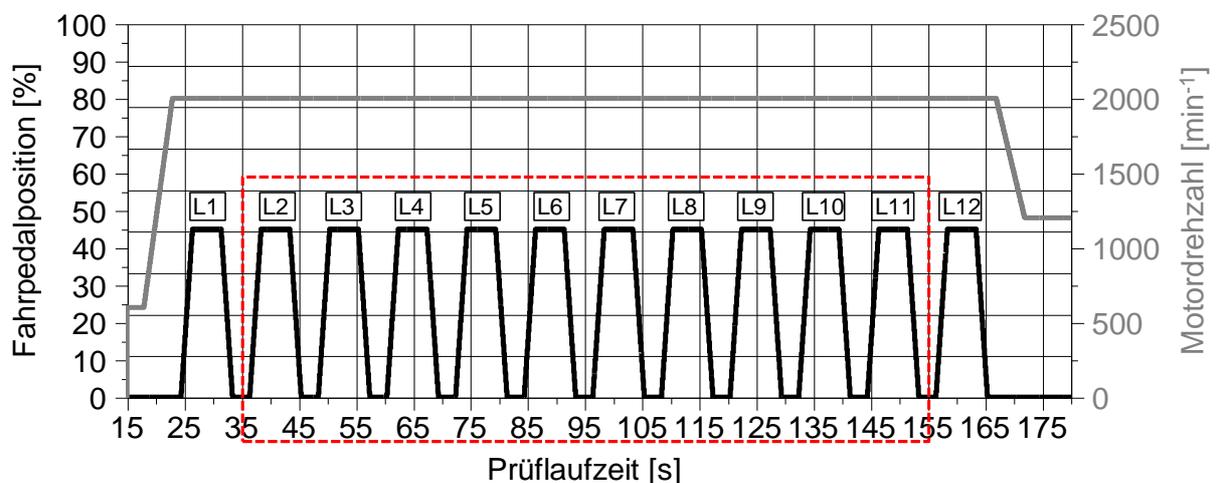


Abbildung 6: Beschreibung der Ablaufsequenzen eines Lastsprungprüflaufs

#### 4.5 Auswertung der Highspeed Aufnahmen bezüglich Partikelquellen

Aufgrund der Veränderungen von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel sind Auswerteverfahren auf Basis von Mittelwertbildungen nicht geeignet, um Zusammenhänge transienter Betriebsphasen hinreichend präzise zu beschreiben. Dennoch ist es auch für die transienten Untersuchungen das Ziel, die Kernaussagen verschiedener Zusammenhänge in einer komprimierten Darstellung zu beschreiben. Die Rohdaten (Einzelaufnahmen) des Rußeigenleuchtens werden mit mehreren Nachbearbeitungsschritten aufbereitet. Der erste Schritt umfasst die Konturerkennung derer Pixel, die sich durch vergleichsweise hohe Intensitäten auszeichnen. Zu diesem Zweck wird auf Basis eines Schwellenwertes (threshold) jedes Pixel geprüft. Bei Überschreitung des Schwellenwertes wird das Pixel dem

Rußeigenleuchten zugewiesen und bei Unterschreitung mit einem Intensitätswert von 0 Counts überschrieben. Für diesen Bearbeitungsschritt muss sichergestellt sein, dass die detektierte Intensität zu diesem Kurbelwinkel nicht auf die Strahlung der regulären Verbrennung zurückzuführen ist und im Fall einer aktiven Beleuchtung des Brennraums auch nicht durch Reflexionen des eingebrachten Lichts verursacht ist. Das binarisierte Bild wird dann in einem zweiten Schritt auf zusammenhängende Pixel geprüft. Sofern die zusammenhängenden Pixel einen Mindestwert überschreiten, wird eine Kontur um die ermittelte Fläche erstellt. Durch die erzeugten Konturen lässt sich die Information einer größeren Anzahl an Einzelaufnahmen auf eine einzige Darstellung komprimieren. Dabei kann sowohl der Vergleich der aufeinanderfolgenden Aufnahmen (also innerhalb eines Arbeitsspiels) als auch der Vergleich ausgewählter Kurbelwinkel aus verschiedenen Arbeitsspielen dargestellt werden.

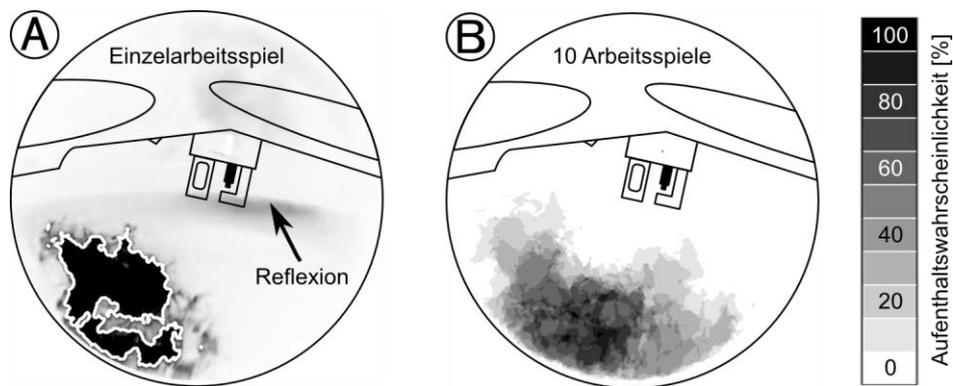


Abbildung 7 Ermittlung der projizierten Fläche aus dem Rußeigenleuchten für ein Einzelarbeitsspiel **A** und in Form der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für zehn Arbeitsspiele **B** [DIS2017]

Mit zunehmender Anzahl berücksichtigter Konturlinien, bedarf es einer weiteren Komprimierung der optischen Daten. Zu diesem Zweck wird die jeweils projizierte Fläche in eine Darstellung zur Aufenthaltswahrscheinlichkeit überführt. Dies ermöglicht beispielsweise die Identifikation und Unterscheidung von lokalen nicht-vorgemischten Flammen an Oberflächen und denen, die beispielsweise durch unzureichende Gemischhomogenisierung verursacht sind. In Abbildung 7 ist die Vorgehensweise beispielhaft dargestellt. Auf der linken Seite **A** ist die Konturerkennung als Überlagerung in einem Rohbild dargestellt und auf der rechten Seite **B** die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für zehn aufeinanderfolgende Arbeitsspiele. Anhand der ausgewerteten Aufenthaltswahrscheinlichkeit wird deutlich, dass das Rußeigenleuchten für alle zehn Arbeitsspiele zum untersuchten Zeitpunkt (50 °KW n. ZOT) auf eine projizierte Fläche zurückzuführen ist, die auf eine nicht-vorgemischte Verbrennung an der Kolbenoberfläche schließen lässt. [DIS2017]

## 5 Versuchsergebnisse

Die dargestellten Versuchsergebnisse beschreiben einen Auszug der bisher gewonnenen Erkenntnisse. Diese umfassen die Ergebnisse zur Untersuchung der Lastsprünge bei konstanter Motordrehzahl als Beispiel eines praxisrelevanten transienten Vorgangs. Eine Ausführliche Beschreibung findet sich darüber hinaus auch bei Disch [DIS2017].

In der folgenden Beschreibung sind die Ergebnisse für die Partikelemissionen (aufgezeichnet mit 10 Hz), die gasförmigen Emissionen (zyklusaufgelöst) und das Brennraumluftverhältnis (kurbelwinkelaufgelöst) für die Versuche 1-4 gemäß der Abbildung 8 beschrieben. Dabei handelt es sich um Lastsprünge aus dem Schubbetrieb auf zwei verschiedene Lastniveaus (25,5 % und 45 % Fahrpedal). Als zweite Variationsgröße wurde die Lastaufschaltzeit variiert. Zur Untersuchung einer kurzen Lastaufschaltung wurde eine Zeit von 0,5 Sekunden gewählt und für die langsame Lastaufschaltung eine Lastaufschaltdauer von zwei Sekunden.

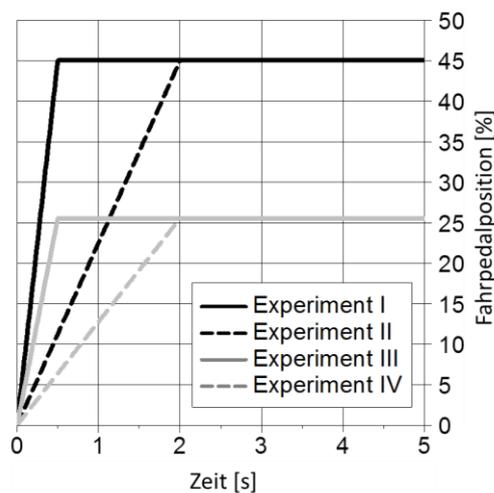


Abbildung 8: Zeitlicher Fahrpedalverlauf für vier verschiedener Lastsprungversuche (Tip-in)

### 5.1 Partikelemissionen

Die reproduzierbare Untersuchung der Partikelemissionen in dynamischen Betriebsphasen ist aufgrund der eingeschränkten Aufnahme Frequenz konventioneller Messgeräte herausfordernd. Dennoch können bei einer Aufzeichnung mit 10 Hz Aussagen über das Verhalten verschiedener Drehmomentverläufe (Lastsprünge) getroffen werden. In der Abbildung 9 sind die Partikelemissionen für die vier Versuche aus ebendieser Abbildung dargestellt. Die linke Bildhälfte beschreibt die Gesamtpartikelanzahlkonzentration als Mittelwert der zehn Wiederholungen eines jeden Prüflaufs. Die rechte Bildhälfte zeigt den dazugehörigen zeitlichen Verlauf der Fahrpedalvorgabe. Es ist zu erkennen, dass nach einer kurzen Totzeit, verursacht durch die Entnahmestelle nach Abgasturbolader und der Laufzeit des Abgases zum Analysator, ein deutlicher Peak für die Partikelanzahlkonzentration auftritt. Diese vergleichsweise hohen Partikelemissionen sind über einen Zeitraum von weniger als einer halben Sekunde zu detektieren. Danach fällt die Partikelanzahlkonzentration auf ein deutlich geringeres Niveau zurück. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, die Prozesse in dynamischen Betriebsphasen hochfrequent aufzuzeichnen.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

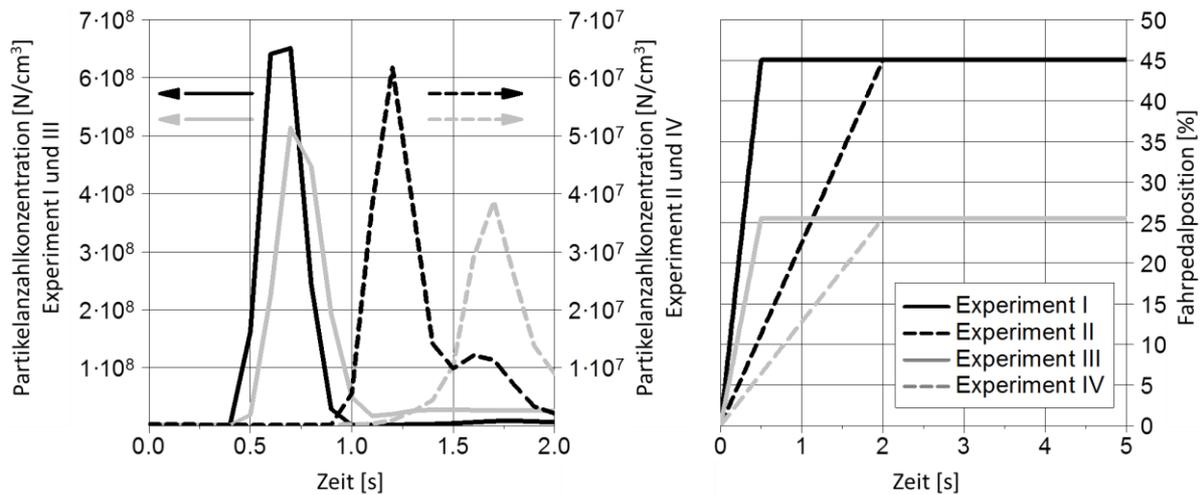


Abbildung 9: Mittlere Partikelanzahlkonzentration für vier verschiedene Lastsprungmanöver

Die Ergebnisse in Abbildung 9 verdeutlichen, dass es unabhängig von der Ziellast zu einer überhöhten Partikelanzahlkonzentration zu Beginn des Lastsprungs kommt und die Dauer des Auftretens der überhöhten Emissionen nahezu unabhängig vom zeitlichen Verlauf des Fahrpedals ist. Somit ist der größte Einfluss der Emissionen beim Fahrpedalgradient auszumachen. Die quantitative Betrachtung zeigt, dass die erreichten maximalen Partikelemissionen in direktem Zusammenhang mit der gewünschten Lastaufschaltung stehen. Der Versuch I verursacht die höchsten Partikelemissionen ( $6,4E+08 \text{ N/cm}^3$ ), während der Versuch IV die geringsten Maximalwerte aufweist ( $3,8E+07 \text{ N/cm}^3$ ). Die beiden Extremfälle unterscheiden sich um mehr als eine Größenordnung. Jedoch gibt diese Betrachtung keine Aufschlüsse über das Größenspektrum der gemessenen Partikel. In Abbildung 10 ist die Partikelgrößenverteilung für die ersten fünf Sekunden nach Beginn der Lastaufschaltung dargestellt. Die Darstellung der Versuchsergebnisse beschreibt den Mittelwert aus den zehn einzelnen Tip-ins. In den Ergebnissen der schnellen Lastaufschaltung ( $t_2 = 0,5 \text{ s}$ ) ist die vergleichsweise hohe Partikelanzahlkonzentration zu Beginn des Lastsprungs zu erkennen. Die Darstellung zeigt zudem, dass in diesen Phasen vor allem Partikel mit kleinerem Durchmesser zu detektieren sind. Diese Tendenz ist in beiden Versuchen zu sehen und zeigt somit eine Charakteristik, die unabhängig von der gewünschten Ziellast ist. In den Ergebnissen der Versuche mit längerer Lastaufschaltzeit ( $t_2 = 2 \text{ s}$ ) kann der vergleichsweise hohe Partikelausstoß während der Lastaufschaltung ebenfalls identifiziert werden. Jedoch wird ersichtlich, dass das Partikelgrößenspektrum hin zu größeren Durchmessern verschoben ist. Während in den Versuchen mit der kurzen Lastaufschaltung der Schwerpunkt bei einem Durchmesser von 10 nm lag, liegt dieser bei der längeren Lastaufschaltzeit zwischen 60 nm und 80 nm.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

