



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# **TWO-DIMENSIONAL QUANTIFICATION OF SOOT AND FLAME-SOOT INTERACTION IN SPRAY COMBUSTION AT ELEVATED PRES- SURES**

Schlussbericht 2008

**Thomas Gerber, Paul Scherrer Institut**

Molekulare Dynamik, CH-5330 Villigen, [thomas.gerber@psi.ch](mailto:thomas.gerber@psi.ch), <http://rag.web.psi.ch/>

Impressum

Datum: 2. Juli 2008

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Verbrennung

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Bereichsleiter, [sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)

BFE-Projektnummer: 100863

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
Resumé .....	3
Abstract .....	3
1. Ausgangslage .....	2
2. Ziel der Arbeit .....	2
3. Methode .....	2
4. Ergebnisse .....	4
5. Diskussion .....	4
6. Schlussfolgerungen .....	7
Referenzen .....	7

## Zusammenfassung

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrößen von Russ während der Diesel-Verbrennung haben wir die Methode der zeitaufgelösten laser-induzierten Inkandescenz an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer eingesetzt.

Das 2-Farben LII Experiment zur Bestimmung der Russpartikelgröße und zur simultanen Registrierung räumlich aufgelöster Russemissions-Spektren wurde weiter verbessert. Transiente LII-Signale wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 MPa und 3.5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50-130 MPa aufgezeichnet.

Das Abkühlverhalten der laser-aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet. Ein von Kock et al. zusammengestelltes thermo-physikalisches Modell<sup>1</sup> wurde verwendet um theoretische berechnete Kurven an die experimentell bestimmten LII-Abklingkurven unter Variierung verschiedener Parameter anzupassen. Die Auswertungen ergaben mittlere Partikeldurchmesser der Russteilchen zwischen 10-20 nm, je nach Gasdruck, Einspritzdruck sowie dem Zeitpunkt nach Einspritzbeginn, (5-16 ms). Insbesondere zeigte sich, dass bei einer eingestellten Gastemperatur von 773 K, einem Gasdruck von ca. 1.4 MPa und einem Einspritzdruck von 50 MPa der mittlere Partikeldurchmesser mit der Brenndauer kontinuierlich von ca. 10 nm auf 20 nm zunimmt. Unter den gegebenen Bedingungen wachsen demnach die Russteilchen noch 16 ms nach Einspritzbeginn. Die Ergebnisse waren weitgehend unabhängig von der Annahme einer konkreten Teilchenverteilung und der Umgebungstemperatur, was auf eine gute Robustheit der Auswertemethode hinweist.

## Resumé

## Abstract

Single-pulse time-resolved laser-induced incandescence (TiRe-LII) signal transients from soot particulates were acquired during unsteady high pressure Diesel combustion in a constant volume cell near top dead centre conditions typically found in a Diesel engine. Measurements were performed for initial gas pressures between 1 MPa and 3 MPa, injection pressures between 50 MPa and 130 MPa and laser probe timings between 5 ms and 16 ms after start of fuel injection. In separate experiments and for the same cell operating conditions, gas temperatures were deduced from spectrally resolved soot pyrometry measurements.

Implementing the LII model of Kock et al.<sup>1</sup> ensemble mean soot particle diameters were evaluated from least-squares fitting of theoretical cooling curves to experimental TiRe-LII signal transients. Since in the experiments the environmental gas temperature and the width of an assumed particle size distribution were not known, the effects of the initial choice of these parameters on retrieved particle diameters were investigated. It is shown that evaluated mean particle diameters are only slightly biased by the choice of typical size distribution widths and gas temperatures. For a fixed combustion

phase mean particle diameters are not much affected by gas pressure, however they become smaller at high fuel injection pressure. At a mean chamber pressure of 1.4 MPa evaluated mean particle diameters increased by a factor of two for probe delays between 5 ms and 16 ms after start of injection irrespective of the choices of first-guess fitting variables, indicating a certain robustness of data analysis procedure.

## 1. Ausgangslage

Im Zusammenhang mit den wachsenden Ansprüchen im Umweltschutz müssen empfindliche und quantitative optische Messverfahren entwickelt werden, um die *innermotorische* Entwicklung der Russpartikelgrösse bei der Dieselverbrennung im Verbrennungsraum zu beobachten. Die Messungen führen zu einem besseren Verständnis der Russbildung und Russoxidation als Funktion verschiedener Betriebsparameter. Die zeitaufgelöste laser-induzierte Inkandescenz (TIRE-LII) kann zur Bestimmung der mittleren Teilchengrößen herangezogen werden. Trotz der schwierigen Anwendung wurden einige Arbeiten mit LII und TIRE-LII in z.T. turbulenten Verbrennung bei hohem Druck durchgeführt. LII wurde für den Nachweis von Russ verwendet, in stationären Hochdruckflammen<sup>2,3</sup>, in Motor ähnlichen Umgebungen, wie z.B. Hochdruck-Verbrennungszellen<sup>4</sup>, oder "rapid compression machines"<sup>5</sup>, sowie direkt in kleinen<sup>1,6</sup> und grösseren<sup>7</sup> Diesel Motoren.

