

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß
gemischbildungsseitiger Maßnahmen auf den
Zündprozeß, Verbrennung und Schadstoffbildung
an einem optisch zugänglichen DE-Dieselmotor

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dietmar Bertsch

aus Backnang in Baden-Württemberg

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. U. Spicher

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H. Bockhorn

Tag der mündlichen Prüfung: 20. April 1999

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Formelzeichen und Abkürzungen	5
1 Einleitung	6
2 Wissensstand über das Dieserverfahren aus der Literatur	7
2.1 Einspritzung und Gemischbildung	8
2.2 Zündung und Verbrennung.....	9
2.2.1 Selbstzündung.....	9
2.2.2 Vorgemischte Verbrennung.....	11
2.2.3 Diffusionsverbrennung	11
2.3 Schadstoffe	13
2.3.1 Ruß.....	13
2.3.2 Stickoxide.....	13
2.4 Handlungsbedarf.....	14
3 Meßmethoden und Versuchsaufbau	15
3.1 optische Methoden zur Prozessanalyse	15
3.1.1 Streulichtverfahren.....	15
3.1.2 Chemilumineszenzmessungen	15
3.1.3 Aufzeichnung der rußleuchtenden Verbrennung.....	16
3.2 Optische Auswertemethodiken.....	16
3.2.1 Zwei-Farben-Spektrometrie.....	16
3.2.2 Schadstoffkorrelation	18
3.3 Versuchsträger und Meßaufbau.....	20
3.3.1 Optisch zugängliches Einzylinder-NFZ-Diesel-DE-Aggregat	20
3.3.2 Adaption der Meßverfahren.....	21
4 Versuchsprogramm und Auswertung	25
4.1 Parameterstudien	25
4.2 Auswertung und Darstellung des Prozessablaufes.....	28
4.2.1 Messungen zur Einspritzung und Gemischbildung	28
4.2.2 Untersuchungen zur Zündphase.....	29
4.2.3 Analyse der Hauptphase der Verbrennung	29
4.2.4 Darstellung der Schadstoffentstehung.....	30
5 Ergebnisse	31
5.1 Analyse des Prozessablaufes beim Basisbetriebspunkt.....	31
5.1.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	31
5.1.2 Vergleichsmessungen zum Zündprozeß	32
5.1.3 Zündung und vorgemischte Verbrennung	36
5.1.4 Diffusionsverbrennung	39
5.1.5 Schadstoffe	41

5.2 Variation von Last und Aufladung.....	45
5.2.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	45
5.2.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung	46
5.2.3 Diffusionsverbrennung	48
5.2.4 Schadstoffe	51
5.3 Spritzbeginnvariation	53
5.3.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	53
5.3.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung	53
5.3.3 Diffusionsverbrennung	55
5.3.4 Schadstoffe	56
5.4 Einfluß von AGR.....	58
5.4.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	58
5.4.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung	58
5.4.3 Diffusionsverbrennung	60
5.4.4 Schadstoffe	61
5.5 Einspritzdruckvariation	63
5.5.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	63
5.5.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung	64
5.5.3 Diffusionsverbrennung	66
5.5.4 Schadstoffe	68
5.6 Einspritzsystemvariation.....	70
5.6.1 Einspritzung und Gemischbildung.....	70
5.6.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung	72
5.6.3 Diffusionsverbrennung	74
5.6.4 Schadstoffe	75
6 Diskussion der Meßergebnisse	78
6.1 Einflußfaktoren auf die Gemischbildung	78
6.2 Einflußfaktoren auf die Zündung und die Vormischflamme.....	79
6.3 Einflußfaktoren auf die Diffusionsverbrennung	81
6.4 Einflußfaktoren auf die Schadstoffbildung	83
6.5 Einfluß der Zündung auf die Schadstoffbildung	85
7 Zusammenfassung und Ausblick	88
7.1 Zusammenfassung.....	88
7.2 Ausblick.....	90
8 Literatur	91
Anhang.....	91

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen von Untersuchungen, die ich während meiner Tätigkeit als Doktorand im Bereich Forschung und Technik der Daimler-Benz AG durchgeführt habe. Alle optischen Messungen am DE-Diesel-Filmaggregat, deren Ergebnisse in Form von Bildern und Diagrammen in dieser Arbeit erscheinen, habe ich eigenständig durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Professoren Dr.-Ing. Ulrich Spicher und Dr.-Ing. Henning Bockhorn, die mich in dieser Zeit wissenschaftlich betreut haben. Die konstruktiven Diskussionen und Anregungen waren für die inhaltliche Ausrichtung meiner Arbeit wertvoll.

Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Dr. Petra Stapf und den Herren Dr. Harald Broll, Dr. Volker Drewes, Dr. Christoph Espey, Jürgen Frisch, Frank Keller, Dr. Gerhard König, Holger Kögl, Roland Laib, Dr. Gregor Renner, Claus Schmalzing, Roland Schramm, Thomas Streule, Eberhard Wagner und Dr. Matthias Zahn, die mich während meiner Tätigkeit bei der Daimler-Benz AG in vielfältiger Weise unterstützt haben.. Ebenso bedanke ich mich bei allen damaligen Diplomanden, die mir in dieser Zeit hilfreich zur Seite standen.

Noch ein Gothewort zum Anfang:

*„So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig,
man muß sie für fertig erklären,
wenn man nach Zeit und Umständen
das möglichste getan hat.“*

(J. W. v. Goethe, Italienische Reise 16.03.1787)

Formelzeichen und Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
c	Lichtgeschwindigkeit = 300.000 [km/s]
CO	Kohlenstoffmonoxid
CR	<u>C</u> ommon- <u>R</u> ail (-Einspritzsystem)
h	Planck'sches Wirkungsquantum = 6,626 E-34 [Js]
HT-Kammer	Hoch-Temperatur-Kammer = Versuchsträger zur Darstellung dieselmotorischer Randbedingungen für die Untersuchung von Einzelstrahlen
k	Stefan Boltzmann Konstante = 1,38 E-23 [J/K]
K	Kelvin
KL, KL-Wert	Spezifische Rußkonzentration, [-]
° KW	Grad Kurbelwinkel
L _s	Strahlungsintensität [W/m ³]
LIF	Laser-induzierte Fluoreszenz
LII	Laser-induzierte Incandescenz
λ [-]	Luft-Kraftstoff-Verhältnis (Stöchiometrisch: λ = 1)
λ [nm]	Wellenlänge
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Alle Stickstoffoxide
NOK, NOK-Wert	<u>N</u> O-Bildungs- <u>K</u> ennzahl = Korrelationskennzahl, [-]
OH	Hydroxyl-Radikal
OT	<u>O</u> berer <u>T</u> otpunkt
p	Druck
p _{Einspr}	Einspritzdruck
p _{Zyl} (SB)	Zylinderdruck bei Einspritzbeginn (Absolutdruck) in bar
PLD	<u>P</u> umpe- <u>L</u> eitung- <u>D</u> üse (-Einspritzsystem)
Ω ₀	Raumwinkel [radian]
RoHR	„Rate of Heat Release“ = Heizverlauf
SB	Spritzbeginn = effektiver Beginn der Einspritzung
SMD	<u>S</u> auter <u>M</u> ean <u>D</u> iameter = mittlerer Sauterdurchmesser mittlere Tröpfchengrößenverteilung bei der Einspritzung
T	Absolute Temperatur in Kelvin
T _{Zyl} (SB)	Brennraumtemperatur bei Einspritzbeginn
V _E	Eingespritzte Kraftstoffmenge pro Arbeitsspiel
ZOT	<u>Z</u> ünd- <u>O</u> T = Kompressions-OT

1 Einleitung

Die aus Umweltgesichtspunkten sinnvolle Fortschreibung der Emissionsgrenzwerte in der Europäischen Union hat die Motorenentwicklung in den letzten Jahren vor große Herausforderungen gestellt. Bei der Neuentwicklung von Dieselmotoren zeichnet sich ab, daß mittel- und langfristig nur ladeluftgekühlte Motoren mit Direkteinspritzung in Verbindung mit elektronisch geregelten Einspritzsystemen im Markt bestehen können /1/. Die Zukunft erfordert dabei neben der Verbesserung der Kraftstoffqualität bezüglich des Schwefelanteils vor allem weiterführende Techniken bei der Einspritzverlaufsformung, da die herkömmlichen Einspritzsysteme nicht über ein ausreichendes Potential zur Erfüllung zukünftiger Anforderungen nach gesteigerter Leistungsfähigkeit und höchster Wirtschaftlichkeit vor dem Hintergrund weiter verschärfter Abgas- und Geräuschgrenzwerte verfügen /2/-/3/.

Dabei wird es zunehmend erforderlich, zusätzlich zu Prüfstandsuntersuchungen und numerischer Simulation die grundlegenden Abläufe der dieselmotorischen Verbrennung experimentell zu untersuchen und Wirkketten herauszuarbeiten, um ein erweitertes Verständnis für zukünftige Optimierungen am Verbrennungsablauf zu schaffen.

Für weitergehende experimentelle Untersuchungen zur dieselmotorischen Verbrennung eignen sich in besonderem Maße optische Meßtechniken, die, sowohl in speziellen Versuchsträgern als auch in seriennahen Motoren eingesetzt, den Gemischbildungs- und Verbrennungsablauf des Dieselprozesses so weit wie möglich transparent machen. Durch Untersuchungen zur Gemischbildung und Verbrennung unter dieselmotorischen Randbedingungen in Strahlbild- und Hochtemperatur-Kammern erhält man grundlegende Erkenntnisse, deren Übertragbarkeit auf den realen Motorbetrieb in optisch zugänglichen Diesel-Aggregaten überprüft werden muß.

Dieselaggregate mit unterschiedlichem optischem Zugang in den Brennraum, die in der Vergangenheit als Versuchsträger zu diesem Zweck konstruiert wurden, sind in der Literatur bereits seit über 30 Jahren zu finden. Jedoch werden erst seit Anfang der 90er Jahre die Forschungen auf diesem Gebiet vor allem mit Hilfe der Laser-Technik intensiviert /4/.

Trotz intensiver Forschungsarbeiten, sowohl experimenteller als auch theoretischer Art, ist die detaillierte Beschreibung zahlreicher Teilprozesse des Dieserverfahrens bisher noch nicht möglich. Zum großen Teil unerforscht ist dabei vor allem der Bereich der Selbstzündung, wobei hier noch Unklarheiten sowohl über die ablaufende Reaktionskinetik als auch über Ort und Zeitpunkt des Auftretens von Zündzonen am Einspritzstrahl herrschen.

Zur Untersuchung des gesamten Verbrennungsablaufes wurde ein Nfz-DE-Diesel-Einzyylinder-Aggregat konstruiert, das einen optischen Zugang zum Brennraum durch einen Glaseinsatz im Kolben zur Einsicht in die Brennraummulde und die Quetschzone besitzt.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verständnis für den Zündprozeß beim DE-Dieselmotor durch experimentelle Untersuchungen mit optimierter optischer Meßtechnik zu erweitern, seine Auswirkung auf die Verbrennung und Schadstoffbildung zu analysieren, und damit Lücken im detaillierten Verständnis des Dieselprozesses zu schließen.

2 Wissensstand über das Dieserverfahren aus der Literatur

In der Literatur ist das Dieserverfahren in weiten Teilen ausführlich beschrieben, wobei in Fachbüchern und vor allem auch in Vorlesungsmanuskripten der aktuelle Stand der Technik dargestellt wird /5/-/11/.

Dabei werden unterschiedliche Schwerpunkte auf die Hydraulik, die Verbrennungschemie, die Thermodynamik und die Strömungsmechanik gelegt und in den verschiedenen Bereichen theoretische Ansätze für die rechnerische Behandlung diskutiert.

Zur phänomenologischen Beschreibung des dieselmotorischen Prozesses soll an dieser Stelle ein Ansatz von Heywood /5/ erläutert werden. Zur Veranschaulichung sind dazu in Bild 2.1 ein ausgewählter Zylinderdruckverlauf und ein Heizverlauf dargestellt, die in die vier im Folgenden beschriebenen Abschnitte der dieselmotorischen Verbrennung unterteilt sind.

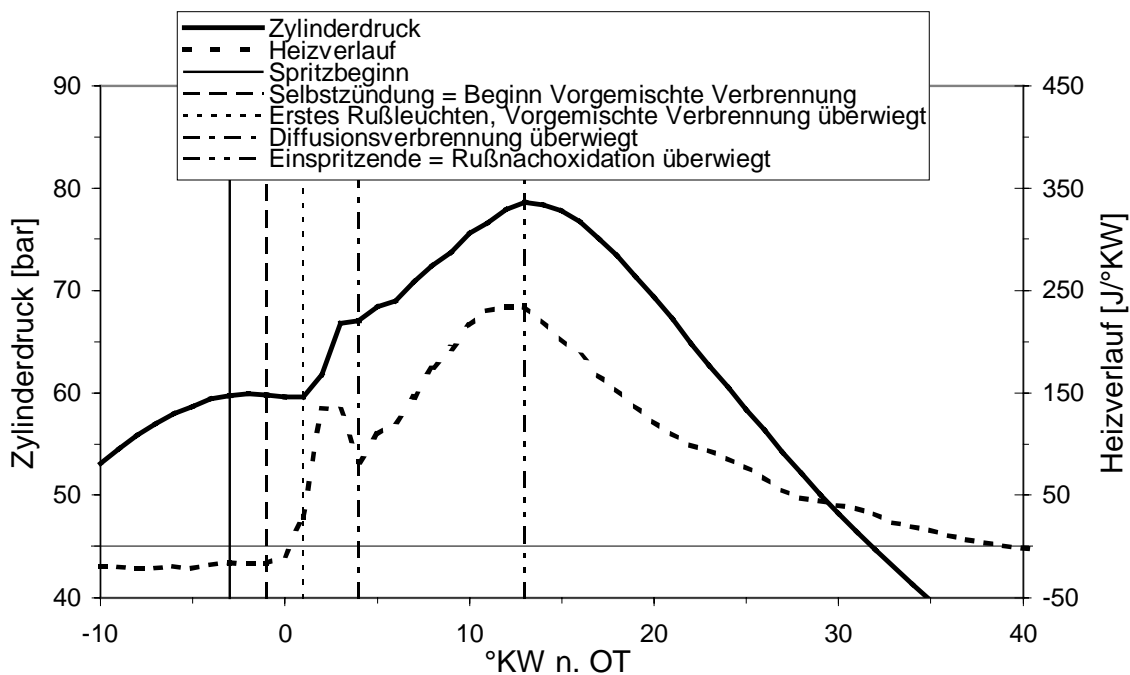


Bild 2.1: Heizverlauf und Zylinderdruckverlauf einer zweistufigen Verbrennung

1. Nach Einspritzbeginn wird der Kraftstoff mit hohem Druck in den Brennraum eingespritzt, in dem die vorkomprimierte Verbrennungsluft in der Regel eine Gastemperatur von mehr als 800 K besitzt. Im Einspritzstrahl liegen außer sehr mageren auch sehr fette Bereiche vor, die aufgrund der sehr schnellen Verdampfung einzelner Tropfengruppen entstehen. Der Zeitraum zwischen Einspritzbeginn und Einsetzen der Verbrennung (Selbstzündung) wird als Zündverzug bezeichnet.
2. In der ersten Phase der Verbrennung wird der während der Zündverzugsphase physikalisch aufbereitete Kraftstoff chemisch umgesetzt. Charakteristisch für dieses Stadium der Verbrennung ist die kurzzeitig enorm hohe Wärmefreisetzung, charakterisiert durch den Höcker im Heizverlauf, und der daraus resultierende große Druckgradient im Brennraum. Man bezeichnet die erste Phase der Verbrennung als vorgemischte Verbrennung (premixed

burn), auch wenn bereits während dieser Phase erste Diffusionsverbrennung und damit erstes Rußleuchten auftritt.

3. In der zweiten Phase der Verbrennung wird der Kraftstoff in Form einer Diffusionsverbrennung umgesetzt, wobei sich der in den Brennraum eingebrachte Kraftstoff mit der Luft und dem Verbrennungsgas vermischt. Dieses Gemisch ist stark inhomogen. Die Flammenzonen ragen dabei sowohl in magere als auch in fette Bereiche hinein. Bei der Verbrennung in den kraftstoffreichen Zonen entstehen Rußpartikel, die aufgrund ihrer Temperatur als graue Strahler leuchten. Der Kraftstoffumsatz ist dabei direkt von der Gemischbildung abhängig (mixing-controlled burn).
4. Die weitere Durchmischung in diesem Stadium der Verbrennung sorgt in den mageren Zonen des brennenden Einspritzstrahls für eine Oxidation des größten Teils des zuvor gebildeten Rußes. Die Rußnachoxidation läuft auch noch nach Einspritzende weiter, wobei aufgrund der zunehmenden Expansion im Zylinder die zur Oxidation notwendigen hohen Temperaturen immer mehr abnehmen.

2.1 Einspritzung und Gemischbildung

Zusätzlich zu den Grundlagen der Ausbreitung von Dieselsprays im Brennraum (/12/) gibt es in jüngster Zeit aktuelle Ergebnisse zu optischen Messungen der Einspritzung und Gemischbildung unter dieselmotorischen Randbedingungen, die sowohl Messungen in der Gesamtstrahl-Kammer als auch in der Hochtemperatur-(HT)-Kammer beinhalten (/13/-/16/). Solche quaderförmigen Strahlkammern besitzen in der Regel an fünf Seiten Glaseinsätze, die einen großflächigen optischen Zugang in mehrere Raumebenen erlauben. In diesen Kammern können mittels Gasbefüllung definierte Innendrucke erzeugt werden und bei Bedarf durch eine Wasserstoff-Vorverbrennung Temperaturen erzeugt werden, wie sie im Dieselmotor im Kompressionstakt kurz vor der Kraftstoffeinspritzung herrschen. Die an der sechsten Seite entsprechend angeflanschte Einspritzdüse spritzt ein oder mehrere Strahlen in das Innere der Kammer. Durch die Glasscheiben kann die Einspritzung und das Strahlverhalten optisch analysiert werden.

Messungen in einem optisch zugänglichen Diesel-Aggregat bezüglich der Strahlausbreitung und Gemischbildung sind ebenso in der Literatur vertreten /17/-/21/. Dabei werden die in der Kammer unter dieselmotorischen Randbedingungen gewonnenen Erkenntnisse im optisch zugänglichen Motor zum großen Teil bestätigt.

Der Ablauf der Einspritzung und Gemischbildung im realen direkteinspritzenden Dieselmotor wird im Folgenden kurz erläutert. Bei der direkten Einspritzung von Kraftstoff in den Hauptbrennraum erhält man abhängig vom verwendeten Einspritzsystem einen Einspritzverlauf mit nahezu konstanter Einspritzrate bei konstantem Einspritzdruck (Common-Rail-System) oder mit steigender Einspritzrate bei über der Einspritzung ansteigendem Druck (Pumpe-Leitung-Düse-System) /15/-/16/. Der Kraftstoff wird beim Austritt aus dem Düsenloch infolge des vorliegenden hohen Druckgradienten und anderen Strömungseffekten zerstäubt und tritt in Form eines keulenförmigen Dieselsprays mit unterschiedlichen Tröpfchengrößen aus. Die gemittelte Tröpfchengrößenverteilung läßt sich dabei mittels Malvern-, LDA-, LIF- oder

Rayleigh-Verfahren bestimmen und ist in der Literatur ausführlich beschrieben /22/. Das Kraftstoffspray verdampft durch den Kontakt mit der im Brennraum vorkomprimierten und erwärmten Luft. Ab einer gewissen Zeit nach Eintritt in den Brennraum ist jedes Kraftstofftröpfchen verdampft, was zu einer maximalen Eindringtiefe der flüssigen Kraftstoffphase, dem Strahlspitzenweg, führt. Mit Strahlspitzenweg wird die maximale axiale Ausdehnung des flüssigen Strahlkerns eines Einspritzstrahles während des Einspritzvorgangs, gemessen ab dem Düsenaustritt, bezeichnet. Gleichzeitig dringt die dampfförmige Kraftstoffphase unter einer Durchmischung mit der vorhandenen Luft weiter in den Brennraum ein. Der nachströmende Kraftstoff bewirkt dabei aufgrund seines Impulses eine zusätzliche Durchmischung des bereits eingespritzten Kraftstoffes mit der Verbrennungsluft.

Zumeist ist der Einspritzvorgang noch nicht abgeschlossen, wenn die Selbstzündung erfolgt. Zu Beginn der Verbrennung liegt also ein sehr heterogenes Gemisch im Brennraum vor, bestehend aus vorgemischten, gasförmigen Kraftstoff-Luft-Bereichen, teilweise verdampften, von Luft umgebenen Kraftstofftröpfchen und sehr kompakten Tropfenpaketen, in deren direkter Umgebung sich sehr wenig Luft befindet.

2.2 Zündung und Verbrennung

Die dieselmotorische Verbrennung ist eine zweistufige Verbrennung, wobei mit der Selbstzündung die vorgemischte Verbrennung einsetzt und etwas später die Diffusionsverbrennung. Als vorgemischte Verbrennung bezeichnet man die Verbrennung des verdampften und bereits mit der Verbrennungsluft durchmischten Kraftstoffes in einer nahezu homogenen Zone. Im Gegensatz dazu tritt die Diffusionsverbrennung an Grenzschichten zwischen kraftstoffreichen und sauerstoffreichen Zonen auf /7/.

2.2.1 Selbstzündung

In der Literatur werden die Grundlagen der technischen Verbrennung theoretisch sehr genau analysiert /5/-/7/. Der Ablauf der Dieselvebrennung wird darin wie folgt beschrieben:

Während der Einspritzung gelangt der Kraftstoff als Spray mit einer bestimmten Tröpfchengrößenverteilung in den Brennraum. Dort verdampft das Tröpfchenkollektiv, und der verdampfte Kraftstoff beginnt, sich chemisch zu zersetzen. Diese Crack-Prozesse des Kraftstoffes und die chemischen Reaktionen des Kraftstoffes und seiner Crack-Produkte mit der Verbrennungsluft führen zur Bildung von Reaktionszwischenprodukten in Form von mehratomigen Radikalen, die durch kettenverzweigende Weiterreaktionen für eine Wärmefreisetzung aus der gesamten Reaktionskinetik sorgen. In diesem hochkomplexen Reaktionsmechanismus, der momentan nur für Reinstoffe wie n-Heptan und Oktan detailliert numerisch beschrieben werden kann, gibt es bestimmte Radikale und kurzkettige Moleküle, deren Konzentration während dieser ersten Phase der chemischen Umsetzung besonders stark ansteigt /23/. Die Simulation der Zündung im homogenen Reaktor mit dem detaillierten Reaktionsmechanismus für n-Heptan zeigt, daß eines der ersten in höherer Konzentration auftretenden Radikale das OH-Radikal ist (Bild 2.2). Das CH-Radikal, das ebenso häufig zur Beschreibung von Zündvorgängen herangezogen wurde, entsteht dabei etwas später. Viel

später als diese zwei ausgewählten Radikale entstehen, wie auch im Experiment nachgewiesen wird, erste Rußpartikel, womit das Auftreten ersten Rußleuchtens zur Charakterisierung des Zündvorganges ungeeignet erscheint /24/-/26/.

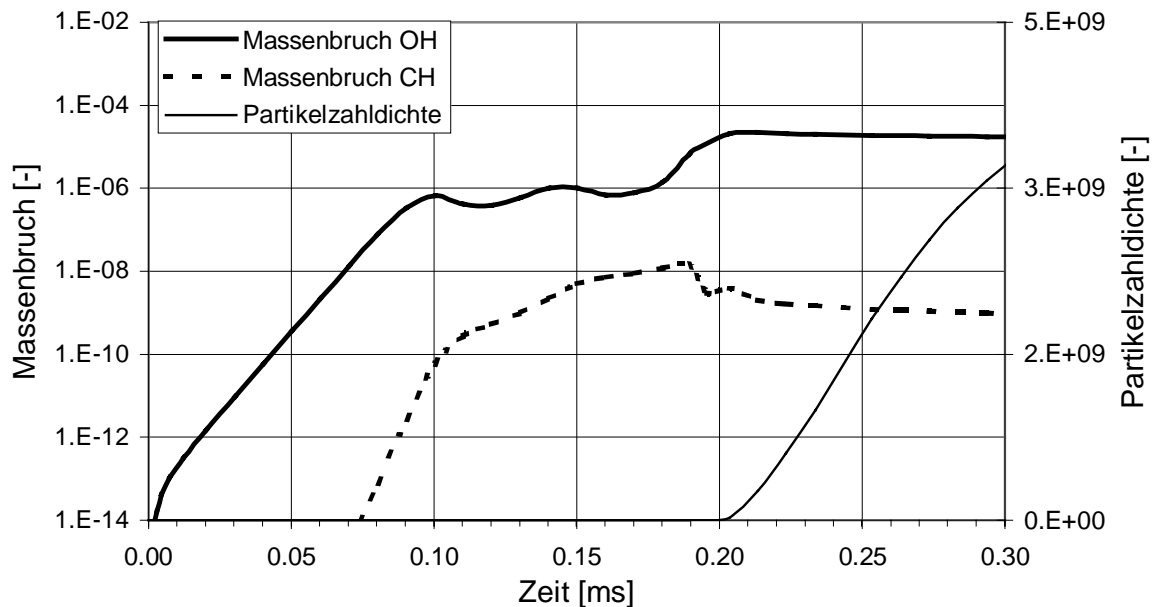


Bild 2.2: Simulation der Zündung im homogenen Reaktor, detaillierter Reaktionsmechanismus, $p = 60 \text{ bar}$, $T = 900 \text{ K}$, $\lambda = 0,5$

Die einzelnen Radikale haben ihr Konzentrationsmaximum dabei in unterschiedlichen Bereichen des Luft-Kraftstoffverhältnisses: Der Schwerpunkt der CH-Radikalkonzentration liegt im fetten Bereich und der Schwerpunkt der OH-Radikalkonzentration im stöchiometrischen bis leicht mageren Gemischbereich.

Für die Festlegung des Zündzeitpunktes einigt man sich in der Simulation auf den Zeitpunkt der Überschreitung eines Konzentrationsschwellwertes eines ausgewählten Radikals. Aufgrund der Analyse der Ergebnisse der Reaktionskinetik in der Zündphase (Bild 2.2) und Überlegungen zur meßtechnischen Erfassbarkeit einzelner Radikalsorten wird in dieser Arbeit das OH-Radikal als Indikator für den Zündort und den Zündbeginn ausgewählt.

Sind nun die während der Zündverzugsphase entstehenden reaktiven Zwischenprodukte in ausreichender Konzentration an einem Ort vorhanden, so entsteht dort eine sehr exotherme Umsetzung des Kraftstoff-Luft-Gemisches mit stark ansteigender Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit. Von diesem Zündort breitet sich die Verbrennungzone im weiteren Verlauf der vorgemischten Verbrennung aus, wobei darauf hingewiesen werden muß, daß sich bei der dieselmotorischen Verbrennung meist mehrere Zündorte gleichzeitig im Brennraum ausbilden.

Frühere Arbeiten zum experimentellen Nachweis der Zündorte detektierten sowohl Chemilumineszenz als auch das erste im Strahl auftretende Rußleuchten und setzten diesen Ort mit dem Zündort gleich /27/-/30/. Aus neueren experimentellen Arbeiten geht jedoch hervor, daß OH und Ruß am selben Ort in der Flamme keinesfalls gleichzeitig in erhöhter Konzentration nebeneinander existieren können, da OH ein sehr starkes Rußoxidationsmittel

ist und damit bei der ständigen Durchmischung mit den Rußpartikeln in der turbulenten Diffusionsflamme diese sehr schnell oxidiert /31/-/32/. Der detektierte Ruß befindet sich nach diesen Messungen in den fetteren Zonen des Einspritzstrahls und damit näher an der Strahlachse als die Orte, an denen erhöhte OH-Konzentration feststellbar ist.

Zur Detektion von OH-Radikalen im Diesel-Einspritzstrahl gibt es zahlreiche Arbeiten, die die Anwendung der Technik der Laser-Induzierten Fluoreszenz (LIF) in HT-Kammern unter dieselmotorischen Randbedingungen beschreiben /33/-/35/. Planare OH-LIF-Messungen im optisch zugänglichen DE-Dieselaggregat sind jedoch in der Vergangenheit nur mit schwach rußenden Dieseleratzkraftstoffen durchgeführt worden /36/-/37/.

Zur Detektion des Eigenleuchtens der Vormischflamme wurden vereinzelt Messungen durchgeführt, die die CH-Chemilumineszenz zur Charakterisierung der Verbrennung analysierten /38/-/39/. Integrale Messungen zur Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufes der Intensität der OH-Chemilumineszenz wurden mittels Lichtleitmeßtechnik am DI Dieselmotor durchgeführt /40/. Eine 2D-Chemilumineszenzmessung der OH-Radikale im DE-Dieselmotor ist jedoch aufgrund der zu erwartenden sehr niedrigen Emissions-Intensitäten in der Literatur bislang nicht zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Basis der Vorleistung einer anderen Dissertation eine Meßtechnik weiterentwickelt, die eine 2D-Chemilumineszenzmessung von OH-Radikalen in optisch zugänglichen DE-Dieselmotoren während der Zündphase erlaubt /41/. Der Vorteil der Chemilumineszenzmessung gegenüber der PLIF-Meßtechnik liegt dabei in der räumlich erweiterten Detektionsebene (alle Einspritzstrahlen), der infolge der fehlenden Laseranregung nicht auftretenden Störeffekte wie Kraftstoff-Mie-Streuung, Kraftstoff-Rayleigh-Streuung und signaldämpfende Effekte (Quenching), die bei den LIF-Messungen das OH-Fluoreszenz-Signal negativ beeinflussen /35/.

2.2.2 Vorgemischte Verbrennung

Nach der Selbstzündung läuft die vorgemischte Verbrennung in den während der Zündverzugszeit vorgemischten Kraftstoff-Luft-Bereichen ab. Die vorgemischte Verbrennung ist durch eine schwach bläulich leuchtende Flamme charakterisiert, die wie bei der ottomotorischen Verbrennung auf eine intensive CH-Chemilumineszenz zurückzuführen ist /42/-/44/. Die Reaktionsgeschwindigkeiten und die entstehenden Verbrennungstemperaturen während der vorgemischten Verbrennung sind sehr hoch /5/-/6/. Sind die sich ausbreitenden Reaktionszonen an den verdampfenden Tröpfchen angelangt, so beginnt dort die den Hauptteil der Dieselerverbrennung ausmachende Diffusionsverbrennung, in deren Folge auch Ruß gebildet wird. Abhängig vom Anteil der verdampften und während des Zündverzuges vorgemischten Kraftstoffmenge läuft die dieselmotorische Verbrennung härter oder weicher ab /45/.

2.2.3 Diffusionsverbrennung

Bei der Diffusionsverbrennung reicht die Reaktionszone bis in sehr fette Bereiche, in denen über Vorläuferprodukte Ruß gebildet wird /46/-/48/. Dieser Ruß tritt als Festkörperpartikel auf, der nahezu die ihn umgebende Temperatur besitzt. Die Rußteilchen gehorchen dem

Planck'schen Strahlungsgesetz und emittieren Licht in einem ihrer Temperatur entsprechenden Spektrum. Ab diesem Zeitpunkt läuft die dieselmotorische Verbrennung für das menschliche Auge sichtbar ab, da die Rußteilchen bei den entstehenden Temperaturen sehr intensiv im gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich strahlen /42/-/43/.

Nach dem Auftreten des ersten Rußleuchtens nimmt die Intensität der diffusionskontrollierten Verbrennung bis zum Einspritzende zu, da durch den Impuls der Kraftstoffstrahlen eine Turbulenz in die Verbrennungszonen induziert und dadurch die Verbrennung intensiviert wird. Zur Beurteilung der Hauptphase der Verbrennung wird in der Literatur außer dem Verlauf der Gesamtstrahlung auch der nach der 2-Farben-Methode berechnete integrale Rußtemperaturverlauf herangezogen /49/-/52/.

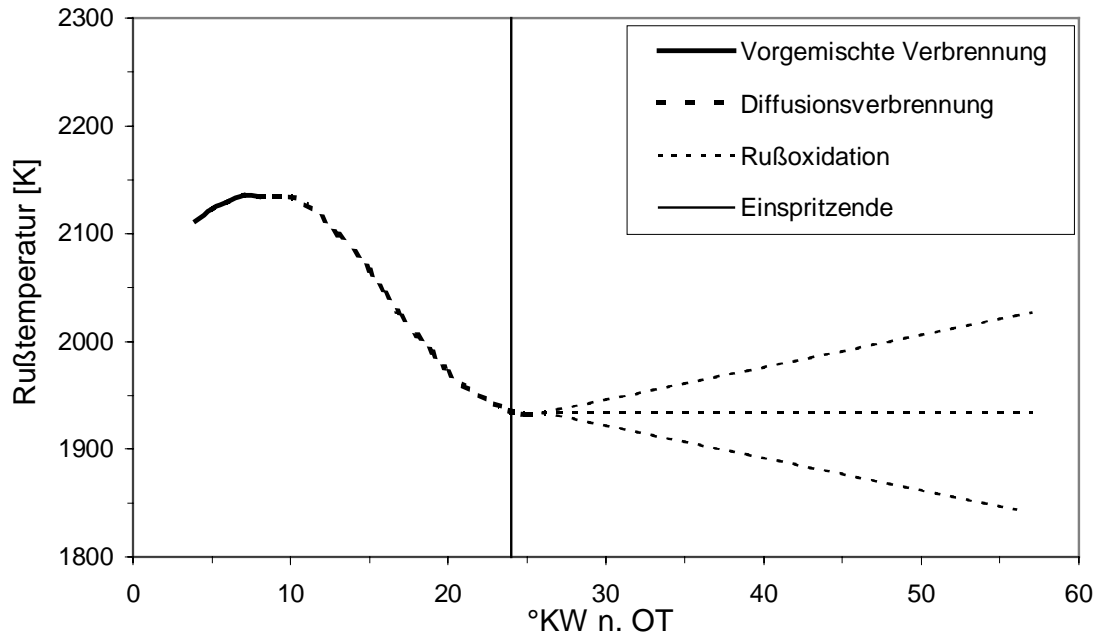


Bild 2.2: Rußtemperaturverlauf bei der Dieselerverbrennung

Betrachtet man die in Bild 2.2 dargestellten typischen Rußtemperaturverläufe, so fällt auf, daß zu Beginn der rußleuchtenden Verbrennung, also noch in der Vormischflamme, im Brennraum sehr hohe Temperaturen erreicht werden. In der zweiten Phase der Verbrennung wird während der Einspritzung dem System Brennraum infolge der Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffes ständig Wärme entzogen. Außerdem ragt die Verbrennungszone bei der Diffusionsverbrennung bis in sehr fette Bereiche, in denen die Verbrennungstemperatur wesentlich geringer ist als in der Vormischflamme, was aus der Tatsache folgt, daß die höchste Brenntemperatur bei $\lambda = 0,95$ erreicht wird /5/. Dadurch sinkt die Temperatur nach dem Ende der vorgemischten Verbrennung und damit während der reinen Diffusionsverbrennung kontinuierlich ab. Nach dem Einspritzende verdampft der restliche eingebrachte Kraftstoff, und ab diesem Zeitpunkt überwiegt die exotherme Verbrennung des verdampften Kraftstoffes und die bald vorherrschende exotherme Rußnachoxidation. Je nachdem, wie sich ab jetzt die thermodynamischen Randbedingungen im Zylinder entwickeln, steigt die Temperatur im Brennraum an, bleibt sie gleich, oder fällt sie ab. Die thermodynamischen Randbedingungen im

Brennraum betreffen vor allem die einsetzende Abwärtsbewegung des Kolbens nach OT und die damit beginnende, immer schneller werdende Absenkung der Brennraumtemperatur und des Brennraumdruckes. Ebenso entscheidend für die Rußnachoxidation und damit für den weiteren Temperaturverlauf ist der Restsauerstoffanteil im Brennraum und dessen örtliche Verteilung.

Neben der integralen Beschreibung der Strahlungsverläufe während der Diffusionsverbrennung gibt es auch einige Arbeiten, die mittels Hochgeschwindigkeits-Filmtechnik den Verbrennungsablauf auf Strömungseffekte und auch auf 2D-Verteilungsmuster der Rußtemperatur und der Rußkonzentration hin analysieren /52/-/55/. Insgesamt gesehen wurde die Diffusionsverbrennung in der Literatur vor allem durch die inzwischen weit verbreiteten optisch zugänglichen Diesellaggregate als geeignete Versuchsträger bereits in weiten Bereichen analysiert.

2.3 Schadstoffe

Die wichtigsten Schadstoffe beim Dieselprozess sind die Stickoxide und die Rußpartikel, deren jeweilige Verminderung in der Regel zu einem Zielkonflikt (Trade-Off) führt. Ändert man zum Beispiel bei einem Motor-Betriebspunkt den Spritzbeginn von spät nach früh, so verringert sich in der Regel der Rußausstoß und es erhöht sich gleichzeitig die Stickoxidemission. Bei einer Verlagerung des Spritzbeginnes von früh nach spät kehren sich die Verhältnisse um: Die Rußemission steigt an und die Stickoxidemission nimmt ab.

2.3.1 Ruß

Im Gegensatz zum Stickoxid wird während des Diesel-Verbrennungsprozesses bereits ein Teil des gebildeten Rußes zu Kohlendioxid weiteroxidiert. Nach dem Ende des Einspritzvorgangs läuft je nach Betriebspunkt die Rußnachoxidation mehr oder weniger intensiv ab, so daß im Idealfall ein Rußausstoß sogar vermieden werden kann. Die Güte der Rußnachoxidation ist dabei von der Anwesenheit von Oxidanten wie Sauerstoff und OH abhängig, was vom verfügbaren Gasmisch und der erforderlichen Intensität der Durchmischung der Rußpartikel mit dem Restgas abhängt /46/-/48/.

Außer den Rußtemperaturmessungen mittels der 2-Farben-Methode wurden in der Literatur quantitative Rußkonzentrationsmessungen mit der LII-Methode durchgeführt, was zum weiteren Verständnis der noch wenig erforschten Rußkinetik beiträgt /56/-/57/.

2.3.2 Stickoxide

Der Hauptteil der Stickoxidemission ist auf die Bildung von thermischem NO (Zeldovic-Mechanismus) zurückzuführen. Als Randbedingung wird dazu nur eine hohe Temperatur und ein mageres Gemisch, wie es beim Dieselmotor in großen Bereichen des Brennraumes vorkommt, benötigt. Dabei wächst die NO-Produktion ab einer bestimmten Temperaturschwelle (ca. 1850 K) pro Zeiteinheit exponentiell mit der Erhöhung der Prozesstemperatur (Bild 2.3) /58/. Die gebildeten NO-Moleküle werden bei der während des Verbrennungsprozesses im Dieselmotor vorliegenden mittleren Temperatur nicht mehr

abgebaut, weshalb man bei einer innermotorischen NO-Reduzierung bereits deren Bildung unterdrücken muß /59/.

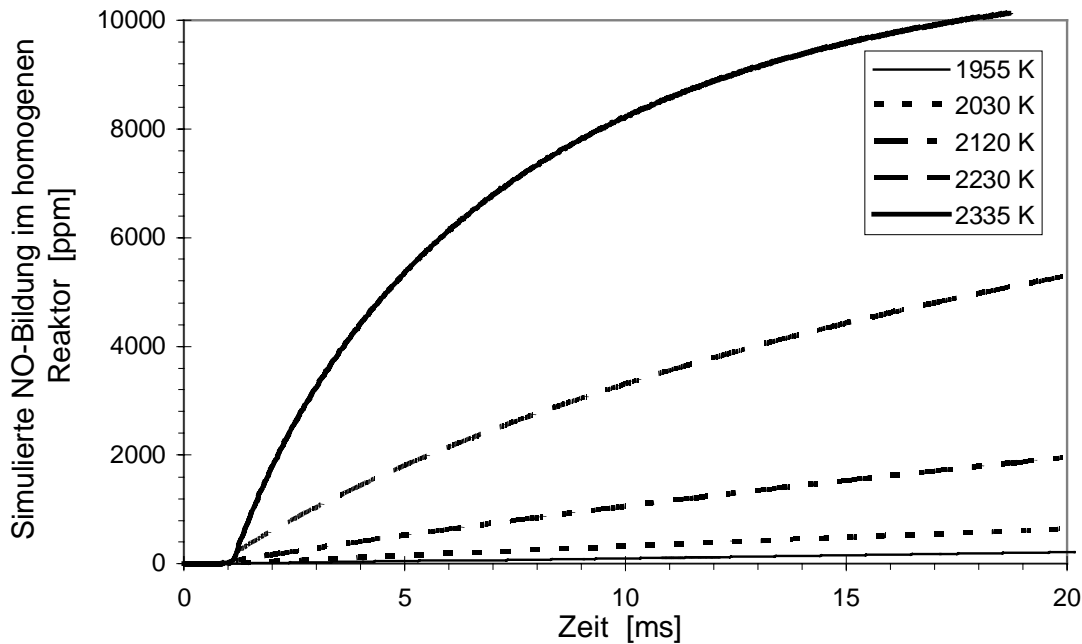


Bild 2.3: Simulierter Bildungsverlauf von thermischem NO

Zur Messung von NO-Konzentrationen im Brennraum während der dieselmotorischen Verbrennung werden zur Zeit einige Anstrengungen unternommen, in der Literatur ist dazu jedoch noch recht wenig zu finden /60/-/62/.

2.4 Handlungsbedarf

Eine genaue Betrachtung der Literatur läßt den Schluß zu, daß das Dieselfahren noch in weiten Bereichen unerforscht ist und nur durch zum Teil stark vereinfachte Modellvorstellungen beschrieben werden kann.

In dieser Arbeit soll mit Hilfe eines gegenüber früheren Arbeiten (/36/-/37/) verbesserten Verfahrens zur 2D-Chemilumineszenzmessung von OH-Radikalen ein besseres Verständnis für die Orte und die Zeitpunkte der Selbstzündung im Dieselmotor geschaffen werden, sowie mögliche Auswirkungen des Zündprozesses auf die Schadstoffentstehung und die Schadstoffreduktion untersucht werden.

3 Meßmethoden und Versuchsaufbau

Die verwendeten Meßmethoden umfassen sowohl die Standard-Indiziermeßtechnik als auch optische Methoden zur Verbrennungsuntersuchung. Im Kapitel 3.2 wird zusätzlich auf die Auswertemethodiken der optischen Messungen eingegangen.

3.1 optische Methoden zur Prozessanalyse

Im Folgenden werden nur die optischen Untersuchungsmethoden für Verbrennungsvorgänge betrachtet, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich beim Streulichtverfahren um eine fremdbeleuchtete Analyse der flüssigen Einspritzstrahlen und bei den Chemilumineszenzmessungen sowie den Aufnahmen der rußleuchtenden Verbrennung um eine Analyse selbstleuchtender Prozesse bei der dieselmotorischen Verbrennung.

3.1.1 Streulichtverfahren

Das Streulichtverfahren beruht auf dem physikalischen Effekt der Reflexion von Licht an spiegelnden Oberflächen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde es verwendet, um während des Einspritzvorganges die eingespritzten Kraftstofftröpfchen sichtbar zu machen /15/-/16/.

Dazu wird der aufgeweitete Strahl eines Cu-Dampf-Lasers durch den Quarzglaskolben auf die gesamte Brennraumbene gelenkt. Während der geschwärzte Zylinderkopf nahezu nicht reflektiert, wird das eingestrahelte Laserlicht von allen flüssigen Kraftstofftröpfchen zurückgeworfen. In der Dampfphase des Kraftstoffes wird das ankommende Licht infolge des Brechungsindexunterschiedes an der Grenzfläche zur Verbrennungsluft nicht zurückgeworfen, sondern nur abgelenkt. Die Gasphase des Kraftstoffes kann daher mit dem Streulichtverfahren nicht sichtbar gemacht werden, man behilft sich hier mit vergleichbaren Messungen aus der HT-Kammer /16/.

3.1.2 Chemilumineszenzmessungen

Chemilumineszenz oder Eigenleuchten von Molekülen oder Radikalen ist ein physikalischer Effekt, der in Verbindung mit exothermen chemischen Reaktionen vorkommt. Die bei der elementaren Verbrennungsreaktion freigesetzte Energie wird an die Umgebung in Form von Konvektion, Diffusion, Druckänderung, thermischer Gasstrahlung und Chemilumineszenz abgegeben /42/-/43/, /63/.

Das Molekül nimmt während seiner Entstehung durch chemische Reaktion Energie auf. Diese zugeführte Energie wird vom Molekül durch Anheben einzelner Elektronen in höhere Energieniveaus kurzfristig gespeichert. Aus dieser energetisch instabilen Lage fallen die Elektronen kurze Zeit später direkt oder über Stufen in das Ausgangsniveau zurück. Dabei emittiert das Molekül ein Lichtquant in der dieser Energiedifferenz entsprechenden Frequenz. Jedes Molekül hat dabei festgelegte Kombinationen von energetischen Ausgangs- und Endzuständen, die die Elektronen einnehmen können, und somit ein festgelegtes

Lichtemissions-Spektrum bei diesem durch chemische Reaktion hervorgerufenen Eigenleuchten.

Für das OH-Radikal existiert eine deutliche Chemilumineszenz-Emissions-Bande bei 308 nm und für das CH-Radikal ist bei einer Wellenlänge von 430 nm mit deutlicher Chemilumineszenz zu rechnen [42]/[43]. Mit geeigneter Filtertechnik lassen sich diese von den einzelnen Molekülsorten ausgesendeten Lichtsignale integral (Lichtleiter) oder zweidimensional (ICCD-Kamera) voneinander getrennt aufnehmen und somit Aussagen über den Zustand der Verbrennung treffen.

Aus der Literatur ist bekannt, daß die Strahlung bei 308 nm bei der dieselmotorischen Verbrennung vor dem ersten Rußleuchten zu über 90% und während der rußleuchtenden Diffusionsverbrennung bis zu 60% auf OH-Chemilumineszenz zurückzuführen ist [47]. Die Intensität der Chemilumineszenz bei 308 nm nimmt dabei integral über den gesamten Brennraum betrachtet vom Zeitpunkt der Zündung bis zur rußleuchtenden Verbrennung um das 750-fache zu [44]. Selektiv auf einen Zündort bezogen, der von Beginn der Zündphase bis zur Diffusionsverbrennung immer intensiver bei 308 nm leuchtet, nimmt die Intensität jedoch nur um das 30-fache zu.

3.1.3 Aufzeichnung der rußleuchtenden Verbrennung

Glühende Rußteilchen mit einer Temperatur oberhalb von 1800 K, wie sie bei der dieselmotorischen Verbrennung entstehen, strahlen auch Licht im sichtbaren Bereich ab. Aufgrund der hohen Intensität dieses Rußleuchtens ist sowohl eine transiente integrale Aufzeichnung von Lichtemission in ausgewählten Spektralbereichen möglich (Lichtleiter), als auch die Aufnahme von Bildsequenzen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera auf Basis eines chemischen 16mm-Filmes. Aus den Verbrennungsfilmern mit einem Bildabstand von etwa 165 µs lassen sich Strömungsphänomene und verschiedene Effekte auf die Gemischbildung, Luftausnutzung und den Rußausbrand ableiten, sowie eine Verteilung der Rußtemperatur und der spezifischen Rußkonzentration rechnerisch ermitteln.

3.2 Optische Auswertemethodiken

Mit den aufgezeichneten optischen Daten, die sowohl Null-Dimensional (Lichtleiter) als auch Zwei-Dimensional (Kamera) vorhanden sind, lassen sich sowohl über den Vergleich ihrer absoluten Werte als auch über den Vergleich von Rechengrößen aus diesen optischen Meßdaten Aussagen über den Verbrennungsablauf treffen. Für die visuelle Beurteilung der Bilddaten werden die Aufnahmen selbst und die aus ihnen errechneten Mittelwertbilder beziehungsweise Rußtemperatur- und Rußkonzentrationsbilder als Falschfarbendarstellungen herangezogen.

3.2.1 Zwei-Farben-Spektrometrie

Die Gesamtstrahlungsemission der dieselmotorischen Flammenstrahlung, als Spezialfall einer rußenden Kohlenwasserstoffflamme, läßt sich auf die Phänomene der thermischen Gasstrahlung, der Chemilumineszenz und der Festkörperstrahlung zurückführen. Bei

Messungen im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich überragt die Festkörperstrahlung der leuchtenden Rußpartikel in Bezug auf ihre Intensität deutlich alle anderen Strahlungsphänomene. Das Spektrum der freigesetzten Rußstrahlung entspricht dabei dem eines realen Temperaturstrahlers: Die einzelnen Atome eines Rußteilchens beeinflussen sich durch ihre enge Packung so massiv, so daß sie ein kontinuierliches Spektrum mit unterschiedlichsten Wellenlängen erzeugen. Der dabei emittierte Wellenlängenbereich und die Höhe des Strahlungsflusses sind von der Temperatur des Körpers abhängig. Durch eine Messung der Intensitäten zweier Wellenlängen im Spektralbereich von 500 nm bis 900 nm, in dem die Strahlungsintensität nahezu linear ansteigt, kann mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes und des Wien'schen Verschiebungsgesetzes eine der Strahlung zugrunde liegende Rußtemperatur und spezifische Rußkonzentration bestimmt werden (Bild 3.1) /42/-/43/, /49/-/55/.

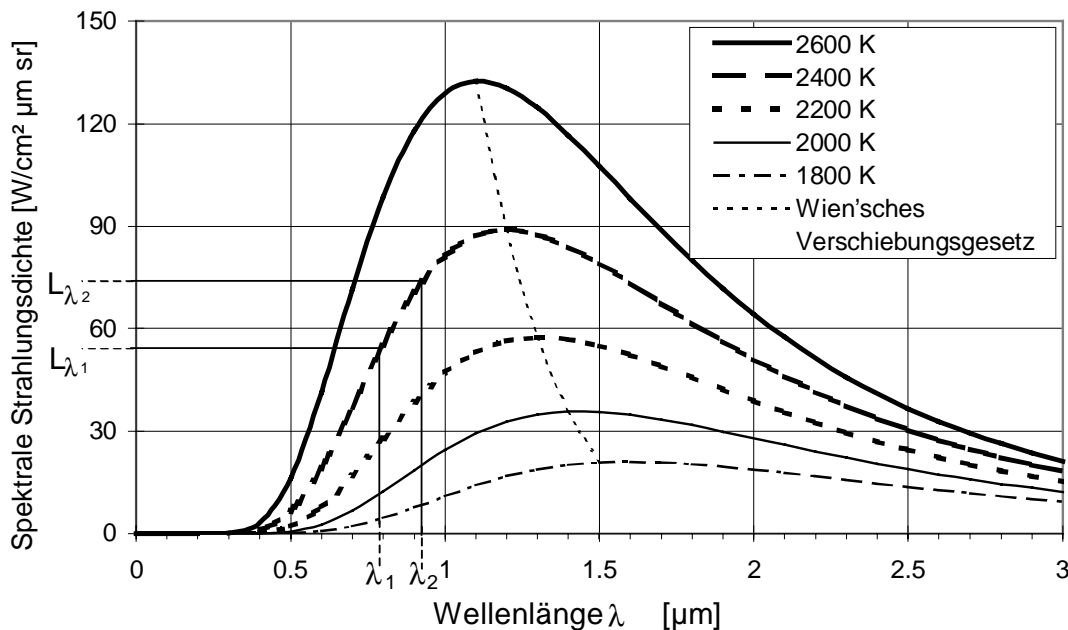


Bild 3.1: Spektrale Strahlungsdichte eines schwarzen Strahlers als Funktion von λ und T

Die Intensität der Strahlung des schwarzen Strahlers L_s als Funktion der Wellenlänge und der Temperatur errechnet sich aus folgender Formel:

$$L_s(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\Omega_0 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}\right) - 1}}$$

- Dabei ist
- k = Boltzmann-Konstante = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]
 - h = Planck'sches Wirkungsquantum = $6,626 \cdot 10^{-34}$ [Js]
 - c = Lichtgeschwindigkeit = $3,0 \cdot 10^8$ [m/s]
 - Ω_0 = Raumwinkel = [sr]
 - λ = Wellenlänge [nm]
 - T = Temperatur [K]

Die Strahlung des schwarzen Strahlers als Modell der Rußstrahlung nimmt dabei in einem für die dieselmotorische Verbrennung realistischen Temperaturfenster von $T < 2400$ K im UV-Bereich sehr geringe Werte an. Bei 2400 K ist die Intensität der Strahlung im sichtbaren blauen Bereich bei 430 nm etwa 40 mal höher als bei 308 nm. Bei einer in weiten Bereichen der rußleuchtenden Verbrennung herrschenden Temperatur von 2000 K beträgt die Strahlungsintensität bei 430 nm sogar das 100-fache derer bei 308 nm.