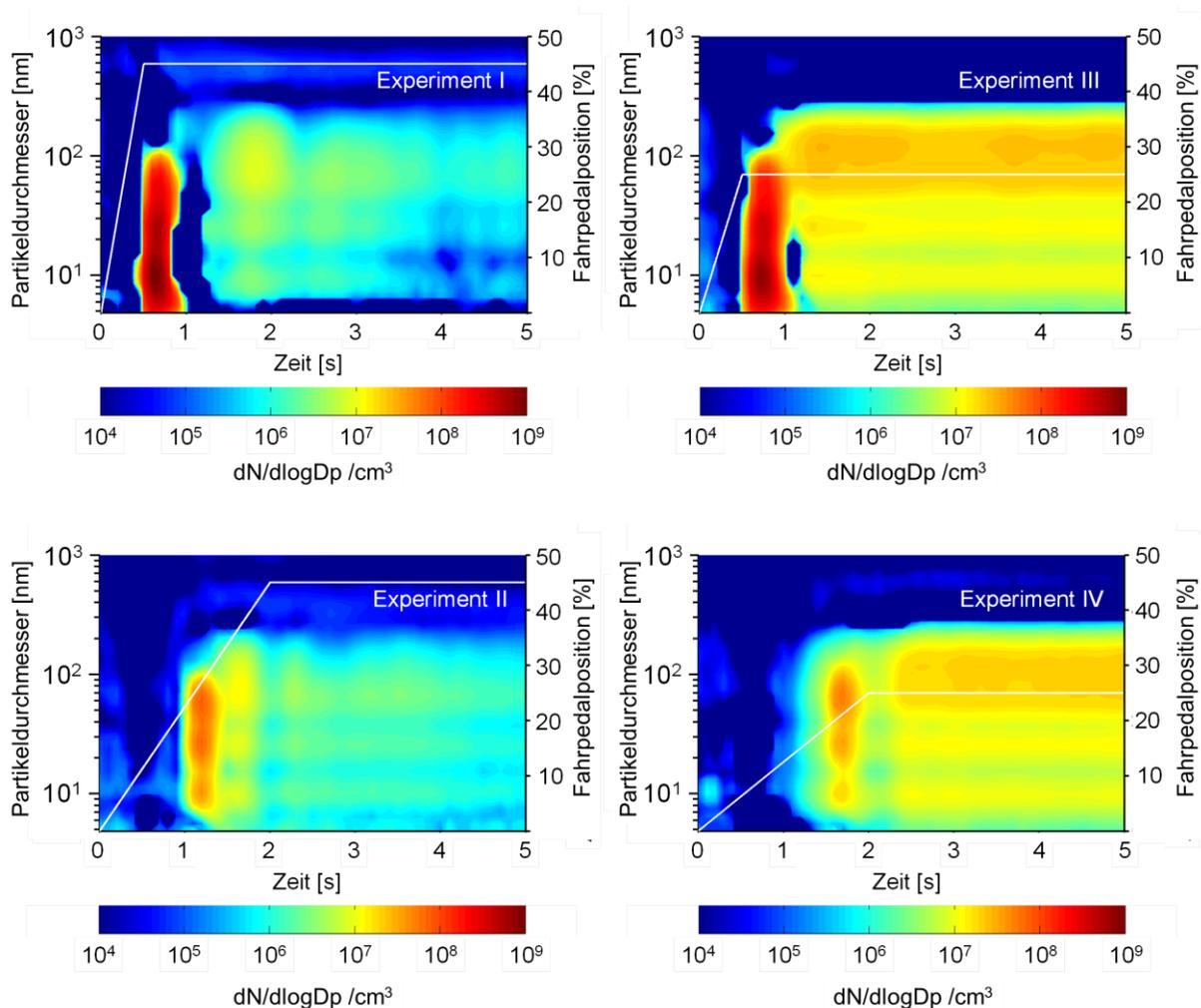


Abbildung 10: Mittelwertbetrachtung für die Partikelemissionen verschiedener Lastsprünge (Tip-in)

In Abbildung 11 sind die Partikelemissionen als Differenz der Größenverteilung dargestellt. Die linke Bildhälfte beschreibt den Einfluss der Lastaufschaltdauer bei einem indizierten Mitteldruck von 12 bar und die rechte Bildhälfte bei 6 bar. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Unterschiede vor allem im Bereich des Nukleationsmodus auswirken. In beiden Darstellungen ist zu erkennen, dass die größte Differenz bei einem Partikeldurchmesser im Bereich von 10 nm zu identifizieren ist. Die Abbildung 11 zeigt zudem, dass sich die Ergebnisse mit Ausnahme des Bereichs der Lastaufschaltung nur geringfügig unterscheiden. Dies ist ein Indikator dafür, dass die Versuchswiederholungen eine sehr gute Reproduzierbarkeit aufweisen und die Ziellast eine untergeordnete Rolle für die Partikelemissionen im initialen Bereich des Lastsprungs spielt. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen der Partikelemissionen kann somit als Zwischenfazit festgehalten werden, dass sich sowohl bei unterschiedlichen Lasten als auch bei variabler Zeit zur Lastaufschaltung eine vergleichsweise höhere Partikelanzahlkonzentration im Übergangsbereich (Laständerung) einstellt. Darüber hinaus ist der Gradient ein Indikator für das Größenspektrum. Je schneller die Lastaufschaltung erfolgt, umso mehr kleinere Partikel sind zu detektieren. Aus dem zeitlichen Ablauf kann gefolgert werden, dass die auffälligen Prozesse für die untersuchte Drehzahl ( $n = \text{konst.} = 2000 \text{ min}^{-1}$ ) in weniger als einer halben

Sekunde ablaufen. Somit sind circa acht Verbrennungszyklen für die Entstehung der Emissionen in diesen Lastsprüngen in Korrelation zu bringen und verdeutlicht die Notwendigkeit der zeitlich hochaufgelösten Messtechnik.

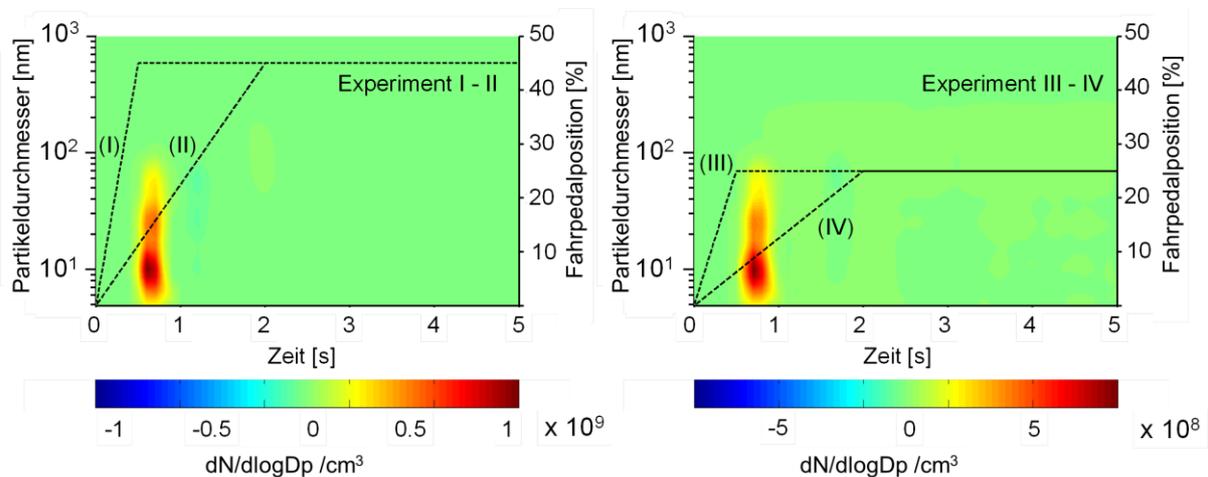


Abbildung 11: Differenz der verschiedenen Lastsprungversuche mit Bezug auf das Partikelgrößenspektrum

## 5.2 Messung der zyklus aufgelösten gasförmigen Rohemissionen

Die Messung der gasförmigen Rohemissionen direkt hinter dem Auslassventil des Zylinders 6 und nach Abgasturbolader geben wichtige Hinweise auf die Emissionsentstehung im dynamischen Betrieb. Der simultane Einsatz beider Linien ermöglicht zum einen die zyklus aufgelöste Erfassung der zylinderselektiven Rohemissionen (Zylinder 6) und zum anderen auch eine Beurteilung des Gesamtaggregateverhaltens. In Abbildung 12A sind die Verläufe sowohl für die eingespritzte Kraftstoffmasse als auch der HC- und CO-Emissionen für die einzelnen Tip-ins des Versuchs I im Auslasskanal des Zylinders 6 dargestellt. Die Streuung der eingespritzten Kraftstoffmasse ist erwartungsgemäß zu Beginn des Tip-ins besonders groß, da hier die Reihenfolge der Zylinder nach der Einspritzfreigabe über die initial eingespritzte Kraftstoffmasse entscheidet. Ein nach spät gestellter Zündwinkel führt im allerersten Arbeitsspiel zu sehr später 50%-Schwerpunktlage der Verbrennung, was eine Erklärung für die vergleichsweise hohen HC-Emissionen am Auslassventil liefert. In Abbildung 12 B sind die gemittelten Emissionen des Versuchs zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die niedrigen CO- und CO<sub>2</sub>-Emissionen nur für den ersten Zyklus zu messen sind. In den darauffolgenden Arbeitsspielen steigen die CO-Emissionen für ein Arbeitsspiel bis auf 10 Vol% an (Arbeitsspiel 4). Dies lässt auf eine unvollständige Verbrennung unter deutlichem Luftmangel schließen. Die vergleichsweise hohen CO-Emissionen sind über einen Zeitraum von acht Arbeitsspielen zu sehen. Dies passt somit zu der Zeitdauer der deutlich erhöhten Partikelanzahlkonzentration aus Kapitel 5.1 zusammen.

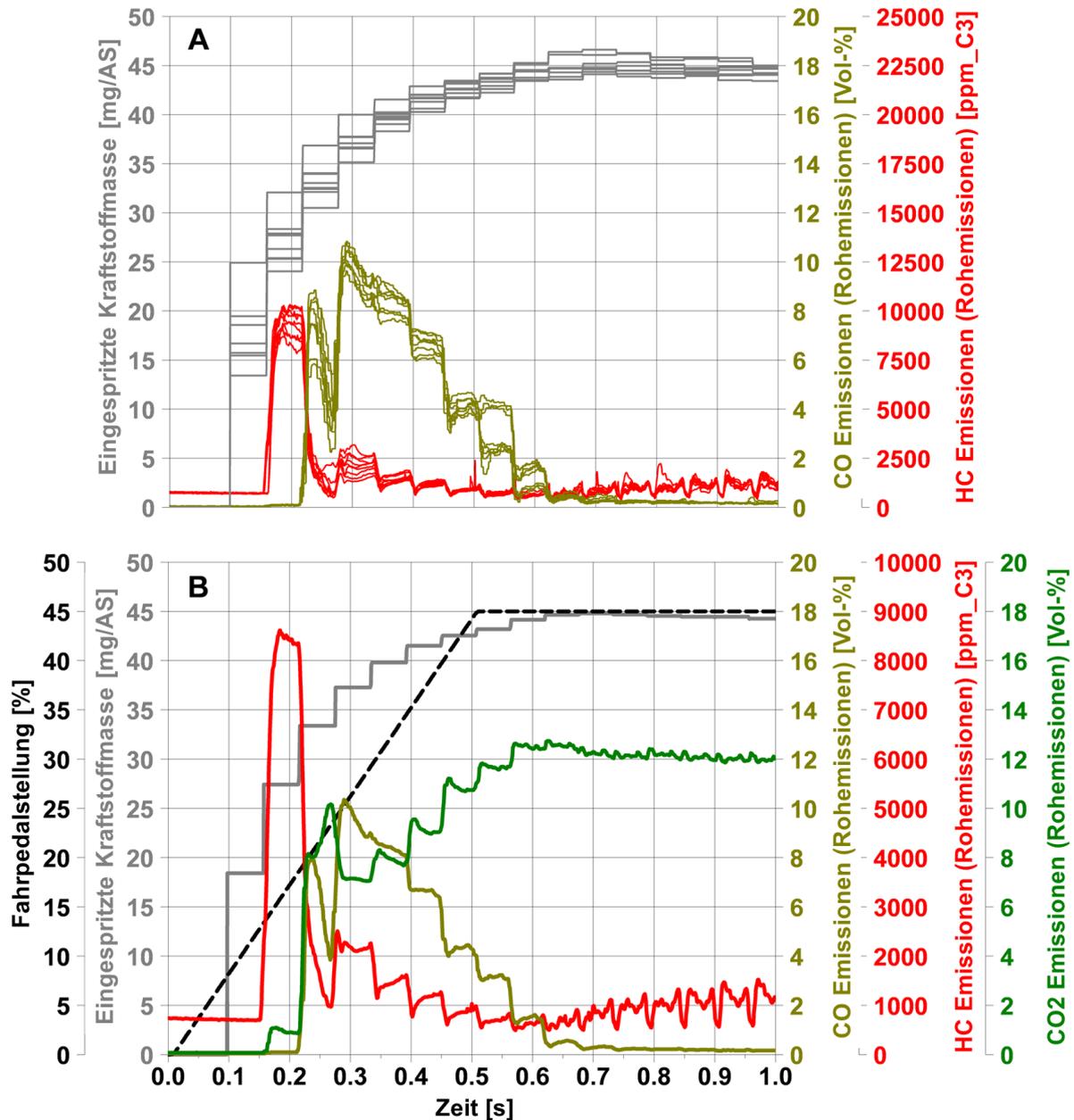


Abbildung 12: Messung der gasförmigen Rohemissionen und der eingespritzten Kraftstoffmasse von Zylinder 6

### 5.3 Messung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses

Als Ergänzung zu den Untersuchungen der Partikelemissionen und der gasförmigen Rohemissionen liefern die Voruntersuchungen des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses weitere Erkenntnisse zu den Vorgängen im Brennraum. In Abbildung 14 ist die Entwicklung des Luftverhältnisses für die vier verschiedenen Versuche (Exp. I-IV) jeweils für einen Ausschnitt aus dem Kompressionshub (180°KW v. ZOT bis 25°KW v. ZOT) dargestellt. Die Einzeldarstellungen beschreiben jeweils 40 aufeinanderfolgende Arbeitsspiele, beginnend mit der Einspritzfreigabe beim Tip-in. Alle Zyklen stellen Mittelwerte der zehn aufeinanderfolgenden Tip-ins eines jeden Prüflaufs dar. Die farblich abgesetzten Zyklen markieren den zeitlichen Übergang in den Stationärzustand.

Allen Versuchen gemein ist die deutlich überstöchiometrische Entwicklung des Luftverhältnisses im ersten Arbeitsspiel nach Einspritzfreigabe. Hierbei sind die Unterschiede zwischen den Versuchen vergleichsweise gering. Mit Ausnahme des initialen Zyklus zeichnen sich die ersten Arbeitsspiele durch einen unterstöchiometrischen Betrieb aus. Bereits nach zehn bis zwölf Zyklen entwickelt sich die Zylinderladung im Kompressionshub erwartungsgemäß in den stöchiometrischen Bereich. Jedoch lassen sich auch anhand der vier Versuche spezifische Charakteristiken bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Luftverhältnisses im Brennraum ableiten. Es ist zu erkennen, dass beispielsweise Experiment I einen starken Gradienten in der Homogenisierung aufweist, während im Experiment II bereits im unteren Totpunkt eine gute Homogenisierung des Gemisches sichergestellt ist. Ein Vergleich mit den dazugehörigen Experimenten mit kleinerem Momentengradienten (Experiment II und Experiment IV) zeigt, dass sich auch hier für die ersten Zyklen nach Freigabe der Einspritzung deutliche Gradienten in der Entwicklung des Luftverhältnisses ausbilden. Dennoch ist in beiden Versuchen bereits während der Lastaufschaltung nach ungefähr zehn Arbeitsspielen ein Zustand erreicht, in dem bereits eine vergleichsweise gute Homogenisierung ausgebildet ist. Mit Hilfe dieser Analyse kann auf die Einflüsse der verschiedenen Ladungswechselorgane und den damit einhergehenden Homogenisierungsgrad geschlossen werden.

