

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 zur Projektphase I**

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

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

**Az. 30369**

eingereicht von

Dipl.-Ing. Christian Disch & Dr.-Ing. Heiko Kubach

Karlsruhe, August 2014

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



Az	<b>30369/01</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>139.572 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Untersuchung zur Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung im transienten Betrieb an einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung (Teilprojekt 1)</b>			
<b>Stichworte</b>		Transienter Ottomotor, Real Driving Emissions, Entwicklungsmethodik, Sondermesstechniken			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>36 Monate</b>	<b>09.10.2012</b>	<b>31.08.2016</b>	<b>2</b>		
Zwischenberichte	Halbjährlich				
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Institut für Kolbenmaschinen Dr.-Ing. Heiko Kubach Rintheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe		Tel	0721 608 43636
				Fax	
				Projektleitung Dr.-Ing. Heiko Kubach	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. Christian Disch	
<b>Kooperationspartner</b>		MOT GmbH Rintheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe 0721 20482 0			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
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.					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
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 Prüfstandsumgebung 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.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die vorgestellten Versuchsergebnisse der ersten Projektphase 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). 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. Um das Prozessverständnis weiter zu vertiefen und die Eingriffsmöglichkeiten zu erweitern sind für die zweite Projektphase weitere experimentelle Untersuchungen notwendig. Diese umfassen insbesondere die Arbeitspakete zur Verbrennungsdiagnostik mittels optischer Sondermesstechnik. Im Fokus dieser Verfahren liegt die Identifikation der Ursachen für die Partikelentstehung im transienten Motorbetrieb. Die Herausforderungen liegen hier in der zyklusaufgelösten Analyse der Motorrohmissionen.

Die Voruntersuchungen zur Erhöhung des Kraftstoff-Einspritzdruckes haben gezeigt, dass dies ein vielversprechendes Mittel zur Reduktion der Partikelanzahlkonzentration im Lastsprung ist. Aus diesem Grund soll in der zweiten Projektphase über den Umfang des Erstantrags hinaus auch ein Kraftstoffhochdrucksystem aufgebaut werden, so dass Einspritzdrücke bis 350 bar realisiert werden können.

Neben der Erweiterung zu den Applikationsstrategien wird in der zweiten Projektphase auch die Betriebsstrategie (Verbrennungsmotor im Hybridkonzept) weiter verfolgt. Ziel ist es, die elementaren Einflüsse der Applikationsstrategie im Gesamtfahrzeugkontext zu beleuchten. Aus diesem Grund soll ein neues Fahrprofil definiert werden, anhand dessen die Verbesserungsmaßnahmen in komprimierter Weise (Reduzierung der Zeitdauer des Prüflaufs → Handling Messdaten) untersucht werden können. Zusätzlich ist zu den beiden bereits beleuchteten Strategien (Applikations- und Betriebsstrategie), die Auswahl des Energieträgers eine weitere Möglichkeit, um die Emissionen über die bereits beschriebenen Maßnahmen hinaus zu reduzieren. Dies soll in der zweiten Projektphase anhand von Ethanol-Mischkraftstoffen untersucht werden (Ressourcenstrategie). 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.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Bereits in der ersten Projektphase konnten neue Erkenntnisse einem breiten Publikum auf Konferenzen und in Fachzeitschriften erläutert werden.

[1] Disch, C., Pfeil, J., Kubach, H., Koch, T., Spicher, U., Thiele, O., "Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses im Transientbetrieb eines Ottomotors mit Direkteinspritzung," ATZ- Konferenz Ladungswechsel, Stuttgart, 2014

[2] Disch, C., Koch, T., Spicher, U., Donn, C., "Engine-in-the-Loop als Entwicklungswerkzeug für die Emissionsoptimierung im Hybridkontext," Motortechnische Zeitschrift, 10/2014

[3] Disch, C., Koch, T., Spicher, U., Donn, C., "Engine-in-the-Loop as a Development Tool for Emissions Optimization in the Hybrid Context," MTZ worldwide, 10/2014

[4] Disch, C., Kubach, H., Pfeil, J., Koch, T., Spicher, U., Thiele, O., Donn, C., Schyr, C., "Cycle-resolved Combustion Diagnostics of a Direct Injection Gasoline Engine in Transient Operation," 11th International Symposium on Combustion Diagnostics, Baden-Baden, 2014

## **Fazit**

Die Ergebnisse haben die Erwartungen zur ersten Projektphase erfüllt, so dass an der ursprünglichen Planung für die zweite Projektphase festgehalten wird.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>2</b>
2.1	Ausgangssituation .....	2
2.2	Zielsetzung.....	3
2.3	Aufgabenstellung .....	3
2.4	Novität der Arbeit .....	4
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Ziele und Arbeitsprogramm der Projektphase I .....</b>	<b>10</b>
4.1	Ziele .....	10
4.2	Begriffsdefinition Transienter Motorbetrieb .....	10
4.3	Entwicklungsmethodik zur Ermittlung der Zusammenhänge des transienten Motorbetriebs.....	13
4.4	Architektur der experimentellen Versuchsumgebung.....	15
4.5	Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik zur Untersuchung des transienten Motorbetriebs.....	16
4.6	Optische Indizierung zur kurbelwinkelaufgelösten Ermittlung des Luftverhältnisses im Brennraum .....	18
4.7	Untersuchung und Analyse realer Fahrprofile.....	18
4.8	Untersuchung und Analyse elementarer transienter Prozesse .....	19
4.9	Versuchsvorbereitung und -auswertung .....	20
<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse .....</b>	<b>22</b>
5.1	Partikelrohmissionen .....	22
5.2	Messung der zyklusaufgelösten gasförmigen Rohmissionen.....	25
5.3	Messung des kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses .....	26
5.3.1	Einzelzyklusanalyse .....	27
5.4	Korrelation optischer Messtechniken zur Identifikation von auffälligen Arbeitsspielen im transienten Motorbetrieb .....	28
<b>6</b>	<b>Anwendung der bereits gewonnen Erkenntnisse – Umweltnutzen .....</b>	<b>32</b>
6.1	Anwendungsbeispiel Applikationsstrategie.....	32

6.1.1	Variation des Einspritzzeitpunktes.....	33
6.1.2	Variation des Kraftstoffeinspritzdruckes.....	34
6.2	Anwendungsbeispiel Betriebsstrategie.....	38
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick auf zweite Projektphase.....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Projektbezogene Publikationen.....</b>	<b>43</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>44</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Zurückgelegte Personenkilometer in Deutschland [VDA2014] .....	2
Abbildung 2: Kategorisierung der PKW-Weglängen [BMVI2014] .....	3
Abbildung 3: HC-Emissionen während der Katalysatorheizphase [Dav2007] .....	6
Abbildung 4: HC-Emissionen bei Schubabschaltung und Wiederstart [Dav2007] .....	6
Abbildung 5: Auszug aus der Messung der Partikelgrößenverteilung und -konzentration im NEFZ eines Mittelklassefahrzeugs mit Ottomotor und Benzin-Direkteinspritzung [Han2003].	7
Abbildung 6: Vergleich von Kraftstoffverbrauch im NEFZ zu realem Kraftstoffverbrauch [Spi2012] .....	8
Abbildung 7: Partikelanzahlemissionen im NEFZ [Toe2013] .....	9
Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentrationen in ausgewählten NEFZ-Betriebspunkten bei unterschiedlichen Einspritzdrücken (eigene Messungen) .....	9
Abbildung 9: Kriterien zur Klassifizierung der transienten Betriebsphasen.....	11
Abbildung 10: Lastsprung mit 60 Sekunden Lasthaltephase .....	12
Abbildung 11: Detailansicht aus dem Lastsprung .....	12
Abbildung 12: Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung zu Beginn eines Lastsprungs.....	13
Abbildung 13: Schematische Beschreibung der Vorgehensweise – Entwicklungsmethodik [DIS2014b] .....	14
Abbildung 14: Konstruktive Anpassung des Zylinderkopfes zur Integration der optischen Sondermesstechnik .....	16
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus .....	17
Abbildung 16: Auszug aus einem realen Fahrprofil – Beschleunigungsvorgang .....	19
Abbildung 17: Beschreibung der aufeinanderfolgenden Einzelphasen eines Lastsprungs...	20
Abbildung 18: Beschreibung der Ablaufsequenzen eines Lastsprungprüflaufs .....	21
Abbildung 19: Zeitlicher Fahrpedalverlauf für vier verschiedener Lastsprungversuche (Tip-in) .....	22
Abbildung 20: Mittlere Partikelanzahlkonzentration für vier verschiedene Lastsprungversuche .....	23
Abbildung 21: Mittelwertbetrachtung für die Partikelemissionen verschiedener Lastsprünge (Tip-in).....	24
Abbildung 22: Differenz der verschiedenen Lastsprungversuche mit Bezug auf das Partikelgrößenspektrum .....	25

Abbildung 23: Messung der gasförmigen Rohemissionen und der eingespritzten Kraftstoffmasse von Zylinder 6 .....	26
Abbildung 24: Vergleich des gemittelten lokalen Brennraumluftverhältnisses für die ersten 40 Zyklen der vier verschiedenen Lastsprungvarianten .....	27
Abbildung 25: Lokales Brennraumluftverhältnis als Mittelwert und als Einzelzyklusanalyse für zwei verschiedene Lastsprungvarianten .....	28
Abbildung 26: Verlauf des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für die ersten beiden Arbeitsspiele bei einem SOI = 340°KW v. ZOT .....	29
Abbildung 27: 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 .....	30
Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse optischer Messtechnik und der Partikelanzahlkonzentration.....	31
Abbildung 29: Vergleich des lokalen Brennraumluftverhältnisses für das dritte Arbeitsspiel (AS 3) unter Variation des Einspritztimings (SOI) .....	33
Abbildung 30: Einfluss eines erhöhten Kraftstoff-Einspritzdruckes auf die Partikelanzahlkonzentration während eines Lastsprungs als Mittelwert aus zehn Wiederholungen .....	34
Abbildung 31: Einfluss des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf das lokale Brennraumluftverhältnis im fünften Arbeitsspiel (AS 5) unter Variation des Einspritztimings (SOI).....	35
Abbildung 32: Oben: Partikelemissionen in Abhängigkeit des SOI, gemessen am Auslassventil des Einzelzylinders (Zylinder 6), Unten: Beispielaufnahmen zur innermotorischen Entwicklung des Rußeigenleuchtens für verschiedene SOI .....	37
Abbildung 33: Abkühlung der Brennraumoberfläche (Zylinderkopf) im Schubbetrieb, gemessen mit einem oberflächenbündigen NiCrNi-Mantelthermoelement.....	38
Abbildung 34: Einfluss der Momentenformung auf die Emissionen während des Lastsprungs .....	39
Abbildung 35: Modifizierter Fahrpedalverlauf zur Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors .....	41

## **1 Zusammenfassung**

Die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren ist die Erhöhung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Reduktion des Schadstoffausstoßes. Dabei wird das Motorverhalten in der Regel in stationären Betriebspunkten analysiert und optimiert. In realen Fahrprofilen hat allerdings der transiente Betrieb einen erheblichen Anteil und führt zu vergleichsweise hohen Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch. Zur Untersuchung transientser Betriebsphasen werden in diesem Forschungsvorhaben mehrere Messtechniken kombiniert. Der Einsatz optischer Messtechniken ermöglicht es, die innermotorischen Vorgänge zu visualisieren, wodurch der Prozess ausgehend von der Einspritzung und anschließenden Gemischbildung über die Zündung bis hin zur Verbrennung untersucht werden kann. Ergänzt wird die optische Messtechnik durch schnelle Abgasmesstechnik (Fast Response Gas Analyzers), welche simultan die Emissionen (HC-, CO-, CO<sub>2</sub>- und NO-Emissionen) der entsprechenden transienten Betriebsphasen misst. Ziel ist es, durch experimentelle Untersuchungen innermotorische Vorgänge detailliert zu analysieren und Maßnahmen zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes und des Kraftstoffverbrauchs im transienten Motorbetrieb abzuleiten. Dabei wird der Verbrennungsmotor sowohl einzeln als auch im hybriden Antriebssystem betrachtet.

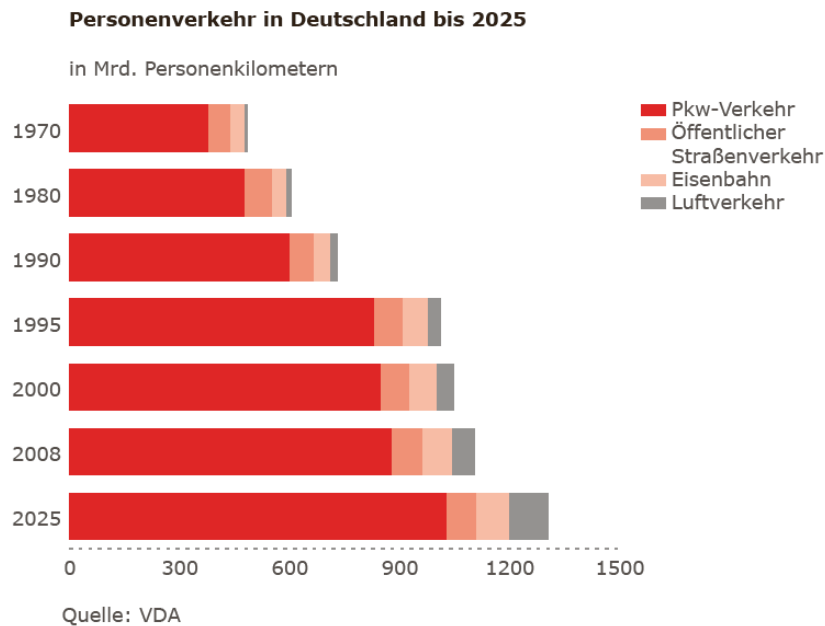


## 2 Einleitung

### 2.1 Ausgangssituation

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].

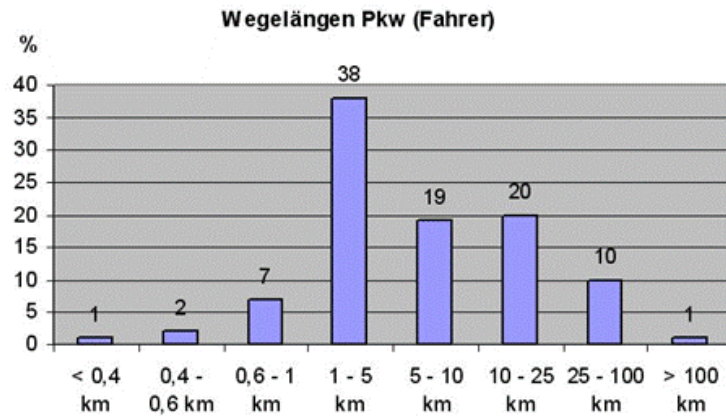


Abbildung 2: Kategorisierung der PKW-Weglängen [BMVI2014]

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 orientieren. Eine Optimierung der Motorapplikationsparameter im hoch-transienten 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 zukünftige Grenzwerte einhalten zu können.

## 2.2 Zielsetzung

Mit den unter 2.1 genannten Randbedingungen verfolgt diese Forschungsarbeit das Ziel, emissionskritische Phasen des realen Fahrverhaltens bei Einsatz eines Verbrennungsmotors zu identifizieren und die zugrundeliegenden Mechanismen, die für die Emissionsentstehung relevant sind, im Detail zu verstehen. Dadurch können Teilprozesse gezielt optimiert und Rohemissionen und Kraftstoffverbrauch im transienten Betrieb gesenkt werden.

## 2.3 Aufgabenstellung

Auf Basis der in 2.1 beschriebenen Situation und der unter 2.2 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 am Motorprüfstand abzubilden und zu untersuchen. Dazu wird der Motor zunächst in einer Engine-in-the-Loop-Prüfstandsumgebung aufgebaut, welcher die Möglichkeit bietet, das transiente Fahrverhalten nachzubilden. 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 Prüfstands Umgebung 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 simultan, 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. Solche Manöver können beispielsweise Lastwechsel, Tip-in oder Schaltvorgänge sein. Um möglichst allgemeingültige Aussagen zu erhalten, ist es sinnvoll, zunächst nur ausgewählte standardisierte 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 im sichtbaren Wellenlängenbereich visualisiert. Die Erkenntnisse aus dem Brennraum werden mit den hochfrequent gemessenen Rohemissionswerten 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 Rohemissionsvermeidung. 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 als 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.