In Studien mit nicht vorgemischten Hochdruckflammen zeigten Thomson et al.<sup>2</sup>, dass der mittlere Partikel Durchmesser wie auch die totale Russ Menge mit zunehmendem Umgebungsdruck steigt. Mit gleichzeitigen TIRE-LII and Absorptionsmessungen in einer laminaren Methane/Luft-Flamme unterschiedlichen Druckes, fand Thomson mittlere Durchmesser von 20 nm bei 0.5 MPa und bis zu 120 nm bei 4 MPa. Die entsprechenden Russ Volumenbrüche stiegen von 3 ppm bis 60 ppm. Die Russmenge skalierte mit dem Druck  $p$  gemäss  $\sim p^{1.4}$ , in einem gewissen Widerspruch zu McCrain et al.<sup>8</sup>, die in einer ähnlichen Flamme eine Proportionalität  $\sim p$  feststellten. Viele Aspekte der LII-Technik und ihrer praktischen Anwendung wurden kürzlich in ein "workshops" der Universität Duisburg-Essen and Karlsruhe vorgestellt. Wissenschaftliche Beiträge wurden in einer besonderen Ausgabe der Zeitschrift Appl. Phys. B abgedruckt<sup>9,10</sup>.

## 2. Ziel der Arbeit

Ziel dieses Projektes waren Experimente mit bildgebenden optischen Methoden, um zweidimensionale Russverteilungen und Flammenfronten in einer Hochdruck-Verbrennungszelle unter den Bedingungen Diesel-motorischer Verbrennung zu erfassen. Neben einer hohen örtlichen und zeitlichen Auflösung der betrachteten Vorgänge sollten die angewendeten Verfahren auch quantitative Informationen über z.B. Temperatur, Partikelgrößen oder gemessene Konzentrationen liefern.

Für die Untersuchungen wurde eine möglichst detaillierte 2-dimensionale Erfassung der Russbildung und Flammenausbreitung nach Zündbeginn eines Brennstoff-Sprays bei hohen Dichten (d.h., Temperaturen bis 800 K und Drücke bis 8 MPa) angestrebt. Die gewünschten Informationen können durch Messungen der laser-induzierten Inkandescenz (LII) bzw. der laser-induzierte OH-Fluoreszenz (LIF) erhalten werden. Zur Charakterisierung von Parametern zur Grössenverteilung der gebildeten Russpartikel wurden zeitaufgelöste LII Messungen (Time-Resolved LII, TIRE-LII) bzw. eine Kombination von simultan eingesetzter LII, Rayleighstreuung und Extinktionsmessung angewandt.

Ein wichtiger Aspekt der Messungen ist die systematische in-situ Charakterisierung der Russverteilungen bei Verwendung sauerstoffhaltiger Kraftstoffmischungen wie Diesel/Butylal oder Diesel/Wasseremulsionen. Bei der Verwendung dieser Brennstoffgemische wurde eine verminderte Russemission beobachtet.

## 3. Methode

In unseren Messungen wurde der Bereich der eingestellten Betriebsparameter bei der Dieselverbrennung gegenüber früheren Messungen erweitert und TIRE-LII Zeitprofile simultan bei zwei Emissionswellenlängen aufgenommen. Mittlere Partikeldurchmesser wurden durch detaillierte zeitaufgelöste Modellierung des Abkühlverhaltens der mit Laserlicht aufgeheizten Partikel ausgewertet. Dazu mussten allerdings Parameter wie Partikelgrößenverteilung und lokale Umgebungstemperatur angenommen werden. Diese zusätzlichen Grössen können mit den angewendeten Messmethoden nicht erfasst werden.

## Theoretische Modelle

Die theoretischen Grundlagen zur Modellierung zeitaufgelöster LII-Signalintensitäten wird in vielen Arbeiten detailliert beschrieben<sup>10</sup>. Als Basis dienen die Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie der Russpartikel. Die Gleichung für die Energieerhaltung ergibt:

$$\dot{q}_{\text{int}} = \dot{q}_{\text{abs}} - \dot{q}_{\text{rad}} - \dot{q}_{\text{subl}} - \dot{q}_{\text{cond}},$$

wobei die Wärmemengen  $q$  (von links nach rechts) die „Interne Energie“, die „Absorbierte Energie“, die „abgestrahlte Energie“, die „Sublimationsenergie“ und die Wärmeleitung bezeichnen. Der Punkt über den Buchstaben bezeichnet die Ableitung nach der Zeit, d.h. die Energieänderung pro Zeiteinheit.