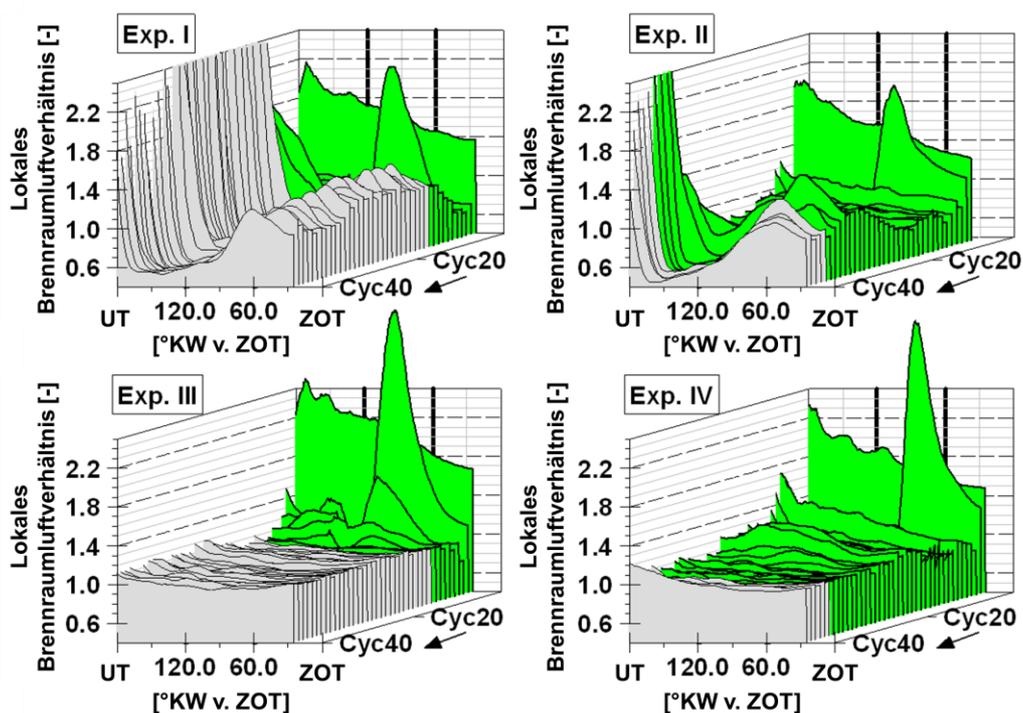


Abbildung 13: Vergleich des gemittelten lokalen Brennraumluftverhältnisses für die ersten 40 Zyklen der vier verschiedenen Lastsprungvarianten

### Einzelzyklusanalyse

Die Ergebnisse der ersten Projektphase haben verdeutlicht, dass die Analyse des transienten Motorbetriebs die Bewertung aufeinanderfolgender Einzelarbeitsspiele voraussetzt. In Abbildung 14 sind die Verläufe des Luftverhältnisses für zwei exemplarische Tip-ins aus den Versuchen I (Abbildung 14 B) und III (Abbildung 14 D) dargestellt. Die Darstellung beginnt mit dem ersten Zyklus nach der Einspritzfreigabe. Die Markierung für

den Versuch I hebt die ersten zehn Arbeitsspiele des Tip-ins hervor. Anhand des Farbindexes wird ersichtlich, dass das Aggregat in dieser Phase mit einem deutlich unterstöchiometrischen Gemisch betrieben wird. Dies unterstützt die Bildungsmechanismen für die Partikelemissionen und passt zu den deutlich erhöhten CO-Emissionen, wie sie in Abbildung 10 aufgeführt sind. Der untere Teil aus Abbildung 14 (Einzelversuche) verdeutlicht noch einmal die vergleichsweise schnellere Gemischhomogenisierung und auch das schnellere Erreichen des stöchiometrischen Betriebs für den Versuch III. Mit der Ermittlung des Brennraumluftverhältnisses einzelner Arbeitsspiele lassen sich die dynamischen Betriebsphasen detailliert analysieren und leisten dadurch einen wichtigen Beitrag zur Erklärung der Emissionsentstehung.

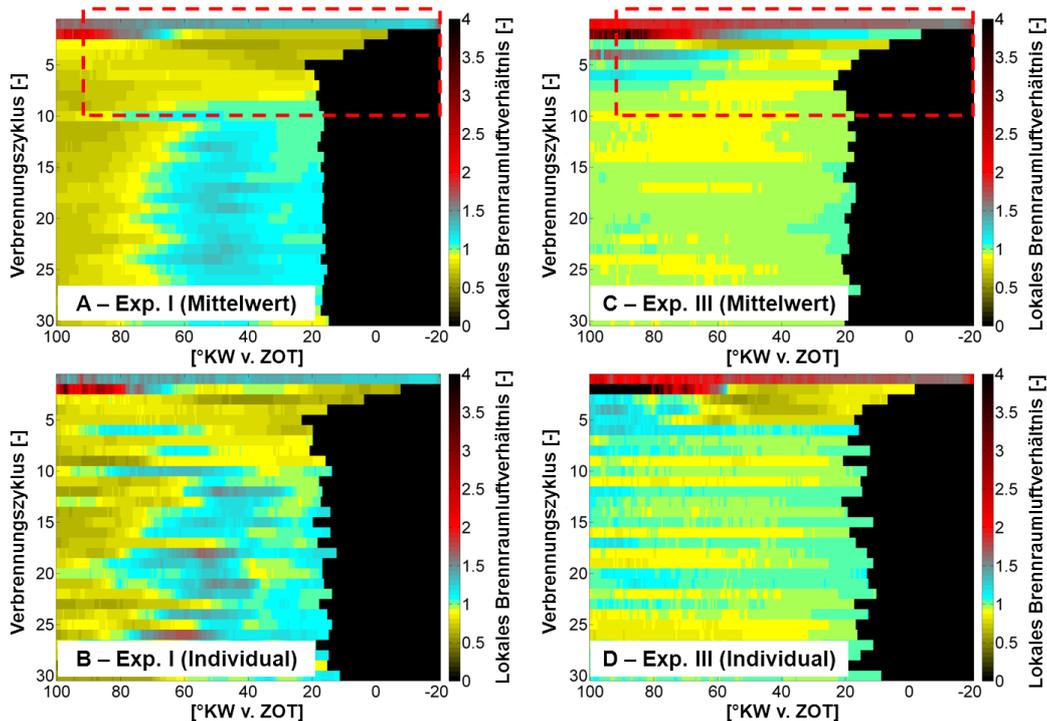


Abbildung 14: Lokales Brennraumluftverhältnis als Mittelwert und als Einzelzyklusanalyse für zwei verschiedene Lastsprungvarianten

### Korrelation optischer Messtechniken zur Identifikation von auffälligen Arbeitsspielen im transienten Motorbetrieb

Der simultane Einsatz der verschiedenen optischen Messverfahren ermöglicht neben den globalen Aussagen der verschiedenen Parametervariationen auch die Detailanalyse der Prozesszusammenhänge individueller Arbeitsspiele.

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse umfassen Lastsprünge deren Applikation auf kennfeldbasierten Parameteranpassungen beruhen. Etwaige Einflüsse einzelner motorischer Parameter sind deshalb nur bedingt zu extrahieren. Aus diesem Grund wurde im Folgenden der Einspritzzeitpunkt als bekannte Größe zur Beeinflussung der Partikelemissionen über den kompletten Lastsprung hinweg konstant gehalten. Der Einfluss der verschiedenen untersuchten Einspritzzeitpunkte ist in Kapitel 6.1.1 beschrieben.

Im Versuch mit  $SOI = 340^\circ\text{KW v. ZOT}$  war auffällig, dass im Verlauf der Infrarotabsorptionsspektroskopie für mehrere erste Arbeitsspiele noch ein Kraftstoffsignal nach dem Zündzeitpunkt zu detektieren war. Dies lässt auf einen vollständigen

Verbrennungsaussetzer oder eine allenfalls unvollständige Verbrennung schließen. In Abbildung 15 sind die zehn Einzelverläufe des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für das erste und zweite Arbeitsspiel des Lastsprungs (Variante 2) bei einem  $\text{SOI} = 340^\circ\text{KW v. ZOT}$  dargestellt. In beiden Darstellungen sind die zusammengehörigen Arbeitsspiele aus demselben Lastsprung farblich markiert. Es zeigt sich, dass trotz der identischen Zündwinkel im ersten Arbeitsspiel drei Sonderfälle zu detektieren sind. In allen Fällen ergibt sich ein stetiger Verlauf über den Zündzeitpunkt hinweg. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Flamme nach der Zündung nicht in das Messvolumen eingetreten ist. Dies geht in der Regel mit einem vollständigen Zündaussetzer einher. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich die auffälligen Arbeitsspiele auch im darauffolgenden Arbeitsspiel in ihrer Tendenz von den anderen unterscheiden. Vor allem die in grün und grau hervorgehobenen Verläufe zeigen im zweiten Arbeitsspiel einen deutlich unterstöchiometrischen Verlauf. Dies lässt den Schluss zu, dass diese Arbeitsspiele unter Voraussetzung identischer Steuerzeiten und eingespritzter Kraftstoffmasse ein vergleichsweise großer Anteil des eingespritzten Kraftstoffs aus dem vorangegangenen Arbeitsspiel im Brennraum verblieben sein muss.

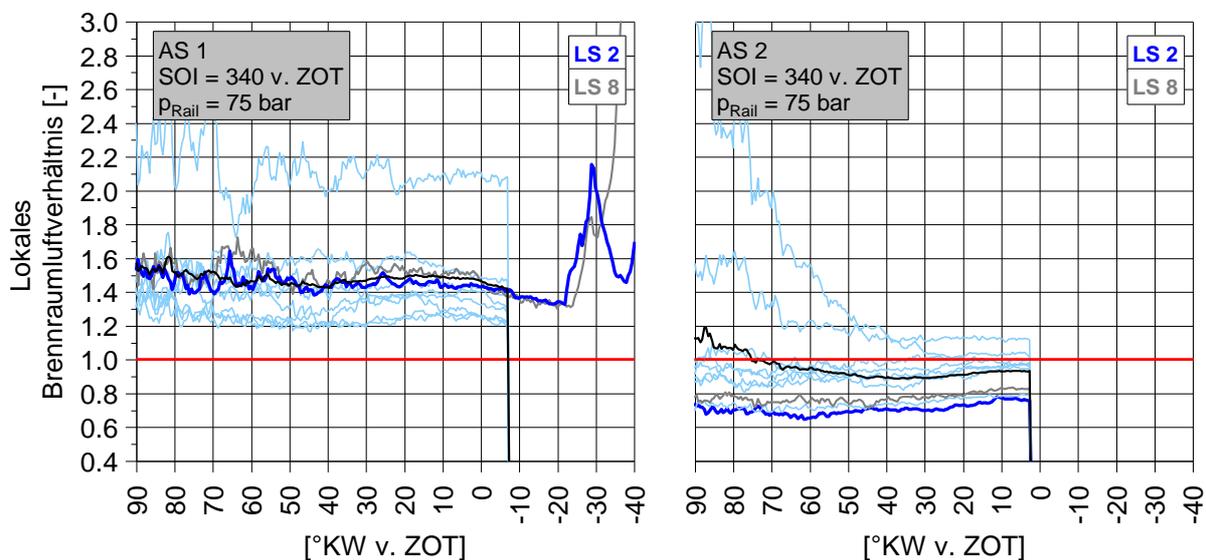
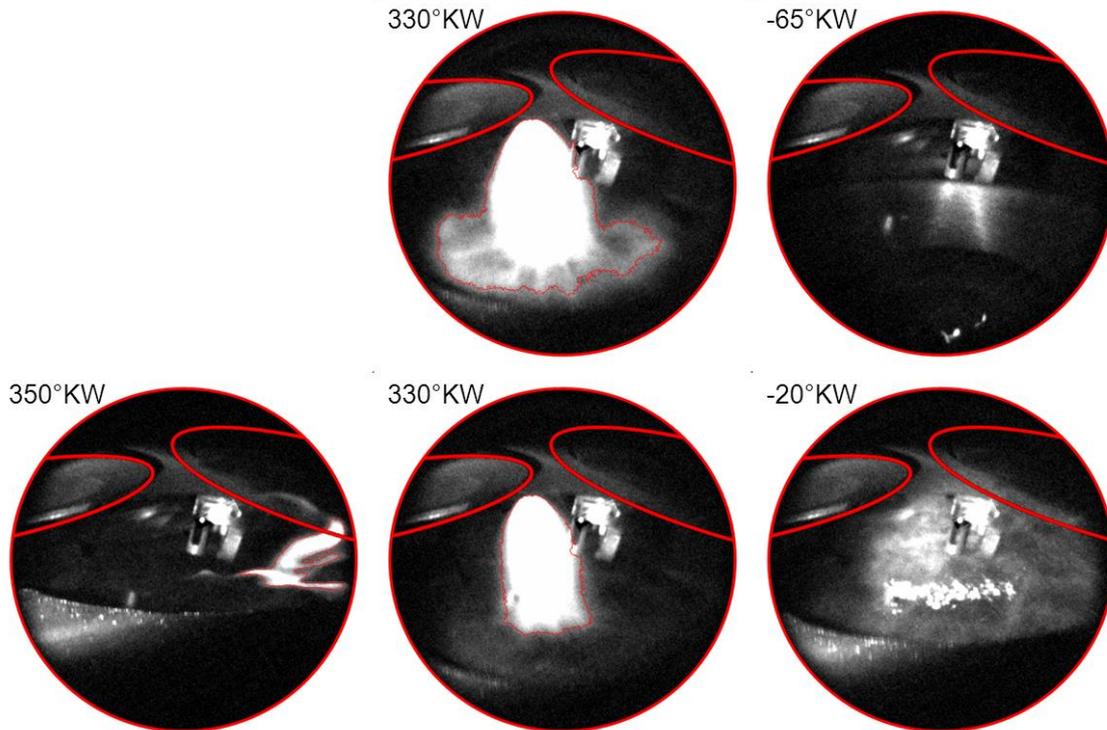


Abbildung 15: Verlauf des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für die ersten beiden Arbeitsspiele bei einem  $\text{SOI} = 340^\circ\text{KW v. ZOT}$

Eine Analyse der simultan aufgezeichneten High-Speed-Aufnahmen konnte weitere Rückschlüsse auf die innermotorischen Vorgänge der beiden in dunkelblau hervorgehobenen Arbeitsspiele des ersten Lastsprungs (LS1) geben. In Abbildung 16 sind fünf charakteristische Momentaufnahmen der beiden Arbeitsspiele dargestellt. Die obere Reihe beschreibt die Zustände des ersten Arbeitsspiels und die zweite Reihe Momentaufnahmen des zweiten Arbeitsspiels. Die Auswertung ergab, dass trotz regulärer Einspritzung im ersten Arbeitsspiel (siehe Aufnahme bei  $330^\circ\text{KW v. ZOT}$ ) und erkennbarer Auslenkung des Zündfunken keine unmittelbare Ausbreitung einer Flamme (im Nicht-UV-Bereich) detektiert werden konnte. Lediglich in der späten Expansion ( $65^\circ\text{KW n. ZOT}$ ) konnte auf dem Kolben ein kleiner Bereich mit Diffusionsverbrennung aufgezeichnet werden. Dass es zu einer lokalen Entzündung der Zylinderladung kam, war in dem darauffolgenden zweiten Arbeitsspiel bereits vor dem Einspritzvorgang zu sehen. Zu diesem Zeitpunkt

(350°KW v. ZOT) war erneut bzw. immer noch eine kleine diffuse Verbrennung auf dem Kolben und im Bereich des Auslassventils (rechter Bildrand) zu detektieren. Die anschließende Einspritzung (gekennzeichnet durch einen zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise geringeren Kolbenauftrag und einer eingeschnürten Form, 330°KW v. ZOT) und die folgende reguläre Verbrennung waren wieder gemäß dem Einspritztiming durch eine Diffusionsverbrennung auf dem Kolben (Poolfire, 20°KW n. ZOT) charakterisiert.



*Abbildung 16: Detektion des Mie-Streulicht-Signals zur Visualisierung der Kraftstoffeinspritzung und Aufzeichnung des Rußeigenleuchtens für zwei aufeinanderfolgende Arbeitsspiele aus dem Versuch mit einem SOI = 340°KW v. ZOT*

In der folgenden Beschreibung werden die Möglichkeiten des simultanen Einsatzes von optischer Messtechnik und der Messung der Partikelemissionen beschrieben. In Abbildung 17 sind die Verläufe der Partikelanzahlkonzentration, der Maxima für die gemittelte Bildintensität der High-Speed-Kameraaufnahmen zum Rußeigenleuchten sowie das Rohsignal der Zyklenmaxima des Rohsignals für den 950 nm - Kanal der erweiterten Zwei-Farben-Methode dargestellt. Zur Interpretation ist es wichtig, die Lage der Messstelle des jeweiligen Systems, gemäß des Prüfstandsbaus zu berücksichtigen. Während die Partikelemissionen das Ergebnis des Verhaltens des Gesamtaggregate darstellen, basieren die beiden Verläufe der optischen Messtechnik ausschließlich auf den innermotorischen Prozessen des Zylinders 6. Trotz dieser ungleichen Voraussetzungen ist zu sehen, dass der Verlauf der Partikelemissionen auch durch die Charakteristik der optischen Messtechnik wiedergegeben wird. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Abbildung 12, wonach die Ursache für die erhöhten Partikelemissionen während eines Lastsprungs innerhalb weniger Einzelzyklen zu Beginn der Lastaufschaltung zu finden sind.