## **2.4 Novität der Arbeit**

Die Arbeit beschreibt eine Vorgehensweise zur durchgängigen Untersuchung des transienten Motorbetriebs ausgehend von der Gemischbildung, der Verbrennung bis hin zu der Schadstoffentstehung. Dabei werden die Prozessvorgänge im Zylinder thermodynamisch und optisch analysiert und simultan mit zeitlich hochauflösender Abgasmesstechnik untersucht.

Die methodische Vorgehensweise zur Auswahl der experimentellen Versuchsumgebung stellt die Grundlage für weitere Projekte mit dem Fokus zur Verbesserung des transienten Motorbetriebs dar.

### **3 Stand der Forschung**

Der transiente Motorbetrieb, d.h. der Motorbetrieb mit Last-, Drehzahl- und/oder Betriebsartänderung, stellt einen wesentlichen Anteil innerhalb der verschiedenen Testzyklen und insbesondere in realen Fahrprofilen dar. Die Bewertung der HC- und Partikelemissionen im „Neuen Europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) zeigt beispielsweise, dass ein erheblicher Anteil der kumulierten Emissionen in Phasen transienten Motorbetriebs verursacht werden. Ein Großteil der transienten Betriebsphasen wird durch eine schnelle Veränderung der Lastanforderung des Fahrers verursacht. Eine Erhöhung der Lastanforderung führt beim Ottomotor unter anderem zum Öffnen der Drosselklappe und zum Anstieg der eingespritzten Kraftstoffmasse ( $\lambda=1$  Betriebsstrategie). Bis zum Erreichen eines stationären Zustands sind das Luft-Kraftstoffverhältnis (Reaktionszeit der Lambdaeregelung) und die Strömungsbedingungen im Motor (Drehzahländerung, zunehmender Saugrohrdruck, Umstellung des variablen Ventiltriebs, etc.) erheblichen Schwankungen unterworfen. Der Einfluss auf die Schadstoffemissionen wurde in verschiedenen Veröffentlichungen untersucht. Maricq et al. [Mar1999a] konnten durch Stationärmessungen der Partikelkonzentration im Abgas eines Ottomotors mit äußerer Gemischbildung zeigen, dass sowohl eine Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Last als auch eine Erhöhung der Last bei konstanter Drehzahl zu einer Zunahme der Partikelemissionen führt. Dies verdeutlicht, dass bereits die Variation bzw. Anhebung nur einer Prozessgröße (Drehzahl oder Motorlast) eine Zunahme der Partikelemissionen verursacht. Den Einfluss der Überlagerung der verschiedenen Effekte im transienten Motorbetrieb (gleichzeitige Drehzahl- und Laständerung) haben Davis und Peckham mit einem schnellen HC (HFR500) und NO<sub>x</sub> (CLD500) Messgerät an einem 4-Zylinder Ottomotor mit äußerer Gemischbildung untersucht. Sie zeigten, dass abhängig von der Ausprägung der Dynamik, z.B. beim Schaltverhalten des Fahrers, mehr oder weniger hohe Peaks in der HC- und NO<sub>x</sub>-Konzentration im Abgas gemessen werden können [Dav2007]. Dabei traten auch bei betriebswarmem Motor und Katalysator vereinzelt Katalysatordurchbrüche und so kurzzeitig erhöhte HC- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im emittierten Abgas auf. Abbildung 3 zeigt den gemessenen zeitlichen Verlauf der HC-Konzentration im Abgas während der Katalysatoraufheizphase. Die Messungen wurden am Fahrzeug während eines urbanen Fahrprofils durchgeführt. Die zu beobachtenden HC-Peaks wurden während der vom Fahrer durchgeführten Schaltvorgänge emittiert. Aus der Darstellung wird deutlich, dass die langsame HC-Messung diese Effekte nicht erfassen konnte. Des Weiteren zeigt die schnelle HC-Messung direkt hinter dem Auslassventil und am Auspuff, dass durch Oxidation in der Abgasstrecke die HC-Emissionen zwar gesenkt werden, aber dennoch beim Schaltvorgang HC-Peaks emittiert werden.

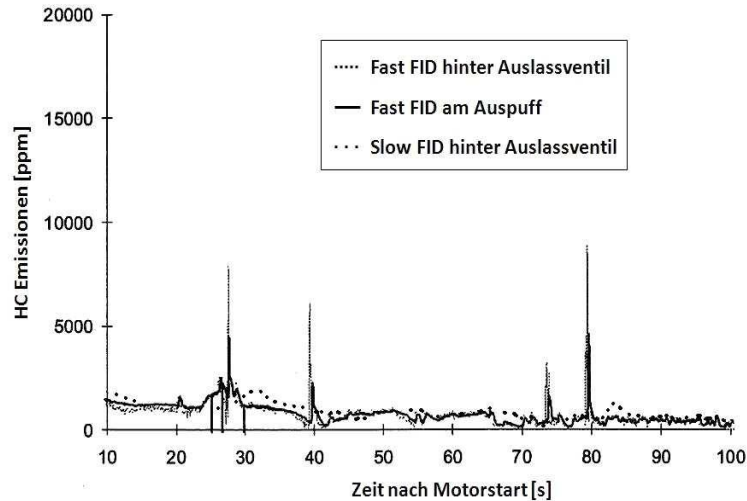


Abbildung 3: HC-Emissionen während der Katalysatorheizphase [Dav2007]

Eine analog durchgeführte Messung des  $\text{NO}_x$ -Ausstoßes hat ebenfalls die Notwendigkeit schneller Abgasmesstechnik für die Analyse des (hoch)dynamischen Motorbetriebs verdeutlicht. Während durch die schnelle Abgasanalyse das  $\text{NO}_x$ -Emissionsverhalten während Beschleunigungs- und Schaltvorgängen nahezu zyklus aufgelöst abgebildet werden konnte, ließ die langsame Analyse lediglich qualitative Ergebnisse erkennen.

Neben dem Einfluss des Gangschaltverhaltens und der Beschleunigung auf die Schadstoffemissionen haben Davis und Peckham die Auswirkungen der Schubabschaltung mit anschließendem Wiederstart an einem Motor mit äußerer Gemischbildung untersucht (Abbildung 4). Durch den Abbau von Wandanlagerungen bei Schubabschaltung bzw. den Wiederaufbau beim Wiederstart ist eine erhebliche Zunahme der HC-Emissionen zu beobachten. Während ein betriebswarmer Katalysator die erhöhte HC-Konzentration beim Abschalten der Einspritzung vollständig abbauen konnte, wurden beim Wiederstart Katalysatordurchbrüche mit einem entsprechenden HC-Peak am Auspuff festgestellt.

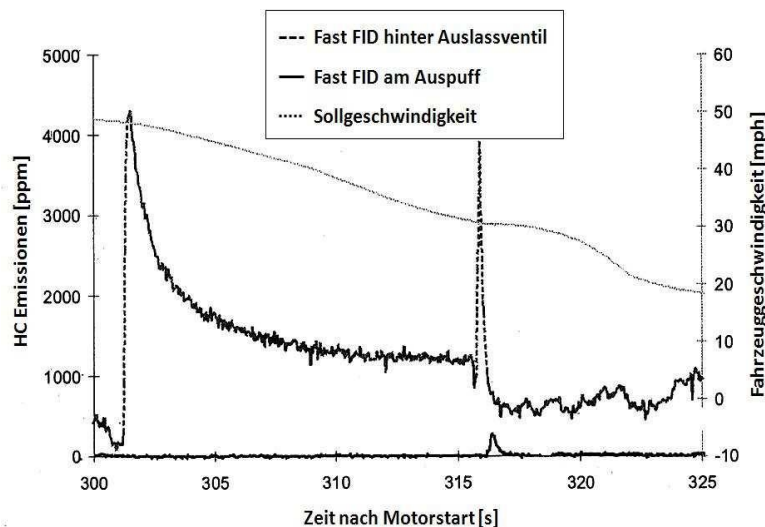


Abbildung 4: HC-Emissionen bei Schubabschaltung und Wiederstart [Dav2007]

Die Auswirkungen des transienten Motorbetriebs auf die Partikelentstehung haben Kayes et al. untersucht [Kay2000]. Sie haben in Prüfstandsmessungen gezeigt, dass im Moment eines Lastsprungs (schlagartiges Öffnen der Drosselklappe) deutlich mehr Rußkeime gebildet werden. Gleichzeitig wird die Einspritzmenge entsprechend der Lastanforderung erhöht und führt zu einer kurzzeitigen Anfettung des Luft-Kraftstoffgemisches. Die höhere HC-Konzentration im Brennraum bewirkt in Verbindung mit der höheren Rußkeimanzahl eine wesentliche Erhöhung der Primärpartikelbildungsrate. Maßgebliche Ursache für die Zunahme der Partikelemissionen sind folglich Bereiche fetter Gemischzusammensetzung im Brennraum, wie sie zum Beispiel durch unzureichende Gemischbildung auftreten. Diesbezüglich zeigen Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung im Vergleich zu solchen mit äußerer Gemischbildung, bedingt durch die kürzere Gemischbildungsdauer und die Möglichkeit der Brennraumwandbenetzung durch die Einspritzstrahlen, Nachteile und führen so zu vergleichsweise höheren Partikelemissionen [Kra2010, Mar1999b]. Solange der Motor seine Betriebstemperatur noch nicht erreicht hat und der Kraftstoff im Brennraum entsprechend langsamer verdampft, zeigt sich dieser Effekt besonders.

Die Sensitivität der Partikelentstehung auf Änderungen in der Gemischzusammensetzung und entsprechend der Verbrennung wurde auch von Hands et al. gezeigt, welche die Partikelkonzentration und -größenverteilung im Abgas eines Ottomotors mit zwei Liter Hubraum und Benzin-Direkteinspritzung im NEFZ gemessen und analysiert haben [Han2003]. Abbildung 5 zeigt einen Auszug des Messaufschriebs. Der Farbverlauf beschreibt die Konzentration der verschiedenen Partikelgrößen im Abgas. Charakteristische Betriebsphasen sind entsprechend bezeichnet. Bemerkenswert ist die deutliche Zunahme der Partikelkonzentration bei Beschleunigung, Umschaltung der Betriebsart, „Tip-in“ und dem Gangwechsel, welches allesamt transiente Betriebsphasen sind.

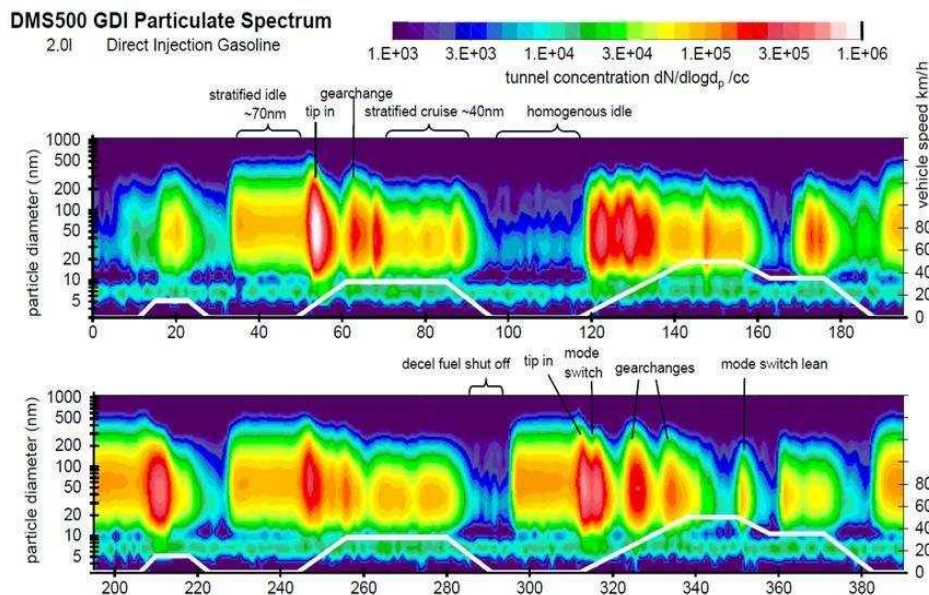
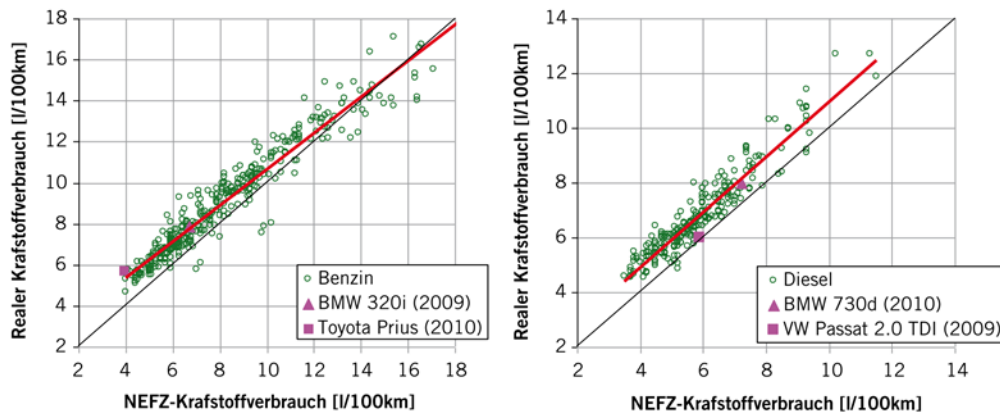


Abbildung 5: Auszug aus der Messung der Partikelgrößenverteilung und -konzentration im NEFZ eines Mittelklassefahrzeugs mit Ottomotor und Benzin-Direkteinspritzung [Han2003]



In puncto Kraftstoffverbrauch verweisen Hersteller in der Regel auf Ergebnisse aus dem NEFZ. Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass reale Kraftstoffverbräuche fast ausschließlich über dem des Verbrauchs im NEFZ liegen. In der Abbildung 6 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Die Basis der Untersuchungen sind die Herstellerangaben (nach NEFZ) und die real gemessenen Verbräuche auf der Teststrecke von Auto Motor und Sport [Spi2012]. Die Verbräuche unterscheiden sich zum Teil um mehr als 30%. Dies ist nahezu unabhängig vom eingesetzten Antriebs- bzw. Motorkonzept. Der Sachverhalt war für Diesel- und Ottomotor-Konzepte genauso festzustellen, wie auch für hybridangetriebene Fahrzeuge.



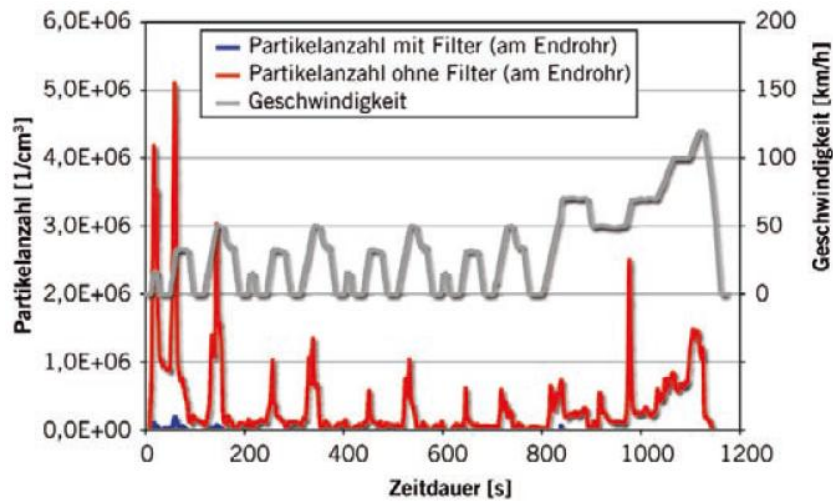
*Abbildung 6: Vergleich von Kraftstoffverbrauch im NEFZ zu realem Kraftstoffverbrauch [Spi2012]*

Um der oben ausgeführten Diskrepanz zwischen Messwerten im NEFZ und bei durchschnittlichen realen Kundenzyklen Rechnung zu tragen, wird vom Gesetzgeber seit vielen Jahren die Einführung neuer Fahrzyklen diskutiert. Einer dieser Zyklen ist der "Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure", kurz WLTP. Dieser wird schrittweise ab dem Jahr 2017 innerhalb der EU und vielen weiteren Ländern eingeführt. Durch transientere Anteile und höhere Lasten verspricht man sich eine realitätsnähere Abbildung von Kundenfahrprofilen. Des Weiteren werden sogenannte Real Driving Emissions (RDE) diskutiert. Hierbei werden Emissionen nicht unter Laborbedingungen auf einem Rollenprüfstand gemessen, sondern direkt beim Fahren auf der Straße. Eine Untersuchung von Realprofilen mit einer entsprechenden Applikationsstrategie wird zukünftig somit stetig an Bedeutung gewinnen.