Die verschiedenen Komponenten des Wärmehaushaltes eines Russpartikels werden mit einzelnen thermo-physikalischen Modellen beschrieben<sup>1</sup>. Verschiedene Varianten der LII-Theorie unterscheiden sich im Prinzip nur durch die unterschiedliche Beschreibung und Gewichtung dieser Teilmodelle.

In einer Auswertung wird der abklingende Teil der LII-Signalintensität an die experimentellen Daten in einem Minimierungsverfahren (Levenberg-Marquart) angepasst. Bei den in unseren Experimenten vorherrschenden hohen Drücken überwiegt die Wärmeableitung an das umgebende Medium alle anderen Wärmeflussanteile.

## Experiment

Im Laufe des Projektes wurden eine Reihe von Aufbauten realisiert, mit denen je nach Aufgabe mehrfarbige TIRE-LII, LIF-Messungen, Streubilder oder Schattenbilder aufgenommen werden konnten. Die verschiedenen Stufen des Aufbaues und die damit erzielten Teilergebnisse wurden in den bisherigen Jahresberichten zusammengefasst. In der zuletzt erreichten Version des Aufbaues konnten mehrere dieser Messungen simultan, oder zumindest innerhalb  $\sim 1\mu\text{s}$  aufgenommen werden. Ereignisse innerhalb  $\sim 1\mu\text{s}$  dürfen als „simultan“ betrachtet werden, da sich der Verbrennungsprozess in dieser Zeit nicht wesentlich ändert.

Abbildung 1 zeigt den experimentellen Aufbau für ein 2-Farben TIRE-LII Experiment mit zeitlich simultaner Aufnahme von 1-dimensional räumlich aufgelösten Russ-Emissionsspektren. Die Anordnung erlaubt die Registrierung von transienten LII-Signalen bei zwei Emissionswellenlängen des vom Laser aufgeheizten Russes im Verbrennungsraum. Die zwei separaten Detektionskanäle erlauben eine zeitaufgelöste pyrometrische Bestimmung der Temperatur der mit Laser aufgeheizten Russpartikel. Gleichzeitig kann durch einen zweiten optischen Zugang das Russ-Emissionsspektrum mit einer intensivierten CCD-Kamera in der Abbildungsebene eines Gitterspektrographen (Spaltbreite  $300\mu\text{m}$ ,  $f = 300\text{ mm}$ ,  $600\text{ l/mm}$ ) aufgezeichnet werden. Abbildung 1 zeigt die experimentelle Anordnung der Hochdruck-Einspritzkammer von oben. Durch das obere Fenster hat ein Nd:YAG-Laserstrahl ( $1064\text{ nm}$ ,  $90\text{ mJ/Puls}$ ) Zugang zur Verbrennungskammer. Über einen dichroitischen Strahlteiler und entsprechende Bandpassfilter registrieren die Photomultiplier (PMT 1 und PMT 2) die LII-Signalintensität bei  $630\text{ nm}$  bzw.  $460\text{ nm}$ . Andererseits wird über den Spektrometer das Emissionsspektrum in einem Wellenlängenbereich zwischen  $380\text{ nm}$  und  $670\text{ nm}$  aufgenommen. Soweit die Emissionscharakteristik der Russpartikel als die eines grauen Strahlers angenommen werden kann sollten die Spektren Informationen über die Partikeltemperatur zum Aufnahmezeitpunkt liefern. Um sicherzustellen, dass alle optischen Nachweiskanaläle das gleiche Probenvolumen beobachten, wird ein in der Zelle positionierter Gittermasstab abgebildet. Zur Ermittlung der wellenlängenabhängigen Transmissionscharakteristik und Nachweisempfindlichkeit wird eine absolut kalibrierte Strahlungsquelle (Halogenlampe in Ulbrichtkugel) verwendet.