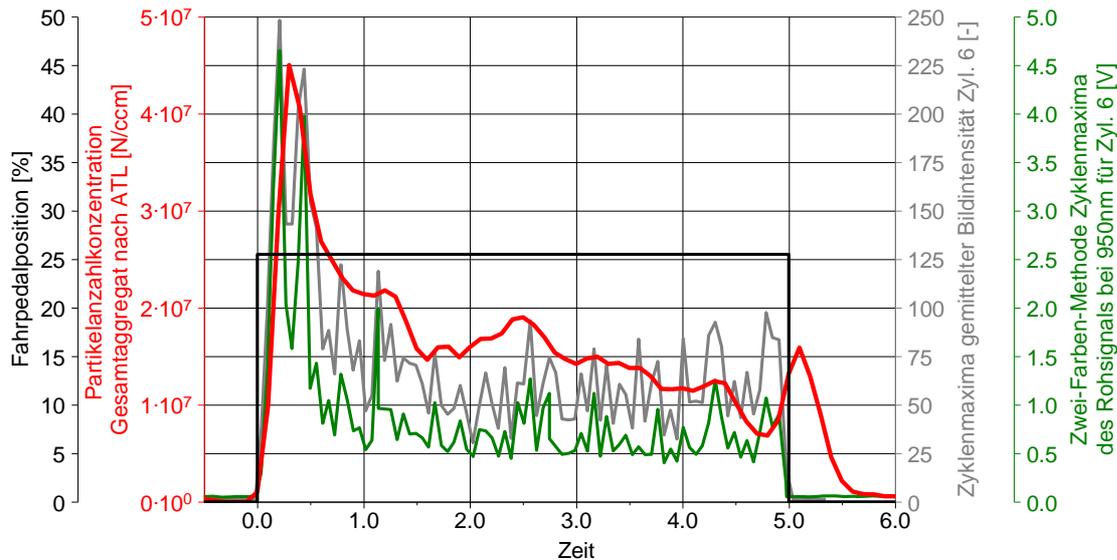


Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse optischer Messtechnik und der Partikelanzahlkonzentration

Ausgehend von den Ergebnissen in Abbildung 17 kann somit die optische Einzelzyklusanalyse weitere wichtige Hinweise liefern, wie, wann und wo im Brennraum die Partikelemissionen während der Lastaufschaltung entstehen und auch wieder reduziert werden (können).

## 6 Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse – Umweltnutzen

### Emissionsoptimierung im Gesamtfahrzeugkontext

Der Aufbau des hochdynamischen, echtzeitfähigen Prüfstandes erlaubt sowohl die Untersuchung elementarer transienter Prozesse als auch die Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkonzepte. Zu diesem Zweck wurde in der Fahrzeugsimulation eine Matlab/Simulink Schnittstelle genutzt, um das virtuelle Fahrzeug um die Komponenten eines eigens modellierten Hybridtriebstranges zu ergänzen. Auf diese Weise wird auch den Möglichkeiten durch den Einsatz alternativer Antriebe Rechnung getragen. Generell lassen sich Rohemissionen im Gesamtfahrzeugkontext über drei verschiedene Strategien beeinflussen.

- 1.) Konventioneller Optimierungsprozess prozessrelevanter Parameter (Motorsteuerung)  
→ **Applikationsstrategie**
- 2.) Veränderung des Einsatzes des Verbrennungsmotors im Gesamtfahrzeugkonzept (Verbrennungsmotor als integraler Bestandteil eines elektrifizierten Antriebsstrangs)  
→ **Betriebsstrategie**
- 3.) Auswahl und Verwendung eines alternativen Energieträgers (Möglichkeiten eines geeigneten biogenen Kraftstoffes zu Reduzierung der Rohemissionen)  
→ **Ressourcenstrategie**

Die Möglichkeiten zur Veränderung des Rohemissionsverhaltens der Applikationsstrategie und der Betriebsstrategie konnten in der ersten Projektphase bereits untersucht und nachgewiesen werden. Der Ansatz zur Beeinflussung durch die Ressourcenstrategie konnte anhand eines alternativen Kraftstoffes (Bioethanol-Mischkraftstoff) in der zweiten

Projektphase als zusätzliche Maßnahme untersucht werden. Ein emissionsoptimiertes alternatives Antriebskonzept der Zukunft zeichnet sich letztlich durch das mögliche Zusammenspiel aller drei Strategien aus.

## **6.1 Anwendungsbeispiel Applikationsstrategie**

Beim homogen betriebenen Ottomotor kommt der Kraftstoffeinspritzung und der anschließenden Gemischbildung hinsichtlich der Emissionsentstehung besondere Bedeutung zu. Der Einfluss etwaiger Kraftstoffaufträge auf vergleichsweise kalte Brennraumwände stellt beispielsweise eine zentrale Herausforderung zur Verringerung der Partikelrohmissionen dar. Aufgrund der relativen Kolbenbewegung während des Einspritzvorgangs spielen sowohl der Einspritzzeitpunkt als auch der Kraftstoffeinspritzdruck eine tragende Rolle. Eine Erhöhung des Kraftstoffeinspritzdruckes ohne Veränderung des Einspritzzeitpunktes kann trotz des verbesserten Strahlerfalls aufgrund der erhöhten Eindringtiefe und somit möglich resultierender Wandaufträge zu mehr Partikelemissionen führen. Im Kontext des dynamischen Motorbetriebs kommt zudem hinzu, dass sich die Oberflächentemperaturen von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel ändern und die ideale Abstimmung somit einen zusätzlichen temperaturabhängigen Aspekt beinhaltet.

### **6.1.1 Variation des Einspritzzeitpunktes**

In Abbildung 18 sind die kurbelwinkelaufgelösten Verläufe des lokalen Brennraumluftverhältnisses für vier verschiedene Einspritztimings visualisiert. Basis ist das jeweils dritte Arbeitsspiel nach der Einspritzfreigabe (AS 3). Die Verläufe unterscheiden sich sowohl in ihrer Charakteristik als auch im Wert des erreichten Zündlambdas. Während die Versuche bei SOI = 340°KW v. ZOT und 300°KW v. ZOT vergleichsweise wenig Fluktuationen aufweisen sind diese für die beiden Versuche bei 260°KW v. ZOT und 220°KW v. ZOT deutlich stärker. Bei SOI = 220°KW v. ZOT erreicht die Streuung des lokalen Brennraumluftverhältnisses im dargestellten Bereich Werte von 0,6 bis 1,2, während es bei SOI = 340°KW v. ZOT zwischen 0,85 und 1,05 variiert. Darüber hinaus unterscheiden sich die Versuche auch in der kurbelwinkelbezogenen Entwicklung des Brennraumluftverhältnisses. Während die beiden Versuche mit vergleichsweise früheren Einspritztimings bereits bei 120°KW v. ZOT ein Brennraumluftverhältnis im Bereich des gewünschten Zündlambdas ausweisen, folgen die Verläufe der beiden Versuche mit vergleichsweise späteren Einspritztiming noch einer deutlichen Veränderung während des Kompressionshubs.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

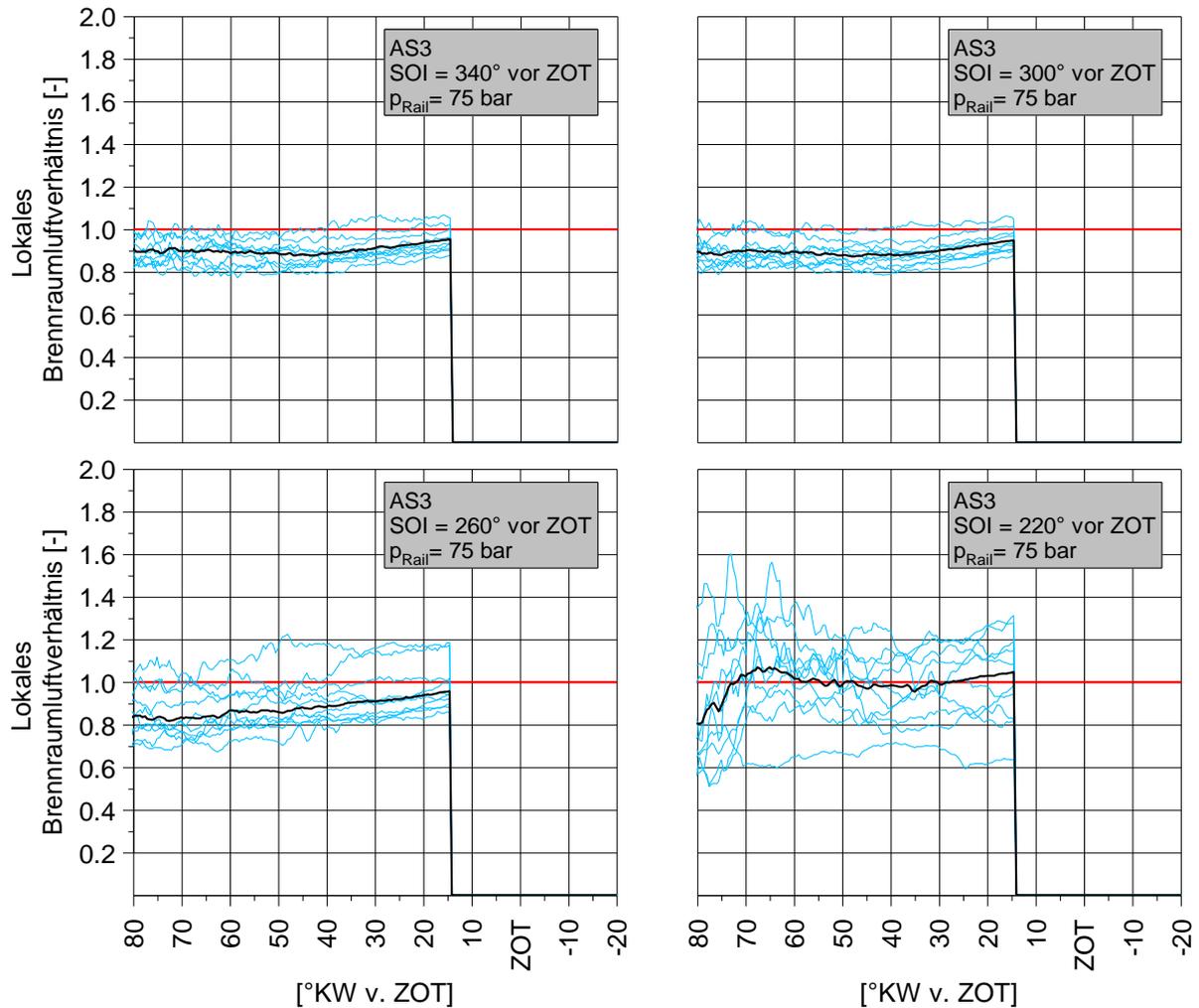


Abbildung 18: Vergleich des lokalen Brennraumluftverhältnisses für das dritte Arbeitsspiel (AS 3) im Lastsprungversuch 2 unter Variation des Einspritztimings (SOI)

Abbildung 19 zeigt Ergebnisse der SOI Variation bei einem erhöhten Raildruck von 190bar bezüglich der Partikelanzahlemissionen. In den Größenverteilungen (rechts) ist zu sehen, dass sich die die Anzahl mit späteren Einspritztimings verringert. Außerdem verschiebt sich das Spektrum im hinteren Teil des Lastsprunges hin zu kleineren Partikeln. In Abbildung 19 links ist Außerdem das Ergebnis der optischen Analyse bezüglich Rußleuchten zu dargestellt. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit wurde hier jeweils für 10 aufeinanderfolgende Verbrennungszyklen bestimmt. Für das Einspritztiming 300°KW v.ZOT wird deutlich eine Diffusionsflamme in Kolbennähe detektiert. Für SOI 260 und 220 befindet sich in Nähe der ICOS Sondermesszündkerze eine Diffusionsflamme, was die Erhöhung der Partikelemissionen in frühen Phasen des Lastsprunges erklären könnte.

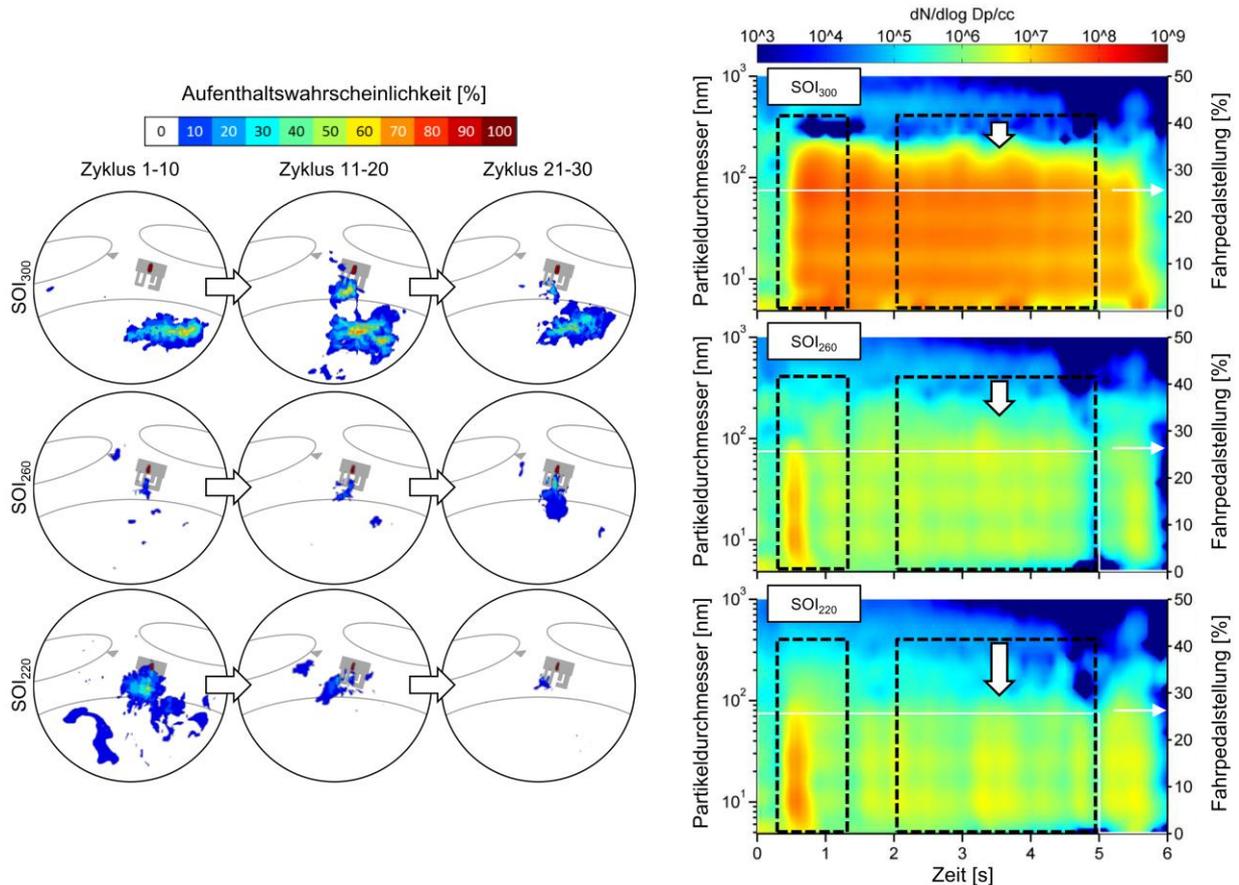


Abbildung 19: Partikelgrößenverteilung (rechts) und Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Rußstrahlung im Brennraum (links) für SOI Variation

### 6.1.2 Variation des Kraftstoffeinspritzdruckes

Die Auswertung der Versuche haben gezeigt, dass ein möglicher Parameter zur Verbesserung des transienten Motorbetriebs vor dem Hintergrund der Applikationsstrategie, die Erhöhung des Kraftstoff-Einspritzdruckes darstellt. Zu diesem Zweck wurde eine Variation des Kraftstoff-Einspritzdruckes (Raildruck) über einen Lastsprung hinweg erprobt. Der Raildruck wurde jedoch nicht im gesamten Kennfeldbereich verändert, sondern lediglich im niedrigeren Lastbereich erhöht. In der Abbildung 20 ist der Einfluss der Raildruckerhöhung zu Beginn des Lastsprungs dargestellt. Während der Ausgangszustand (rote Linie) zu einem deutlichen Peak zu Beginn des Lastsprungs neigt, sind bei der Variante mit dem erhöhten Raildruck (grüne Linie) nur geringfügig höhere Emissionen zu detektieren als dies im stationären Anteil (1,5 - 2,5 Sekunden) der Fall ist. Die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen konnten durch diese Maßnahme in der Initialphase des Lastsprungs somit um nahezu eine vollständige Größenordnung reduziert werden.