Eine weitere Verschärfung der Randbedingungen für die Motorenentwicklung stellt die neue Abgasnorm Euro 6 (seit September 2014) dar. In dieser Richtlinie wird erstmals ein Grenzwert für die emittierte Partikelanzahl festgelegt, wobei der Wert für die Partikelmasse aus der Euro 5 Norm übernommen wird. In der Einführungsphase innerhalb der ersten 3 Jahre gilt ein Grenzwert von  $6 \cdot 10^{12}$  Partikel/km. Ab 2017 verringert er sich auf  $6 \cdot 10^{11}$  Partikel/km.

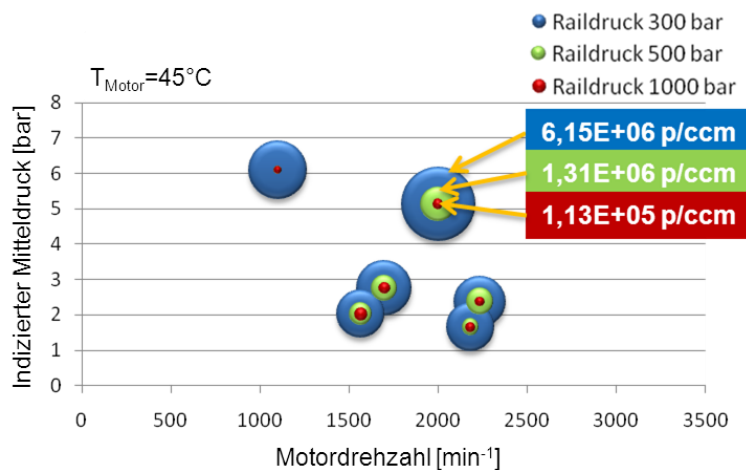
Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Partikelanzahlkonzentrationen während eines NEFZ-Fahrprofils. Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem während starker Beschleunigungsvorgänge die Partikelemissionen hohe Werte annehmen. Dies ist meist die Folge einer unzureichenden Gemischbildung. Zumindest lokale unterstöchiometrische

Gemischbereiche oder Wandanlagerungen (Kraftstoffbenetzung) begünstigen die Rußentstehung. Abhilfe kann beispielsweise durch eine Erhöhung des Einspritzdruckes erreicht werden, weil hierdurch die Aufbereitung des Kraftstoffes unterstützt wird.



*Abbildung 7: Partikelanzahlemissionen im NEFZ [Toe2013]*

Abbildung 8 zeigt den Einfluss einer Anhebung des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf die Partikelanzahlkonzentration. Der eingesetzte Versuchsträger basierte auf einem seriennahen 4-Zylinder-Ottomotor mit Direkteinspritzung und zentraler Lage der Einspritzdüse. In typischen NEFZ-Betriebspunkten wurde der Raildruck zwischen 300 und 1.000 bar variiert. In dem beispielhaft gekennzeichneten Punkt konnte durch die Anhebung des Einspritzdruckes die emittierte Partikelanzahlkonzentration auf ein Sechzigstel verringert werden.



*Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentrationen in ausgewählten NEFZ-Betriebspunkten bei unterschiedlichen Einspritzdrücken (eigene Messungen)*



## **4 Ziele und Arbeitsprogramm der Projektphase I**

### **4.1 Ziele**

Für die individuelle Mobilität ist der Verbrennungsmotor aktuell und auch in absehbarer Zukunft die Hauptantriebsquelle. In Kraftfahrzeugen wird der Verbrennungsmotor speziell bei Stadtfahrten durch eine Vielzahl an Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen zu einem wesentlichen Anteil dynamisch betrieben. Um den Verbrennungsmotor in diesem Umfeld unter dem Aspekt der transienten Betriebsbedingungen konsequent weiter zu entwickeln und so den Schadstoffausstoß und den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, ist es daher wesentlich, den Motorprozess nicht nur in stationären Betriebspunkten, sondern auch im hochdynamischen Betrieb zu analysieren und im Detail zu verbessern.

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, analysiert und korreliert. Daraus werden innermotorische Maßnahmen abgeleitet, mit denen sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen gezielt reduziert werden können.

### **4.2 Begriffsdefinition Transienter Motorbetrieb**

Für die Beschreibung des transienten Motorbetriebs existiert keine allgemeingültige Begriffsdefinition. Der Begriff transienter Motorbetrieb wird im Zusammenhang mit experimentellen Untersuchungen und/oder der Simulation verbrennungsmotorischer Fragestellungen als zeitliche Änderung prozessrelevanter Parameter interpretiert. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung motorischer Parameter lassen sich grundsätzlich vier verschiedene Ordnungen des transienten Motorbetriebs unterscheiden. Diese Klassifizierung dient zur Abgrenzung der verschiedenen Einflussgrößen und als Basis zur Auswahl der eingesetzten Messtechnik. In Abbildung 9 ist die Einteilung der Ordnungen mit Bezug auf deren zeitliches Auftreten und deren Prozesseinfluss dargestellt. Die verschiedenen Ordnungen lassen sich zum einen nach der zeitlichen Veränderung der beschriebenen Parameter gliedern und zum anderen anhand deren unmittelbaren Einflusses auf den Motorprozess. Gemäß der oszillatorischen Kolbenbewegung und der offenen Prozessführung kann sowohl beim stationär als auch beim instationär betriebenen Verbrennungsmotor grundsätzlich von einem transienten Zustand erster Ordnung gesprochen werden. Dem überlagert folgt dann auf Basis der gewünschten Parameteränderung des Fahrers eine Zustandsänderung zweiter Ordnung. Hierunter sind zum Beispiel die zeitlich gezielten Veränderungen der Motorlast und/oder der Motordrehzahl zu verstehen. Diese Vorgänge sind somit Bestandteil eines jeden Fahrprofils. Jedoch gibt es auch hier eine Überlagerung, welche in den transienten Zustandsänderungen dritter Ordnung zusammengefasst werden kann. Diese beschreiben Entwicklungen prozessrelevanter Motorparameter, welche als Folge aus den Änderungswünschen von Parametern zweiter Ordnung resultieren. Als Beispiel dient der Start und/oder Warmlauf des Motors. Vor allem die Oberflächentemperaturen im Brennraum (Wand und Kolben) nehmen über einen Lastsprung hinweg kontinuierlich zu, was in der Folge beispielsweise die Charakteristik der Rohemissionen beeinflussen kann und in deren Beurteilung entsprechend

berücksichtigt werden muss. Die zeitliche Unterscheidung der verschiedenen Prozesse führt letztlich zu den transienten Prozessen vierter Ordnung. Diese Umschreiben motorische Zustandsänderungen, deren Entstehungsmechanismen über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet und bewertet werden müssen. Hierzu zählen zum Beispiel die Änderungen durch Versottungseinflüsse und Ablagerungen im Brennraum, Kraftstoffeintrag ins Motoröl oder zum Beispiel auch applikative Anpassungen zur Kompensation der Alterungsprozesse von Injektoren. Die transienten Prozesse vierter Ordnung sind im Kontext der Motorhistorie und somit der Gesamtlaufzeit des Versuchsträgers zu bewerten. Unter Berücksichtigung der Klassifizierung des transienten Motorbetriebs sind verschiedene dynamische Prozesse zu unterscheiden. Angefangen vom Motorkalt und -warmstart über das Warmlaufverhalten hin zu Last- und Drehzahländerungen ist auch die Hybridisierung/Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors Bestandteil transienter Vorgänge. Die Beschreibung der Herausforderungen und Möglichkeiten, die sich aus der Betrachtung dieser dynamischen Zugänge ergeben, wird im Folgenden anhand des Tip-ins exemplarisch ausgeführt.

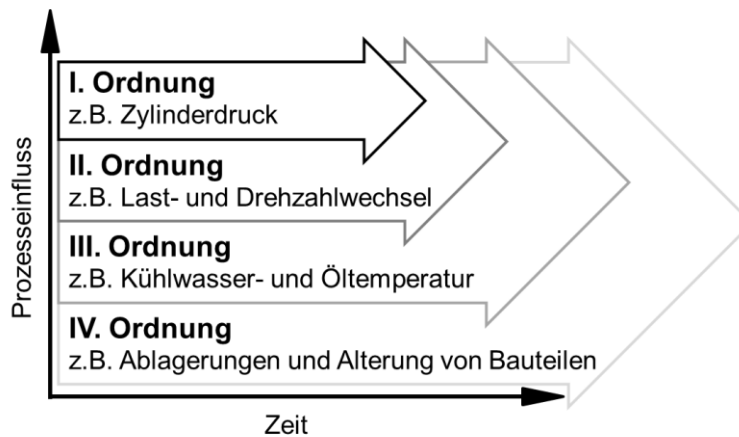


Abbildung 9: Kriterien zur Klassifizierung der transienten Betriebsphasen

In Abbildung 10 sind beispielhaft transiente Prozesse zweiter und dritter Ordnung abgebildet. Ausgangspunkt ist ein Lastsprung aus dem Schubbetrieb auf eine Motorlast von  $p_{mi} = 6$  bar. Zur Veranschaulichung der verschiedenen Einflüsse wurde die Ziellast anschließend 60 Sekunden stationär gehalten. Anhand der Verläufe der Partikelanzahlkonzentrationen ist zu erkennen, dass insbesondere in der initialen Phase des Lastsprungs vergleichsweise hohe Partikelemissionen zu messen sind. Diese fallen dann unmittelbar nach dem Lastsprung zunächst sehr deutlich und in der Folge in allen Durchmesserbereichen (Nukleations- und Akkumulationsmodus) stetig ab. Selbst nach 60 Sekunden ist noch kein stationärer Zustand erreicht. Sowohl die Abgastemperatur als auch die Partikelemissionen erfahren zu diesem Zeitpunkt noch eine stetige Änderung. Für die Übertragung auf das reale Fahrverhalten bedeutet dies im Umkehrschluss, dass in den meisten Fahrprofilen quasi nie ein stationärer Zustand erreicht werden kann und unterstreicht die Notwendigkeit zur Untersuchung des transienten Motorbetriebs.

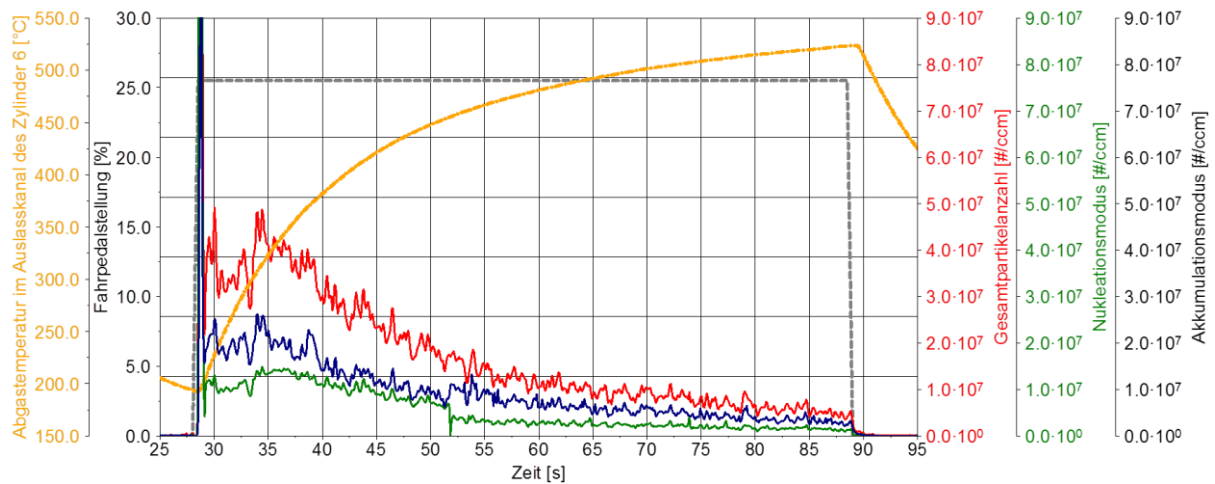


Abbildung 10: Lastsprung mit 60 Sekunden Lasthaltephase

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Partikelemissionen unmittelbar nach dem Lastsprung im Detail (Abbildung 11), fällt zudem auf, dass diese für eine Dauer von circa einer halben Sekunde um eine Größenordnung höher ist, als dies im anschließenden Stationäranteil der Fall ist. Darüber hinaus wird auch ersichtlich, dass sich das Größenspektrum der emittierten Partikel nach dem Lastsprung ändert. Während in der Initialphase ein Großteil der Partikel im Nukleationsmodus (mit kleinsten Durchmessern) auftritt und nur vergleichsweise wenige im Akkumulationsmodus auftreten, ist dies im stationären Anteil des Lastsprungs ( $t > 29$  s) genau umgekehrt.

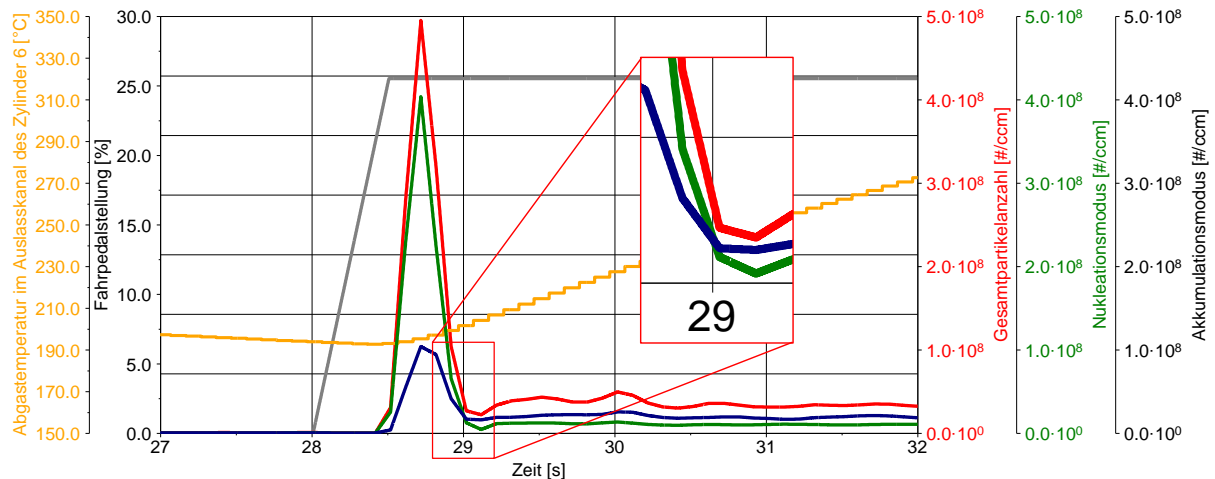


Abbildung 11: Detailansicht aus dem Lastsprung

Wenn man in der Folge die Partikelgrößenverteilung zu Grunde legt (Abbildung 12), wird deutlich, dass ein Großteil der Emissionen in der initialen Phase im Durchmesserbereich  $< 20$  nm gemessen wird. Dies ist aus zugleich zwei Gründen von Interesse. Zum einen ist dies ein Durchmesserbereich, der bislang nicht zertifizierungsrelevant aber dennoch von

großer Bedeutung ist, da kleinste Partikel lungengängig und somit im besonderen Maße gesundheitsschädlich sind.