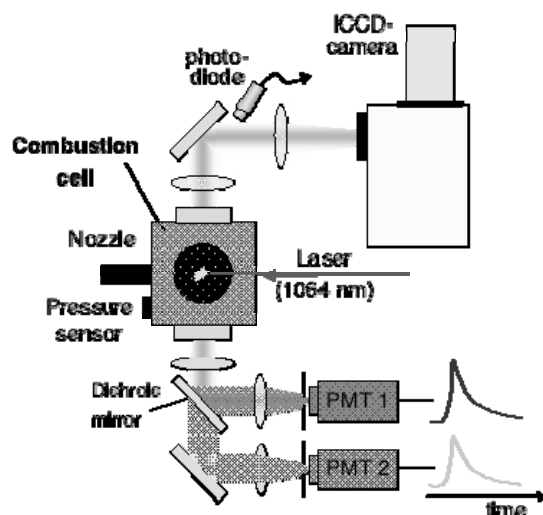


Bild 1: Experimentelle Anordnung für die simultane Registrierung von transienten LII-Signalen und Russ-Emissionsspektren an der Hochdruck-Einspritzkammer.

Die Ausbreitung und Zündung des Dieselsprays wurde durch simultane Schattenwurf- und Schlierenaufnahmen mit zwei separat ansteuerbaren Kamerasystemen beobachtet.

## 4. Ergebnisse

Der grösste Teil der Messungen und erste Auswertungsversuche wurden im Jahresbericht 2006 und in einer Publikation<sup>11</sup> festgehalten. Seit diesen Berichten bis zum, durch den Abgang von Thomas Dreier bedingten, Abbruch der Arbeiten im Frühjahr 2007, wurden nur keine Experimente mehr durchgeführt. In einer aufwändigen Arbeit wurde dagegen die Auswertung der Daten von T. Dreier weit über das Kündigungsdatum vorangetrieben. Eine Zusammenstellung der Resultate wurde Ende 2007 zur Publikation eingereicht<sup>12</sup>.

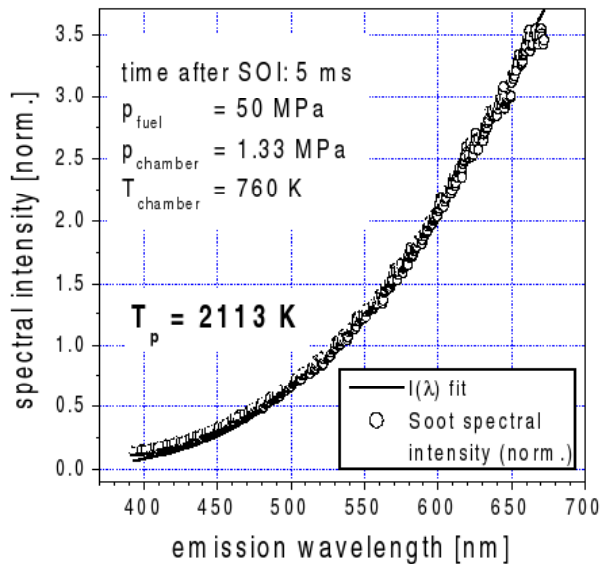


Bild 2: Russ Emissions-Spektrum. Die Kreise stellen gemessene Daten dar. Die durchgezogene Kurve zeigt ein angepasstes Schwarzkörper-Spektrum bei einer Russtemperatur  $T_p = 2113$  K.

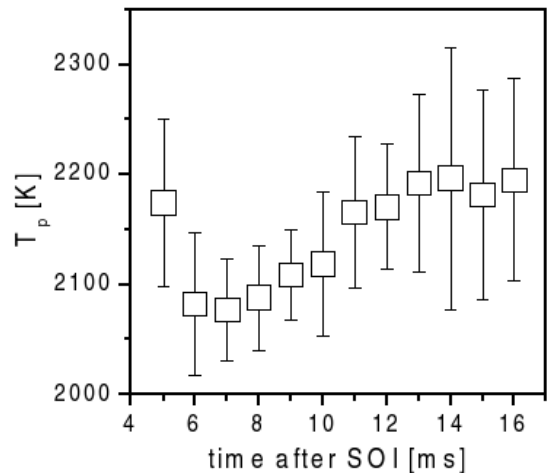


Bild 3: Temperaturbestimmung gemäss Bild 2 zu verschiedenen Zeiten nach dem Einspritzbeginn (SOI, Start of Injection)

In die rechnerische Bestimmung der mittleren Partikelgrösse muss die Temperatur des umgebenden Gases bekannt sein. Diese Gastemperatur kann nicht direkt bestimmt werden. Man nimmt deshalb an, dass die Russpartikel vor der Aufheizung durch Laserlicht mit dem umgebenden Gas im thermischen Gleichgewicht stehen. Die Russtemperatur kann durch Zweifarben-Pyrometrie bestimmt werden. Das Spektrum des leuchtenden Russes (natürliches Leuchten, ohne Anregung) wird mit einem Spektrometer erfasst. Die erhaltenen Daten werden mit der Spektralfunktion für Schwarzkörperstrahlung angenähert (Bild 2). Diese Funktion enthält als einzigen Parameter die Temperatur. Somit ergibt die beste Näherung der Daten die Temperatur des Russes, und gemäss Annahme auch die Temperatur des umgebenden Gases. Bild 3 zeigt Messungen dieser Temperatur zu verschiedenen Zeiten nach dem Einspritzbeginn (SOI, Start of Injection). Die Temperatur steigt um zu 100 K während dem beobachteten Zeitintervall nach der Einspritzung. Der erste Wert weist evtl. auf die hohe Temperatur der anfänglichen „vorgemischten“ Verbrennungsphase.

