



Rußcharakterisierung mit der Laserinduzierten Glühtechnik (LII)

Praktikumsversuch im Rahmen der Technischen Thermodynamik
(Vertiefung) für den Studiengang Chemie- und Bioingenieurwesen
der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

Raum Nr. L.1.07

Stand: 17. Mai 2006

Betreuerin: Monika Wendler, Tel.: (09131) 85-29783

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Eigenschaften von Ruß	4
2.2	LII	6
2.2.1	Rußkonzentration	8
2.2.2	Primärpartikelgröße	9
3	Versuchsbeschreibung	12
3.1	Aufbau	12
3.2	Aufgabenstellung und Durchführung	14
3.3	Auswertung	16

1 Einführung

In diesem Praktikumsversuch sollen mit der Rußmassenkonzentration und der Primärpartikelgröße wichtige Kenngrößen zur Charakterisierung von Verbrennungsruß bestimmt werden. Dies geschieht mit einem Messgerät, das für den Einsatz im industriellen Bereich entwickelt wurde.

In den letzten Jahren, insbesondere seit Inkrafttreten einer neuen EU-Richtlinie, in der die Grenzwerte für die Feinstaubbelastung weiter gesenkt wurden, ist die Rußemission von Fahrzeugen verstärkt in der öffentlichen Diskussion präsent. Außerdem werden die zulässigen Grenzwerte für den Rußausstoß von Dieselfahrzeugen regelmäßig weiter gesenkt, eine gesetzliche Vorschrift zum Einbau von Partikelfiltern in der Zukunft ist Gegenstand der Diskussion.

Mit stetig sinkenden Rußemissionen steigt die Notwendigkeit für neue Messverfahren, da die momentan eingesetzten Methoden zur Charakterisierung von Fahrzeugen an die Grenzen ihrer Messbereiche stoßen.

Mit der Laserinduzierten Glühtechnik ist es möglich, solch niedrige Massenkonzentrationen zu erfassen. Weitere Vorteile sind u. a. die hohe zeitliche und räumliche Auflösung, die Möglichkeit, ohne Probenentnahme direkt im Abgas messen zu können, und dass eine hohe Sensitivität auf elementaren Kohlenstoff¹ gegeben ist.

¹Im englischen Sprachgebrauch bezeichnet man dies als Elemental Carbon (EC), im Gegensatz zu in organischen Verbindungen eingebauten Kohlenstoff, der als Organic Carbon (OC) bezeichnet wird.

2 Grundlagen

2.1 Eigenschaften von Ruß

Ruß besteht aus nahezu sphärischen Primärpartikeln mit Durchmessern von typischerweise 5–100 nm, die kettenartig verzweigte Strukturen bilden (siehe Abb. 2.1). Die einzelnen Mechanismen, die zur Rußbildung beitragen, sind komplizierte chemische und physikalische Prozesse, die im folgenden nur grob skizziert werden sollen.

Die Rußbildung lässt sich, wie die Nanopartikelsynthese in der Gasphase allgemein, grob in drei Phasen einteilen (vgl. Abb. 2.2). Zunächst nukleieren Primärpartikel aus Precursormolekülen. Im Fall von Verbrennungsruß sind dies polyzyklische Aromaten¹, die sich aus den Brennstoffmolekülen bilden, zu dreidimensionalen Strukturen zusammenlagern und schließlich die so genannten „Primärpartikel“ formen. Anschließend wachsen diese über Koagulation² und Oberflächenwachstum weiter. Welcher dieser beiden Prozesse dominiert, ist abhängig von den Umgebungsbedingungen. Nachdem das Wachstum der Primärteilchen abgeschlossen ist, lagern sich diese zu den in Abb. 2.1 gezeigten fraktalen Strukturen zusammen, die Aggregate genannt werden. Je nach System kommen weitere Prozesse hinzu.