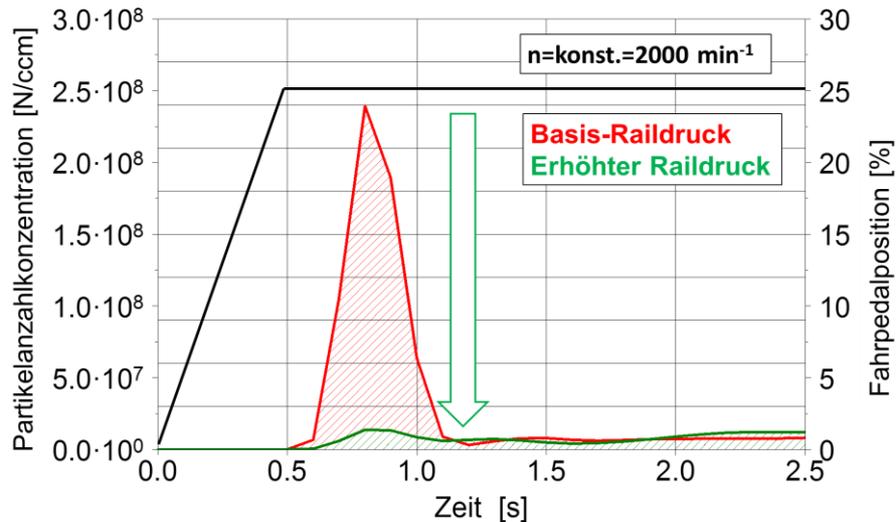


Abbildung 20: Einfluss eines erhöhten Kraftstoff-Einspritzdruckes auf die Partikelanzahlkonzentration während eines Lastsprungs als Mittelwert aus zehn Wiederholungen

In Ergänzung zu den Ausführungen aus 6.1.1 wurde auch für die höheren Kraftstoffeinspritzdrücke der Einspritzzeitpunkt variiert und hinsichtlich seiner Entwicklung des lokalen Brennraumluftverhältnisses analysiert. In Abbildung 21 ist der Einfluss des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf die lokale Entwicklung des Brennraumluftverhältnisses visualisiert. Die Darstellungen beschreiben die Verläufe des fünften Arbeitsspiels nach Einspritzfreigabe (AS 5). Im direkten Vergleich wird deutlich, dass der erhöhte Kraftstoff-Einspritzdruck zu einer Verringerung der Fluktuationen führt. Insbesondere die Versuche bei  $\text{SOI} = 300^\circ\text{KW v. ZOT}$  und  $220^\circ\text{KW v. ZOT}$  zeigen eine deutliche Verbesserung der Streuung zum Zündzeitpunkt.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

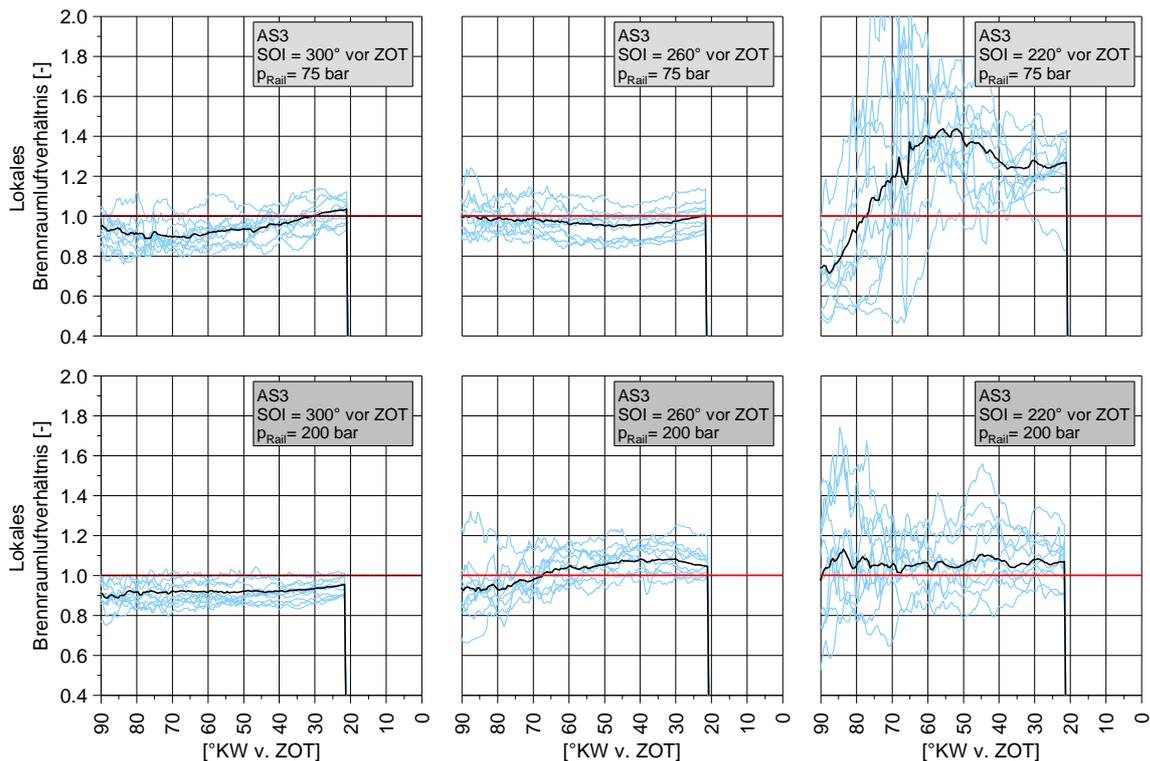


Abbildung 21: Einfluss des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf das lokale Brennraumluftverhältnis im fünften Arbeitsspiel (AS 5) unter Variation des Einspritztimings (SOI)

In Abbildung 22 sind die Partikelanzahlkonzentrationen als Mittelwert aus den zehn Einzellastsprüngen (Lastsprungversuch 2) für die SOI-Variationen bei erhöhtem Kraftstoff-Einspritzdruck dargestellt. Anhand der Ergebnisse ist zu sehen, dass ein spätes Einspritztiming sowohl in der initialen Phase eines Lastsprungs als auch in der Lasthaltephase zur deutlichen Reduktion der Partikelanzahlkonzentration führt. Somit ist für den untersuchten Lastsprung der Einfluss der kürzeren zur Verfügung stehenden Zeit zur Homogenisierung im Vergleich zum Risiko einer Kraftstoffbenetzung/-auftrag von Brennraumoberflächen vernachlässigbar. Allen drei Variationen gemein ist die Charakteristik, dass zu Beginn des Lastsprungs die jeweiligen Maximalwerte erreicht werden. Während sich für die vergleichsweise späteren Einspritztimings bereits nach ca. 0,5 Sekunden ein stationärer Zustand für die Partikelemissionen einstellt, ist dies für das  $\text{SOI} = 300^\circ \text{KW v. ZOT}$  nicht der Fall. Für diesen Versuch stellt sich eine stetige Reduktion der Partikelanzahlkonzentration bis hin zur Lastwagnahme ein und bestätigt somit die Theorie, dass der Verlauf der Partikelemissionen für dieses Timing maßgeblich durch einen Kraftstoffauftrag auf die Brennraumoberflächen geprägt ist. Denn dieser kann mit zunehmenden Oberflächentemperaturen leichter verdampfen als dies bei kalten Brennraumoberflächen zu Beginn des Lastsprungs der Fall ist. Trotz der zunehmenden Brennraumtemperaturen erreicht dieser Versuch zu keinem Zeitpunkt das Partikelemissionsniveau der vergleichsweise späteren Einspritztimings. In Abbildung 22 sind ergänzend zwei Beispielaufnahmen für das Rußeigenleuchten dargestellt. Diese bestätigen die zuvor beschriebenen Verläufe. In der linken Darstellung ist eine Momentaufnahme aus dem 16. Arbeitsspiel ( $54^\circ \text{KW n. ZOT}$ ) für ein  $\text{SOI} = 300^\circ \text{KW v. ZOT}$  visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine intensive Diffusionsverbrennung auf der Kolbenoberfläche aufgezeichnet werden kann.

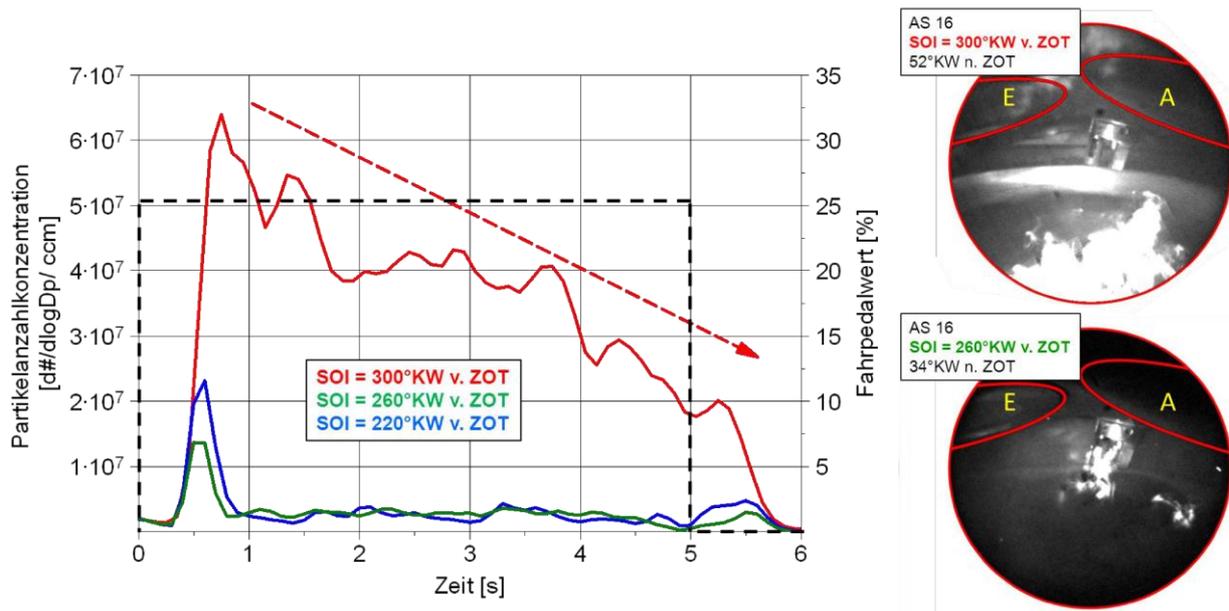


Abbildung 22: Oben: Partikelemissionen in Abhängigkeit des SOI für die Lastsprungvariante 2, gemessen am Auslassventil des Einzelzylinders (Zylinder 6). Unten: Beispielaufnahmen zur innermotorischen Entwicklung des Rußeigenleuchtens für verschiedene SOI.

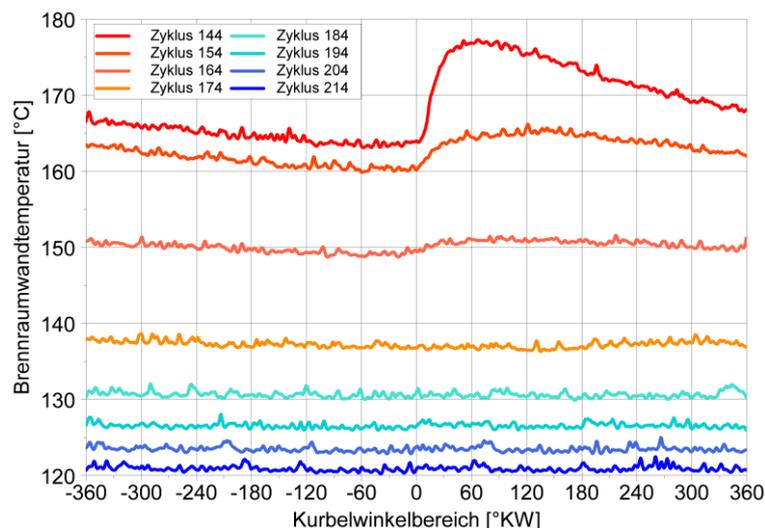
Für die Versuche mit späteren Einspritztimings ( $\text{SOI} \leq 260^\circ\text{KW v. ZOT}$ ) konnte in keinem der Arbeitsspiele eine Diffusionsflamme an der Kolbenoberfläche detektiert werden. Die rechte Darstellung in Abbildung 22 visualisiert für ein  $\text{SOI} = 260^\circ\text{KW v. ZOT}$  ebenfalls eine Momentaufnahme aus dem 16. Arbeitsspiel. Im Vergleich zur Darstellung des späten Einspritztimings zeigt diese Aufnahme jedoch, dass bereits  $34^\circ\text{KW n. ZOT}$  schon eine deutlich geringere Intensität im Brennraum zu detektieren ist. Die Hauptquelle für die Partikelemissionen sind in dieser Phase im Zündkerzenbereich festzustellen. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Motor im unteren Teillastbereich, so dass die Temperaturentwicklung an der Sondermesskerze noch nicht ausreicht, um den durch die Einspritzung aufgetragenen Kraftstofffilm wieder rechtzeitig zu verdampfen. Zu späteren Zeitpunkten in der Lasthaltephase ist dies nur noch geringfügig bzw. nicht mehr festzustellen. Ein vergleichsweise späteres Einspritztiming ist somit vorteilhaft auf die initiale Entwicklung der Kolbenoberflächentemperatur zu Beginn des Lastsprungs. Zwei Effekte sind hier in direkter Abhängigkeit wirksam. Zum einen führt der grundsätzlich geringere Kraftstoffauftrag auf dem Kolben zur Reduktion der Diffusionsverbrennung auf der Kolbenoberfläche und zum anderen erhöht sich aufgrund der reduzierten Kühlung (durch den verringerten Kraftstoffauftrag) die Kolbentemperatur schneller, was wiederum die Verdampfung des möglicherweise unvermeidbaren Kraftstofffilmauftrags verbessert. Den Vorteilen in Bezug auf die Partikelemissionen stehen für die späten Einspritztimings jedoch die Nachteile bezüglich Laufruhe aufgrund der erhöhten Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen (als Folge aus der schlechteren Homogenisierung) gegenüber.