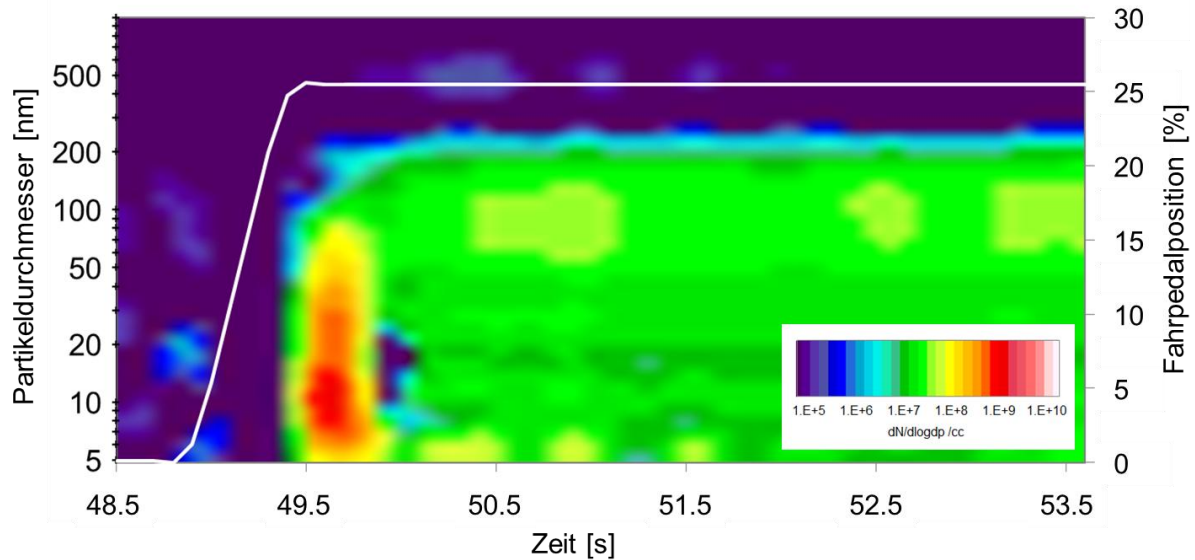


Abbildung 12: Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung zu Beginn eines Lastsprungs

### 4.3 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 Prüfstandsumgebung 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 auf dem Engine-in-the-Loop Prüfstand die Ausgangsbasis bildet (siehe Abbildung 13). Auf dieser Grundlage werden dann emissionskritische Fahrmanöver identifiziert und in den beiden folgenden Detaillierungsstufen schrittweise 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 jeweils mit 1 kHz.

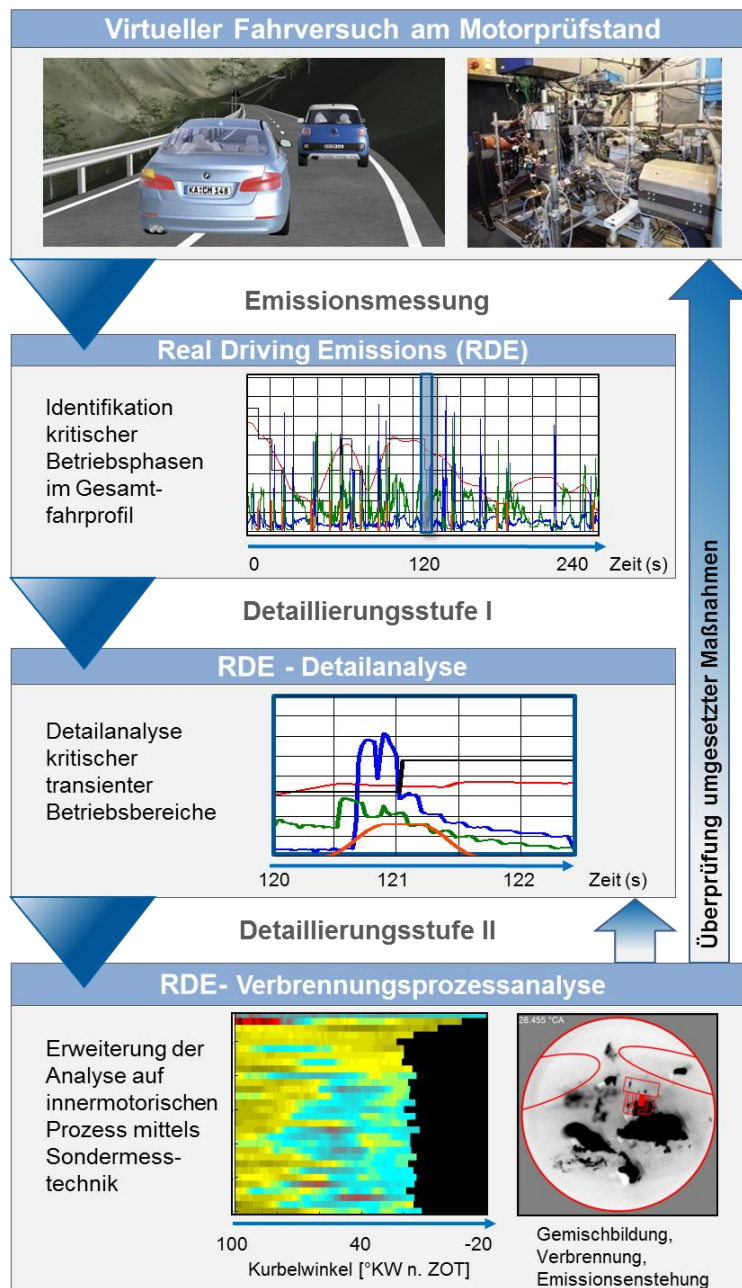


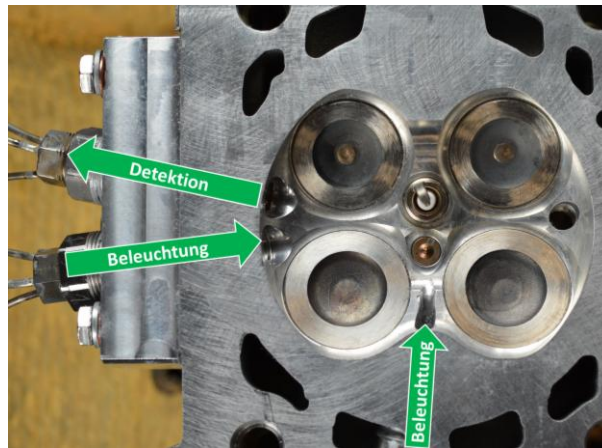
Abbildung 13: Schematische Beschreibung der Vorgehensweise – Entwicklungsmethodik [DIS2014b]

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.

#### **4.4 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 zyklus aufgelösten 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 (AVL InMotion powered by 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-Einsatz 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. In der Abbildung 14 sind die Anpassungen am ausgebauten Zylinderkopf dargestellt. 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-Einzyylinderaggregaten möglich ist.





*Abbildung 14: Konstruktive Anpassung des Zylinderkopfes zur Integration der optischen Sondermesstechnik*

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

Die Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik lassen sich aus der Begriffsdefinition in Abbildung 9 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. Die Entnahmepositionen können der Abbildung 15 schematisch entnommen werden.

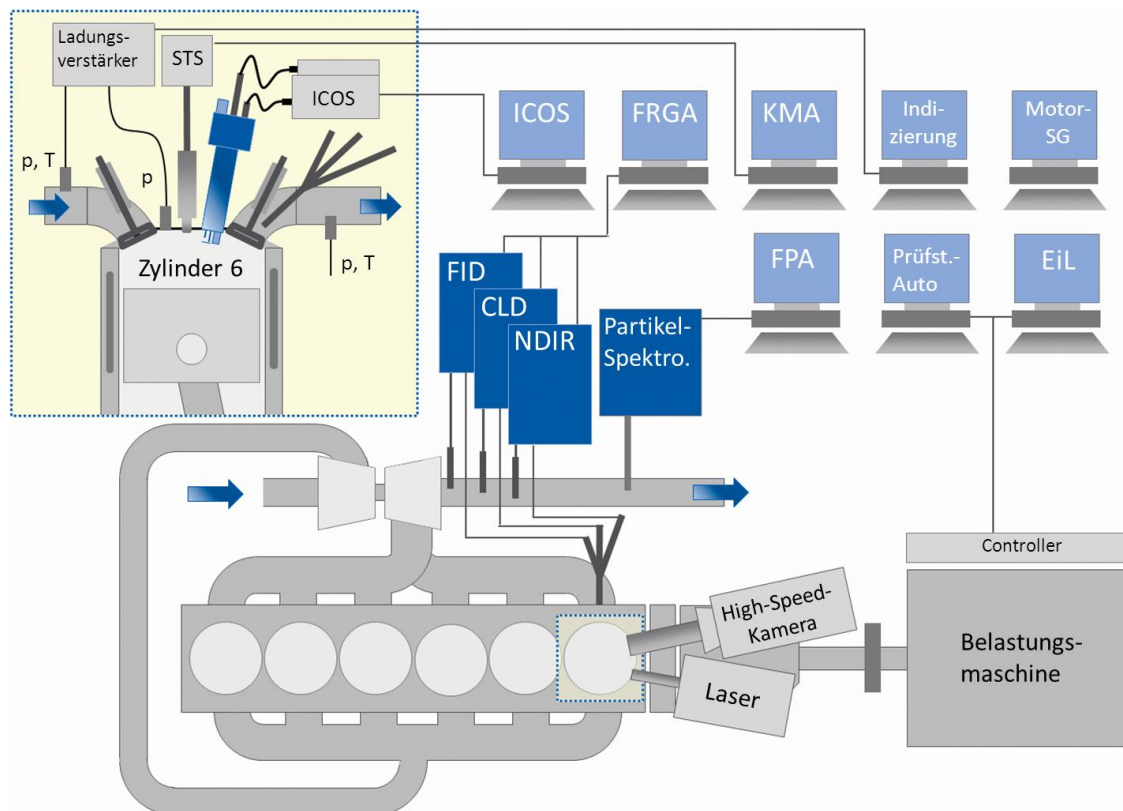


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Zur Ermittlung der Partikelemissionen kommt ein Partikelgrößen-Spektrometer (Transient Engine Particle Analyzer, Combustion 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. Darüber hinaus verfügt der eingesetzte Versuchsträger über ein Twin-Scroll Abgassystem, so dass eine Entnahme vor dem Turbolader nur für drei der sechs Zylinder repräsentativ ist. Unter diesen Randbedingungen wurde die Entnahmestelle zur Ermittlung der Partikelemissionen nach Abgasturbolader platziert. Die Einflüsse der verschiedenen Entnahmemöglichkeiten entlang des Abgasstrangs sind in [Eri2009] beschrieben. Die Arbeit zeigt die Notwendigkeit, Partikelrohmissionen 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.



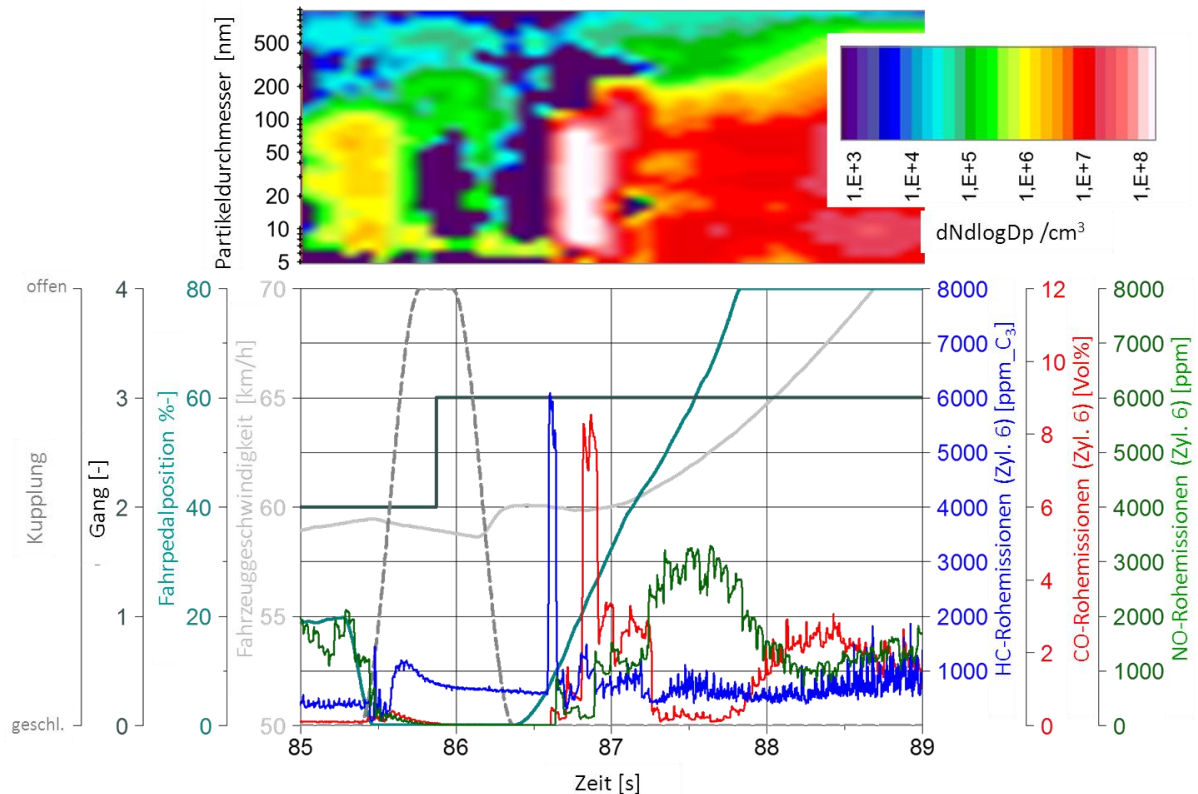
#### **4.6 Optische Indizierung zur kurbelwinkelaufgelösten Ermittlung des Luftverhältnisses im Brennraum**

Als einer der zentralen Prozessparameter für den dynamischen Motorbetrieb steht das Luftverhältnis in direktem Zusammenhang mit den Entstehungsmechanismen verschiedener gasförmiger Rohemissionen 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 jedoch nicht möglich, die Luftverhältnisse uneingeschränkt einzelnen Zylindern zuzuordnen. Dies könnte unter Berücksichtigung der Abgasgedrücke 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. 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 Aufnahmezeit 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 mehr als 2000 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 zeitliche Verzögerung 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.

#### **4.7 Untersuchung und Analyse realer Fahrprofile**

Der Projektteil zur Untersuchung der Gesamtfahrprofile umfasst sowohl die Aspekte der gesetzlichen Fahrprofile als auch der realen Fahrprofile. Die in Abbildung 16 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 Partikelgrößen-spektrometer zurückzuführen. Zur Analyse transienter 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 Aufnahme­frequenz für die gemessenen und simulierten Daten im kHz-Bereich ausge­führt sein, so dass sich die Prozesse auch zyklusaufgelöst bewerten lassen.

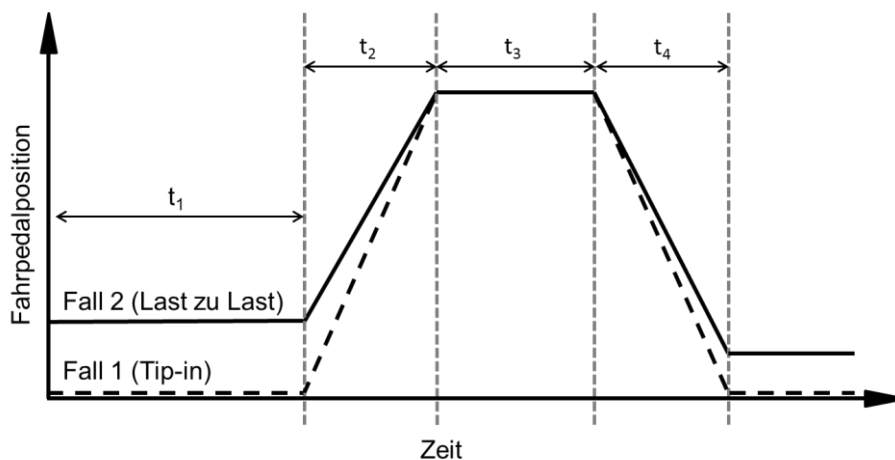


*Abbildung 16: Auszug aus einem realen Fahrprofil – Beschleunigungsvorgang*

#### **4.8 Untersuchung und Analyse elementarer transienter Prozesse**

Ausgehend von den Ergebnissen aus der Abbildung 16 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 Schubetrieb – 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 17). Die erste Phase beschreibt die Zeitdauer, über welche der Motor zuvor im Schubetrieb 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 17: Beschreibung der aufeinanderfolgenden Einzelphasen eines Lastsprungs*

#### **4.9 Versuchsvorbereitung und -auswertung**

Die Anpassung des Versuchsträgers für den transienten Motorbetrieb erfordert Maßnahmen 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 auszubedenken. 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  $85^\circ\text{C}$  zwangskonditioniert. Somit kann der Einfluss veränderlicher Kühlwasser- und Öltemperaturen ausgeschlossen werden. Für eine statistische Aussage der einzelnen Lastsprungversuche, wurden alle Prüfläufe gemäß Abbildung 18 aus zehn einzelnen aufeinanderfolgenden Lastsprüngen (L2-L11)

generiert. Dies ermöglicht, die Effekte des Temperatureinflusses ebenso zu berücksichtigen wie auch den Quervergleich verschiedener Lastsprünge.