¹Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH

²Zusammenlagern einzelner Primärpartikel

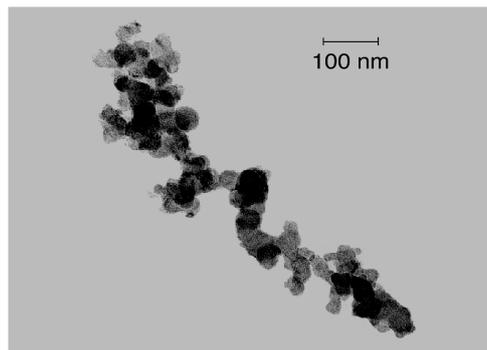


Abbildung 2.1: TEM-Aufnahme von Dieselruß

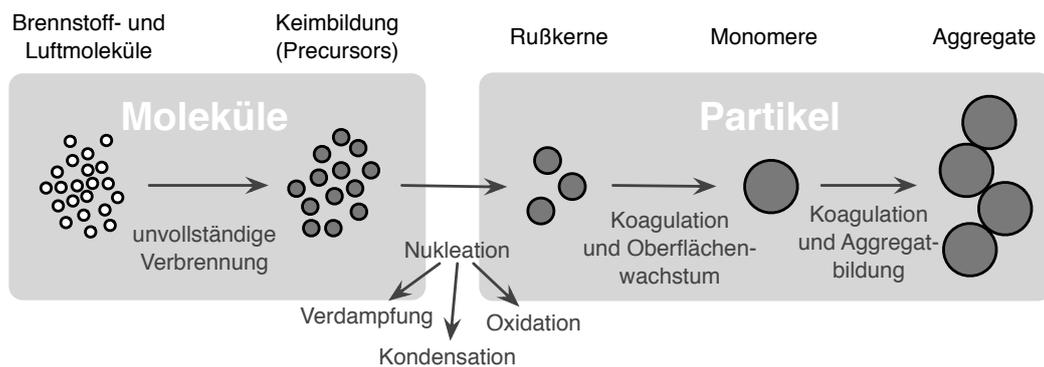


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Rußentstehung

In Flammen herrschen beispielsweise Temperaturen, die ausreichen, um den Kohlenstoff in Rußpartikeln zu oxidieren, wodurch diese wieder schrumpfen können. Außerdem können sich (z. B. im Abgasstrang von Fahrzeugen) mehrere Aggregate zu so genannten Agglomeraten zusammen schließen, die i. A. eine dichtere Struktur als Aggregate aufweisen.

Ruß ist nicht nur ein störendes und gesundheitlich bedenkliches Nebenprodukt in technischen Verbrennungsprozessen, sondern dient ebenso als Rohstoff für verschiedene industrielle Produkte, wie beispielsweise Toner für Drucker und Fotokopierer oder Autoreifen. In beiden Bereichen ist neben der Rußmassenkonzentration die Partikelgröße ein relevanter Parameter. So ist für die Beurteilung der gesundheitlichen Bedenklichkeit die Größe entscheidend, da kleinere Partikel tiefer in die Atemwege eindringen können. Im industriellen Bereich ist die mit der Partikelgröße verknüpfte spezifische Oberfläche von besonderem Interesse, da durch sie die chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt werden.

Mit herkömmlichen Messverfahren ist bei solchen fraktalen Strukturen nur ein kugeläquivalenter Durchmesser zugänglich (vgl. Abb. 2.3), je nach Methode z. B. der Mobilitätsdurchmesser, der Diffusionsdurchmesser oder der Streuquerschnitt. Diese Größen sind jedoch spezifisch für die jeweilige Messmethode, und der Bezug zum Primärteilchendurchmesser ist nur begrenzt möglich. Andere Verfahren, wie z. B. TEM³, die eine genaue Bestimmung der Partikelgröße ermöglichen, setzen eine Probenentnahme voraus, mit der u. U. eine Änderung der Struktur einher geht. Die Ergebnisse sind erst nach einer zeitaufwändigen Auswertung verfügbar. Für eine direkte Prozesskontrolle und um Einflüsse der Probenentnahme auszuschließen, ist also eine Messtechnik von Interesse, die eine in-situ Anwendung erlaubt und

³Transmissionselektronenmikroskopie

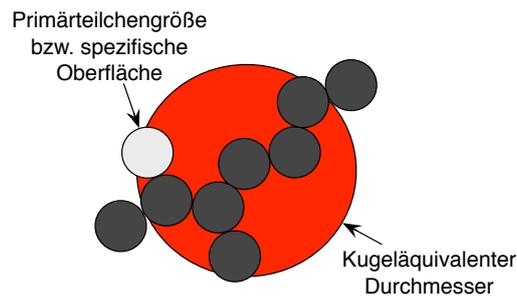


Abbildung 2.3: Primärpartikelgröße und kugeläquivalenter Durchmesser (schematisch)

direkt Ergebnisse liefert. Dies ist mit der Laserinduzierten Glühtechnik möglich.

2.2 LII

Bei der Laserinduzierten Glühtechnik werden Rußpartikel mit einem hochenergetischen Laserpuls beschossen und anschließend die erhöhte Plancksche Strahlung zeitaufgelöst detektiert. Dabei verdampfen organische Bestandteile, und nur elementarer Kohlenstoff trägt zum Signal bei. Mit der Analyse des zeitlichen Verlaufs des LII-Signals lassen sich die wichtigen Kenngrößen Rußmassenkonzentration und Primärpartikelgröße bestimmen.