## 6.2 Anwendungsbeispiel Betriebsstrategie

### Hybridisierung als Synergie der Antriebssysteme E-Traktion und VKM

Neben den konventionellen Applikationsmöglichkeiten können die konzeptbedingten Nachteile eines Verbrennungsmotors auch durch den Einsatz erweiterter Antriebsstrangkonzepte kompensiert werden. Die systembedingten Probleme des Verbrennungsmotors sind im hochdynamischen Betrieb durch Herausforderungen in der

Mess- und Regelungstechnik verschiedener Prozessgrößen sowie in den thermo- und/oder fluiddynamischen Veränderungen zu finden. Als Beispiel kann hier der Einfluss kalter Brennraumwände bei Einspritzfreigabe nach dem Schubbetrieb aufgeführt werden. Unter Einsatz eines vollvariablen Ventiltriebs (Einlassventilhub und Phasenlage) kann dies durch eine maximale Spreizung von Ein- und Auslassnockenwelle bei gleichzeitig minimalem Einlassventilhub reduziert werden. Generell gilt, dass das Durchströmen der kalten angesaugten Luft im Schubbetrieb die Brennraumoberflächen deutlich abkühlt. In der Abbildung 23 ist das Abkühlen im Zylinderkopf zwischen den beiden Einlassventilen dargestellt. Zur Ermittlung wurde hierfür ein Dummy in den optischen Zugang 3 platziert, welcher mit einem NiCrNi-Mantelthermoelement ausgestattet ist. Um das Ansprechverhalten des Mantelthermoelementes zu erhöhen, wurde dieses oberflächenbündig zum Brennraum hin eingelötet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Temperatur an diesem Thermoelement bereits nach 40 Zyklen im Schubbetrieb um mehr als 40°C gesenkt hat (Zyklus 144 = letztes gefeuertes Arbeitsspiel)

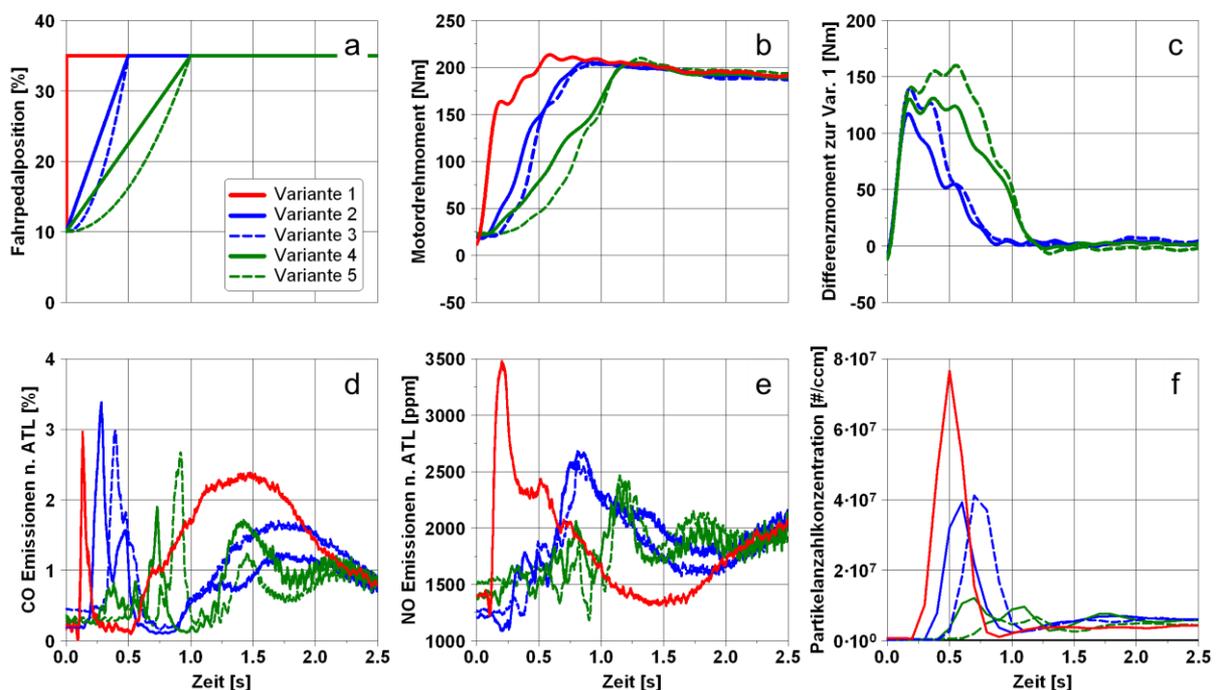


*Abbildung 23: Abkühlung der Brennraumoberfläche (Zylinderkopf) im Schubbetrieb, gemessen mit einem oberflächenbündigen NiCrNi-Mantelthermoelement*

Die Abkühlung der Brennraumoberflächen führt bei Wiedereinsetzen der Einspritzung (Tip-in) zu einem schlechten Verdampfungsverhalten des Kraftstoffs, der während der Einspritzung auf die Brennraumoberflächen aufgetragen wurde. Dadurch kommt es zur Diffusionsverbrennung von unterstöchiometrischen Bereichen im Brennraum. In Abhängigkeit des Lastwunsches für den Tip-in wird die eingespritzte Kraftstoffmasse von Zyklus zu Zyklus deutlich erhöht. Je größer die eingespritzte Kraftstoffmasse, bei vergleichsweise kalten Brennraumoberflächen, desto mehr Bereiche mit diffusiver Verbrennung sind zu erwarten. Jedoch nimmt die Temperatur an der Oberfläche schon nach wenigen Arbeitsspielen deutlich zu, so dass der Effekt nach mehreren Verbrennungszyklen eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund ist es zielführend die ersten Arbeitsspiele nach Einspritzfreigabe mit möglichst geringer eingespritzter Kraftstoffmasse zu betreiben. Dies führt zu einem „Vorkonditionieren“ der Brennraumoberflächen für die nachfolgende Einbringung größerer Kraftstoffmassen, wie es während des Lastsprungs notwendig ist. Der geringere Betrag an eingebrachter Kraftstoffmasse in den ersten Arbeitsspielen resultiert allerdings auch in einem zeitlich veränderten Aufbau des indizierten

Mitteldrucks ( $p_{mi}$ ) und somit auch der Fahrzeugbeschleunigung. Um diesen Effekt auszugleichen bieten verschiedene Hybridtriebstränge, die Möglichkeit, den verzögerten Momentenaufbau des Verbrennungsmotors durch eine kurzzeitige Unterstützung mittels Elektromotor auszugleichen. Die sogenannte Phlegmatisierung sorgt durch eine optimierte Momentenformung für zeitlich veränderte thermische Entwicklungen im Brennraum und ist deshalb ein vielversprechendes Mittel, die Emissionen der initialen Verbrennungszyklen eines Lastsprungs signifikant zu beeinflussen.

In der Abbildung 24 sind die Ergebnisse für fünf verschiedene Momentenformungen eines Lastsprungs beispielhaft dargestellt. Neben den Vorgaben der Fahrpedalverläufe sind das effektive Motordrehmoment das notwendige Differenzdrehmoment zum Referenzfall (Variante 1), die gasförmigen Emissionen CO und NO sowie die resultierenden Partikelanzahlkonzentrationen der Varianten 1-5 dargestellt.



*Abbildung 24: Einfluss der Momentenformung auf die Emissionen während des Lastsprungs*

Anhand der Ergebnisse aus Abbildung 24 ist zu erkennen, dass sich durch die kurzzeitige Momentenformung eine Differenz zum tatsächlichen effektiven Motordrehmoment von maximal 160 Nm ergibt (Vergleich Variante 5 und Variante 1). Unter der Annahme, dass dieses Defizit des verbrennungsmotorischen Drehmoments im virtuellen Hybridtriebstrang durch das Drehmoment eines Elektromotors ausgeglichen wird, können die Spitzenwerte der Partikelanzahlkonzentrationen auf ein Viertel der Ausgangssituation reduziert werden. Hervorzuheben ist an dieser Stelle der kurze Zeitraum, in dem die Phlegmatisierung eingesetzt wird. Bereits die Momentenformung in der allerersten Sekunde nach Einspritzfreigabe kann schon zu dieser deutlichen Reduktion der Rohemissionen genutzt werden.

Die Darstellungen in Abbildung 24 zeigen, dass sich durch die kurzzeitige Momentenformung eine Differenz zum tatsächlichen effektiven Motordrehmoment von maximal 160 Nm ergibt. Unter der Annahme, dass dieses Drehmoment im virtuellen Hybridtriebstrang ausgeglichen wird, muss das Kennfeld des Elektromotors unter der möglichen Berücksichtigung einer Überlast auf dieses maximale Moment ausgelegt sein.

In Bezug auf die Ergebnisse der Emissionen sind die Unterschiede bei gasförmigen Emissionen nicht so stark ausgeprägt wie bei den Partikelemissionen. Die Spitzenwerte der CO-Emissionen unterscheiden sich für die Varianten 1-3 nur geringfügig. Wenn man den dargestellten Zeitbereich bis zu den 2,5 Sekunden (alle Varianten haben denselben stationären Zustand erreicht) betrachtet, wird deutlich, dass der schnellstmögliche Momentenaufbau auch nach dem Peak, zu Beginn der Lastaufschaltung, erneut Werte erreicht, die auf demselben Niveau der Spitzenwerte von Variante 4 und 5 liegen.

Auf dieser Basis erfolgte die Integration einer Betriebsstrategie in das virtuelle Fahrzeugmodell der Engine-in-the-Loop Versuchsumgebung. Zu diesem Zweck wurde das Basisfahrzeug als P2-Hybrid Variante erweitert. Das zusätzliche Mehrgewicht des permanent erregten Synchronmotors (40 kW/210 Nm), der Lithium-Ionen-Batterie (96 Zellen, Nominalspannung=317 V, Spannungsbereich=200V bis 385 V, Nominalkapazität= 4 Ah), und der Leistungselektronik wurde mit 100 kg (75 kg direkt hinter der Vorderend 25 kg im Bereich der Hinterachse) in der Fahrzeugsimulation berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der elektrische Antrieb samt der Leistungselektronik in der Lage ist, das erforderliche Drehmoment während der Kurzzeitentkopplung (max. 2 Sekunden) auszugleichen.

In Abbildung 25 ist ein schematisches Ablaufdiagramm zur Beschreibung der regelbasierten Betriebsstrategie dargestellt. Die Veränderung des Fahrpedals beschreibt den Hauptpfad. Das angeforderte Drehmoment wird in Form des Fahrpedals für jeden Simulationszeitschritt (1 kHz) in der closed-loop-Regelung berechnet. Zu diesem Zweck wird der aktuelle Fahrpedalwert bzw. der Verlauf zum Zeitpunkt  $x$  ( $t_x$ ) zunächst abgeleitet. Dadurch wird ermittelt, ob es sich um einen Beschleunigungs-, Lasthalte- oder Verzögerungszustand handelt ①. Bei einer Verzögerung wird die Rekuperation eingeleitet. Diese ist für die Untersuchung mit dem Fokus auf das Beschleunigungsvermögen nicht relevant. Sofern ein Beschleunigungs- oder Lasthaltewunsch vorliegt, wird geprüft, ob das gewünschte Drehmoment durch die Elektrotraktion kompensiert werden kann ②. Dies geschieht durch einen Abgleich der hinterlegten Drehmomentkennfelder auf Basis der aktuellen Drehzahl für den Elektro- und Verbrennungsmotor. Sofern das zum Fahrpedalwert ( $\alpha$ ) korrespondierende Drehmoment unterhalb des systemabhängigen Maximalwertes ( $\alpha_{max}$ ) liegt, wird der Schalter ④ zugunsten der Phlegmatisierung geschlossen. Dies bedeutet, dass der Fahrpedalwert auf Basis eines PT1-Glieds ③ entsprechend verformt wird und dann als neuer Fahrpedalwert zum Zeitpunkt  $x + 1$  ( $t_{x+1}$ ) an das Steuergerät des Verbrennungsmotor weitergegeben wird. Bei einer Überschreitung des Maximalwertes wird der Fahrpedalwert am Schalter ④ ohne Veränderung an das Steuergerät des Verbrennungsmotors weitergegeben.

Für die Ermittlung des notwendigen Differenzdrehmomentes ( $\Delta$ ) wird das Drehmoment des Verbrennungsmotors auf Basis des Eingangsfahrpedalwerts mit dem des veränderten Fahrpedalwerts verglichen ⑤ und als Anforderung an das Kennfeld des Elektromotors ⑥ weitergegeben und daraus die aktuellen Anforderungen an den Elektromotor ⑦ abgeleitet. Das Drehmoment des modellierten Elektromotors wird dann zu dem Drehmoment des phlegmatisierten Verbrennungsmotors addiert ⑧ und anschließend als Antriebsmoment an das Fahrzeugmodell in der Engine-in-the-Loop Umgebung ⑩ übergeben. Nicht dargestellt sind im schematischen Ablaufdiagramm die Abhängigkeiten zum Ladezustand der Lithium-Ionen-Batterie (SOC) ⑧ und zur Fahrzeuggeschwindigkeit.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

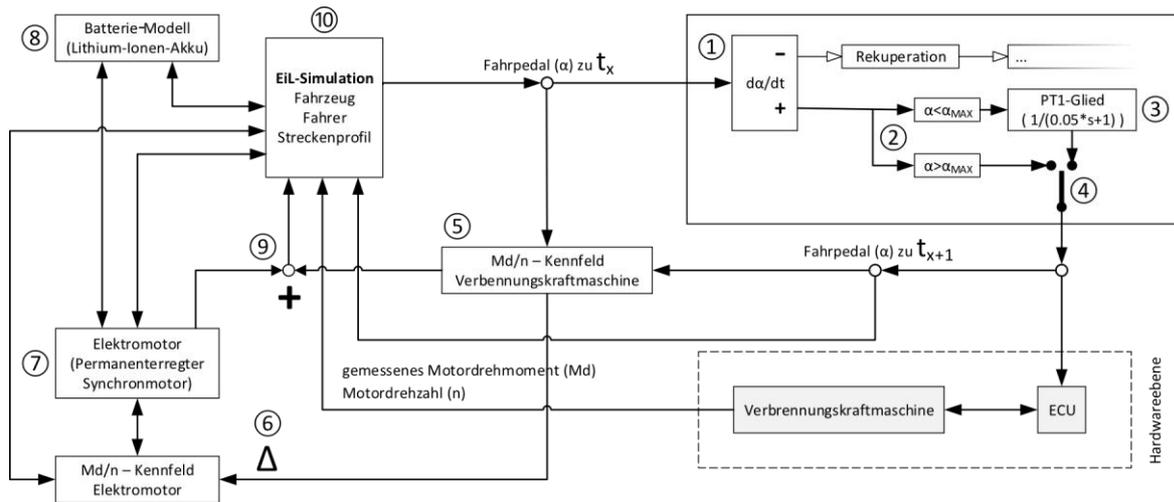


Abbildung 25: Schematisches Ablaufdiagramm zur Beschreibung der regelbasierten Betriebsstrategie für die Momentenverlaufsformung in Beschleunigungsphasen [DIS2017]

In einer modifizierten Variante ist es möglich, die Ausgangssituation so zu gestalten, dass das Fahrpedal bis zur Einspritzfreigabe dem ursprünglichen Verlauf folgt und erst dann die parametrisierte Verlaufsformung vollzieht. In Abbildung 26 ist dies als Auszug ( $t=5$  s) aus dem Slalombereich des ET-Zyklus dargestellt. Das Spraytargeting des Injektors neigt zu Benetzung der Brennraumoberflächen und ist somit hinsichtlich der Partikelrohmissionen in der Lastsprungdynamik besonders kritisch. Der Vergleich der Partikelanzahlkonzentrationen  $\textcircled{E}$  und  $\textcircled{F}$  zeigt, dass sich durch die Hybridisierung für beide Beschleunigungsvorgänge eine deutliche Reduktion der Spitzenwerte erzielen lässt. Für die erste Lasterhöhung ist kein Peak zu Beginn zu detektieren und im zweiten Fall ergibt sich eine Reduktion der Spitzenwerte um mehr als 75 %. Die Maßnahme kompensiert somit die Nachteile einer unzureichenden dynamischen Applikation samt der Defizite eines nicht idealen Spraytargetings.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