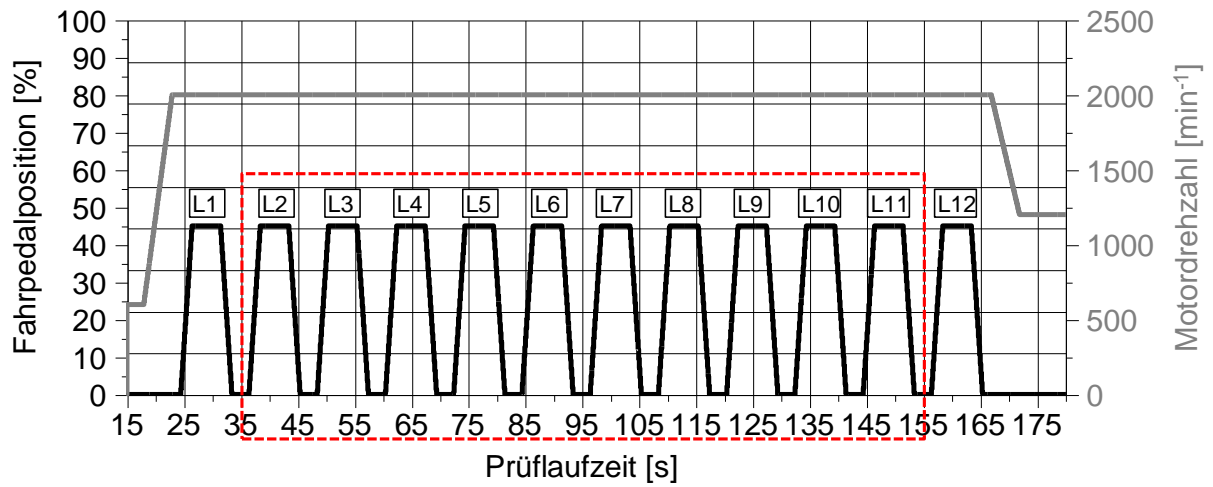


Abbildung 18: Beschreibung der Ablaufsequenzen eines Lastsprungprüflaufs

## 5 Versuchsergebnisse

Die vorgestellten Versuchsergebnisse beschreiben einen Auswahl der bisher gewonnenen Erkenntnisse. Diese umfassen die Ergebnisse zur Untersuchung der Lastsprünge bei konstanter Motordrehzahl als Beispiel eines praxisrelevanten transienten Vorgangs.

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 19 beschrieben. Dabei handelt es sich um Lastsprünge aus dem Schubbetrieb auf zwei verschiedene Lastniveaus (Fahrpedal = 25,5 %  $\rightarrow$   $p_{mi} = 6$  bar und Fahrpedal = 45 %  $\rightarrow$   $p_{mi} = 12$  bar). 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.

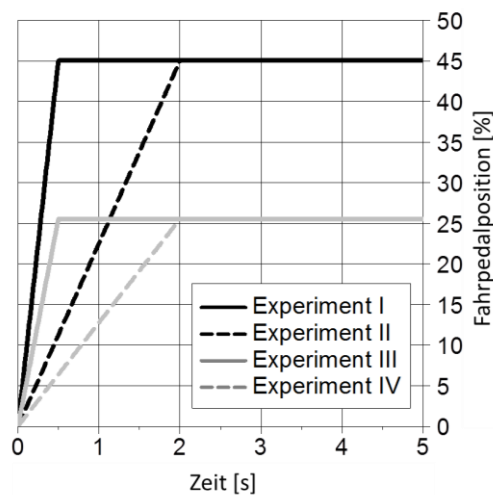


Abbildung 19: Zeitlicher Fahrpedalverlauf für vier verschiedener Lastsprungversuche (Tip-in)

### 5.1 Partikelrohmissionen

Die detaillierte Untersuchung der Partikelrohmissionen in dynamischen Betriebsphasen ist aufgrund der Aufnahmefrequenz konventioneller Messgeräte nur eingeschränkt möglich. Dennoch können bei einer Aufzeichnung mit 10 Hz reproduzierbare Aussagen über das Verhalten verschiedener Drehmomentverläufe (Lastsprünge) getroffen werden. In der Abbildung 20 sind die Partikelemissionen für die vier Versuche aus Abbildung 20 dargestellt. Die linke Bildhälfte beschreibt die Gesamtpartikelanzahlkonzentration als Mittelwert der zehn Wiederholungen eines jeden Prüflaufs (Vgl. Abbildung 18). 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 ab.

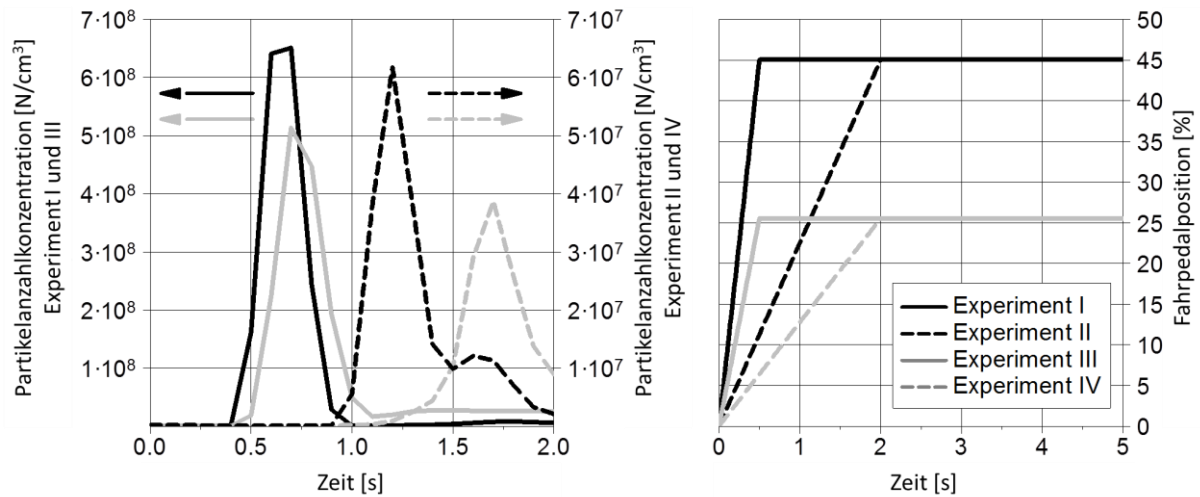


Abbildung 20: Mittlere Partikelanzahlkonzentration für vier verschiedene Lastsprungversuche

Die Ergebnisse in Abbildung 20 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 Partikelanzahlkonzentrationen ( $6,4E+08 \text{ N/cm}^3$ ), 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 21 ist die Partikelgrößenverteilung für die ersten fünf Sekunden nach Beginn der Lastaufschaltung als Mittelwert der jeweils zehn Lastsprünge dargestellt. In den Ergebnissen der schnellen Lastaufschaltung ( $t_2 = 0,5 \text{ s}$ ) ist die vergleichsweise hohe Partikelanzahlkonzentration zu Beginn des Lastsprungs deutlich 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.

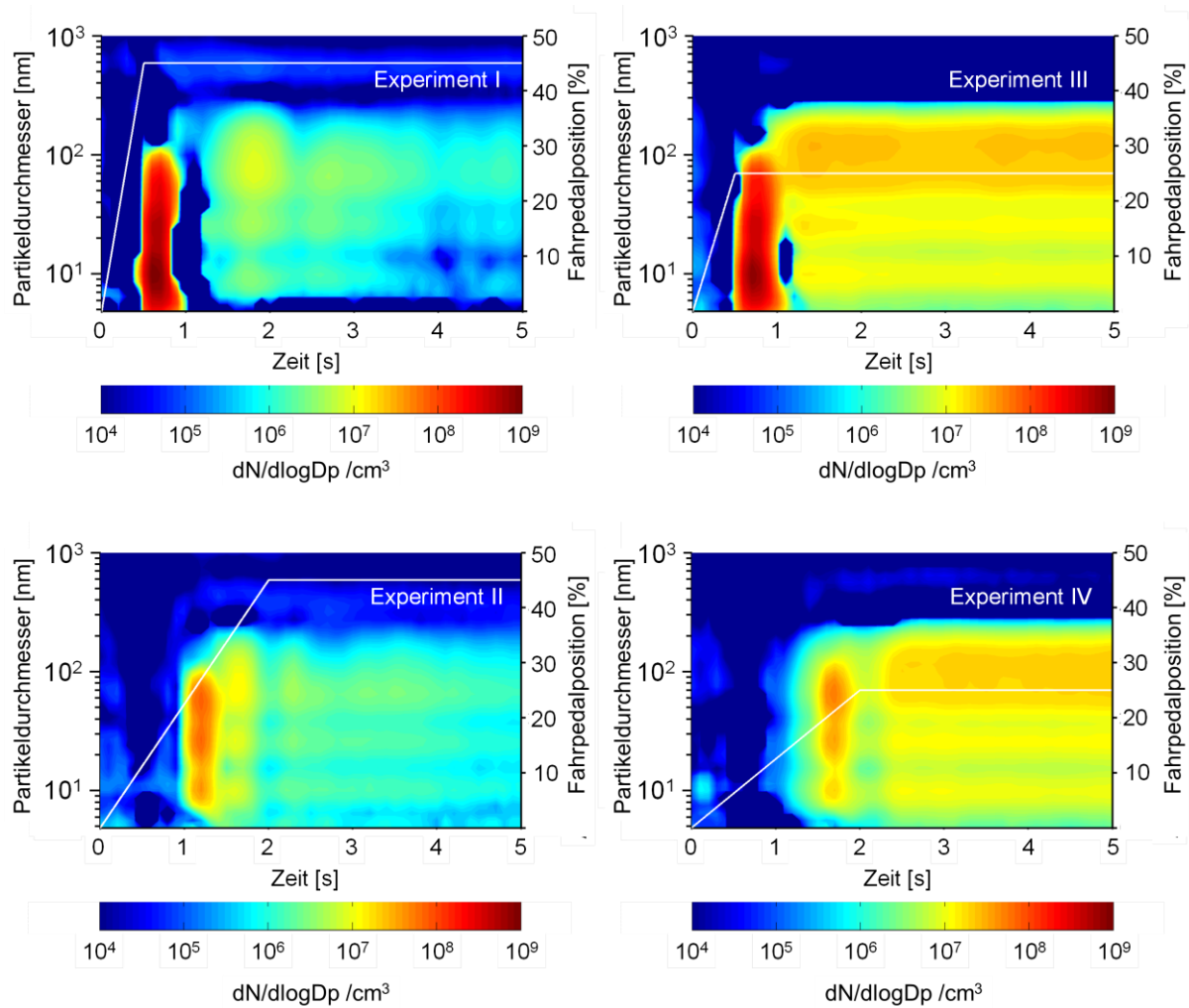


Abbildung 21: Mittelwertbetrachtung für die Partikelemissionen verschiedener Lastsprünge (Tip-in)

In Abbildung 22 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 22 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.

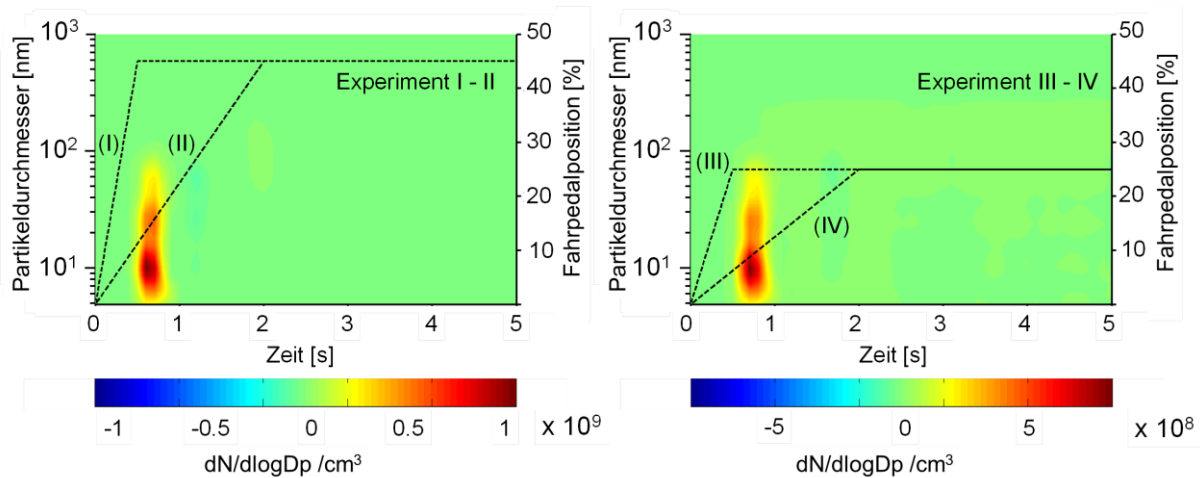


Abbildung 22: Differenz der verschiedenen Lastsprungversuche mit Bezug auf das Partikelgrößenspektrum

## 5.2 Messung der zyklus aufgelösten gasförmigen Rohemissionen

Die Messung der gasförmigen Rohemissionen direkt hinter dem Auslassventil des Zylinders 6 und an der Entnahmestelle nach Abgasturbolader geben wichtige Hinweise auf die Emissionentstehung 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 23A 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 23B 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.



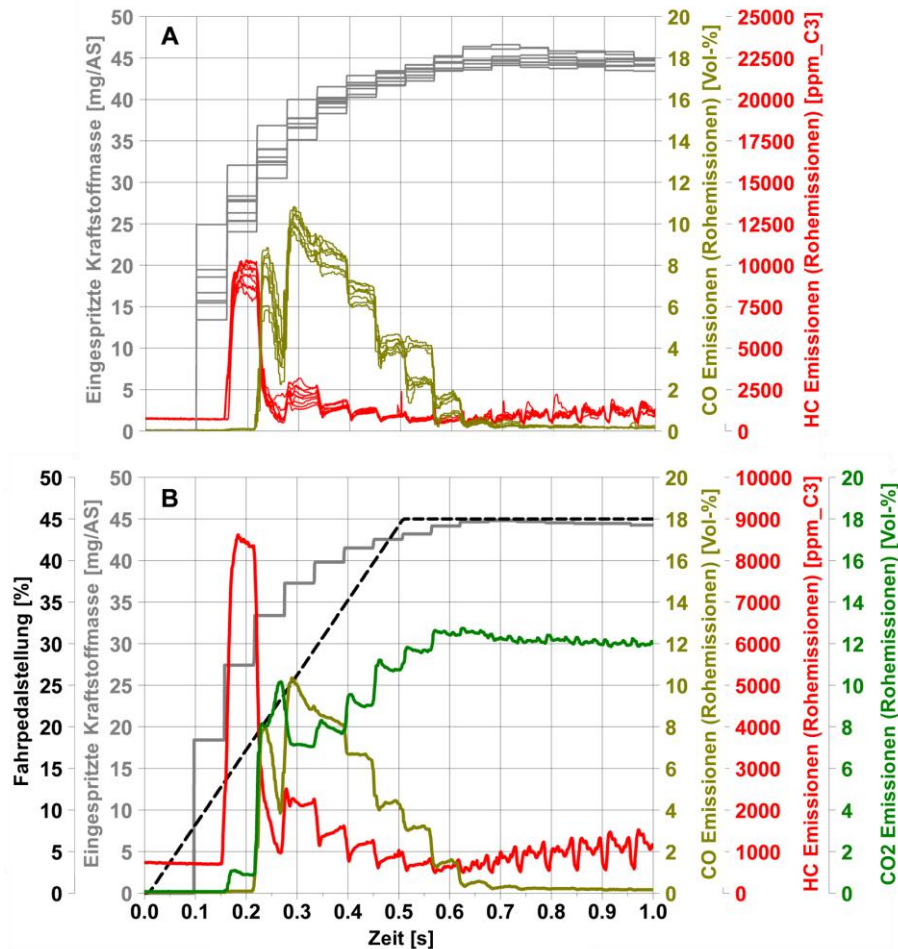


Abbildung 23: Messung der gasförmigen Rohemissionen und der eingespritzten Kraftstoffmasse von Zylinder 6

### 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 24 ist die Entwicklung des Luftverhältnisses für die vier verschiedenen Versuche 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 des Fahrpedals 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 einem nahezu 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.