Tabelle 1		unit	Serie								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{0,Zelle}$	K		773	773	773	773	773	773	773	773	773
$p_{0,Zelle}$	MPa		0.5	1	1.5	2	3	1	1	1	1
$p_{LII,Zelle}$ ( $\Delta p_{LII,Zelle}$ )	MPa		0.92 (0.12)	1.40 (0.07)	1.86 (0.17)	2.34 (0.13)	3.25 (0.08)	1.41 (0.08)	1.49 (0.07)	1.28 (0.03)	1.33-1.43 (0.06-0.07)
$P_{Brennstoff}$	MPa		50	50	50	50	50	50	90	130	50
$\Delta t_{LII}$	ms		7	11	10	8	7	9	9	9	5-16

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messungen. In jeder der 9 Messserien wurden 20 Messungen zusammengefasst. In dieser Tabelle ist der Druck der in der Verbrennungszelle zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht, im Gegensatz zum anfänglichen Fülldruck  $p_{0,Zelle}$ , die einzige

nicht einstellbare Grösse. Dementsprechend kann der aktuelle Druck  $p_{\text{LII,Zelle}}$  bei dem eine LII-Messung durchgeführt wurde nur innerhalb des angegebenen Bandes bestimmt werden.

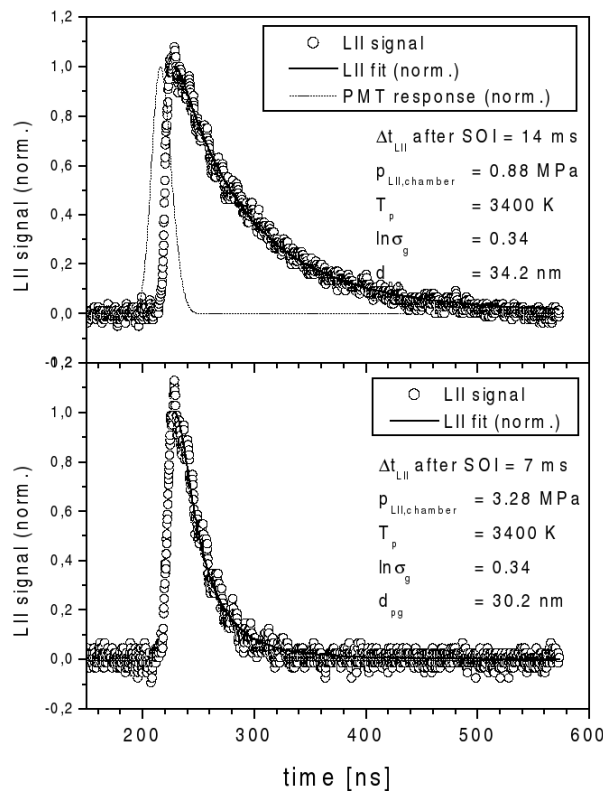


Bild 4: Gemessenen TIRE-LII Signale für die in der Legende angegebenen Betriebsbedingungen. Die durchgezogenen Kurven entsprechen den mit dem Partikeldurchmesser  $d_{pg} = 34.2$  (oben) bzw.  $30.2$  nm (unten) als Start-Parameter modellierten Abklingkurven. (Dünn ausgezogene Kurve im oberen Teilbild s. Text).

Im Bild 4 sind zwei Beispiele für die in einem TIRE-LII gemessenen Abklingkurven gezeigt. Beide Kurven zeigen Messungen (Kreise) zusammen mit den dazu angepassten Kurven gemäss Theorie. Für diese Berechnungen mussten Parameter wie die oben diskutierte Umgebungstemperatur sowie die Teilchenverteilung angenommen werden. Zudem muss ein Anfangswert für die mittlere Teilchengrösse, - also eine Schätzung für die zu bestimmende Grösse angegeben werden. Diese und andere vom Simulationsverfahren verlangten Startgrössen werden dann im Algorithmus so lange variiert bis eine akzeptable Kurve durch die Messpunkte erreicht wird. Als Resultat gilt der mittlere Teilchendurchmesser, mit dem die Kurve am besten angenähert werden kann.