Die wichtigsten der dabei auftretenden Mechanismen sind in Abbildung 2.4 für ein einzelnes Rußteilchen schematisch dargestellt. Zunächst heizt sich das Partikel durch Absorption des Laserpulses auf, die maximale Temperatur wird durch die einsetzende Verdampfung limitiert, die Maximaltemperatur bewegt sich im Bereich der Verdampfungstemperatur. Nach Abklingen des Laserpulses kühlt es sich über verschiedene Energieverlustmechanismen wieder ab. Die wichtigsten sind hierbei die Verdampfung von C_2 - und C_3 -Molekülen, Wärmeleitung durch Stöße mit Gas-molekülen aus der Umgebung und Wärmestrahlung. Diese Plancksche Strahlung ist temperaturabhängig, und zu jedem Zeitpunkt des Prozesses ist der damit verbundene Energieverlust um mehrere Größenordnungen kleiner als bei den anderen betrachteten Mechanismen. Deshalb ist sie als Messgröße zur Beschreibung des LII-Prozesses geeignet.

Zur quantitativen Auswertung der Messdaten wird der gemessene Signalverlauf mit numerisch generierten Signalverläufen verglichen. Im Modell, das im folgenden beschrieben wird, wird davon ausgegangen, dass sich im Messvolumen nur Parti-

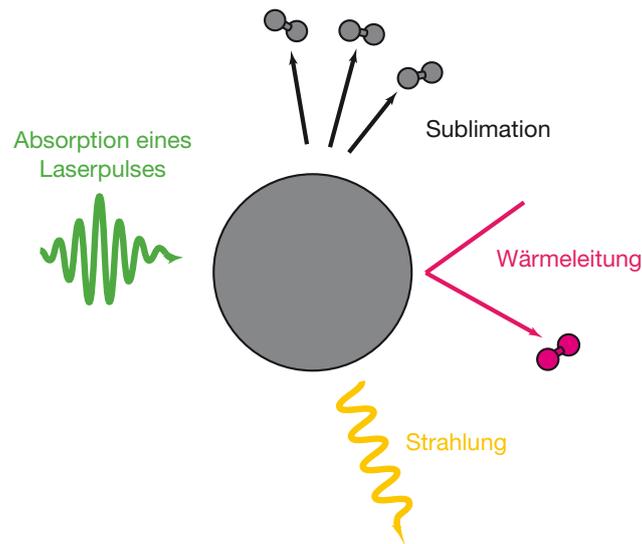


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der am LII-Prozess beteiligte Mechanismen

kel mit gleicher Größe befinden⁴, die im losen Kontakt (Punktkontakt) miteinander stehen, was eine gute Näherung für die betrachteten Systeme darstellt.

Dann kann die Energiebilanzgleichung für ein einzelnes Teilchen aufgestellt werden:

$$\underbrace{Q_{\text{abs}} \frac{\pi d_p^2}{4} E_i}_{\text{Absorption}} - \underbrace{\Lambda(T - T_0) \pi d_p^2}_{\text{Wärmeleitung}} + \underbrace{\frac{\Delta H_s}{M} \frac{dm}{dt}}_{\text{Sublimation}} - \underbrace{\pi d_p^2 \int \varepsilon(d_p, \lambda) M_\lambda^b(T, \lambda) d\lambda}_{\text{Strahlung}} - \underbrace{\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_s C_s \frac{dT}{dt}}_{\text{Änderung der inneren Energie}} = 0. \quad (2.1)$$

Hierbei sind Q_{abs} die Absorptionseffizienz, d_p der Partikeldurchmesser, E_i die Bestrahlungsstärke, Λ der Wärmeleitungskoeffizient, ΔH_s die Sublimationsenthalpie von Ruß, ε die Emissivität, M_λ^b die spektrale Leistungsdichte des Schwarzkörperstrahlers, ρ die Massendichte von Ruß und C_s die spezifische Wärmekapazität.

⁴Dies wird als monodisperses Partikelkollektiv bezeichnet.