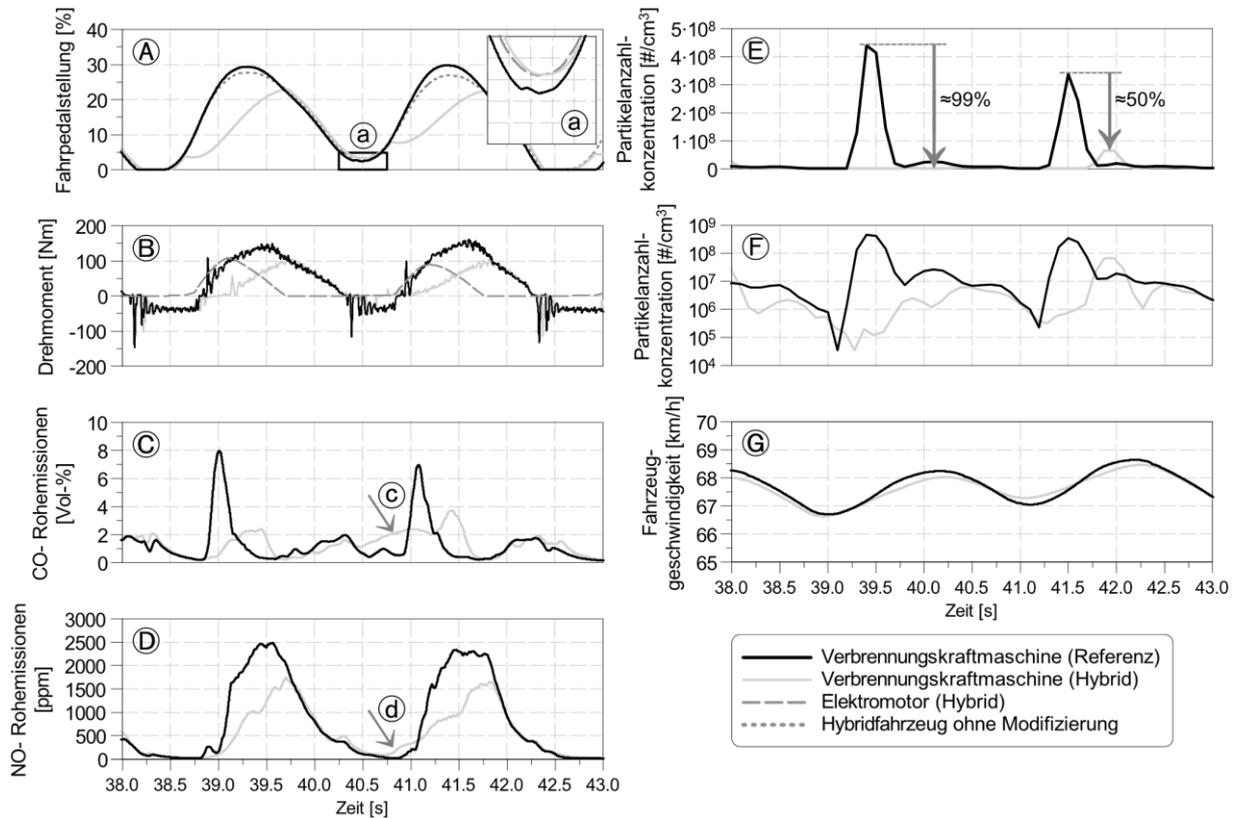


Abbildung 26: Phlegmatisierung während der Slalomfahrt. Vergleich der Fahrpedalverläufe aus der regelbasierten Betriebsstrategie (A), der Drehmomentverläufe (B), der CO-Rohemissionen (Linie 1, nach Auslassventil) (C), der NO-Rohemissionen (Linie 1) (D), der Partikelrohmissionen (E) + (F) und der Fahrzeuggeschwindigkeit (G) [DIS2017]

Die Analyse der CO-Rohemissionen (C) zeigt zusätzliches Optimierungspotential. Für beide Lastanhebungen ergeben sich deutlich reduzierte Spitzenwerte. Dies ist in erster Linie auf die Möglichkeit zurückzuführen, dass die phlegmatisierte Lastanhebung mit deutlich weniger unterstöchiometrischen Arbeitsspielen vollzogen wird, als dies für die schnelle Lastaufschaltung der Fall ist. Im Gegensatz zum Referenzergebnis weist die modifizierte Variante höhere CO-Emissionen vor der zweiten Lastanhebung auf (C). Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass das Fahrpedal in der Zwischenphase oberhalb der Schubabschaltung verbleibt (siehe Detail (a)). Das Fahrermodell ist für beide Versuche identisch. Dies lässt darauf schließen, dass die minimal veränderte Fahrdynamik aufgrund der Momentenunterschiede zu einer leicht abweichenden Manövercharakteristik führt. Ein Blick auf die Fahrzeuggeschwindigkeit zeigt aber, dass der Geschwindigkeitsunterschied zu keinem Zeitpunkt im Beobachtungsbereich 0,3 km/h übersteigt. Eine Verbesserung der NO-Rohemissionen (D) konnte auch in der modifizierten Variante reproduzierbar nachgewiesen werden. Die Spitzenwerte fallen in der modifizierten Variante um mehr als 500 ppm niedriger aus und auf Basis eines zeitbasierten Vergleichs teilweise um mehr als 1000 ppm.

Auf Basis der in Abbildung 26 gezeigten Ergebnisse wird deutlich, dass durch die implementierte regelbasierte Betriebsstrategie simultan CO-, CO<sub>2</sub>-, NO- und auch Partikelrohmissionen signifikant reduziert werden können. [DIS2017]

### 6.3 Anwendungsbeispiel alternativer Kraftstoff

Es wurden verschiedene Kraftstoffe mit unterschiedlichem Ethanolgehalt untersucht. Zum einen werden die zuvor gefundenen Hauptzusammenhänge bezüglich verschiedener Applikationsstrategien auf Partikelemissionen bestätigt. Hierzu wurden ähnliche Versuchsreihen durchgeführt. Zum anderen konnte der Effekt des Kraftstoffes auf die Partikelemissionen nachgewiesen werden.

#### Versuchsbeschreibung

Für die Versuche wurden Benzin-Ethanol-Gemische in den Ethanolkonzentrationen E5, E25, E50 und E75 verwendet. Hierfür wurde Ethanol und Benzin aus einer Charge verwendet, so dass insbesondere der Ottobasiskraftstoff für alle Gemische gleichbleibend ist. Der Einfluss des Kraftstoffes auf die Motorrohmissionen wurde in dem in Projektphase 1 entwickeltem Prüflauf aus mehreren Einzellastsprüngen untersucht. Besonderer Fokus liegt hierbei wieder auf den Partikelemissionen.

Für den Versuch wurde eine ethanolfähige externe Raildruckerzeugung verwendet. Die Messtechnik blieb für die Versuche unverändert. Neben schneller Abgasmesstechnik für gasförmige Emissionen und Partikelmessgerät kommt eine Highspeed-Kamera zum Einsatz. Bei der Verwendung der externen Raildruckerzeugung fällt die direkt Kontrolle des Raildrucks durch das Steuergerät weg, so dass die Kennfelder entsprechend des anliegenden Drucks überschrieben werden müssen. Hierdurch ergeben sich Nachteile für die Versuchsführung. Die Serienkennfelder für den Raildruck konnten nicht verwendet werden. Stattdessen wurde jeweils ein erhöhter Raildruck (195 bar) und ein niedriger Raildruck (150 bar) verwendet.

#### Variation des Einspritzzeitpunktes

Zunächst wurde für jeden Kraftstoff anhand einer Variation des Einspritzzeitpunktes untersucht. Ob sich die gefunden Zusammenhänge zur Partikelentstehung auch auf die ethanolhaltigen Kraftstoffe übertragen lassen.

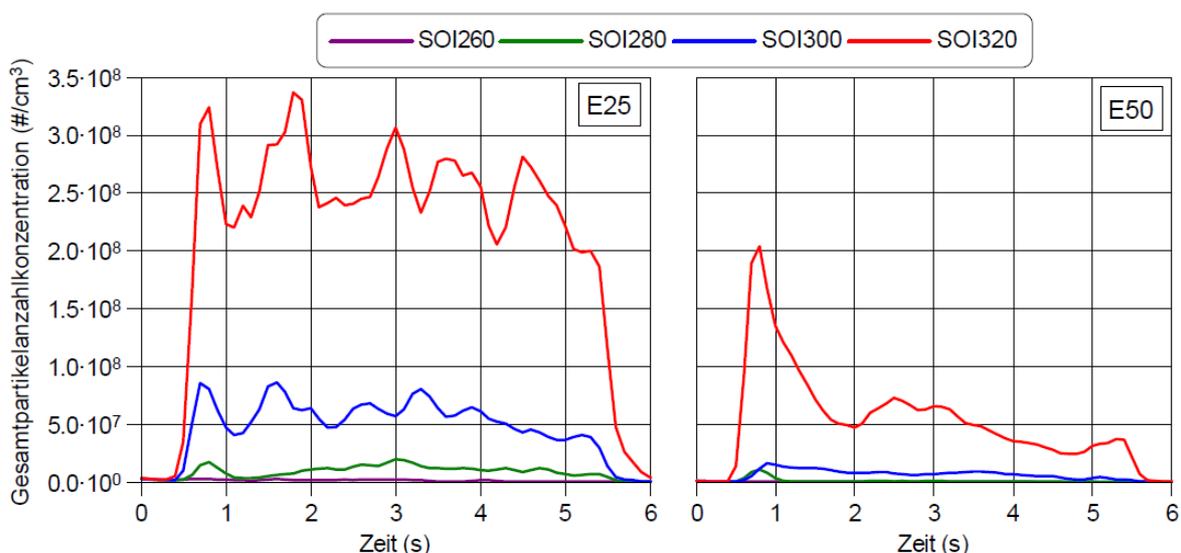
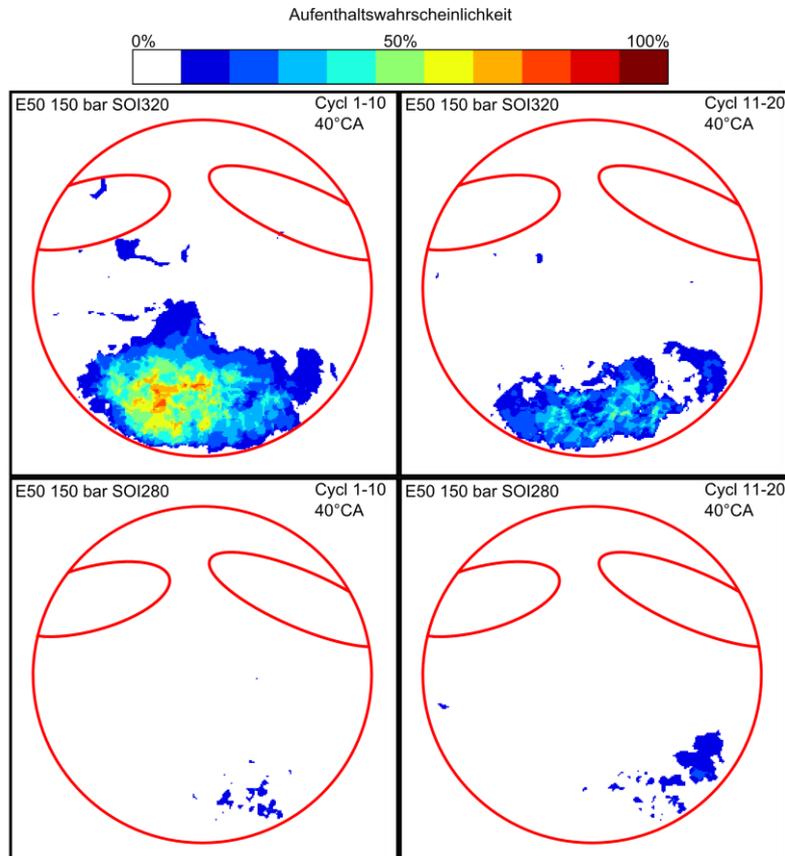


Abbildung 27: Gesamtpartikelanzahlkonzentrationen während Lastsprüngen für E25 (links) und E50 (rechts) Lastsprungvariante 2 bei 25,5% Fahrpedal und 150 bar Raildruck

Abbildung 27 zeigt die Partikelemissionen der SOI Variation für zwei Kraftstoffe im Vergleich. Die Partikelemissionen unmittelbar nach dem Lastsprung sowie das Niveau in der Stabilisierungsphase steigen mit früheren SOI. Dieses Verhalten ist analog der Untersuchungen mit herkömmlichem Kraftstoff. Auf Kamerabildern können Flammen in Kolbennähe als Partikelquelle erkannt werden.



*Abbildung 28: Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Rußstrahlung über je 10 Zyklen bei E50 Kraftstoff und 150 bar Raildruck.*

In Abbildung 28 sind für SOI 320 °KW v. ZOT und SOI 280°KW V. ZOT die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Poolflammen gegenübergestellt. Analog der vorangegangenen Untersuchungen mit konventionellem Kraftstoff begünstigt ein früher SOI die Entstehung von Poolflammen insbesondere in frühen Phasen des Lastsprungs, wenn der Kolben durch die vorangegangene Schubphase noch kalt ist. Bei SOI 280°KW v.ZOT verschwinden nahezu vollständig.

### **Einfluss des Kraftstoffes auf Partikelemissionen**

Der Vergleich der Kraftstoffe untereinander wurde bei konstantem Einspritzbeginn und Raildruck durchgeführt. Der Einfluss des Kraftstoffes auf die Partikelemissionen wird also bei sonst möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt. In ist beispielhaft der Einfluss des Kraftstoffes auf die Gesamtpartikelanzahlkonzentration für die 4 Untersuchten Kraftstoffe aufgetragen. Es zeigt sich, dass sich die Kraftstoffe in 2 Gruppen einteilen lassen. Gezeigt ist hier jeweils der Versuch bei Einspritzbeginn 320°KW v.ZOT und 150 bar Raildruck. In diesem Punkt zeigen sich für die Kraftstoffe mit niedrigerem Ethanolgehalt (E5, E25) höhere Partikelkonzentrationen als bei höherem Ethanolgehalt (E50, E75). Außerdem bleiben die

Partikelemissionen bei E5 und E25 über den gesamten Lastsprung hoch, während bei E50 und E75 ein Peak zu Beginn des Lastsprungs zu beobachten ist.

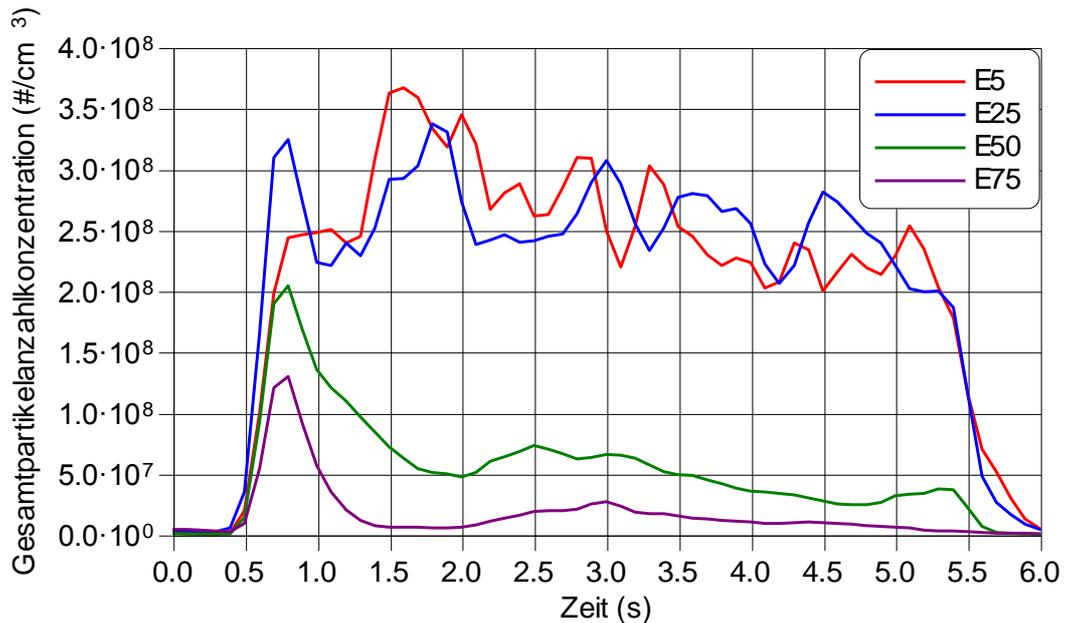


Abbildung 29: Gesamtpartikelanzahlkonzentrationen während Lastsprüngen für Lastsprungvariante 2 mit 25,5% Fahrpedal, 150 bar Raildruck und Einspritzzeitpunkt 320 °KW v.ZOT

Als Ursache können die Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera hinzugezogen werden. In Abbildung 30 sind die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Poolflammen passend zu den Partikelemissionen aus Abbildung 29 aufgetragen. Während sich bei E5 und E25 auch im hinteren Teil des Lastsprungs (Verbrennungszyklus 31-90) ausgeprägte Poolflammen finden, fehlen diese bei E50 und E75.

Hier ist möglicherweise die unterschiedliche Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffes entscheidend. Durch den erhöhten Ethanolanteil bleibt deutlich weniger Kraftstoff auf dem Kolben zurück was das Auftreten der Poolflammen vermindert. In Verbindung mit der zuvor gezeigten Problematik, dass bei später Einspritzung die Partikelanzahlkonzentrationen wieder zunehmen, lässt sich hier mit dem alternativen Kraftstoff Potential erschließen. Die Poolflamme kann als Partikelquelle bereits bei früherer Einspritzung vermieden werden, so dass die bessere Gemischbildung bei diesen Einspritztimings ohne erhöhte Partikelemissionen ausgenutzt werden kann.