Bei höherem Druck werden die erhitzten Russteilchen viel schneller abgekühlt als bei niedrigerem Druck. Dieser Sachverhalt geht aus den beiden Kurven, die bei  $0.88$  MPa, bzw. bei  $3.3$  MPa aufgenommen wurden, klar hervor. Bei hohen Drucken erreicht die Abklingzeit dieselbe Grössenordnung wie die zeitliche Auflösung des Messsystems. Die dünn ausgezogene Kurve im oberen Teilbild zeigt die simulierte zeitliche Auflösung, wie sie durch Laserpulslänge und Detektionsystem für einen unendlich schnellen Vorgang gegeben wäre.

Die, mithilfe des Modells, erhaltenen mittleren Partikeldurchmesser können nicht mit einer anderen Methode nachgemessen werden. Die einzige mögliche Kontrolle, ob die LII Messmethode richtige Resultate liefert, ist somit nur die innere Evidenz, d.h. ein Test der Robustheit der Resultate in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen (Start-Teilchengrösse, und Start-Umgebungstemperatur, Verteilungsfunktion, maximal erreichte Russtemperatur, etc.). Bild 5 zeigt Histogramme der Auswertung einzelner Messungen aus der Serie #1 (s. Tabelle 1.) mit verschiedenen Startparametern. Die Bilder in der linken Kolonne entsprechen Modellierungen für eine bei Modellierungsstart angenommenen Umgebungstemperatur von  $1800$  K. Variiert wurde der Anfangsparameter  $d_{pg}^0$  (Start-Teilchendurchmesser). Weisse und schwarze Balken entsprechen zweier leicht verschiedener angenommener Teilchengrössen Verteilungen (ausgedrückt durch ein Mass für die Breite der Grössenverteilung). Die durch das Histogramm angepasste Glockenkurve ergibt den wahrscheinlichsten Wert für den wahren Teilchendurchmesser. Eine kleine Verschiebung in Abhängigkeit der Start-Durchmesser

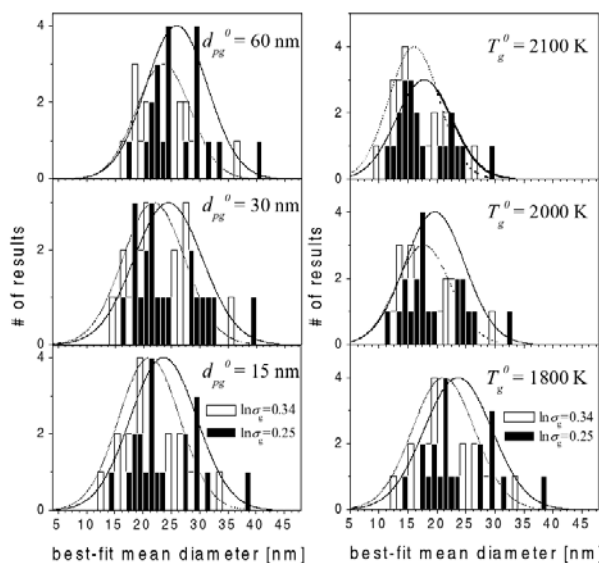


Bild 5: Histogramm der Teilchendurchmesser die für jede einzelne Messung den besten Fit an die gemessene Kurve ergeben. Diskussion und Bezeichnungen siehe Text.

kann beobachtet werden: die resultierenden Teilchendurchmesser sind um 2-3 nm kleiner, falls kleine Anfangswerte angenommen werden. Ebenso führt eine andere Breite der Teilchengrößenverteilung zu einer Varianz der mittleren Teilchengrößen im Bereich von wenigen Nanometern (s. Bild 5. : Verschiebung der Glockenkurven der verschiedenen Verteilungen).

Die Histogramme in der rechten Kolonne zeigen die Abhängigkeit der eruierten Teilchengrößen von der zu Beginn eines Algorithmus angenommenen Umgebungstemperatur. Um 17 % höhere Anfangs-Temperaturen ergeben um 23% kleiner Teilchendurchmesser. Damit zeigt sich, dass die zum Start des Algorithmus festgelegte Umgebungstemperatur einen recht kritischen Einfluss hat. Dagegen ist der resultierende mittlere Teilchendurchmesser nur relativ schwach von den anfänglich angenommenen Teilchendurchmesser und von der Teilchenverteilung abhängig.