Für die Berechnung der Rußtemperatur und der spezifischen Rußkonzentration mit Hilfe der Zwei-Farben-Spektrometrie werden die Intensitäten im sichtbaren bis nah-infraroten Bereich herangezogen (550...900 nm). Die integralen spektralen Intensitäten bei 800 nm und 900 nm aus den Lichtleitermessungen werden zur Berechnung des mittleren Rußtemperatur- und Rußkonzentrationsverlaufes herangezogen. Die Bilder der Hochgeschwindigkeitsfilme werden Punktweise bei 550 nm und 650 nm ausgewertet, um für jedes Verbrennungsbild eine Verteilung der Rußtemperatur und der spezifischen Rußkonzentration zu erhalten.

3.2.2 Schadstoffkorrelation

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Ansätze verfolgt, die über die während der Verbrennung gewonnenen optischen Meßdaten Rückschlüsse auf die zu erwartenden Schadstoffemissionen im Abgas zulassen.

- NO-Korrelation:

Ausgehend von dem Ansatz, daß bei der dieselmotorischen Verbrennung in den meisten Motorbetriebspunkten der überwiegende Teil der Stickoxidbildung auf die Bildung von thermischem NO zurückzuführen ist, werden die aus den Hochgeschwindigkeitsbildern erstellten Temperaturverteilungen der rußleuchtenden Flammen analysiert.

Die elf verschiedenen Temperaturbereiche der zweidimensionalen Projektion der Rußtemperaturen werden in vier Bereiche zusammengefaßt und deren Teilflächen auf die gesamte Brennraumfläche bezogen. Die zeitlichen Verläufe dieser Temperaturen erhält man nach Auswertung aller Filmbilder (Bild 3.2). Diesen vier Temperaturbereichen wird eine mittlere Temperatur und ein Gewichtungsfaktor zugeordnet /58/. Der thermische NO-Bildungs-Faktor für die Temperaturfläche von 1700-2000 K beträgt dabei 0,1, für den Temperaturbereich von 2000-2100 K beträgt er 1,0, für den Bereich von 2100-2200 K wird ein Gewichtungsfaktor von 4,0 angenommen, und für den höchsten Temperaturbereich über 2200 K wird ein Faktor von 14,0 eingesetzt. Bildet man nun die Integrale der Teilflächen und multipliziert diese mit ihrem Gewichtungsfaktor, so erhält man nach anschließender Addition einen Gesamtwert, der als thermische NO-Kennzahl (NOK) bezeichnet wird, und der sehr gut mit der dem Betriebspunkt entsprechenden NO_x-Emission korreliert. In Bild 3.3 sind den NO_x-Emissionswerten einiger Betriebspunkte jeweils die berechneten Werte der NO-Kennzahl gegenübergestellt. Man erkennt deutlich, daß die Korrelation vor allem bei den Betriebspunkten mit hoher NO_x-Emission gut gelingt, was bedeutet, daß bei diesen Punkten der Anteil des prompten NO an der Gesamtkonzentration vernachlässigbar klein wird. Durch schrittweise Integration, Gewichtung und Addition erhält man zusätzlich einen

NO-Bildungsverlauf, der Rückschlüsse auf die Schwerpunkte der thermischen NO-Bildung zuläßt und der für die Interpretation der Verbrennung in Kapitel 5 herangezogen wird.

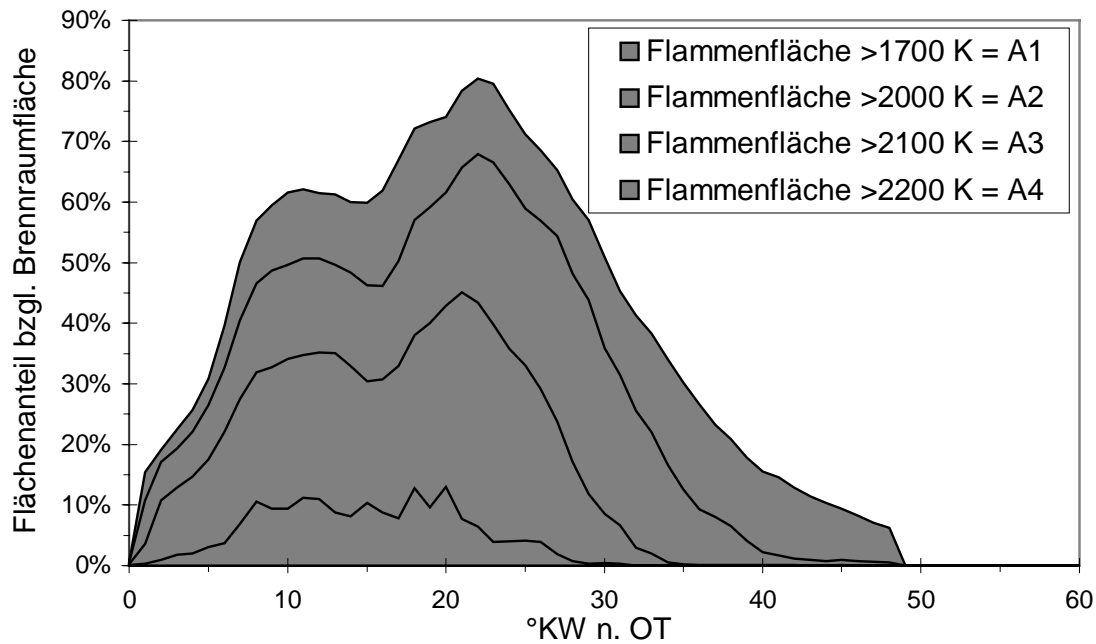


Bild 3.2: Temperaturflächenverläufe der Flamme eines Verbrennungszyklusses

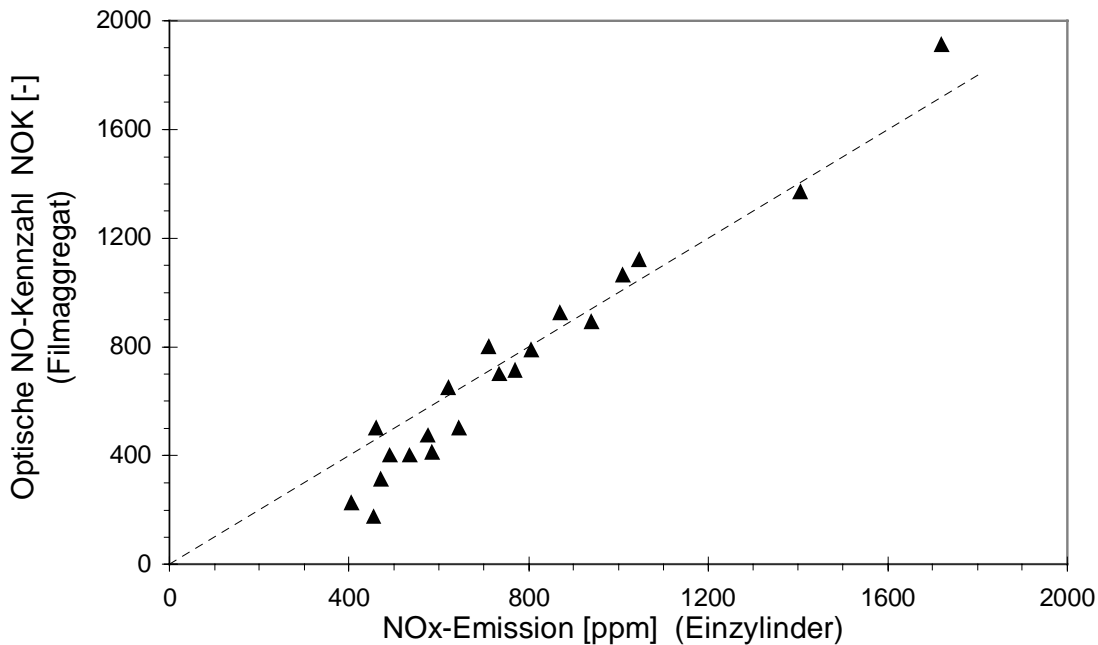


Bild 3.3: Korrelation zwischen optisch ermittelter NO-Kennzahl und realer NO-Emission

- Ruß-Korrelation:

Im Gegensatz zur NO-Korrelation läßt sich anhand der Filmaufnahmen keine Rußkorrelation ableiten. Allein die Tatsache, daß Ruß während der Verbrennung sowohl gebildet als auch oxidiert wird, verhindert eine vereinfachte Interpretation der komplexen Zusammenhänge.

3.3 Versuchsträger und Meßaufbau

Diese Arbeit wurde an einem Nfz-Diesel-DE-Einzylinderaggregat durchgeführt, das als konstruktive Besonderheit einen großflächigen optischen Zugang von unten durch den Kolben besitzt, der die Beobachtung des Verbrennungsvorgangs zweidimensional in der gesamten Brennraumbene erlaubt (Bild 3.4). Alle zuvor beschriebenen Meßtechniken wurden daran adaptiert und die Auswertetechnik entsprechend angepaßt.

3.3.1 Optisch zugängliches Einzylinder-NFZ-Diesel-DE-Aggregat

Der optische Zugang durch den Kolben beinhaltet die Besonderheit, daß in den Quarzglas-Kolbenboden brennraumseitig die im realen Motor eingesetzte ω -Mulde eingearbeitet ist. Der Quarzeinsatz bietet somit einen optischen Zugang in die Brennraummulde und in den Quetschpalt.

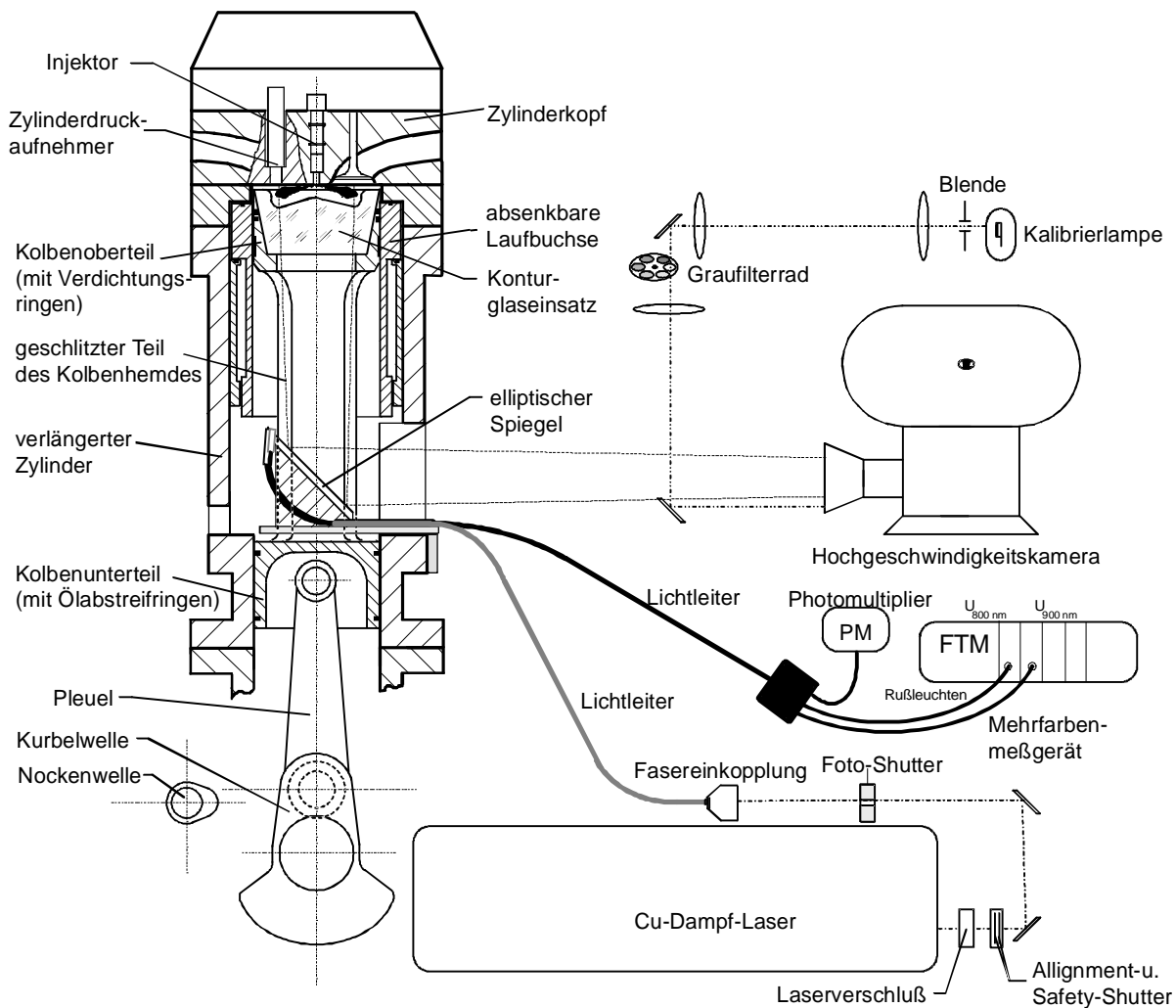


Bild 3.4: Nfz-Diesel-DE-Filmaggregat schematisch mit optischem Aufbau

3.3.2 Adaption der Meßverfahren

- Hochgeschwindigkeitskamera

Über den unter 45° in der Laufbuchse stehenden Hauptspiegel wird während des Motorbetriebes mit der Hochgeschwindigkeitskamera die Verbrennung mit einer Aufnahme­frequenz von 6 kHz aufgezeichnet. Dies entspricht einem Bildabstand von ca. 165μ s oder bei der verwendeten Motordrehzahl von 1130 1/min einem Bildabstand von ca. $1,1^\circ$ KW. Auf dem Hochgeschwindigkeitsfilm wird die mittels Cu-Dampf-Laser beleuchtete flüssige Phase des eingespritzten Kraftstoffes sichtbar.

Die Hauptphase der Verbrennung mit ihrem typischen gelblichen bis hell-weißen Rußleuchten wird ebenfalls mit der Hochgeschwindigkeitsfilmtechnik aufgezeichnet, wobei die Entwicklung der Verbrennung bei diesem Bildabstand hinreichend genau analysiert und Strömungseffekte nachgewiesen werden können.

Die Anwendung der Zwei-Farben-Methode zur Berechnung der Rußtemperatur- und Rußkonzentrationsverteilung basiert dabei auf der unterschiedlichen Schwärzung der drei Emulsionsschichten des verwendeten Umkehrmaterials. Die Einzelbilder werden dabei von einer Schwarz-Weiß-CCD-Kamera abfotografiert und digitalisiert, wobei pro Filmbild zwei Aufnahmen mit jeweils vorgeschaltetem Interferenzfilter unterschiedlicher Transmissionswellenlänge entstehen, die mit entsprechender Software anschließend Pixelweise ausgewertet werden. Zur Berechnung wird die Schwärzung der roten (650 nm) und der grünen (550) Emulsionsschicht herangezogen, und man erhält eine Verteilung der Rußtemperatur und der spezifischen Rußkonzentration mit einer Auflösung von 200.000 Pixel pro Bild. Zur Bestimmung der spezifischen Rußkonzentration (kl) bedient man sich des Lambert-Beerschen Gesetzes, das eingesetzt in das Planck'sche Strahlungsgesetz eine mathematische Beziehung für das Produkt aus dem Absorptionskoeffizient proportional zur Rußkonzentration (k) und der Schichtdicke der rußenden Flamme (l) ergibt. Quantitative kl-Werte lassen sich aufgrund der fehlenden Erfassung des Raumwinkels, unter dem das Rußleuchten emittiert wird, nicht darstellen /64/-/65/.

- Slow-Scan-Kamera (Intensitätsverstärkte CCD-Kamera oder ICCD-Kamera)

Für die 2D-Detektion der Chemilumineszenz während der Zündphase wird der in Bild 3.5 dargestellte ICCD-Kameraaufbau anstelle der in Bild 3.4 bezeichneten Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Die ICCD-Kamera besitzt im Bereich von 300 nm bis 650 nm ihr Empfindlichkeitsmaximum von ca. 32...38 mA/W und verstärkt innerhalb des Meßbereiches linear mit einer Dynamik von 16 Bit (65535 Graustufen) und einer Auflösung von 384×577 Pixel. Die ICCD-Kamera wird mit einem Quarz-Objektiv hoher Lichtstärke (Blende 2,0) bestückt, was zu einer hervorragenden Dynamik der Aufnahmen führt. Für die Einzelaufnahmen des OH-Leuchtens wird ein Reflexionsfilter der Wellenlänge 308 nm verwendet (Bild 3.5).

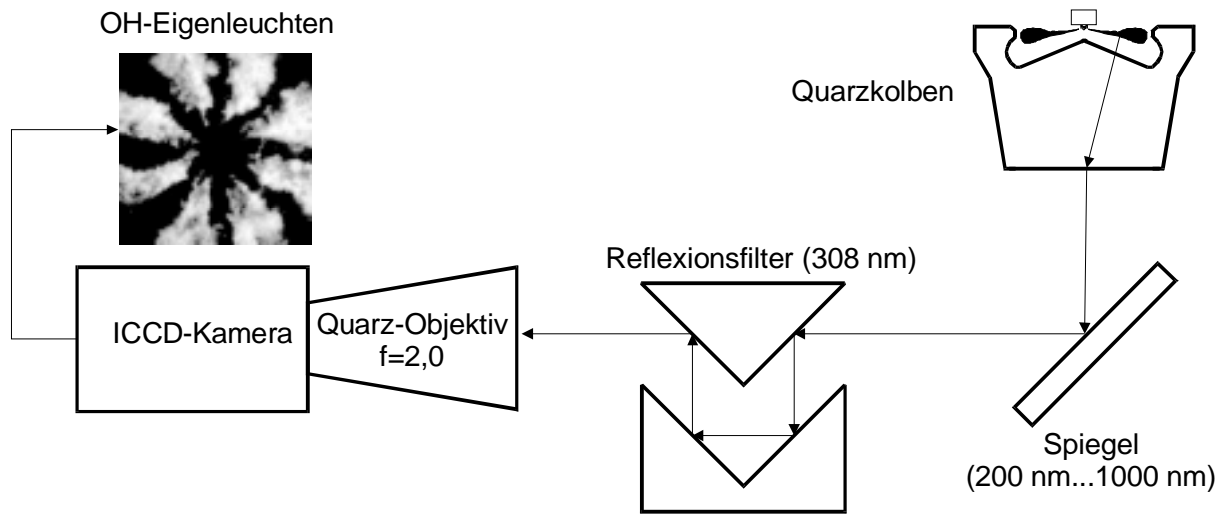


Bild 3.5: Optischer Aufbau zur Einzelbildaufnahme der OH-Chemilumineszenz bei 308 nm für die Detektion der Zündorte und des Zündbeginns.

Für die gleichzeitige Detektion von OH- und CH-Chemilumineszenz wurde ein Doppel-Reflexionsfilter hinter einem Dachkantprisma als Strahlteiler anstelle des einfachen Reflexionsfilters aufgebaut (Bild 3.6).

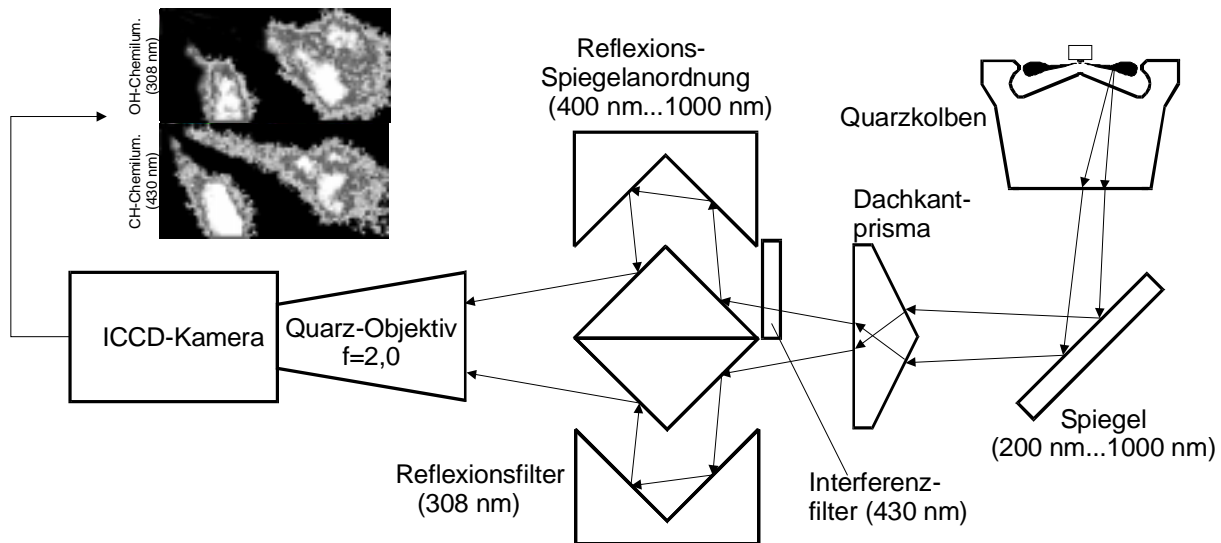


Bild 3.6: Optischer Aufbau zur gleichzeitigen Aufnahme der OH-Chemilumineszenz bei 308 nm und der CH-Chemilumineszenz bei 430 nm mittels Bildteiler.

Die Transmissionskurven der in dieser Arbeit verwendeten Filter für die Aufnahmen von OH- und CH-Chemilumineszenz mit einer ICCD-Kamera sind in Bild 3.7 dargestellt. Die Transmission der ausgefilterten Wellenlängen beträgt ab einem Abstand von 50 nm von der Nennwellenlänge weniger als 10^{-4} .

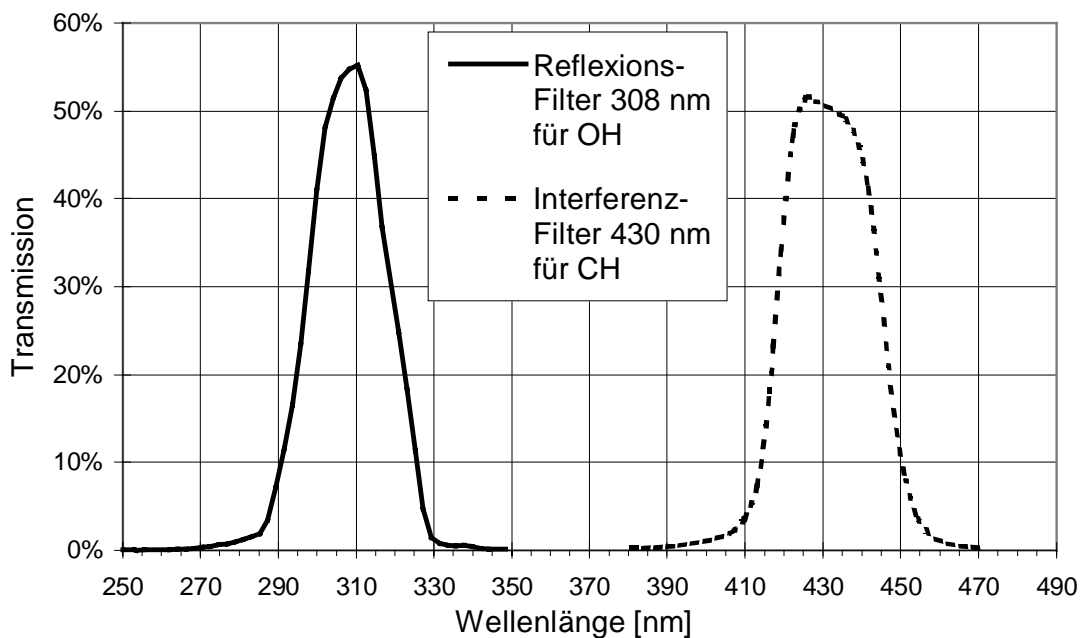


Bild 3.7: Filterkurven der verwendeten Filter für die ICCD-Aufnahmen

Der verwendete Reflexionsfilter für die Wellenlänge 308 nm besitzt im Bereich von 580 nm eine geringfügig schwächere Blockung als bei allen anderen Wellenlängen >400 nm. Durch die gleichzeitige Aufnahme einer Zündzone durch den Reflexionsfilter 308 nm und den Interferenzfilter 430 nm kann jedoch nachgewiesen werden, daß in weiten Bereichen der rußleuchtenden Verbrennung ein Übersprechen der Rußstrahlung auf die OH-Chemilumineszenz bei 308 nm vermieden wird. Als Beispiel kann das jeweils letzte Bildpaar im Anhang A1-A3 der Vergleichsbilder für drei verschiedene Betriebspunkte angeführt werden. In allen Fällen gibt es Bereiche entlang des Strahls, in denen die Chemilumineszenz bei 308 nm überwiegt, obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits schwaches Rußleuchten auftritt, und die Intensität des Rußleuchtens bei 430 nm etwa 40 bis 100 mal stärker ist als bei 308 nm. Folglich besteht das durch den Reflexionsfilter 308 nm gemessene Signal im analysierten Bereich der Zündphase bis zum Einsetzen der rußleuchtenden Verbrennung tatsächlich überwiegend aus Chemilumineszenzstrahlung.

- Lichtleiteroptik.

Über den Quarz-Lichtleiter wird während der Verbrennung die integrale Lichtemission bei 308 nm mittels eines Photomultipliers und bei 800 nm und bei 900 nm mittels Photodioden im Mehrfarbenmeßgerät wie alle anderen Indizierdaten mit einer Abtastrate von 0,1° KW oder 15 µs aufgezeichnet. Man erhält dadurch zusätzlich zu den Bilddaten einen zeitlich detaillierteren Verlauf der integralen Emissionen und den daraus errechneten Rußtemperaturen und spezifischen Rußkonzentrationen. Der Bialkali-Photomultiplier besitzt ähnlich wie die ICCD-Kamera ein Empfindlichkeitsmaximum im Bereich von 300 nm bis 450 nm mit einer ebenso linearen Verstärkung in weiten Teilen des Meßbereiches. Bei zu hoher einfallender

Lichtintensität für eine gewählte Verstärkung läuft das Ausgangssignal in die Sättigung, was bedeutet, daß die Ausgangsspannung gegen 10 V konvergiert.

Für die Messungen in dieser Arbeit wurde dem Photomultiplier ein Bandpassfilter mit einer Transmission bei 310 nm vorgeschaltet und die Verstärkung auf den Bereich der Zündung optimiert. Im Bereich der Diffusionsverbrennung lief das Signal infolgedessen in den Sättigungsbereich und liefert somit keine Aussage über den Intensitätsverlauf der 308 nm-Lichtemission während der rußleuchtenden Diffusionsverbrennung. Für einen Betriebspunkt wurde daher für eine Meßreihe die Verstärkung zurückgenommen, um diesen Verlauf exemplarisch darzustellen (Bild 5.6).

- Indizierung

Das verwendete Meßdatenerfassungssystem zeichnet während den Messungen mit den verschiedenen Kamerasystemen jeweils den Zylinderdruck, den Nadelhub, den Einspritzdruck, den Ansaugdruck, den Bildpuls und die oben beschriebenen integralen Lichtleiterdaten mit einer Auflösung von $1/10^\circ\text{KW}$ oder $15 \mu\text{s}$ bei der verwendeten Drehzahl von 1130 1/min auf.

4 Versuchsprogramm und Auswertung

Der Versuchsablauf für die Messungen wurde aus Gründen der Reproduzierbarkeit immer gleich durchgeführt. Aus dem geschleppten Betrieb bei der gewählten Drehzahl des auf Betriebstemperatur vorgeheizten Filmaggregates wurden bei zehn aufeinanderfolgenden Zyklen Einspritzungen vorgenommen und diese Verbrennungsvorgänge mit den optischen Aufnahmemedien synchronisiert. Zusätzlich wurde bei jedem Versuch die komplette Standardindizierung mit durchgeführt und parallel zu den optischen Aufnahmen aufgezeichnet. Das Versuchsprogramm beinhaltet umfangreiche Parameterstudien zur Variation der Einspritzbedingungen und des thermodynamischen Zustandes im Brennraum zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns.

4.1 Parameterstudien

Die Variation der einzelnen auf die Verbrennung Einfluß nehmenden Parameter umfaßt unterschiedliche Lasten, Spritzbeginne, AGR-Raten, Einspritzdrücke und Einspritzsysteme. Die bei jedem Versuch konstant gelassenen Parameter umfassen die Aggregatvorwärmtemperaturen, die Umgebungstemperatur, die Motordrehzahl (1130 1/min) und die verwendete 8-Loch-Einspritzdüse. Die acht Düsenlöcher dieser Einspritzdüse sitzen dabei alternierend auf zwei Lochkreisen, die einen unterschiedlichen Abstand zum Düsenchaft (A-Maß) besitzen. Diese Besonderheit bewirkt deutliche Unterschiede in der Gemischbildung, Strahlausbreitung und Verbrennung zwischen den Kraftstoffstrahlen aus den Löchern unterschiedlichen A-Maßes. Der am deutlichsten sichtbare Unterschied in der Strahlausbreitung ergibt sich aus der hydraulischen Gesetzmäßigkeit, die bewirkt, daß nach dem Abheben der Düsennadel aus dem Nadelsitz der Kraftstoffdruck im Sackloch vom unteren Ende her aufgebaut wird und somit der Kraftstoff zuerst aus den vier Löchern mit dem großen A-Maß austritt. Die Strahlanalyse ergibt zusätzlich, daß diese zuerst in den Brennraum eintretenden Kraftstoffstrahlen einen geringeren Impuls, eine bessere Zerstäubung und breitere Auffächerung besitzen als die anderen vier Strahlen.

In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Parameter der einzelnen Betriebsvarianten aufgeführt und jeder Variante eine Kurzbezeichnung zugeordnet, die später in den Diagrammen im Kapitel „5 Ergebnisse“ wieder auftauchen.

Betriebspunkt Bezeichnung	Last [%]	$p_{Zyl}(SB)$ [bar]	$T_{Zyl}(SB)$ [K]	SB [°KW]	p_{Einspr} [bar]	Einspritz- System	AGR- Rate [%]	λ_{Ges} [-]
8LCR_600	25	48	842	3° v.OT	600	CR	0	3.15
8LCR600H	50	60	857	3° v.OT	600	CR	0	2.0
8LCR1000	25	48	842	3° v.OT	1000	CR	0	3.15
8LCR100N	25	46	814	3° n.OT	1000	CR	0	3.15
8LCR12HL	50	60	857	3° v.OT	1200	CR	0	2.0
8LCR12HA	50	60	857	3° v.OT	1200	CR	10	1.85
8LCR120V	100	97	880	3° v.OT	1200	CR	0	1.58
8LPLD_25	25	48	842	3° v.OT	300-550	PLD	0	3.15
8LPLD100	100	97	880	3° v.OT	300-1030	PLD	0	1.58

Tabelle 4.1: wichtige Betriebspunkt-Parameter der untersuchten Varianten

Die untersuchten Varianten wurden so gewählt, daß durch Kombinationen jeweils zweier Betriebspunkte folgende Parameterstudien betrieben werden konnten:

- Variation von Last und Aufladung

Bei der Variation der Last wird beim qualitätsgeregelten Dieserverfahren nur die Einspritzmenge variiert. Bei einer Veränderung der Last ändert sich dadurch das Gesamt-Luft-Kraftstoff-Verhältnis im Brennraum. Bei modernen Dieselmotoren ist zusätzlich die Aufladung mittels Turbolader Standard, und auch der NFZ-DE-Dieselmotor, von dem das hier verwendete Filmaggregat abgeleitet wurde, wird mit Turboaufladung betrieben. Aufgrund des geänderten Abgas-Volumenstromes durch eine Laständerung variiert auch die Drehzahl der Turbine und damit auch das Druck- und Temperaturniveau nach dem Verdichter. Daraus ergibt sich, daß sich bei einem auf dem Prüfstand stationär eingestellten Betriebspunkt bei einer bestimmten Drehzahl durch eine Änderung der Last (= geänderte Einspritzmenge) gleichzeitig die Parameter Ansaugdruck und Ansaugtemperatur verändern. Um die Umgebungsbedingungen entsprechend dem realen Motor darzustellen, wurden bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen bei den Betriebspunkten mit erhöhter Last auch Ansaugdruck und Ansaugtemperatur angehoben. Dies führt gleichzeitig zu einer Veränderung von Druck und Temperatur im Brennraum zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns. Die Prozentangabe der Last bezieht sich dabei auf die eingespritzte Kraftstoffmenge. Verglichen werden die Lastvarianten 8LCR_600 (25%) und 8LCR600H (50%) bei einem Einspritzdruck von 600 bar, sowie die Lastvarianten 8LCR12HL (50%) und 8LCR120V (100%) bei einem Einspritzdruck von 1200 bar. Mit der Variation der Last und der

Aufladung soll der Einfluß des Brennraumdruckes und der Brennraumtemperatur auf die Zündung und die weitere dieselmotorische Verbrennung untersucht werden.

- Spritzbeginnvariation

Bei der Verlagerung des Spritzbeginns im hier untersuchten Rahmen von 3° KW v.OT (8LCR1000) nach 3° KW n.OT (8LCR100N) verringern sich Druck und Temperatur im Brennraum zum Zeitpunkt des Spritzbeginns und im weiteren Verlauf des Zündverzuges und des Verbrennungsvorgangs. Bei ansonsten konstant gehaltenen Parametern wird hier vor allem der Einfluß der Brennraumtemperatur auf die Gemischbildung und Zündung untersucht, da die Druckdifferenz zwischen den beiden Zündphasen moderat ausfällt.

- Variation der AGR-Rate

Beim Betriebspunkt 8LCR12HA mit einer AGR-Rate von 10% wurden die Werte für die Ansaugtemperatur und den Ansaugdruck so gewählt, daß zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns dieselben thermodynamischen Randbedingungen im Brennraum vorlagen wie beim Vergleichspunkt 8LCR12HL ohne AGR-Zumischung. Mit diesem Vergleich soll der Einfluß des Sauerstoffanteils auf die Zündung und Verbrennung untersucht werden.

- Einspritzdruckvariation

Eine Variation des Einspritzdruckes wurde bei zwei unterschiedlichen Lasten durchgeführt. Beim 25% Lastpunkt betragen die Einspritzdrücke 600 bar (8LCR_600) und 1000 bar (8LCR1000), beim 50% Lastpunkt betragen sie 600 bar (8LCR600H) und 1200 bar (8LCR12HL). Ein höherer Einspritzdruck bedingt eine höhere Einspritzrate und eine bessere Zerstäubung, und so soll mit diesem Vergleich der Einfluß des Einspritzverlaufes und der Gemischbildung auf die Zündung und Verbrennung untersucht werden.

- Einspritzsystemvariation

Eine Variation des Einspritzsystems wurde bei 25% Last und 100% Last durchgeführt. Beim für alle anderen Parameterstudien verwendeten CR-System liegt dabei jeweils ein konstanter Druck über der gesamten Einspritzung an. Mit dem PLD-System tritt im Gegensatz dazu während der Einspritzung eine Druckerhöhung vom Öffnungsdruck der Nadel (300 bar) bis zum Einspritzende (maximal 1800 bar) auf. Beim 25% Lastpunkt beträgt der Einspritzdruck beim CR-System 600 bar (8LCR_600) und beim PLD-System 300-550 bar (8LPLD_25), beim 100% Lastpunkt beträgt er beim CR-System 1200 bar (8LCR120V) und beim PLD-System 300-1030 bar. Die Einspritzdrücke der mit dem PLD-System verglichenen CR-Lastpunkte wurden so gewählt, daß der CR-Einspritzdruck in etwa dem maximalen Einspritzdruck des PLD-Lastfalles entspricht. Mit dieser Variation soll der Einfluß der Änderung der Gemischaufbereitungsgüte und der Einspritzrate während der Einspritzung auf Zündung und Verbrennung untersucht werden.

4.2 Auswertung und Darstellung des Prozessablaufes

Die Auswertung und der Vergleich der Prozessabläufe stützt sich im Wesentlichen auf die Analyse der integralen optischen Daten und für den Bereich der Selbstzündung zusätzlich auf die visuelle Beurteilung der Chemilumineszenz-Einzelbilder. Die der visuellen Beurteilung der Einspritzung und der Hauptphase der Verbrennung zugrundeliegenden Verbrennungsbilder aus den Hochgeschwindigkeitsfilmen werden zwar zur Beurteilung herangezogen, werden aber nur exemplarisch an einem Beispiel im Anhang dieser Arbeit abgebildet.

4.2.1 Messungen zur Einspritzung und Gemischbildung

Die Analyse der Einspritzphase beschränkt sich beim Filmaggregat auf die Sichtbarmachung der flüssigen Phase der Einspritzstrahlen und deren Auswertung. Die dampfförmige Phase des eingespritzten Kraftstoffes umgibt die flüssige Phase und breitet sich mit zunehmender Einspritzdauer immer weiter im Brennraum aus. Sie kann in einem anderen Versuchsträger, der HT-Kammer, näher untersucht werden. Man erkennt dabei, daß die Eindringgeschwindigkeit der flüssigen Strahlspitze mit zunehmender Einspritzdauer abnimmt und damit die axiale Ausdehnung des flüssigen Kraftstoffstrahls ab einer bestimmten Zeit nach Einspritzbeginn stagniert. Es ergibt sich somit für jeden Betriebszustand ein charakteristischer Strahlspitzenweg, der vor allem von den ihn umgebenden Zustandsgrößen Druck und Temperatur abhängt. Beim realen Motor kann zusätzlich die Temperatur der in der Nähe befindlichen Muldenwand die Strahlausbreitung beeinflussen. Der im Versuchsträger verwendete Quarzglaszylinder besitzt einen gegenüber einem Aluminiumzylinder deutlich verringerten Wärmeübergang, sodaß die Möglichkeit besteht, daß die Oberflächentemperatur des Quarzglaszylinders höher ist als die Zylinderbodentemperatur im realen Motor.

Beim verwendeten Zylinder ist der flüssige Strahlspitzenweg in jedem Fall kürzer als die Strecke zwischen der Düse und dem Muldenrand, auf den alle Strahlen gerichtet sind. Das bedeutet, daß der eingespritzte Kraftstoff beim Erreichen des Muldenrandes bereits komplett verdampft ist und daß es somit zu keiner Wandauflagerung von flüssigem Kraftstoff in der Mulde kommt. Interaktionen zwischen Strahl und Wand spielen also nur in gasförmigem Zustand eine Rolle, wobei meist vor dem Erreichen des Muldenrandes die rußleuchtende Diffusionsverbrennung eingesetzt hat. Daraus ergibt sich, daß in diesem Fall nur der thermodynamische Zustand im Zylinder und der Kraftstoffdruck in der Einspritzdüse einen Einfluß auf die Gemischbildung während des Zündverzuges besitzen.

Aus diesem Grund kann man die Ergebnisse bezüglich des Eindringverhaltens von flüssigem und dampfförmigem Kraftstoff aus den Versuchen mit dem Freistrahler in der HT-Kammer bis zum Zeitpunkt der rußleuchtenden Verbrennung gut auf die Randbedingungen im Filmaggregat übertragen.

Aufgrund dieser anfänglichen Muldengeometrieunabhängigkeit werden mit den untersuchten Varianten der Veränderung des Lastzustandes und der Gaszusammensetzung im Zylinder sowie der Änderung des Einspritzdruckes und des Einspritzsystems alle relevanten Einflußgrößen auf die Gemischbildung und den Zündprozeß variiert.

Die Darstellung der Einspritz- und Gemischbildungsphase beschränkt sich im Folgenden auf die binarisierte Darstellung der flüssigen Anteile der Einspritzstrahlen als Hintergrundbild für die aufgenommenen OH-Chemilumineszenzen.

4.2.2 Untersuchungen zur Zündphase

Die Untersuchung der Zündphase stützt sich auf die Sichtbarmachung der in der Zündphase entstehenden OH-Chemilumineszenz. Die Begründung für die Auswahl des OH-Radikals als Indikator für die Zündung wurde bereits im Kapitel „2 Wissensstand über das Dieselfahren aus der Literatur“ gegeben. Zur Verdeutlichung der Argumentation wird für wenige Betriebspunkte ein simultaner Vergleich zwischen OH- und CH-Chemilumineszenz an einem ausgewählten Einspritzstrahl durchgeführt.

Die auftretende OH-Chemilumineszenz wird in dieser Arbeit in zweifacher Hinsicht betrachtet: Einerseits wird der integrale Verlauf der Chemilumineszenz mittels Quarz-Lichtleiter und Photomultiplier mit dem Indiziersystem fortlaufend mit einer Abtastrate von $0,1^\circ\text{KW}$ aufgezeichnet. Andererseits wird mit dem installierten ICCD-Kamerasystem ein Einzelbild pro gefeuertem Zyklus gemacht. Diese beiden Daten werden aufeinander bezogen und es kann so eine Serie aus Einzelbildern zusammengestellt werden, deren zugeordnete integrale Chemilumineszenz-Intensitäten in der Reihenfolge ihrer Auswahl dem aus vielen Einzelversuchen gemittelten integralen Verlauf entspricht. Diese ausgewählten Einzelbilder werden mit den zum Aufnahmezeitpunkt vorhandenen binarisierten Einspritzstrahlbildern (flüssige Phase) hinterlegt und als Bilderserie mit einem Zeitabstand von $15\ \mu\text{s}$ von Bild zu Bild im Anhang dargestellt.

Da für die Beschreibung der Zündphase nur wenige $^\circ\text{KW}$ n.SB analysiert werden müssen, und die nachfolgende Verbrennung rückwirkend keinen Einfluß mehr auf die Zündphase besitzt, wurde für alle ICCD-Aufnahmen die Einspritzmenge von $75\ \text{mm}^3$, auch für alle „Lastvarianten“, konstant gehalten. Aus diesem Grund sind die Nadelhubverläufe in den Diagrammen der integralen OH-Chemilumineszenz und des Rußleuchtens in den folgenden Kapiteln der Analyse der Zündung und vorgemischten Verbrennung auffallend kurz. Zur Analyse der Diffusionsverbrennung mittels Hochgeschwindigkeitsfilm wurde jeweils die korrekte Kraftstoffmenge pro Arbeitsspiel eingespritzt.

4.2.3 Analyse der Hauptphase der Verbrennung

Die Analyse der Diffusionsverbrennung stützt sich in dieser Arbeit vor allem auf die Interpretation der Zylinderdruckverläufe, der daraus berechneten Heizverläufe und der aus den integralen Strahlungsintensitäten berechneten Verläufe für die Rußtemperatur und die spezifische Rußkonzentration. Die visuelle Analyse der Verbrennungsfilme auf Strömungsphänomene ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Darstellung beschränkt sich daher auf die Diagrammform.

Bei der Berechnung des Heizverlaufes (Rate of Heat Release = RoHR) handelt es sich um einen vereinfachten Algorithmus, der die Wandwärme unberücksichtigt läßt und zur Berechnung der spezifischen Wärme c eine Näherungsformel benutzt /66/.

Dabei berechnet sich die zugeführte Wärme in dem Intervall 1→2 aus dem Unterschied zwischen dem gemessenen Druck am Intervallende und dem Druck, der sich bei adiabater Kompression beziehungsweise Expansion ergeben würde.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \frac{c_v}{R} \cdot (p_2 - p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa)$$

mit: R: Gaskonstante
 c_v : spezifische Wärme bei konstantem Volumen
 κ : Isentropenexponent

Für κ und c_v werden folgende Näherungsformeln verwendet:

$$\kappa = 1 + \frac{0,2888}{c_v}$$

$$c_v = 0,7 + T \cdot 0,001 \cdot \left(0,155 + \frac{56 \cdot I}{V_h \cdot p_s}\right)$$

mit: I: umgesetzte Wärme
 V_h : Hubvolumen
 p_s : Saugrohrdruck

Die während des Verbrennungszyklusses zugeführte Wärme $Q_{1 \rightarrow 2}$ wird nach dem Kurbelwinkel differenziert. Bei den Heizverlaufs-Diagrammen zeigt dann der Ordinatenwert der Kurve die Änderung der durch die Verbrennung zugeführten Wärme pro Grad Kurbelwinkel. Durch diese Darstellung werden die Auswirkungen der Änderungen bestimmter Parameter auf die einzelnen Phasen der Verbrennung in der vergleichenden Betrachtung besonders deutlich hervorgehoben.

4.2.4 Darstellung der Schadstoffentstehung

Für die Darstellung der Schadstoffentstehung werden die aus den Hochgeschwindigkeitsbildern gewonnenen Temperaturbilder zur Ermittlung der Verläufe der NO-Bildungs-Kennzahl benutzt. Für eine Abschätzung der Güte des Rußausbrandes wird der integrale Verlauf der spezifischen Rußkonzentration herangezogen und interpretiert.

5 Ergebnisse

Im Kapitel 5.1 der Ergebnisse wird anhand eines repräsentativen Betriebspunktes die ausgewählte Analysemethodik detailliert angewandt. Die nachfolgenden Kapitel 5.2 bis 5.6 behandeln anschließend vergleichende Untersuchungen von jeweils zwei Betriebspunkten, die sich in den in Kapitel „4.1 Parameterstudien“ festgelegten Parametern unterscheiden.

5.1 Analyse des Prozessablaufes beim Basisbetriebspunkt

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen beim Basisbetriebspunkt, der einem für den europäischen Abgastest relevanten Teillast-Betriebspunkt entspricht, bezüglich der Zündung und Verbrennung ausführlich diskutiert.

Die Randbedingungen der einzelnen Versuche entsprechen dem in Kapitel „4.1 Parameterstudien“ erläuterten Betriebspunkt mit der Bezeichnung 8LCR_600 (= 8-Loch-Düse, Common-Rail-System, 600 bar Einspritzdruck, 25% Last).

Für die Bezeichnung der einzelnen Einspritzstrahlen in der Darstellung auf den Bildern im Anhang wurde die „Uhrzeit“-Bezeichnung als Charakterisierung ihrer Lage in der Projektionsebene durch den Kolbenboden gewählt. In Bild 5.1 ist ein schematisiertes Strahlbild mit der Bezeichnung der einzelnen Einspritzstrahlen dargestellt.

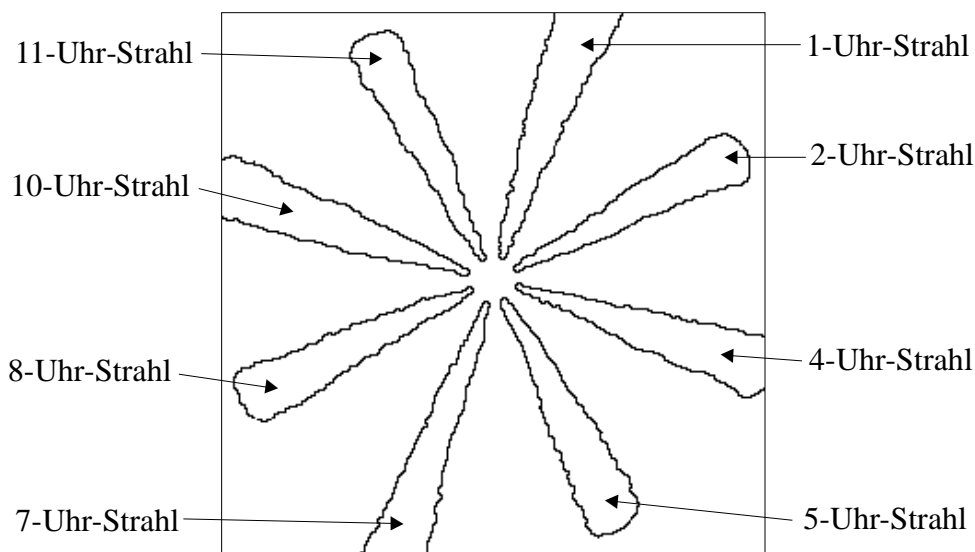


Bild 5.1: Bezeichnung der Einspritzstrahlen auf den Bildern im Anhang

5.1.1 Einspritzung und Gemischbildung

Im Filmaggregat läßt sich während der Einspritzung durch das Streulichtverfahren nur der flüssige Anteil der eingespritzten Kraftstoffstrahlen sichtbar machen. Für die Sichtbarmachung der Ausbreitung des dampfförmigen Kraftstoffes wurde deshalb in der HT-Kammer eine zusätzliche Untersuchung durchgeführt. In Bild 5.2 ist eine Gegenüberstellung der gemessenen

Eindringtiefen zwischen der flüssigen Phase und der brennenden, gasförmigen Phase der Einspritzstrahlen im Filmaggregat und der Dampfphase in der HT-Kammer aufgezeichnet /15/.

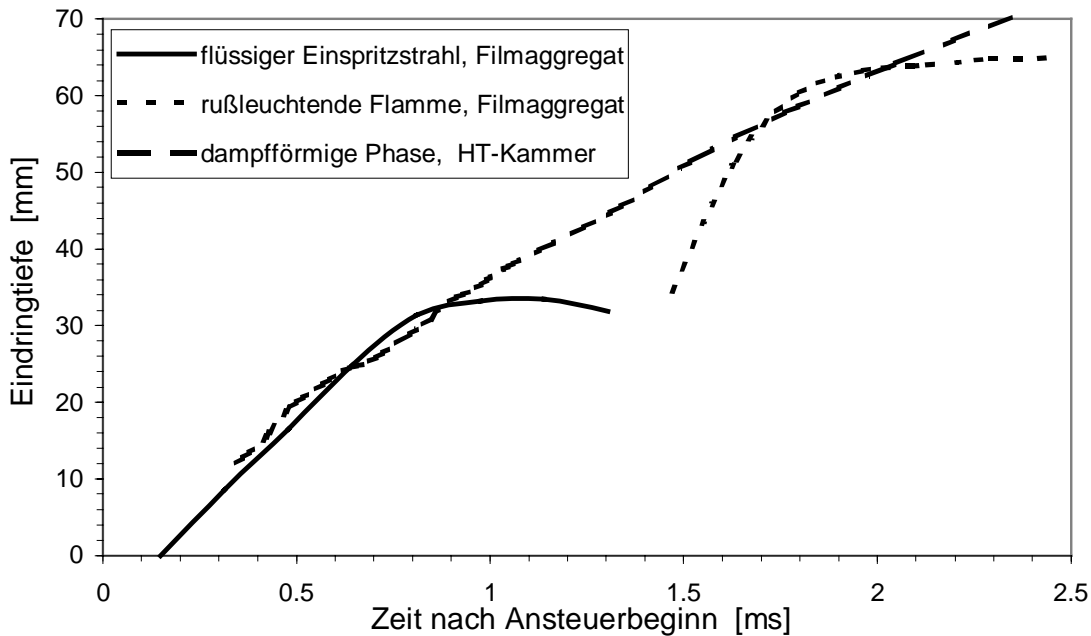


Bild 5.2: Eindringverhalten der flüssigen und dampfförmigen Phase des Kraftstoffes

Aus dem Diagramm wird deutlich, daß nach dem Beginn der rußleuchtenden Verbrennung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dieselflammen im Filmaggregat sehr gut mit der des dampfförmigen Kraftstoffes in der HT-Kammer übereinstimmt. Deutlich zu erkennen ist das Erreichen des flüssigen Strahlspitzenweges von etwa 34 mm zum Zeitpunkt 0,8 ms nach Ansteuerbeginn, beziehungsweise etwa 0,6 ms nach Spritzbeginn.