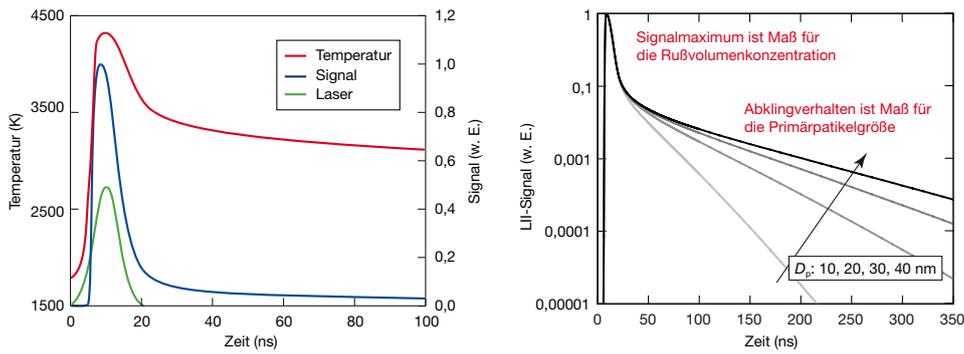


Abbildung 2.5: Modellerter Temperatur- und Signalverlauf (links), normierte Signalverläufe für unterschiedliche Partikelgrößen (rechts)

Ein numerisches Lösen der Gleichung führt zum zeitlichen Verlauf der Partikeltemperatur, wodurch unter Berücksichtigung des Strahlungsverhaltens von Rußpartikeln und der spektralen Charakteristik des Messaufbaus das zu erwartende LII-Signal berechnet werden kann.

In Abbildung 2.5 ist beispielhaft ein solcher Signalverlauf zusammen mit dem Temperaturverlauf und dem Verlauf der eingestrahlt Laserenergie dargestellt. Zunächst steigen Temperatur und LII-Signal stark an, die Maxima fallen mit dem Maximum des Laserpulses zusammen. Zu verschiedenen Zeiten nach dem Laserpuls dominieren verschiedene Energieverlustmechanismen. Bis etwa 100 ns nach dem Laserpuls ist die Temperatur der Teilchen so hoch, dass die Abkühlung hauptsächlich durch die Verdampfung bestimmt wird. Danach fällt die Temperatur weiter, und die Wärmeleitung zum umgebenden Gas ist entscheidend.

Dieses Signalverhalten führt zu der Ermittlung der gesuchten Messgrößen aus dem Signal.

2.2.1 Rußkonzentration

Zum Zeitpunkt des Temperatur- bzw. Signalmaximums wird der Energieverlust der Rußteilchen durch die Verdampfung dominiert. Der Beitrag der Wärmeleitung ist vernachlässigbar, und die Temperatur der Teilchen steigt nicht weiter an. Damit kann die Energiebilanzgleichung folgendermaßen vereinfacht werden:

$$Q_{\text{abs}} \frac{\pi d_p^2}{4} E_i + \frac{\Delta H_s}{M} \frac{dm}{dt} = 0. \quad (2.2)$$

Unter der Annahme, dass das Signalmaximum mit dem Maximum der einge-

strahlten Laserenergie zusammen fällt, und dass im betrachteten Wellenlängenbereich $hc/\lambda \ll kT$ gilt, kann man zeigen, dass bei einer geeigneten Wahl der Detektionswellenlänge das maximale LII-Signal annähernd proportional zu d_p^3 und damit zur Rußvolumenkonzentration ist:

$$S_\lambda^{\max}(d_p) \propto d_p^{3 + \frac{154\text{nm}}{\lambda}}. \quad (2.3)$$

Zur Bestimmung von Absolutwerten ist es notwendig, die Messungen zu kalibrieren. Dies kann beispielsweise durch Extinktionsmessungen oder durch LII-Messungen in Medien mit bekannter Rußkonzentration geschehen.

2.2.2 Primärpartikelgröße

Typischerweise 100 ns nach dem Puls ist der Einfluss der Sublimation bereits so stark zurück gegangen, dass die Wärmeleitung an das umgebende Gas zum dominierenden Energieverlustmechanismus wird.

Die Energiebilanz reduziert sich somit zu

$$\Lambda(T - T_0)\pi d_p^2 + \frac{\pi d_p^3}{6}\rho_s C_s \frac{dT}{dt} = 0. \quad (2.4)$$

Dies ist eine Differentialgleichung 1. Ordnung und besitzt die Lösung der Form

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \exp(-t/\tau) \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{d_p \rho_s C_s}{6\Lambda}. \quad (2.5)$$

Die Abfallzeit τ ist also proportional zum Partikeldurchmesser, da kleine Teilchen aufgrund ihrer spezifischen Oberfläche schneller abkühlen als größere, was sich im zeitlichen Verlauf des LII-Signals widerspiegelt (siehe Abb. 2.5). Mit Hilfe eines Kurvenanpassungsprogrammes kann die Abfallzeit aus gemessenen LII-Signalen ermittelt werden. Ist die Umgebungstemperatur bekannt, liefert ein Vergleich der Abfallzeiten von gemessenen LII-Signalen mit Abfallzeiten, die an Modellkurven angepasst wurden, die Partikelgröße.