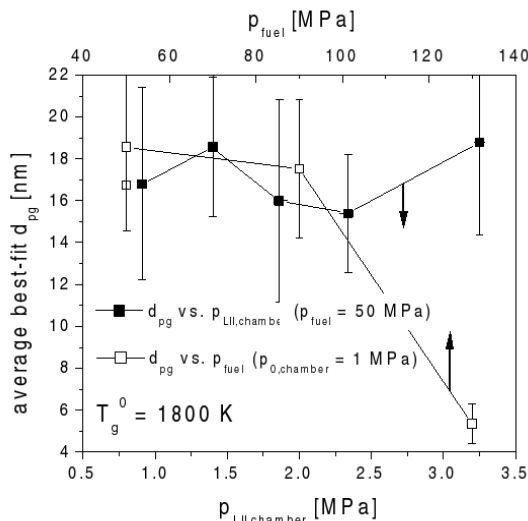


Bild 6: Auswertung der Messserien #1-#5, #6-#8. Die mittleren Teilchengröße ist vom Verbrennungsdruck höchstens schwach abhängig (Kurve mit vollen Symbolen, Massstab unten). Dagegen werden die Teilchen mit steigendem Einspritzdruck (offene Symbole, obere Skala) deutlich kleiner. Die ausgezogenen Linien verbinden nur Messpunkte zur besseren Lesbarkeit.

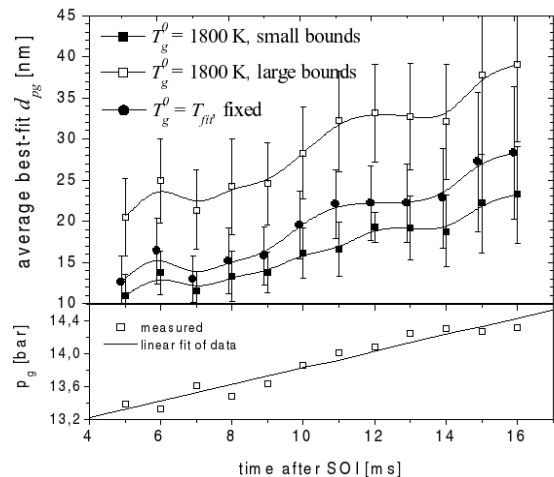


Bild 7: Die Russteilchen wachsen proportional zu der seit der Einspritzung vergangenen Zeit. Für die Resultate, bezeichnet mit „small bound“, konnte das Modell die anfänglich gewählte Temperatur innerhalb 500 K, für „large bound“, innerhalb 1000 K variieren. Für die Daten, bezeichnet „fixed“, wurden die Umgebungstemperatur bei den pyrometrisch gemessenen Werten festgehalten. Die unterste Kurve zeigt den aktuellen Zellendruck bei dem gemessen wurde.

Bild 6 fasst die Resultate zusammen die aus der Auswertung der Messserien #1-#5, #6-#8 in Abhängigkeit des Zellendruckes und des Einspritzdruckes gewonnen werden konnten. Die mittlere Teilchengröße ist vom Verbrennungsdruck nur schwach abhängig. Dagegen scheint die Teilchengröße stark vom Einspritzdruck abzuhängen, wobei mit grösserem Einspritzdruck kleinere Russteilchen resultieren.

Bild 7. Zeigt die Auswertung der Messserie #9. Wie länger der Verbrennungsprozess dauert, umso grösser wachsen die Russteilchen. Die Resultate hängen relativ stark davon ab, wie der Parameter  $T_g^0$  „Umgebungstemperatur“ behandelt wird. Wenn es dem Anpassungsalgorithmus erlaubt wird,  $T_g^0$  in einem Bereich von 1500 K bis 2000 K zu variieren, werden um Faktor zwei kleinere Durchmesser eruiert, als mit einer Temperaturvarianz innerhalb von  $\pm 500$  K um den Anfangswert. Diese recht grosse Abhängigkeit von den Optimierungsparametern ist noch etwas unbefriedigend. Offenbar gelingt es dem Algorithmus in der Anpassung an die gemessenen Daten nicht, ein eindeutiges absolutes Minimum zu finden. Die Auswertungen in denen die Umgebungstemperatur kein variabler Parameter ist, sondern die mit Zwei-Farben-Pyrometrie ermittelten Temperaturen fest eingesetzt wurden, liefern Teilchengrößen, die zwischen den beiden vorher beschriebenen Werten liegen. Trotz der recht auffälligen Diskrepanz zeigen alle Auswertemethoden ein konstantes Anwachsen der Teilchengröße mit der Zeit.