Die Begrenzung der Ausbreitung der flüssigen Kraftstoffphase richtet sich nach der Verdampfungsgeschwindigkeit der eingespritzten Kraftstofftröpfchen. Die Ergebnisse zeigen dabei, daß der Muldenrand in keinem Fall von den direkt in die Brennraummulde gerichteten flüssigen Kraftstoffstrahlen erreicht wird, der maximale Strahlspitzenweg beträgt etwa 75% des Muldenradius. Die Stagnation der Ausbreitung der rußleuchtenden Flamme im Filmaggregat ergibt sich aus dem Erreichen der Zylinderwand (ca. 1,8 ms nach Ansteuerbeginn).

5.1.2 Vergleichsmessungen zum Zündprozeß

Bei der Untersuchung des Zündprozesses stellt sich die Frage, warum in dieser Arbeit das Auftreten von OH-Chemilumineszenz als Indikator für die Selbstzündung verwendet wird, und nicht die Chemilumineszenz von CH-Radikalen, die häufig für die Charakterisierung des gesamten Verbrennungsablaufes, sowohl bei der dieselmotorischen als auch bei der ottomotorischen Verbrennung, herangezogen werden /38/-/39/. CH-Radikale treten sowohl in der Vormischflamme als auch in der Diffusionsflamme auf und sind aufgrund ihrer Chemilumineszenz im sichtbaren Bereich (430 nm) meßtechnisch einfacher zu erfassen /38/-/39/. Zur Klärung ist im Folgenden eine vergleichende Analyse der Chemilumineszenzen der

OH-Radikale und der CH-Radikale beispielhaft bei drei Betriebspunkten dargestellt, um die Auswahl des OH-Radikals als den besser geeigneten Indikator zur Charakterisierung der Zündung zu begründen.

Im Anhang in Bild A.1 sind Vergleichsbilder mit den Intensitäten für 430 nm (CH-Chemilumineszenz) und 308 nm (OH-Chemilumineszenz) für den betrachteten Betriebspunkt 8LCR_600 dargestellt. Aufgenommen wurden diese Bilder mit einem optischen Bildteiler und jeweils einem Filterpaket pro Wellenlänge (siehe Kapitel „3.3.2 Adaption der Meßverfahren, Bild 3.6“). Als Vergleichsstrahl wurde der besonders stark ausgeprägte „4-Uhr-Strahl“ herangezogen. Es wurden Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn gemacht. Die Auswahl der Vergleichsbilder ist willkürlich und zeigt den Fortschritt in der vorgemischten Verbrennung im betrachteten Strahl ab einem Zeitpunkt, an dem bereits deutliches OH- und CH-Leuchten auftritt, das erste Rußleuchten jedoch erst beim vierten Bildpaar gerade schwach eingesetzt hat.

Auf dem zu einem frühen Zeitpunkt nach Zündbeginn aufgenommenen oberen Doppelbild erkennt man, daß sich die Emission der OH-Radikale in der ebenen Darstellung breiter um den Strahl verteilt als das Eigenleuchten der CH-Radikale. In der räumlichen Vorstellung befinden sich die OH-Radikale damit in einer weiter außen liegenden Umhüllenden des Spray-Kegelmantels als die CH-Radikale.

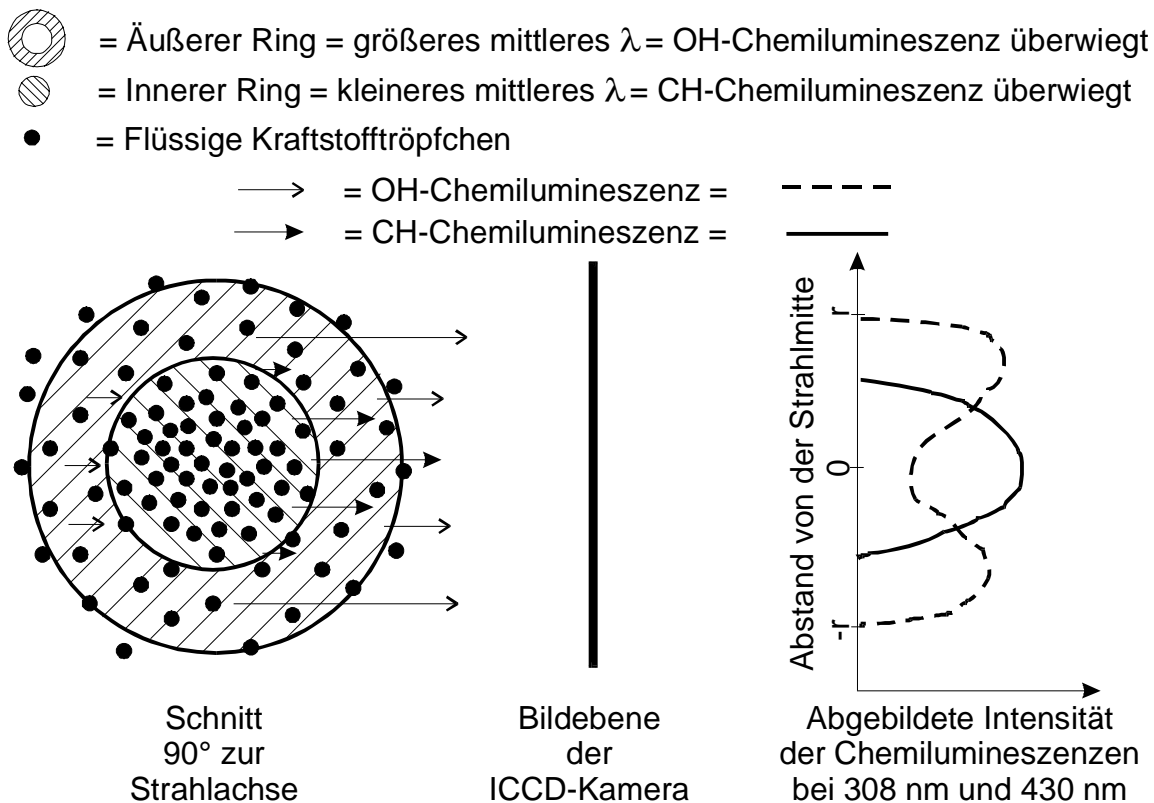


Bild 5.3: von der Kamera aufgezeichnete Chemilumineszenzen, Anordnung am Strahl

In Bild 5.3 ist dargestellt, wie die räumlich um den Strahl auftretenden Chemilumineszenzen in der Bildebene erscheinen. Dabei wird davon ausgegangen, daß der flüssige Strahlkern die

hinter ihm entstehende Chemilumineszenzstrahlung blockt oder ablenkt, so daß diese nicht in der Bildebene erscheint. Daraus ergibt sich, daß nur die in Kameraperspektive vor dem flüssigen Strahlkern und an den seitlichen Randbereichen entstehende Chemilumineszenz von der Kamera aufgezeichnet wird.

Geht man davon aus, daß sich das Maximum der OH-Konzentration im stöchiometrischen Gemischbereich befindet, so ist demnach eine erhöhte CH-Konzentration in den fetteren Gemischbereichen zu erwarten, da das Luft-Kraftstoffverhältnis in Richtung des flüssigen Strahlkegels immer mehr abnimmt /8/.

Integriert man die Intensitäten jeweils parallel zur Strahlachse, so erhält man eine radiale Chemilumineszenzverteilung (Diagramm rechts). Integriert man senkrecht zur Strahlachse, so erhält man eine axiale Verteilung der beiden Chemilumineszenz-Intensitäten (Diagramm in der Mitte).

Radial erkennt man beim oberen Bildpaar (Bild A.1), daß der Schwerpunkt der CH-Chemilumineszenz näher bei der Strahlachse liegt als der der OH-Chemilumineszenz. Ebenso ist die gesamte Intensität des CH-Leuchtens niedriger als die des OH-Leuchtens. Axial kann man erkennen, daß außer der Hauptreaktionszone (8-18mm Düsenabstand) noch eine zweite mit geringerer Intensität auftaucht, die sich direkt in Düsennähe befindet. Es ist zu beobachten, daß an einer Stelle dieser düsennahen Reaktionszone die CH-Chemilumineszenz überwiegt.

Betrachtet man sich nun die anderen Vergleichsbilder zu späteren Zeitpunkten, so fällt auf, daß diese Tendenzen weiterhin gelten: Die Häufung der CH-Chemilumineszenz liegt näher an der Strahlachse als die OH-Chemilumineszenz und der Schwerpunkt der OH-Chemilumineszenz liegt weiter von der Düse weg als der Schwerpunkt der CH-Chemilumineszenz. Die Gesamtintensität der OH-Chemilumineszenz überwiegt anfangs noch deutlich (555 und 615µs n.SB), wird aber bald von der integralen Chemilumineszenz-Intensität bei 430 nm überschritten (660 und 720µs n.SB), wobei zu diesen späten Zeitpunkten ein deutlicher Anteil des Rußleuchtens im 430 nm Signal vorhanden ist. Die unterschiedlichen Schwerpunktsverteilungen bleiben jedoch tendenziell erhalten.

Zur Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse werden die Vergleichsmessungen zusätzlich bei zwei anderen Betriebspunkten durchgeführt. Die Schaubilder für den Teillastpunkt 8LCR1000 sind dabei im Anhang in Bild A.2 und für den Teillastpunkt 8LCR100N in Bild A.3 dargestellt.

Bei diesen beiden Betriebspunkten mit einem erhöhten Einspritzdruck von 1000 bar verschwindet der Unterschied in der axialen Schwerpunktslage der beiden Chemilumineszenzen nahezu. Nur bei späteren Aufnahmezeitpunkten läßt sich erkennen, daß die CH-Chemilumineszenz entlang des flüssigen Einspritzstrahles in der Nähe der Düse stärker ausgeprägt ist als die OH-Chemilumineszenz. Absolut gesehen befinden sich die Orte erhöhter OH- und CH-Chemilumineszenz aufgrund des höheren Einspritzimpulses weiter von der Düse weg als beim Betriebspunkt mit 600 bar Einspritzdruck (8LCR_600).

Die Tendenz, daß sich die Schwerpunktslage der Chemilumineszenz bei 430 nm radial betrachtet näher an der Strahlachse befindet als die Chemilumineszenz bei 308 nm, bleibt

jedoch auch bei diesen Betriebspunkten erhalten. Als repräsentatives Beispiel für dieses Charakteristikum kann das untere Bildpaar in Bild A.3 ($1005\mu\text{s n.SB}$) angesehen werden. Während die radiale Verteilung der CH-Chemilumineszenz einer Gauss-Verteilung mit dem Schwerpunkt in Strahlachse nahekommt, besitzt die OH-Chemilumineszenzverteilung je ein Maximum rechts und links des Strahles mit einem Minimum direkt auf der Strahlachse.

Im Gegensatz zum Teillastpunkt 8LCR_600 überwiegt bei den Betriebspunkten mit 1000 bar Einspritzdruck die OH-Chemilumineszenz integral betrachtet bei allen acht Bildpaaren. Das bedeutet, daß aufgrund der besseren Kraftstoffaufbereitung infolge feinerer Zerstäubung die Konzentration der OH-Radikale bis zu späten Zeitpunkten nach Zündbeginn und einer entsprechend hohen absoluten Chemilumineszenzintensität überwiegt.

Die oben beschriebenen Vergleichsmessungen für die Chemilumineszenzen der Radikale OH und CH wurden in einem Zeitbereich durchgeführt, in dem bereits beide Radikalarten in erhöhter Konzentration am betrachteten Strahl auftraten, in dem andererseits Rußleuchten in den meisten Fällen noch nicht eingesetzt hatte.

Betrachtet man nun beispielhaft die aus Lichtleitermessungen gewonnenen integralen Verläufe der Chemilumineszenzen bei 308 nm und 430 nm über den gesamten Bereich vom Spritzbeginn bis zum Einsetzen intensiven Rußleuchtens, so wird deutlich, daß bei allen Betriebspunkten zuerst eine Chemilumineszenz bei 308 nm detektierbar ist. In Bild 5.4 sind beispielhaft von einem Teillast-Betriebspunkt die integralen Verläufe für OH- und CH-Chemilumineszenz und für das Rußleuchten bei 800 nm über dem Nadelhub dargestellt.

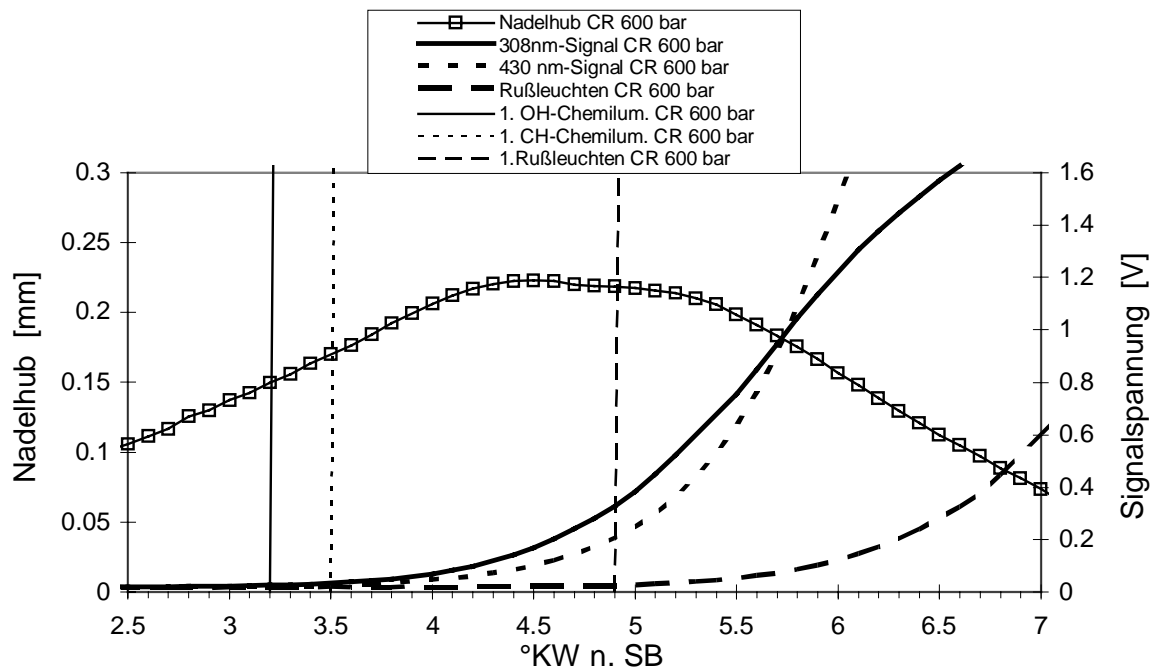


Bild 5.4: Integrale Verläufe des OH-, CH-, und Ruß-Signals

Man erkennt deutlich das frühere Auftreten und steilere Ansteigen der OH-Chemilumineszenz und den verschleppten Beginn der CH-Chemilumineszenz. Kurz nach Einsetzen der rußleuchtenden Verbrennung steigt die Kurve der Chemilumineszenz bei 430 nm stärker an als

die Kurve für 308 nm, bis sich beide Kurven bei der gewählten Verstärkung der beiden Photomultiplier etwa 2° KW nach Zündbeginn überschneiden. Zu diesem Zeitpunkt ist die Intensität des Rußleuchtens jedoch bereits so weit angestiegen, daß eine zusätzliche Beeinflussung des gemessenen 430 nm-Signals durch das Rußleuchten angenommen werden muß. Die in einem breiten Spektrum sehr intensiv leuchtenden Rußpartikel haben eine deutliche Emission bei 430 nm, die thermische Strahlung bei 308 nm ist dagegen sehr viel geringer (siehe Kapitel „3.2.1 Zwei-Farben-Spektrometrie“). Im Gegensatz zur Analyse des CH-Leuchtens ist eine Betrachtung der OH-Chemilumineszenz über den gesamten Verbrennungszyklus parallel zur Analyse des Rußleuchtens möglich, da der Anteil der Chemilumineszenz der OH-Radikale an der gesamten Lichtemission bei 308 nm überwiegt (Siehe Kapitel „3.1.2 Chemilumineszenzmessungen“) /47/.

Die vergleichenden Messungen der OH- und der CH-Chemilumineszenz an einem ausgewählten Strahl zeigten vor allem bei hohen Einspritzdrücken, daß bei beiden Wellenlängen Chemilumineszenz in nahezu demselben Abstand von der Düse auftritt. Die Lage der Zündorte bezüglich des Abstandes von der Düse zeigt also keine Abhängigkeit von der analysierten Spezies. Allerdings differiert die Ausdehnung der Zündorte in radialer Richtung des Einspritzstrahles deutlich, was vom örtlichen Luftverhältnis, in dem die Radikale auftreten, abhängt.

Durch den experimentellen Nachweis, daß die für das CH-Eigenleuchten stehende Chemilumineszenz bei 430 nm bei der dieselmotorischen Verbrennung zu späteren Zeitpunkten und mit geringerer Intensität auftritt als die Chemilumineszenz bei 308 nm, die für das OH-Eigenleuchten steht, ergibt sich bezüglich der Definition des Zündzeitpunktes eine Abhängigkeit von der verwendeten Radikalspezies.

Mit der Argumentation, daß OH-Chemilumineszenz bei der dieselmotorischen Verbrennung früher und intensiver als CH-Chemilumineszenz auftritt, daß die Lage der Zündorte bezüglich der Einspritzdüse nahezu unabhängig von der betrachteten Radikalspezies ist, und daß im Verlauf der Verbrennung ein Übersprechen des Rußleuchtens auf das 430 nm-Signal zu erwarten ist, wird im Folgenden zur Charakterisierung der Zündphase ausschließlich die für das OH-Radikal stehende Chemilumineszenz bei 308 nm herangezogen.

5.1.3 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Bei der Untersuchung des Zündprozesses wurde aus einer Vielzahl von Einzelbildern, die mit dem ICCD-Kameraaufbau, wie in Kapitel „3.3.2 Adaption der Meßverfahren“ beschrieben, aufgenommen wurden, eine repräsentative Auswahl getroffen. Eine Zusammenstellung von Einzelbildern in einer zeitlichen Reihenfolge in einem Abstand von $0,1^\circ$ KW oder $15\ \mu\text{s}$ ist im Anhang in den Bildern A.4 und A.5 zu sehen. Das erste Auftreten deutlicher OH-Chemilumineszenz ist dabei ab $465\ \mu\text{s}$ n.SB zu beobachten. Bei der Falschfarbendarstellung in einer Ebene liegen die Orte des OH-Leuchtens nicht immer direkt auf dem flüssigen Strahlanteil, was darauf hindeutet, daß sich die OH-Radikale räumlich gesehen in einem gewissen Abstand vom flüssigen Strahlkegel im vorgemischten Bereich befinden. Aus der Literatur ist bekannt, daß sich die höchste OH-Konzentration im stöchiometrischen Bereich

nachweisen läßt /47/. Innerhalb dieses Bereiches, der den kompletten flüssigen Strahlkegel umschließt, ist das Auftreten der Zonen erhöhter OH-Chemilumineszenz an den jeweiligen Orten in einem räumlich begrenzten Rahmen zufällig und statistisch verteilt. Diese Orte, an denen OH-Chemilumineszenz nachgewiesen werden kann, werden im Folgenden als Zündorte bezeichnet. Diese ersten Zündorte befinden sich in einem Abstand von etwa 5-10 mm von der Düse entfernt. Das entspricht etwa 15-30% der Länge des flüssigen Einspritzstrahls zu diesem Zeitpunkt. Anfangs noch als kleine Kerne mit einem Durchmesser von ca. 1-3 mm bewegen sich diese Orte deutlicher OH-Chemilumineszenz aufgrund ihres Impulses in Richtung Strahlspitze fort und wachsen dabei innerhalb des vorgemischten Bereiches entlang der Strahlachse und um den flüssigen Strahl herum weiter, wobei sie an Intensität zunehmen. Während der Ausbreitung der Reaktionszonen kann es vorkommen, daß zwei Zündkerne zusammenwachsen und damit eine größere Zündzone bilden (siehe Bild 525 μ s n.SB). Dies kann sowohl entlang eines Strahles als auch im Bereich zwischen zwei Strahlen vorkommen. Die Unterschiede in der Intensität zwischen den Zündorten auf einem Bild sind häufig relativ groß und differieren in ihrem Maximum um bis zu einer Größenordnung. Die Zündzonen im Bereich der vier Strahlen aus den Düsenlöchern mit dem größeren A-Maß sind meist stärker ausgebildet als die Zündzonen an den anderen vier Strahlen, was vor allem zu späteren Zeitpunkten nach Spritzbeginn deutlich wird.

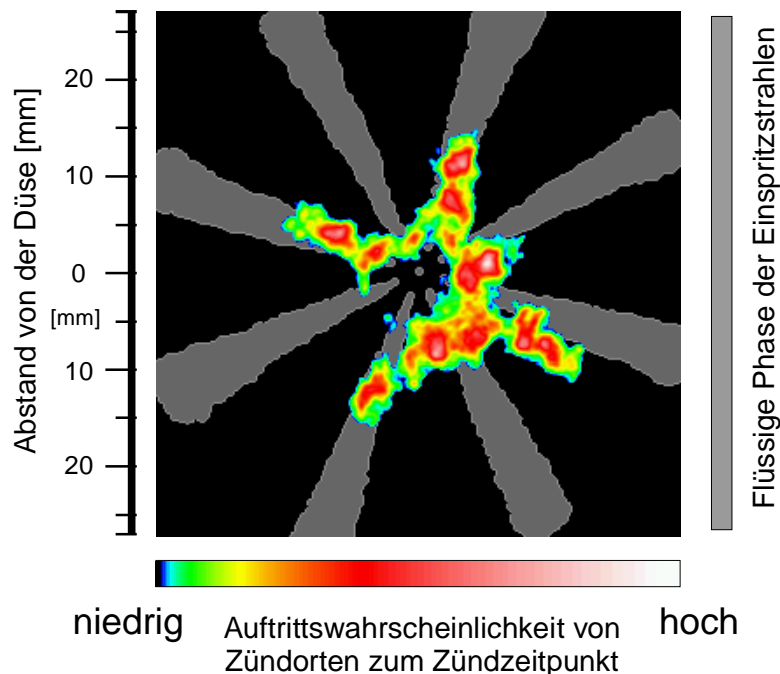


Bild 5.5: Auftretswahrscheinlichkeit von Zündorten bei der dieselmotorischen Verbrennung, $T = 842$ K, $p = 48$ bar, Einspritzdruck = 600 bar (Betriebspunkt 8LCR600)

Für eine statistische Beschreibung der Zündorte im Anfangsstadium deutlicher OH-Chemilumineszenz wurde exemplarisch für diesen Teillastpunkt eine umfangreiche Versuchsreihe durchgeführt, und daraus 16 Aufnahmen zu exakt dem Zeitpunkt, der als Zündzeitpunkt definiert wurde, gemittelt. Als Ergebnis ist in Bild 5.5 eine

Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten erster OH-Chemilumineszenz in Form eines Falschfarbenbildes dargestellt.

Sehr deutlich erkennt man die hohe Auftrittswahrscheinlichkeit von Zündorten in Düsenhöhe. Beim „8-Uhr-Strahl“, der sich auf der Einlaßseite befindet, ist die Wahrscheinlichkeit, daß an ihm zu diesem Zeitpunkt Zündorte entstehen, sehr gering. Auffällig ist auch, daß die Zündorte häufig in der Betrachtungsebene zwischen den Einspritzstrahlen auftreten. Infolgedessen ergibt sich ein nahezu kompletter Ring mittlerer Wahrscheinlichkeit in einem - in der Projektion auf die Betrachtungsebene - sehr geringen Abstand von etwa 5 mm von der Düse, was ca.15% des Strahlspitzenweges entspricht. Entlang der Strahlen der Düsenlöcher mit dem größeren A-Maß ist zu diesem Zeitpunkt auch eine hohe Zündortswahrscheinlichkeit bis zu ca.40% des Strahlspitzenweges, also bis etwa 14 mm von der Düse weg, zu erkennen.

Mittelt man alle Auftrittswahrscheinlichkeiten bezüglich ihres Abstandes zur Einspritzdüse, so wird deutlich, daß die Zündung bei diesem Betriebspunkt mit höchster Wahrscheinlichkeit in nächster Nähe der Düse stattfindet. Der mittlere Abstand beträgt dabei etwa 8 mm oder 25% des Strahlspitzenweges.

Eine derartige statistische Beschreibung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von deutlicher OH-Chemilumineszenz läßt sich auch für spätere Zeitpunkte durchführen. Als Ergebnis ist dabei, wie bei der Analyse der Einzelbilder bereits erwähnt, eine Ausdehnung der Zündzonen in Strahlachse und deren gleichzeitige radiale Ausdehnung zu erwarten.

Zur Verdeutlichung der Zyklusschwankungen sind im Anhang in Bild A.6 zu vier ausgewählten Zeitpunkten nach Spritzbeginn jeweils drei Bilder dargestellt. Jedem der drei Bilder zu einem Zeitpunkt ist derselbe integrale OH-Chemilumineszenz-Intensitätswert zugeordnet. Es zeigt sich, daß die Zündung sowohl sehr gleichmäßig auf alle Strahlen verteilt als auch sehr inhomogen mit dem Schwerpunkt auf einem oder zwei Strahlen ablaufen kann. Auch der Abstand der Schwerpunktslage der OH-Chemilumineszenz von der Düse variiert von Bild zu Bild. Ein gutes Beispiel für das verzögerte Einspritzen und den damit verbundenen verzögerten OH-Intensitätsanstieg an den vier Strahlen der Düsenlöcher mit dem niedrigeren A-Maß ist das rechte Bild der Serie bei 645 μ s n.SB. Hier sind die Orte deutlicher OH-Chemilumineszenz am „11-Uhr“- , „2-Uhr“- , „5-Uhr“- und „8-Uhr-Strahl“ etwa so ausgeprägt wie die Zündorte bei 555 μ s n.SB. Dagegen ist das OH-Eigenleuchten am „1-Uhr“- , „4-Uhr“- , „7-Uhr“- und „10-Uhr-Strahl“ für diesen Zeitpunkt normal ausgebildet, wobei die OH-Chemilumineszenz am 4-Uhr-Strahl wie bei einem großen Teil der Aufnahmen am stärksten ausgeprägt ist.

Betrachtet man nun den Verbrennungsfortschritt über den Bilderserien, so sieht man, daß die Orte meßbarer Chemilumineszenz bei 308 nm beim gewählten Betriebspunkt bis zu einem Zeitpunkt von 630 μ s n.SB im Strahlbereich zwischen der Düse und 75% des flüssigen Strahlspitzenweges zu finden sind. Bis zum Auftreten des ersten Rußleuchtens bei etwa 705 μ s n.SB wandern diese Zonen noch bis maximal zur flüssigen Strahlspitze weiter. Erst zu wesentlich späteren Zeitpunkten ($t > 1$ ms n.SB) ist eine deutliche OH-Chemilumineszenz auch in Regionen jenseits des Muldenrandes zu erkennen. Dann sind OH-Radikale entlang der kompletten, inzwischen rußleuchtenden Flamme vorhanden.

5.1.4 Diffusionsverbrennung

Erstes Rußleuchten ist bereits während der vorgemischten Verbrennung zu sehen (Bild 2.1). Während dem „Dieselschlag“ im Zylinderdruckverlauf, der für die Verbrennung des vorgemischten Anteils steht, ist durch die Ausbreitung der Flammen in die fetten Gemischzonen an den Tröpfchen bereits Ruß entstanden. Auf dem Hochgeschwindigkeitsfilm wird sichtbar, wie die ersten rußleuchtenden Zonen an einigen Einspritzstrahlen entstehen und innerhalb von etwa 0,3 ms an allen Strahlen die komplette eingespritzte dampfförmige Gemischwolke erfaßt haben.

Zum Zeitpunkt des ersten auf dem Hochgeschwindigkeitsfilm sichtbaren Rußleuchtens hat sich die meßbare OH-Chemilumineszenz infolge der stark exothermen Vormischflamme bereits auf alle Strahlen ausgebreitet und besitzt ein hohes Intensitätsniveau. Analysiert man nun einige Bilder verschiedener Zyklen des Hochgeschwindigkeitsfilmes zum Zeitpunkt des Rußleuchtens, so erhält man statistische Verteilungen der Orte ersten Rußleuchtens zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Spritzbeginn. In Bild 5.6 sind die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten rußleuchtender Verbrennung zu drei verschiedenen Zeitpunkten nach Spritzbeginn dargestellt. Es wird deutlich, daß die Orte ersten Rußleuchtens weiter von der Düse entfernt auftreten als die Zonen erster OH-Chemilumineszenz. Zum Zeitpunkt 705 μs n.SB, bei dem beim betrachteten Betriebspunkt erstmals Rußleuchten auftritt, beträgt der Abstand der schwach rußenden Zonen zur Düse etwa 10-15 mm, was etwa 30-50% des Strahlspitzenweges entspricht.

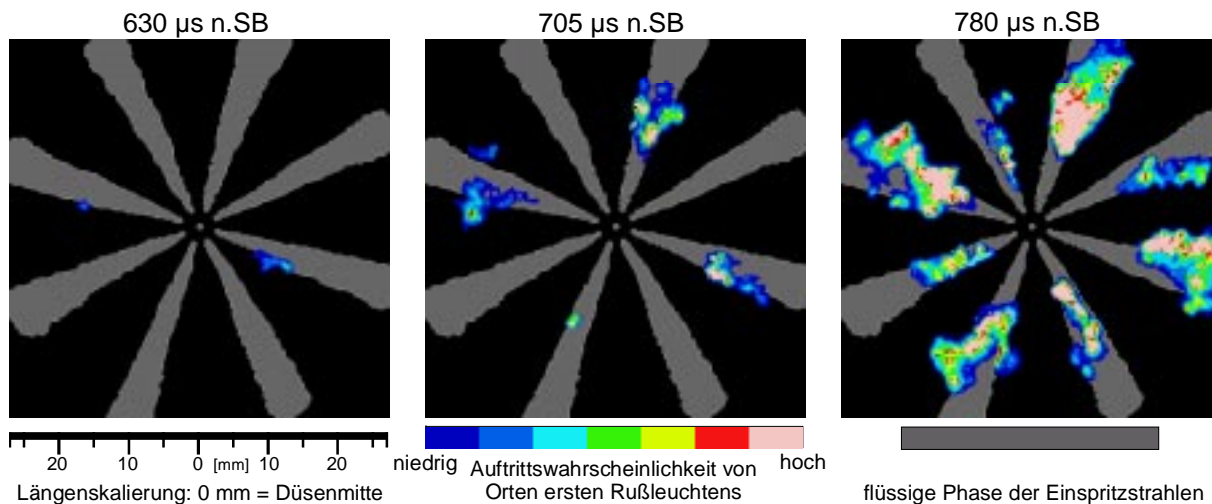


Bild 5.6: Auftretswahrscheinlichkeit von Zonen ersten Rußleuchtens (8LCR600)

Im weiteren Verlauf der rußleuchtenden Verbrennung breiten sich diese Zonen entlang der Strahlachsen in beide Richtungen aus, wobei ein direktes Heranbrennen an die Düse während des Einspritzvorganges nicht auftritt.

Es ist also eine Analogie zum Auftritt und zur Weiterentwicklung der Zonen deutlicher OH-Chemilumineszenz festzustellen, mit dem Unterschied, daß das erste OH-Leuchten wesentlich näher an der Düse auftritt und sich in einer radial zur Strahlachse größeren Ausdehnung ausbreitet. Geht man davon aus, daß die ersten Rußpartikel in der Nähe der ersten

Reaktionszonen der Vormischflamme gebildet werden, in denen deutliche OH-Chemilumineszenz auftritt, und daß diese Zonen sich durch den Einspritzimpuls radial von der Düse weg bewegen, so ergibt sich automatisch eine größere Eindringtiefe für die Zonen ersten Rußleuchtens, da die Rußbildung zeitlich verzögert zur Bildung von OH-Radikalen auftritt.

Nach dem Ende der vorgemischten Verbrennung findet in der Hauptphase der Verbrennung bis zum Ende der Einspritzung die rußleuchtende Diffusionsverbrennung statt, und nach Einspritzende läuft die Rußnachoxidation bis zum Unterschreiten der Temperaturschwelle von etwa 1700 K ebenfalls unter Abgabe von thermischer Strahlung im sichtbaren Bereich ab. Aus diesem Grund läßt sich der Verbrennungsablauf in dieser Phase sehr gut anhand der aus der Rußstrahlung berechneten Rußtemperaturen und spezifischen Rußkonzentrationen analysieren. Unterhalb dieser Rußtemperatur von etwa 1700 K können mittels der Zwei-Farben-Methode weder aus den Lichtleiterdaten noch aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm zuverlässige Werte ermittelt werden. Aus dem integralen spezifischen Rußkonzentrationsverlauf läßt sich jedoch abschätzen, daß die Rußkonzentration unterhalb der Nachweisgrenze gegen einen bestimmten Wert konvergiert und nicht auf Null zurückgeht.

Während der Diffusionsverbrennung interagieren die Flammen ihrer Lage und ihrem Impuls entsprechend mit dem Muldenrand und später auch mit der Zylinderwand. Während der Einspritzung wird durch den Einspritzimpuls eine Turbulenz induziert, die für eine gute Durchmischung des brennenden Dieselsprays mit der im Zylinder vorhandenen Verbrennungsluft sorgt. Die Einlaßkanäle des Zylinderkopfes sind nahezu drallfrei ausgelegt, weshalb die komplette Gemischbildung und Verbrennung nur von den Einspritzbedingungen und der Geometrie der Mulde bzw. dem Auftreffpunkt des Einspritzstrahles abhängt. Die Güte der Gemischbildung und der Luftausnutzung in dieser Phase der Verbrennung entscheidet über die Bildung der Schadstoffe und über deren Übrigbleiben nach Ende des Verbrennungstaktes. Um die auftretenden Strömungsphänomene während der Hauptphase der Verbrennung bei allen untersuchten Varianten möglichst konstant zu halten, wurden alle Versuche mit der gleichen Einspritzdüse durchgeführt. Aus diesem Grund ist es ausreichend, zur Interpretation der Phase der Diffusionsverbrennung die integralen Daten des Rußtemperatur- und Rußkonzentrationsverlaufes zu verwenden.

Die aus den Lichtleiterdaten ermittelten integralen Verläufe für die Rußtemperatur und die spezifische Rußkonzentration eignen sich vor allem für vergleichende Untersuchungen, weshalb hier auf eine Interpretation dieser Daten für den Betriebspunkt 8LCR_600 verzichtet wird.

Zur Veranschaulichung eines kompletten Verbrennungszyklusses sind im Anhang in Bild A.15 bis Bild A.17 Aufnahmen eines Hochgeschwindigkeits-Verbrennungsfilmes in ausgewählten Zeitintervallen beim betrachteten Betriebspunkt dargestellt. Zu den Bildern, auf denen rußleuchtende Verbrennung zu sehen ist, sind Falschfarbenbilder mit den Rußtemperaturverteilungen beziehungsweise Rußkonzentrationsverteilungen dargestellt.

Für die Analyse der Hauptphase der Verbrennung wird zusätzlich der aus dem Zylinderdruckverlauf ermittelte Heizverlauf herangezogen. Über ihn kann man wie beim Rußtemperaturverlauf vor allem vergleichende Aussagen bezüglich vorgemischtem

Kraftstoffanteil, Brenndauer und Intensität der Verbrennung treffen. Aus diesem Grund wird nur in den folgenden Kapiteln der vergleichenden Untersuchungen darauf eingegangen.

5.1.5 Schadstoffe

- Ruß

Für die Beurteilung der Rußemission wird der aus den integralen Lichtleiterdaten ermittelte Rußkonzentrationsverlauf analysiert (Bild 5.7).

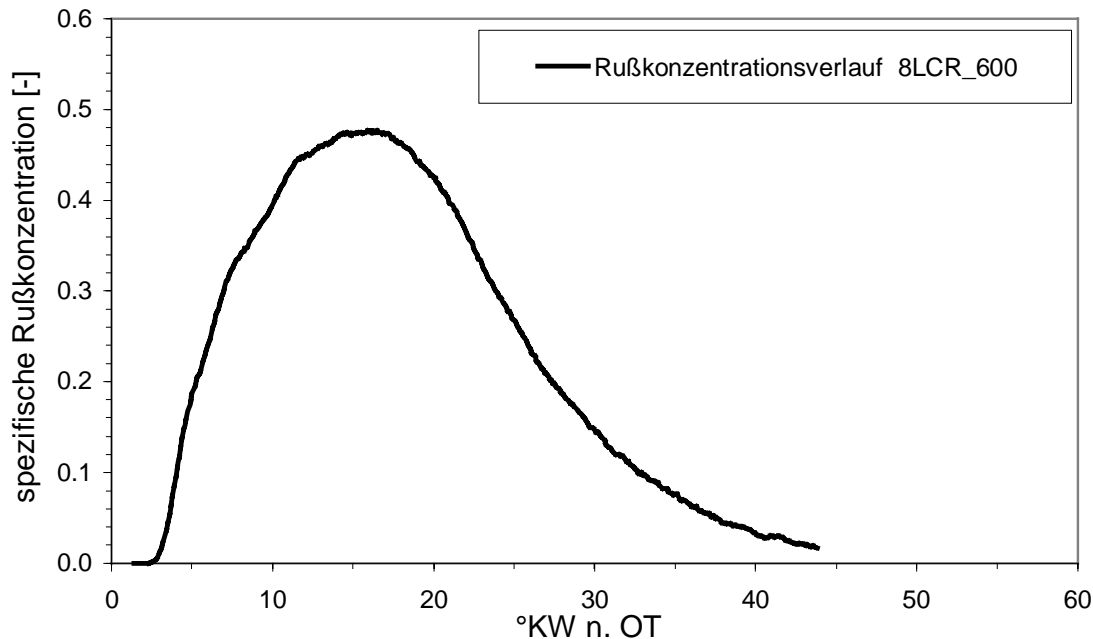


Bild 5.7: Integraler spezifischer Rußkonzentrationsverlauf

Zu Beginn der Verbrennung, während des Einspritzvorgangs, überwiegt die Rußbildung und die spezifische Rußkonzentration steigt an. Kurze Zeit nach Einspritzende (hier bei ca. 15°n.OT), wenn der gesamte eingespritzte Kraftstoff verdampft und chemisch umgesetzt ist, endet die Rußbildung, und der vorhandene Ruß wird durch die vorhandenen OH-Radikale und den Sauerstoff aus der Verbrennungsluft oxidiert. In dieser Phase (hier ab ca. 15°n.OT) überwiegt demnach die Rußnachoxidation, und die Rußkonzentration nimmt ab. Je besser und intensiver diese Rußnachoxidation vonstatten geht, desto steiler ist die abfallende Flanke der Rußkonzentrationskurve und desto geringer ist letztendlich der effektive Rußausstoß.

In Bild 5.8 sind für einen Betriebspunkt mit früherem Spritzbeginn (6°v.OT) die integralen Intensitäten für Rußleuchten (800 nm) und OH-Chemilumineszenz (308 nm) über den gesamten Bereich der Verbrennung dargestellt. Dabei wird deutlich, daß in der Anfangsphase der Rußnachoxidation ab 13° KW n.OT eine deutliche Abnahme der OH-Konzentration auf etwa 50% ihres Maximalwertes zu verzeichnen ist. In diesem Zeitbereich fällt auch die spezifische Rußkonzentration am steilsten ab.

Im weiteren Verlauf der Verbrennung nimmt die Intensität der Rußnachoxidation ab, wodurch die Abnahme der Signalstärke des Rußleuchtens bei 800 nm gebremst wird, während die

Intensität der OH-Chemilumineszenz ebenfalls moderater abnimmt. Zur Veranschaulichung des Verbrennungsablaufes bezüglich der 2D-Verteilung der OH-Chemilumineszenz und des Rußleuchtens sind in Bild 5.8 zu den integralen Kurvenverläufen je fünf ausgewählte Bilder paarweise zu jeweils denselben Zeitpunkten dargestellt. Die obere Bilderfolge ist dabei eine Serie von Einzelbildern aus den ICCD-Aufnahmen zur OH-Chemilumineszenz-Analyse. Die Aufnahmen in der unteren Reihe sind Ausschnitte aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm mit derselben Größenskalierung wie die Chemilumineszenzbilder in der oberen Reihe. Erkennbar wird, daß sich die OH-Chemilumineszenz in dieser Phase auf den gesamten Bereich der rußleuchtenden Flamme ausgedehnt hat, und daß die OH-Chemilumineszenz gegen Ende der Verbrennung schneller nachläßt als das Rußleuchten. Vor allem tritt die OH-Chemilumineszenz gegen Ende nur noch in den Randbereichen der „Rußwolken“ auf.

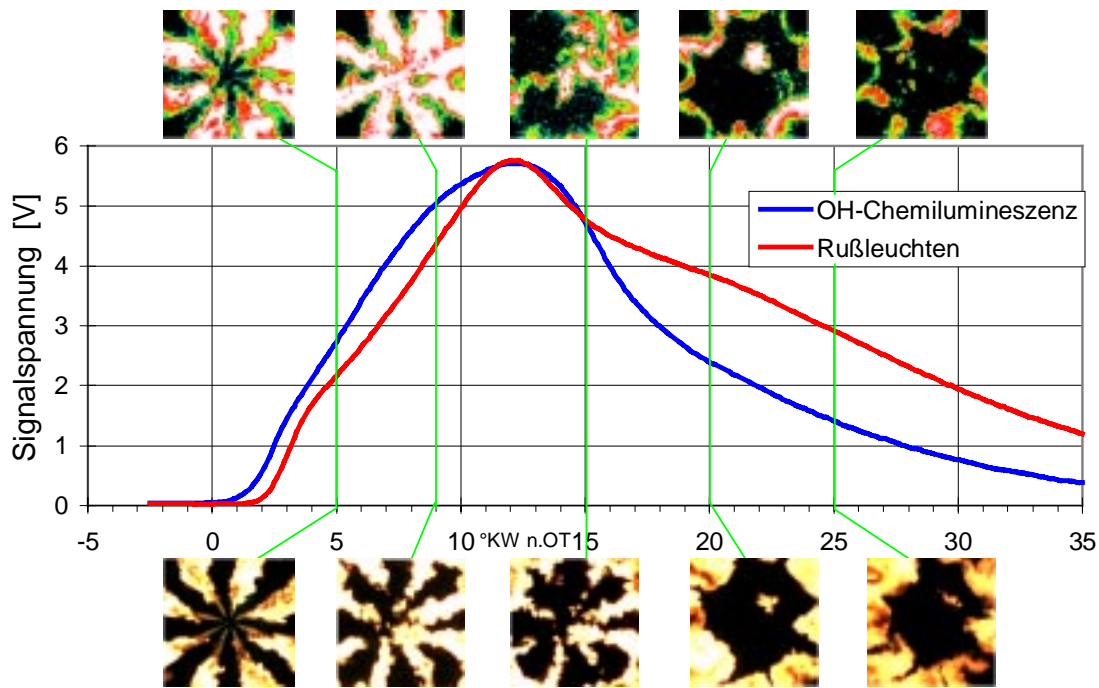


Bild 5.8: Integrale Verläufe für OH und Ruß, ausgewählte Bilder

Diese Messungen bestätigen die Annahme, daß eine intensive Rußnachoxidation an das Vorhandensein von OH-Radikalen geknüpft ist /48/.

In den folgenden Kapiteln wird zu klären sein, ob aus den vergleichenden Messungen eine Abhängigkeit zwischen der Intensität der OH-Radikalbildung zu Beginn der Verbrennung und der Güte der Rußnachoxidation herausgearbeitet werden kann.

- NO

Für die Analyse der Stickoxidbildung werden die Temperaturflächenverläufe der Flammen (Bild 5.9) aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm (Anhang Bild A.15 bis Bild A.17) entsprechend Kapitel „3.2.2 Schadstoffkorrelation“ mit einer entsprechenden Gewichtung versehen, schrittweise addiert und als Verlauf der NO-Bildungskennzahl (Bild 5.10) dargestellt. Dabei

wird deutlich sichtbar, wie bestimmend der Verlauf der Flammenfläche über 2200 K durch seine hohe Gewichtung für die Form der NO-Bildungskurve ist.

Betrachtet man den somit berechneten Verlauf der NO-Bildungskennzahl in Bild 5.10 für den Basis-Betriebspunkt 8LCR_600, so fällt auf, daß der Schwerpunkt der NO-Bildung bei etwa 8° KW n.OT, also am Anfang der Verbrennungs-Hauptphase, liegt.

Aus dem Verlauf wird deutlich, daß die NO-Bildung zwar über den gesamten Verbrennungsablauf stattfindet, daß der Schwerpunkt der thermischen NO-Bildung infolge der hohen Verbrennungstemperaturen in der Vormischflamme jedoch deutlich in der Anfangsphase der Verbrennung liegt. Trotz der Tatsache, daß aufgrund der ausschließlichen Auswertung rußleuchtender Verbrennung ein Teil der heißen vorgemischten Verbrennung bei der NO-Korrelation unberücksichtigt bleibt, stimmt der ermittelte integrale NOK-Wert sehr gut mit der am Einzylinderaggregat gemessenen NO-Emission überein (siehe Bild 3.3).

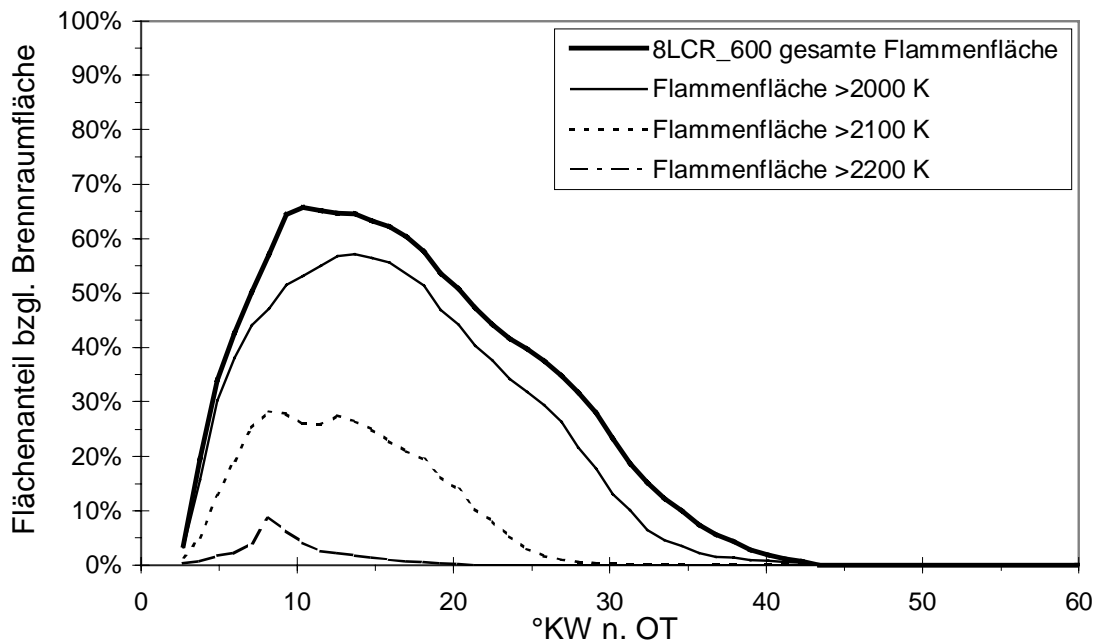


Bild 5.9: Verläufe der Temperaturflächen in der Flamme

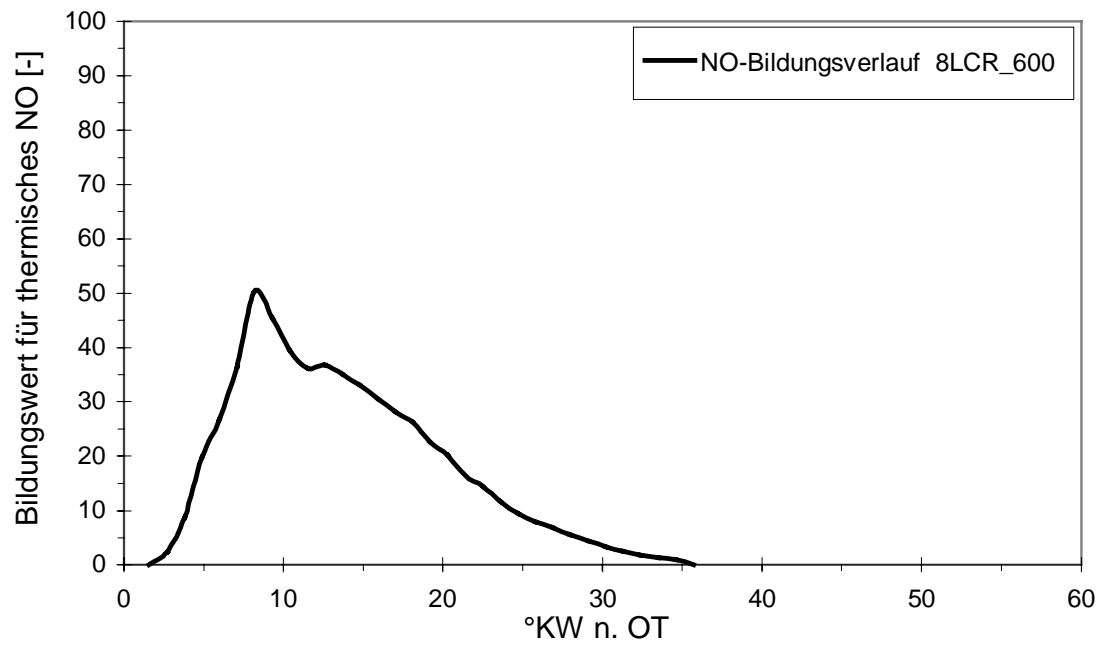


Bild 5.10: Verlauf NO-Bildungskennzahl für thermisches NO

5.2 Variation von Last und Aufladung

Um den Einfluß von Brennraumdruck und -temperatur auf die Verbrennung deutlich zu machen, werden bei gleicher Drehzahl durch Aufladung Ansaugdruck und Ansaugtemperatur geändert. Gleichzeitig wird bei konstantem Einspritzdruck die eingespritzte Kraftstoffmenge und damit die Einspritzdauer variiert. Es werden zwei Vergleiche parallel diskutiert, um eine grundsätzliche Tendenz herauszuarbeiten. Verglichen wird der Betriebspunkt 8LCR_600 mit 8LCR600H, sowie der Betriebspunkt 8LCR12HL mit 8LCR120V. Die Randbedingungen bei Spritzbeginn sind in Tabelle 5.1 kurz aufgeführt, wobei der Spritzbeginn bei den gewählten Betriebspunkten jeweils bei 3° KW v.OT liegt.

Die prozentualen Lastangaben beziehen sich auf die eingespritzte Kraftstoffmenge. Bei erhöhter Last wird gleichzeitig auch der Aufladegrad vergrößert, was sich in den gehobenen Brennraumdrücken und Brennraumtemperaturen bemerkbar macht (siehe Tabelle 5.1). Im Folgenden werden die zu vergleichenden Betriebspunkte vereinfacht nur noch als „Lastpunkte“ oder „Lastfälle“ bezeichnet.

Die mit Stern (*) gekennzeichneten Werte gelten für die Einspritzmengen der Betriebspunkte zur Untersuchung der OH-Chemilumineszenz während des Zündprozesses. Die Zündung findet in einer frühen Phase der Einspritzung statt, so daß eine Verringerung der Einspritzmenge und damit der Einspritzdauer bei den hohen „Lastpunkten“ keinen Einfluß auf den Bereich der Gemischbildung während der Zündverzugsphase und die Zündung selbst hat. Bei diesen Untersuchungen wurden also nur Brennraumdruck und -temperatur dem „Lastfall“ angepaßt.