Hierbei ist zu beachten, dass dieses Verfahren einen mittleren Partikeldurchmesser liefert, weil real nicht wie im Modell angenommen monodisperse Partikelkollektive vorliegen, sondern eine Größenverteilung. Da diese im betrachteten Fall aber recht schmal ist, stellt dies eine akzeptable Näherung dar.

Symbolverzeichnis

ΔH_s	Sublimationsenthalpie
ε	Emissivität
Λ	Wärmeleitungskoeffizient
λ	Wellenlänge
ρ	Massendichte
τ	Abfallzeit
C_s	Spezifische Wärmekapazität
d_p	Partikeldurchmesser
E_i	Bestrahlungsstärke
M	Molare Masse von Ruß
m	Masse der Rußteilchen
M_λ^b	Spektrale Leistungsdichte des Schwarzkörperstrahlers
Q_{abs}	Absorptionseffizienz
T	Temperatur der Rußteilchen
T_0	Temperatur der Umgebung
T_{max}	Maximaltemperatur der Rußteilchen

Literaturverzeichnis

- [1] Henning Bockhorn, editor. *Soot Formation in Combustion*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
- [2] David L. Hofeldt. Real-time soot concentration measurements technique for engine exhaust streams. *SAE Technical Paper Series*, 930079, 1993.
- [3] L. A. Melton. Soot diagnostics based on laser heating. *Applied Optics*, 23(13):2201–2008, 1984.
- [4] B. Quay, T. W. Lee, T. Ni, and R. J. Santoro. Spatially resolved measurements of soot volume fraction using laser-induced incandescence. *Combustion and Flame*, 97(3-4):384–392, 1994.
- [5] Robert J. Santoro and Christofer R. Shaddix. *Applied Combustion Diagnostics*, chapter Laser-Induced Incandescence, pages 252–286. Taylor & Francis, New York - London, 2002.
- [6] Stefan Will, Stefan Schraml, and Alfred Leipertz. Two-dimensional soot-particle sizing by time-resolved laser-induced incandescence. *Optics Letters*, 20(22):2342–2344, 1995.
- [7] Stefan Will, Stephan Schraml, Katharina Bader, and Alfred Leipertz. Performance characteristics of soot primary particle size measurements by time-resolved laser-induced incandescence. *Applied Optics*, 37(24):5647–5658, 1998.
- [8] Stefan Will, Stephan Schraml, and Alfred Leipertz. Comprehensive two-dimensional soot diagnostics based on laser-induced incandescence. In *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, pages 2277–2284. The Combustion Institute, 1996.

3 Versuchsbeschreibung

3.1 Aufbau

Abbildung 3.1 zeigt den Versuchsaufbau. Der Rußgenerator CAST¹ ist an eine Einlaufstrecke in Form eines Rohres angeschlossen, in deren Verlauf sich stationäre Strömungsverhältnisse ausbilden. Daran angeflanscht ist der Messadapterring des LI²SA-Sensors², mit dessen Hilfe die LII-Messungen durchgeführt werden, gefolgt von einem weiteren Rohr und einem Schlauch zum Ableiten des Abgases.

Im Rußgenerator CAST wird mit Hilfe einer Propangasdiffusionsflamme Ruß erzeugt (siehe Abb. 3.2). Durch ein Quenchen der Flamme auf verschiedenen Höhen werden Verbrennungsprozesse gestoppt, die vorliegenden Rußpartikel stabilisiert und Kondensation im Gasstrom verhindert. Am Gerät können durch Variation der Gasflüsse verschiedene Betriebspunkte eingestellt werden, die Partikelströme mit unterschiedlichen aber definierten Rußmassenkonzentrationen und Primärpartikelgrößen produzieren.

Der LI²SA-Sensor ist ein Messgerät zur Rußcharakterisierung und findet vor allem zur Messung in motorischen Abgasen Anwendung. Im Messadapterring verläuft der Laserstrahl senkrecht zur Strömungsrichtung des Gases und wird von einer Strahlfalle geblockt. Wiederum senkrecht dazu ist die Detektorbox mit integrierter Abbildungsoptik angebracht.