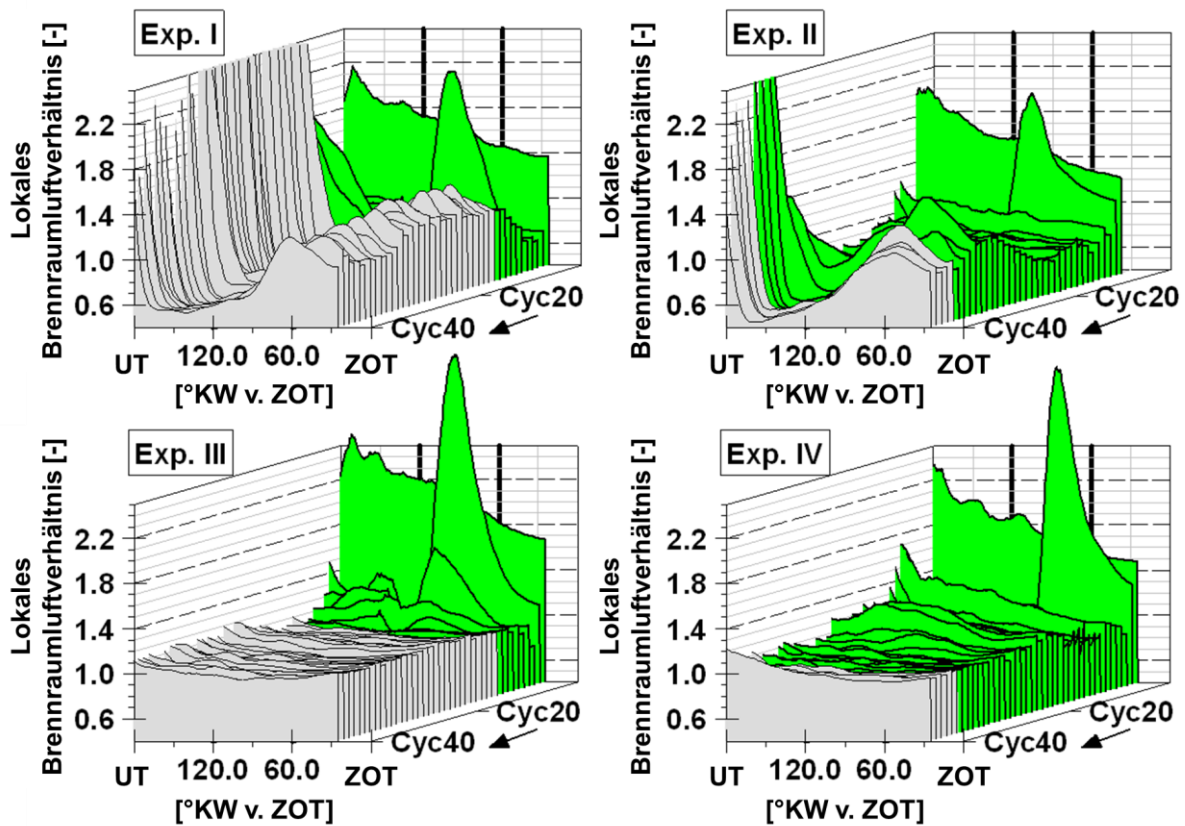


Abbildung 24: Vergleich des gemittelten lokalen Brennraumluftverhältnisses für die ersten 40 Zyklen der vier verschiedenen Lastsprungvarianten

### 5.3.1 Einzelzyklusanalyse

Die Ergebnisse der ersten Projektphase haben verdeutlicht, dass die Analyse des transienten Motorbetriebs die Bewertung aufeinanderfolgender Einzelarbeitsspiele voraussetzt. In Abbildung 25 sind die Verläufe des Luftverhältnisses für zwei exemplarische Tip-ins aus den Versuchen I (Abbildung 25 B) und III (Abbildung 25 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 der Motor in dieser Phase mit einem deutlich unterstöchiometrischen Gemisch betrieben wird. Dies unterstützt die Bildungsmechanismen

für die Partikelrohmissionen und passt zu den deutlich erhöhten CO-Emissionen, wie sie in Abbildung 23 aufgeführt sind. Der untere Teil aus Abbildung 25 (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.

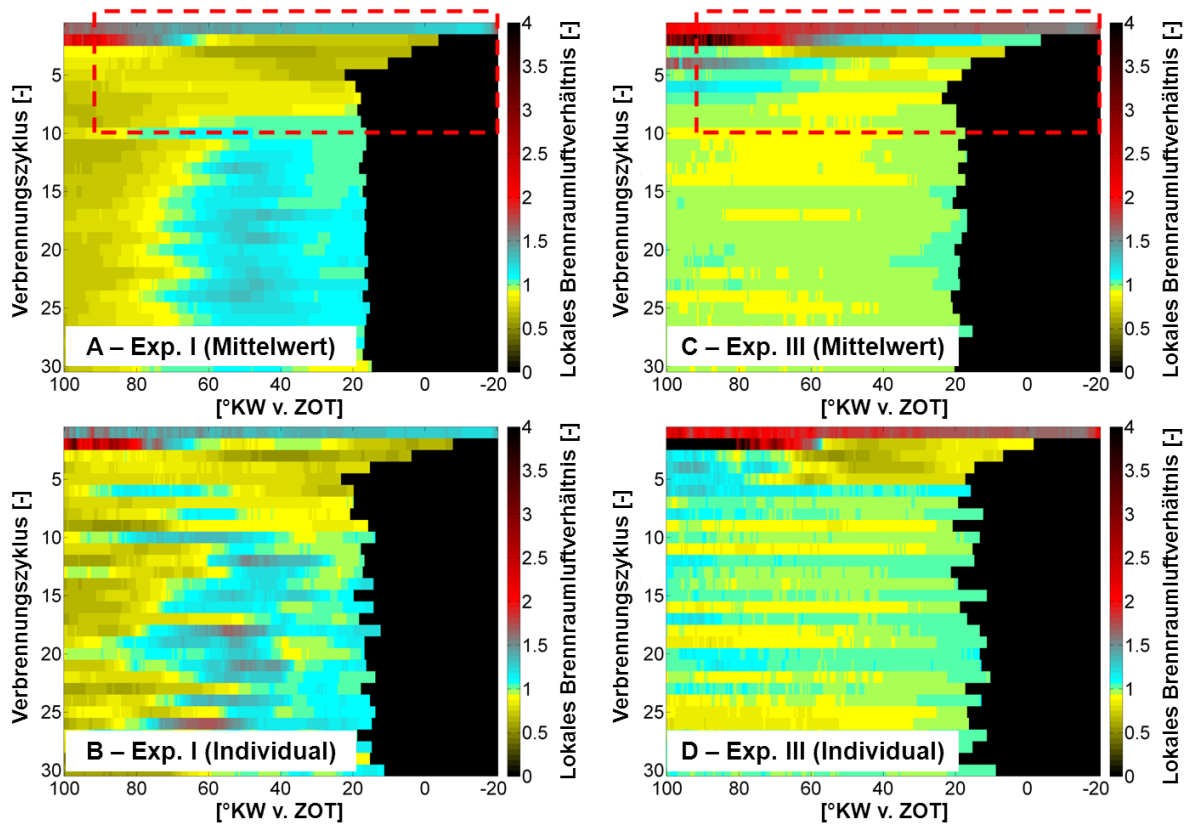


Abbildung 25: Lokales Brennraumluftverhältnis als Mittelwert und als Einzelzyklusanalyse für zwei verschiedene Lastsprungvarianten

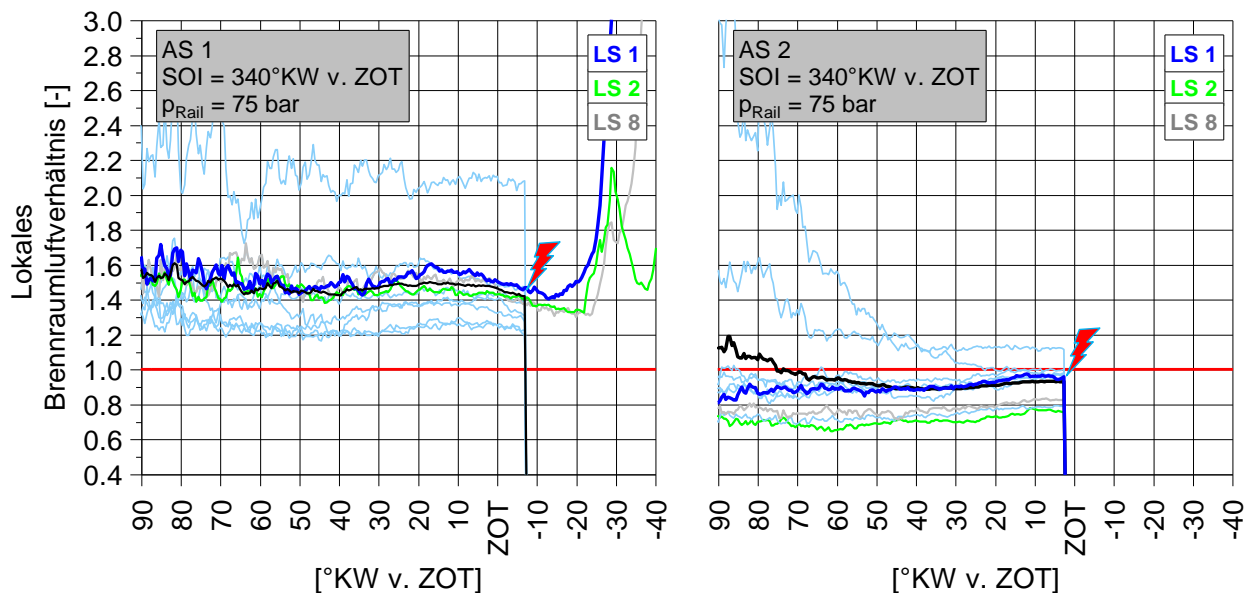
#### 5.4 Korrelation optischer Messtechniken zur Identifikation von auffälligen Arbeitsspielen im transienten Motorbetrieb

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 Partikelrohmissionen über den kompletten Lastsprung hinweg konstant gehalten. Hierzu wurde der Versuch gemäß der Beschreibung in Abbildung 17 und Abbildung 18 derart angepasst, dass die Ziellast (Fahrpedal = 25,5 %  $\rightarrow p_{mi} = 6$  bar) innerhalb einer Millisekunde angefordert wurde. Zum

Vergleich wurden vier verschiedene Einspritzzeitpunkte untersucht (220°KW v. ZOT, 260°KW v. ZOT, 300°KW v. ZOT und 340°KW v. ZOT)

Im Versuch mit einem SOI = 340°KW v. ZOT war auffällig, dass der Verlauf der Infrarotabsorptionsspektroskopie zur Ermittlung des Brennraumluftverhältnisses 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 26 sind die zehn Einzelverläufe (Wiederholungen) des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für das erste und zweite Arbeitsspiel des Lastsprungprüflaufs mit einem konstanten SOI = 340°KW v. ZOT dargestellt. In beiden Darstellungen sind die zusammengehörigen Arbeitsspiele der Sonderfälle farblich markiert (Lastsprung 1 in blau, Lastsprung 2 in grün und Lastsprung 8 in grau). 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, andernfalls hätte dies zum Signalverlust geführt (Vgl. reguläre Arbeitsspiele).

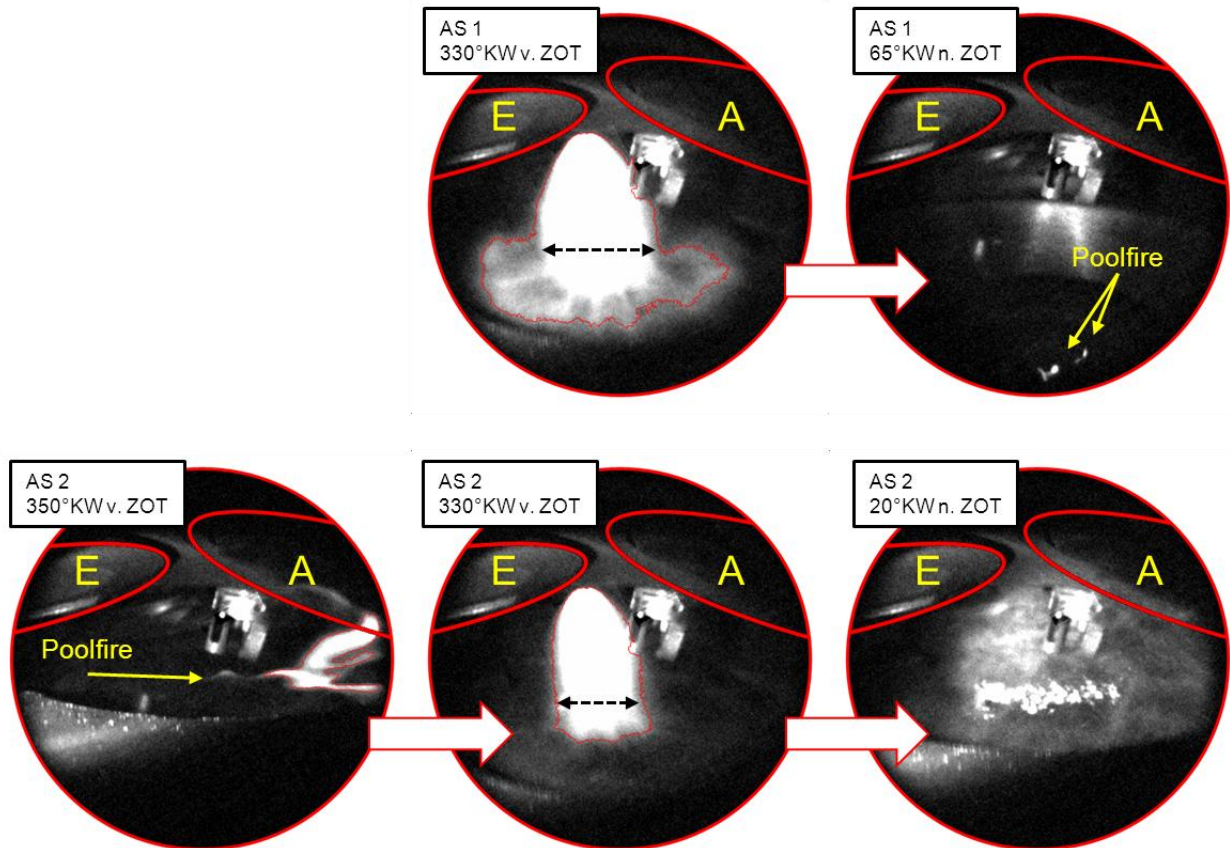


*Abbildung 26: Verlauf des lokalen kurbelwinkelaufgelösten Brennraumluftverhältnisses für die ersten beiden Arbeitsspiele bei einem SOI = 340°KW v. ZOT*

Eine Analyse der simultan aufgezeichneten High-Speed-Kameraaufnahmen konnte weitere Rückschlüsse auf die innermotorischen Vorgänge der beiden in dunkelblau hervorgehobenen Arbeitsspiele des ersten Lastsprungs (LS1) geben. In Abbildung 27 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°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°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