Betriebspunkt	V_E [mm ³]	Last	Brennraumdruck bei SB	Brennraumtemperatur bei SB
8LCR_600	75	25%	48 bar (absolut)	842 K
8LCR600H	150 / 75*	50%	60 bar (absolut)	857 K
8LCR12HL	150 / 75*	50%	60 bar (absolut)	857 K
8LCR120V	300 / 75*	100%	97 bar (absolut)	880 K

Tabelle 5.1: Betriebspunkte für die Lastvariation

5.2.1 Einspritzung und Gemischbildung

Aufgrund der Anhebung des Gegendruckes im Brennraum wird den eingespritzten Kraftstofftröpfchen bei höherem Aufladegrad (höhere Lastfälle) ein größerer Widerstand entgegengesetzt, was zu einem stärkeren Geschwindigkeitsabbau dieser Tröpfchen führt. Die höhere Gasdichte im Brennraum führt zu einer höheren Konvektion an der Oberfläche der einzelnen Kraftstofftröpfchen, was ebenso wie die Erhöhung der Brennraumtemperatur eine größere Verdampfungsrate bewirkt. Die Tröpfchen dringen somit bei Erhöhung des Aufladegrades langsamer in den Brennraum ein und verdampfen schneller, was eine Verringerung des flüssigen Strahlspitzenweges bewirkt. Die Verringerung der

Eindringgeschwindigkeit durch Erhöhung des Aufladegrades gilt dabei sowohl für die Flüssigphase des Kraftstoffes als auch für seine Dampfphase.

Durch die Erhöhung der Brennraumtemperatur und des Brennraumdruckes verringert sich der Zündverzug, was zu einer kürzeren Aufbereitungszeit zur Bildung eines homogenen Gemischanteils für eine vorgemischte Verbrennung führt. Trotz höherer Verdampfungsrates nimmt deshalb die verdampfte und mit Luft vorgemischte Kraftstoffmasse bei Zündbeginn ab.

5.2.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Eine Bildfolge der OH-Chemilumineszenzen zur Darstellung der Zündung ist für den Lastfall 8LCR600H im Anhang auf Bild A.7 zu sehen. Für den Betriebspunkt 8LCR_600 steht die Bildsequenz in Bild A.4. Der Raildruck beträgt bei beiden Betriebspunkten 600 bar.

Vergleicht man die beiden Betriebspunkte 8LCR_600 und 8LCR600H miteinander, so stellt man fest, daß sich im Abstand der Zündorte von der Düse Unterschiede ergeben. Bedingt durch den höheren Gegendruck treten die Zündorte beim 50% Lastpunkt statistisch gesehen etwas näher an der Düse auf. In Relation zur Länge des flüssigen Strahlspitzenweges, der beim 50% Lastpunkt deutlich geringer ist, befinden sie sich damit im Bereich von ca. 80% der flüssigen Strahllänge. Das statistisch wechselnde Auftreten der Zündzonen in Ort und Anzahl ist bei beiden Betriebspunkten gegeben. Die Wahrscheinlichkeit, daß zwischen den Strahlen erhöhte OH-Chemilumineszenz auftritt, ist beim 50% Lastpunkt noch höher als beim 25% Lastpunkt. Insgesamt sind beim 50% Lastpunkt weniger Zündorte zu erwarten. Die Intensitätsunterschiede zwischen den einzelnen Zündorten einer Aufnahme sind beim 50% Lastpunkt minimal geringer. Mit der Voraussetzung, daß beim 50% Lastpunkt die Zündung auf engerem Raum stattfindet, ergibt sich ein beschleunigtes Zusammenwachsen der einzelnen kleinen Zündorte zu größeren Zündzonen. Aufgrund dieser Zündzonenkonzentration und des erhöhten Sauerstoffangebotes aufgrund des höheren Brennraumdruckes geht der Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeit und der damit verbundene schnelle Umsatz des vorgemischten Bereiches etwas zügiger vonstatten als beim 25% Lastpunkt. Daher ist am Ende der Bilderserie beim 50% Lastpunkt eine höhere Gesamt-OH-Chemilumineszenz zu erkennen. Dort wird auch deutlich, daß die Reaktionszonen alle Strahlen erfaßt haben und sich in nächster Nähe der Düse formieren, bevor sie sich im weiteren (nicht dargestellten) Verlauf der Verbrennung stetig in Richtung der einzelnen Strahlachsen ausbreiten. Orte mit erster meßbarer OH-Chemilumineszenz treten als Folge der höheren thermodynamischen Gastemperatur und damit erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit beim 50% Lastpunkt grundsätzlich früher auf als beim 25% Lastfall. Bei den gewählten Beispielen ergab sich eine Differenz im Zündbeginn von 120 µs, was bei der verwendeten Drehzahl 0,8° KW entspricht. Die Zeit vom Einspritzbeginn bis zur ersten OH-chemilumineszenten Reaktion, und damit der Zündverzug, nimmt durch Verringerung der Aufladung vom 50% Lastfall zum 25% Lastfall um etwa 25% zu.

Vergleicht man die integralen Verläufe der OH-Chemilumineszenz und des Rußleuchtens, so ist zusätzlich zu den bereits besprochenen Differenzen beim 25% Lastpunkt eine geringfügige Vergrößerung des Abstandes zwischen dem Auftreten erster OH-Chemilumineszenz und

erstem Rußleuchten zu erkennen (Bild 5.11). Aufgrund der geänderten thermodynamischen Randbedingungen beim 25% Lastpunkt sind also nicht nur die Reaktionsgeschwindigkeiten zur OH-Bildung niedriger, auch die Rußbildung läuft verlangsamt ab.

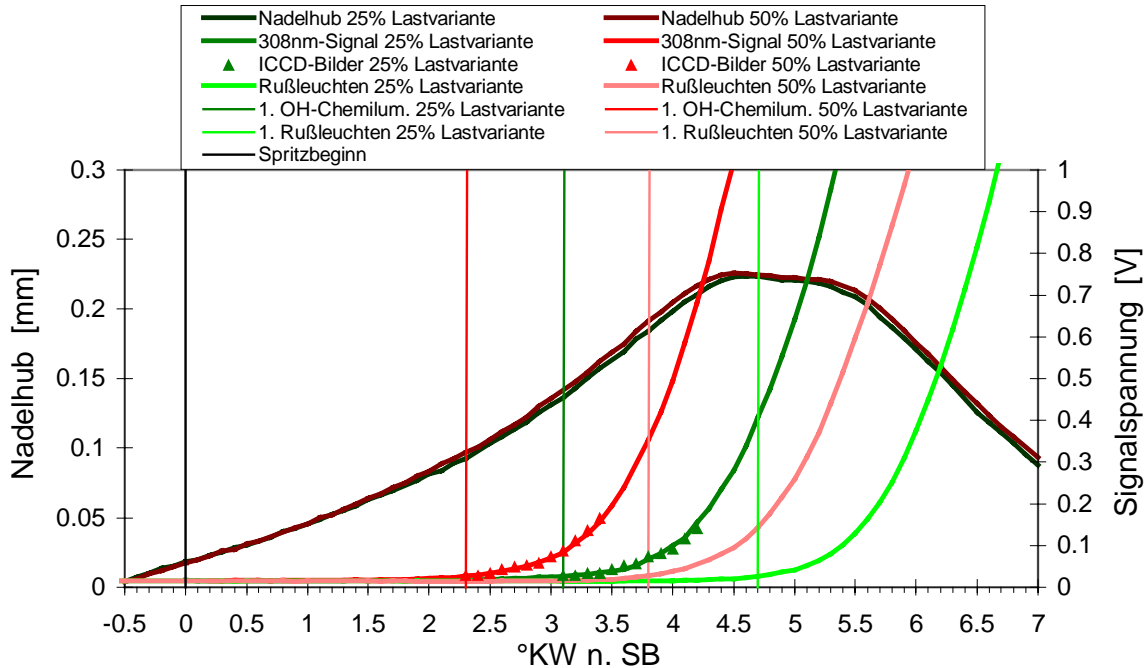


Bild 5.11: Integrale Intensitätsverläufe Last- und Aufladeveriation, 600 bar Raildruck

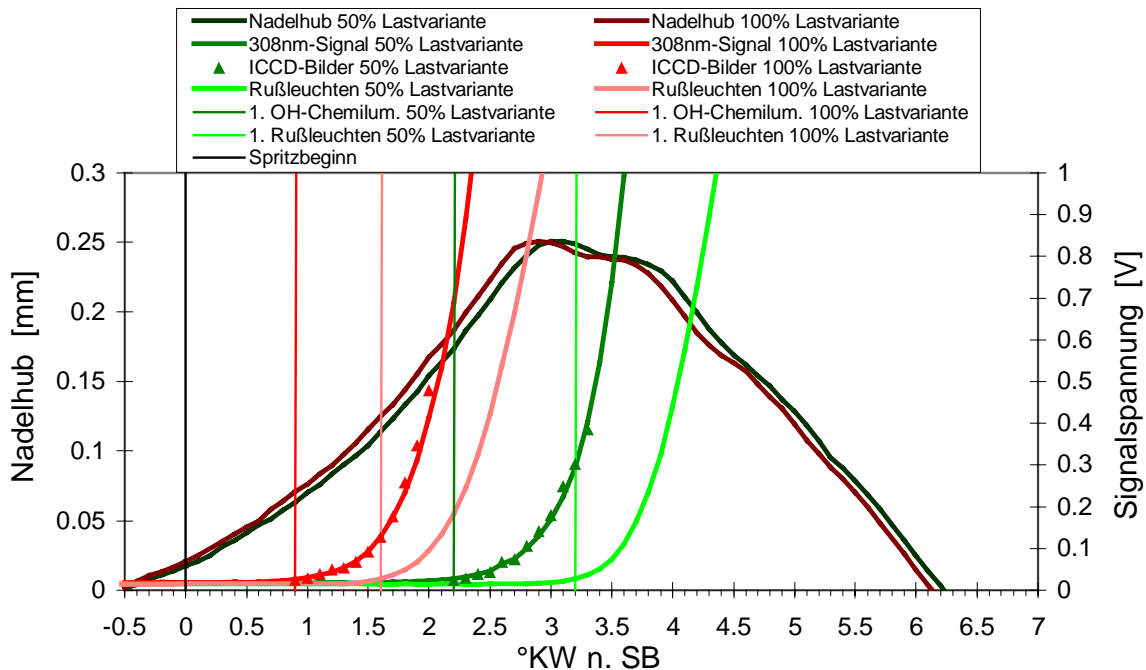


Bild 5.12: Integrale Intensitätsverläufe Last- und Aufladeveriation, 1200 bar Raildruck

Eine weiterer Vergleich wurde zwischen dem 50% Lastpunkt und dem 100% Lastpunkt mit einem Raildruck von 1200 bar durchgeführt. Der integrale Vergleich zwischen diesen beiden Punkten ist in Bild 5.12 dargestellt. Der steiler verlaufende Nadelhub ist für einen hohen Raildruck typisch. Die bei den beiden anderen Lastpunkten getroffenen Aussagen lassen sich

zum Teil auch hier treffen. Die Erhöhung der Aufladung vom 50% Lastfall zum 100% Lastfall bewirkt hier eine Verkürzung des Zündverzuges um etwa 50%. Die Steigung der integralen OH-Chemilumineszenz ist zwar anfänglich nahezu gleich, steigt jedoch beim 50% Lastpunkt zunehmend stärker an. Die Gründe hierfür liegen in der deutlich verlängerten Zündverzugsphase, in der durch den hohen Raildruck eine wesentlich höhere Kraftstoffmenge in den Brennraum gelangt und bereits verdampft ist. Beim 100% Lastpunkt befindet sich aufgrund der kürzeren Zündverzugszeit und des relativ geringen Nadelhubes zum Zeitpunkt des Zündbeginns beim Auftreten erster Zündzonen eine wesentlich geringere Kraftstoffmenge im Brennraum als beim 50% Lastpunkt. Die Reaktionsgeschwindigkeiten sind beim 100% Lastpunkt höher, und somit ist der zeitliche Abstand zwischen dem ersten Auftreten von OH-Chemilumineszenz und erstem Rußleuchten etwa 25% geringer als beim 50% Lastpunkt.

Vergleicht man die Bilderfolgen der beiden Betriebspunkte miteinander (Anhang: Bild A.10 und Bild A.12), so kann man gut erkennen, daß beim Betriebspunkt 8LCR120V erste Zündzonen bereits ganz kurze Zeit nach Einspritzbeginn (135 μ s) auftreten. Infolge des Gegendruckes von etwa 97 bar verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit deutlich. Entsprechend näher an der Düse sind denn auch die Zündorte zu finden. In diesem relativ engen Bereich entstehen schnell an allen Strahlen Zündzonen, die eng aneinander liegend sich bald nur noch in Richtung der jeweiligen Spitze der flüssigen Einspritzstrahlen ausdehnen können. Beim Lastpunkt 8LCR12HL sind die Zündorte weit verstreut über nahezu den ganzen vom flüssigen Strahlspitzenweg vorgegebenen Umkreis zu erkennen. Infolge des hohen Einspritzdruckes bei relativ geringem Gegendruck im Brennraum treten Zündzonen auch in einer Entfernung von bis zu 25 mm von der Düse auf. Deutlich sichtbar ist die enorme Reaktivität der einzelnen Zündzonen. Innerhalb kürzester Zeit herrscht innerhalb dieser Zonen eine sehr hohe OH-Konzentration vor. Dabei kann der Unterschied zwischen den einzelnen Reaktionszonen wiederum beträchtlich sein. Die vorgemischte Verbrennung findet beim 50% Lastpunkt auf einem volumenmäßig weit größeren Areal statt, wobei davon auszugehen ist, daß trotz geringeren Sauerstoffpartialdruckes beim 50% Lastpunkt eine insgesamt höhere Sauerstoffmasse an dieser anfänglichen Verbrennung teilnimmt. Aufgrund dieser Tatsache und dem Zustand des höheren zu diesem Zeitpunkt eingespritzten Kraftstoffanteils ist die Umsatzrate in der Vormischflamme beim 50% Lastpunkt etwas höher als beim 100% Lastpunkt, was im folgenden Kapitel mit der Heizverlaufsanalyse bestätigt wird.

5.2.3 Diffusionsverbrennung

Zur Analyse der Diffusionsverbrennung sind in Bild 5.13 die Heizverläufe für die Betriebspunkte der Lastvariation dargestellt.

Betrachtet man sich die beiden Lastvarianten mit dem Einspritzdruck von 1200 bar, so ist zu erkennen, daß der vorgemischte Anteil beim 50% Lastpunkt größer ist als beim 100% Lastpunkt. Dementsprechend ist dort auch die Verbrennung härter. Beim 50% Lastpunkt mit 1200 bar Raildruck ist die Verbrennung sogar so hart, daß der durchbrennende vorgemischte Anteil Druckschwankungen im weiteren Zylinderdruckverlauf hervorruft (Anhang, Bild A.19, Kurve 8LCR12HL), wodurch auch Schwankungen im Heizverlauf entstehen. Der maximale

Kraftstoffumsatz befindet sich beim 100% Lastpunkt deutlich im Bereich der Hauptphase der Verbrennung, während beim 50% Lastpunkt die beiden Maxima in der Vormischverbrennung und in der Diffusionsverbrennung beinahe gleich hoch sind. Dabei darf man nicht vergessen, daß die eingespritzte Kraftstoffmenge bei höherer Last entsprechend steigt. Infolgedessen kann man bei den Heizverläufen der Lastvariation nur den Anteil der vorgemischten Verbrennung direkt miteinander vergleichen, da in dieser Phase bei beiden Lastvarianten die Einspritzung noch andauert.

Auch bei den Lastvarianten mit dem Einspritzdruck von 600 bar läßt sich die Aussage treffen, daß mit Erhöhung des Aufladegrades der vorgemischte Anteil im Brennraum sinkt. Als Grund dafür können auch hier wiederum die durch Druck- und Temperaturerhöhung erheblich besseren Zündbedingungen im Brennraum genannt werden, die den Zündverzug und damit die verfügbare Zeit für Einspritzung und Gemischbildung bis zur Zündung drastisch verkürzen.

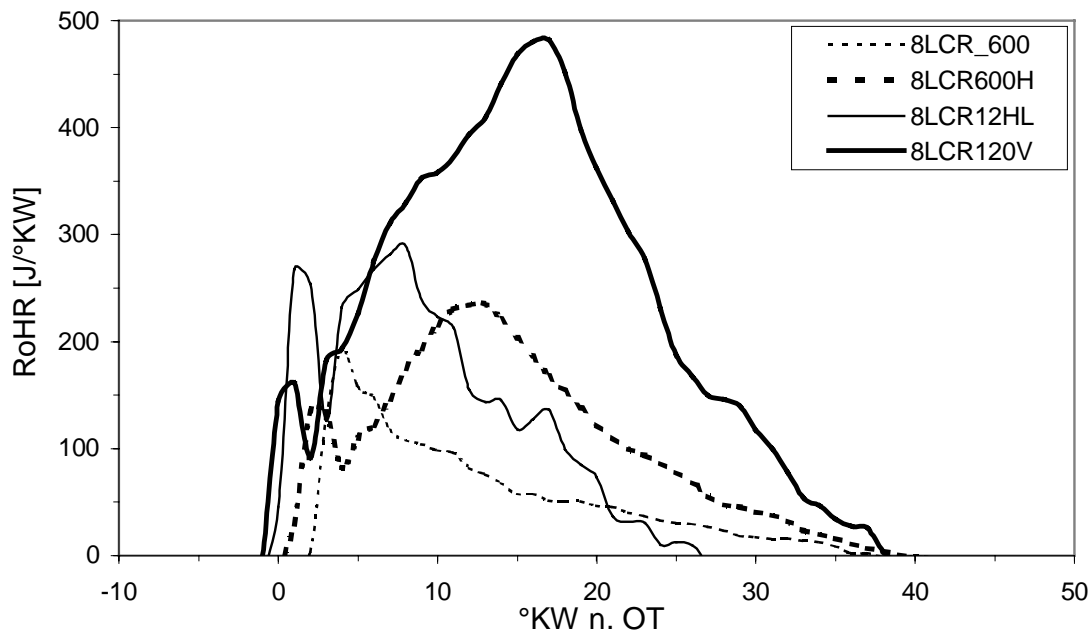


Bild 5.13: Heizverläufe, Last- und Aufladeveriation

Interessant ist, daß bei der Lastvariation mit 600 bar Raildruck die Dauer der Verbrennung laut Heizverlauf etwa gleich lang ist, obwohl die eingespritzte Kraftstoffmenge bei Halblast (8LCR600H) genau doppelt so groß ist. Bei der Lastvariation mit 1200 bar Raildruck ist die Verbrennung der niedrigen Lastvariante im Gegensatz dazu deutlich früher zu Ende als bei der 100% Lastvariante. Bei der visuellen Analyse der Verbrennungsfilme wird deutlich, daß bei der 25% Lastvariante mit dem niedrigen Einspritzdruck von 600 bar eine relativ schlechte Luftausnutzung während der Verbrennung stattfindet. Infolge der kurzen Einspritzdauer mit niedrigem Impuls bildet sich am Muldenrand eine ringförmige Verbrennungszone mit geringer Ladungsbewegung aus, in der die Rußnachoxidation nur schleppend ablaufen kann. Beim 50% Lastpunkt mit 600 bar Einspritzdruck werden die brennenden Zonen durch den länger anhaltenden Einspritzimpuls am Muldenrand umgelenkt und zur Brennraummitte

zurückgedrängt. Die daraus resultierende bessere Luftausnutzung führt mit den besseren Brennbedingungen (höherer Druck, höhere Temperatur) zu einer schnelleren Verbrennung.

Bei den Lastvarianten mit dem hohem Einspritzdruck von 1200 bar ist in beiden Fällen durch den hohen Einspritzdruck eine gute Durchmischung des eingespritzten Kraftstoffes mit der vorhandenen Verbrennungsluft gewährleistet, weshalb die Brenndauer beim Lastfall mit der geringeren Einspritzmenge (8LCR12HL) auch entsprechend kürzer ist.

Betrachtet man sich die integralen Verläufe der entstehenden Rußtemperaturen in Bild 5.14, so erkennt man, daß bei den höheren Lastfällen zu Beginn der Diffusionsverbrennung eine höhere mittlere Rußtemperatur herrscht. Durch die konstante Einspritzrate steigt bei diesen gleichzeitig die Einspritzdauer an. Das bedeutet, daß bei höherer Last und Aufladung eine länger anhaltende Temperaturabnahme zu beobachten ist, was bei beiden Vergleichen zu einer Überschneidung der Rußtemperaturkurven führt.

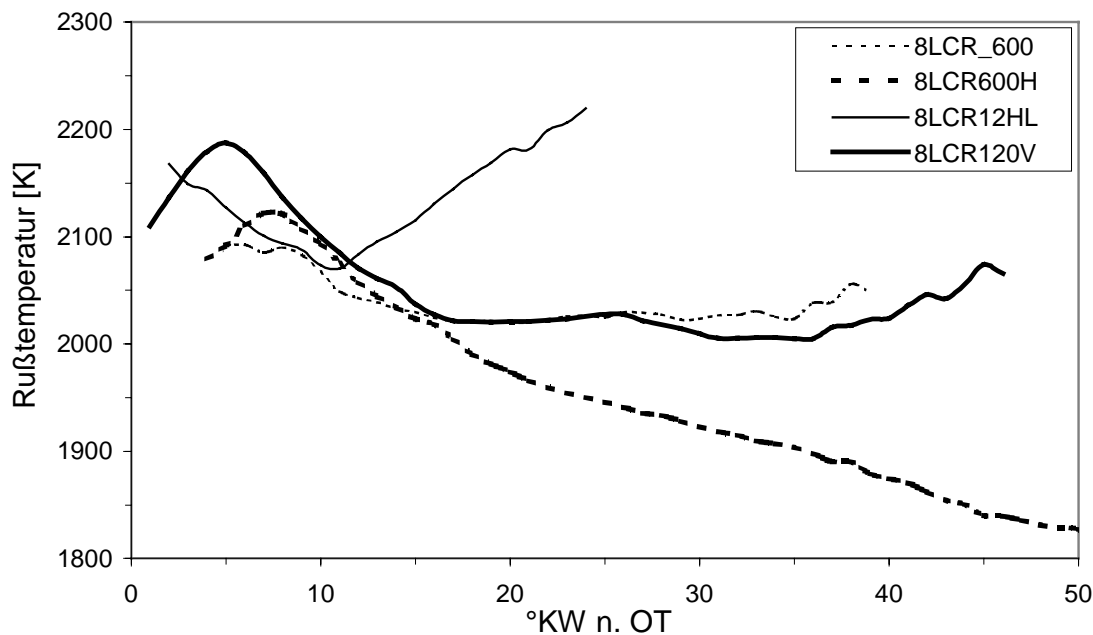


Bild 5.14: Integrale Rußtemperaturverläufe, Last- und Aufladeariation

Ebenso ist für beide Vergleiche charakteristisch, daß bei der höheren Lastvariante der sich nach Einspritzende einstellende Temperaturverlauf jeweils eine geringere Steigung aufweist. Bei 600 bar Raildruck ist ab diesem Zeitpunkt bei der 25% Lastvariante eine nahezu gleichbleibende integrale Rußtemperatur zu beobachten, während bei der 50% Lastvariante die Rußtemperatur konstant abnimmt. Bei 1200 bar Raildruck steigt die Rußtemperatur nach Spritzende bei der 50% Lastvariante deutlich an, während bei der 100% Lastvariante ein gleichbleibender Temperaturverlauf zu beobachten ist.

Dies hängt zum Teil mit dem etwas fetteren Gesamt-Luft-Kraftstoff-Verhältnis bei den höheren Lastfällen zusammen, da trotz Aufladung verhältnismäßig mehr Kraftstoff als zusätzliche Verbrennungsluft in den Brennraum eingebracht wird. Auf dem Verbrennungsfilm kann man erkennen, daß gegen Ende der Verbrennung bei den hohen Lastfällen stark rußende Zonen übrigbleiben, bei denen die notwendige Durchmischung mit der Verbrennungsluft für eine

vollständige Oxidation aufgrund mangelnder Turbulenz und geringerem überschüssigen Sauerstoffanteil ausbleibt. Zudem liegt durch den gleichen Spritzbeginn und der jeweils identischen Einspritzrate bei den höheren Lastfällen das Einspritzende bei späteren Zeitpunkten nach ZOT. Dadurch bleibt infolge der zunehmenden Abwärtsbewegung des Kolbens thermodynamisch gesehen weniger Zeit für die Rußnachoxidation, da während der Oxidation die thermodynamische Gastemperatur infolge der Volumenvergrößerung des Brennraumes schneller abnimmt und die Grenztemperatur für das Ende der Rußnachoxidation schneller erreicht wird. Allgemein gilt, daß der Rußtemperaturanstieg in Bild 5.14 umso größer ist, je stärker die Rußkonzentrationskurven in Bild 5.16 während der Rußnachoxidation abfallen.

5.2.4 Schadstoffe

Die über die Temperaturkorrelation ermittelten NO-Bildungskurven in Bild 5.15 machen deutlich, daß der Schwerpunkt der NO-Bildung am Anfang der Verbrennung liegt, also dort, wo durch die sehr heiße Vormischflamme hohe Flammentemperaturen herrschen.

Bei der Last- und Aufladevariation läßt sich feststellen, daß mit einer Vergrößerung des vorgemischten Anteils (niedrige Lastpunkte) der maximale NOK-Wert nach Beginn der rußleuchtenden Verbrennung zunimmt. Bedingt durch die zu Anfang höheren Flammentemperaturen in der Diffusionsflamme bei hoher Last und dadurch erhöhter Produktion von thermischem NO übersteigt der NOK-Wert der hohen Lastvarianten kurze Zeit später den der jeweils niedrigeren Lastvariante. Im weiteren Verlauf der Verbrennung macht sich dann die eingespritzte Kraftstoffmenge bemerkbar: Bei den höheren Lasten wird bis zum Ende der Verbrennung jeweils mehr und länger thermisches NO gebildet, was auch aus den Abgasmessungen am Einzylinderaggregat hervorgeht /67/.

Da die Berechnung der NO-Bildungskennzahl die nach Temperaturbereichen geordneten Flammenflächen der Bilder der Hochgeschwindigkeitsfilme zur Grundlage hat, ist die jeweilige Größe und die Zusammenstellung der einzelnen Rußtemperaturflächen von entscheidender Bedeutung. Beim Vergleich mit 1200 bar Raildruck ist beim 50% Lastpunkt auf dem Film zu erkennen, daß sich die sehr heiße Verbrennung nach Einspritzende in einer relativ schmalen ringförmigen Randzone der Brennraummulde und des Quetschspaltes abspielt. Aus dieser mittelgroßen, sehr heißen Fläche errechnet sich über die Lichtleiterdaten eine hohe mittlere Rußtemperatur (Bild 5.14, ab ca. 13°KW n.OT). Der aus den Filmbildern ermittelte NOK-Wert jedoch, der zusätzlich die Größe der leuchtenden Flächen bezüglich der gesamten Brennraumfläche berücksichtigt, fällt dabei geringer aus (Bild 5.15). Die Verbrennung findet beim 100% Lastpunkt hingegen in sehr unterschiedlichen Temperatur-bereichen, dafür jedoch in der gesamten sichtbaren Brennraumbene statt. Damit liegt beim 100% Lastpunkt der Maximalwert der Bildungskennzahl fast genau so hoch wie beim 50% Lastpunkt, während seine integral gemittelte Rußtemperatur wesentlich niedriger ausfällt.

In Bild 5.16 sind die Verläufe der spezifischen Rußkonzentrationen für die Last- und Aufladevariationen dargestellt. Man kann erkennen, daß bei niedrigerer Aufladung zu Beginn die Rußbildung deutlich stärker als bei höherer Aufladung ist. Durch das frühere Einspritzende steigt die Rußkonzentration bei den niedrigeren Lastfällen jedoch auf geringere Werte an. Ab

dem Zeitpunkt der reinen Rußnachoxidation nach Spritzende ist der Unterschied in der Effektivität des Rußausbrandes bei den jeweils miteinander verglichenen Lastpunkten nicht sehr groß. Die etwas bessere Rußnachoxidation haben dabei jeweils die beiden niedrigeren Lastpunkte.

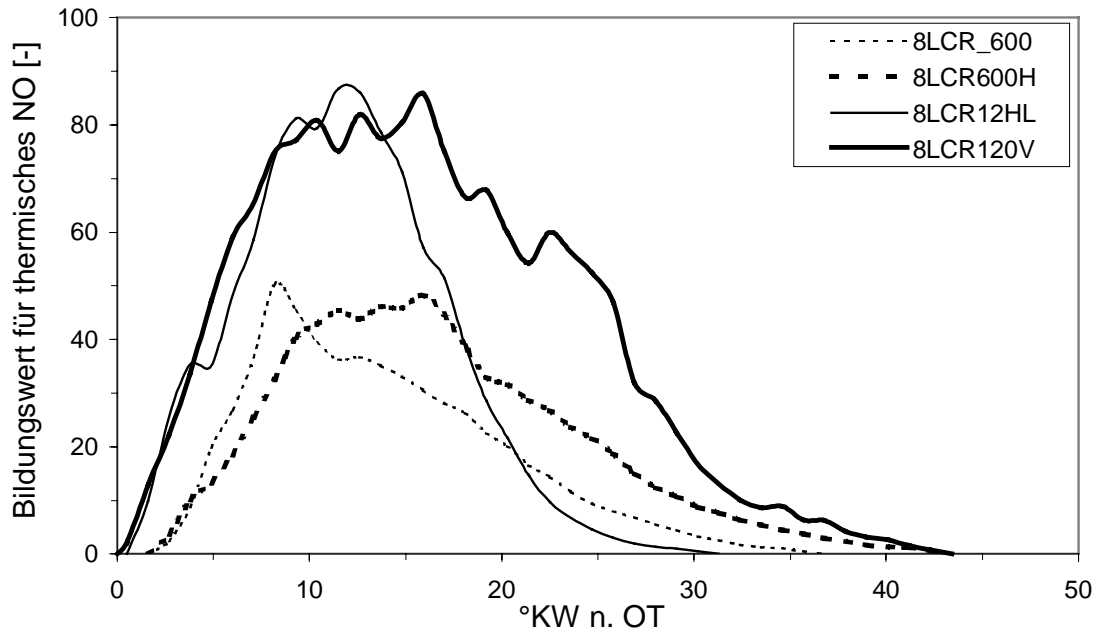


Bild 5.15: Verläufe der NO-Bildungskennzahlen für thermisches NO, Lastvariation

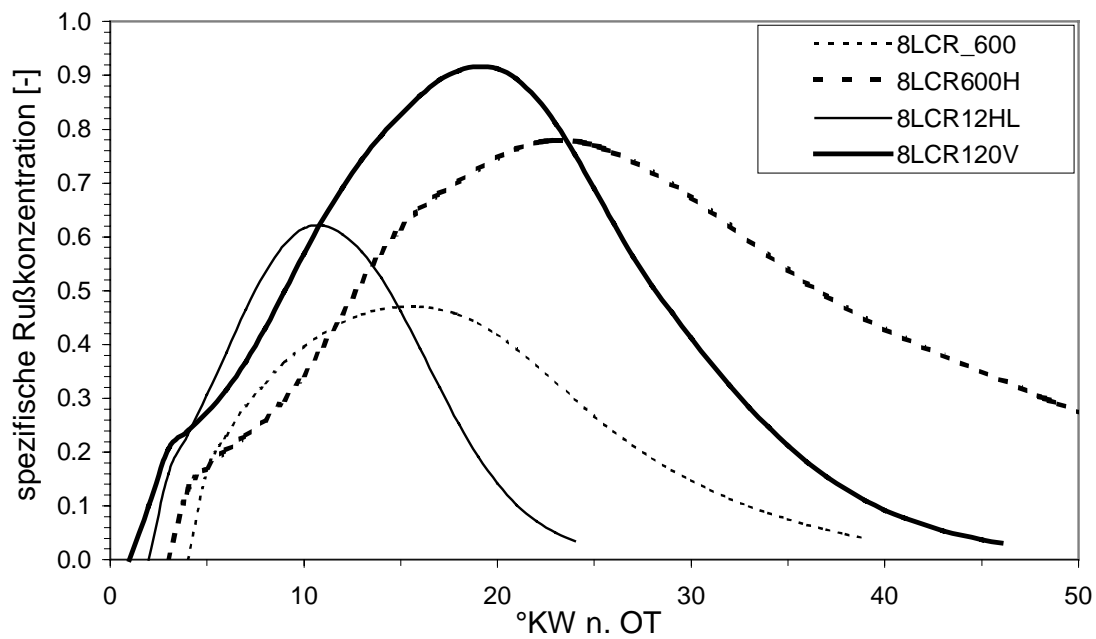


Bild 5.16: Integrale Rußkonzentrationsverläufe, Lastvariation

5.3 Spritzbeginnvariation

Eine weitere Betriebspunktvariante, um den Einfluß von Brennraumdruck und -temperatur auf die Verbrennung deutlich zu machen, ist die Spritzbeginnvariation. Dazu wurden zwei Betriebspunkte mit einer Last von 25% verwendet, die einen für diesen Lastfall extrem hohen Einspritzdruck von 1000 bar besitzen, um die Unterschiede im Verbrennungsablauf zu verdeutlichen. Die Bedingungen bei Spritzbeginn sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Bei der Spritzbeginnvariation in der Nähe des oberen Totpunktes bleibt dabei der Druck bei Spritzbeginn etwa gleich, im Laufe der Einspritzung fällt er bei 8LCR1000 um etwa 1 bar und bei 8LCR100N um ca. 5 bar ab. Die Temperatur fällt während der Zündverzugszeit bei beiden Betriebspunkten, bei 8LCR1000 um etwa 20 K und beim Betriebspunkt 8LCR100N um 42 K. Die Druckänderung fällt im Vergleich zur Variation der Aufladung sehr moderat aus, wohingegen durch die deutliche Temperaturänderung eine entsprechende Abnahme an Reaktionsgeschwindigkeit zu erwarten ist.

Folglich ist diese Parameterstudie, zumindest was den Beginn der Verbrennung betrifft, im wesentlichen eine Untersuchung des Einflusses der Brennraumtemperatur auf die Verbrennung.

Betriebspunkt	Spritzbeginn	Brennraumdruck (absolut)	Brennraumtemperatur
8LCR1000	3° v. OT	48 bar bei SB, 47 bar bei ZB	842 K bei SB, 822 K bei ZB
8LCR100N	3° n. OT	46 bar bei SB, 41 bar bei ZB	814 K bei SB, 772 K bei ZB

Tabelle 5.2: Betriebspunkte für die Spritzbeginnvariation

5.3.1 Einspritzung und Gemischbildung

Der etwas höhere Gegendruck im Brennraum ist bei der frühen Spritzbeginnvariante in Kombination mit der höheren Brennraumtemperatur dafür verantwortlich, daß bei frühem Spritzbeginn der Strahlspitzenweg etwa 10% geringer ausfällt als bei der späten Variante. Der vorgemischte Kraftstoffanteil zum Zeitpunkt der Zündung ist bei beiden untersuchten Betriebspunkten jeweils relativ hoch. Aufgrund der geringen Einspritzmenge und des hohen Einspritzdruckes wurde bis zur Zündung bereits ein großer Anteil des Kraftstoffes in den Brennraum eingespritzt. Beim späten Spritzbeginn ist vor dem ersten Rußleuchten bereits das Einspritzende erreicht.

5.3.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Eine Bilderfolge zur Darstellung der Zündung ist für den Betriebspunkt 8LCR1000 im Anhang auf Bild A.8 zu sehen. Für den Betriebspunkt 8LCR100N steht die Bildsequenz in Bild A.9. Bei beiden Varianten beträgt der Raildruck 1000 bar.

Beim Vergleich der Bilderserien für die Spritzbeginnvarianten fällt auf, daß Zündorte in einem sehr weiten Bereich von der Düse weg im Bereich der Einspritzstrahlen entstehen können. Das Gros der Zündorte tritt jedoch in beiden Fällen in einem Bereich von etwa 25 mm Abstand von der Düse auf. Die flüssige Strahllänge ist dabei durch den hohen Einspritzdruck und den geringen Gegendruck ebenfalls sehr hoch. Die niedrige Gastemperatur zu Anfang der

chemischen Reaktionen und die Herabsetzung der Umgebungstemperatur während der vorgemischten Verbrennung sorgen allgemein für einen verlangsamten Umsatz des Kraftstoffes. Deutlich erkennbar ist der verzögerte Umsatz in den Reaktionszonen durch den schleppenden Anstieg der OH-Chemilumineszenz bei der späten Variante, bei der durch die zunehmende Expansion eine beschleunigte Abnahme der Gastemperatur auftritt. Ebenso ist dort das Anwachsen der Zündkerne zu größeren Zündzonen sehr verlangsamt und das Zusammenwachsen benachbarter Zündorte durch die weitläufige Verteilung statistisch noch unwahrscheinlicher als bei der frühen Variante. Die Intensitätsunterschiede zwischen den einzelnen Zündzonen können bei beiden Varianten sehr groß sein. Zu späteren Zeitpunkten formieren sich die Zündorte bei der frühen Variante in einem Abstand von etwa 15-20 mm von der Düse, wohingegen der Schwerpunkt der OH-Chemilumineszenz beim späten Spritzbeginn eher bei 20-25 mm liegt.

Analysiert man die integralen Verläufe der beiden Varianten, so fällt auf, daß die Spritzbeginnverschiebung um 6° Kurbelwinkel nach spät eine deutliche Verlängerung des Zündverzuges von etwa 50% zur Folge hat (Bild 5.17).

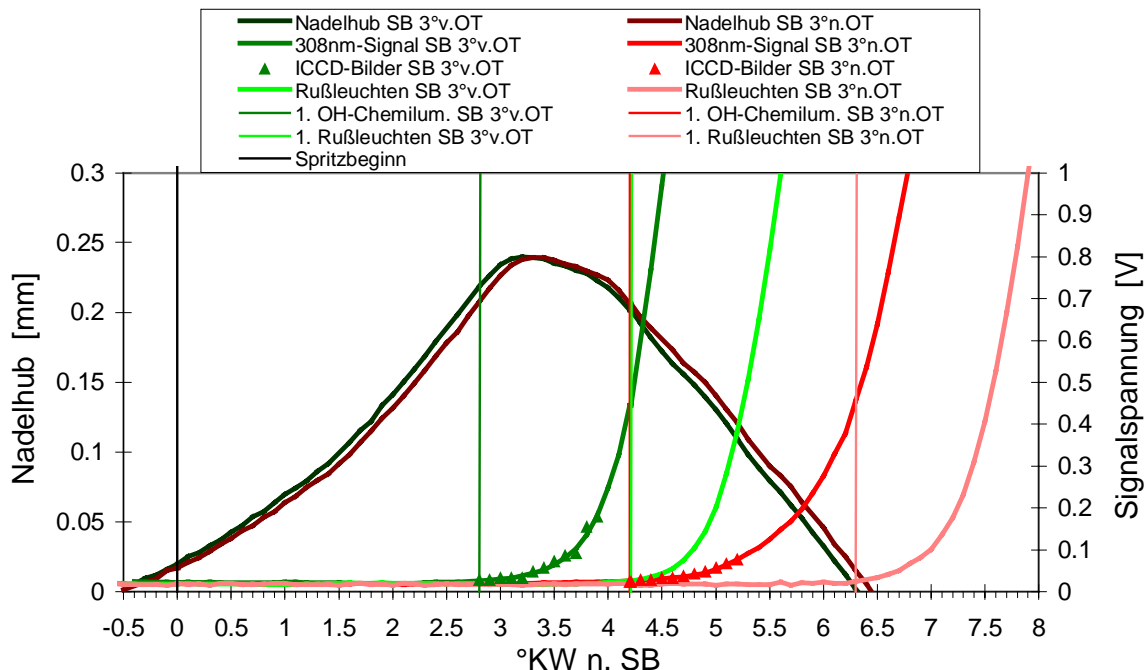


Bild 5.17: Integrale Intensitätsverläufe Spritzbeginnvariation, 25% Lastpunkt

Durch die Spritzbeginnverschiebung nach spät wird außerdem der Abstand zwischen Zündbeginn und erstem Rußleuchten um ca. 50% deutlich vergrößert. Im weiteren Verlauf der Intensitäten für OH-Chemilumineszenz und Rußleuchten wird dieser Abstand jedoch aufgrund des stark verzögerten Umsatzes des vorgemischten Anteils geringer. Die Unterschiede in der maximalen Steigung der Kurven für die OH-Chemilumineszenz sind bei beiden Varianten relativ groß, und die Umsatzspitze für die Bildung von OH-Radikalen liegt bei der späten Variante bezüglich des Zündbeginns sehr spät.

Die Weiterreaktion bis zum Auftreten des ersten Rußleuchten läuft bei der späten Spritzbeginnvariante so verzögert ab, daß vor Beginn der Rußbildung bereits der gesamte

Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt wurde. In Verbindung mit einem hohen Einspritzdruck und einer daraus resultierenden guten Gemischbildung befindet sich bei diesem Betriebspunkt der größte Anteil des Kraftstoffes in einem verdampften und vorgemischten Zustand, der zwar anfangs sehr langsam, gegen Ende jedoch sehr heftig reagiert. Dieses Durchbrennen des vorgemischten Kraftstoffes erzeugt starke Druckschwankungen im Brennraum, die denen bei der klopfenden Verbrennung im Ottomotor ähnlich sind /23/.

5.3.3 Diffusionsverbrennung

In Bild 5.18 sind für die beiden Betriebspunkte der Spritzbeginnvariation sowohl die Zylinderdrücke als auch die Heizverläufe dargestellt.

Man erkennt durch das erste Maximum im Heizverlauf deutlich, daß bei beiden Varianten der vorgemischte Anteil bei Zündbeginn sehr groß sein muß. Diese erste Spitze im Heizverlauf ist dabei so ausgeprägt, daß sie für etwa die Hälfte des Kraftstoffumsatzes steht, wobei die vorgemischte Verbrennung bei der späten Variante noch ausgeprägter ist.

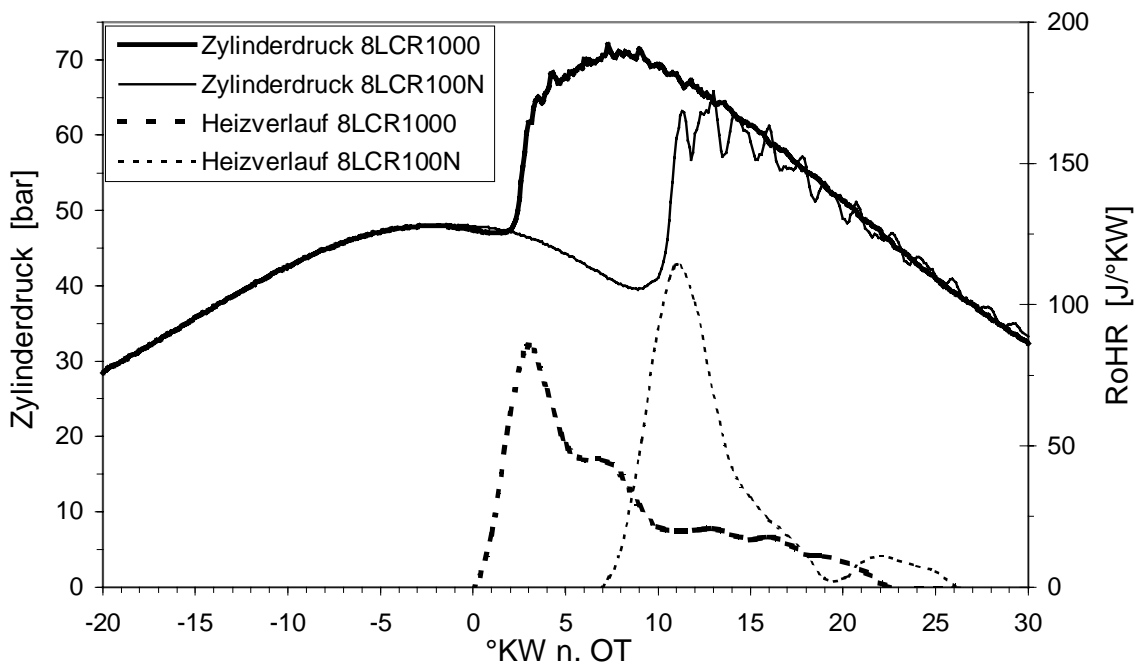


Bild 5.18: Zylinderdrücke und Heizverläufe, Spritzbeginnvariation

Betrachtet man dazu den Hochgeschwindigkeitsfilm, so erkennt man, daß bei der späten Spritzbeginnvariante bereits vor dem ersten Auftreten rußleuchtender Verbrennung die Einspritzung zu Ende ist. Die während der Verbrennung im Zylinderdruckverlauf auftretenden Druckschwankungen werden dabei auch im Verbrennungsfilm sichtbar. Im Film drückt sich diese Druckschwankung als ein Versatz der gesamten Flammenzone im Brennraum von Bild zu Bild aus.

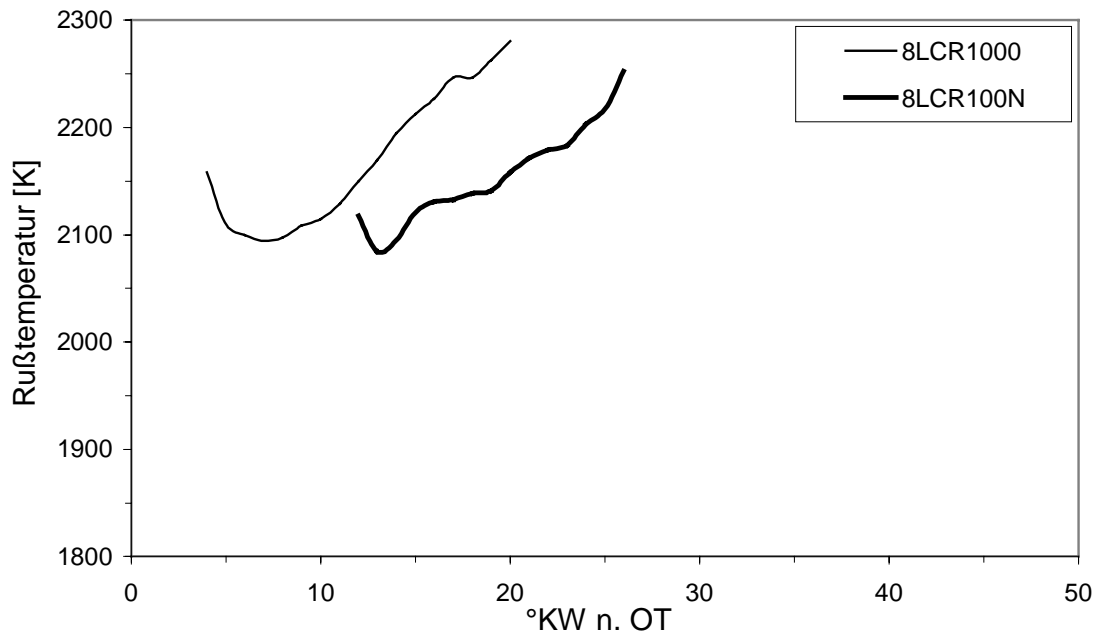


Bild 5.19: Integrale Rußtemperaturverläufe, Spritzbeginnvariation

Die infolge des hohen vorgemischten Anteils bei beiden Spritzbeginnvarianten harte Verbrennung läuft konsequenterweise bei hohen Temperaturen ab. Besonders deutlich ist der in Bild 5.19 zu sehr hohen Verbrennungstemperaturen führende Temperaturanstieg nach Einspritzende, der mit dem hohen Einspritzdruck und der niedrigen Last zusammenhängt.

Interessanterweise ist die Temperatur bei der späten Variante trotz der schlechteren thermodynamischen Randbedingungen im Brennraum nicht niedriger. Dies hängt vermutlich mit einem höheren Vormischanteil zusammen, der durch seine höhere Flammentemperatur gegenüber der Diffusionsverbrennung die thermodynamische Gastemperatur und die mittlere Rußtemperatur anhebt.

Für genauere Aussagen muß das genannte Phänomen noch detaillierter untersucht werden.

5.3.4 Schadstoffe

Die in Bild 5.20 dargestellten NO-Bildungskennzahlverläufe machen deutlich, daß bei der späten Spritzbeginnvariante die thermische NO-Bildung scheinbar deutlich weniger ausgeprägt ist.

Diese Differenz, die sich nicht aus dem integralen Rußtemperaturverlauf ableiten läßt, ergibt sich aus der in Kapitel „5.1.5 Schadstoffe“ beschriebenen Tatsache, daß zur NO-Korrelation ausschließlich die aus der rußleuchtenden Verbrennung ermittelten Temperaturen verwendet werden. Im Bereich der heißen Vormischflamme, in der die Intensität des Rußleuchtens für eine Auswertung noch nicht ausreichend hoch ist, wird jedoch bereits thermisches NO gebildet. Durch die verzögerte Rußbildung bei der späten Spritzbeginnvariante fällt somit ein noch größerer Bereich aus der NO-Korrelation heraus, was den NOK-Wert im Ergebnis etwas verfälscht. Tendenziell nimmt jedoch bei der Spritzbeginnverschiebung nach spät die Bildung von thermischem NO und damit die NO-Emission im Abgas tatsächlich ab /67/.

Betrachtet man sich die Rußkonzentrationsverläufe für beide Spritzbeginnvarianten in Bild 5.21, so stellt man fest, daß infolge des hohen vorgemischten Anteils die Rußbildung insgesamt nicht sehr stark ausgeprägt ist, und mit der Spätverstellung sogar noch abnimmt. Gleichzeitig nimmt jedoch mit der Spritzbeginnverstellung nach spät auch die Güte der Rußnachoxidation am Ende der Verbrennung deutlich ab, was durch den flacheren Abfall der Rußkonzentrationskurve sichtbar wird, und wodurch sich die Rußmasse im Abgas erhöht /67/.