Zum Aufheizen der Rußpartikel wird ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser verwendet, der bei einer Wellenlänge von 532 nm arbeitet und typischerweise eine Pulsenergie von 20 mJ liefert. Die Detektionsoptik besteht aus einer Linsenkombination zur Abbildung des Messvolumens über spektrale Filter auf einen Photomultiplier. Im Strahlengang befinden sich ein Kurzpassfilter, der Wellenlängen oberhalb von 450 nm unterdrückt, und ein schmalbandiger Notch-Filter, der die Anregungswellenlänge 532 nm blockt. Zusammen mit der spektralen Charakteristik des Photomultipliers und des Fenstermaterials der optischen Zugänge ergibt sich ein Detektionswellenlängenbereich von 390–450 nm.

¹Combustion Aerosol Standard, kommerziell erhältlicher Rußgenerator der Firma Matter Engineering

²Laser Induced Incandescence Soot Analyzer, kommerziell erhältlicher Rußsensor der Firma ESY-TEC, der am LTT entwickelt wurde

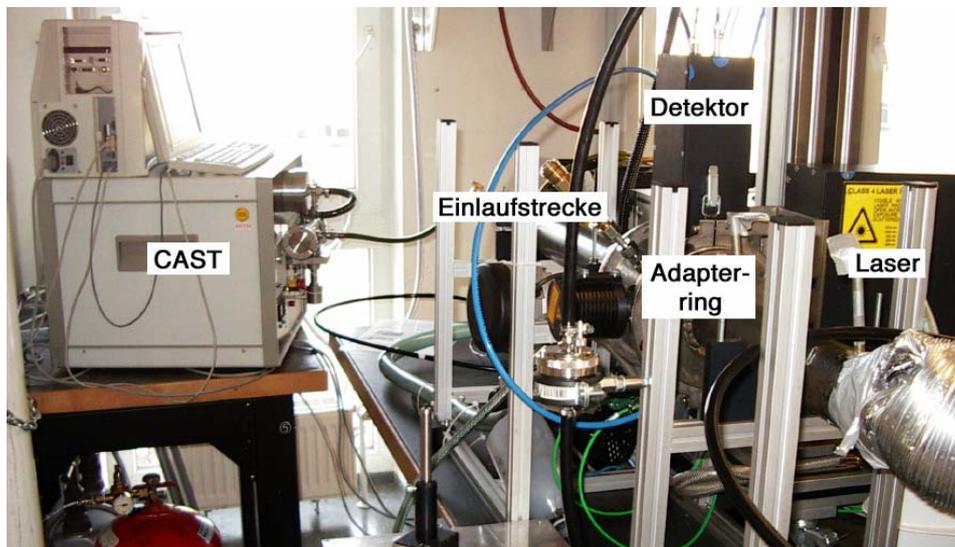


Abbildung 3.1: Laboraufbau

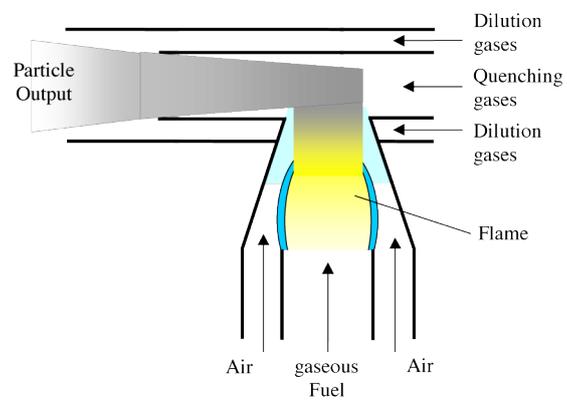


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Rußerzeugung im CAST (Bild: Matter Engineering)