## 5. Diskussion

Eines der Hauptresultate dieser Arbeit ist die Erarbeitung von einer beachtlich grossen Anzahl miteinander vergleichbarer Messungen. Messserien, wie die in der Tabelle 1 zusammengefassten, sind immer noch relativ rar. Die Auswertung der Daten zeigen eine gewisse Abhängigkeit der Resultate von den zum Beginn des Auswerte-Algorithmus angenommenen Start-Parametern. Die mehrdimensionale Funktion, die den mittleren Teilchendurchmesser beschreibt, ist abhängig von einer Anzahl Parameter. Dazu gehören äussere freie Parameter wie Temperatur Zellendruck und Einspritzdruck. Ebenso wichtig sind aber auch innere „physikalische“ Parameter, die vor allem die Eigenschaften des Russes charakterisieren, wie z.B. Absorptionsvermögen, Brechungsindex, Russ-Struktur, Grössenverteilung und Verdampfungsgeschwindigkeit etc. Offenbar konvergiert diese Funktion bei Variation einiger dieser Parameter nicht zu einem absoluten Minimum. Je nach Vorgabe eines Sets von Startparametern wird ein anderes Minimum gefunden. Trotz dieser Mehrdeutigkeit erscheint die Theorie im angewandten Parameter-Bereich als relative robust, insbesondere, weil für viele der verwendeten Parameter heute durchaus plausible obere und untere Schranken angenommen werden dürfen.

Durch den vorzeitigen Abbruch des Projektes konnte zwar das Ziel, die Russverteilungen in Sprayflammen zweidimensional zu erfassen erreicht werden. Die Methodik ist im Experiment realisiert worden und Vorgehensweisen zur Auswertung der gemessenen Daten wurden etabliert. Allerdings wurde das ursprünglich gesteckte Ziel, vollständige Messserien zu den Eigenschaften einzelner Dieselmischungen vorzustellen, noch nicht erreicht.

## 6. Schlussfolgerungen

Es wäre wünschenswert, wenn die Messarbeiten am PSI und anderswo koordiniert weitergeführt würden. Neben der Erweiterung des Bereichs physikalischer Parameter, wie z.B. Verbrennungsdruck, Einspritzdruck, Einspritzgeometrie etc. würde vor allem eine Ausdehnung der Messungen auf verschiedene in Dieselmotoren verwendete Brennstoffe, insbesondere Bio-Brennstoffe interessieren. Allerdings müsste zugleich noch weiter an der Auswertung der Messdaten gearbeitet werden. Insbesondere müsste nach Möglichkeiten gesucht werden, die beim LII-Messprozess relevanten Temperaturen direkt zu messen, - ein evtl. hoffnungsloses Vorhaben, das noch kaum angedacht wurde. Darüber hinaus müsste auch daran gearbeitet werden, die LII-Messmethode direkt mit andere Messmethoden zu kontrollieren, z.B. mit Streuungsmessungen vor und nach einer LII-Probe.

## Referenzen

- 1 B. F. Kock, B. Tribalet, C. Schulz, and P. Roth, Combust. & Flame 147, 79 (2006).
- 2 K. A. Thomson, D. R. Snelling, G. J. Smallwood, and F. Liu, Appl. Phys. B 83 (3), 469 (2006).
- 3 M. Hofmann, W. G. Bessler, C. Schulz, and H. Jander, Appl. Opt. 12, 2052 (2003).
- 4 C. Crua, D. A. Kennaird, and M. R. Heikal, Combust. Flame 135, 475 (2003).
- 5 H. Kosaka, T. Nishigaki, T. Kamimoto, and S. Harada, SAE Technical Paper Series 952451, 11 (1995).
- 6 B. F. Kock, T. Eckhardt, and P. Roth, Proc. Combust. Inst. 29, 2775 (2002).
- 7 B. Bougie, L. C. Ganippa, A. P. van Vliet, W. L. Meerts, N. J. Dam, and J. J. ter Meulen, Combust. & Flame 145, 635 (2006).
- 8 L. L. McCrain and W. L. Roberts, Combust. & Flame 140, 60 (2005).
- 9 C. Schulz and D. R. Snelling, Appl. Phys. B (special issue) 83 (2006).
- 10 H. A. Michelsen, F. Liu, B. F. Kock, H. Bladh, A. Boiarciuc, M. Charwath, T. Dreier, R. Hadeif, M. Hofmann, J. Reimann, S. Will, P.-E. Bengtsson, H. Bockhorn, F. Foucher, K.-P. Geigle, C. Mounaïm-Rousselle, C. Schulz, R. Stirn, B. Tribalet, and R. Suntz, Appl. Phys. B 87, 503 (2007).
- 11 T. Dreier, B. Bougie, N. Dam, and T. Gerber, Applied Physics B-Lasers and Optics 83 (3), 403 (2006).
- 12 R. Ryser, T. Gerber, and T. Dreier, Combustion and Flame to be published (2008).