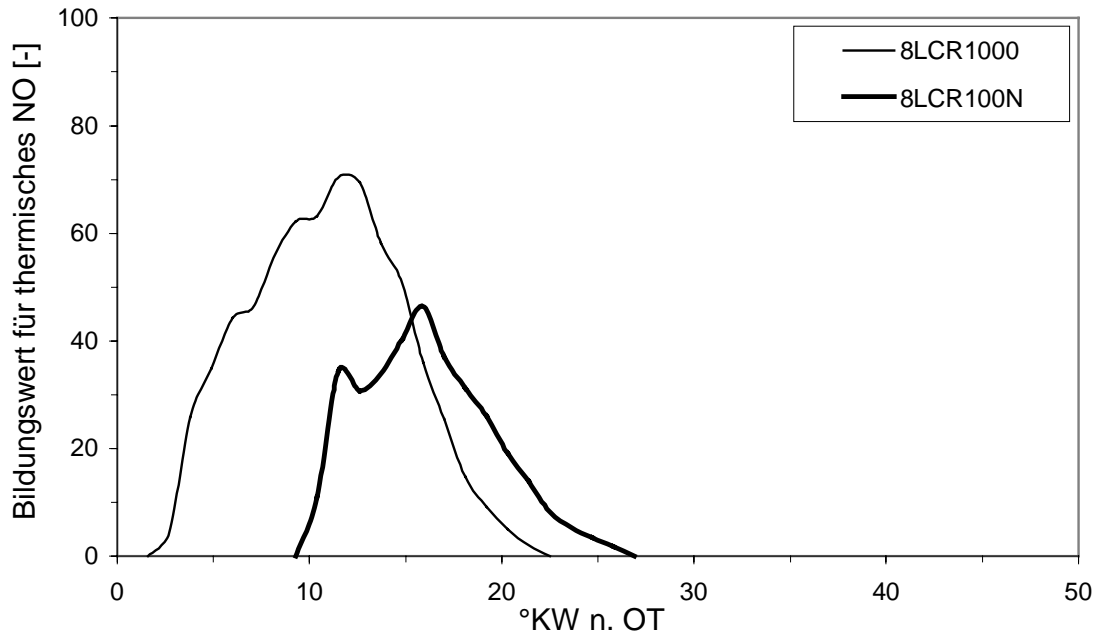


Bild 5.20: NO-Bildungskennzahlverläufe für thermisches NO, Spritzbeginnvariation

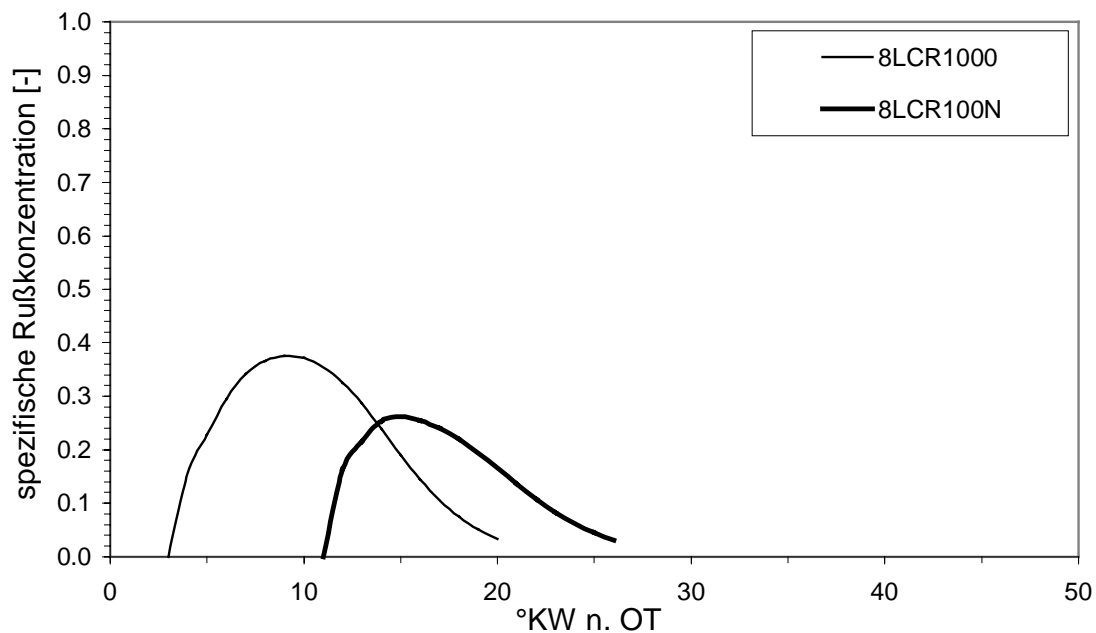


Bild 5.21: Integrale Rußkonzentrationsverläufe, Spritzbeginnvariation

5.4 Einfluß von AGR

Mit der hier vorgestellten Parameterstudie soll die Auswirkung der Änderung des Sauerstoffanteils in der Verbrennungsluft untersucht werden. Bei einer Last von 50% und einem Raildruck von 1200 bar wird einmal mit und einmal ohne Zuführung von trockenem Abgas je eine Meßreihe durchgeführt (Tabelle 5.3). Der höheren mittleren Wärmekapazität der mit CO₂ beaufschlagten Zylinderladung bei der Variante mit AGR (Abgasrückführung) wird mit einer leicht erhöhten Ansauglufttemperatur Rechnung getragen, da aufgrund des kleineren Polytropenexponenten κ sonst eine geringere Spitztemperatur bei OT entstehen würde. Somit sind die thermodynamischen Gastemperaturen bei Spritzbeginn für beide Varianten gleich.

Der einzige effektive Unterschied zwischen den beiden Betriebspunkten ist folglich die Differenz im Gesamt-Luftverhältnis.

Betriebspunkt	AGR-Rate	Brennraumdruck bei SB	Brennraumtemperatur bei SB	λ_{Ges}
8LCR12HL	0 %	60 bar (absolut)	857 K	2.0
8LCR12HA	10 %	60 bar (absolut)	857 K	1.85

Tabelle 5.3: Betriebspunkte für die AGR-Variation

5.4.1 Einspritzung und Gemischbildung

Durch den identischen Gegendruck und die gleiche thermodynamische Gastemperatur im Brennraum ist bei beiden Varianten die Strahlausbreitung nahezu gleich. Trotz der etwas höheren mittleren Wärmekapazität der AGR-Variante ist die Verdampfungsrate und damit der flüssige Strahlspitzenweg bei beiden Betriebspunkten praktisch gleich lang. Die Gemischbildung kann jedoch trotzdem nicht in beiden Fällen als identisch betrachtet werden, da die örtlichen Luftverhältnisse an den einzelnen Einspritzstrahlen aufgrund des niedrigeren Sauerstoffpartialdruckes bei der AGR-Variante gegenüber der Variante ohne AGR differieren. Mit der Änderung des Gesamt-Luft-Kraftstoff-Verhältnisses ändert sich auch die λ -Verteilung radial zur Strahlachse.

5.4.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Bilderfolgen für die untersuchten Varianten sind im Anhang in Bild A.10 und Bild A.11 zu sehen. Als eine Folge der vergleichbaren Verdampfung und des nur geringfügig unterschiedlichen Zündverzuges befinden sich auch die Orte, an denen OH-Chemilumineszenz auftritt, statistisch gesehen im selben Abstand von der Düse entfernt. Aufgrund des hohen Einspritzdruckes liegt der Bereich des Auftretens von Zündorten bei etwa 5-25 mm Abstand zur Düse, was etwa 15-80% des flüssigen Strahlspitzenweges entspricht. Infolge des niedrigeren Gesamt-Luft-Kraftstoff-Verhältnisses bei der AGR-Variante befindet sich stöchiometrisches Gemisch radial etwas weiter entfernt von der Strahlachse. Daher tritt

OH-Chemilumineszenz etwas weiter von den einzelnen Strahlachsen entfernt auf, was vor allem bei den späteren Zeitpunkten nach Zündbeginn deutlich wird. Bei diesen späten Aufnahmen fällt zudem auf, daß sich die Zündzonen bei der AGR-Variante infolge des längeren Zündverzuges vornehmlich in Richtung Strahlspitze ausbreiten. Dies hängt vermutlich mit dem geringeren Sauerstoffangebot in der Verbrennungsluft zusammen. Insgesamt fällt der Anstieg der OH-Chemilumineszenz-Intensität bei der AGR-Variante etwas moderater und die Intensitätsunterschiede zwischen den einzelnen Zündzonen etwas geringer aus.

Die minimal längere Zündverzugszeit bei der Variante mit 10% Abgas-Zumischung, zu beobachten in den integralen Verläufen in Bild 5.22, resultiert aus dem verminderten Sauerstoffangebot im Zylinder. Dadurch sinkt die Anzahl der gleichzeitig ablaufenden exothermen Reaktionen, was eine geringere Temperaturerhöhung und damit einen geringeren Anstieg in der Reaktionsgeschwindigkeit zur Folge hat [24]. Dies führt zu einem etwas längeren Zündverzug, einer langsamer ansteigenden OH-Chemilumineszenz und einem geringeren Steigungsmaximum des integralen OH-Chemilumineszenz-Intensitätsverlaufes der AGR-Variante (siehe auch Bild 6.1 und Bild 6.2).

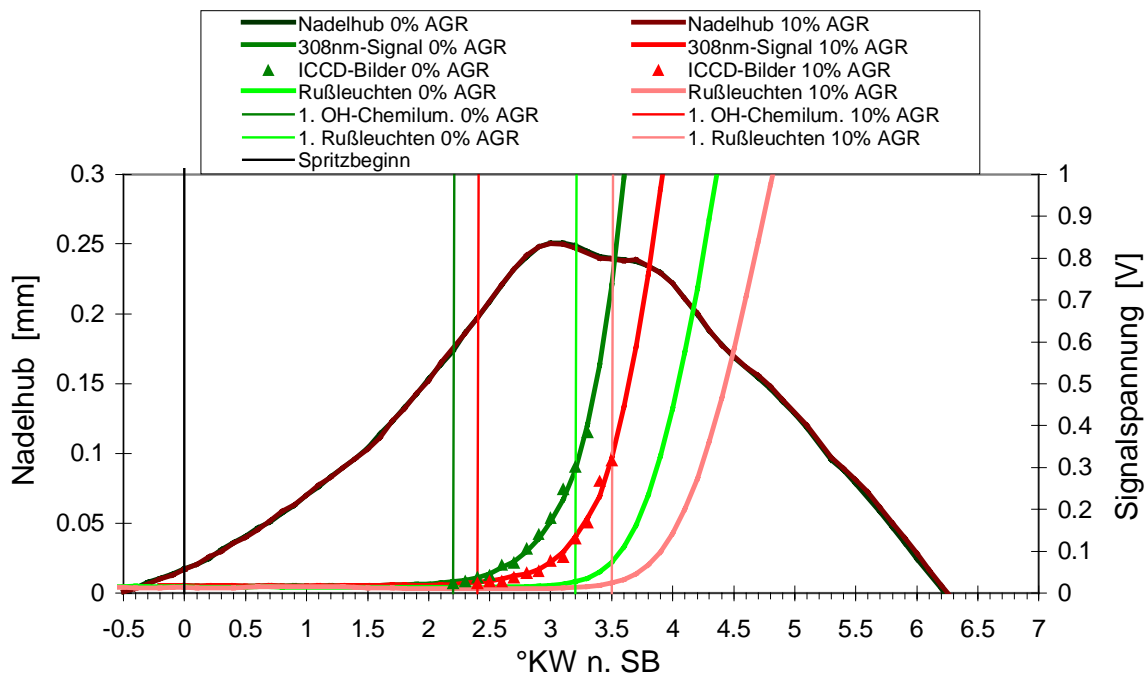


Bild 5.22: Integrale Intensitätsverläufe Eigenleuchten, AGR-Variation

5.4.3 Diffusionsverbrennung

Wie aus den Heizverläufen in Bild 5.23 deutlich wird, führt der längere Zündverzug bei der AGR-Variante zu einer Erhöhung des vorgemischten Anteils im Brennraum, was zu einer höheren Energiefreisetzung am Anfang des Heizverlaufes führt. Der größte Teil der Verbrennung spielt sich jedoch jeweils im nachfolgenden Diffusionsverbrennungsbereich ab. Dort ist zu erkennen, daß die Verbrennung durch die Zumischung von Abgas verzögert abläuft und somit auch die Brenndauer etwas zunimmt.

In Bild 5.24 sind die Rußtemperaturverläufe der beiden AGR-Varianten dargestellt. Man kann erkennen, daß eine Zumischung von 10% Abgas in die Ansaugluft bereits eine deutliche Verringerung der integralen Rußtemperatur bewirkt (20-50K). Nach der aufgrund der Verlangsamung der chemischen Reaktionen verlängerten Diffusionsverbrennungsphase läuft die Rußnachoxidation aufgrund mangelnden Sauerstoffes ebenfalls verzögert ab, was zusätzlich die Steigung im weiteren Rußtemperaturverlauf im Vergleich zur Variante ohne AGR absenkt. Die Rußnachoxidation findet bei der AGR-Variante über einen längeren Zeitraum statt, wodurch deutlich sichtbares Rußleuchten etwa 10°KW länger zu sehen ist.

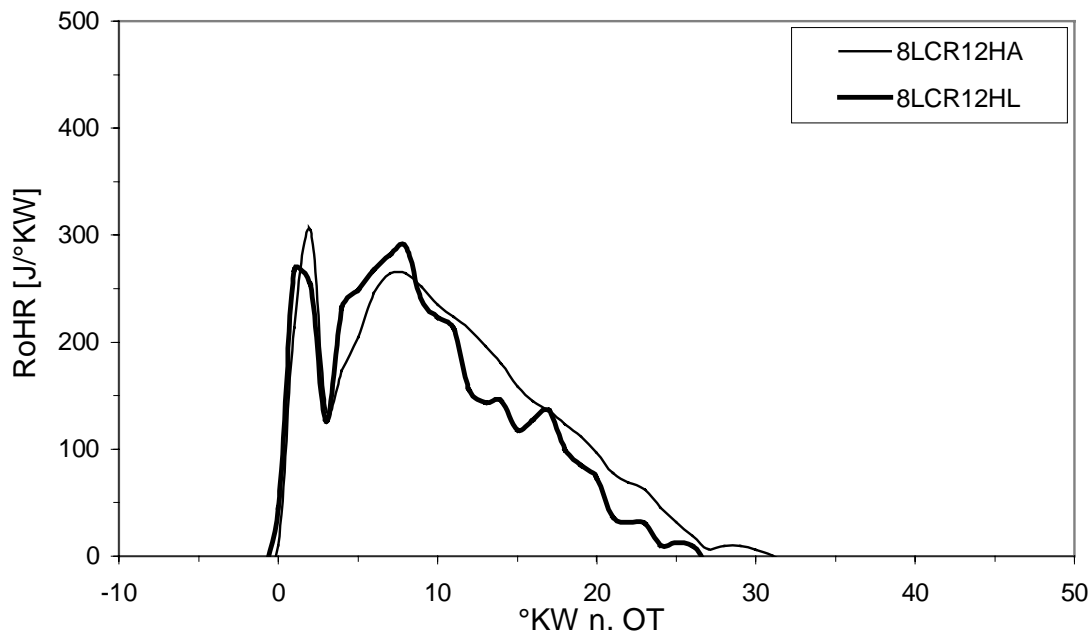


Bild 5.23: Heizverläufe, AGR-Variation

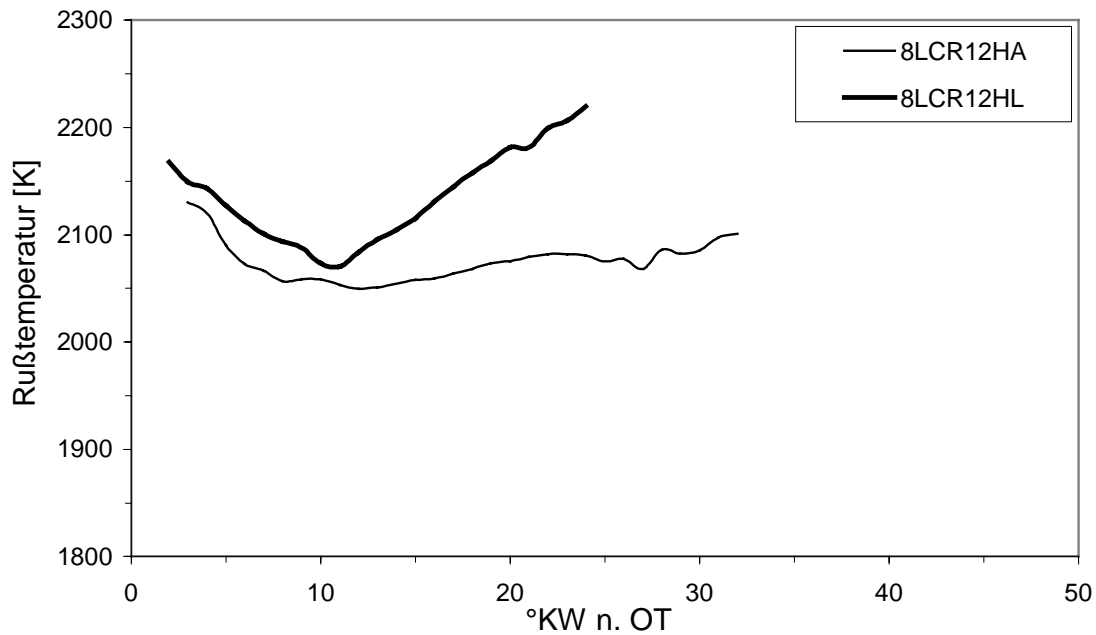


Bild 5.24: Integrale Rußtemperaturverläufe, AGR-Variation

5.4.4 Schadstoffe

In den NO-Bildungskennzahlverläufen in Bild 5.25 wirkt sich die Temperaturabsenkung während der Verbrennung durch Abgas-Zumischung deutlich aus: Die Bildung von thermischem NO ist beim Betriebspunkt mit AGR wesentlich geringer als beim Betriebspunkt ohne AGR.

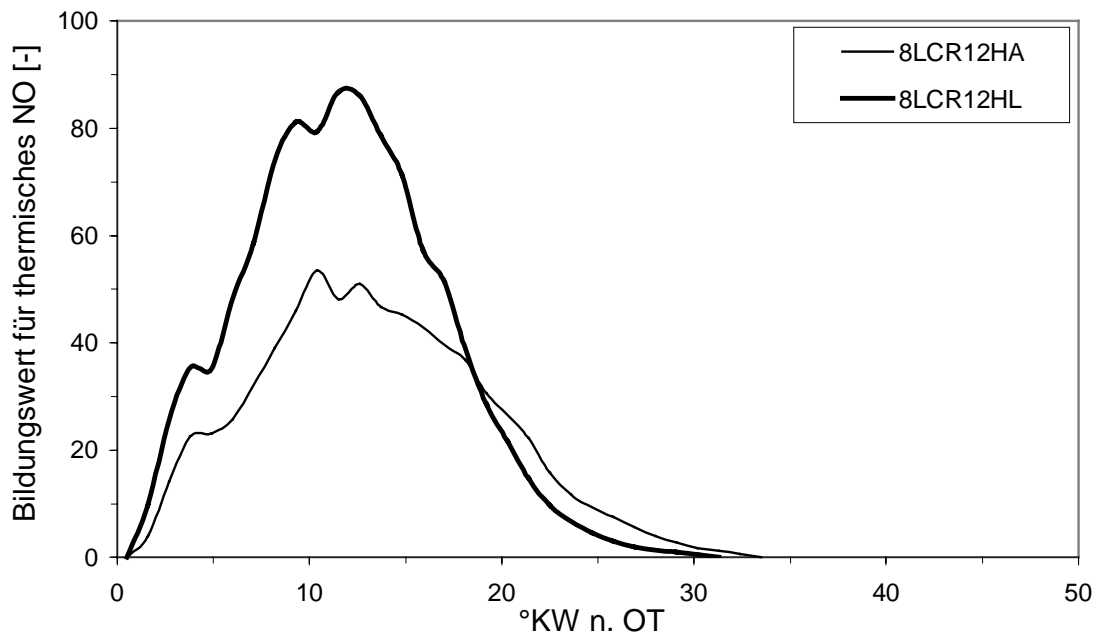


Bild 5.25: Verläufe der NO-Bildungskennzahlen für thermisches NO, AGR-Variation

Infolge der länger andauernden Verbrennung wird zwar bei der AGR-Variante über einen längeren Zeitraum NO gebildet, die Bildungszahlen sind insgesamt jedoch vergleichsweise gering, so daß der integrale NOK-Wert deutlich abnimmt, wie aus Bild 5.25 zu entnehmen ist. Betrachtet man sich die in Bild 5.26 dargestellten Rußkonzentrationsverläufe, so stellt man fest, daß eine Abgas-Zumischung eine verlangsamte Rußbildung und ein geringeres Rußkonzentrationsmaximum bewirkt. Durch die Verlangsamung aller chemischen Reaktionen infolge niedrigerer Reaktionstemperatur tritt dieses Maximum bei der AGR-Variante etwas später auf. Bei der darauffolgenden Rußnachoxidation geht der Rußabbrand bei der AGR-Variante langsamer vonstatten, was dazu führt, daß die abfallende Flanke der Rußkonzentrationskurve etwas weniger steil abfällt. Infolge der fortschreitenden Abnahme der thermodynamischen Gastemperatur im Brennraum aufgrund der durch die Abwärtsbewegung des Kolbens hervorgerufenen Expansion nimmt die Intensität der Rußnachoxidation zu späteren Zeitpunkten bei der AGR-Variante zusätzlich ab. Am Ende eines Verbrennungszyklusses bleibt deshalb bei der AGR-Variante infolge der unvollständigeren Rußnachoxidation eine höhere Rußmasse übrig.

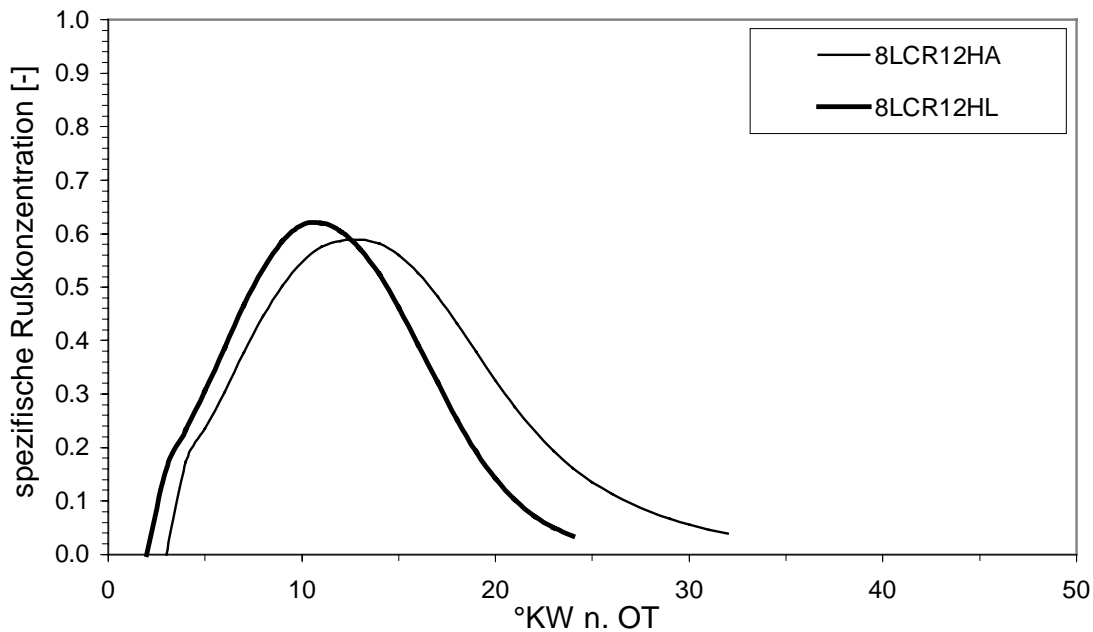


Bild 5.26 Integrale Rußkonzentrationsverläufe, AGR-Variation

5.5 Einspritzdruckvariation

Bei der Variation des Einspritzdruckes wird der Einfluß der Gemischbildung auf die Zündung und Verbrennung untersucht. Mit dem Common-Rail-System wurde dazu bei je einem Betriebspunkt der Raildruck und somit der Einspritzdruck variiert. Die Brennraumdrücke und -temperaturen waren bis zum Spritzbeginn für beide Einspritzdruckvarianten jeweils gleich.

Bei 25% Last werden die beiden Betriebspunkte mit 600 bar und 1000 bar miteinander verglichen, bei 50% Last die zwei Betriebspunkte mit 600 bar und 1200 bar. Alle Betriebspunkte sind in Bezug auf eine andere Parameterstudie bereits einmal zitiert worden.

Betriebspunkt	Last	Raildruck	Brennraumdruck bei SB	Brennraumtemperatur bei SB
8LCR_600	25%	600 bar	48 bar (absolut)	842 K
8LCR1000	25%	1000 bar	48 bar (absolut)	842 K
8LCR600H	50%	600 bar	60 bar (absolut)	857 K
8LCR12HL	50%	1200 bar	60 bar (absolut)	857 K

Tabelle 5.4: Betriebspunkte für die Einspritzdruckvariation

5.5.1 Einspritzung und Gemischbildung

Durch eine Beibehaltung des thermodynamischen Zustandes im Zylinder bei Spritzbeginn ist es möglich, den Einfluß des Einspritzdruckes auf die Gemischbildung zu untersuchen. Grundsätzlich wird, unabhängig vom Gegendruck im Brennraum, mit einer Einspritzdruckerhöhung der mittlere Sauterdurchmesser (SMD) der eingespritzten Tröpfchen herabgesetzt /13/-/15/.

Zum Vergleich der flüssigen Einspritzstrahlen dienen für den 25% Lastpunkt die Bilderserien im Anhang in Bild A.4 und Bild A.8, für den 50% Lastpunkt in Bild A.7 und Bild A.10. Betrachtet man den flüssigen Strahlenteil des eingespritzten Kraftstoffes, der auf den jeweiligen Bilderserien abgebildet ist, so erkennt man eine gegenläufige Tendenz: Beim 25% Lastpunkt führt eine Raildruckerhöhung zu einer Verringerung des flüssigen Strahlspitzenweges, beim 50% Lastpunkt ist eine Verlängerung zu beobachten. Im Vergleich der beiden 25% Lastpunkte ist zu erkennen, daß die Strahlen beim hohen Raildruck etwas schlanker sind, d.h. daß der Strahlkegelwinkel der flüssigen Strahlenteile etwas geringer ist als beim Betriebspunkt mit dem niedrigeren Raildruck. Dies deutet darauf hin, daß die Tröpfchen am Rande des Strahlkegels beim höheren Einspritzdruck einen geringeren Durchmesser besitzen und dadurch schneller verdampfen /15/. Dieser Unterschied im Strahlkegelwinkel tritt bei den 50% Lastvarianten nicht so deutlich sichtbar auf.

Eine bessere Zerstäubung des Kraftstoffes, wie sie mit Erhöhung des Raildruckes einhergeht, bewirkt eine schnellere Verdampfung der einzelnen Tröpfchen. Gleichzeitig wird dabei allerdings auch der Einspritzimpuls erhöht, was zu einer erhöhten Eindringgeschwindigkeit führt. Diese beiden den flüssigen Strahlspitzenweg bestimmenden Faktoren sind über eine gegensätzlich wirkende (Trade-Off) Beziehung miteinander verknüpft. Abhängig von den

thermodynamischen Randbedingungen im Zylinder und dem Wert der Einspritzdruckerhöhung überwiegt der eine oder andere den Strahlspitzenweg bestimmende Faktor. Beim 25% Lastpunkt nimmt der flüssige Strahlspitzenweg mit der Erhöhung des Einspritzdruckes von 600 bar auf 1000 bar minimal ab, beim 50% Lastpunkt nimmt er bei Erhöhung des Raildruckes von 600 bar auf 1200 bar geringfügig zu. Die Unterschiede im Strahlspitzenweg durch Variation des Einspritzdruckes sind bei den gewählten Betriebspunkten sehr gering. Für eine detaillierte Beschreibung der den Strahlspitzenweg bestimmenden Faktoren und ihre gegenseitige Beeinflussung muß noch weitere Forschungsarbeit geleistet werden.

5.5.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Um den Einspritzdruckeinfluß auf die Zündung deutlich zu machen, wurden für die Vergleiche je zwei Betriebspunkte mit extrem unterschiedlichen Raildrücken ausgewählt. Beim 25% Lastpunkt wird der Einspritzdruck um 80% erhöht, beim 50% Lastpunkt ist es eine Verdoppelung des Raildruckes.

Deutlich sichtbar bei den Bilderserien für die 25% Lastpunkte ist, daß es infolge der besseren Gemischaufbereitung beim 1000 bar Betriebspunkt (Bild A.8) zu einem etwas kürzeren Zündverzug kommt als beim Betriebspunkt mit 600 bar Raildruck (Bild A.4). Erkennbar ist auch, daß mit einer Erhöhung des Raildruckes die Lage der Zündorte radial nach außen wandert. Befinden sich die Zündorte beim 600 bar Betriebspunkt zwischen 5-10 mm von der Düse entfernt, so sind beim 1000 bar Punkt Orte erhöhter OH-Chemilumineszenz im Bereich von 7-25 mm Abstand von der Düse festzustellen. Diese starke Streuung ist dadurch zu erklären, daß beim Lastpunkt mit hohem Einspritzdruck einerseits der Großteil der Tröpfchen mit hohem Einspritzimpuls weit in den Brennraum eindringt, um dort Zündkerne zu bilden, und andererseits durch das starke Aufreißen des Strahls an der Düse ein kleiner Kraftstoffanteil in den äußersten Randzonen des Einspritzstrahles senkrecht zur Strahlrichtung stark abgelenkt wird, sich mit geringem Impuls in Richtung der Strahlachse weiterbewegt und bereits in der Nähe der Düse zündet. Statistisch findet bei der hohen Raildruckvariante die vorgemischte Verbrennung anfänglich in mehr und dafür kleineren, im Mittel intensiver leuchtenden Zonen statt als bei der 600 bar Variante. Durch die größere räumliche Ausdehnung ist hingegen das Zusammenwachsen einzelner Zündorte bei der 1000 bar Variante weniger ausgeprägt. Insgesamt schreitet die vorgemischte Verbrennung aufgrund der besseren Gemischbildung und der höheren Einspritzrate bei der 1000 bar Variante schneller voran.

Auf Bild 5.27 sind die integralen Verläufe der Intensitäten für die OH-Chemilumineszenz und das Rußleuchten für die beiden 25% Lastpunkte dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, daß bei der Variante mit dem hohen Einspritzdruck die OH-Chemilumineszenz nach etwas früherem Zündbeginn wesentlich stärker ansteigt, und sich somit im weiteren Verlauf der Vormischflamme immer deutlicher vom Betriebspunkt mit 600 bar Raildruck abhebt. Deutlich für beide Betriebspunkte gilt auch, daß nach anfänglichem Rußleuchten der Anstieg dieses Signals zeitversetzt mit nahezu derselben Steigung wie das OH-Signal zunimmt.

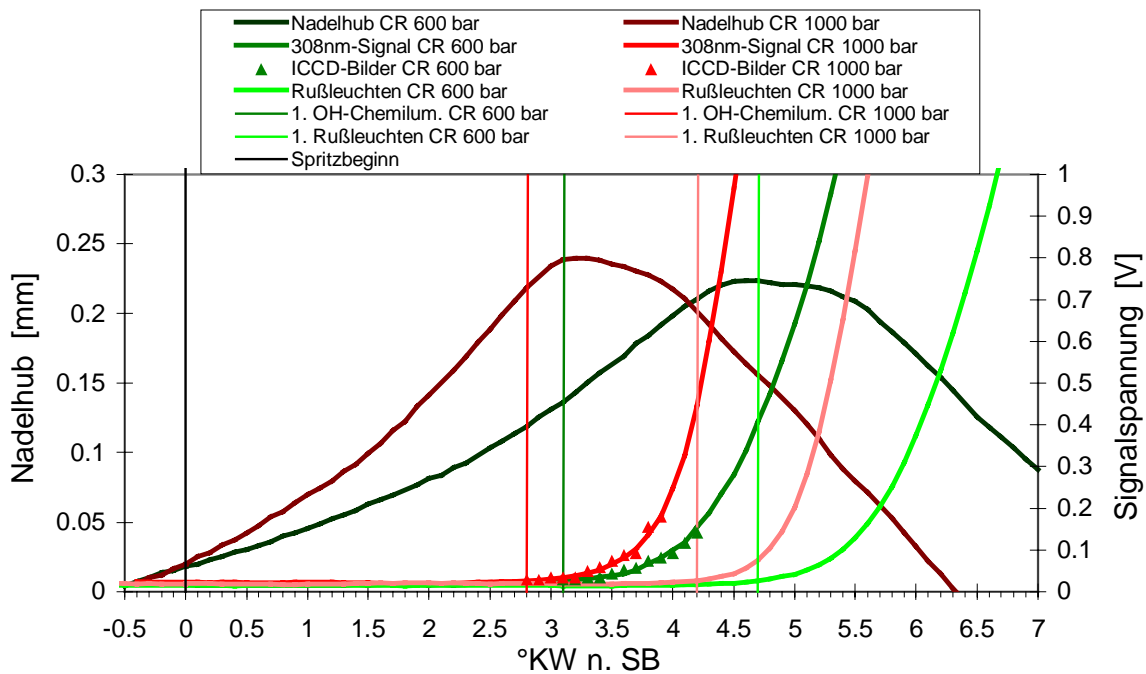


Bild 5.27: Integrale Intensitätsverläufe, Einspritzdruckvariation, 25% Last

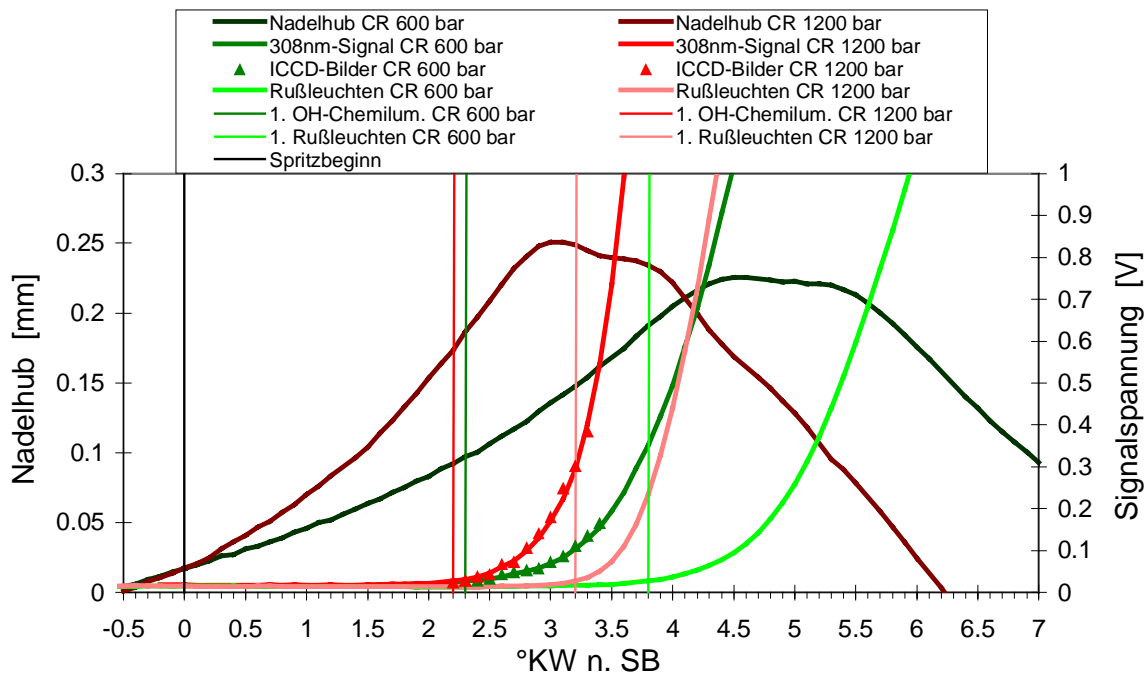


Bild 5.28: Integrale Intensitätsverläufe, Einspritzdruckvariation, 50% Last

Betrachtet man die beiden Raildruckvarianten beim 50% Lastpunkt, so gilt das oben gesagte auch hier. Die in Bild 5.28 dargestellten integralen Signalverläufe bestätigen die Aussage, daß eine Erhöhung des Raildruckes eine nur minimale Verkürzung des Zündverzuges zur Folge hat. Aufgrund der besseren Zerstäubung und Verdampfung nach Einspritzbeginn und der höheren Einspritzrate befindet sich zum Zündzeitpunkt bei der Variante mit dem höheren Raildruck mehr und mit höherem Prozentsatz vorgemischter Kraftstoff im Brennraum.

In den Bilderserien im Anhang auf Bild A.7 (600 bar) und Bild A.10 (1200 bar) ist ebenso wie bei den 25% Lastpunkten zu erkennen, daß bei der Variante mit dem höheren Einspritzdruck die Zündorte im Mittel einen größeren Abstand zur Düse besitzen. Während die Zündorte bei der niedrigen Einspritzdruckvariante der 50% Lastpunkte in einem Bereich von 5-10 mm Abstand von der Düse liegen, was etwa 20-50% des Strahlspitzenweges entspricht, befinden sie sich bei der 1200 bar Variante in einer Entfernung von 5-27 mm von der Düse, also entlang des gesamten flüssigen Strahlkernes. Auch ist bei der 1200 bar Variante eine Vielzahl von relativ kleinen, sehr intensiv leuchtenden Zündkernen im Gegensatz zur 600 bar Variante vorhanden. Im Gegensatz dazu schreitet der integrale OH-Chemilumineszenz-Intensitätsanstieg beim Betriebspunkt 8LCR600H sehr viel langsamer voran als beim Lastpunkt 8LCR12HL, und die oft etwas länger gestreckten Zündzonen wachsen in ihrer kompakt um die Düse orientierten Lage eher zusammen.

5.5.3 Diffusionsverbrennung

Bei der Analyse der Heizverläufe in Bild 5.29 zur Beurteilung der Diffusionsverbrennung wird deutlich, daß mit einer Erhöhung des Einspritzdruckes gleichzeitig eine Erhöhung des vorgemischten Anteils im Brennraum zum Zündzeitpunkt auftritt. Dementsprechend haben die Varianten mit dem hohen Raildruck ein ausgeprägteres und höheres Maximum im Heizverlauf am Anfang der Verbrennung als ihre Vergleichsvarianten mit dem niedrigeren Einspritzdruck.

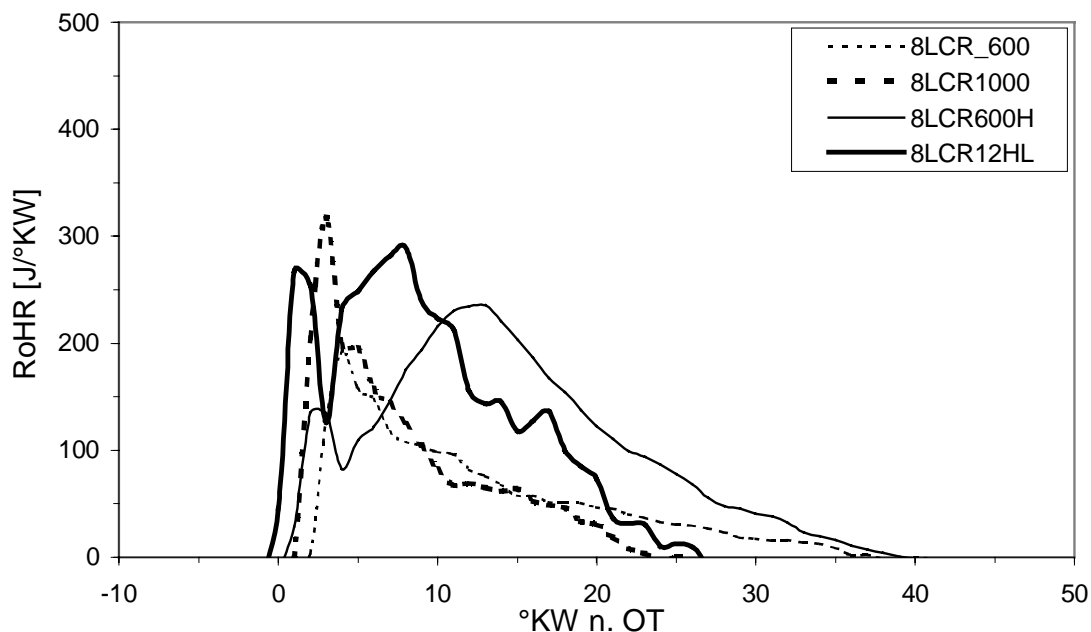


Bild 5.29: Heizverläufe, Einspritzdruckvariation

Genau wie die intensivere vorgemischte Verbrennung läuft bei den höheren Druckvarianten auch die folgende Diffusionsverbrennung heftiger und kürzer ab. Bei den niedrigen Einspritzdruckvarianten läuft die gesamte Verbrennung unabhängig vom Lastpunkt wesentlich weniger intensiv und wesentlich länger ab. Deutlich sichtbar ist auch aus dem Heizverlauf, daß

die gesamte Verbrennung bei den Betriebspunkten mit dem niedrigeren Einspritzdruck durch den verlängerten Zündverzug etwas später beginnt.

Betrachtet man dazu die integralen Rußtemperaturverläufe in Bild 5.30, so werden die aus den Heizverläufen bereits resultierenden höheren Temperaturen der Betriebspunkte mit dem höheren Einspritzdruck auch tatsächlich erreicht.

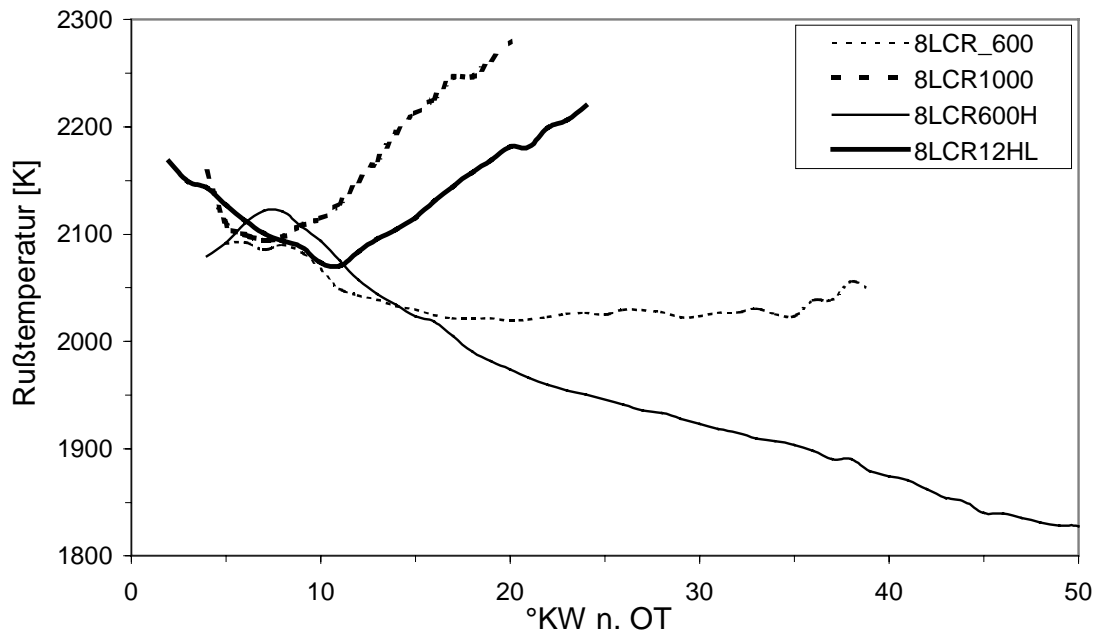


Bild 5.30: Integrale Rußtemperaturverläufe, Einspritzdruckvariation

Die Temperaturen zu Beginn der rußleuchtenden Verbrennung sind bei den Varianten mit dem hohen Einspritzdruck infolge des größeren mit der heißeren Vormischflamme durchbrennenden Vormischanteils wesentlich höher. Bei der anschließenden Diffusions-verbrennung wird infolge der intensiveren Gemischbildung die Verdampfungsenthalpie des eingespritzten Kraftstoffes in einem kürzeren Zeitraum dem System Brennraum in Einspritzstrahlhöhe entzogen. Dadurch nimmt die integrale Rußtemperatur in der Diffusionsflamme stärker ab, was bei den 50% Lastpunkten sogar zu einer Überschneidung der Rußtemperaturkurven führt.

Nach dem Ende der Einspritzung klaffen die Verläufe für die integrale Rußtemperatur bei den Raildruckvarianten weit auseinander. Wegen der schlechteren Gemischaufbereitung und der infolge geringerer Einspritzrate längeren Einspritzdauer erfolgt die Rußnachoxidation bei den Varianten mit dem niedrigeren Einspritzdruck wesentlich später. Durch die beschleunigte Abwärtsbewegung des Kolbens und die daraus resultierende immer stärker abnehmende thermodynamische Gastemperatur bleiben die Rußtemperaturen trotz der exothermen Oxidationsreaktion während der Rußnachoxidation gleich oder nehmen ab. Bei den beiden Varianten mit dem hohen Einspritzdruck läuft die Rußnachoxidation zu einem früheren Zeitpunkt ab, wodurch in beiden Fällen eine deutliche Rußtemperaturzunahme in dieser Phase zu verzeichnen ist.

5.5.4 Schadstoffe

Betrachtet man die Bildungskennzahlverläufe für das thermische NO in Bild 5.31, so fällt auf, daß auch hier deutliche Unterschiede bei der Einspritzdruckvariation zu erkennen sind.

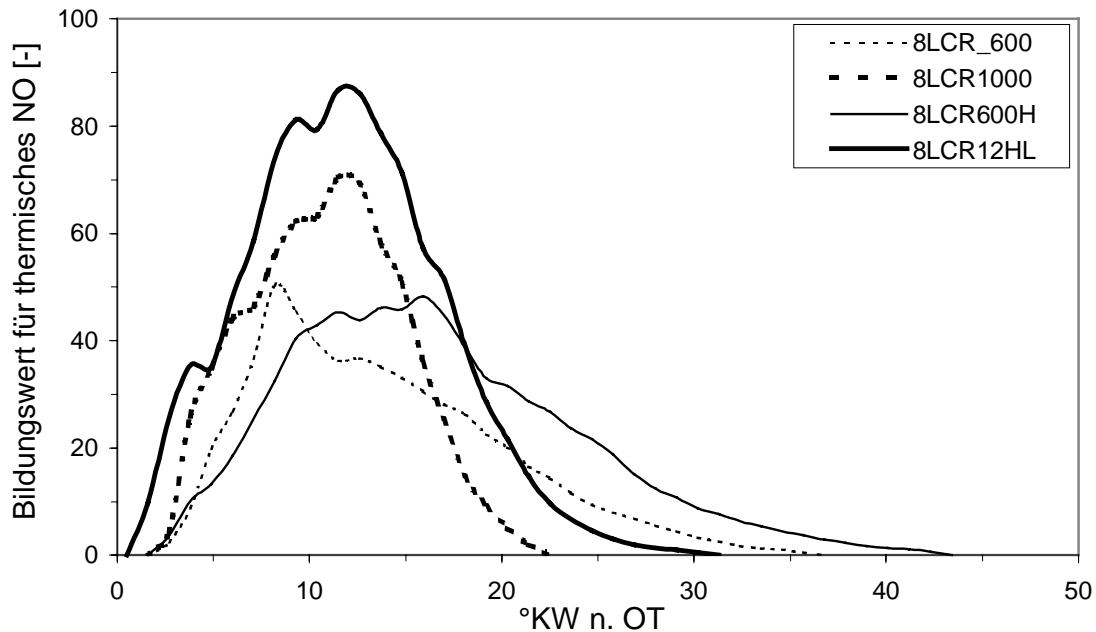


Bild 5.31: Bildungsverläufe für thermisches NO, Einspritzdruckvariation

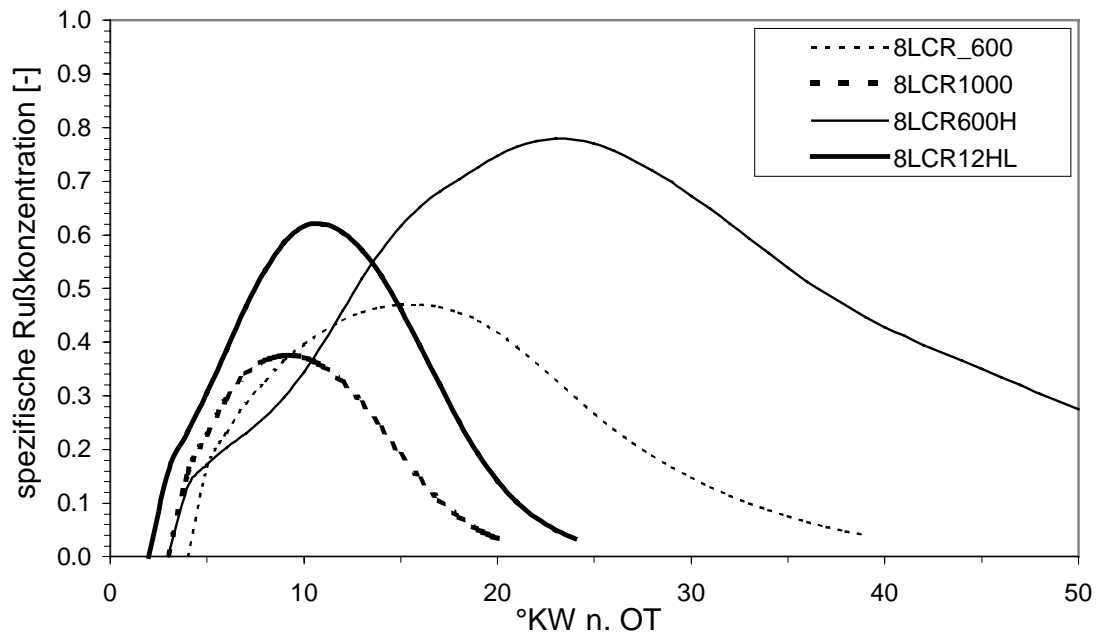


Bild 5.32: Integrale Rußkonzentrationsverläufe, Einspritzdruckvariation

Die Varianten mit dem höheren Einspritzdruck haben während dem Großteil ihrer Brenndauer eine wesentlich höhere NO-Bildungszahl als die Vergleichsbetriebspunkte mit dem niedrigeren Einspritzdruck. Dies bewirkt, daß trotz der kürzeren Brenndauer der integrale NOK-Wert und damit die Stickoxidemission jeweils wesentlich höher liegt.

Betrachtet man die Verläufe für die integralen Rußkonzentrationen in Bild 5.32, so stellt man fest, daß bei den höheren Einspritzdruckvarianten aufgrund des geringeren durch Diffusionsverbrennung umgesetzten Kraftstoffanteils die Maximalwerte der Rußkonzentrationen niedriger ausfallen. Infolge der länger anhaltenden Diffusionsverbrennung wird bei den niedrigen Raildruckvarianten mehr Ruß gebildet, der wegen der schlechteren Durchmischung der rußenden Zonen mit der Verbrennungsluft am Ende der Verbrennung aufgrund der geringeren induzierten Turbulenz allerdings auch langsamer und unvollständiger oxidiert. Bei den Betriebspunkten mit dem höheren Einspritzdruck steigt die Zahl der gebildeten Rußpartikel schneller an und nimmt nach Einspritzende auch schneller wieder ab, so daß in beiden Lastfällen auch jeweils eine niedrigere Partikelemission im Abgas auftritt /67/.

5.6 Einspritzsystemvariation

Die Umstellung des Einspritzsystems von CR (Common-Rail) auf PLD (Pumpe-Leitung-Düse) stellt eine Änderung des Einspritzverlaufes und der Gemischbildung durch die Variation des Einspritzdruckverlaufes dar. Das PLD-System beginnt aufgrund des festgelegten Öffnungsdruckes mit einem Einspritzdruck von 300 bar, der, je nach Spritzdauer und Drehzahl, auf Werte von bis zu 1800 bar ansteigen kann. Beim Common-Rail-System hingegen bleibt der in einem weiten Bereich beliebig variierbare Einspritzdruck während der gesamten Einspritzung konstant.

Ein direkter Vergleich der beiden Einspritzsysteme gestaltet sich aus diesem Grund der freien Wählbarkeit des Druckes beim CR-System als relativ schwierig. Sinnvoll erscheinende Vergleiche zwischen CR- und PLD-System, auch was die Abgaswerte betrifft, sind in der Tabelle 5.5 in Form von je einer Variation bei zwei unterschiedlichen Lastpunkten aufgeführt. Dabei wurde der Einspritzdruck der Variante mit dem CR-System jeweils so gewählt, daß er in etwa dem maximalen Einspritzdruck des Vergleichsbetriebspunktes mit dem PLD-System entsprach.

Die Variationen für die unterschiedlichen Einspritzsysteme wurden mit zwei 8-Loch-Düsen, die bezüglich Lochanzahl, Lochgeometrie und hydraulischem Durchfluß identisch waren, durchgeführt. Die Lage der Düsenlöcher ist beim PLD-System in eingebautem Zustand im Vergleich zum CR-System leicht gedreht, weshalb sich die flüssigen Einspritzstrahlen in den Bilderserien zur OH-Chemilumineszenz von ihrer Lage her unterscheiden.