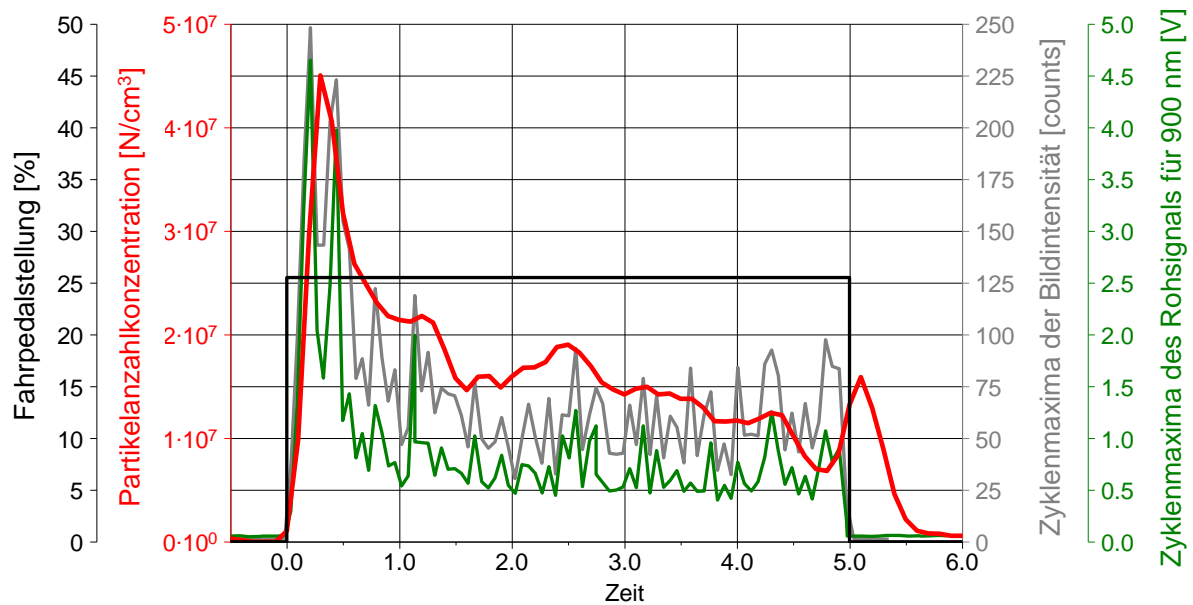
(350°KW v. ZOT) war erneut bzw. immer noch eine kleine diffuse Verbrennung auf dem Kolben und im Bereich des Auslassventils (rechter Bildrand → Verweil poolfire) zu detektieren. Die anschließende Einspritzung (gekennzeichnet durch einen zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise geringeren Kolbenauftrag und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



*Abbildung 27: 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 wird die Möglichkeiten des simultanen Einsatzes von optischer Sondermesstechnik und der Partikelemissionsmesstechnik beschrieben. In Abbildung 28 sind die Verläufe der Partikelanzahlkonzentration, die Maxima für die gemittelte Bildintensität aus den High-Speed-Kameraaufnahmen zum Rußeigenleuchten sowie die Maxima der spektral gefilterten Intensitätsverläufe eines Lichtwellenleiters (900 nm) dargestellt. Zur Interpretation ist es wichtig, die Lage der Messstelle des jeweiligen Systems, gemäß des Prüfstandsbaus in Abbildung 15 zu berücksichtigen. Während die Partikelemissionen aufgrund der Anordnung nach Abgasturbolader das Ergebnis des Verhaltens des Gesamtaggregate darstellen, basieren die beiden Verläufe der optischen Messtechniken ausschließlich auf den innermotorischen Prozessen des Zylinders 6. Zudem unterscheiden sich die Beobachtungsvolumen der beiden optischen Verfahren deutlich. Dennoch zeigen die unterschiedlichen Messbedingungen, dass der Verlauf der Partikelanzahlkonzentration auch durch den Verlauf der optischen Signale qualitativ

wiedergegeben werden kann. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Abbildung 23, wonach die Ursache für die erhöhten Partikelemissionen während eines Lastsprungs innerhalb weniger Einzelzyklen zu Beginn der Lastaufschaltung zu finden sind.



*Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse optischer Messtechnik und der Partikelanzahlkonzentration*

Ausgehend von den Ergebnissen in Abbildung 28 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 bereits gewonnenen Erkenntnisse – Umweltnutzen**

### **Emissionsoptimierung im Gesamtfahrzeugkontext**

Der Aufbau des hochdynamischen, echtzeitfähigen Prüfstandes erlaubt sowohl die Untersuchung elementarer transienter Prozesse als auch die Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkonzeppte. 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 soll 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 Strahlzerfalls aufgrund der erhöhten Eindringtiefe und somit möglich resultierender Wandaufträge zu mehr Partikelrohmissionen führen. Im Kontext des dynamischen Motorbetriebs kommt 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 29 sind die kurbelwinkelaufgelösten Verläufe des lokalen Brennraumlufverhältnisses für vier verschiedene Einspritztimings dargestellt. 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 Luftverhältnisses zum Zündzeitpunkt. Während die Versuche bei  $\text{SOI} = 340^\circ\text{KW v. ZOT}$  und  $300^\circ\text{KW v. ZOT}$  vergleichsweise wenig Fluktuationen aufweisen sind diese für die beiden Versuche bei  $260^\circ\text{KW v. ZOT}$  und  $220^\circ\text{KW v. ZOT}$  deutlich stärker. Bei  $\text{SOI} = 220^\circ\text{KW v. ZOT}$  erreicht die Streuung des lokalen Brennraumlufverhältnisses im dargestellten Bereich Werte von 0,6 bis 1,2. Im Vergleich dazu ergeben sich bei  $\text{SOI} = 340^\circ\text{KW v. ZOT}$  Werte im Bereich zwischen 0,85 und 1,05. Darüber hinaus unterscheiden sich die Versuche auch in der kurbelwinkelbezogenen Entwicklung des Brennraumlufverhältnisses. Während die beiden Versuche mit vergleichsweise früheren Einspritztimings bereits bei  $120^\circ\text{KW v. ZOT}$  ein Brennraumlufverhältnis im Bereich des gewünschten Zündlambdas ausweisen, folgen die Verläufe der beiden Versuche mit vergleichsweise späteren Einspritztiming noch deutlichen Veränderungen während des Kompressionshubs.

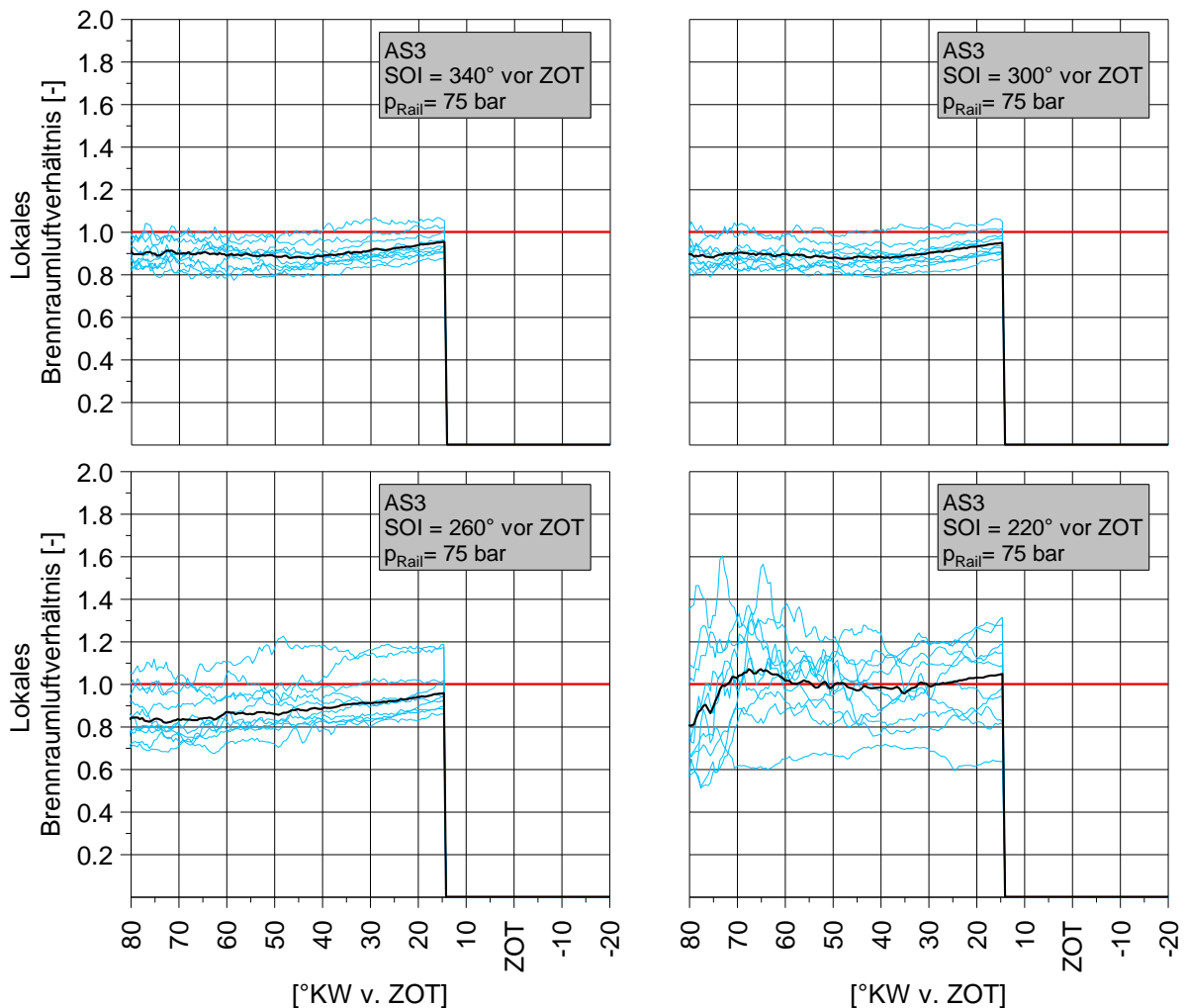
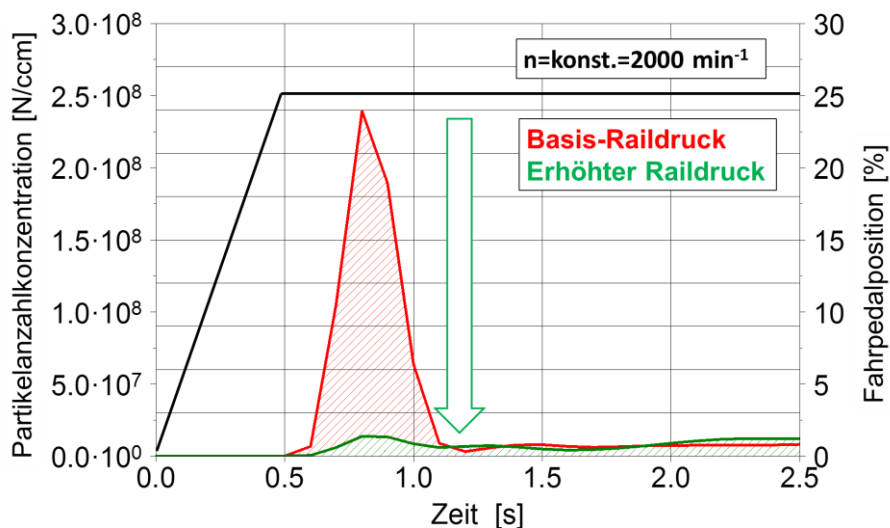


Abbildung 29: Vergleich des lokalen Brennraumlufverhältnisses für das dritte Arbeitsspiel (AS 3) unter Variation des Einspritztimings (SOI)



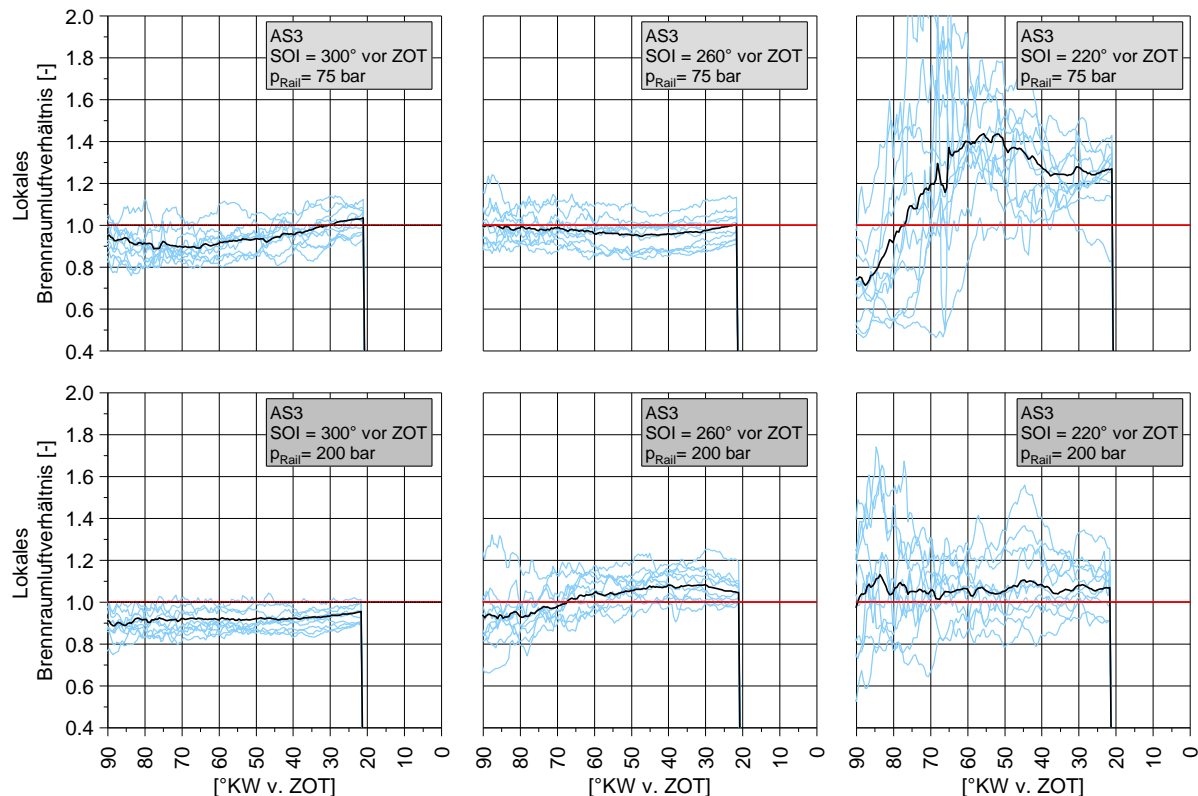
### 6.1.2 Variation des Kraftstoffeinspritzdruckes

Die Auswertung der Versuche der ersten Projektphase 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 30 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 (195 bar, 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 30: 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 31 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  $SOI = 300^\circ KW$  v. ZOT und  $220^\circ KW$  v. ZOT zeigen eine deutliche Verbesserung der Streuung zum Zündzeitpunkt.



*Abbildung 31: Einfluss des Kraftstoff-Einspritzdruckes auf das lokale Brennraumluftverhältnis im fünften Arbeitsspiel (AS 5) unter Variation des Einspritztimings (SOI)*

In Abbildung 32 sind die Partikelanzahlkonzentrationen als Mittelwert aus den zehn Einzellastsprüngen 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 Lastwegnahme ein und bestätigt somit die Theorie, dass der Verlauf der Partikelemissionen für dieses Timing maßgeblich durch einen Kraftstoffauftrag auf die Brennraumoberflächen geprägt ist. Dieser kann mit der stetig zunehmenden Oberflächentemperatur 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 32 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. 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 32 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 Bereich der Messzündkerze 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 Kraftstoffilm 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 Kraftstoffilm auftrags verbessert. Den Vorteilen in Bezug auf die Partikelemissionen stehen für die späten Einspritztimings jedoch die Nachteile in puncto Laufruhe, aufgrund der erhöhten Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen (als Folge aus der schlechteren Homogenisierung) gegenüber.

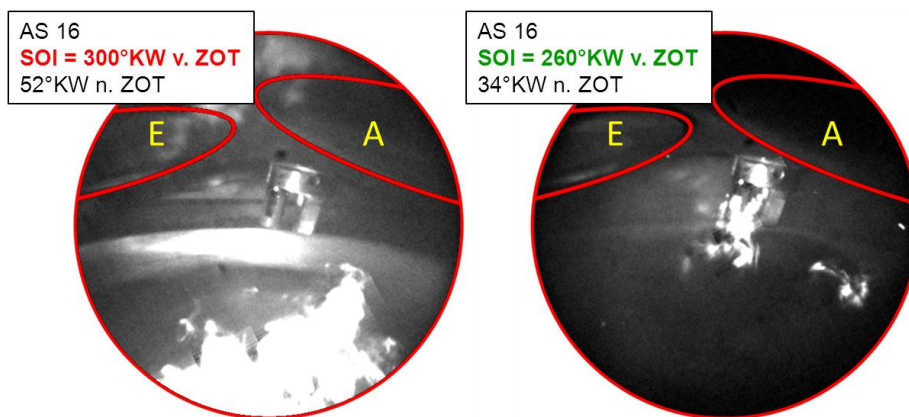
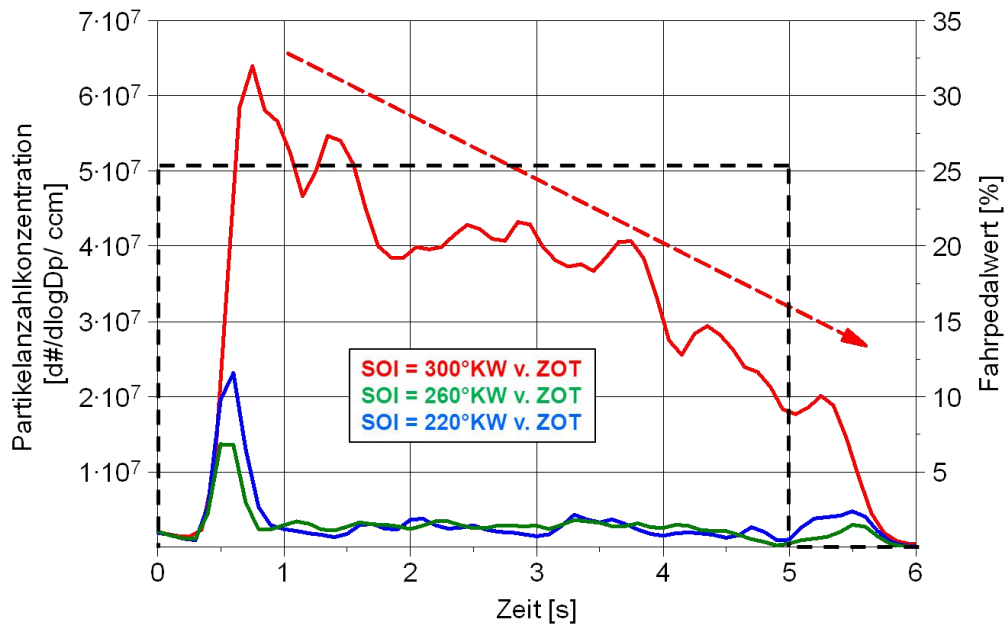


Abbildung 32: Oben: Partikelemissionen in Abhängigkeit des SOI, gemessen am Auslassventil des Einzelzylinders (Zylinder 6), Unten: Beispielaufnahmen zur innermotorischen Entwicklung des Rußleuchtens für verschiedene SOI

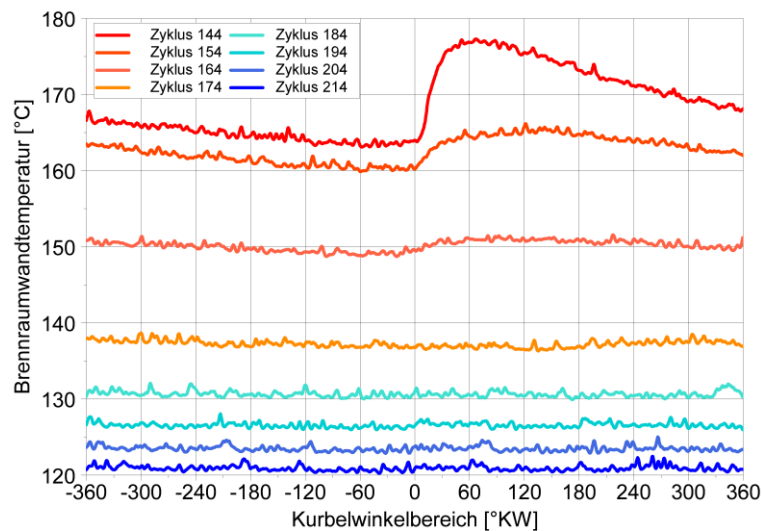
## Umweltnutzen – Applikationsstrategie

Die vorgestellten Untersuchungen zur Optimierung der Einspritztimings haben gezeigt, dass das komplexe Wechselspiel aus Einspritzzeitpunkt und Kraftstoffeinspritzdruck im transienten Motorbetrieb aufgrund der sich stetig ändernden Oberflächentemperaturen deutliches Optimierungspotential aufweist. Anhand der Umsetzung wird deutlich, dass sich unter Umständen eine aus Applikationssicht weniger attraktive Lösung sehr wohl eignet, um die Partikelrohmissionen in den initialen Zyklen eines Lastsprungs umfangreich zu reduzieren. Die Spätverstellung des Einspritzzeitpunktes führt zwar zu Einbußen in der Laufruhe, dies kann jedoch mit Einsatz eines höheren Kraftstoffeinspritzdruckes teilweise kompensiert werden. Die Strategie bildet somit einen guten Kompromiss aus Fahrbarkeit und Emissionsreduzierung für dynamische Betriebsphasen.

## 6.2 Anwendungsbeispiel Betriebsstrategie

### Hybridisierung als Synergie der Antriebssysteme Elektrotraktion und VKM

Neben den konventionellen Applikationsmöglichkeiten können die konzeptbedingten Nachteile eines Verbrennungsmotors auch durch den Einsatz erweiterter Antriebsstrangkonzeppte kompensiert werden. Die systembedingten Nachteile des Verbrennungsmotors im hochdynamischen Betrieb sind in erster Linie durch Herausforderungen in der Mess- und Regelungstechnik verschiedener Prozessgrößen sowie in den thermo- und/oder fluiddynamischen Veränderungen in diesen Betriebsphasen 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 33 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 33: 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, welcher während der Einspritzung auf die Brennraumoberflächen aufgetragen wurde. Dadurch kommt es zur Diffusionsverbrennung von unterstöchiometrischen Gemischbereichen. 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 Hybridtriebkonzepte 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 34 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.

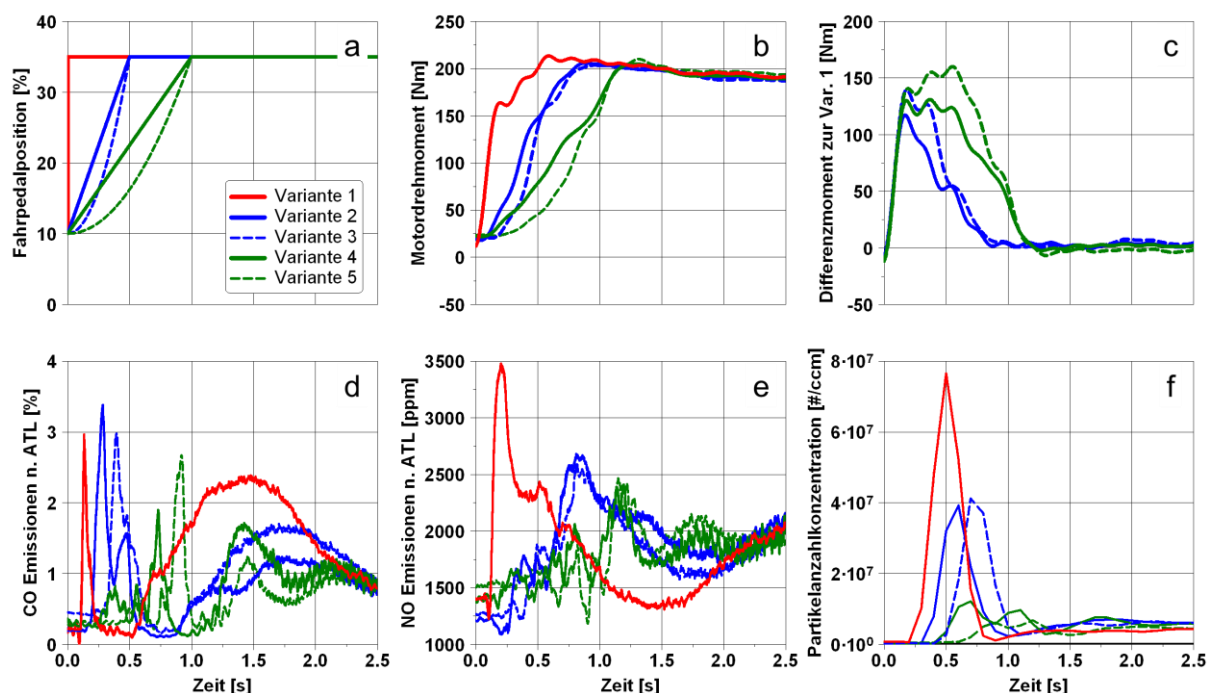


Abbildung 34: Einfluss der Momentenformung auf die Emissionen während des Lastsprungs

Anhand der Ergebnisse aus Abbildung 34 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.

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  $t=2,5$  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.

Um eine derartige Momentenverlaufsformung in einem beliebigen Fahrprofil anzuwenden, ist eine direkte Vorsteuerung aller Fahrzustände nur eingeschränkt zielführend. Aus diesem Grund wurde das Echtzeitsystem der Prüfstandsautomatisierung dazu genutzt, ein virtuelles Hybridmodell in Matlab/Simulink zu realisieren. Das Modell selbst besteht aus drei Teilmodellen

- Hybrid Acceleration Control
- Hybrid Brake Control
- Hybrid Energy Control

Die Hybrid Energy Control beinhaltet ein vereinfachtes Batteriemodell zur Simulation des Ladezustandes. Dies dient zum Abgleich der Energiebilanzen innerhalb eines beliebigen Fahrprofils. Ziel ist es, den Ladezustand über die Gesamtstrecke näherungsweise konstant zu halten bzw. Mindestenergieserven für besondere Fahrmanöver vorzuhalten. Eine Rekuperation wird im verwendeten Modell über die Hybrid Brake Control verwirklicht. Die Energierückgewinnung wird im Modell ausschließlich aus der Bremsenergie bezogen (keine Lastpunktverschiebung). Hierzu wird das notwendige Bremsmoment über die Erhöhung des Generatormomentes am Elektromotor realisiert.

Zentrales Element für die Emissionsreduktion ist neben der Rückgewinnung der Bremsenergie jedoch die Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors. Hierzu wird der Laständerungswunsch des Fahrers (Fahrpedal) innerhalb der Hybrid Acceleration Control bewertet und auf Basis von empirischen Kennfeldern mit einem PT1-Glied derart verändert, dass die Emissionen deutlich verringert werden können. Das „neuinterpretierte“ Fahrpedal wird dann an den Verbrennungsmotor weitergegeben. Aus der zeitlichen Veränderung des Fahrpedalverlaufs resultiert jedoch auch eine reduzierte Fahrzeugbeschleunigung. Um dies zu kompensieren, wird auf Basis eines Momentenkennfeldes, das erforderliche Differenzmoment durch den Elektromotor (virtuell) bereitgestellt.

In Abbildung 35 ist der Einfluss des Modells anhand des konventionellen und elektrisch unterstützten Fahrpedalverlaufs beispielhaft dargestellt. Der Fahrpedalmaximalwert war in diesem Versuch auf 50% begrenzt. Der schwarze Fahrpedalverlauf entspricht dem konventionellen Verlauf des Fahrers, sofern die Verbrennungskraftmaschine den alleinigen Antrieb des Fahrzeugs darstellt. Der grüne Fahrpedalverlauf entspricht der phlegmatisierten Variante. Dies bedeutet, dass sich der grüne Fahrpedalverlauf insbesondere in den Betriebsphasen unterscheidet, in denen hohe Fahrpedalgradienten auszumachen sind. Damit das Fahrzeug trotz des verzögerten Momentenaufbaus der Verbrennungs-



kraftmaschine eine vergleichbare Beschleunigung ausweist, wird in den phlegmatisierten Betriebsbereichen der Elektromotor mit dem nötigen Differenzdrehmoment hinzugeschaltet.

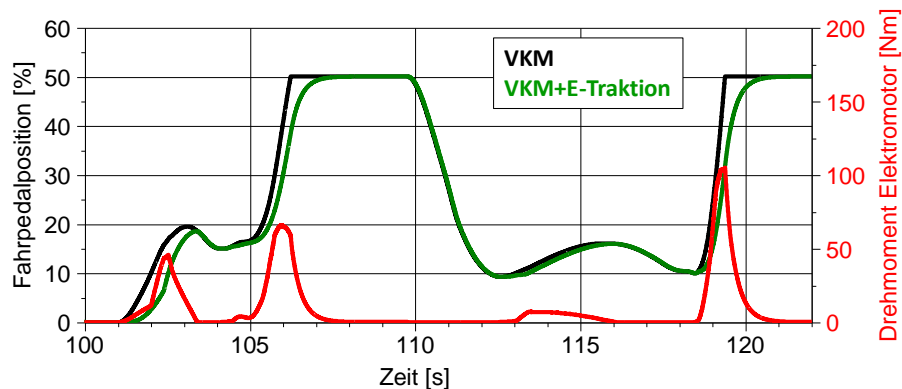


Abbildung 35: Modifizierter Fahrpedalverlauf zur Phlegmatisierung des Verbrennungsmotors

### Umweltnutzen – Betriebsstrategie

Auf Basis der in Abbildung 35 dargestellten Realisierung der Phlegmatisierung können somit die Verbesserungspotentiale, wie sie in der Abbildung 34 dargestellt sind, auf beliebige reale und gesetzliche Fahrprofile angewandt werden. Unter der Voraussetzung, dass der State of Charge der Batterie (SOC) vor und nach dem virtuellen Fahrversuch einen vergleichbaren Zustand aufweist, können die Rohemissionen somit ohne zusätzlichen Energieeintrag deutlich reduziert werden.

## 7 Fazit und Ausblick auf zweite Projektphase

Die vorgestellten Versuchsergebnisse zeigen das Potential, elementare Prozesse des Transientenbetriebs 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.

Um das Prozessverständnis weiter zu vertiefen und die Eingriffsmöglichkeiten zu erweitern sind für die zweite Projektphase weitere experimentelle Untersuchungen notwendig. Diese umfassen insbesondere die Arbeitspakete zur Verbrennungsdiagnostik mittels optischer Sondermesstechnik. Im Fokus dieser Verfahren liegt die Identifikation der Ursachen für die Partikelentstehung im transienten Motorbetrieb. Die Herausforderungen liegen hier in der zyklusaufgelösten Analyse der Motorrohmissionen.

Die Voruntersuchungen zur Erhöhung des Kraftstoff-Einspritzdruckes haben gezeigt, dass dies ein vielversprechendes Mittel zur Reduktion der Partikelanzahlkonzentration im Lastsprung ist. Aus diesem Grund soll in der zweiten Projektphase über den Umfang des Erstantrags hinaus auch ein Kraftstoffhochdrucksystem aufgebaut werden, so dass Einspritzdrücke bis 350 bar realisiert werden können (aktueller Stand der Technik: 200 bar).

Neben der Erweiterung zu den Applikationsstrategien wird in der zweiten Projektphase auch die Betriebsstrategie (Verbrennungsmotor im Hybridkonzept) weiter verfolgt. Ziel ist es, die elementaren Einflüsse der Applikationsstrategie im Gesamtfahrzeugkontext zu beleuchten. Aus diesem Grund soll ein neues Fahrprofil definiert werden, anhand dessen, die Verbesserungsmaßnahmen in komprimierter Weise (Reduzierung der Zeitdauer des Prüflaufs → Handling Messdaten) untersucht werden können.

Neben den beiden bereits beleuchteten Strategien (Applikations- und Betriebsstrategie) ist die Auswahl des Energieträgers eine weitere Möglichkeit, um die Emissionen über die bereits beschriebenen Maßnahmen hinaus zu reduzieren. Dies soll in der zweiten Projektphase anhand von Ethanol-Mischkraftstoffen untersucht werden (Ressourcenstrategie). 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.

In Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen wird in der zweiten Projektphase auch der Aufbau des 1D-Simulationsmodells fokussiert. Die Herausforderung besteht im Aufbau und der Anpassung des Modells an die gegebenen Besonderheiten des transienten Motorbetriebs (keine Mittelwertbetrachtung möglich). So ändern sich beispielsweise Ventilsteuerzeiten während des Lastsprungs innerhalb des Arbeitsspiels kontinuierlich. Feste Vorgaben von Steuerzeiten sind in diesem Anwendungsfall unter Umständen nicht zielführend, bzw. müssen mit Sensitivitätsanalysen abgesichert werden.

Mit Hilfe der Modellbildung wird es möglich sein, ergänzende Hinweise zu den experimentellen Ergebnissen zu bekommen und darüber hinaus Einflussgrößen zu variieren, die so am Prüfstand nicht variiert werden könnten. Ziel ist es letztlich, die Synergie aus Versuch und Simulation zur Erweiterung des Prozessverständnisses zu nutzen.

## 8 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 zugänglich gemacht werden konnten.

[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 Motortechnische Zeitschrift, 10/2014

[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 worldwide, 10/2014

[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

## 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

- [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
- [Spi2012] SPICHER, U.: *Analyse der Effizienz zukünftiger Antriebssysteme für die individuelle Mobilität*. MTZ Motortechnische Zeitschrift, 02/2012
- [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)