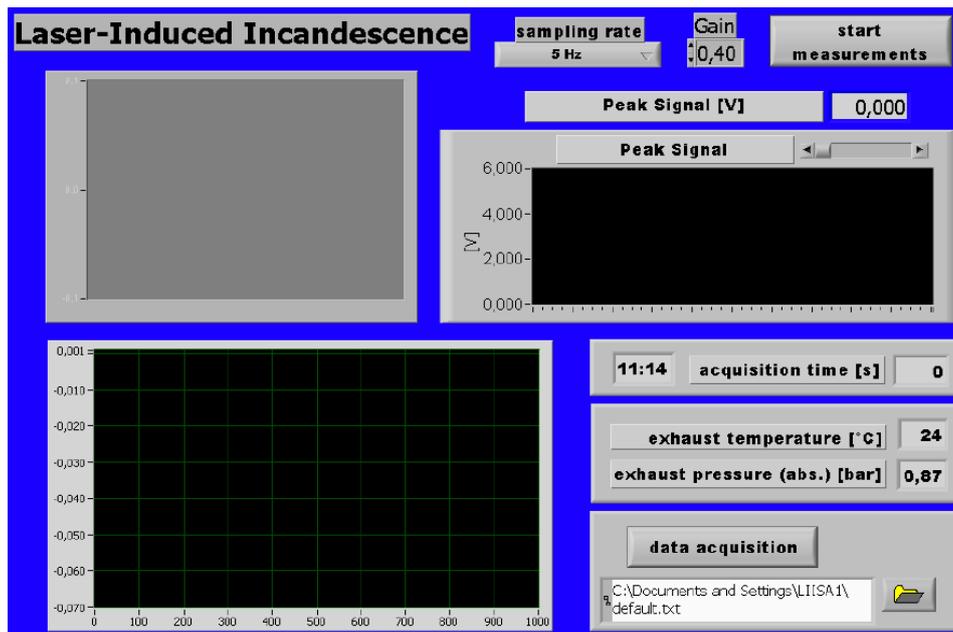


Abbildung 3.3: Benutzeroberfläche der LI²SA-Software

3.2 Aufgabenstellung und Durchführung

Im Praktikumsversuch werden mit Hilfe des LI²SA-Sensors Ruß-Luft-Gemische, erzeugt bei verschiedenen Betriebspunkten des CAST, auf Rußmassenkonzentration und Primärpartikelgröße untersucht.

Aufgrund der komplizierten Prozedur wird das CAST durch den/die Versuchsbetreuer/in in Betrieb genommen. Eine kurze Einweisung in die Funktionsweise des Gerätes erfolgt, außerdem liegt die Betriebsanleitung am Versuchsplatz aus. *Bei einer Fehlfunktion ist in jedem Fall umgehend der/die Betreuer/in zu kontaktieren.*

Die Bedienung des LI²SA-Sensors erfolgt über ein Programm mit einer einfachen Benutzeroberfläche (siehe Abb. 3.3), deren Funktion im folgenden kurz erläutert wird.

Allgemeine Informationen In den Feldern „exhaust temperature“ und „exhaust pressure (abs.)“ werden die aktuell von LI²SA gemessenen Werte für den Druck und die Temperatur in der Einlaufstrecke ausgegeben.

Beginn der Messung Durch Drücken der Schaltfläche „start measurements“ beginnt eine Messung. Im Diagramm unten links wird das gesamte LII-Signal

angezeigt, im Diagramm oben rechts die Anpassung der Abfallzeit und oben links der Verlauf des Spannungswertes am Signalmaximum, der als Zahlenwert im Feld direkt über dem Diagramm angezeigt wird. Es werden noch keine Messdaten abgespeichert.

Mit Hilfe des Aufklappmenüs „sampling rate“ kann die Anzahl der erfassten Messwerte pro Sekunde eingestellt werden. Der Maximalwert von 20 Hz ist durch die Pulsfrequenz des Laser begrenzt. Ist ein niedrigerer Wert eingestellt, wird über eine entsprechende Anzahl von Einzelpulsen gemittelt.

Gain Hier wird die Verstärkerspannung des Photomultipliers eingestellt.

Datenaufnahme Wird der Knopf „data acquisition“ gedrückt, werden die aktuellen Messwerte für Datum, Uhrzeit, Maximalsignal und Signalabfallzeit in eine Datei gespeichert. Durch erneutes Drücken der Schaltfläche wird das Speichern beendet.

Die Dauer der Messdatenerfassung kann im Feld rechts neben „acquisition time“ abgelesen werden.

Aufgaben

Der Rußgenerator ist zu Beginn des Praktikums bereits in Betrieb, da er etwa 30 Minuten zur Stabilisierung benötigt. Sie beginnen mit Betriebspunkt MP4.

Untersuchen Sie, ob das Gerät bereits stabil läuft. Dazu starten Sie die Messsoftware, stellen die in Tab. 3.1 genannte Gainspannung und eine Abtastrate von 5 Hz ein. Notieren Sie alle zwei Minuten den angezeigten Spannungswert am Signalmaximum, und überprüfen Sie, ob die Messwerte noch ansteigen oder abfallen.

Ist dies nicht mehr der Fall, speichern sie zunächst 20 Sekunden lang Messwerte ab, und zwar für die Gainspannungen 0,64 V, 0,66 V, 0,68 V und 0,78 V.

Anschließend stellen sie nacheinander Betriebspunkt MP3 und MP2 am CAST ein und wiederholen die Arbeitsschritte. Nehmen sie für MP3 Messwerte bei 0,54 V, 0,64 V, 0,66 V, 0,68 V und 0,78 V, für MP2 bei 0,64 V, 0,66 V, 0,68 V und 0,78 V auf. Überzeugen sie sich bei jedem Wechsel des Betriebspunkts davon, dass sich der Rußgenerator stabilisiert hat, und notieren sie wie oben beschrieben die Spannungswerte. Beachten Sie, dass während der Stabilisierung für die unterschiedlichen Betriebspunkte verschiedene Gainspannungen eingestellt werden sollen (vgl. Tab. 3.1).