Betriebspunkt	Last	Einspritzdruck	Brennraumdruck b. SB	Brennraumtemperatur b.SB
8LCR_600	25%	600 bar	48 bar (absolut)	842 K
8LPLD_25	25%	300-550 bar	48 bar (absolut)	842 K
8LCR120V	100%	1200 bar	97 bar (absolut)	880 K
8LPLD100	100%	300-1030 bar	97 bar (absolut)	880 K

Tabelle 5.5: Betriebspunkte für die Einspritzsystemvariation

5.6.1 Einspritzung und Gemischbildung

Betrachtet man sich die Einspritzdruckverläufe der ausgewählten Betriebspunkte in Bild 5.33, so stellt man fest, daß beim PLD-System der Einspritzdruck des Common-Rail-Systems am Ende der Einspritzung zu 90% erreicht wird. Die Gemischbildung ist beim Spitzendruck des PLD-Systems ähnlich der des CR-Systems. Gänzlich anders ist die Einspritzrate und Zerstäubung des Kraftstoffes bei Einspritzbeginn, in der Phase des Zündverzuges und während der vorgemischten Verbrennung. Beim 25% Lastpunkt ergibt sich dabei eine Verdoppelung des Einspritzdruckes beim CR-System, beim 100% Lastpunkt ist es sogar eine Vervierfachung. Kurz nach Einspritzbeginn bricht der Druck vor der Düse beim PLD-System kurzfristig von bereits erreichten 450 bar auf etwa 300 bar zusammen, was mit der plötzlichen Freigabe des

Durchflußquerschnittes an der Düsennadel zusammenhängt. Der im Hochdruckteil des Einspritzsystems befindliche Kraftstoff hat systembedingt beim CR-System ein viel größeres Volumen, weshalb dort während der Einspritzung nur ein relativ geringer Druckabfall von etwa 40 bar zu erkennen ist.

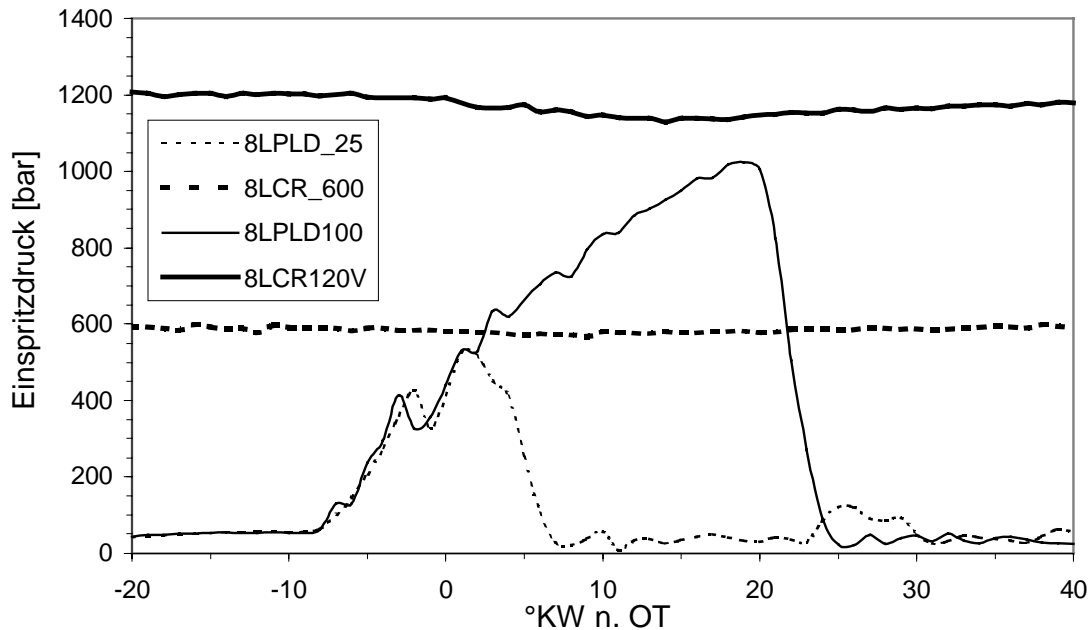


Bild 5.33: Einspritzdruckverläufe Einspritzsystemvariation, 25% und 100% Lastpunkte

Betrachtet man die Bilderserien im Anhang für die beiden Betriebspunkte mit 25% Last (Bild A.4: 8LCR_600 und Bild A.13: 8LPLD_25), so fällt auf, daß, wie schon im vorhergehenden Kapitel aufgeführt, bei Erhöhung des Einspritzdruckes der flüssige Strahlspitzenweg ansteigt. Dies gilt auch für den Vollastvergleich auf Bild A.12 (8LCR120V) und Bild A.14 (8LPLD100). Deutlich sichtbar ist auch, daß jeweils bei den CR-Varianten der Strahlspitzenweg bei Zündbeginn noch nicht erreicht ist, was auch mit dem wesentlich verkürzten Zündverzug von PLD zu CR zu tun hat. Ein Charakteristikum in der Strahlstruktur ist, daß beim CR-System grundsätzlich der A-Maß-Einfluß bezüglich der unterschiedlichen flüssigen Strahllängen zweier benachbarter Strahlen stärker hervortritt als beim PLD-System. Dort ist in kürzester Zeit nach Spritzbeginn zwischen den Strahllängen kein Unterschied mehr zu erkennen.

Während eine Einspritzdruckanhebung beim 25% Lastpunkt von 600 bar auf 1000 bar (Kapitel „5.5 Einspritzdruckvariation“) eine Verkürzung des Zündverzuges um etwa 10% bewirkt, verlängert sich der Zündverzug durch den Einspritzsystemwechsel und einer damit verbundenen Absenkung des Einspritzdruckes von 600 bar auf 300-400 bar um etwa 30%. Der Einspritzdruck von 600 bar beim CR-System ist dabei gewählt, der anfängliche Einspritzdruck von 300-400 bar beim PLD-System ist systembedingt. Das bedeutet, daß durch diese Einspritzdruckabsenkung eine entscheidende Verschlechterung der Aufbereitung des während der Zündverzugszeit eingespritzten Kraftstoffes eingetreten ist. Der vorgemischte Anteil ist beim PLD-System damit zur gleichen Zeit nach Einspritzbeginn wesentlich geringer. Auch

beim 100% Lastpunkt ist eine Verdoppelung der Zündverzugszeit vom CR- zum PLD-System zu erkennen. Aufgrund der anfänglich schlechteren Gemischbildung beim PLD-System ist also grundsätzlich eine Verlängerung der Zeit bis zum Auftreten erster OH-Chemilumineszenz festzustellen.

5.6.2 Zündung und vorgemischte Verbrennung

Betrachtet man sich die Bilderserien der 25% Lastpunkte im Anhang (Bild A.4 und Bild A.13), so erkennt man den deutlichen Unterschied in der Ausprägung der Zündzonen. Beim Betriebspunkt mit dem CR-Einspritzsystem treten statistisch gesehen die einzelnen Zündorte mit einer höheren OH-Chemilumineszenz als beim Betriebspunkt mit dem PLD-Einspritzsystem auf. Zu diesem Ergebnis kommt man auch in Kapitel „5.5 Einspritzdruckvariation“, in dem festgestellt wird, daß bei einer Erhöhung des Einspritzdruckes die Intensität der einzelnen Zündzonen zunimmt. Der Abstand der Zündbereiche zur Düse ist allerdings bei beiden Betriebspunkten etwa gleich groß. Aufgrund des weniger großen Einflusses des A-Maß-Unterschiedes beim PLD-Einspritzsystem ist hier eine statistische Bevorzugung der vier Strahlen aus den Düsenlöchern mit dem hohen A-Maß nicht so ausgeprägt.

Der Anstieg in der integralen OH-Chemilumineszenz ist nach Zündbeginn beim Lastpunkt mit dem PLD-Einspritzsystem nicht ganz so groß. Im weiteren Verlauf nimmt die Reaktivität jedoch zu, so daß das Maximum der Steigung in der OH-Chemilumineszenz-Intensitätskurve kaum geringer ist als das des Betriebspunktes mit dem CR-Einspritzsystem. Dieser verzögerte Anstieg in der OH-Bildung ist mit der anfänglich relativ schlechten Gemischaufbereitung (größerer SMD) zu erklären. Bis zur Zündung erhöht sich der Einspritzdruck jedoch auf über 500 bar und somit gleicht sich die Qualität der Gemischbildung der des Betriebspunktes mit dem CR-Einspritzsystem immer mehr an, was zu einem ähnlichen weiteren Verlauf der vorgemischten Verbrennung führt.

Beim Vergleich der beiden 100% Lastpunkte ist ebenfalls zu sehen, daß beim Betriebspunkt mit dem CR-System (Bild A.12) ein wesentlich schnellerer und steilerer Anstieg der OH-Chemilumineszenz zu beobachten ist. Die Zündorte befinden sich bei beiden Varianten in nächster Nähe der Düse (2-5 mm Abstand), wachsen jedoch beim Betriebspunkt mit dem CR-Einspritzsystem schneller in Richtung der jeweiligen Strahlspitze weiter. Während beim Betriebspunkt mit dem PLD-Einspritzsystem (Bild A.14) bis zum Beginn des Rußleuchtens die Zündzonen in einem Bereich von 2-12 mm Abstand von der Düse auftreten, befinden sie sich beim Betriebspunkt mit dem CR-Einspritzsystem in einem Abstand von etwa 3-20 mm von der Düse.

Betrachtet man nun die integralen Verläufe der Emissionsintensitäten, so wird deutlich, daß beim 25% Lastpunkt in Bild 5.34 das PLD-System einen 30% längeren Zündverzug verursacht, im Anstieg des Intensitäten jedoch ähnlich dem des Betriebspunktes mit dem CR-Einspritzsystem verläuft. Infolge des verzögerten Beginns der chemischen Reaktivität verschleppt sich auch die Rußbildung, was zu einer größeren zeitlichen Differenz zwischen dem OH-Signalverlauf und dem Verlauf des Rußleuchten-Signals führt.

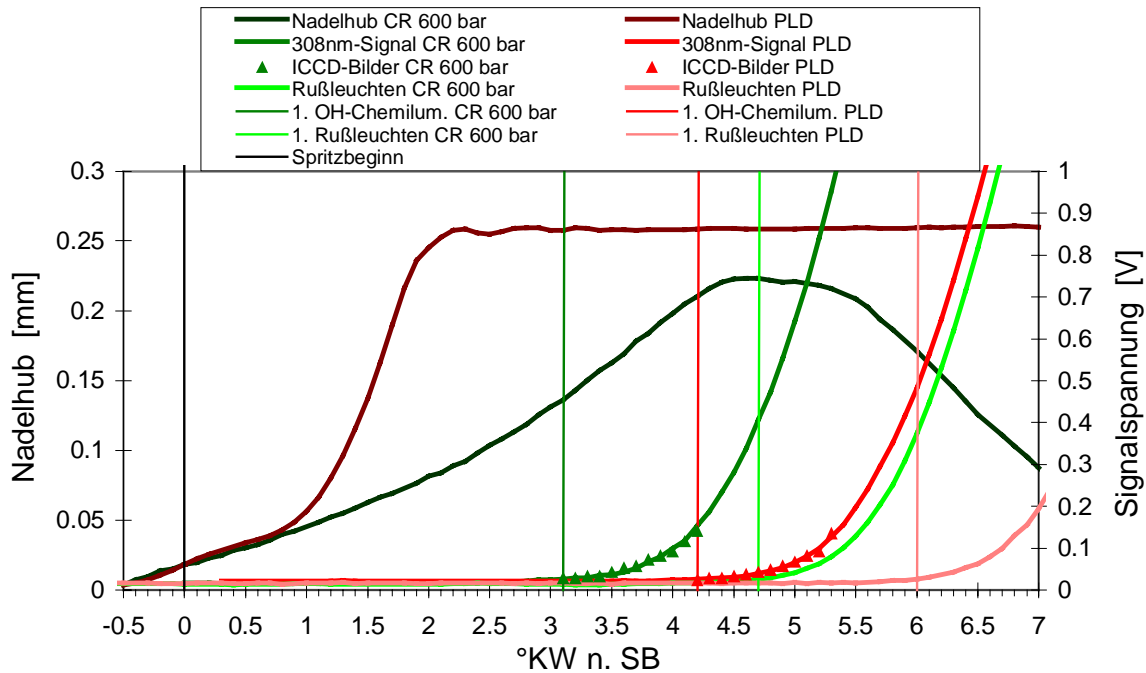


Bild 5.34: Integrale Intensitätsverläufe Einspritzsystemvariation, 25% Lastpunkte

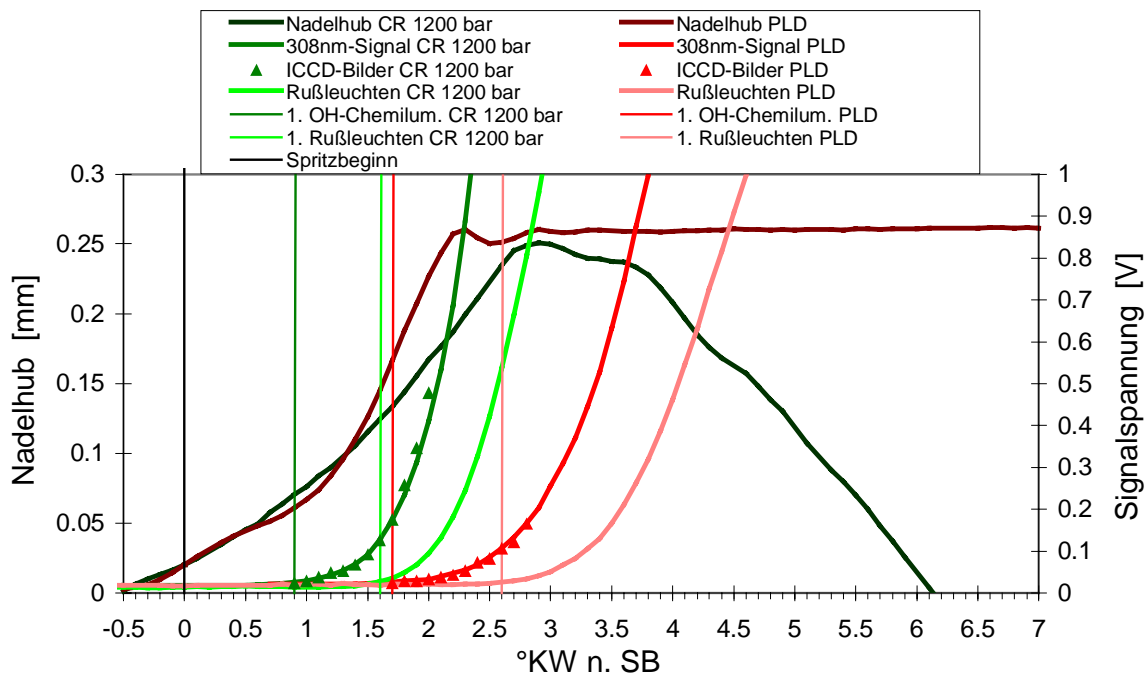


Bild 5.35: Integrale Intensitätsverläufe Einspritzsystemvariation, 100% Lastpunkte

Beim 100% Lastpunkt in Bild 5.35 sind die gleichen Tendenzen zu beobachten, wobei hier zusätzlich zur Verdoppelung des Zündverzuges beim Betriebspunkt mit dem PLD-Einspritzsystem dessen flacherer Anstieg bei der OH-Chemilumineszenz-Intensitätskurve und der Intensitätskurve des Rußleuchtens festzustellen ist. Der enorme Unterschied im Einspritzdruck macht sich hier also auch in der Umsatzrate (Steigungsmaximum der OH-Chemilumineszenz-Intensitätskurve, siehe auch Bild 6.2) nach Zündbeginn bemerkbar.

5.6.3 Diffusionsverbrennung

Betrachtet man sich zur Analyse der Diffusionsverbrennung die in Bild 5.36 dargestellten Heizverläufe für den 100% Lastfall, so stellt man eindeutig Ähnlichkeiten zu den Heizverläufen bei der Einspritzdruckvariation fest. Zu Anfang der Verbrennung ist der vorgemischte Kraftstoffanteil im Brennraum bei der CR-Variante jeweils höher, und die anschließende Diffusionsverbrennung läuft aufgrund der höheren Einspritzrate und der besseren Gemischbildung kürzer und heftiger ab als bei der PLD-Variante. Der höhere vorgemischte Kraftstoffanteil im Brennraum bei den CR-Varianten ergibt sich aus dem deutlich höheren Einspritzdruck, trotz der um etwa 40% kürzeren Zündverzugsphase.

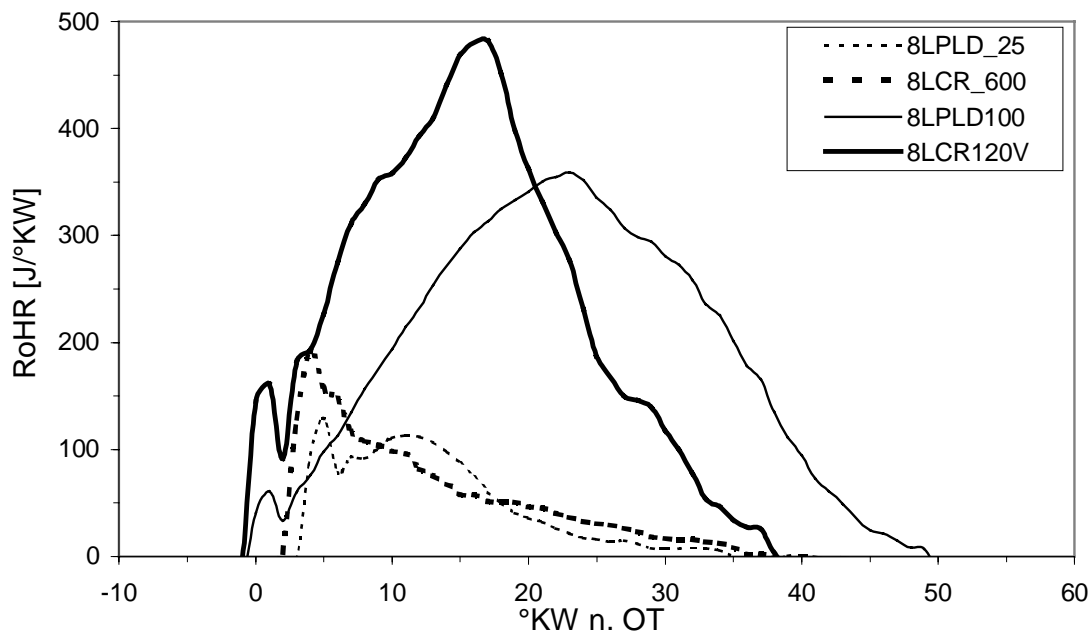


Bild 5.36: Heizverläufe, Einspritzsystemvariation

Beim 25% Lastfall sind die Unterschiede im Heizverlauf nicht so groß, hier liegt auch keine große Einspritzdruckdifferenz vor. Der vorgemischte Kraftstoffanteil im Brennraum ist bei der CR-Variante wie beim hohen Lastfall etwas höher als bei der PLD-Variante, im weiteren Verlauf der Verbrennung macht sich dann jedoch der ansteigende Einspritzdruck des PLD-Systems bemerkbar, was bedeutet, daß die Einspritzrate und die Güte der Gemischbildung bei 550 bar Einspritzdruck gegen Ende der Einspritzung ähnlich denen des CR-Systems mit 600 bar Einspritzdruck sind. Daraus resultiert ein ähnlich langer Heizverlauf der beiden Varianten. Die Brenndauer ist beim Betriebspunkt 8LPLD_25 aufgrund der länger andauernden Rußnachoxidation im Gegensatz zum 8LCR_600 deutlich länger, was aus den Heizverläufen nicht zu entnehmen ist, auf den Hochgeschwindigkeitfilmen jedoch deutlich sichtbar wird. Beim Betriebspunkt 8LCR_600 klingt das helle Verbrennungsleuchten gegen Ende der Verbrennung relativ schnell ab (Anhang, Bild A.17), während beim Betriebspunkt 8LPLD_25 die rußenden Zonen noch lange nachglühen. Auffallend ist zusätzlich, daß der Schwerpunkt

des Heizverlaufes beim PLD-System aufgrund der ansteigenden Einspritzrate gegenüber dem CR-System zu späteren Zeiten nach Spritzbeginn verschoben ist.

Betrachtet man sich die integralen Rußtemperaturverläufe in Bild 5.37, so erkennt man beim 100% Lastfall, daß beim CR-System zu Beginn der Verbrennung höhere Temperaturen erreicht werden, und daß die Umsetzung des vorgemischten Kraftstoffanteils bei der PLD-Variante verzögert einsetzt und langsamer abläuft. Aufgrund der längeren Einspritzdauer des PLD-Systems als Folge einer geringeren mittleren Einspritzrate hält die Temperaturabnahme während der Diffusionsverbrennung über einen längeren Zeitraum an. Dies führt zu deutlich niedrigeren Temperaturen in der Phase der Rußnachoxidation, während der Temperaturverlauf bezüglich seiner Steigung wegen der Angleichung der Gemischbildungsgüte gegen Ende der Verbrennung bei beiden Einspritzsystemvarianten in dieser Phase nahezu gleich ist. Die längere Einspritzdauer und die niedrigere Rußoxidationstemperatur gegen Ende der Verbrennung führen beim PLD-System in der 100% Lastvariante zu einer deutlich längeren Brenndauer. Die Unterschiede im Temperaturverlauf beschränken sich im 25% Lastfall auf die länger anhaltende Temperaturabnahme beim PLD-System infolge der verlängerten Einspritzdauer und dem dadurch auf gleichbleibend niedrigerem Temperaturniveau ablaufenden Rußausbrand, was ebenfalls zu einer geringfügigen Verlängerung der Brenndauer führt.

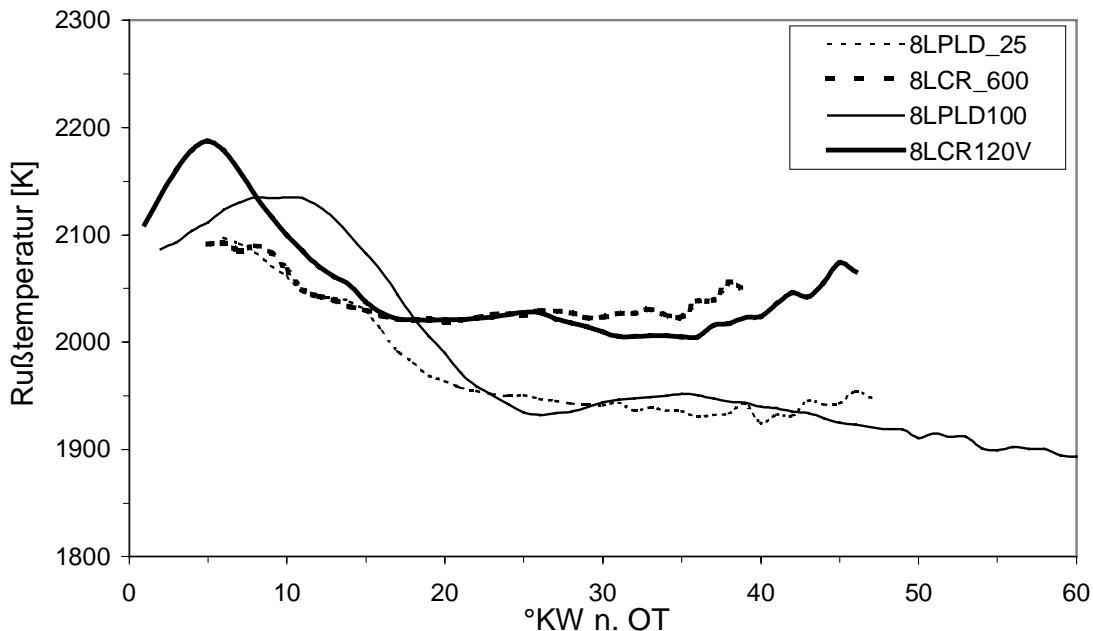


Bild 5.37: Integrale Rußtemperaturverläufe, Einspritzsystemvariation

5.6.4 Schadstoffe

Die NO-Bildungskennzahlverläufe in Bild 5.38 machen deutlich, daß beim PLD-System in beiden Lastfällen wesentlich weniger thermisches NO gebildet wird als beim CR-System. Beim 25% Lastfall liegt das Maximum des NO-Kennzahlverlaufes beim CR-System etwas früher als beim PLD-System, während beim 100% Lastfall die Maxima in der NO-Bildungskennzahl für

beide Varianten etwa zur selben Zeit nach Spritzbeginn auftreten. Aufgrund der jeweils längeren Brenndauer der PLD-Varianten hält auch die NO-Bildung länger an. Der integrale Wert für die thermische NO-Bildung liegt bei den CR-Varianten jedoch deutlich höher.

Die integralen spezifischen Rußkonzentrationsverläufe in Bild 5.39 machen ebenfalls deutlich, daß aufgrund der besseren Gemischbildung die Rußbildung und die Rußnachoxidation bei den CR-Varianten jeweils intensiver abläuft, wodurch nach einem ähnlich hohen Rußkonzentrationsmaximum der integrale Rußkonzentrationswert am Ende der Verbrennung aufgrund des schlechteren Rußausbrandes bei den PLD-Varianten jeweils höher liegt. Wie beim Rußtemperaturverlauf kann man auch hier einen verzögerten Reaktionsablauf beim PLD-System feststellen.

Alle beobachteten Differenzen nehmen mit zunehmender Einspritzdruckdifferenz zu, was bedeutet, daß die gefundenen Unterschiede bei den 25% Lastpunkten jeweils geringer ausfallen als bei den Betriebspunkten mit 100% Last.

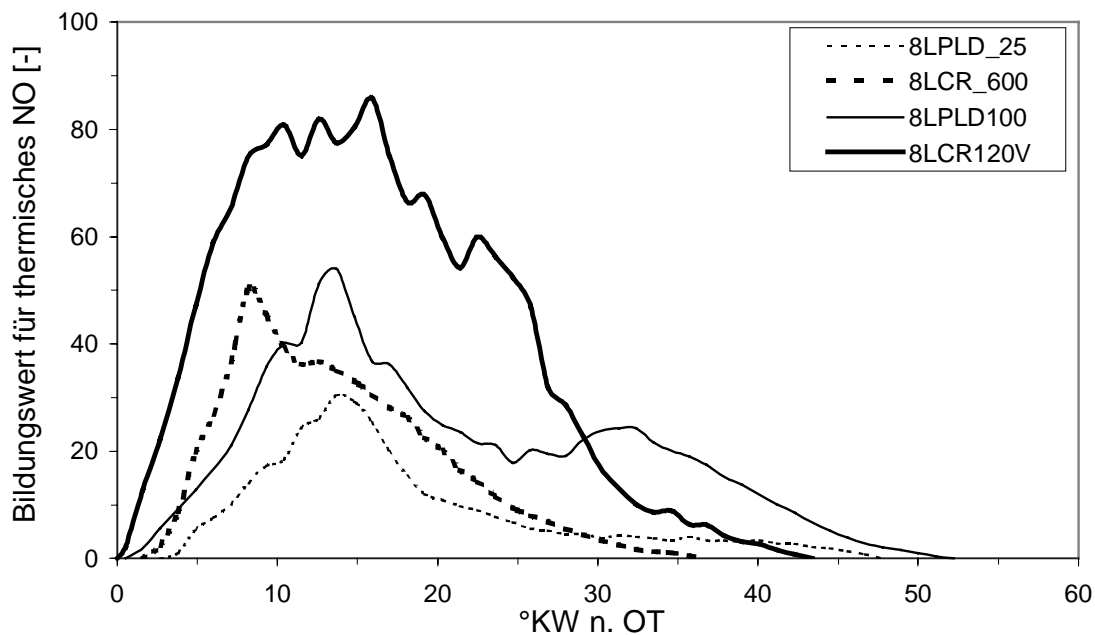


Bild 5.38: NO-Bildungskennzahlverläufe für thermisches NO, Einspritzsystemvariation

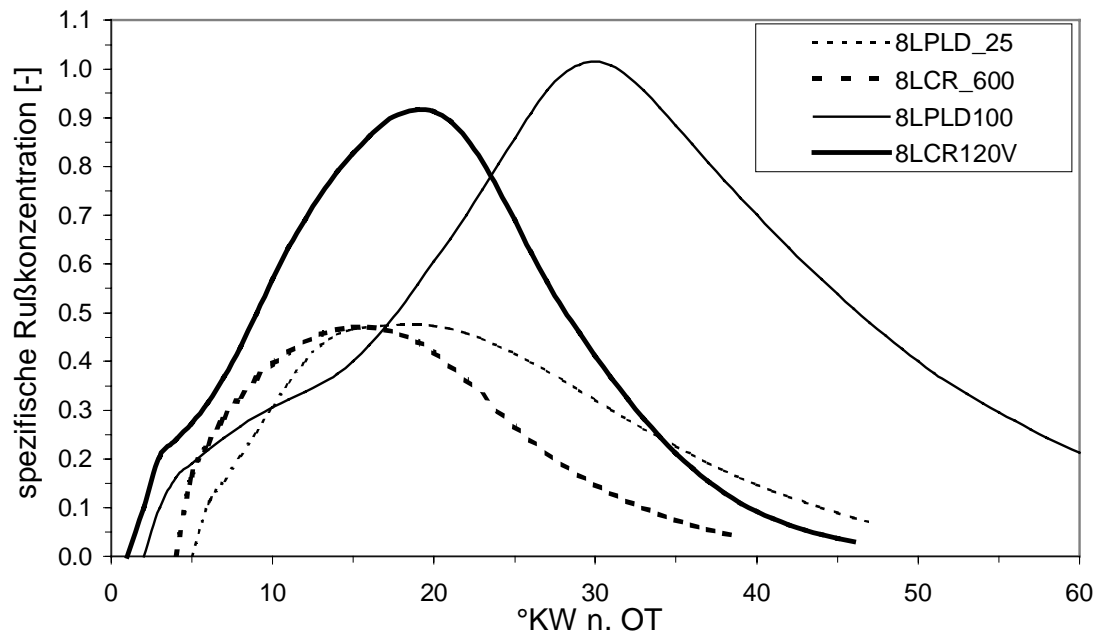


Bild 5.39: Integrale Rußkonzentrationsverläufe, Einspritzsystemvariation

6 Diskussion der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse liefern einige Antworten auf Fragen des Zusammenhanges zwischen den Parametern, die die Einspritzung und die Gemischbildung beeinflussen und ihre Auswirkungen auf den gesamten Verbrennungsablauf. Am Ende wird hier der Zusammenhang zwischen der Zündphase und den entstehenden Schadstoffen herausgearbeitet.

6.1 Einflußfaktoren auf die Gemischbildung

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse bezüglich der Gemischbildung aus den Teilkapiteln der einzelnen Parameterstudien zusammengestellt.

Als für die Einspritzung und Gemischbildung charakteristische Größen wurden der flüssige Strahlspitzenweg und die Strahleindringgeschwindigkeit gewählt. Zusätzlich wird in einer Spalte die Güte der Zerstäubung, Verdampfung und Durchmischung mit dem vorhandenen Luftsauerstoff allgemein beurteilt.
















Zustandsänderung (p_{zyl} und T_{zyl} jeweils bei SB)					Flüssiger Strahl- spitzenweg	Strahleindring- geschwindig- keit	Zerstäubung, Verdampfung, Durchmischung
Last + Aufladung: 25% → 50% → 100%							
PEspr •	p_{zyl} ↑	T_{zyl} ↑	V_e ↑	λ_{ges} ↓			
Spritzbeginnverschiebung: 3°v. → 3°n.							
PEspr •	p_{zyl} ↓	T_{zyl} ↓	V_e •	λ_{ges} •			
Luft → AGR							
PEspr •	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} ↓			
Einspritzdruckanhebung: 600bar → ↑							
PEspr ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •			
Einspritzsystemvariation: PLD → CR							
PEspr ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •			

Tabelle 6.1: Einflußfaktoren auf die Gemischbildung

Als Ergebnis kann man dabei festhalten, daß die Haupteinflußgrößen auf die Gemischbildung auf der Düsenseite beim Einspritzdruck und auf der Brennraumseite beim Zylinderdruck und der Temperatur liegen. Somit kann man die wesentlichsten Änderungen auf die Gemischbildung mit der Last- und Spritzbeginnvariation, sowie der Einspritzdruckvariation erzielen.

Die moderate Verschlechterung in der Gemischbildung bei Abgas-Zumischung steht für die Absenkung des lokalen Luft-Kraftstoffverhältnisses aufgrund des niedrigeren Sauerstoffpartialdruckes und den damit verschlechterten Bedingungen für die nachfolgende Verbrennung ($\lambda_{AGR\ Ges} = 1.85$ gegenüber $\lambda_{Ges} = 2.0$).

6.2 Einflußfaktoren auf die Zündung und die Vormischflamme

In Tabelle 6.2 sind die Auswirkungen der Zustandsänderungen auf die Zündung und die vorgemischte Verbrennung zusammengefaßt.

Zustandsänderung (p_{Zyl} und T_{Zyl} jeweils bei SB)					Zünd- verzug	Abstand der Zünd- orte von der Düse	Maximaler Anstieg OH-Kon- zentration	Zeitl. Ab- stand OH- Bildung zu Rußbildung
Last + Aufladung: 25% → 50% → 100%								
PEspr •	p_{Zyl} ↑	T_{Zyl} ↑	V_e ↑	λ_{ges} ↓				
Spritzbeginnverschiebung: 3°v. → 3°n.								
PEspr •	p_{Zyl} ↓	T_{Zyl} ↓	V_e •	λ_{ges} •				
Luft → AGR								
PEspr •	p_{Zyl} •	T_{Zyl} •	V_e •	λ_{ges} ↓				
Einspritzdruckanhebung: 600bar → ↑								
PEspr ↑	p_{Zyl} •	T_{Zyl} •	V_e •	λ_{ges} •				
Einspritzsystemvariation: PLD → CR								
PEspr ↑	p_{Zyl} •	T_{Zyl} •	V_e •	λ_{ges} •				

Tabelle 6.2: Einflußfaktoren auf die Zündung und die Vormischflamme

Aus den integralen, gemittelten Lichtleiterdaten werden zur Charakterisierung dieses Bereiches die Größen „Zündverzug“, „maximaler Anstieg der OH-Konzentration“ und die „zeitliche Differenz zwischen erstem OH-Chemilumineszenzanstieg und erstem Rußleuchten“ herangezogen. Aus den ausgewählten Bilderserien wird zusätzlich der mittlere Abstand der Zündorte von der Düse ermittelt.

Auf die einzelnen Charakterisierungspunkte haben jeweils unterschiedliche Parameter einen entscheidenden Einfluß. Beim Zündverzug sind die wesentlichen Einflußgrößen der Druck und die Temperatur im Brennraum, wobei eine Erhöhung dieser beiden Parameter eine deutliche Verkürzung des Zündverzuges bewirkt. Die Gründe liegen in der infolge der höheren Reaktionstemperatur gestiegenen Verdampfungsrate und Reaktionsgeschwindigkeit, in dem

aufgrund des höheren Brennraumdruckes gestiegenen Tropfenzerfall am Düsenloch und der höheren Reaktionsdichte aufgrund des größeren Sauerstoffangebotes, wobei die Temperatur den größeren Einfluß auf den Zündverzug besitzt.

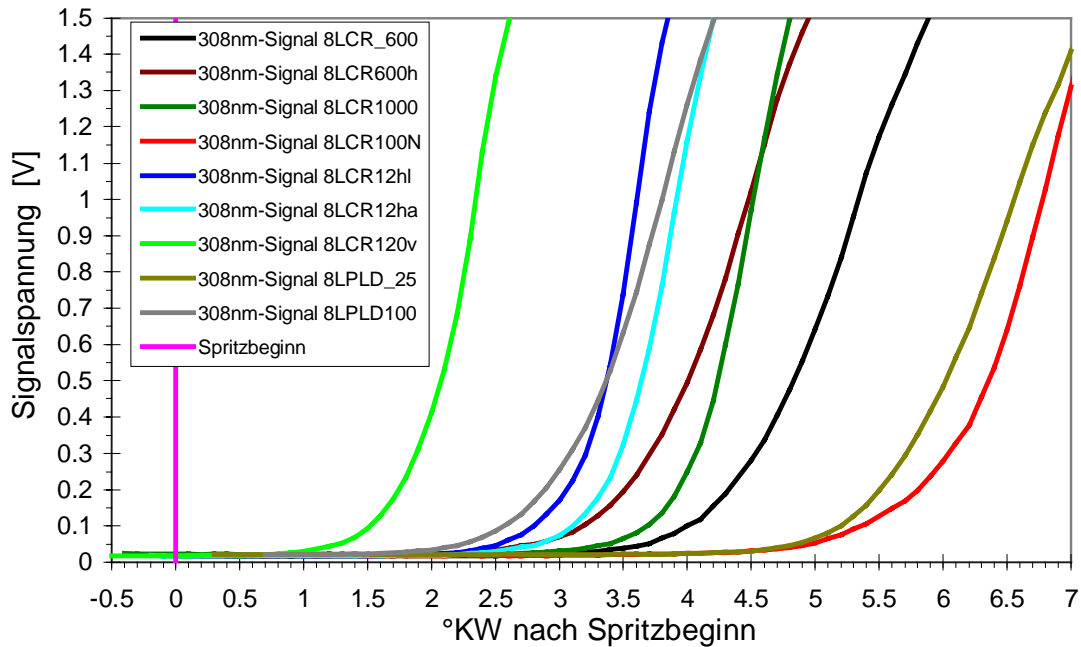


Bild 6.1: Integrale Intensitätsverläufe OH-Leuchten bezüglich Spritzbeginn, alle Varianten

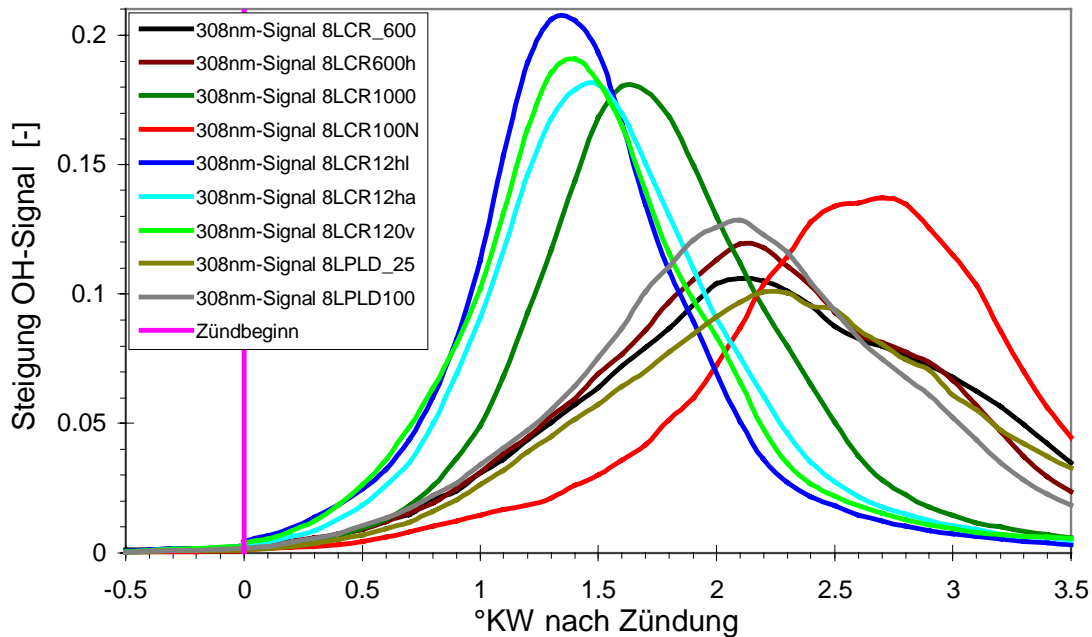


Bild 6.2: Steigungsverläufe des 308 nm - Signals bezüglich Zündbeginn, alle Varianten

Der Parameter Brennraumdruck ist in Verbindung mit dem Einspritzdruck verantwortlich für die Lage der Zündorte. Dabei hat die Druckerhöhung im Brennraum bezüglich der Düse eine abstandsverringende Wirkung auf das statistische Auftreten der Zündorte, während die Einspritzdruckerhöhung die Zündorte in einem größeren Abstand von der Düse auftreten läßt.

Um die Einflüsse auf den Zündverzug noch einmal deutlich zu machen, sind in Bild 6.1 alle OH-Chemilumineszenzverläufe bezüglich des Spritzbeginnes aufgetragen.

Deutlich früher als bei allen anderen Betriebspunkten steigt die OH-Chemilumineszenz bei dem Vollastpunkt mit dem CR-System an. Der 100% Lastfall mit dem PLD-System zeigt beispielhaft, daß eine wesentlich schlechtere Gemischaufbereitung durch einen niedrigeren Einspritzdruck zu Beginn der Einspritzung keinen wesentlich längeren Zündverzug zur Folge hat. Infolge der geringeren Zerstäubungsgüte und der gesunkenen Verdampfungsrate läuft der Anstieg der Intensität des OH-Leuchtens beim Betriebspunkt mit dem PLD-Einspritzsystem jedoch wesentlich langsamer ab. Die auffällige Zündverzugsverlängerung durch eine Spritzbeginnverschiebung nach spät läßt sich vor allem durch die gesunkene Reaktionstemperatur im Brennraum zum Zeitpunkt des Spritzbeginns erklären, da der Druck, wie bereits beschrieben, nur geringfügig abnimmt.

Zur Interpretation der Einflüsse auf die Steigungen der Kurvenverläufe für das OH-Signal, die für die OH-Bildungsrate zum jeweiligen Zeitpunkt stehen, sind in Bild 6.2 die Steigungsverläufe aller untersuchten Varianten dargestellt.

Man erkennt dabei deutlich, daß die OH-Bildungsrate im wesentlichen vom Einspritzdruck abhängt. Mit der Erhöhung des Einspritzdruckes steigt infolge der Verbesserung der Zerstäubungsgüte und Verdampfungsrate aufgrund erhöhter Konvektion die nach der Zündung folgende OH-Bildungsrate stark an. Für die Unterschiede im maximalen Anstieg der OH-Chemilumineszenz-Kurven in den Betriebspunkten mit gleichem Einspritzdruck sind die anderen Parameter zu unterschiedlichen Teilen verantwortlich, wobei die Temperatur im Brennraum dabei die größte Rolle spielt (Spritzbeginnvariation): Mit Erhöhung der Gastemperatur im Brennraum steigt die OH-Bildung stärker an.

Diese intensivere chemische Reaktion infolge einer verbesserten Gemischbildung gilt für den gesamten folgenden Verbrennungsablauf und macht sich dadurch auch im letzten zur Charakterisierung ausgewählten Punkt bemerkbar: Der zeitliche Abstand zwischen dem ersten Auftreten von OH-Chemilumineszenz und dem ersten Auftreten meßbaren Rußleuchtens wird mit der Erhöhung des Einspritzdruckes geringer.

6.3 Einflußfaktoren auf die Diffusionsverbrennung

Die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Diffusionsverbrennung sind in Tabelle 6.3 zusammengefaßt.

Ein Maß zur Charakterisierung der Diffusionsflamme ist der Anteil des mit der Verbrennungsluft vorgemischten Kraftstoffes bei Zündbeginn, der sich aus den Heizverläufen ablesen läßt. Wie in Kapitel „5.1.4 Diffusionsverbrennung“ erläutert, beginnt die rußleuchtende Verbrennung, bevor der vorgemischte Kraftstoffanteil im Brennraum vollständig verbrannt ist. Aus den Heizverläufen kann man erkennen, daß sich die vorgemischte Verbrennung je nach Betriebspunkt über einen Bereich von etwa 3-8°KW erstreckt, während Rußleuchten bereits 1-2°KW nach Zündbeginn auftritt. Während die Vormischflamme die Verbrennung noch bestimmt, hat also bereits die Rußbildung und lokal die Diffusionsverbrennung eingesetzt.

Im Folgenden wird der Bereich der vorgemischten Verbrennung ab dem ersten Rußleuchten, also ab dem Zeitpunkt, bei dem die Beschreibung in Kapitel 6.2 abbricht, in die Diskussion der Diffusionsflamme mit einbezogen.

Zustandsänderung (p_{zyl} und T_{zyl} jeweils bei SB)					Vorgem. Kraftstoff- anteil bei ZB	Brenn- dauer nach Heizverlauf und Film	Rußtempe- raturniveau bei Brenn- beginn	Steigung Rußtempe- raturverlauf n.SE
Last + Aufladung: 25% → 50% → 100%					↓	↑	↑	↓
p_{spr} •	p_{zyl} ↑	T_{zyl} ↑	V_e ↑	λ_{ges} ↓				
Spritzbeginnverschiebung: 3°v. → 3°n.					↑	→	↘	↘
p_{spr} •	p_{zyl} ↓	T_{zyl} ↓	V_e •	λ_{ges} •				
Luft → AGR					↗	↗	↓	↓
p_{spr} •	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} ↓				
Einspritzdruckanhebung: 600bar → ↑					↑	↓	↑	↑
p_{spr} ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •				
Einspritzsystemvariation: PLD → CR					↑	↓	↑	→
p_{spr} ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •				

Tabelle 6.3: Einflußfaktoren auf die Diffusionsverbrennung

Der Anteil an vorgemischtem Kraftstoff im Brennraum hängt von der Einspritzrate, der Güte der Gemischbildung und vom Zündverzug, also der Zeit, die den eingespritzten Tröpfchen von der Einspritzung über das Verdampfen bis zum Zündbeginn bleibt, ab. Die Einspritzrate und die Güte der Gemischbildung steigen mit der Erhöhung des Einspritzdruckes, während der Zündverzug von der Temperatur und dem Druck im Brennraum abhängig ist. Da mit der Erhöhung von Druck und Temperatur im Brennraum bei gleichem Spritzbeginn der Zündverzug verkürzt wird, haben Aufladung und Einspritzdruck also einen gegensätzlichen Einfluß auf den vorgemischten Anteil.

Die Brenndauer ist ein weiteres charakteristisches Merkmal der Diffusionsverbrennung. Wichtigste Parameter zur Variation der Brenndauer sind hierbei der Einspritzdruck und die Brennraumtemperatur während der Verbrennung. Der erhöhte Einspritzdruck verkürzt die Brenndauer aufgrund seiner höheren Einspritzrate und seiner allgemein besseren Gemischbildungseigenschaften, während die Erhöhung der Gastemperatur die Reaktionsgeschwindigkeiten allgemein erhöht. Mit einer Anhebung der Last verlängert sich die Brenndauer aufgrund der erhöhten Einspritzmenge jedoch wieder deutlich. Das Gleichbleiben der Brenndauer bei Spritzbeginnverschiebung nach spät und einer damit verbundenen

Brennraumtemperaturabsenkung bei Spritzbeginn läßt sich mit der Erhöhung des vorgemischten Kraftstoffanteils zum Zündzeitpunkt und dem daraus resultierenden schnelleren Durchbrennen in der heißen Vormischflamme trotz abnehmender thermodynamischer Gastemperatur im Brennraum aufgrund der Abwärtsbewegung des Kolbens erklären.

Die Rußtemperatur liegt zu Beginn der Verbrennung in den meisten Fällen auf einem höheren Niveau als im gesamten weiteren Verlauf. Dies hängt mit der Temperatur in der Vormischflamme zusammen, die grundsätzlich höher ist als die Temperatur in der Diffusionsflamme. Erhöht man den Einspritzdruck und damit den vorgemischten Anteil, so steigt die Rußtemperatur zu Beginn der Diffusionsverbrennung an. Die Erhöhung des Brennraumdruckes und der Temperatur haben dabei denselben Effekt. Eine deutliche Absenkung der gesamten Verbrennungstemperaturen erreicht man durch eine AGR-Zumischung und damit durch eine Verringerung des Gesamt-Luft-Kraftstoff-Verhältnisses.

Nach dem Ende der Einspritzung und Gemischbildung ist der Ablauf der Rußnachoxidation von mehreren Faktoren abhängig. Wichtig erscheinen dabei die Kolbenstellung und der Einspritzdruck bei Spritzende, sowie das Gesamt-Luftverhältnis. Je weiter sich der Kolben von OT entfernt, desto beschleunigter ist die Abnahme der thermodynamischen Größen Druck und Temperatur im Brennraum. Dies ist während der Verbrennung sowohl bei der späten Spritzbeginnvariante als auch bei hoher Last und der damit verbundenen langen Einspritzdauer der Fall. Diese Abnahme der Gastemperatur im Brennraum wirkt der Temperaturerhöhung der Rußpartikel durch deren exotherme Oxidation entgegen und führt von Variante zu Variante zu einem Halten oder einer Abnahme der Rußtemperatur.

Bei der AGR-Variante läuft durch den geringeren Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft die Rußnachoxidation verzögert ab, was zu einer Verringerung der Steigung der Rußtemperaturkurve am Ende der Verbrennung führt.

Bei der Variation PLD-CR wird deutlich, daß der hohe Einspritzdruck zum Ende der Einspritzung beim PLD-System mit einer daraus resultierenden guten Gemischbildung einen auf gleichem Niveau liegenden Temperaturverlauf bei der Rußnachoxidation wie beim CR-System bewirkt.

6.4 Einflußfaktoren auf die Schadstoffbildung

Eine Zusammenfassung der Einflüsse der Parameter auf die Schadstoffbildung ist in Tabelle 6.4 dargestellt. Als aussagekräftigste Charakteristika gelten bei den optischen Messungen die aus den Rußtemperaturen korrelierten NO-Bildungskennzahlverläufe und die Analyse der Rußkonzentrationsverläufe. In Ermangelung einer Korrelation zwischen dem Rußkonzentrationsverlauf und der Schwarzzahl wird aus dem Rußkonzentrationsverlauf dessen Maximum und die anschließende negative Steigung als Maß für die Güte der Rußnachoxidation analysiert. Zur Veranschaulichung der negativen Steigungen in den Rußkonzentrationsverläufen sind diese für alle Varianten in Bild 6.3 invertiert dargestellt.

Zustandsänderung (p_{zyl} und T_{zyl} jeweils bei ZOT)					NO-Bildungs- kennwertverl., NOK-Wert	Maximum der integralen Ruß- konzentration	Intensität der Rußnachoxida- tion (Steigung)
Last + Aufladung: 25% → 50% → 100%					↑	↑	↘
p_{spr} •	p_{zyl} ↑	T_{zyl} ↑	V_e ↑	λ_{ges} ↓			
Spritzbeginnverschiebung: 3°v. → 3°n.					↓	↘	↘
p_{spr} •	p_{zyl} ↓	T_{zyl} ↓	V_e •	λ_{ges} •			
Luft → AGR					↓	↘	↘
p_{spr} •	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} ↓			
Einspritzdruckanhebung: 600bar → ↑					↑	↓	↑
p_{spr} ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •			
Einspritzsystemvariation: PLD → CR					↑	↓	↑
p_{spr} ↑	p_{zyl} •	T_{zyl} •	V_e •	λ_{ges} •			

Tabelle 6.4: Einflußfaktoren auf die Schadstoffbildung

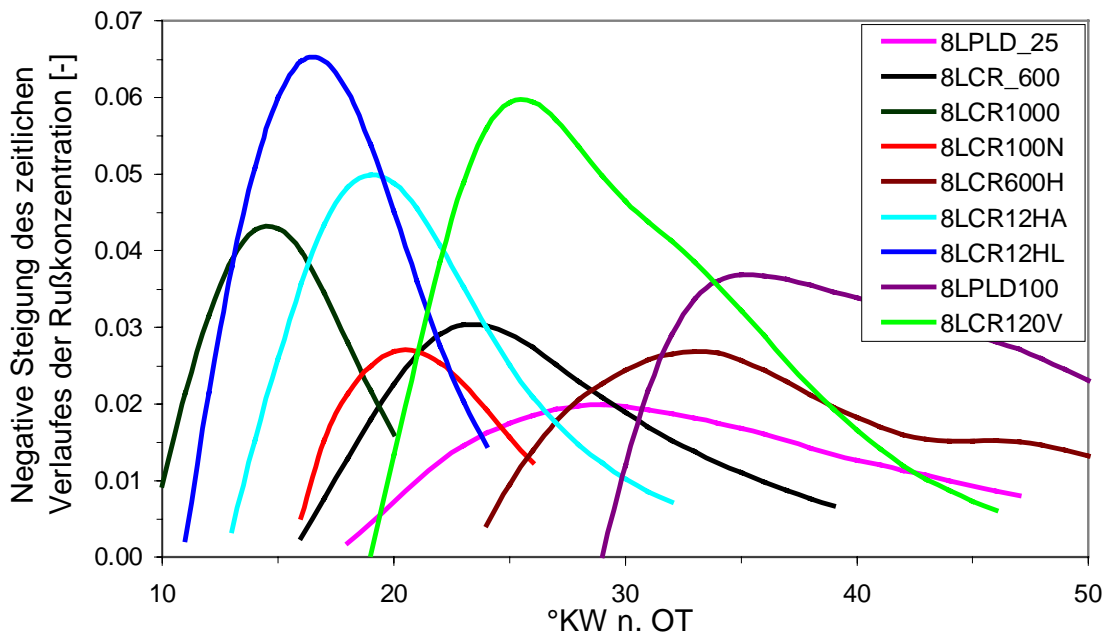


Bild 6.3: Integrale Intensität Rußnachoxidation, alle Varianten

Man erkennt deutlich, daß die Betriebspunkte mit den hohen Einspritzdrücken den höchsten Gradient bei der Abnahme der integralen spezifischen Rußkonzentration nach Einspritzende haben, was der intensivsten Rußnachoxidation zu diesem Zeitpunkt entspricht. Diese Tatsache hängt vermutlich unmittelbar mit der grundlegend besseren Gemischaufbereitung bei diesen

Betriebspunkten zusammen. Die nach „spät“ verschobenen Maxima der Rußnachoxidation bei den Betriebspunkten mit dem PLD-Einspritzsystem und dem 50% Lastpunkt mit dem niedrigen Einspritzdruck sind mit der niedrigen Einspritzrate und der damit zusammenhängenden langen Einspritzdauer zu erklären, nach deren Ende die spezifische Rußkonzentration erst abnehmen kann.

Für einen hohen maximalen Rußkonzentrationswert sorgt eine lange Einspritzdauer (hohe Last, geringe Einspritzrate), was dazu führt, daß bei Einspritzdruckerhöhung und damit verbundener Einspritzdauerverkürzung eine Absenkung des Maximalwertes erreicht wird. Bei der Spritzbeginnvariation führt eine deutliche Vergrößerung des vorgemischten Anteiles zu einer Absenkung des Diffusionsverbrennungsbereiches und zu einer Absenkung der maximalen Rußkonzentration im Verlauf der Verbrennung. Die Rußnachoxidation wird ihrerseits wie die OH-Bildung nach der Zündung hauptsächlich durch einen hohen Einspritzdruck begünstigt, wodurch sich nicht nur die Gemischaufbereitung verbessert, sondern auch die gesamte Verbrennung intensiviert wird. Die Verschlechterung der Rußnachoxidation durch eine Lasterhöhung resultiert aus der Tatsache, daß das Gesamtluftverhältnis mit der Erhöhung der Einspritzmenge trotz Aufladung abnimmt und damit immer weniger Restsauerstoff für die Rußnachoxidation zur Verfügung steht.

Eine Auswirkung auf die Bildung von thermischem NO haben alle Parameter, die einen Einfluß auf die Verbrennungstemperatur und die Brenndauer besitzen. Im betrachteten Vergleich sind dies die Parameter Brennraumdruck und Brennraumtemperatur, Gesamtluftverhältnis, Einspritzmenge und Einspritzdruck. Die durchgeführte Variation dieser Parameter hat jeweils einen deutlichen Einfluß auf die Bildung von thermischem Stickoxid gezeigt. Die effektivste NO-Absenkung wird dabei durch eine geringe Zufuhr von Abgas erreicht. Sehr gut in Bezug auf eine geringe thermische NO-Bildung verhält sich dabei das PLD-System, das mit seiner „schlechten“ Gemischbildung infolge des niedrigen Einspritzdruckes zu Anfang für kleine vorgemischte Kraftstoffanteile im Brennraum und damit für niedrige Temperaturen in der Vormischflamme sorgt. Der hohe Einspritzdruck bei Spritzende bewirkt bei den Betriebspunkten mit dem PLD-Einspritzsystem gegen Ende der Verbrennung eine gute Nachoxidation des gebildeten Rußes, ohne daß sich die Bildung von thermischem NO auf hohem Niveau bewegt.

6.5 Einfluß der Zündung auf die Schadstoffbildung

Bei der Untersuchung des Einflusses der Zündung auf die Schadstoffbildung kann eine sinnvolle Beziehung zwischen dem Anstieg der OH-Chemilumineszenz und damit dem Anstieg der OH-Radikalkonzentration und der Güte der Rußnachoxidation nach Einspritzende herausgearbeitet werden.

Wird zu Anfang der Gemischbildung durch eine gute Zerstäubung und Verdampfung eine gute Vormischung ermöglicht und sind Druck, Temperatur und Sauerstoffangebot im Brennraum ausreichend hoch, so bildet sich ein reaktionsfreudiges Gemisch, nach dessen Zündung im weiteren Verlauf der Verbrennung bis zum Einspritzende durchgehend eine hohe Bildungsrate für OH-Radikale nachgewiesen werden kann. Eine typische Eigenschaft der integralen

Kurvenverläufe aller Betriebspunkte ist, daß bei den gewählten Verstärkungen die Kurve der Intensität des Rußleuchtens bei 800 nm zeitversetzt denselben Anstiegsverlauf besitzt wie der Intensitätsverlauf der OH-Chemilumineszenz bei 308 nm. Diese Charakteristik ist eine Folge der gleichzeitigen Beeinflussung der Reaktionskinetik zur Bildung von OH und Ruß durch eine Variation der untersuchten Parameter.

Aus der Literatur ist bekannt, daß OH-Radikale sehr viel stärker dazu neigen, Ruß zu oxidieren, als etwa molekularer Sauerstoff /48/. Die Rußnachoxidation ist durch eine hohe Konzentration an OH-Radikalen, resultierend aus einer guten Gemischbildung während des Einspritzvorganges, begünstigt. Wird nun die Gemischbildung durch die Änderung eines Parameters „verschlechtert“, so verlangsamt sich automatisch die OH-Bildung am Beginn und die Rußnachoxidation am Ende der Verbrennung. Als Maß der Güte der Rußnachoxidation und der Intensität der OH-Bildung werden die Steigungen der Kurven in einem jeweils relevanten Bereich herangezogen. Bei der OH-Bildung ist das der nahezu lineare Bereich um den Wendepunkt bei der Intensitätszunahme des 308 nm - Signals (Bild 6.2), bei der Rußnachoxidation der ebenfalls nahezu lineare Bereich um den Wendepunkt im abfallenden Kurvenverlauf der integralen spezifischen Rußkonzentration (Bild 6.3: Bereich um die Maxima der Kurven).

Korreliert man diese beiden Werte mit einer Gewichtung der OH-Chemilumineszenz-Intensität mit dem Faktor $I_{OH}/(1-I_{OH})$ linear miteinander, so ergibt sich eine Übereinstimmung der Verhältnisse aus Rußnachoxidation und gewichteter OH-Steigung, die bei keinem Betriebspunkt mit dem CR-Einspritzsystem mehr als 10% von der gebildeten Regressionsgerade abweicht (Bild 6.4).

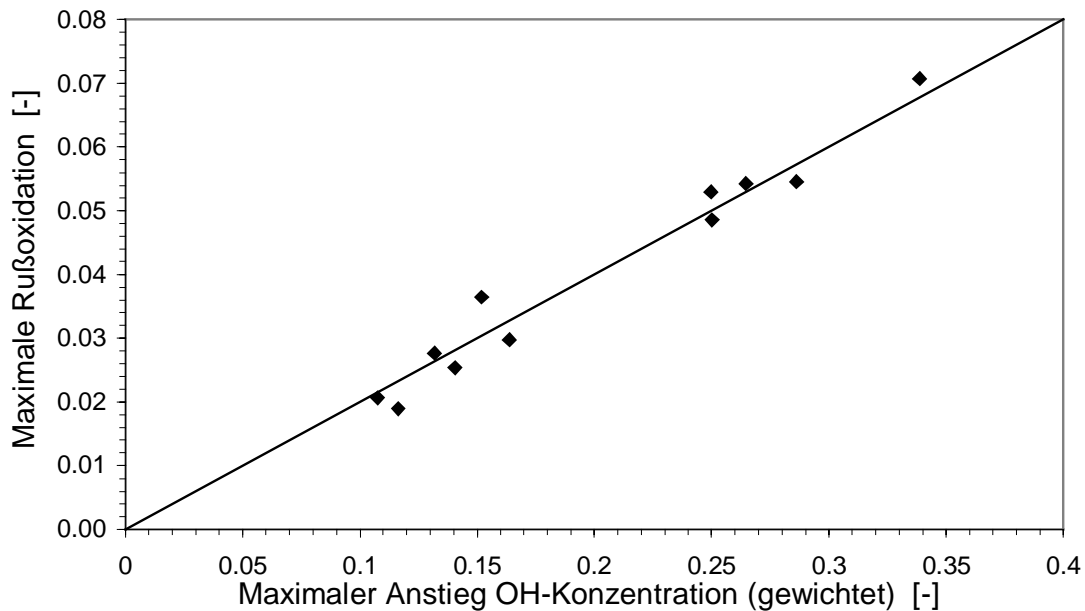


Bild 6.4: Korrelation zwischen OH-Bildung und Rußnachoxidation, alle Varianten

Bei den Betriebspunkten mit dem PLD-Einspritzsystem betragen diese Abweichungen immer noch weniger als 20%, obwohl sich der Einspritzdruck und damit die Güte der

Gemischtaufbereitung und die Intensität der Reaktionskinetik zur OH-Bildung und Rußbildung während des Einspritzverlaufes noch deutlich ändern. Bleibt die Gemischbildung jedoch wie beim CR-System über dem Einspritzvorgang nahezu konstant, so kann mit dieser Korrelation bereits während des Zündvorganges zumindest vergleichend eine qualitative Voraussage über die zu erwartende Rußnachoxidation gemacht werden.

Eine Abhängigkeit der NO-Bildung von der Gemischbildung ist ebenfalls zu erkennen, sie läßt sich jedoch nicht einfach mit einer Korrelationsfunktion beschreiben, da hier der zeitliche Faktor eine große Rolle spielt.

Bekannt ist, daß mit Erhöhung der Last die Einspritzmenge und die Brenndauer zunehmen und damit die NO-Bildung über einen längeren Zeitraum wirksam ist. Im Gegensatz zur Rußrückbildung durch Oxidation gibt es bei den Stickoxiden außer den üblichen Gleichgewichtsreaktionen im Brennraum beim Dieselprozess keine spezielle Reduktionsreaktion, was bedeutet, daß das gebildete NO bis zum Ende der Verbrennung erhalten bleibt.

Ein steilerer Anstieg der OH-Chemilumineszenz nach Zündbeginn und damit eine höhere OH-Bildungsrate steht immer auch für eine intensivere Verbrennung in der Vormischflamme, die wegen ihres höheren Temperaturniveaus gegenüber der Diffusionsflamme für eine erhöhte Bildung von thermischem NO verantwortlich ist. Sichtbar wird dieser erhöhte Energieumsatz auch am Beginn des Heizverlaufes. Diese intensivierte Reaktionskinetik setzt sich auch in der Hauptphase der Verbrennung fort, wodurch weiterhin eine erhöhte NO_x-Produktion stattfindet. Anhand der Einspritzmenge, der Einspritzrate und der Brenndauer läßt sich zusätzlich die Rate des Brennstoffumsatzes abschätzen, die für die Intensität der Verbrennung und damit der NO-Bildung steht.

Mit dem Wissen über diese Zusammenhänge bei der NO-Bildung läßt sich also anhand der OH-Bildungsrate während der Zündphase eine Tendenz der NO_x-Emission im Abgas abschätzen, wenn zusätzlich eine Gewichtung über die Brenndauer erfolgt. Diese relative Aussage kann sehr wertvoll sein, auch wenn man keine absoluten Werte wie bei der beschriebenen sehr guten NO-Korrelation aus den 2D-Temperaturdaten der Verbrennungsbilder erhält (Beispiel: Anhang Bild A.15 bis A.17).

Als Fazit läßt sich festhalten, daß über die Analyse des Anstiegs der OH-Chemilumineszenz nach Zündbeginn eine sehr gute qualitative Aussage über die Intensität der Rußnachoxidation nach Einspritzende und in der vergleichenden Bewertung auch eine Aussage über eine höhere oder niedrigere Rußemission im Abgas getroffen werden kann.

Ebenso kann in der vergleichenden Untersuchung qualitativ die Aussage getroffen werden, daß bei dem Betriebspunkt mit dem steileren Anstieg der anfänglichen integralen OH-Chemilumineszenz zweier Varianten mit derselben Einspritzmenge auch eine erhöhte NO-Emission im Abgas zu erwarten ist. Ein Einfluß des Zündvorganges auf die Bildung von NO und Ruß ist somit also vorhanden, ein Einfluß auf die Schadstoffemission kann jedoch nur qualitativ vergleichend abgeschätzt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, das Verständnis für den Zündprozeß beim DE-Dieselmotor durch experimentelle Untersuchungen mit spezieller, gegenüber früheren Messungen verbesserter optischer Meßtechnik zu erweitern, um damit Lücken im detaillierten Verständnis des Dieselprozesses zu schließen. In der Zusammenfassung wird noch einmal dargestellt, daß es im Rahmen dieser Arbeit gelungen ist, wichtige Zusammenhänge sowohl zwischen den Einspritzparametern als auch mit den thermodynamischen Bedingungen im Brennraum und dem Gemischbildungs- und Zündprozeß herauszuarbeiten. Damit stehen für theoretische Betrachtungen der Zündphase wesentliche experimentelle Ergebnisse zur Verifikation von Zündmodellen zur Verfügung, die für die vollständige Beschreibung des Dieselprozesses notwendig sind.

7.1 Zusammenfassung

Die Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen ergibt, daß mit Hilfe der optischen Verbrennungsuntersuchungen vorhandene Erkenntnisse aus der Literatur bezüglich des gesamten Verbrennungsvorganges bestätigt, vertieft und teilweise ergänzt werden. Mit der Auswertung der Hochgeschwindigkeits-Verbrennungsfilme wird die Hauptphase der Verbrennung transparenter gemacht und zusätzlich können zur Bestätigung der über die Indizierung ermittelten Erkenntnisse neue Aussagen zu Strömungseffekten im Zylinder durch den Einspritzimpuls sowie eine NO-Korrelation abgeleitet werden. Neue Erkenntnisse zum besseren Verständnis der Selbstzündung im DE-Dieselmotor ergeben sich aus den 2D- (ICCD-Kameraaufnahmen) und 0D-Daten (integrales Lichtleitersignal) der OH-Chemilumineszenzmessungen bei der Wellenlänge von 308 nm, die im Folgenden kurz zusammengefaßt sind.

Zündorte treten bei der Verbrennung in DE-Dieselmotoren mit Mehrlochdüsen an mehreren Einspritzstrahlen gleichzeitig auf. Die Zündung wird also im Gegensatz zur ottomotorischen Verbrennung an mehreren Stellen im Brennraum zur selben Zeit eingeleitet, wobei die Verdampfung, die Vermischung mit Luft und die Verweilzeit eines eingespritzten Kraftstofftröpfchens im Brennraum entscheidend für den Beginn einer selbsttätigen Verbrennung an diesem Ort sind. Daraus resultiert, daß bei aneinander angrenzenden Zündzonen nicht unbedingt eine Zündzone von der anderen „angezündet“ wird, und daß bei einer Verlängerung der Verweilzeit im Brennraum bis zur Selbstzündung die Zündorte infolge des in Strahlachse gerichteten Impulses des Gemisches in größerer Entfernung von der Düse entstehen. Im Vergleich zur CH-Chemilumineszenz bei 430 nm liegen die Zonen deutlichen OH-Leuchtens weiter von der Strahlachse entfernt, was bedeutet, daß sie innerhalb der Gemischwolke, die den flüssigen Einspritzstrahl umgibt, vor allem in kraftstoffärmeren Bereichen auftreten. Dies deckt sich mit der Literatur, in der CH-Radikale vorwiegend in λ -Bereichen von 0,6 bis 0,8 auftreten, während eine maximale OH-Konzentration stets im stöchiometrischen Bereich von $\lambda = 1$ zu finden ist /38/-/39/, /42/-/43/, /46/-/48/.

Bei einer Zumischung von AGR ändert sich bei identischer Verdampfung der eingespritzten Kraftstofftröpfchen das Luft-Kraftstoffverhältnis um den Einspritzstrahl, so daß stöchiometrisches Gemisch in einem größeren Abstand zur Strahlachse entsteht, wo deutliche OH-Chemilumineszenz detektiert werden kann. Ebenso ist die Intensität des Eigenleuchtens von OH-Radikalen an den einzelnen Zündorten bei einem durch Abgas-Zumischung verminderten Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft und damit verminderter Reaktionsrate geringer als ohne AGR.

Betrachtet man die Lage der Zündorte in ihrem Abstand zur Einspritzdüse, so ergibt sich, daß die Variation des Einspritzdruckes und des Gegendruckes im Brennraum sowie der Zündverzug den Zündort beeinflussen. Sowohl durch einen höheren Einspritzdruck als auch bei einer längeren Zündverzugszeit treten die ersten Zündzonen weiter von der Düse entfernt auf, während eine Erhöhung des Gegendruckes im Brennraum den Abstand der Zündorte zur Düse verkürzt. Eine wichtige Erkenntnis vor allem für die theoretische Modellierung der Selbstzündung ist dabei, daß erste OH-Chemilumineszenz bei den meisten Betriebspunkten in direkter Umgebung der Düse zu finden ist. Wie in Kapitel „5.1 Analyse des Prozessablaufes beim Basisbetriebspunkt“ in Bild 5.3 zu sehen ist, befindet sich eine hohe Auftretswahrscheinlichkeit von Zündzonen in einem nahezu geschlossenen Kreis in einem Abstand von etwa 5 mm von der Düse.

Durch die sehr niedrige Intensität der OH-Chemilumineszenz während des Zündprozesses wurden die diesen Aussagen zugrunde liegenden ICCD-Aufnahmen, die in Bilderserien im Anhang dargestellt sind, erst mit der im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten optischen Meßtechnik möglich, die im Vergleich zu Messungen in der Literatur eine um den Faktor 100 erhöhte Empfindlichkeit besitzt /38/-/39/, /41/.

Auswirkungen der Lage der Zündorte auf die weitere Entwicklung der Verbrennung wurden nicht untersucht, jedoch lassen sich über die integralen Intensitätsverläufe der OH-Chemilumineszenz bei 308 nm qualitativ vergleichende Aussagen über den Verbrennungsablauf und die Schadstoffentstehung machen. Eine tendenzielle Voraussage der Bildung von thermischem NO und der zu erwartenden Intensität der Rußnachoxidation durch eine Interpretation der Zündphase ist mit Einschränkungen möglich, eine sehr gute NO-Korrelation über die Temperatúrauswertung der Filmbilder ist in der Arbeit dargestellt.

7.2 Ausblick

Für die vollständige Erforschung des Dieselprozesses sind noch umfangreiche Arbeiten zu leisten. Der Beitrag dieser Arbeit zur Erweiterung des Verständnisses beim Zündprozeß ist ein Mosaikstein für die Erforschung eines Bereiches, der im Gegensatz zur Phase der Strahlausbreitung und der Diffusionsverbrennung noch relativ unerschlossen ist. Mit einem weiter verbesserten Kamerasystem, mit dem im interessierenden UV-Bereich von 308 nm Bildsequenzen in Zeitabständen von wenigen μs möglich wären, könnte die tatsächliche Weiterentwicklung von Zündzonen experimentell erfaßt werden und somit weitere Erkenntnisse über den Bereich der Selbstzündung gewonnen werden. Insgesamt stellt die Weiterentwicklung der 2D-Chemilumineszenz-Meßtechnik hohe Anforderungen an die Verbesserung der einzelnen Bausteine, was jedoch lohnenswert erscheint, da die damit gewonnenen Erkenntnisse zur Ergänzung der mit der Laser-Meßtechnik und Lichtleittechnik erzielten Ergebnisse für eine Vervollständigung des Verständnisses beim Zündprozeß wertvoll sind.

8 Literatur

- /1/ Schittler, M., Fränkle, G. „*Entwicklung der Mercedes-Benz Nutzfahrzeug-Motoren zur Erfüllung verschärfter Grenzwerte*“. MTZ Motortechnische Zeitschrift 55, 1994
- /2/ Lange, W., Reglitzky, A., Krumm, H., Cowley, L. „*Potential des Dieselkraftstoffes zur Senkung von Partikel- und NOx-Emissionen von Nutzfahrzeugen*“. MTZ Motortechnische Zeitschrift 54, 1993
- /3/ Velji, A., Danckert, B. „*Verbrennungsentwicklung mit einem Common-Rail-Einspritzsystem*“. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Sonderausgabe, 1996
- /4/ Shiozaki, T., Nakajima, H., Yokota, H., Miyashita, A. „*The Visualization and its Analysis of Combustion Flame in a DI Diesel Engine*“. SAE-Paper 980141, 1998
- /5/ Heywood, J.B. „*Internal Combustion Engine Fundamentals*“. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- /6/ Warnatz, J., Maas, U. „*Technische Verbrennung; Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellbildung, Schadstoffentstehung*“. Springer Verlag, 1993
- /7/ Gutheil, E. „*Sprayverbrennung*“. Vorlesungsumdruck, Stuttgart, 1993
- /8/ Pischinger, F. „*Verbrennungsmotoren I+II*“. Vorlesungsumdruck, Aachen, 1995
- /9/ Spicher, U. „*Verbrennungsmotoren A+B*“. Vorlesungsumdruck, Karlsruhe, 1996
- /10/ Essers, U. „*Verbrennungsmotoren I-III*“. Vorlesungsumdruck, Stuttgart, 1993
- /11/ Bosch „*Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*“. VDI-Verlag, 20. Auflage, 1987
- /12/ Hiroyasu, H., Arai, M. „*Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines*“. Transactions of the SAE, Vol.99, Sect. 3, pp. 1050-1061, 1990
- /13/ Renner, G. „*Einfluß düsen- und einspritzsystemseitiger Parameter auf das Strahlausbreitungs-, Gemischbildungs- und Brennverhalten bei CR Einspritzsystemen*“. Vortragsunterlagen, CR Workshop, Stuttgart, 1997
- /14/ Renner, G. „*Strahl- und Gemischbildungsverhalten aktueller Common-Rail-Einspritzsysteme am Beispiel des OM 611*“. Vortragsunterlagen, Stuttgart, 1996
- /15/ Schmalzing, C. „*Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Strahlausbreitungs- und Verdampfungsverhalten aktueller CR- und PLD-Einspritzsysteme*“. Dissertation in Vorbereitung, 1998
- /16/ Keller, F. „*Grundsatzuntersuchungen zum Strahlausbreitungs- und Gemischbildungsverhalten bei PLD- und CR-Einspritzsystemen*“. Persönliche Mitteilung, 1997
- /17/ Naber, J. D., Siebers, D. L. „*Effects of Gas Density and Vaporisation on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays*“. SAE-Paper 960034, 1996
- /18/ Espey, C., Dec, J. E. „*Soot and Liquid-Phase Fuel Distributions in a Newly Designed Optically Accessible DI Diesel Engine*“. Sandia Report 8690C, 1993

- /19/ Dec, J. E., Espey, C. „*Soot and Fuel Distributions in a DI Diesel Engine via 2-D Imaging*“. SAE-Paper 922307, 1992
- /20/ Espey, C., Dec, J. E., Litzinger, T. A., Santavicca, D. A. „*Quantitative 2-D Fuel Vapor Concentration Imaging in a Firing DI Diesel Engine Using Planar Laser-Induced Rayleigh Scattering*“. SAE-Paper 940682, 1994
- /21/ Espey, C., Dec, J. E. „*The Effect of TDC Temperature and Density on the Liquid-Phase Fuel Penetration in a DI Diesel Engine*“. SAE-Paper 952456, 1995
- /22/ Wirth, R. „*Entwicklung von kombinativen optischen Meßtechniken zur Untersuchung der Strahlausbreitung, Gemischbildung und Zündung unter dieselmotorischen Temperaturen und Drücken*“. Dissertation, Stuttgart, 1996
- /23/ König, G. „*Autoignition and Knock Aerodynamics in Engine Combustion*“. Dissertation, University of Leeds, Dept. of Mechanical Engineering, 1993
- /24/ Stapf, P. „*Simulation des Zündbeginns an einem n-Heptan-Tröpfchen*“. Persönliche Mitteilung, 1996
- /25/ Streule, T. „*Simulation des dieselmotorischen Verbrennungsprozesses*“. Dissertation in Vorbereitung, 1998
- /26/ Huynh, N.-H. „*Untersuchungen über die räumliche Flammenausbreitung bei Dieselmotoren mit direkter Einspritzung*“. Dissertation, Aachen, 1987
- /27/ Scheid, E., Xu, H., Reuter, U. „*Orte der Selbstzündung bei dieselmotorischer Einspritzung*“. Konferenz-Einzelbericht: Motorische Verbrennung, Aachen, 1988
- /28/ Scheid, E., Xu, H. „*Einfluß von Wänden auf Strahlausbreitung und Zündverhalten bei dieselmotorischer Einspritzung*“. Konferenz-Einzelbericht: Motorische Verbrennung, Aachen, 1990
- /29/ Xu, H. „*Einfluß von Wänden auf Strahlausbreitung und Zündverhalten unter dieselmotorischen Bedingungen*“. Dissertation RWTH Aachen, 1991
- /30/ Binder, K. „*Einfluß der Randbedingungen auf den Zündort von Dieselstrahlen*“. Vortragsunterlagen zum FVV-Workshop, 1992
- /31/ Kosaka, H., Nishigaki, T., Kamimoto, T., Sano, T., Matsutani, A., Harada, S. „*Simultaneous 2D Imaging of OH Radicals and Soot in a Diesel Flame by Laser Sheet Techniques*“. SAE-Paper 960834, 1996
- /32/ Puri, R., Santoro, R. J. „*The Oxidation of Soot and Carbon Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames*“. Combustion and Flame, vol. 97, pp.125-144, 1994
- /33/ Knoche, K.-F., Brüggemann, D., Eisele, G., Koss, H.-J. „*Optische Untersuchungen der Kraftstoffverteilung und -zündung in einem Einspritzstrahl*“. Konferenz-Einzelbericht: Motorische Verbrennung, Aachen, 1993
- /34/ Eisele, G., Koss, H.-J., Knoche, K.-F. „*Gemischbildung und Vorreaktionen in einem Einspritzstrahl unter dieselmotorischen Randbedingungen*“. VDI Berichte 1090, 1993

- /35/ Koß, H.-J. „Spektroskopische Untersuchungen zur Kraftstoffeinspritzung“. Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- /36/ Dec, J. E., Coy, E. B. „OH Radical Imaging in a DI Diesel Engine and the Structure of the Early Diffusion Flame“. SAE-Paper 960831, 1996
- /37/ Dec, J. E., Coy, E. B., Porter, E. L. „OH Radical Imaging in a DI Diesel Engine and the Structure of the Diffusion Flame“. Sandia Combustion Research Technical Review, 1997
- /38/ Fujimoto, H., Iida, H., Aoyama, T., Senda, J. „Analysis of combustion characteristics in diesel flame by means of chemiluminescence“. Konferenz-Einzelbericht, International Symposium COMODIA 94, 1994
- /39/ Dec, J. E., Espey, C. „Ignition and Early Soot Formation in a DI Diesel Engine Using Multiple 2D Imaging Diagnostics“. SAE-Paper 950456, 1995
- /40/ Shiozaki, T., Miyashita, A., Aoyagi, Y., Joko, I. „The Analysis of Combustion Flame in a DI Diesel Engine; Part two: Hydroxyl Radical Emission versus Temperature“. Konferenz-Einzelbericht, International Symposium COMODIA 94, 1994
- /41/ Broll, H. „Entwicklung eines Fluoreszenzmeßverfahrens für Zündungsuntersuchungen an Einspritzstrahlen bei hohen Temperaturen und Drücken“. Dissertation, Bonn, 1998
- /42/ Gaydon, A. G. „The Spectroscopy of Flames“. Chapman & Hall, London, 1957
- /43/ Gaydon, A. G., Wolfhard, H. G. „Flames - Their Structure, Radiation and Temperature“. Chapman & Hall, 4th edition, 1973
- /44/ Pittermann, R., Hinz, M., Enke, W., Budack, R., Sandig, R. „Ottomotorische Verbrennung im Dieselmotor“. MTZ Motortechnische Zeitschrift 58, 1997
- /45/ Espey, C., Dec, J. E. „The Effect of TDC Temperature and Density on the Liquid-Phase Fuel Penetration in a DI Diesel Engine“. SAE-Paper 952456, 1995
- /46/ N. N., „Modellierung der Bildung von Ruß bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen“. Statusbericht zum Entwicklungsvorhaben, Stuttgart-Kaiserslautern, 1994
- /47/ Antoni, C., Bockhorn, H., Born, C., Krümming, N., Mayr, B., Peters, N., Pittermann, R., Schön, A., Streibel, T., Winzer, R., „Kinetik der Rußentstehung und -oxidation in DI-Dieselmotoren bei Abgasrückführung“. Abschlußbericht zum FVV-Vorhaben Rußkinetik, Frankfurt, 1999
- /48/ Maly, R. R., Stapf, P., König, G. „Neue Ansätze zur Modellierung der Rußbildung“. Vortragsunterlagen, Esslingen, 1998
- /49/ Kobayashi, S., Sakai, T., Nakahira, T., Komori, M., Tsujimura, K. „Measurement of Flame Temperature Distribution in DI Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection“. SAE-Paper 920692, 1992

- /50/ Shakal, J. S., Martin, J. K. „*Imaging and Spatially Resolved Two-Color Temperature Measurements Through a Coherent Fiberoptic: Observation of Auxiliary Fuel Injection Effects on Combustion in a Two-Stroke DI Diesel*“. SAE-Paper 940903, 1994
- /51/ Reusch, M. „*Aufbau und Inbetriebnahme eines optisch zugänglichen 1-Zylinder-Dieselmotors*“. Studienarbeit durchgeführt bei der Daimler Benz AG, 1994
- /52/ Ahn, S. K., Matsui, T., Kamimoto, T., Matsuoka, S. „*Measurement of Flame Temperature Distribution in a DI Diesel Engine by Means of Image Analysis of Nega-Color Photographs*“. SAE-Paper 810183, 1981
- /53/ Pinson, J. A., Ni, T., Litzinger, T. A. „*Quantitative Imaging Study of the Effects of Intake Air Temperature on Soot Evolution in an Optically-Accessible DI Diesel Engine*“. SAE-Paper 942044, 1994
- /54/ Dec, J. E., Espey, C. „*Soot and Fuel Distributions in a DI Diesel Engine via 2-D Imaging*“. SAE-Paper 922307, 1992
- /55/ Kerckhoff, A. „*Bewertung von Optimierungsmaßnahmen an einem OM 605 VK-PKW-Dieselmotor anhand von optischen Verbrennungsuntersuchungen*“. Diplomarbeit durchgeführt bei der Daimler Benz AG, 1996
- /56/ Espey, C., Dec, J. E. „*Diesel Engine Combustion Studies in a Newly Designed Optical-Access Engine Using High-Speed Visualization and 2-D Laser Imaging*“. SAE-Paper 930971, 1993
- /57/ Dec, J. E. „*Soot Distribution in a DI Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser-Induced Incandescence, Elastic Scattering, and Flame Luminosity*“. SAE-Paper 920115, 1992
- /58/ Stapf, P. „*Simulation der Bildung von thermischem NO bei verschiedenen Reaktionstemperaturen*“. Persönliche Mitteilung, Stuttgart, 1997
- /59/ Kleinschmidt, W. „*Untersuchung des Arbeitsprozesses und der NO, NO₂ und CO-Bildung in Ottomotoren*“. Dissertation, Aachen, 1974
- /60/ Maly, R. R., König, G., Bertsch, D., Uslu, S. „*Engine Measurements and NO & PM Reduction*“. 3rd Periodic Report, EU-Forschungsvorhaben PRIDE, 1997
- /61/ Chikahisa, T., Konno, M., Murayama, T., Kumagai, T. „*Analysis of NO formation characteristics and its control concepts in diesel engines from NO reaction kinetics*“. JSAE Review 15, p. 297-303, 1994
- /62/ Dec, J. E., Cnaan, R. E. „*PLIF Imaging of NO Formation in a DI Diesel Engine*“. SAE-Paper 980147, 1998
- /63/ Hötger, M., Winzer, R., Antoni, C. „*Integrale Lichtleit-Meßtechnik zur experimentellen Untersuchung des Verbrennungsablaufs im Dieselmotor*“. FVV-Forschungsbericht, Heft 607, 1996
- /64/ Hartmann, J. „*Zweidimensionale Temperaturbestimmung mittels Zwei-Wellenlängen-Meßverfahren*“. Dokumentation, IPE, Universität Stuttgart, 1996

- /65/ Bertsch, D., Sauter, F. „Optimierung der 2D-2-Farben-Methode zur Rußtemperatur- und Rußkonzentrationsanalyse von Verbrennungsfilmen“. Auswertungsanleitung, 1997
- /66/ FEV „Bedienungsanleitung für Flexibles Elektronisches Verbrennungs-Indizier-System (FEVIS)“. Bedienungsanleitung, Aachen, 1992
- /67/ König, G., Laib, R. „Schadstoffemissionen eines Einzylinder-Nfz-DE-Diesel-aggregates“. Persönliche Mitteilung, Stuttgart, 1997

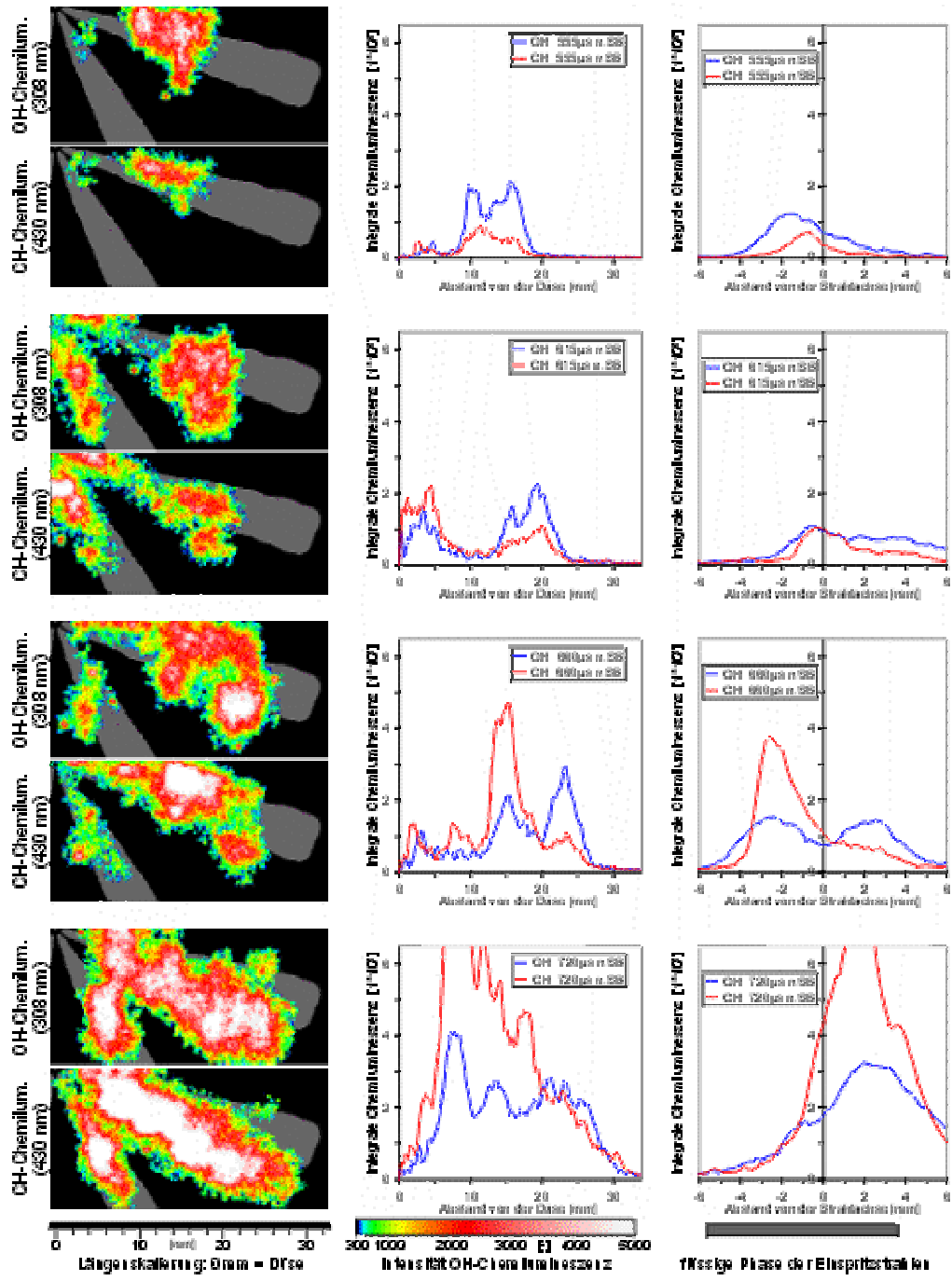


Bild A.1: OH- und CH-Chemilumineszenz in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR_600

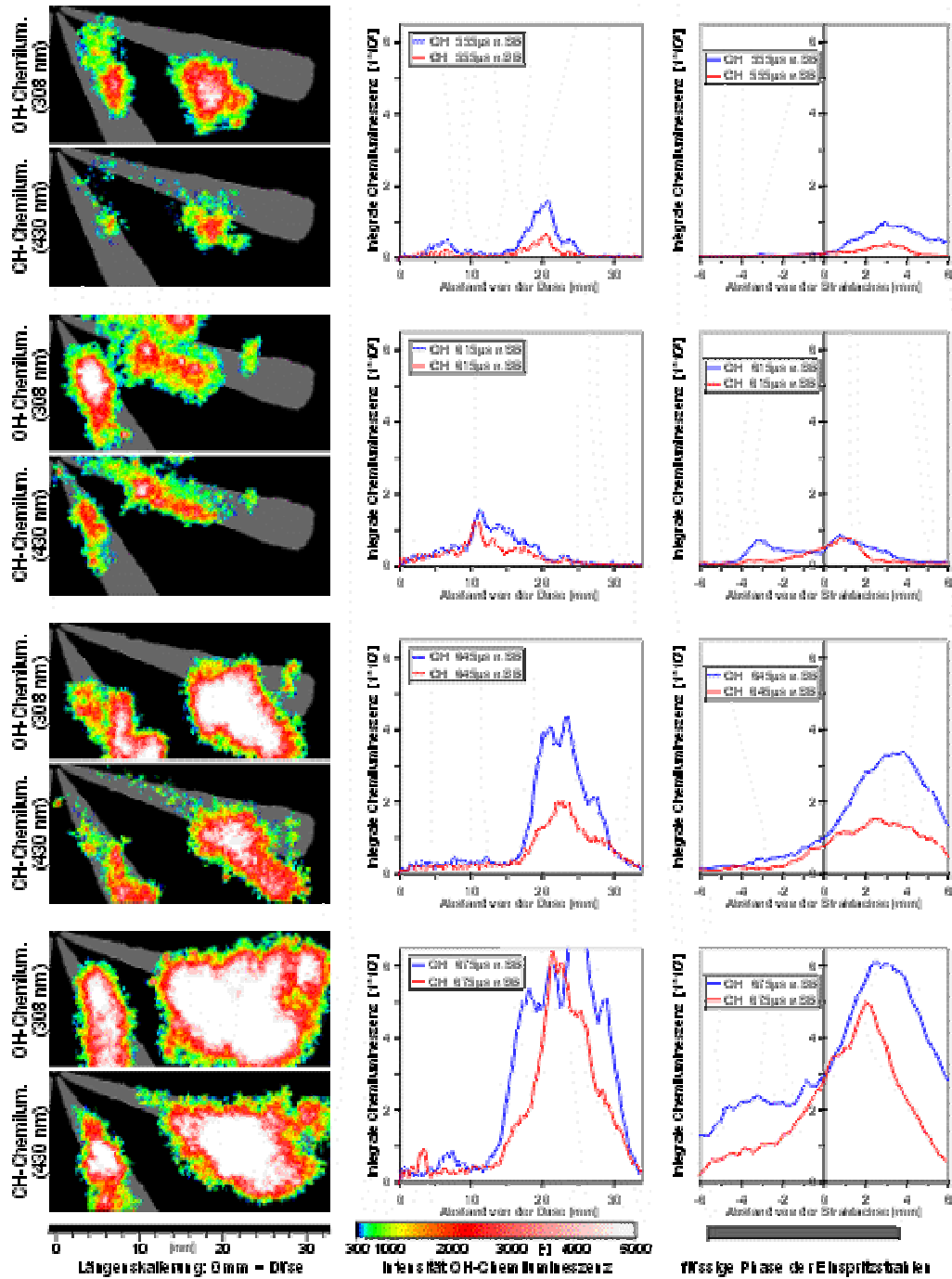


Bild A.2: OH- und CH-Chemilumineszenz in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR1000

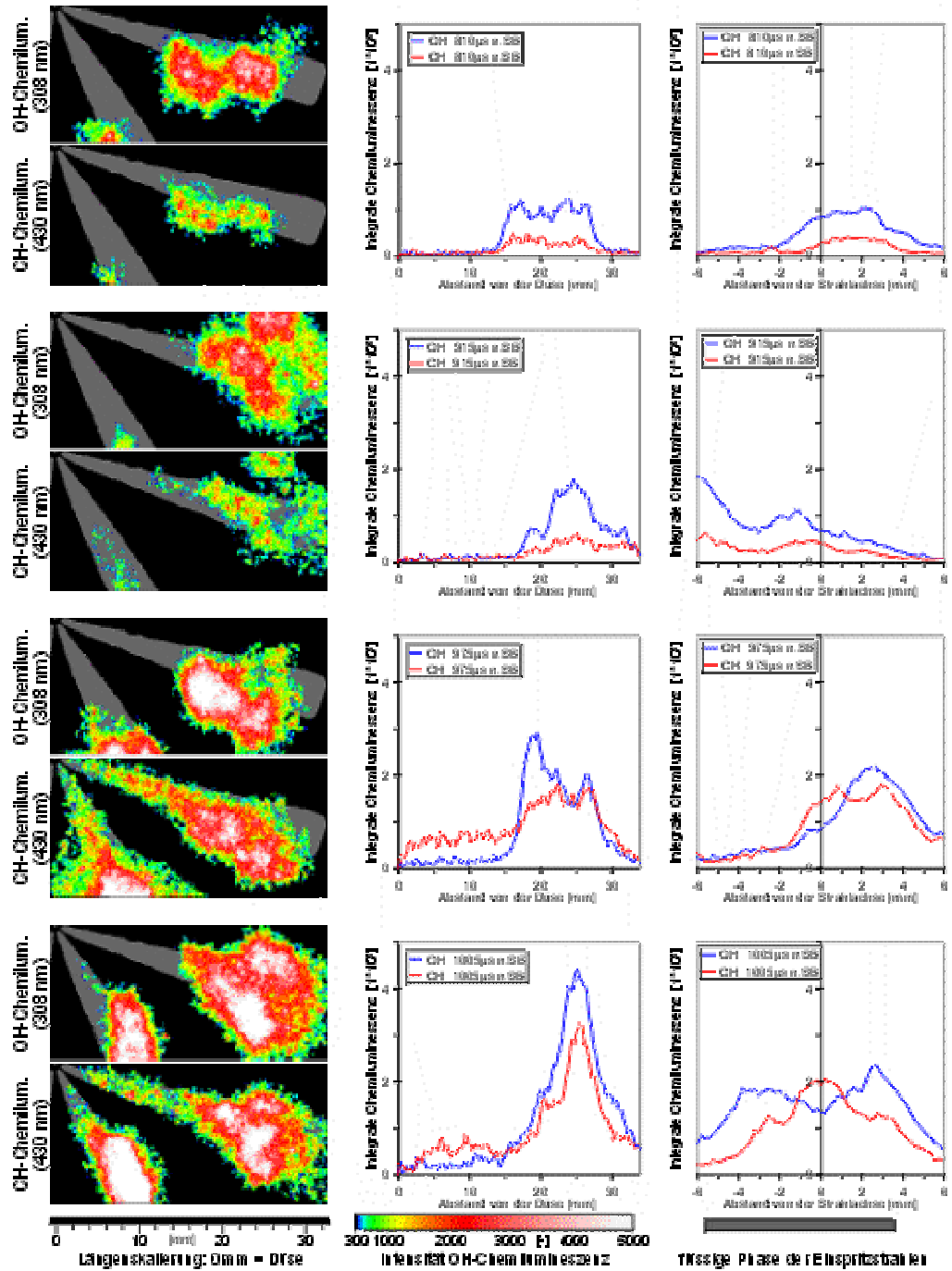


Bild A.3: OH- und CH-Chemilumineszenz in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR100N

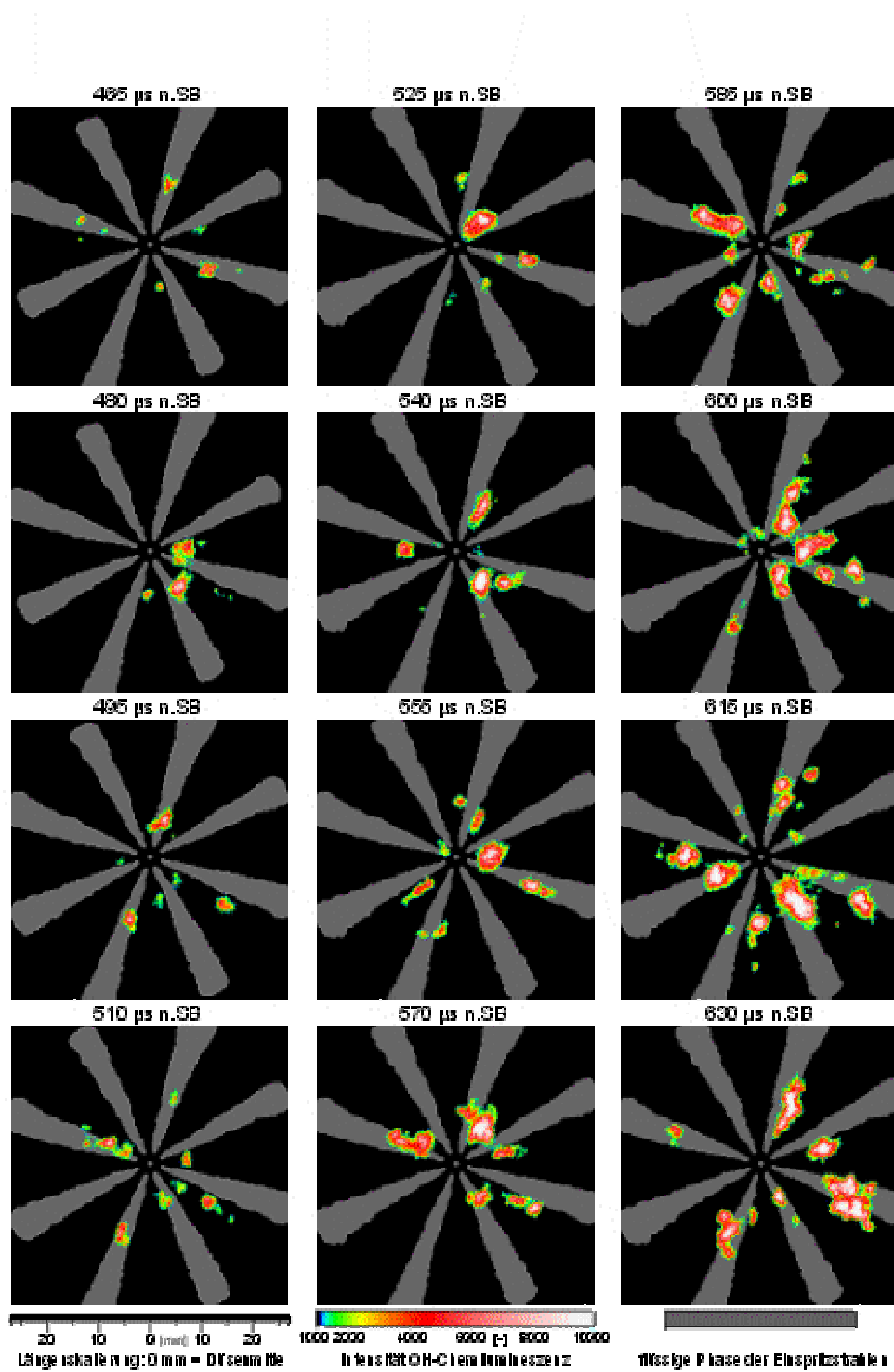


Bild A.4: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR_600

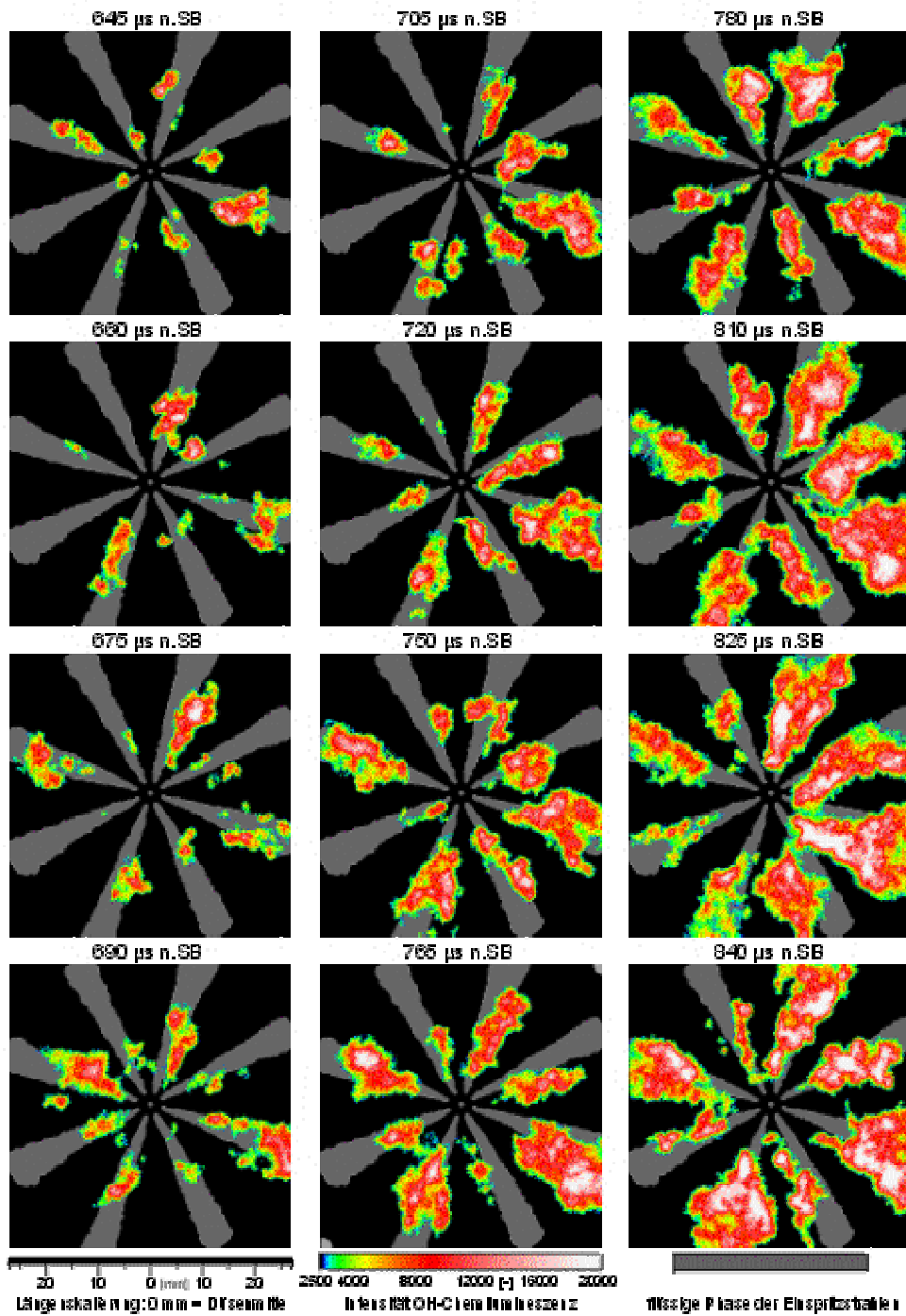


Bild A.5: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR_600

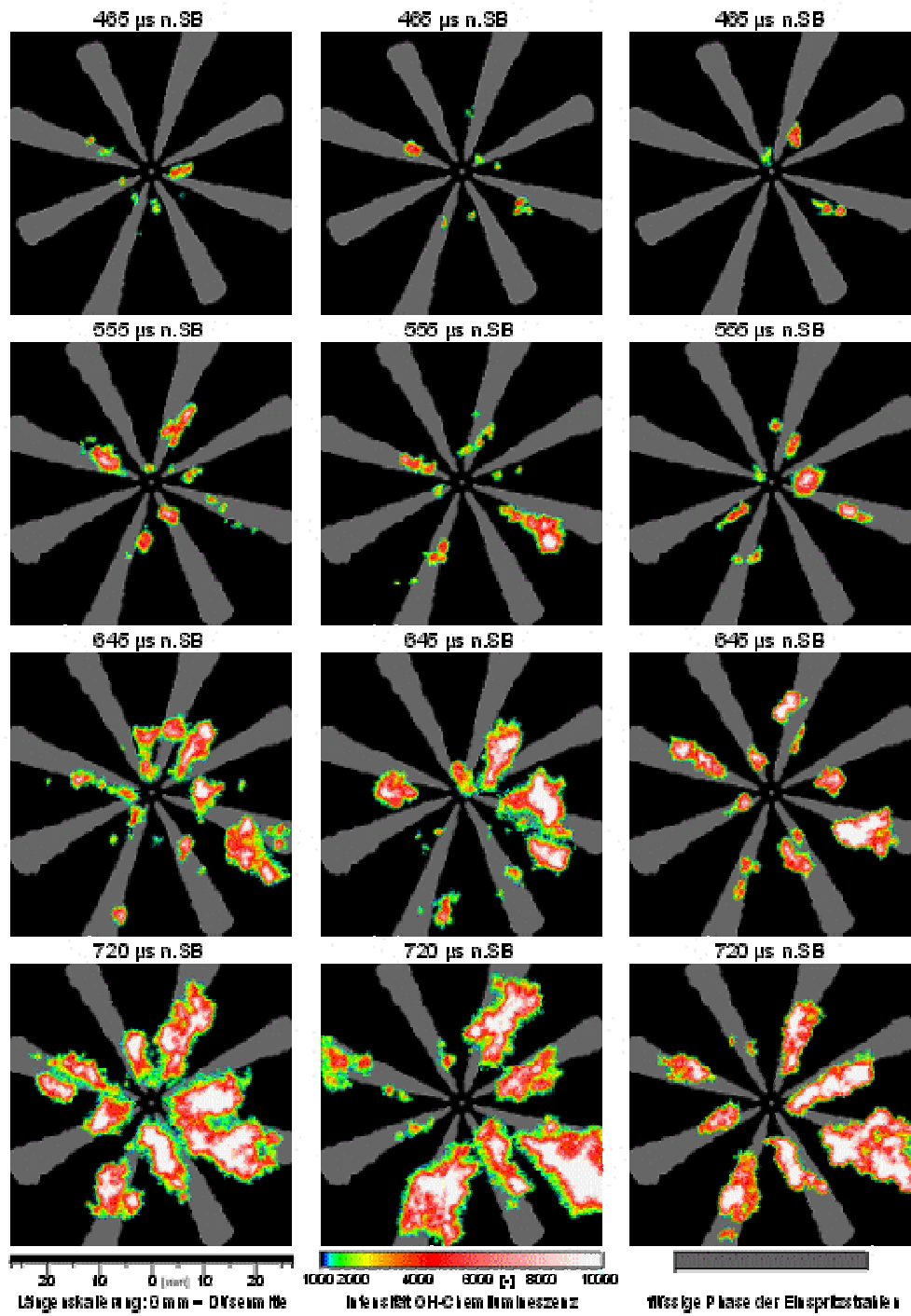


Bild A.6: Statistik der OH-Chemilumineszenz bei 308 nm, Betriebspunkt 8LCR_600

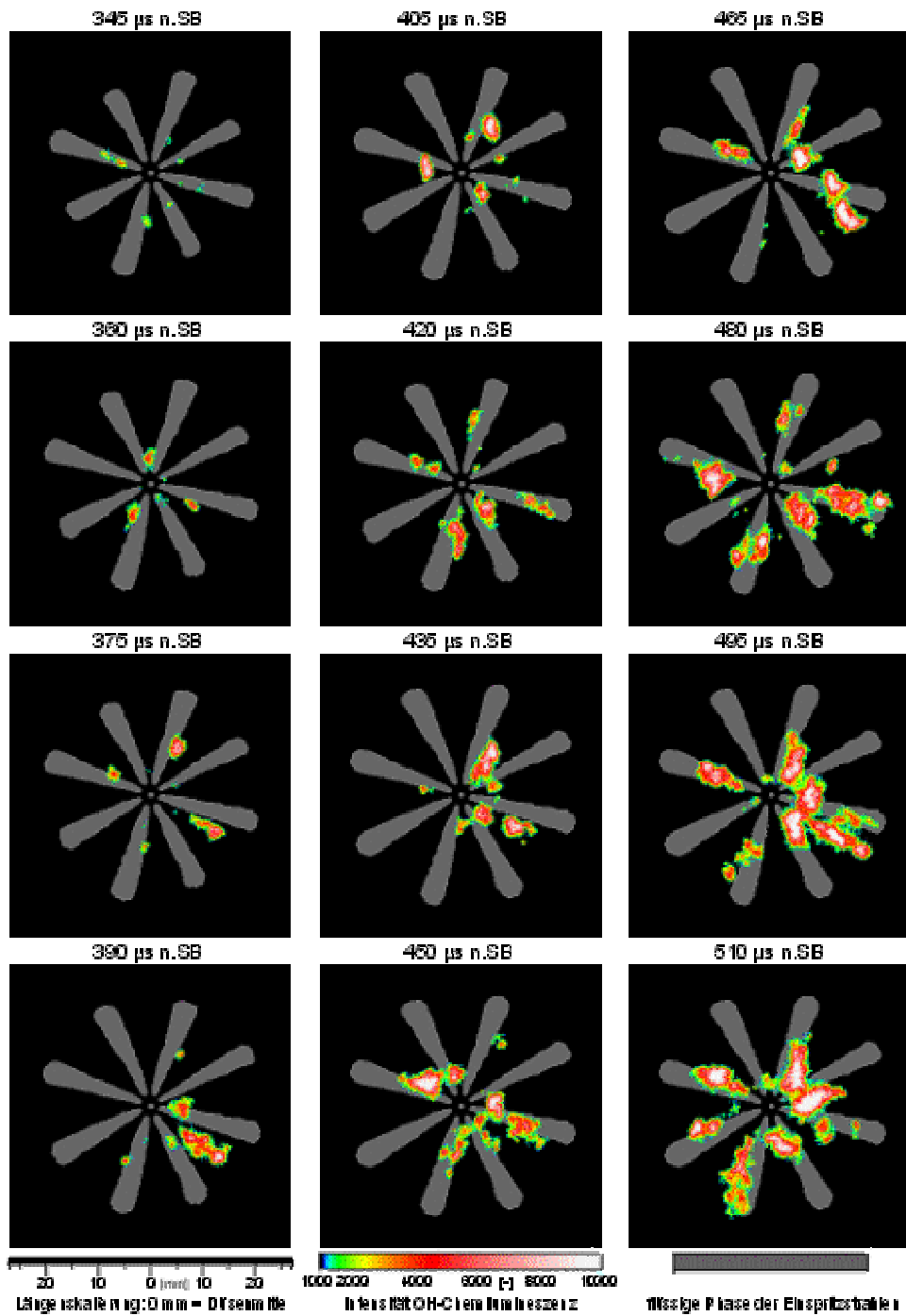


Bild A.7: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR600H

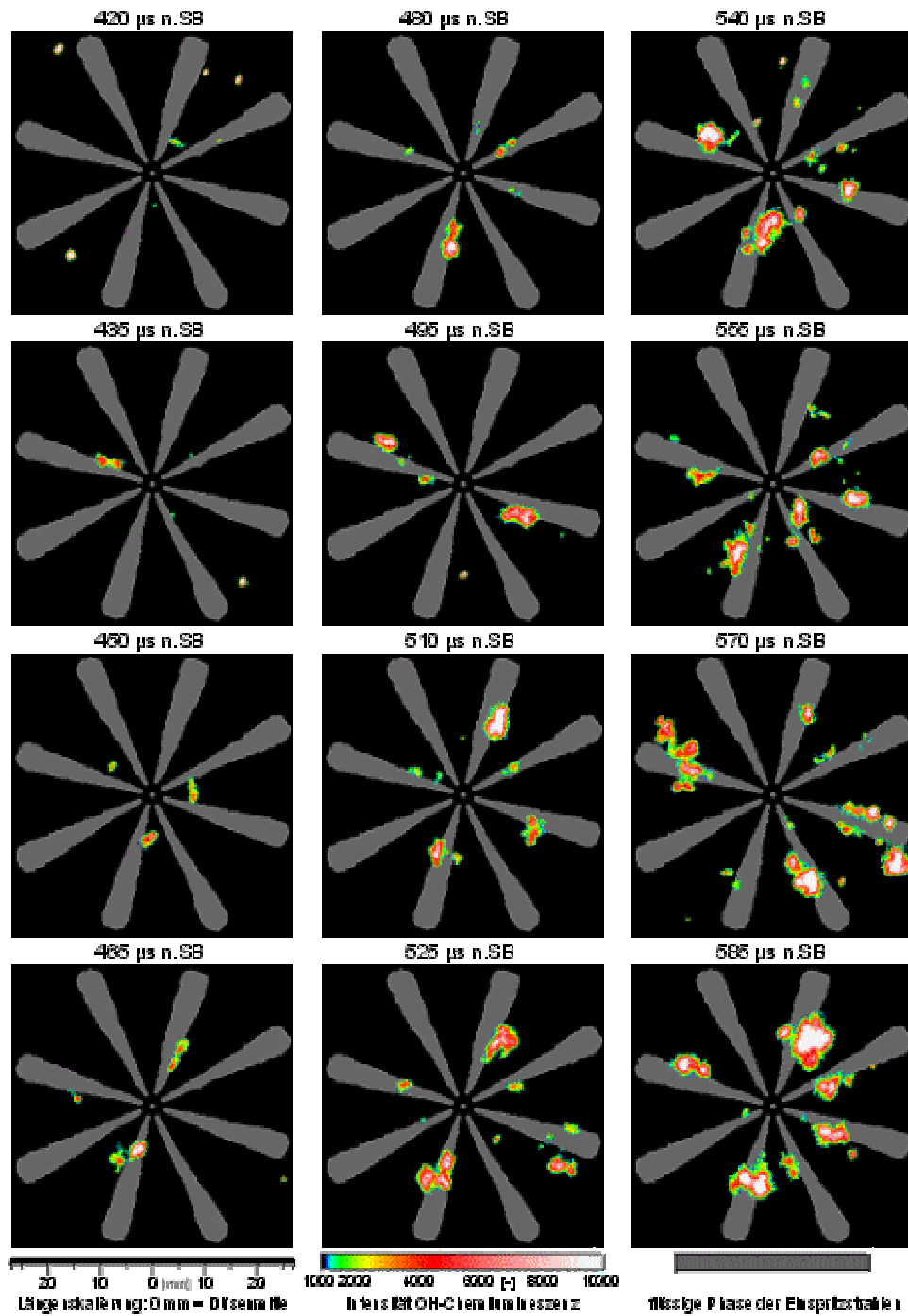


Bild A.8: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR1000

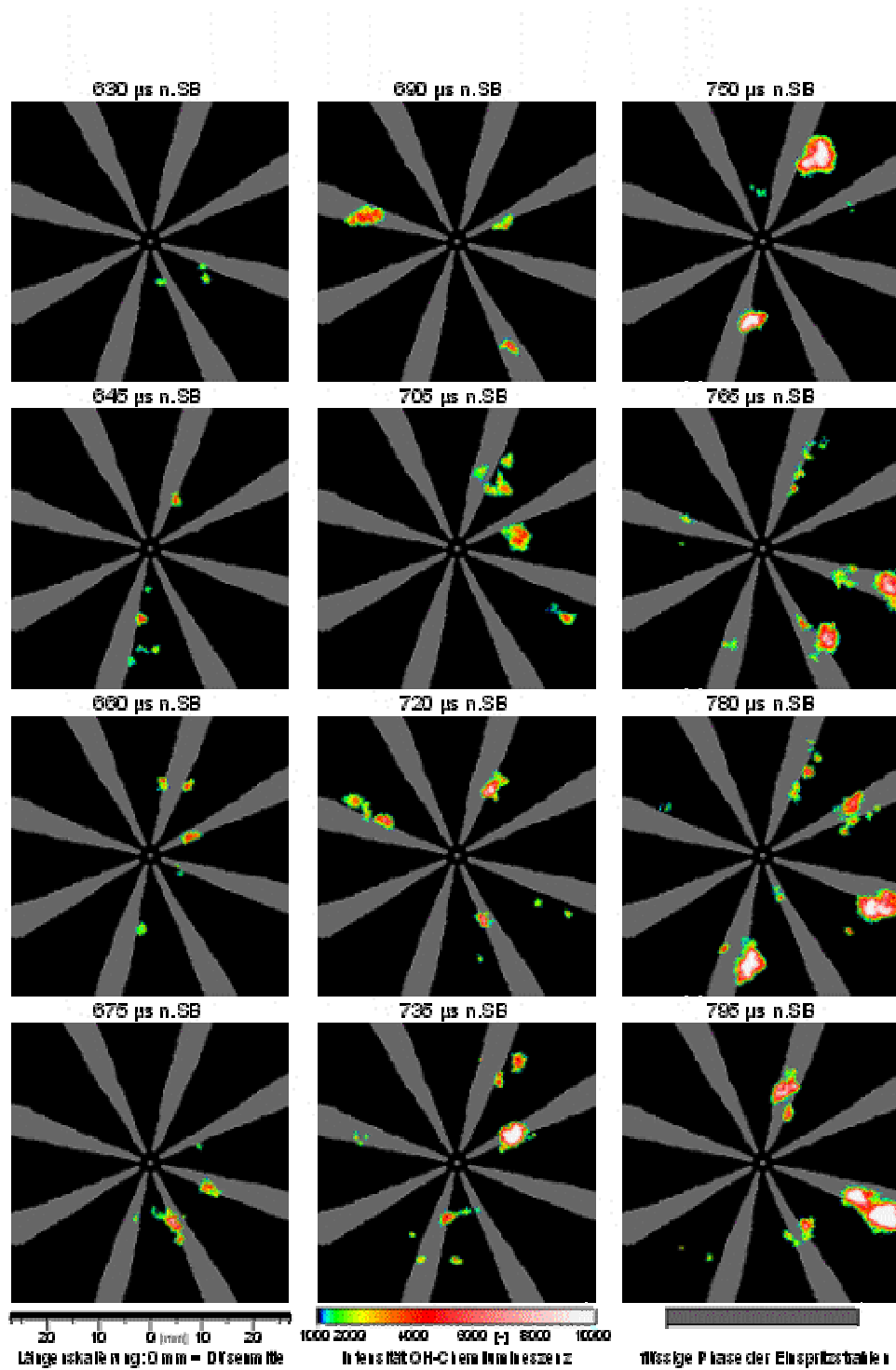


Bild A.9: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR100N

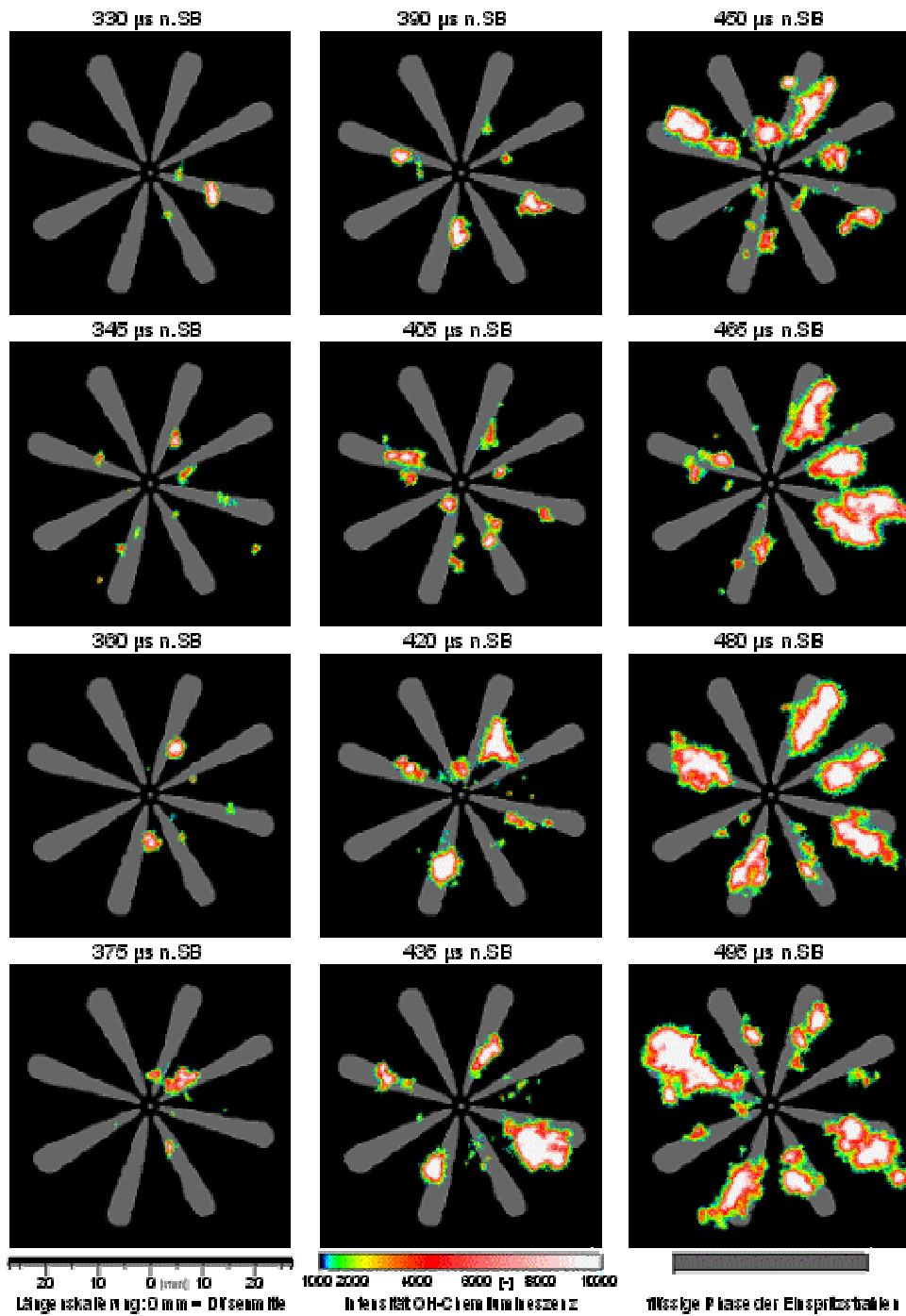


Bild A.10: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR12HL

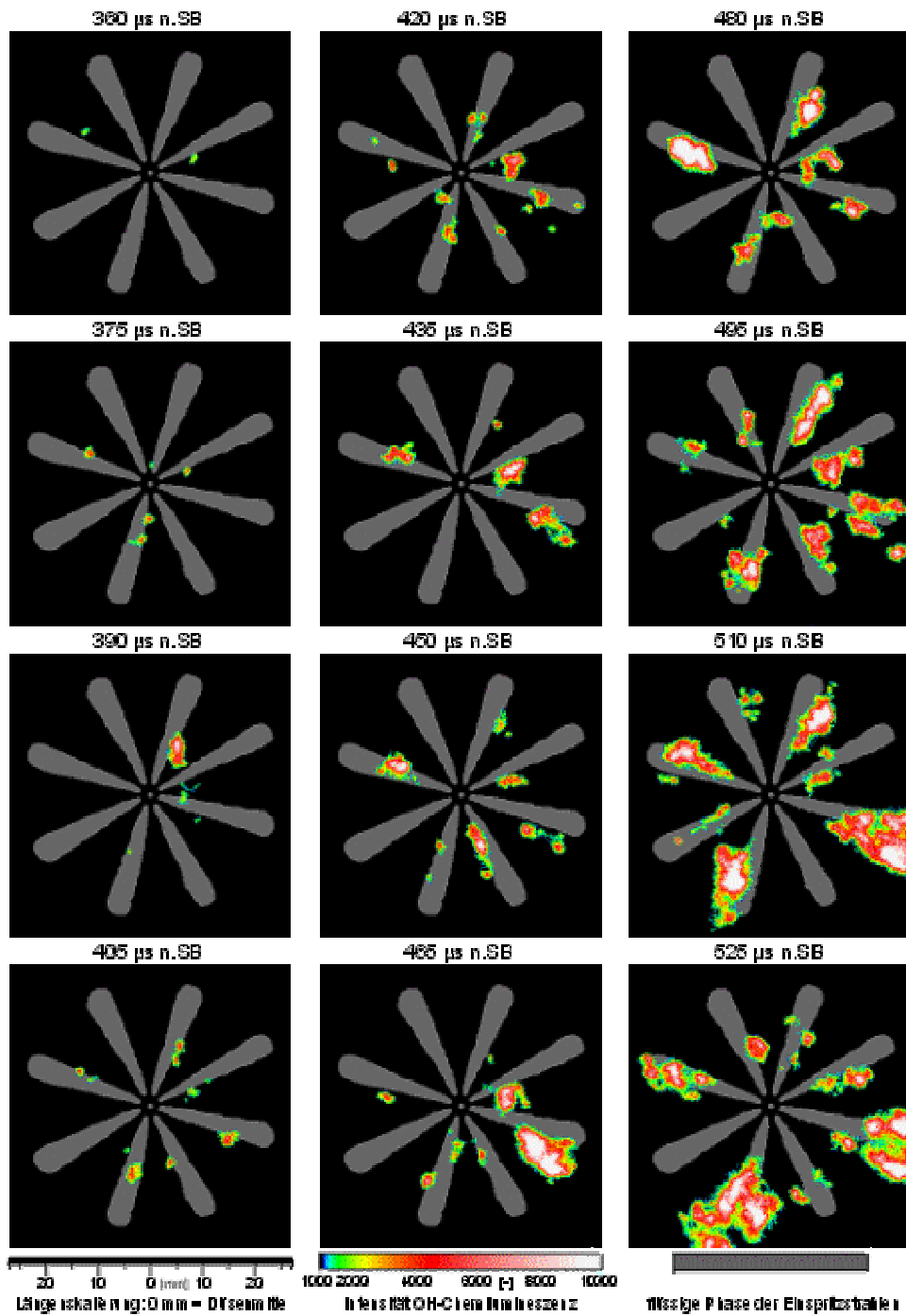


Bild A.11: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR12HA

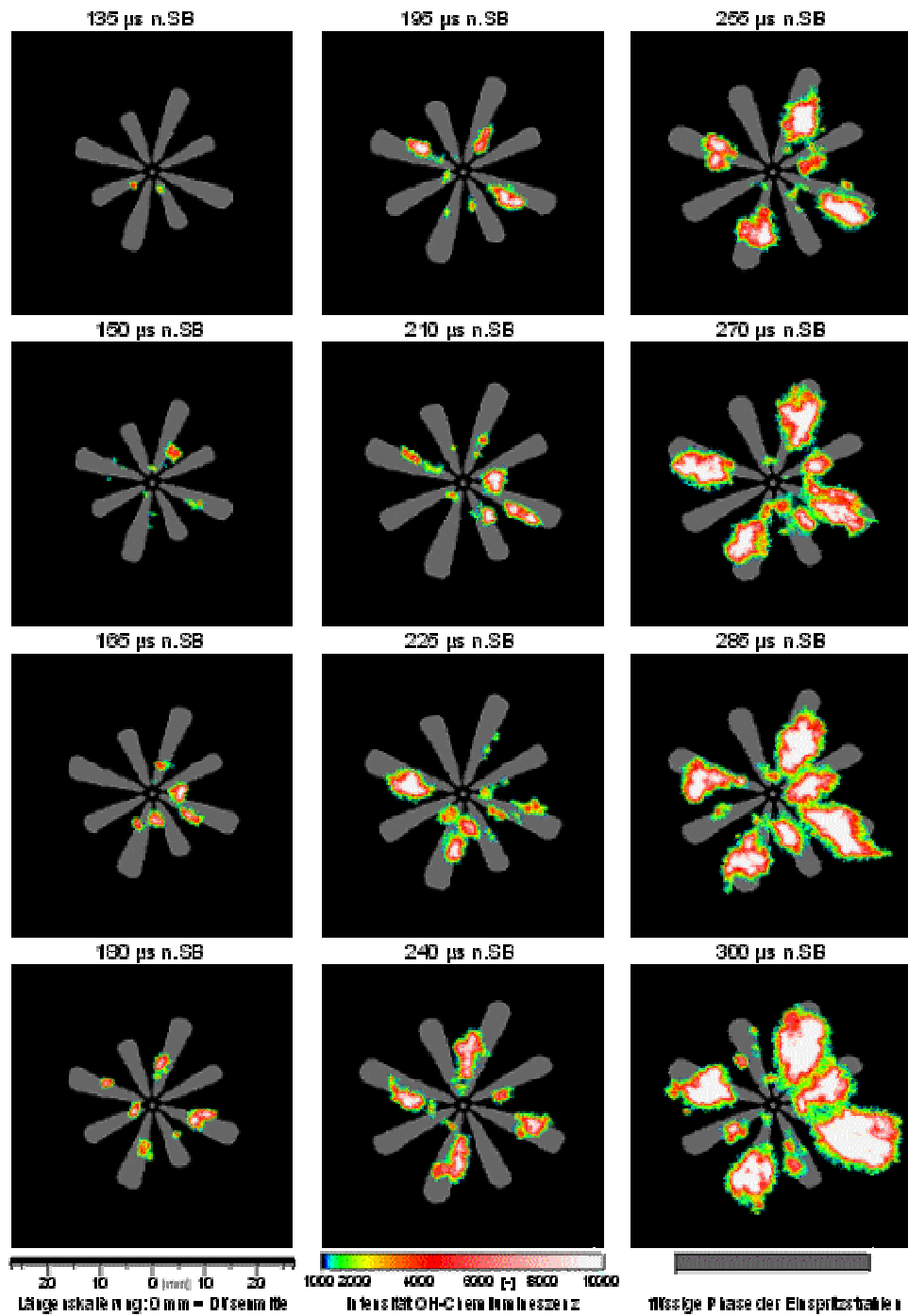


Bild A.12: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LCR120V

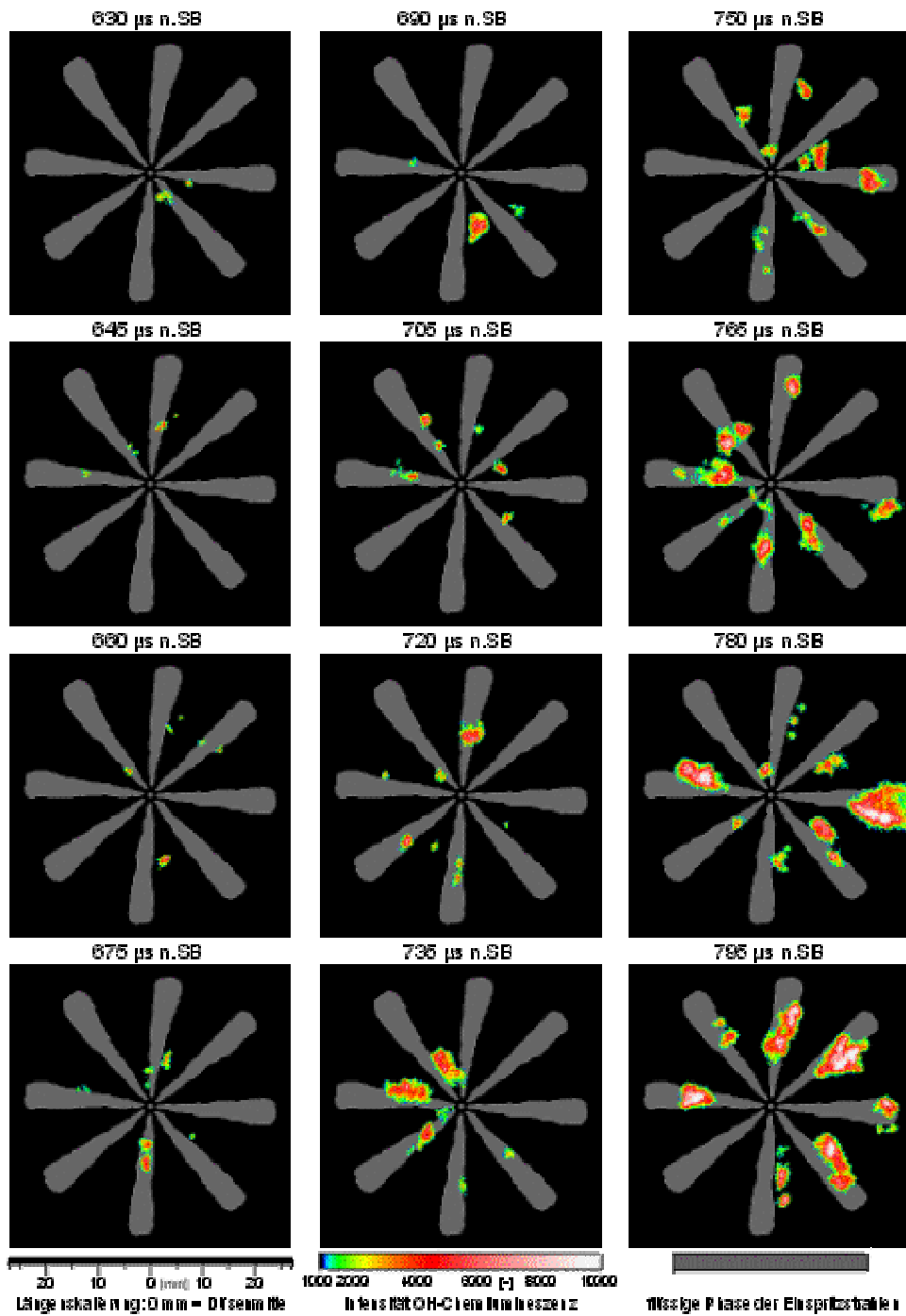


Bild A.13: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LPLD_25

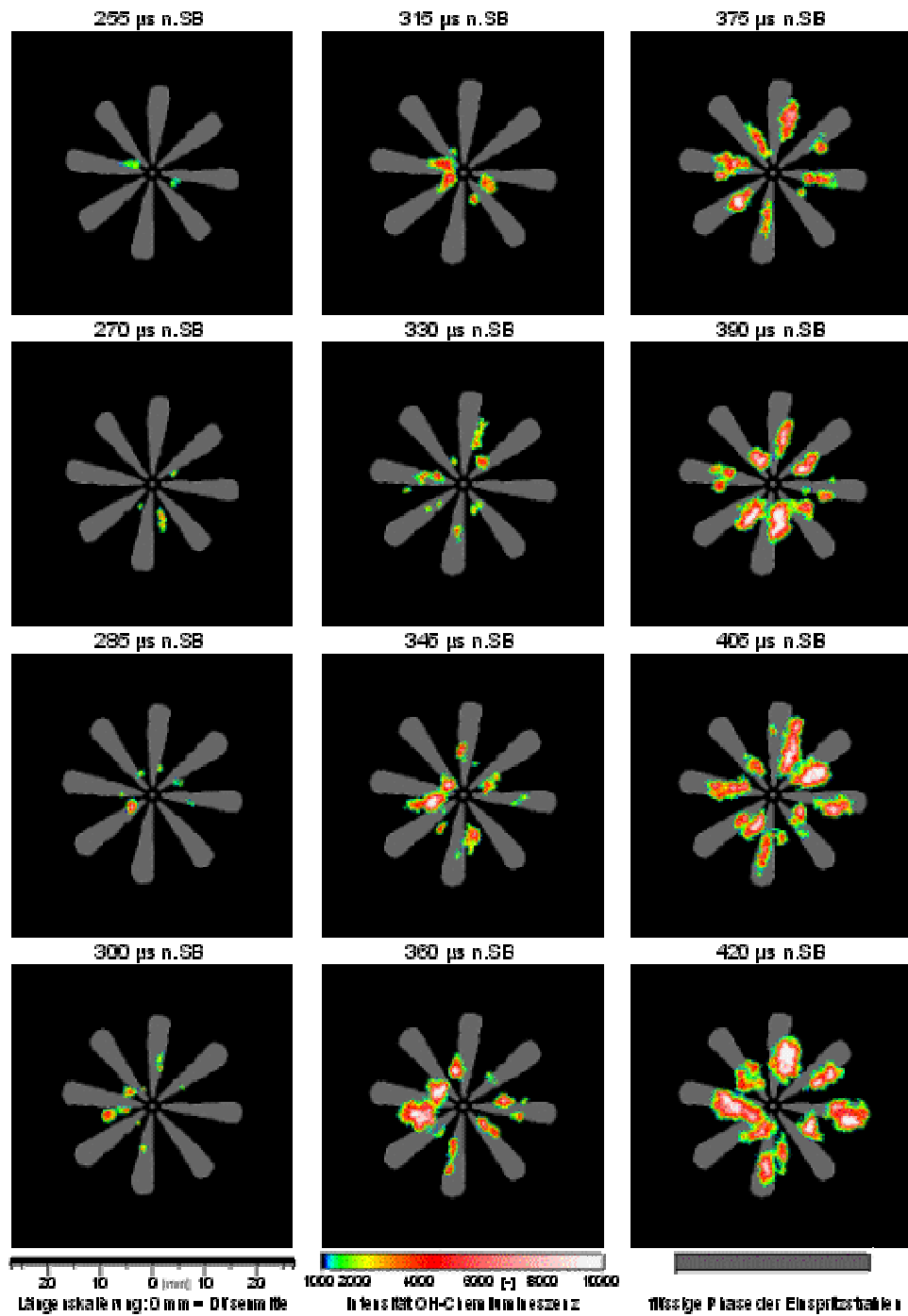


Bild A.14: OH-Chemilumineszenz bei 308 nm in der Zündphase, Betriebspunkt 8LPLD100

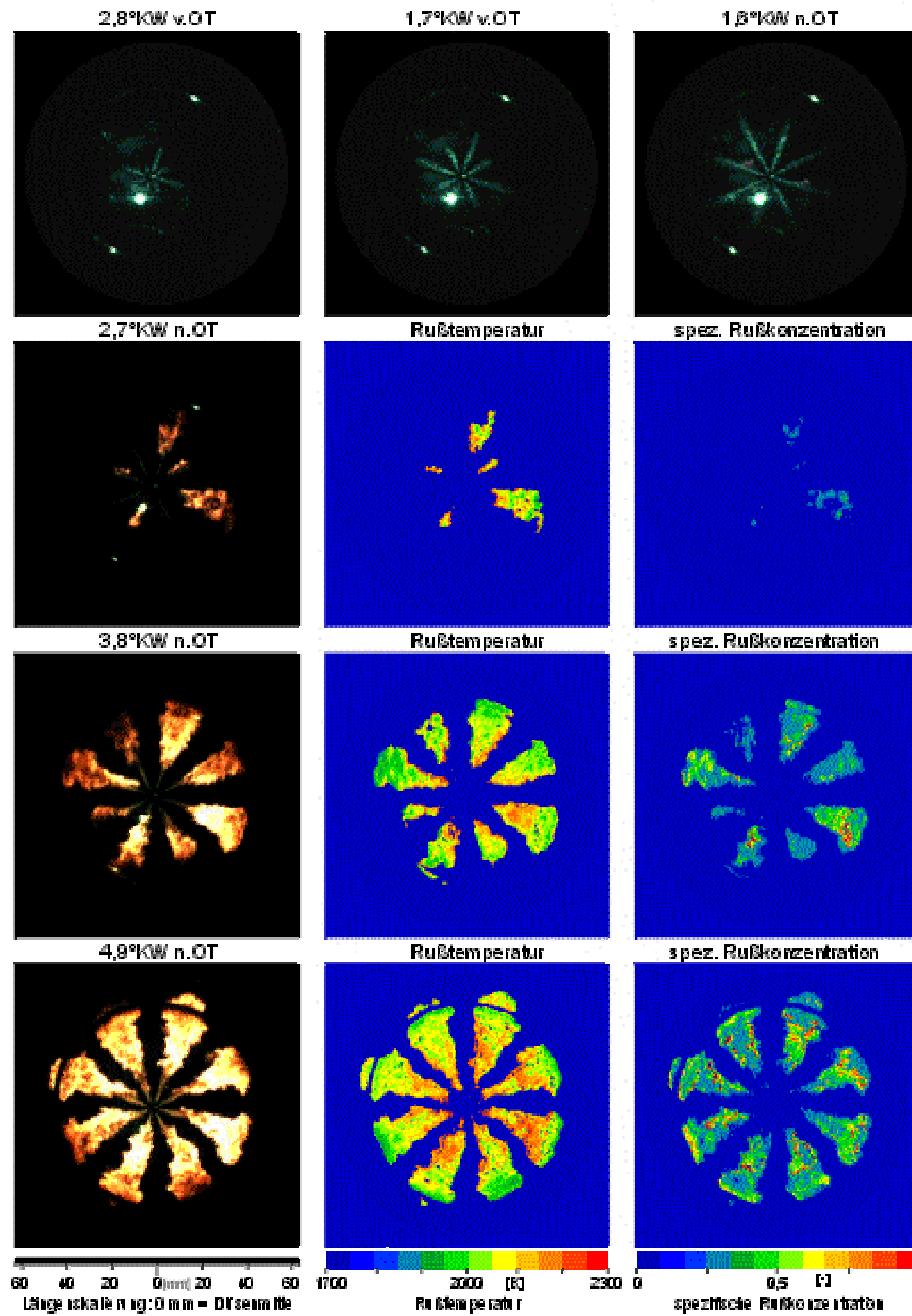


Bild A.15: Aufnahmen Verbrennungsfilm, 2-Farben-Auswertung, Betriebspunkt 8LCR_600

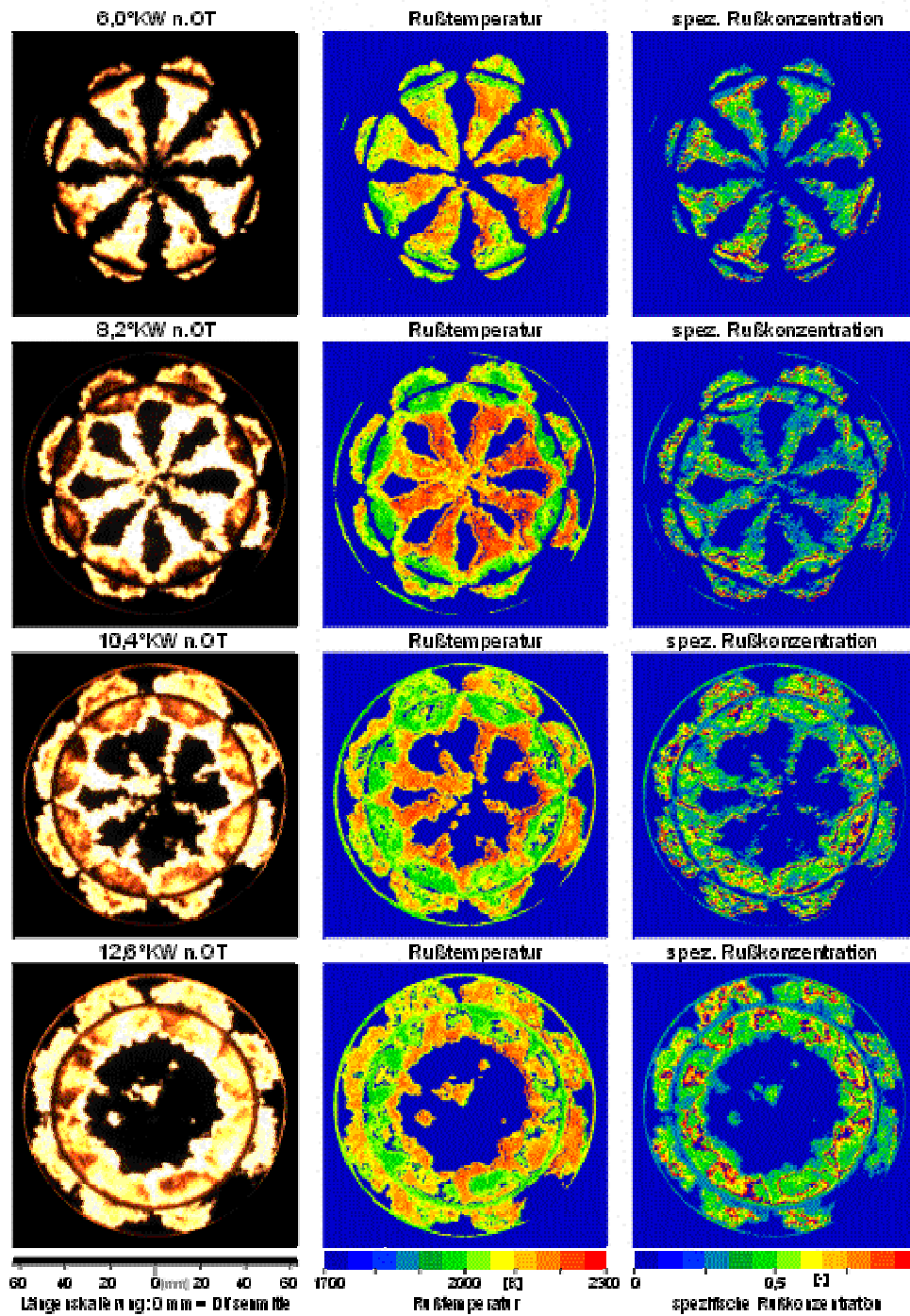


Bild A.16: Aufnahmen Verbrennungsfilm, 2-Farben-Auswertung, Betriebspunkt 8LCR_600

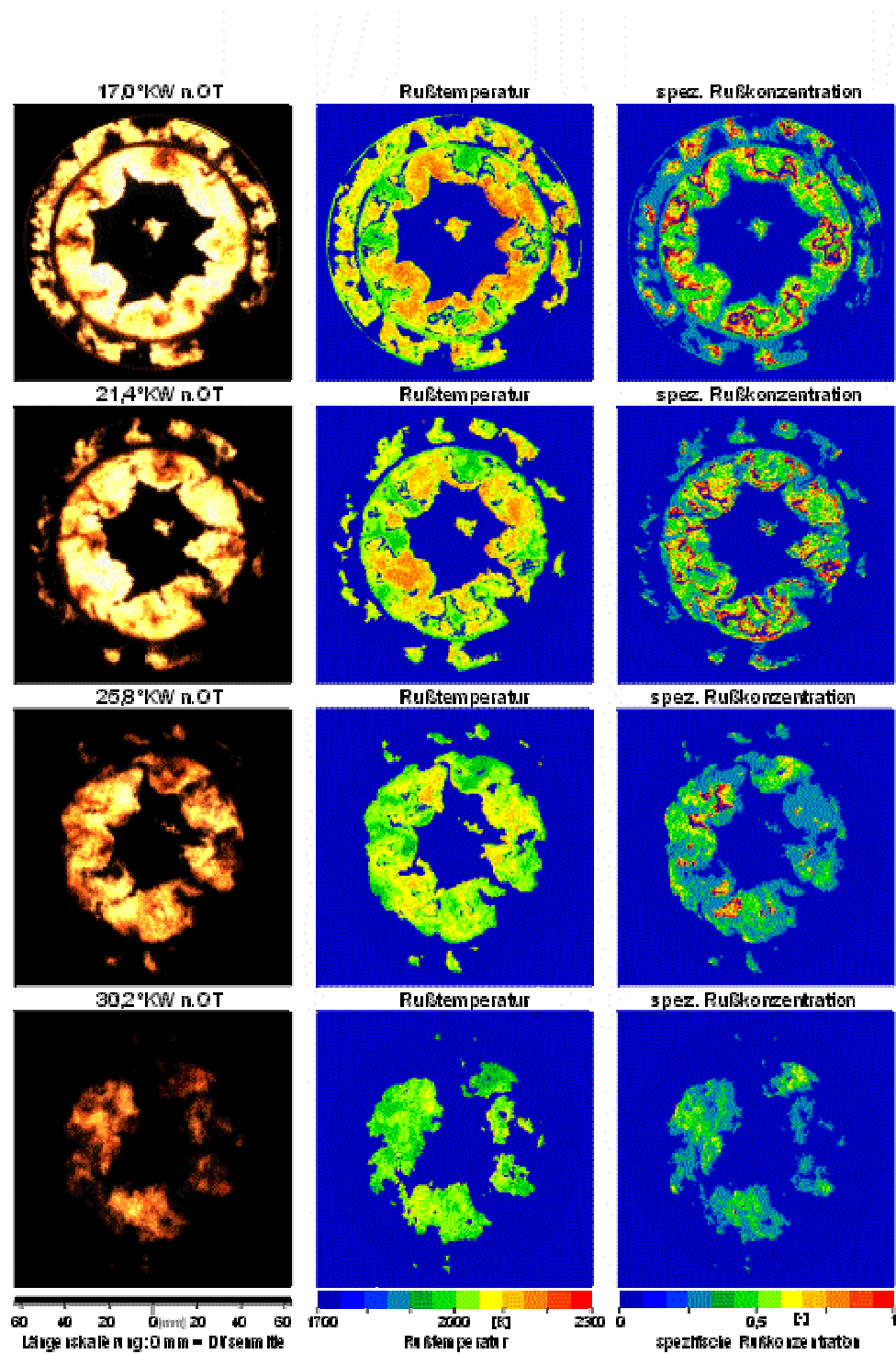


Bild A.17: Aufnahmen Verbrennungsfilm, 2-Farben-Auswertung, Betriebspunkt 8LCR_600

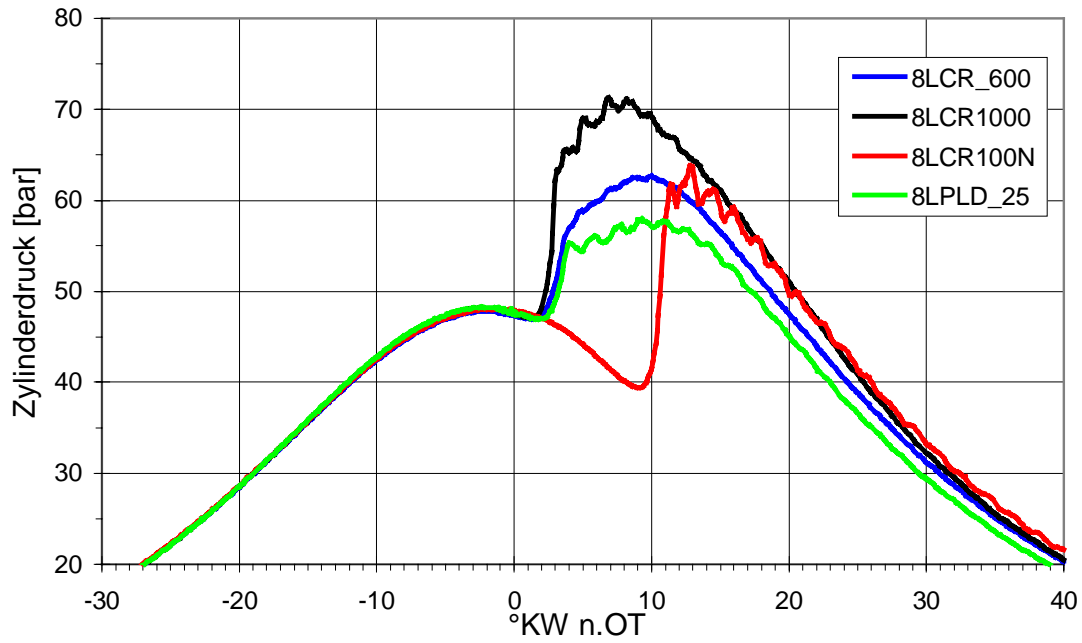


Bild A.18: Zylinderdruckverläufe, Varianten mit 25% Last

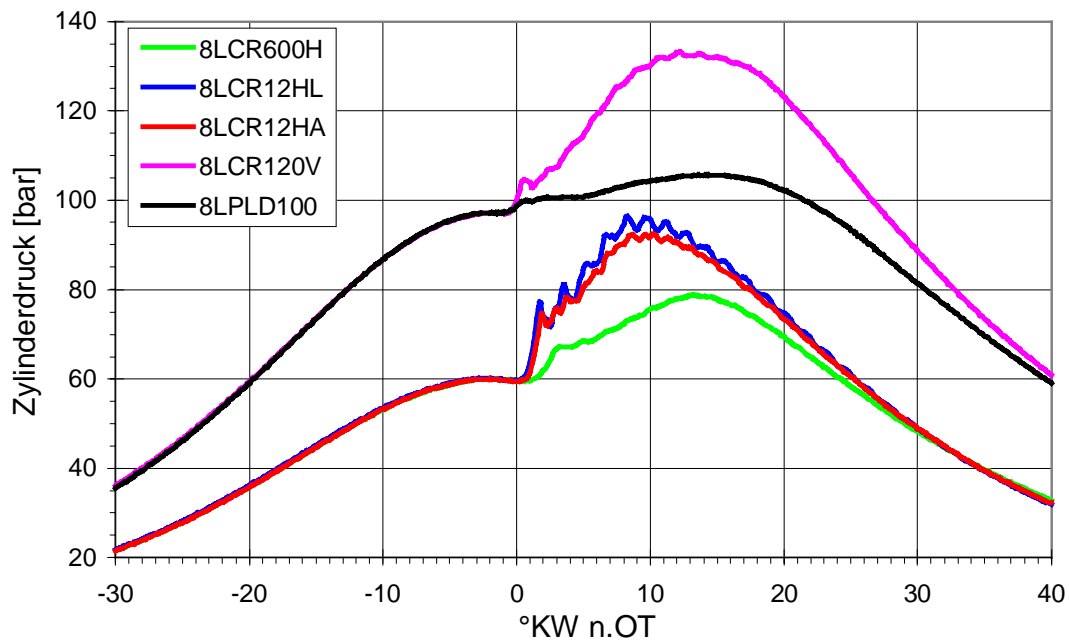


Bild A.19: Zylinderdruckverläufe, Varianten mit 50% Last und 100% Last