## 7 Druckverlaufsanalyse

Simulationen finden besonders in der Entwicklung von Verbrennungsmotoren in verschiedenen Komplexitätsformen Anwendungen. Für dieses Projekt wurde die Druckverlaufsanalyse DVA in GT-Power als TPA (Three-Pressure-Analysis) durchgeführt. Das Modell wurde an mehreren Stellen angepasst um die transienten Vorgänge - besonders auf der Ebene des Ventiltriebs - abbilden zu können. Für die üblicherweise in Stationärpunkten validierten Modelle wurden die am Engine-in-the-Loop-Prüfstand vorhandenen Sondermesssysteme genutzt um die Eingangsgrößen in das Modell zyklusgenau zu bestimmen. Es zeigte sich, gerade in den ersten Zyklen der untersuchten Lastsprünge die größten Abweichungen zwischen Modell und Messung auftraten. Trotzdem konnte in späteren Zyklen eine gute Übereinstimmung auch bei sich ändernden Motorsteuerparametern erreicht werden.

Im Weiteren wurden die im Modell ermittelten Temperaturen mit anderer Messtechnik verglichen. In der Kompressionsphase zeigte sich eine gute Übereinstimmung von Modell und der mit Infrarotabsorptionsspektroskopie (IAS) ermittelten lokalen Gastemperatur. Wie in Abbildung 31 zu sehen, trennen sich die Temperaturverläufe von IAS und DVA ab Einsetzung der Verbrennung voneinander. Dies kann gut auf die Limitierungen die sich bei der Auswertung der IAS ergeben, zurückgeführt werden. Für den Temperatur- und Druckbereich, die nach der Verbrennung typisch sind, ist das System nicht ausgelegt.

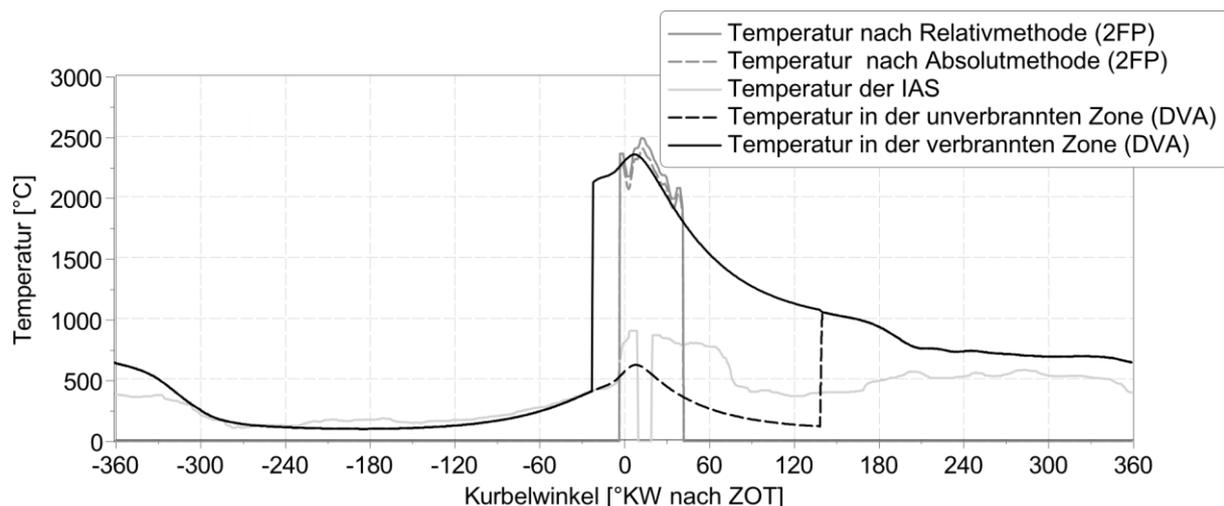


Abbildung 31: Temperaturverläufe des 2-Zonen-Modells der TPA im Vergleich mit optischer Sondermesstechnik (Zwei-Farben-Pyrometrie (2FP) und Infrarotabsorptionsspektroskopie (IAS)) [DIS2017]

Für die Verbrennungstemperatur eignet sich deshalb der Vergleich mit der Zwei-Farben-Pyrometrie (2FP). Die Rußtemperatur lässt sich beim Ottomotor aufgrund niedriger Rußkonzentrationen nur in einem kurzen Zeitraum bestimmen. In Abbildung 31 wird deutlich dass die Temperaturbestimmung durch 2FP in diesem Beispiel nahe an den DVA-Ergebnissen liegt. Für stark heterogene Verteilungen der Brennraumstrahlung – insbesondere durch das Auftreten von Poolflammen – liegen die Ergebnisse der 2FP tendenziell über den berechneten Temperaturen.

Für die ergänzende Interpretation der Versuchsergebnisse liefert die DVA damit gute Ansätze. In den ersten Verbrennungszyklen zeigen sich jedoch teilweise große Abweichungen, so dass hier die beschriebene Sondermesstechnik Vorteile hat.

## 8 Fazit

Die vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen das Potential, elementare Prozesse des Transientbetriebs mit hoher zeitlicher Auflösung an einem Engine-in-the-Loop Prüfstand zu untersuchen. Der kombinierte Einsatz der verschiedenen Sondermesstechniken ermöglicht eine durchgängige Untersuchung der emissionskritischen Zustände und eine Identifikation der relevanten Einflussgrößen angefangen vom Fahrzyklus bis hin zum individuellen Verbrennungszyklus. Auf diese Weise lassen sich Parameteränderungen und deren Auswirkungen auf das reale Fahrverhalten frühzeitig im Gesamtfahrzeugkontext ermitteln (Applikationsstrategie). Im Hinblick auf die zunehmende Elektrifizierung im Antriebsstrang bietet dieser Ansatz zudem die Möglichkeit, die Abstimmung der verschiedenen Energiequellen effizient zu koordinieren (Betriebsstrategie). Mit dem Wissen aus dem Verhalten des Motors in transienten Betriebsphasen lassen sich so Maßnahmen ableiten, wie beispielsweise ein temporärer Einsatz der Elektrotraktion im Hybridverbund zu einem emissionsärmeren Betrieb des Gesamtfahrzeugs genutzt werden kann.

Mit dem Einsatz diverser Sondermesstechnik konnte die Bedeutung der Zyklus-zu-Zyklus Analyse für das Verständnis des Emissionsverhaltens des Verbrennungsmotors in transienten Betriebsphasen herausgestellt werden. Der Einsatz der Highspeedkamera erlaubte eine Identifikation der Partikelquellen für die Untersuchung der Applikationsstrategie. Die Synchronisation der kurbelwinkelbasierten Daten der Indizierung, der Infrarotabsorptionsspektroskopie und der Kamera mit zeitbasierten Daten der schnellen Abgasmesstechnik, der Partikelmesstechnik und der Prüfstandsautomatisierung erlaubte eine tiefgreifende Analyse Partikelentstehung. In Abgrenzung zu üblichen Untersuchungsmethoden konnten hiermit einzelne emissionskritische Motorzyklen untersucht werden.

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels Betriebsstrategie wurde ein eigener Fahrzyklus entwickelt. Er nutzt die Möglichkeiten der Engine-in-the-Loop Umgebung um eine Vergleichsbasis für verschiedene Betriebsstrategien einer virtuellen Hybridisierung umzusetzen. Die Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors im Hybridkontext zeigt deutliche Reduzierungen bezüglich Partikelemissionen, in dem die in den Untersuchungen zur Applikationsstrategie gefundenen kritischen Kombinationen aus Einspritzbeginn und Raildruck durch die Momentenbereitstellung des Elektromotors vermieden werden können.

Mit verschiedenen ethanolhaltigen Kraftstoffen wurde der Einfluss regenerativer Anteile im Kraftstoff und deren Einfluss auf die Partikelemissionen bewertet. Hierzu wurde der Motor mit einer externen Raildruckversorgung ausgestattet. Für die Untersuchung realitätsnaher Fahrprofile ist dieser Ansatz jedoch nur bedingt geeignet, da die Regelung des Railwagens keine Schnittstelle zur Motorsteuerung hat und somit nur mit konstantem Druck betrieben werden kann. Trotzdem konnten die Ergebnisse der Applikationsstrategie auch mit ethanolhaltigen Kraftstoffen bestätigt werden. Zusätzlich konnte mit steigendem Ethanolgehalt eine Abnahme der Partikelanzahlkonzentration im Lastsprung beobachtet werden. An der Stelle der Ressourcenstrategie sollte für weitere Untersuchungen auf ethanolbeständige Motorkomponenten gesetzt werden, oder gleich ein entsprechender Versuchsträger verwendet werden. So ließe sich der gefundene Vorteil in realitätsnahen Fahrversuchen bestätigen oder Unterschiede zu den generischen Testläufen aufzeigen.

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

In Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein 1D-Simulationsmodell hinsichtlich der Eignung von Einzelzyklenanalysen in transienten Betriebsphasen untersucht. Die Ermittlung der Eingangparameter zyklengenau für die als TPA ausgeführte Druckverlaufsanalyse bereitzustellen, stellt die zentrale Herausforderung des gewählten Ansatzes dar. In der Lastaufschaltung gelang die Analyse der ersten Zyklen nicht wie erhofft. Dies weist auf Schwächen des mit stationären Punkten validierten Modells bei schnell ändernden Randbedingungen und Parametern hin.

Das Modell wurde erfolgreich im Vergleich mit der parallel eingesetzten Temperaturmesstechnik eingesetzt. Damit konnte bestätigt werden, dass sich der gewählte Ansatz grundsätzlich für die Einzelzyklenanalyse eignet und für einzelne auffällige Zyklen weitere Erklärungsansätze liefern kann.

## Projektbezogene Publikationen

Auf Basis der zuvor genannten Ergebnisse wurden Fachbeiträge auf Tagungen und in Zeitschriften publiziert, so dass die gewonnen Erkenntnisse im Rahmen der Fachwelt diskutiert und der Öffentlichkeit bereits teilweise zugänglich gemacht werden konnten.

[DIS2015] DISCH, C., PFEIL, J., KUBACH, H., KOCH, T. et al., *Experimental Investigations of a DISI Engine in Transient Operation with Regard to Particle and Gaseous Engine-out Emissions*, SAE Int. J. Engines 9(1):262-278, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1990

[DIS2014a] DISCH, C., KUBACH, H., PFEIL, J., KOCH, T., SPICHER, U., THIELE, O., DONN, C. und SCHYR, C.: *Zyklus aufgelöste Verbrennungsprozessanalyse des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung. (English: Cycle-resolved combustion diagnostics of a direct injection gasoline engine in transient operation)* 11. Internationales Symposium Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 01. und 02. Juli 2014

[DIS2014b] DISCH, C., KOCH, T., SPICHER, U. und DONN, C.: *Engine-in-the-Loop als Entwicklungswerkzeug für die Emissionsoptimierung im Hybridkontext*. MTZ Motortech Z (2014) 75: 70. doi: 10.1007/s35146-014-0570-7

[DIS2014c] DISCH, C., KOCH, T., SPICHER, U. und DONN, C.: *Engine-in-the-Loop as a development tool for emission optimisation in the hybrid context*. MTZ Worldw (2014) 75: 40. doi: 10.1007/s38313-014-0234-5

[DIS2014d] DISCH, C., THIELE, O., KUBACH, H., PFEIL, J., KOCH, T. und SPICHER, U.: *Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses im Transientbetrieb eines Ottomotors mit Direkteinspritzung*. 7. MTZ-Fachtagung – Ladungswechsel im Verbrennungsmotor 2014, Stuttgart, 22. und 23. Oktober 2014

[DIS2014e] DISCH C. und KUBACH, H.: *Untersuchung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung im transienten Betrieb an einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung*, Abschlussbericht zur Projektphase I, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU Az. 30369)

Teile des Berichts wurden übernommen aus:

[DIS2017] DISCH, C., *Untersuchung der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung im transienten Betrieb*, Diss. Karlsruher Institut für Technologie, noch nicht veröffentlicht

## Literaturverzeichnis

- [Ber2013] BERG, T., THIELE, O., SEEFELDT, S. and VANHAELST, R.: *Measurement of in-cylinder mixture formation by optical indication*. MTZ 06/2013
- [BMVI2014] BUNDESMINISTERIUM FUER VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: URL <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/80865/>. (Stand 15. Juli 2014)
- [Bus2010] BUSCH, S., DISCH, C., KUBACH, H. und SPICHER, U.: *Optical Investigations of the Vaporization Behaviors of Isooctane and an Optical, Non-fluorescing Multicomponent Fuel in a Spark Ignition Direct Injection Engine*. SAE Technical Paper, 2010-01-2271, doi:10.4271/2010-01-2271, 2010
- [Dav2007] DAVIS, P. und PECKHAM, M.: *The Analysis of Gasoline Transient Emissions Behaviour Using Fast Response Gas Analysers*. SAE Technical Paper; 2007-26-015, 2007
- [Eri2009] ERRICSON, P. und SAMSON, A.: *Characterization of Particulate Emissions Propagating in the Exhaust Line for Spark Ignited Engines*. SAE Technical Paper, 2009-01-2654, 2009
- [Gro2007] GROSCH, A., BEUSHAUSEN, V., THIELE, O. und GRZESZIK, R.: *Crank Angle Resolved Determination of Fuel Concentration and Air/Fuel Ratio in a SI-Internal Combustion Engine Using a Modified Optical Spark Plug*. SAE Technical Paper, 2007-01-0644, 2007
- [Han2003] HANDS, T., REAVELL, J., NICKOLAUS, C. und COLLINGS, N.: *GDI measurements with a Fast Particulate Spectrometer*. 7th ETH Conference on Combustion generated Nanoparticles, Zurich, 2003
- [Kay2000] KAYES, D., HOCHGREB, S., MARICQ, M., PODSIADLIK, D. und CHASE, R.: *Particulate Matter Emission During Start-Up and Transient Operation of a Spark-Ignition Engine (2): Effect of Speed, Load, and Real-World Driving Cycles*. SAE Technical Paper, 2000-01-1083, 2000
- [Kra2010] KRATSCH, M., KANNAPIN, O., LIEBSCH, S., PREISNER, M. und GUSKE, T.: *Reducing the Particle Number in DI Gasoline Engines*. 10. Internationales Stuttgarter Symposium, 2010.
- [Lie2012] LIEBSCH, S., ZBORALSKI, A., MAASS, J., GUENTHER, M., KRATSCH, M. und ZWAHR, S.: *Cold Start Simulation and Test on DISI Engines Utilizing a Multi-Zone Vaporization Approach*. SAE Technical Paper, 2012-01-0402, doi:10.4271/2012-01-0402, 2012
- [Mar1999a] MARICQ, M., PODSIADLIK, D. und CHASE, R.: *Beyond mass emissions: An examination of the size resolved and transient nature of particle emissions from motor vehicles*. Technischer Bericht, Environ. Sci. Tech., 1999
- [Mar1999b] MARICQ, M., PODSIADLIK, D., BREHOB, D. und HAGHGOOIE, M.: *Particulate Emissions from a Direct-Injection Spark-Ignition (DISI) Engine*. SAE Technical Paper, 1999-01-1530, 1999
- [Pec2011] PECKHAM, M. S., FINCH, A., CAMPBELL, B., PRICE, P., DAVIS, M. T.: *Study of Particle Number Emissions from a Turbocharged Gasoline Direct Injection (GDI) Engine Including Data from a Fast-Response Particle Size Spectrometer*. SAE Technical Paper, 2011-01-1224, 2011

Abschlussbericht: Untersuchung des transienten Betriebs an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

- [Sch2013] SCHYR, C., HAKULI, S. und SCHICK, B.: *Ganzheitliche Fahrzeugbewertung mittels X-in-the-Loop im Entwicklungsprozess am Beispiel Powertrain-in-the-Loop*. Virtual Powertrain Creation 2013, 15. MTZ-Fachtagung
- [Toe2013] TOEBBEN, H. und OESTERLE, J. J.: *Partikel-Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung*. MTZ Ausgabe 02/2013, S 136 ff, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
- [VDA2014] VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE E. V.: URL <http://www.unsere-autos.de/parkplatz/downloadbereich/grafik-unser-standort-personen-verkehr-dtl.pdf>. (Stand 15. Juli 2014)