CAST-Punkt	Gainspannung V
MP4	0,68
MP3	0,66
MP2	0,64

Tabelle 3.1: Einzustellende Gainspannungen während der Stabilisierungsphase eines bestimmten CAST-Punktes.

3.3 Auswertung

Ähnlich wie in anderen Praktikumsversuchen, besteht auch hier ein vollständiges Protokoll aus einer kurzen Einführung in das Thema, einer Beschreibung des Versuchsablaufs und der durchgeführten Ergebnisse sowie der Auswertung der Messwerte gemäß der folgenden Aufgaben.

1. Ermitteln Sie aus den Messwerten für die einzelnen Gainspannungen und den Spezifikationen für die CAST-Betriebspunkte Kalibriergeraden zur Ermittlung der Rußmassenkonzentration aus den gemessenen Signalmaxima. Berücksichtigen Sie dabei die Schwankungsbreite der Messergebnisse.
2. Stellen sie mit Hilfe der Kalibrierung den Verlauf der Rußmassenkonzentration während der Stabilisierungsvorgänge nach der Umstellung auf einen anderen Betriebspunkt grafisch dar.
3. Vergleichen sie die bei MP2 und MP3 aufgenommenen Abfallzeiten mit denen, die in Tabelle 3.3 aufgelistet sind³ jeweils für die höchste und niedrigste Gainspannung und ermitteln Sie so die Primärpartikelgröße bei den einzelnen CAST-Punkten. Wie können eventuelle Abweichungen erklärt werden?

³ ggf. interpolieren

Betriebspunkt	EC mg/m ³	OC mg/m ³
MP2	96,80	6,129
MP3	37,93	3,049
MP4	14,99	1,871

Tabelle 3.2: Spezifikationen der CAST-Betriebspunkte

$T_0 = 291\text{ K}$		$T_0 = 293\text{ K}$		$T_0 = 295\text{ K}$		$T_0 = 297\text{ K}$		$T_0 = 299\text{ K}$	
d_p nm	τ ns								
6	9,64	6	9,70	6	9,77	6	9,83	6	9,89
8	14,50	8	14,59	8	14,67	8	14,75	8	14,83
10	19,45	10	19,55	10	19,65	10	19,75	10	19,86
12	24,42	12	24,54	12	24,66	12	24,78	12	24,90
14	29,38	14	29,52	14	29,66	14	29,80	14	29,94
16	34,33	16	34,49	16	34,64	16	34,80	16	34,96
18	39,25	18	39,43	18	39,60	18	39,77	18	39,95
20	44,14	20	44,33	20	44,52	20	44,71	20	44,90
22	49,00	22	49,21	22	49,42	22	49,62	22	49,83
24	53,82	24	54,05	24	54,27	24	54,49	24	54,71
26	58,60	26	58,84	26	59,08	26	59,32	26	59,56
28	63,34	28	63,59	28	63,84	28	64,10	28	64,35
30	68,02	30	68,28	30	68,55	30	68,82	30	69,08
32	72,64	32	72,92	32	73,20	32	73,48	32	73,75
34	77,19	34	77,48	34	77,77	34	78,06	34	78,35
36	81,67	36	81,97	36	82,27	36	82,58	36	82,88
38	86,07	38	86,38	38	86,70	38	87,01	38	87,32
40	90,39	40	90,71	40	91,04	40	91,36	40	91,68
42	94,63	42	94,96	42	95,29	42	95,62	42	95,95
44	98,78	44	99,12	44	99,45	44	99,79	44	100,12
46	102,84	46	103,18	46	103,53	46	103,87	46	104,21
48	106,81	48	107,16	48	107,51	48	107,86	48	108,21
50	110,69	50	111,05	50	111,4	50	111,76	50	112,11
52	114,48	52	114,85	52	115,21	52	115,56	52	115,92
54	118,18	54	118,55	54	118,91	54	119,28	54	119,64
56	121,80	56	122,17	56	122,53	56	122,90	56	123,26
58	125,32	58	125,69	58	126,06	58	126,43	58	126,80
60	128,76	60	129,13	60	129,50	60	129,87	60	130,24

Tabelle 3.3: Abfallzeiten für gegebenen monodispersen Partikeldurchmesser bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen