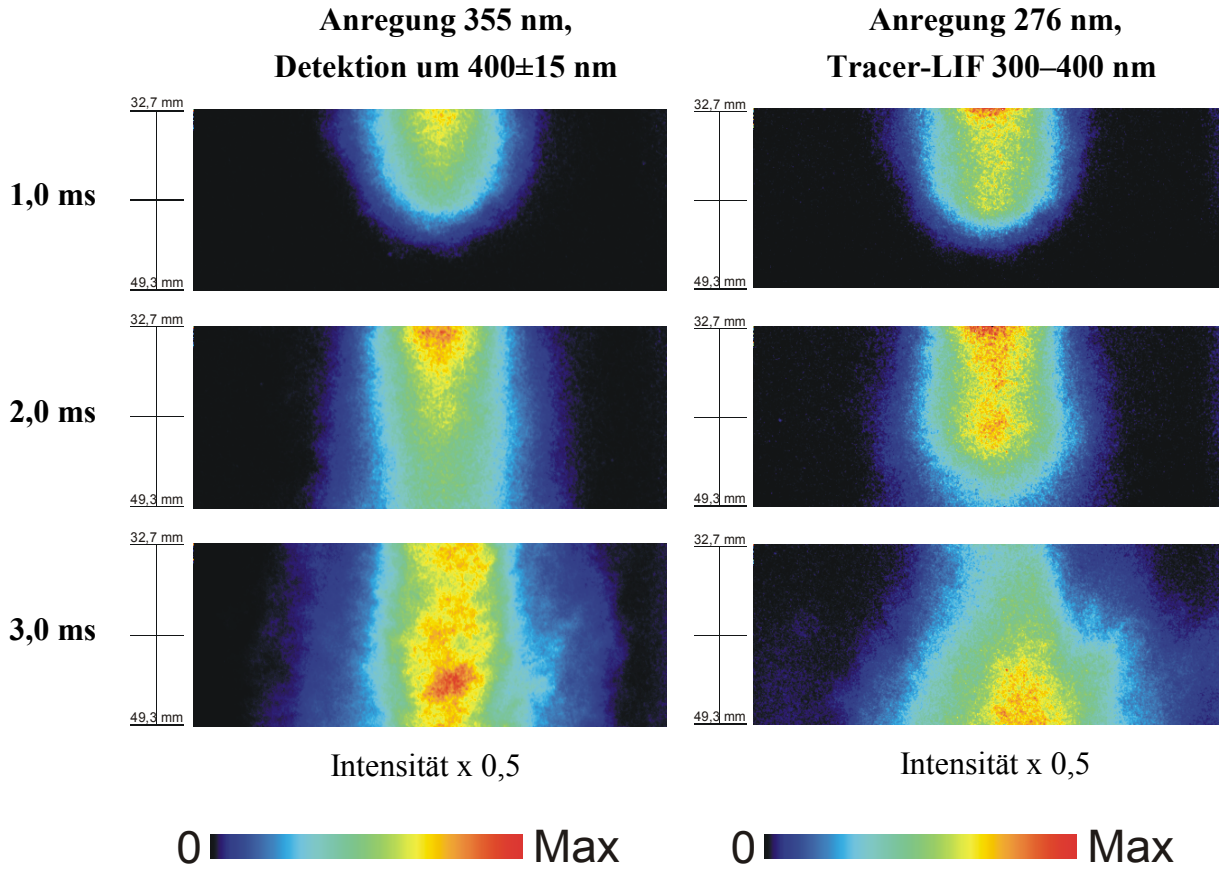

Abbildung 5.23: Simultane Tracer-LIF- und HCHO-LIF-Aufnahmen für verschiedene Zeitpunkte unter Referenzbedingungen. Mittelwerte aus je 50 Einzelbildern. Die dazu ebenfalls simultan aufgenommenen Tracer-LIF-Bilder mit langwelliger Detektion über 400 nm finden sich in Abbildung 5.17. Auftreten der heißen Verbrennung ab 2,5 ms, vereinzelt auch schon ab 2,0 ms..

5.6 NO-Konzentration

Der experimentelle Aufbau zur simultanen Messung von Rayleigh-Streulicht, LII und NO-LIF wurde in Kapitel 3.5, die Auswertung der Bilder wurde in Kapitel 4.6 beschrieben. Zur Anregung von NO wurde entsprechend [12-15,70] der A-X (0,2) O_{12} (8.5-10.5) Bandenkopf bei 247.94 nm gewählt, um die Absorption des Laserlichts zu minimieren und interferierendes O_2-LIF zu unterdrücken. Das bei dieser Anregung induzierte NO-LIF-Signallicht der A-X (0,0) und (0,1) Banden ist blauverschoben (220–240 nm). Eine mögliche Interferenz mit PAH-LIF-Signallicht wird dadurch unterdrückt.

Bei den NO-Messungen an der Göteborger Sprayzelle konnte NO in der Sprayverbrennung detektiert und nachgewiesen werden. Abbildung 5.24 zeigt das NO-Anregungsspektrum um 248 nm mit einem charakteristischen NO-LIF Linienmuster (vgl. [151]). Bei der Detektion von NO aus der Photolyse von NO_2 in der kalten Versuchszelle (vgl. Abschnitt 3.4.2) wurde ein Signal/Rausch-Verhältnis von etwa 5:1 festgestellt (Vergleich von NO-resonantem und off-resonantem Signal). In den Messungen am brennenden Dieselspray sank dieses jedoch auf maximal 2:1 ab.

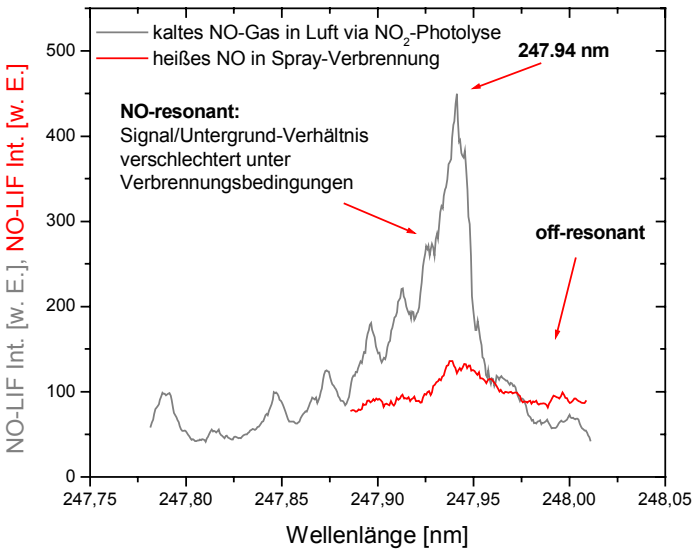

Abbildung 5.24: NO-LIF-Anregungsspektrum um 248 nm an der Göteborger Zelle bei T_{gas} = 728 K, p_{gas} = 33 bar, Position 3, t = 5,5 ms. Bei Wellenlängen unter 247,9 nm nimmt die Signalintensität ab, da hier der Abstimmbereich des KrF-Excimerlasers verlassen wird und die Anregungsenergie sinkt.

Bedingt durch das kleine Signal/Untergrund-Verhältnis der NO-LIF Messungen an der Göteborger Sprayzelle war ein signifikantes, zweidimensionales NO-LIF-Signal nur unter Bedingungen detektierbar, welche die thermische NO-Bildung begünstigen. Nach den Vorüberlegungen in Kapitel 2.4 und den Befunden in Kapitel 5.2 sind dies ein niedriger Umgebungsdruck, eine späte Beobachtungszeit und eine Beobachtungsposition, die möglichst weit von der Injektionsdüse entfernt liegt. Abbildung 5.25 gibt Tripel simultan aufgenommener Rayleigh-, LII- und NO-LIF-Bilder zu verschiedenen, späten Beobachtungszeiten bei 33 bar Umgebungsdruck an Position 3 wieder. Zu diesen Zeitpunkten ist der Abbrand des Sprays in der Endphase, die späteste Rußerscheinung wurde bei 5,5 ms detektiert (siehe Abbildung). Beim vorliegenden, niedrigen Umgebungsdruck fand die Zündung des Sprays relativ weit entfernt von der Einspritzdüse statt und die Rußerscheinung war am brennenden Spray gerade noch am unteren Rand des Beobachtungsausschnitts beobachtbar.

Die Detektion von NO im späten Verbrennungsstadium und insbesondere die Anwesenheit von NO in den heißen Abgasen nach Ende der Sprayverbrennung (Abbildung 6,0 und 6,5 ms) bestätigt zum Teil den von Dec [79] vermuteten Zeitverlauf der NO-Bildung im brennenden Dieselspray. In den vorausgegangenen spektral aufgelösten Messungen gemäß Abschnitt 3.10.1 wurden jedoch Indizien für eine noch höhere NO-Konzentration zu Beginn der Diffusionsflamme detektiert. Diese frühe NO-Bildung lag aber unter den gegebenen Umgebungsbedingungen außerhalb des optisch zugänglichen Beobachtungsausschnitts. Die detektierten NO-LIF-Bilder erfassen das injizierte Spray am oberen Ende der quasi-stationären Diffusionsflamme zu späten Zeitpunkten. Auch umfangreiche Versuche zur Optimierung des Signal/Untergrund-Verhältnisses durch Variationen der Detektionsfilter ermöglichten es nicht, die NO-Bildung auch am führenden Spraykopf und zu früheren Beobachtungszeiten abzubilden.

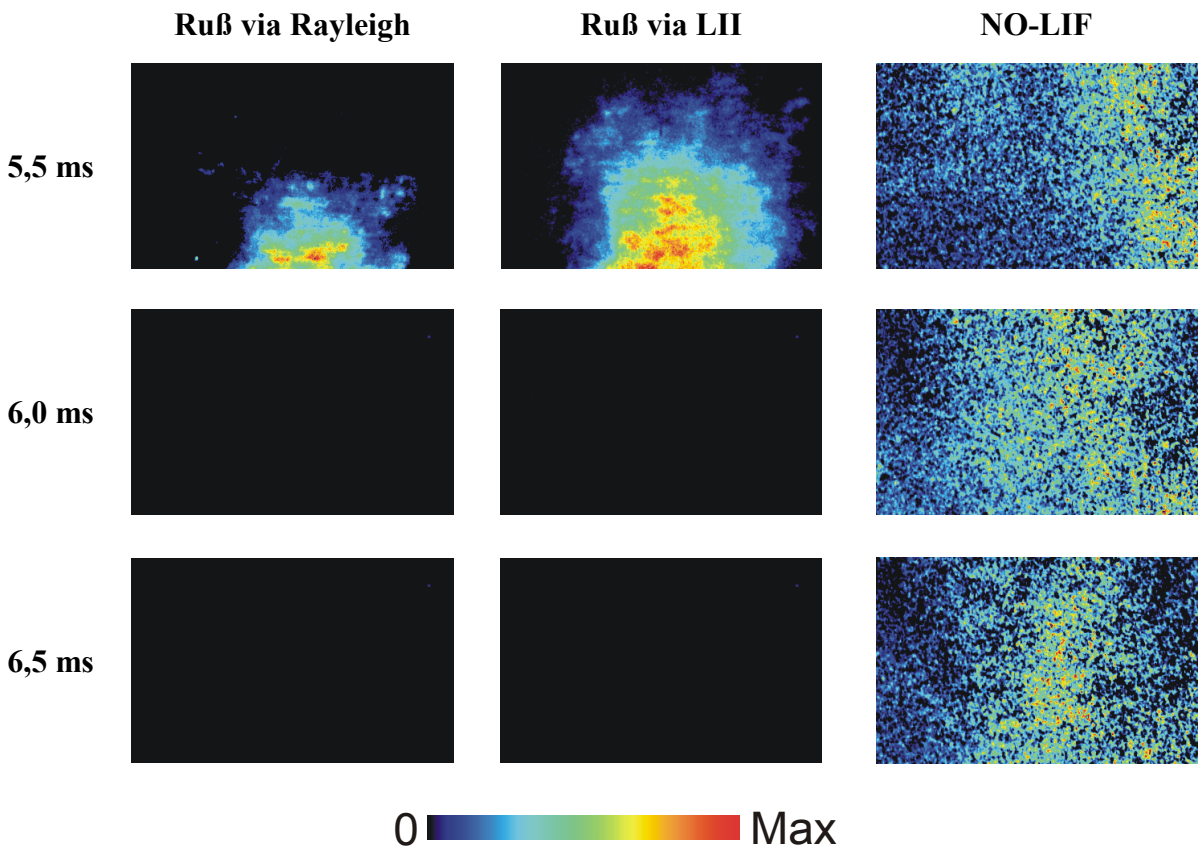

Abbildung 5.25: Simultane Aufnahmen von Rayleigh-Lichtstreuung, LII und NO-LIF (Differenzbild aus NO-resonanter und off-resonanter Anregung). Mittelwertbilder aus 50 Einzelbildern bei T_{gas} = 728 K, p_{gas} = 33 bar, Position 3 zu verschiedenen, späten Beobachtungszeiten. Die Detektionsempfindlichkeit der Rayleigh-Kamera war bei diesen synchronen Aufnahmen herabgesetzt. Jede der drei Spalten besitzt eine unabhängige Farbskalierung.

5.7 Abhängigkeiten von experimentellen Parametern

Verschiedene experimentelle Parameter wie Umgebungsdruck p_{gas} in der Brennkammer, Temperatur T_{gas} der Umgebungsluft in der Brennkammer, Injektionsdruck p_{inj} des Treibstoffes, zeitlicher Ablauf der Injektion, Durchmesser d und Vorbehandlung (%HE) der Einspritzdüsen und Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungskammer wurden in den oben beschriebenen Experimenten systematisch variiert (vgl. Kapitel 3.9). Dadurch konnten parameterabhängige Trends der Messgrößen aufgeklärt werden.

Die Zündverzugszeiten der Sprayverbrennung hängen von Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Druck und Temperatur ab. Nach Einsetzen der zweiten, heißen Zündstufe kommt es zur Bildung von Ruß. Durch seinen hohen Rayleigh-Streuquerschnitt dominiert Ruß fortan das elastische Streulichtsignal. Abbildung 5.26 zeigt das Auftreten von Rayleigh-Lichtstreuung an Ruß zu verschiedenen Zeitpunkten in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration der Umgebungsluft unter ansonsten gleichen Bedingungen. 15,5–16,5% Restsauerstoff in der Umgebungsluft bildeten die untere Zündgrenze des *n*-Decan-Sprays. Gegenüber Luft mit 20,9% Sauerstoff verzögerte sich die heiße Zündung in dieser Umgebung um etwa 0,5 ms.

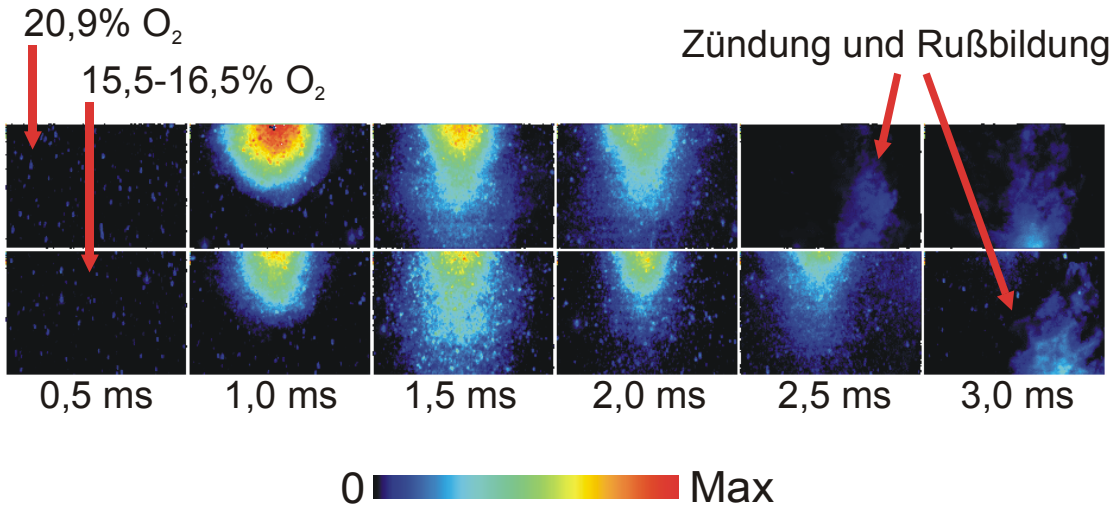

Abbildung 5.26: Zündverzugszeiten in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration unter Referenzbedingungen, Position 2. Mittelwerte aus je 50 Einzelbildern von Rayleigh-Streulicht zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Mit Beginn der Rußbildung musste die Detektionsempfindlichkeit der Kamera gesenkt werden, um Sättigungseffekte zu vermeiden.

Elastische, intensive Mie-Streuung am flüssigen Spraykern interferierte mit der Detektion von Treibstoffdampf nahe der Einspritzdüse. Die Abbildung des Spraykerns durch Mie-Streuung ermöglichte jedoch eine Bestimmung des Einspritzwinkels α und der flüssigen Eindringtiefe S (vgl. Kapitel 4.6).

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick für verschiedene experimentelle Parameter. Nach der Einspritzung nahm die flüssige Eindringtiefe des Spraykerns kontinuierlich um bis zu 50% ab, außer bei den Düsen 2 und 3, bei denen eine kontinuierliche Zunahme von S beobachtet wurde. Mit Einsetzen der quasi-stationären Diffusionsflamme bildete sich eine etwa konstante Gleichgewichtslänge aus. Die Eindringtiefe S nahm mit steigendem Umgebungsdruck ab. Ohne Zündung (Niedertemperaturbedingungen) ist S größer als mit Zündung. Bei reduziertem Sauerstoffgehalt (15,5–16,5%) liegt S zwischen den Längen für Zündung bei 20,9% Sauerstoff und ungezündetem Spray. Der Spraywinkel α hing im wesentlichen nur von der verwendeten Einspritzdüse ab. Man kann erwarten, dass die düsenferne Geschwindigkeit und der Durchfluss des injizierten Sprays und damit die Eindringtiefe S mit sinkendem Flusswiderstand steigen, d. h. mit steigender hydroerosiver Verrundung (%*HE*), und größerem Spritzlochdurchmesser d. Der Spraywinkel steigt gewöhnlich mit sinkenden %*HE* und größeren d. Im Rahmen der Auswertegenauigkeit für Eindringtiefe und Spraywinkel geben die vorliegenden Messungen an verschiedenen Düsen diese Trends wieder.

LII-Bilder von Ruß können zur Untersuchung der abgehobenen Diffusionsflamme des Dieselsprays herangezogen werden. Der Abstand zwischen Injektionsdüsenausgang und der nächsten beobachtbaren Flammenerscheinung in der quasi-stationären Diffusionsflamme ist definiert als Abhebehöhe (engl. *lift-off length*). In früheren Arbeiten wurde das an der Diffusionsflamme beobachtete Eigenleuchten (OH-Lumineszenz bei 310 nm) zur Bestimmung der Abhebehöhe verwendet (vgl. z. B. [80,152]).

Bedingungen	S	α
Referenzbedingungen	2,99 mm	30°
p_{gas} = 85 bar	2,89 mm	30°
p_{gas} = 54 bar	3,32 mm	33°
p_{gas} = 33 bar	15,12 mm	n. v.
T_{gas} = 643 K (ungezündet)	10,64 mm	n. v.
15,5–16,5% Sauerstoff	6,21 mm	n. v.
Düse 2 (d = 0,236 mm, 10,5% *HE*)	9,78 mm	50°
Düse 3 (d = 0,205 mm, 0% *HE*)	3,91 mm	25°

Tabelle 5.1: Einspritzwinkel α nach 0,5 ms und flüssige Eindringtiefe S (Gleichgewichtswert nach ca. 3 ms) aus Bilder der Mie-Streuung an Position 1. Für die Referenzdüse (Düse 1) gilt d = 0,19 mm und 10,5% *HE*.

Nachteil dieser Methode sind die relativ flachen Gradienten des Lumineszenzsignals. Dadurch wird die Festlegung eines definierten Signalschwellwerts bei der Bildauswertung schwierig und die gemessenen Längen der abgehobenen Flamme relativ unzuverlässig. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Bestimmung der Abhebehöhe anhand des LII-Signals, welches steile Signalgradienten aufweist. Die Chemilumineszenz der Flamme ist zwar meist näher an der Injektionsdüse platziert als die Rußerscheinung, die hier vermessenen Abhebehöhen werden also tendenziell zu lang sein. Jedoch lieferte die hier durchgeführte Methode dieselbe empirische Abhängigkeit der Abhebehöhe vom Umgebungsdruck. Die Funktionsvorschrift der in Abbildung 5.27 angepassten Kurve stimmt mit [137] überein. In Übereinstimmung mit [153] führte zudem eine höhere Sauerstoffkonzentration in der Umgebungsluft zu kleineren Abhebehöhen.

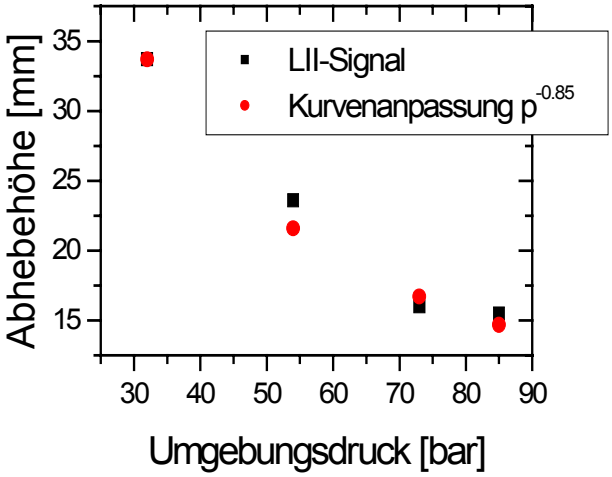

Abbildung 5.27: Abhebehöhen der Diffusionsflamme bestimmt aus Bildern der laserinduzierten Inkandeszenz bei variablem Kammerdruck.

Verschiedene Injektionsmodi beeinflussten Zündverhalten und Rußbildung stark wie Abbildung 5.28 aufzeigt. Der Zündzeitpunkt verzögerte sich bei reduziertem Einspritzdruck (oberste Zeile), was auf eine reduzierte Vermischung von Treibstoff und Luft zurückgeführt werden kann. Erfolgte die Injektion in zwei separaten Teilen (20Massen% Pilotinjektion, Hauptinjektion 1,2 ms später), so war eine Zündung erst nach der Hauptinjektion zu beobachten. Die Zündverzugszeit nach der Hauptinjektion ließen sich in der gegebenen zeitlichen Auflösung nicht vom Zündverzug ohne Pilotinjektion unterscheiden.

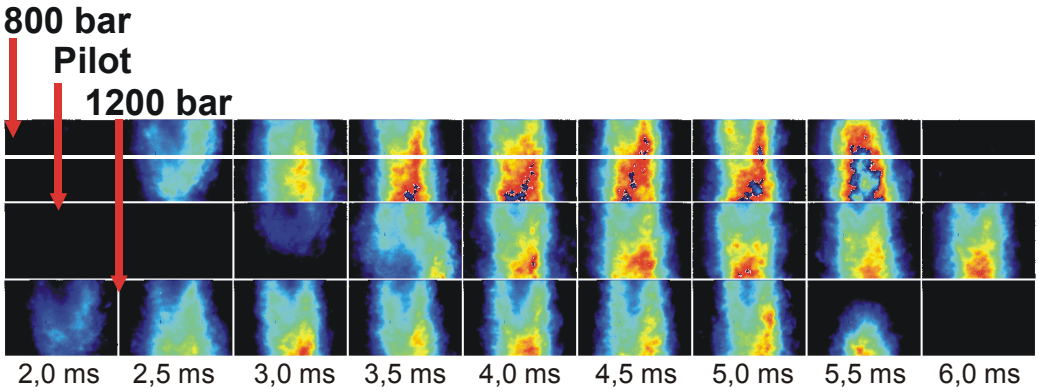

Abbildung 5.28: Rußbildung abgebildet durch LII in Abhängigkeit von der Art der Injektion. T_{gas} = 740 K, p_{gas} = 73 bar, Position 2.

5.8 Numerische Simulation und Modellvalidierung

Kraftstoffdampfverteilung und Rußbildung unter Referenzbedingungen der Göteborger Messungen wurden in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Prof. Peters (RWTH Aachen) mit einem interaktiven Flamelet-Modell numerisch simuliert. Abbildung 5.29 vergleicht Messungen der Kraftstoffdampfverteilung an der Göteborger Hochdruck-Hochtemperatur-Zelle unter Referenzbedingungen (T_{gas} = 720 K, p_{gas} = 73 bar, p_{inj} = 1200 bar) mit numerischen RIF-Simulationen (vgl. Kapitel 2.4) für zwei verschiedene Beobachtungszeiten vor Beginn der heißen Zündung. Messung und Simulation lieferten gut übereinstimmende Ergebnisse. In der Simulation wurden im Spraykern bis zu 30% höhere Dampfkonzentrationen berechnet (siehe Abbildung 5.30). Dies kann auf Temperatureffekte zurückgeführt werden. Es wurde ein homogenes Temperaturfeld angenommen. Nach Kapitel 4.5 weist das Temperaturfeld der Sprayzelle dagegen in der Peripherie eine um ca. 30 K erhöhte Temperatur auf, die in der Modellierung bislang nicht berücksichtigt werden konnte. Auch weist die experimentelle Bestimmung der Gastemperatur bedingt durch die zeitliche Varianz der Durchstromungsmasse von Luft in der Sprayzelle einen Messfehler von 10–20 K auf. Temperaturvariationen haben im vorliegenden Temperaturbereich jedoch große Auswirkungen auf die Chemie der kalten Verbrennung, relativ kleine Temperaturerhöhungen führen zu einer signifikanten Reduktion der Treibstoffdampfdichte. Eine Erhöhung der Temperatur in der Simulation auf 745 K konnte die Differenz zwischen Simulation und Messung etwa kompensieren.

Abbildung 5.31 stellt Messungen des Rußvolumenbruchs unter Referenzbedingungen (T_{gas} = 720 K, p_{gas} = 73 bar, p_{inj} = 1200 bar) mit numerischen RIF-Simulationen der Rußmassenverteilung in der quasi-stationären Verbrennungsphase 4,0 ms nach Injektionsbeginn gegenüber. Die Rußverteilungen in Messung und Simulation unterscheiden sich dabei deutlich. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Simulation kein Abheben der Flamme berücksichtigte, einem Flammenparameter, der wesentlichen Einfluss auf die vorgemischte Verbrennung im Dieselspray hat, in welcher die Grundbausteine der Rußagglomerate gebildet werden. Die Messung zeigt in der Nähe der Einspritzdüse die keilförmige, vorgemischte Reaktionszone, in der Vorläufer der Rußpartikel gebildet werden. Die Rußkonzentration nimmt mit zunehmendem Abstand zur Düse zu (vgl. Abbildung 5.18), da im Inneren des brennenden Sprays gute Bedingungen zur Agglomeration von Rußpartikeln herrschen (vgl.

Kapitel 2.4). Die Simulation zeigt dagegen keine Vormischzone, das Maximum der Rußkonzentration wird dadurch an eine andere Position geschoben.

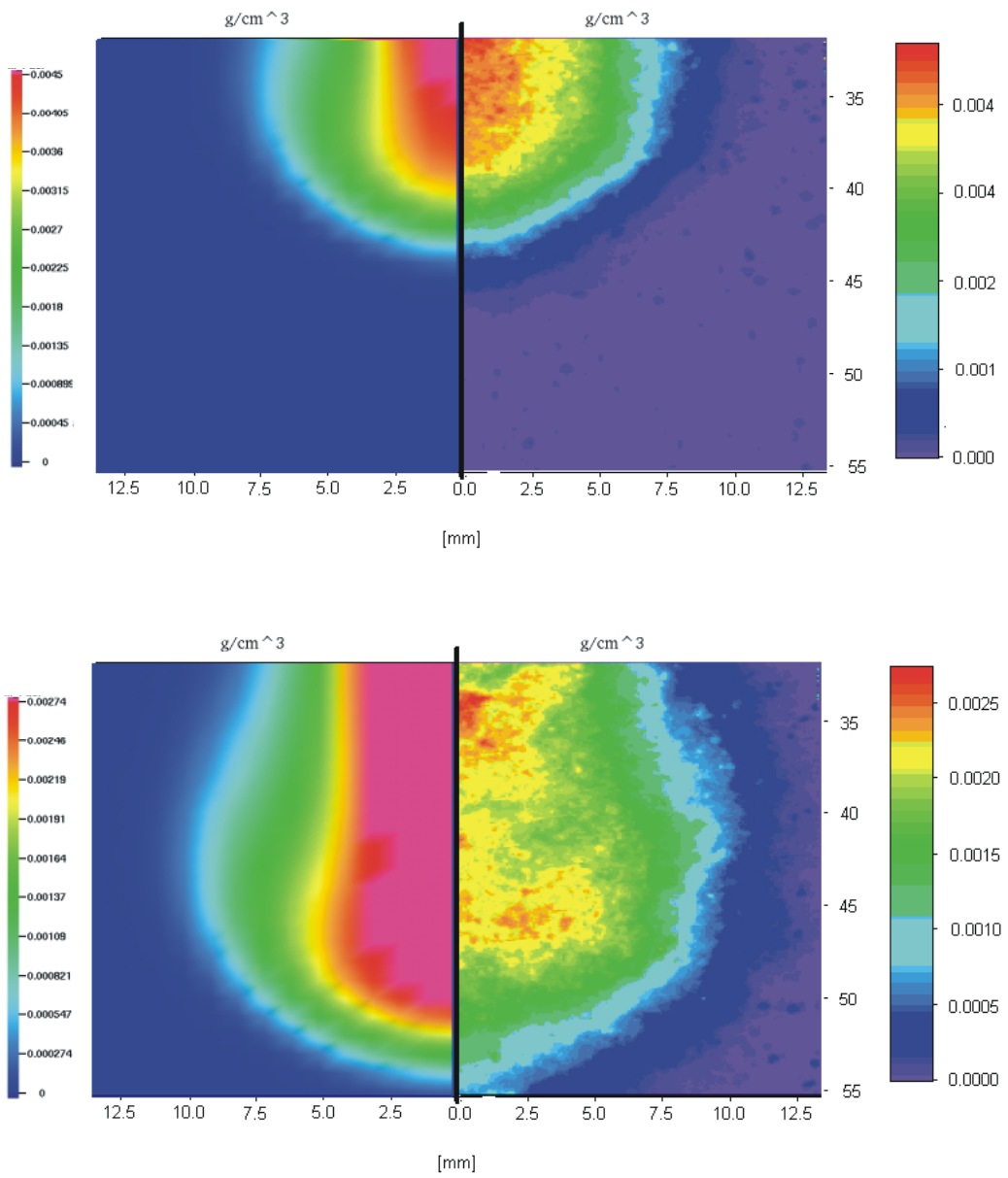

Abbildung 5.29: Treibstoffdampfverteilung unter Referenzbedingungen (T_{gas} = 720 K, p_{gas} = 73 bar, p_{inj} = 1200 bar) 1,0 ms (oben) und 1,5 ms (unten) nach Injektionsbeginn: Vergleich der numerischen RIF-Simulationen (links) mit Messungen an der Hochdruck- und Hochtemperatur-Zelle (rechts). Die Intensitätsskalen sind in g/cm^3, die Längenskalen in mm gegeben.

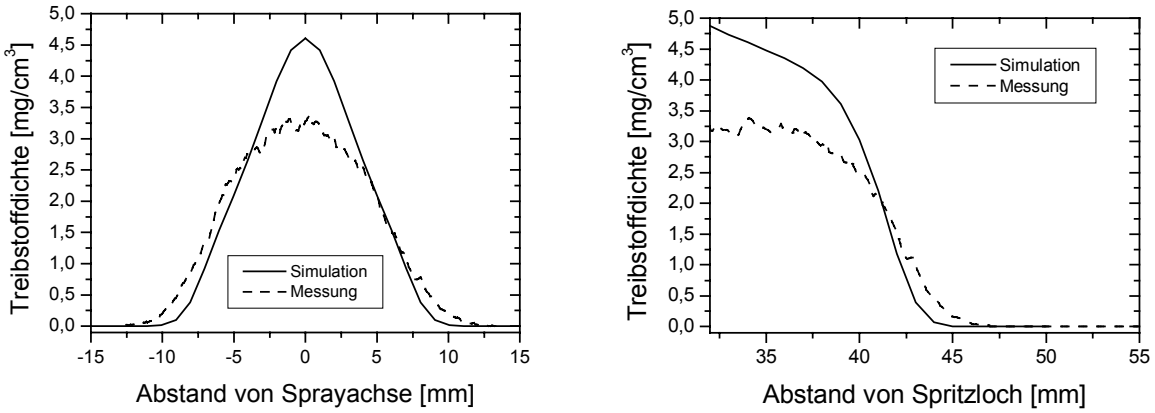

Abbildung 5.30: Auftragung der Signalintensitäten aus Abbildung 5.29 (oben) entlang einer horizontalen Schnittachse 34 mm unter der Einspritzdüse (links) und entlang der vertikalen Sprayachse (rechts) 1,0 ms nach Injektionsbeginn.

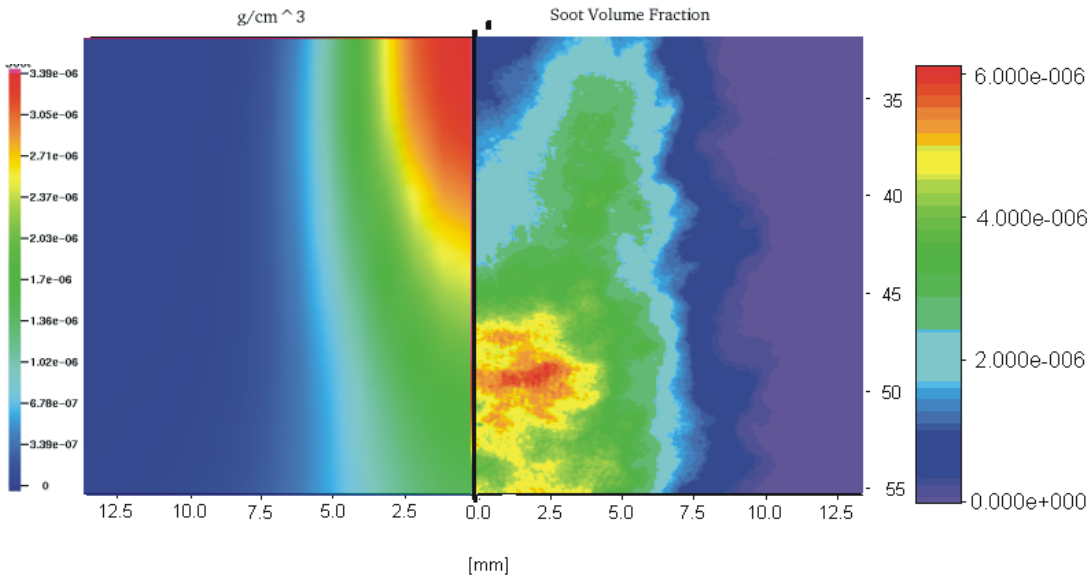

Abbildung 5.31: Rußbildung unter Referenzbedingungen (T_{gas} = 720 K, p_{gas} = 73 bar, p_{inj} = 1200 bar) 4,0 ms nach Injektionsbeginn: Vergleich von numerischer RIF-Simulation (links) und Messung an der Hochdruck- und Hochtemperatur-Zelle (rechts). Die Messungen geben Rußvolumenbrüche wieder, die Simulation ist in g/cm^3 skaliert. Längenangaben in mm. Die Simulation wurde bei T_{gas} = 745 K angefertigt, um in der Modellierung dem Experiment vergleichbare Zündverzugszeiten zu erreichen.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass Simulation und Experiment in Sprayproagation, Verdampfung, Gemischbildung, Chemie der kalten Verbrennung und Zeitpunkt der heißen Zündung quantitativ gut übereinstimmten. Dagegen konnte die Rußbildung während der heißen Verbrennung nicht korrekt simuliert werden. Dafür ist im wesentlichen der Umstand verantwortlich, dass ein Abheben der Dieselsprayflamme im verwendeten RIF-Code nicht implementiert war. Eine Weiterentwicklung des numerischen Rußbildungsmodells auf der Grundlage der Befunde dieser Arbeit ist Gegenstand der aktuellen Forschung [154].

5.9 Datengetriebene Modellierung und Assoziationsanalyse

Unabhängig von der im vorherigen Kapitel vorgestellten Modellierung, die auf physikalisch-chemischen Grundannahmen basiert, wurde in dieser Arbeit eine rein datengetriebene Modellierung der Messdaten durchgeführt. Dabei kamen Data Mining-Techniken wie Entscheidungsbäume und Neuronale Netze zum Einsatz. Zusätzlich wurde eine Assoziationsanalyse der Messgrößen und Versuchsparameter durchgeführt. Eine Beschreibung dieser Techniken findet sich in Kapitel 2.5. Für diese Arbeit wurde die Software *SAS ® Enterprise Miner™* (Version 4.1) der Firma *SAS Institute GmbH* verwendet.

Als Datengesamtheit der datengetriebenen Modellierung wurden Abbildungen des Rußvolumenbruchs gewählt, die durch Abbildung der laserinduzierten Inkandeszenz (LII) gemäß Kapitel 3.4 gewonnen wurden. Die Datengesamtheit wurde auf solche Bilder beschränkt, die unter experimentellen Bedingungen aufgenommen worden waren, welche eine Zündung des Sprays und damit eine Rußbildung ermöglichten. Zur weiteren Verringerung des Datenvolumens wurden die Signalintensitäten über den gesamten Bildbereich gemittelt, die Ortsauflösung der Messungen wurde so auf die drei Lichtschnittpositionen reduziert. Als Zielgröße der Modellierung wurde dieser mittlere Rußvolumenbruch definiert. Die Zielgröße hing von folgenden Variablen ab: Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, Injektionsdruck, Durchmesser der Injektionsdüse, Prozent hydroerosive Verrundung der Injektionsdüse, Lichtschnittposition, Beobachtungszeit, Sauerstoffgehalt in der Umgebungsluft und Injektorsteuerung (Haupt- und evtl. Pilotinjektion). Jedes gemessene LII-Bild unter Zündbedingungen ging mit seinem mittleren Rußvolumenbruch und den genannten abhängigen Variablen als jeweils ein Element in die Lernmenge ein.

Der Entscheidungsbaum wurde bis zu einer Tiefe von zehn Verzweigungen generiert. Weitere Verzweigungen erbrachten keinen zusätzlichen Klassifikationsgewinn und bargen zudem die Gefahr, dass Messunsicherheiten und Rauschen in der Modellierung übergewichtet werden. Jeder Knotenpunkt verzweigte in maximal zwei Äste. Abbildung 5.32 zeigt einen Ausschnitt des modellierten Entscheidungsbaums. Erstes Verzweigungskriterium in der obersten Baumebene ist die Lichtschnittposition. Dieser Befund lässt sich intuitiv leicht nachvollziehen, nimmt doch die Rußbildung entsprechend den konzeptionellen Überlegungen in Kapitel 2.4 mit der Entfernung zur Einspritzdüse stark zu. Auf den weiteren Verzweigungsebenen folgen dann beispielsweise Injektionsmodus, Umgebungstemperatur und Injektionsdruck als weitere

Verzweigungskriterien. In der Abbildung sind für jeden Verzweigungsknoten die Anzahl der Datenelemente und der jeweilige Durchschnittswert der Zielvariable (Rußvolumenbruch in *parts per billion*, ppb) angegeben. Hellgelbe Farbe indiziert einen niedrigen Variablenwert, Dunkelrot einen hohen Wert. Unter jedem Knoten sind jeweils das Verzweigungsattribut der folgenden Baumebene und die zugehörigen Attributwerte dargestellt.

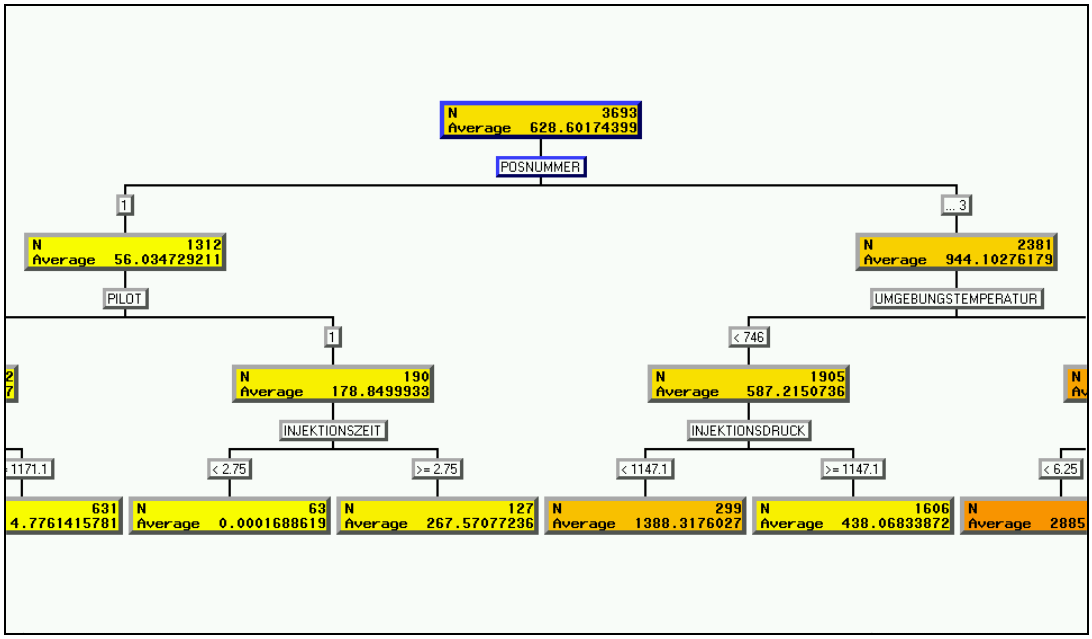

Abbildung 5.32: Ausschnitt eines Entscheidungsbaums. Zielvariable ist der Rußvolumenbruch in ppb (parts per billion). Für jeden Verzweigungsknoten sind Anzahl der Datenelemente und der jeweilige Durchschnittswert der Zielvariable angegeben. Hellgelbe Farbe indiziert einen niedrigen Variablenwert, Dunkelrot einen hohen Wert. Unter jedem Knoten sind jeweils das Verzweigungsattribut der folgenden Baumebene und die zugehörigen Attributwerte dargestellt.

Eine Darstellung des Entscheidungsbaums wie in Abbildung 5.32 stößt schon nach wenigen Verzweigungsebenen an ihre Grenzen. Eine vollständige Darstellung aller Ebenen leistet das äquivalente Baumringdiagramm in Abbildung 5.33. Die Wurzel des Baums ist hier als Ring im Kreiszentrum dargestellt. Jede Verzweigung des Baums erzeugt einen weiteren konzentrischen Ring. Die Elemente der Datengesamtheit verteilen sich nach außen hin über eine zunehmende Zahl einzelner Ringsegmente. Der Baumausschnitt in Abbildung 5.32 findet sich

in dieser Darstellung in der Kreismitte. Die Farbcodierung ist identisch mit Abbildung 5.32. Die Verzweigungsattribute wurden jedoch zur bessern Übersichtlichkeit ausgespart.

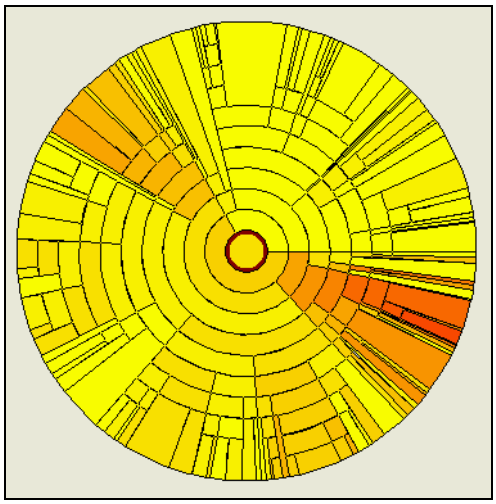

Abbildung 5.33: Vollständige Darstellung des Entscheidungsbaums aus Abbildung 5.32 als Baumringdiagramm. Die Wurzel des Baums ist hier als Ring im Kreiszentrum dargestellt. Jede Verzweigung des Baums erzeugt einen weiteren konzentrischen Ring. Die Elemente der Datengesamtheit verteilen sich nach außen hin über eine zunehmende Zahl einzelner Ringsegmente. Der Baumausschnitt in Abbildung 5.32 findet sich in dieser Darstellung in der Kreismitte. Hellgelbe Farbe indiziert einen niedrigen Rußvolumenbruch, Dunkelrot einen hohen. Die Verzweigungsattribute sind zur bessern Übersichtlichkeit ausgespart.

Der in dieser Arbeit generierte Entscheidungsbaum ermöglicht es dem Anwender, jeder Kombination experimenteller Parameter durch schrittweises Befolgen der hierarchisch geordneten Entscheidungsregeln einen Rußvolumenbruch zuzuordnen. Das Modell ist gleichermaßen sowohl zur Darstellung des gewonnenen Datensatzes als auch zur Vorhersage des Rußvolumenbruchs für neue Parameterkombinationen geeignet. Beispielsweise wird ein großes mittleres LII-Signal (dunkelrote Sektion in Abbildung 5.33) laut Modellaussage durch folgende Einflussgrößen bewirkt: Ungebungstemperatur > 746 K (d. h. Temperatur am oberen Ende des experimentell erfassbaren Temperaturbereiches), Messposition 3 (am düsenfernen Ende des Sprays), Beobachtungszeit zwischen 3,75 und 5,75 ms nach Injektionsbeginn (Phase der quasi-stationären Verbrennung). Solche Vorhersagen ermöglichen zum einen Aussagen über den Wert von Messgrößen bei Versuchsparametern, die nicht experimentell erfasst

wurden oder nicht erfasst werden konnten. Zum anderen wird durch sie die experimentelle Planung unterstützt, indem wichtige von weniger bedeutsamen Einflussgrößen separiert werden. Eine Verfeinerung der Datengesamtheit bzgl. der Variablenzahl und der Anzahl der unterschiedlichen Variablenwerte führt dabei zu detaillierteren Modellaussagen.

Neben dem Entscheidungsbaum-Verfahren wurde ein neuronales Netz zur datengetriebenen Modellierung der Messdaten am Dieselspray eingesetzt. Dabei handelte es sich um ein sogenanntes *Perzeptron*. Das Perzeptron ist die verbreitetste Architektur für neuronale Netze. Ein Perzeptron besteht aus einer beliebige Anzahl von Eingangsneuronen, einer oder mehreren verborgenen Neuronen-Schichten und einer beliebigen Anzahl von Ausgangsneuronen. Alle Neuronen sind vorwärtsgerichtet verbunden. Rekursive, seitliche und Rückwärtsbeziehungen sind nicht erlaubt. Verbindungspartner sind nur Neuronen benachbarter Schichten. Sprünge über Schichten sind nicht erlaubt. Die Transferfunktionen eines Perzeptrons sind linear. Jede Transferfunktion ist mit einer logistischen Funktion verkettet, der sogenannten Aktivierungsfunktion. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Perzeptron mit einer einzigen verborgenen Schicht verwendet. Ein neuronales Netz dieser Architektur ist sehr vielseitig anwendbar. Ist die Lernmenge ausreichend groß und sind eine ausreichende Anzahl von Neuronen und genügend Trainingszeit gegeben, kann dieses Perzeptron praktisch alle Funktionen mit beliebiger Genauigkeit modellieren [102]. Dieses neuronale Netz wurde mit derselben Datengesamtheit trainiert wie das obige Entscheidungsbaum-Verfahren. Die Anzahl der verwendeten Neuronen kann durch die Zahl der Eingangs- und Zielvariablen, den Umfang der Lernmenge und das Rauschniveau der Eingangsvariablen abgeschätzt werden. Es zeigte sich, dass schon mit 7 Neuronen die für die vorliegende Lernmenge bestmögliche Modellierung erzielt wird (siehe unten). Auch eine Steigerung der Neuronenzahl bis 50 erreichte kaum eine weitere Verbesserung der durchschnittlichen Abweichung von Modellantwort und Messgröße.

Um der Gefahr zu begegnen, dass die gefundenen Lerngewichte des neuronalen Netzes oder die Verzweigungsregeln des Entscheidungsbaums in erster Linie die Zufälligkeiten der Lernmenge spiegeln, statt das wiederzugeben, was sich auf andere Stichproben verallgemeinern lässt, wurden die Modelle an einer Testmenge validiert. 75% der Datengesamtheit dienten dabei dem Training des Netzes, die anderen 25% dem Test der Modelle. Die Testmenge umfasste 3.660 zufällig ausgewählte LII-Bilder, die nicht mit der Trainingsmenge aus 14.640 Bildern überlappte. Die Signalintensitäten wurden erneut über den gesamten Bildbe-

reich integriert. Es soll angemerkt werden, dass dies zu kleinen Absolutwerten der Signalstärke führt, die weit niedriger liegen als die Maximalwerte. Abbildung 5.34 zeigt verschiedene Auftragungen von Elementen dieser Testmenge für das Entscheidungsbaum-Modell (Zeile oben) und das neuronale Modell (Zeile unten). In der linken Spalte ist der durch das Modell vorausgesagte Rußvolumenbruch, die Modellantwort, gegen den gemessenen Rußvolumenbruch aufgetragen. Die Modellantworten wurden auf Basis derselben experimentellen Parameter berechnet, die auch den zu vergleichenden Messwerten zugrunde lagen. In der rechten Spalte ist das Residuum (Residuum = Modellantwort minus Messwert) gegen die Modellantwort aufgetragen. Der Schwerpunkt der Modellantworten korrelierte linear mit den Messwerten (linke Spalte), doch ist bei beiden Modellen die Streubreite der vorhergesagten Werte sehr groß, wie besonders die rechte Spalte der Abbildung verdeutlicht. Zwar lagen die Residuen beider Modelle in einem symmetrisch um Null zentrierten Band, wie es in einem gut angepassten Modell der Fall sein muss. Doch skalierte die absolute Abweichung von Modellantwort und Messwert näherungsweise linear mit den Messwerten, was im Einzelfall große Vorhersagefehler zur Folge haben kann.

Die Güte der Modellierung ließ sich nicht durch Einführung weiterer Verzweigungsebenen in den Entscheidungsbaum oder die Erhöhung der Anzahl verborgener Neuronen verbessern (siehe oben). Die gewählten Modellparameter erreichten eine für die vorliegende Lernmenge bestmögliche Darstellung. Die Qualität der Modellierung hängt schließlich wesentlich von der Beschaffenheit der Lernmenge ab. In der verwendeten Lernmenge waren viele der experimentellen Parameter, wie beispielsweise Umgebungstemperatur, Einspritzdruck oder Düsendurchmesser lediglich durch zwei bis drei verschiedene Variablenwerte vertreten. Auch wiesen die 50 unter identischen Umgebungsbedingungen aufgenommenen Einzelbilder mitunter erhebliche LII-Signalfluktuationen auf, was in der Turbulenz der dieselmotorischen Verbrennung begründet liegt. Beides trägt vermutlich zu einer Verminderung der Modellgüte bei. Beim zukünftigen Einsatz der hier angewandten datengetriebenen Modellierungsverfahren in der Verbrennungsdiagnostik ist daher darauf zu achten, dass die der Modellierung zugrundeliegende Lernmenge ein dichteres Gitter von Messpunkten im Raum der experimentellen Parameter abdeckt und beim Vorliegen von starken Signalfluktuationen eine höhere Anzahl von Einzelbildern aufgenommen wird. Da die datengetriebene Modellierung der Lernmengen im Gegensatz zu modellgestützten Verfahren nicht die Gültigkeit einschränken-

der Annahmen voraussetzt, können Data Mining-Techniken wie Entscheidungsbaum-Verfahren und neuronale Netze vergleichsweise leicht auf andere Lernmengen übertragen werden. Insbesondere können die in dieser Arbeit eingesetzten Techniken auch bei anderen (laser-)diagnostischen Experimente verwendet werden.

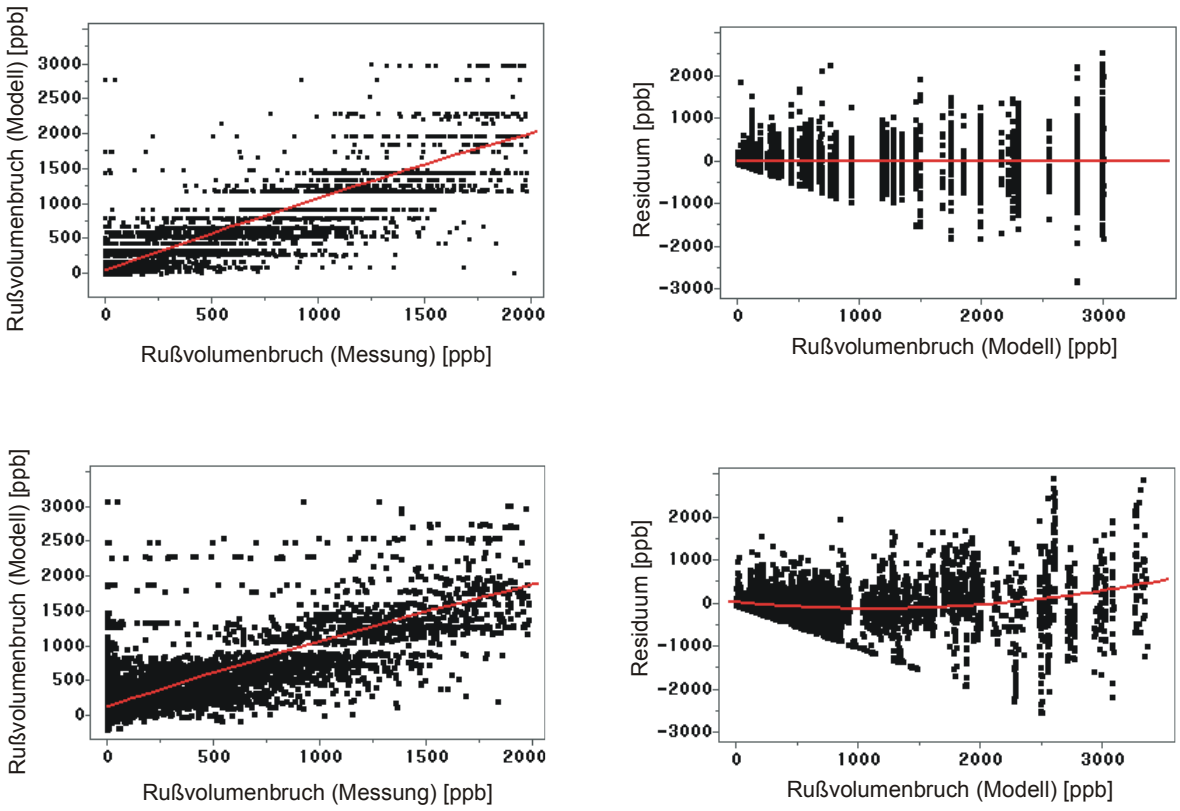

Abbildung 5.34: Güteanalyse der datengetriebenen Modellierung durch einen Entscheidungsbaum (Zeile oben) und durch ein neuronales Netz (Zeile unten). Zielvariable ist der über das gesamte Bild gemittelte Rußvolumenbruch. 90% der Zielwerte liegen unter 2000 ppb. Links wurde die Modellantwort gegen den gemessenen Rußvolumenbruch aufgetragen. Rechts wurde das Residuum = Modellantwort – Messwert gegen die Modellantwort aufgetragen. Kurvenanpassungen zweiter Ordnung sind rot dargestellt. Dargestellt ist eine zufällig ausgewählte Testmenge aus 3.660 LII-Bildern, die nicht mit der Trainingsmenge aus 14.640 Bildern überlappt.

Zur Identifikation und Quantifizierung von Abhängigkeiten der Variablen innerhalb der Datengesamtheit wurde eine Assoziations-Analyse durchgeführt. Basierend auf der Zählung von Häufigkeiten, mit denen Variablenwerte alleine oder in Kombination mit anderen Werten auftreten, generiert die Assoziations-Analyse Aussagen nach dem Muster „Wenn *X* Teil eines Ereignisses ist, dann ist auch *Y* Teil des Ereignisses in *p* Prozent der Fälle" („*X* ➔ *Y*", vgl. Abschnitt 2.5.4).

Abbildung 5.35 zeigt eine Assoziationsmatrix, die in derselben Datengesamtheit von LII-Messungen unter Zündbedingungen errechnet wurde, welche auch den datengetriebenen Modellierungen als Lernmenge zugrunde lag. Der Datenbestand der LII-Messungen wurde dabei so umformatiert, dass er von einer Software verarbeitet werden konnte, die gewöhnlich für kommerzielle Warenkorbanalysen eingesetzt wird. In Analogie zu einer solchen Warenkorbanalyse wurde in der vorliegenden laserdiagnostischen Anwendung untersucht, welche Kombinationen von experimentellen Parametern zu bestimmten Wertintervallen der Zielgröße Rußvolumenbruch führten. Die dargestellte Matrix zeigt Regeln der Form *X* ➔ *Y*. Dabei sind auf der Ordinate Kombinationen *X* von Versuchsparametern aufgetragen, die mit einer signifikanten Wahrscheinlichkeit zu einem von sechs Intervallen des Rußvolumenbruchs führen (Abszisse). Folgende Variablen und Variablenwerte gingen in die Untersuchung ein: Umgebungstemperatur (*RT* ist die Referenztemperatur von 720 K), Umgebungsdruck (*LLP* = 32 bar, *LP* = 55 bar, *RP* = 73 bar, *HP* = 86 bar), Injektionsdruck (*RPinj* = 1200 bar, *LPinj* = 800 bar), Einspritzdüse (*Düse1* bis *Düse5*, vgl. Kapitel 3.9), Sauerstoffgehalt in Umgebungsluft (*O2_normal* und *O2_reduziert*) und Injektorsteuerung (*pilot* und *no_pilot*). Die Zielvariable Rußvolumenbruch wurde in sechs Intervalle eingeteilt (LII0 < 20 ppb, LII1 < 220 ppb, LII2 < 420 ppb, LII3 < 620 ppb, LII4 < 820 ppb, LII5 > 820 ppb). Der Unterstützungsgrad der Regeln (*support*) wird in der Abbildung durch die geometrische Form der Einträge visualisiert. Ihr Konfidenzfaktor (*confidence*) wird durch Größe und Farbe der Matrixeinträge kenntlich gemacht.

Der Matrix kann entnommen werden, dass beispielsweise das Vorliegen von Referenzbedingungen (*no_pilot & duese1 & RT & RPinj & RP & O2_normal*, vierte Zeile der Ordinate) in 45% der Fälle zu einer hohen mittleren Rußbildung im untersuchten Spray (*LII5*, zweite Spalte der Abszisse) zu irgendeiner Beobachtungszeit und an irgendeiner Beobachtungsposition führte. Durch eine Pilotinjektion (fünfte Zeile) ändert sich diese Wahrscheinlichkeit nicht

wesentlich. Beide Regeln werden jeweils durch etwa 5% aller Messungen in der Datengesamtheit bestätigt. Geht man unter Beibehaltung aller anderen Referenzbedingungen von Düse Nr. 1 auf Düse Nr. 4 über (zweite Zeile), so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für eine starke Rußbildung auf etwa 65%. Der Übergang von 73 bar auf 55 bar dagegen (dritte Zeile) senkt die Wahrscheinlichkeit auf 20%. Die letzten beiden Regeln wurden dabei in jeweils etwa 2% aller Messungen beobachtet. Sie sind damit weniger verlässlich als die beiden erstgenannten Regeln. Die Assoziationsanalyse wurde in der gezeigten Weise erfolgreich von ihrem klassischen Einsatzgebiet im kommerziellen Bereich auf die vorliegende experimentelle Datenbasis übertragen.

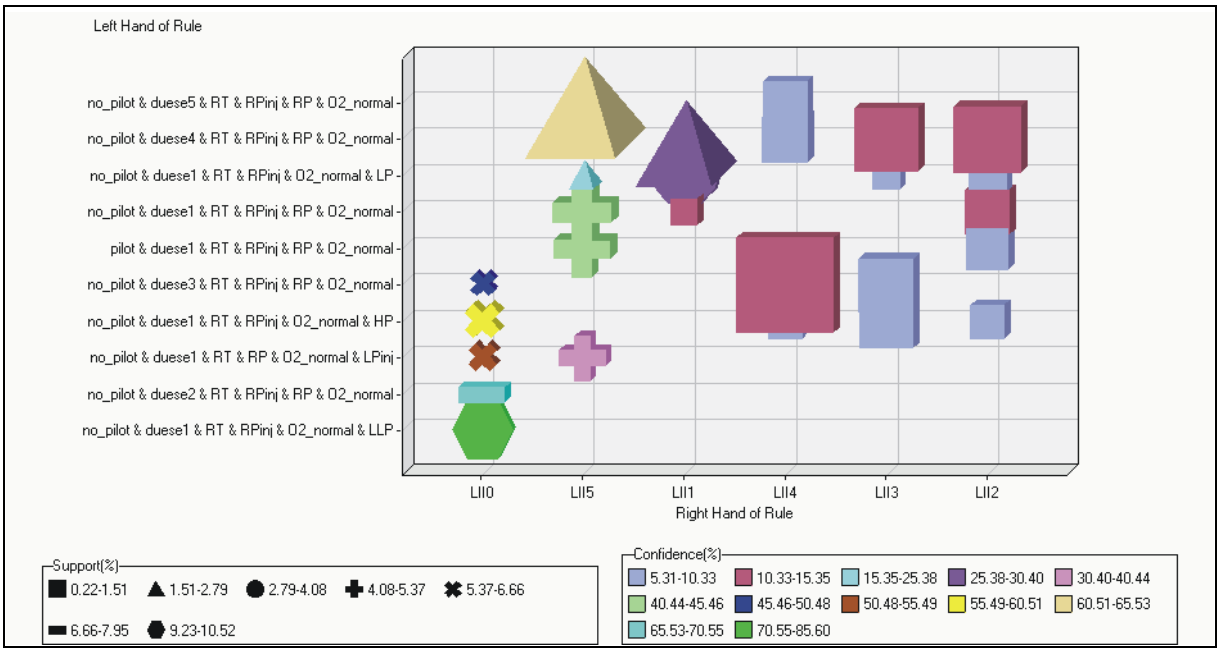

Abbildung 5.35: Assoziationsanalyse: Die dargestellte Matrix zeigt Regeln der Form $X \rightarrow Y$. Dabei sind auf der Ordinate Kombinationen X von Versuchsparametern aufgetragen, die mit einer signifikanten Wahrscheinlichkeit zu einer von sechs Intervalle des Rußvolumenbruchs führen (Abszisse). Der Unterstützungsgrad der Regeln (*support*) wird in der Abbildung durch die geometrische Form der Einträge visualisiert. Ihr Konfidenzfaktor (*confidence*) wird durch Größe und Farbe der Matrixeinträge kenntlich gemacht.

6 Zusammenfassung

Der Dieselmotor boomt. Durch neue Direkteinspritzungstechnologien und ein verändertes Markenimage erreichten die Neuzulassungen von Diesel-Pkws in den vergangenen Jahren beständig neue Rekordquoten. Der moderne Dieselmotor zeichnet sich im Vergleich zum Benzinmotor durch seine bis zu 30% höhere Verbrauchseffizienz und einen damit verminderten CO_2-Ausstoß aus. Dieselmotoren weisen aber gleichzeitig erhöhte Emissionen von Ruß und Stickoxiden auf. Insbesondere Emissionen von Dieselruß stehen zur Zeit stark im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses.

Primäre Strategien zur Reduktion der Emissionen von Dieselmotoren setzen bei der Bildung von Schadstoffen im Brennraum des Motors an. Zur Entwicklung wirksamer Gegenmaßnahmen ist ein detailliertes Verständnis der dem Verbrennungsprozess zugrundeliegenden mikroskopischen Vorgänge der Kraftstoffverteilung, des Kraftstoffabbrands und der Schadstoffentstehung notwendig. Voraussetzung hierfür ist die zuverlässige, experimentelle Beobachtung dieser Vorgänge. Die quantitative, zweidimensionale Laserdiagnostik hat sich als unverzichtbares Werkzeug zur Aufklärung fundamentaler Zusammenhänge im turbulenten, reaktiven und nicht-reaktiven Dieselspray erwiesen. Die komplexen Wechselwirkungen von turbulenter Strömung und Chemie sind dabei eine besondere Herausforderung sowohl für das Experiment als auch für die Modellierung. Ohne ihr Verständnis ist der Einsatz hochoptimierter Verbrennungsprozesse in zukünftigen Dieselmotoren nicht denkbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffbildung eines Dieselsprays experimentell an einer weltweit neuartigen Hochdruck- und Hochtemperatur-Zelle unter motortypischen Bedingungen untersucht. Dabei wurden eine Vielzahl laserdiagnostischer Techniken an den Versuchsträger adaptiert, die eine berührungsfreie, örtlich und zeitlich aufgelöste und quantitative Messung von Treibstoffdampfverteilung und Rußkonzentration sowie eine qualitative Messung der Rußpartikelgröße, NO-, und Formaldehyd-Konzentration (HCHO) und der Konzentration von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) in gezündeten und ungezündeten Dieselsprays ermöglichten. Bei diesen laseroptischen Verfahren handelte es sich um planare Rayleigh-Spektroskopie (Rayleigh-Lichtstreuung), planare laserinduzierte Inkandeszenz (LII) und planare laserinduzierte Fluo-

reszenz (LIF) an NO, PAH und HCHO. Erstmals wurde zudem 5-Nonanon als fluoreszierender Treibstoffmarker zur Beobachtung der Kraftstoffverteilung eingesetzt. Gleichfalls zum ersten mal wurden Rußvolumenbruch, Treibstoffdampfdichte via Rayleigh-Lichtstreuung, relative NO-Konzentration und die Rußpartikelgröße D_{63} simultan gemessen. Die gleichzeitige Abbildung der beiden antagonistischen Spezies NO und Ruß ist dabei von großem Interesse für die technische Anwendung. Ebenso wurden die Konzentrationen an HCHO, PAH und Treibstoff (via Tracer-LIF an 5-Nonanon) simultan abgebildet. HCHO gilt als guter Indikatoren für das Vorliegen des sogenannten *kalten* Verbrennungsprozesses. PAHs sind bekannt als Grundbausteine und Vorläufer von Rußpartikeln. Alle Messungen wurden an mehreren Messpositionen zeitaufgelöst unter systematischer Variation verschiedener experimenteller Parameter durchgeführt, wie Umgebungsdruck, Temperatur, Injektionsdruck, zeitliche Injektionssteuerung, Typ der Einspritzdüse und Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungskammer. Anhand spektral aufgelöster Voruntersuchungen des gezündeten und ungezündeten Dieselsprays wurden Anregungs- und Detektionsschemata dieser laserdiagnostischen Experimente überprüft, vom Detektionszeitpunkt abhängige Untergrundsignale aufgeklärt und die Fluoreszenzeigenschaften des neuen Kraftstoffmarkers 5-Nonanon unter motorischen Bedingungen charakterisiert.

Durch den Umfang der simultan durchgeführten Experimente, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte halbautomatische Versuchsführung und die systematische Variation der Versuchsparameter wurde ein großes Volumen experimenteller Befunde generiert. Mithilfe automatisierter Softwareroutinen wurden 110.000 Einzelbilder elektronisch nachbearbeitet und die vorliegenden Bildinformationen reduziert und analysiert. Die Größe des experimentellen Datensatzes erlaubte eine statistische Analyse der Messgrößen. Bei der Bildnachbearbeitung kam ein neuentwickelter Algorithmus zur Korrektur von Beam Steering-Phänomenen zum Einsatz. Zum ersten mal wurden laserdiagnostische Messungen auf diesen Effekt korrigiert, wodurch lokale Messunsicherheiten in Einzelbildern deutlich reduziert werden konnten.

Ein Teilziel dieser Experimente war ein Vergleich der Rayleigh- und der Tracer-LIF-Technik zur Abbildung der Kraftstoffdampfverteilung. Vor- und Nachteile beider Methoden wurden aufgezeigt. Der geringeren Streulichtempfindlichkeit der Tracer-LIF-Technik stand die vergleichsweise einfache Quantifizierung der Rayleigh-Technik gegenüber. Der verwendete Fluoreszenzmarker 5-Nonanon besaß zwar eine für Anwendungen in Dieselkraftstoff geeigne-

te Flüchtigkeit und die stärkste Fluoreszenzemissionsstärke aller vorab getesteten Tracerkandidaten. In Stoßwellenexperimenten und in der Dieselsprayzelle ließ sich unter motorischen Temperatur- und Druck-Bedingungen jedoch eine thermische Instabilität nachweisen, die eine Quantifizierung der Tracer-LIF-Messungen verhinderte. Ursache dieser Instabilität ist die kalte Verbrennung des Dieselsprays, die der heißen Verbrennung vorgelagert ist und in welcher bereits eine Zersetzung der großen Kohlenwasserstoff-Moleküle einsetzt. Dennoch repräsentierte das „Tracer-Signal“ die Kraftstoffverteilung im Vergleich zur Rayleigh-Technik erstaunlich gut.

Quantitative Rayleigh-Streuung am Kraftstoffdampf erwies sich als Methode der Wahl zur Untersuchung von Verdampfung und Gemischbildung des Dieselsprays. Obwohl diese Technik prinzipiell sehr empfindlich gegenüber Untergrundsignalen aus elastisch gestreutem Laserlicht ist, konnte hier der im Vergleich zur Umgebungsluft hohe Streuquerschnitt des Kraftstoffs ausgenutzt werden, um Kraftstoffdampf von anderen Signalquellen abzugrenzen. Anhand einer PDF-Analyse (probability density function) konnte gezeigt werden, dass im untersuchten Dieselspray eine hohe Kraftstoffdampfdichte mit einer niedrigen Dichtefluktuation korrelierte. Die Treibstoffdampfverteilung vor der heißen Zündung zeigte hohe Dichtefluktuationen an allen Sprayrändern. Dieser Befund steht im Gegensatz zu früheren Messergebnissen in Gassprays [147].

Simultan zur Abbildung der Treibstoffdampfdichte durch Rayleigh-Lichtstreuung wurde der Rußvolumenbruch durch LII abgebildet. Auch diese Messungen erfolgten quantitativ. Aus beiden Messgrößen zusammen ließ sich der Rußpartikelgrößenparameter D_{63} ableiten. Die experimentellen Befunde zur Konzentrations- und Größenverteilung von Ruß im brennenden Dieselspray finden sich in guter Übereinstimmung mit gängigen, konzeptionellen Vorstellungen der Rußbildung und Rußoxidation (vgl. Kapitel 2.4). Der Übergang von der kalten zur heißen Verbrennung im Dieselspray konnte zudem anhand von simultanen Aufnahmen der Kraftstoff- und Rußkonzentrationen abgebildet werden, was eine direkte Visualisierung des Zweischritt-Zündungsmodells ermöglichte. Der Verlauf der kalten Verbrennung ließ sich anhand der Chemilumineszenz und der laserinduzierten Fluoreszenz von Formaldehyd bis nahe an den Beginn der Einspritzung zurückverfolgen.

Die schrittweise Auswertung und Raffination der experimentellen Befunde am reaktiven und nicht-reaktiven Dieselspray führte zur Erstellung einer Datenbank, die zur Validierung nume-

rischer Simulationen herangezogen werden kann und somit die Entwicklung neuer modellgestützter Prognoseverfahren ermöglicht. Die vorliegenden experimentellen Befunde wurden mit numerischen Simulationen durch Projektpartner der RWTH Aachen verglichen. Simulation und Experiment stimmten bzgl. Spraypropagation, Verdampfung, Gemischbildung, Chemie der kalten Verbrennung und Zeitpunkt der heißen Zündung quantitativ gut überein. Abweichungen in der Kraftstoffdampfdichte können auf Temperatureinflüsse zurückgeführt werden. Temperaturvariationen haben im vorliegenden Temperaturbereich um 720 K große Auswirkungen auf die Chemie der kalten Verbrennung, relativ kleine Temperaturerhöhungen führen zu einer signifikanten Reduktion der Treibstoffdampfdichte. Eine Erhöhung der Temperatur in der Simulation von 720 K auf 745 K konnte die Differenz der Kraftstoffdampfdichte zwischen Simulation und Messung etwa kompensieren. Dieser Temperaturunterschied lag innerhalb der Schwankungsbreite sowohl des inhomogenen Temperaturfeldes im Brennraum als auch der betriebstechnischen Temperaturfluktuationen der Zellheizung. Dagegen konnte die Rußbildung während der heißen Verbrennung nicht korrekt simuliert werden. Dafür ist im wesentlichen der Umstand verantwortlich, dass ein Abheben der Dieselsprayflamme im verwendeten RIF-Code nicht implementiert war. Eine Weiterentwicklung des numerischen Rußbildungsmodells auf der Grundlage der experimentellen Befunde dieser Arbeit ist Gegenstand der aktuellen Forschung [154].

Die Bildung von NO konnte gegen und nach dem Ende der quasi-stationären Diffusionsflamme nachgewiesen werden, wie von Dec [79] vermutet. Eine frühe NO-Bildung, für welche in der vorliegenden Arbeit Indizien gefunden wurden, war bislang nie Gegenstand der gängigen Dieselspraymodelle. Ein ungünstiges Signal/Untergrund-Verhältnis verhinderte jedoch vorläufig die Erforschung dieses neuen Phänomens.

In dieser Arbeit wurden im Gebiet der abbildenden Laserdiagnostik bislang weitgehend ungenutzte Data Mining-Techniken eingesetzt, welche die Fähigkeit besitzen, den Forscher durch intelligente Routinen bei der Analyse von Massendaten zu unterstützen. Unabhängig von modellorientierten Verfahren wurde eine datengetriebene Modellierung der Messdaten durchgeführt. Es zeigte sich, dass dieser pragmatische, rein phänomenologisch auf experimentellen Daten statt auf physikalisch-chemischen Modellen basierende Ansatz einen vergleichsweise geringen Aufwand an Arbeits- und Rechenzeit besitzt und sich sowohl Ansatz als auch Implementierung leicht auf andere diagnostische Anwendungen übertragen lassen.

Durch Entscheidungsbäume, neuronale Netze und eine statistische Assoziationsanalyse konnten die experimentellen Befunde kompakt dargestellt werden. Am Beispiel der Rußbildung ließ sich die Korrelation von hohem Rußvolumenbruch mit der Phase der quasi-stationären Verbrennung und einem Ort am düsenfernen Sprayende zeigen.

Im Rahmen dieser Arbeit gelang ein umfangreicher Einblick in die Natur dieselmotorischer Verbrennungsprozesse. Die experimentellen Befunde wurden zur Überprüfung gängiger, konzeptioneller Verbrennungsmodelle herangezogen und erwiesen sich als wichtige Grundlage zur Entwicklung und Validierung zukünftiger numerischer Simulationsverfahren.

Literaturverzeichnis

1. F. Vorholz, *Einheizer auf vier Rädern*, in *Die Zeit, Nr. 21/2002*. 2002. S. 22.
2. H. Schuh, *Die Kunst des lupenreinen Dieselns*, in *Die Zeit, Nr. 50/2002*. 2002. S. 38.
3. B. Strassmann, *Benzin direkt - der zweite Anlauf*, in *Die Zeit, Nr. 37/2002*. 2002. S. 39.
4. D. H. Lamparter, *Kennzeichen D - Deutschlands Autofahrer steigen reihenweise auf Diesel um*, in *Die Zeit, Nr. 3/2000*. 2000. S. 19.
5. G. Herzberg, *Molecular Spectra and Molecular Structure Vol. 3* (van Nostrand Reinghold, NY, 1966).
6. A. C. Eckbreth, *Laser diagnostics for combustion temperature and species*, 2 ed (Gordon and Breach, Amsterdam, The Netherlands, 1996).
7. S. Svanberg, *Atomic and Molecular Spectroscopy* (Springer-Verlag, Heidelberg, 2001).
8. K. Kohse-Höinghaus und J. B. Jeffries, eds. *Applied Combustion Diagnostics* (Taylor and Francis, New York, 2002).
9. V. Ebert, C. Schulz, H.-R. Volpp, J. Wolfrum und P. Monkhouse, "Laser diagnostics of combustion processes: From chemical dynamics to technical devices", Israel Journal of Chemistry **39**, 1-24 (1999).
10. J. Wolfrum, T. Dreier, V. Ebert und C. Schulz, "Laser-based combustion diagnostics", in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, R.A. Meyers, Editor (J. Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2000), S. 2118-2148.
11. F. Hildenbrand, C. Schulz, M. Hartmann, F. Puchner und G. Wawrschin, "In-cylinder NO-LIF imaging in a realistic GDI engine using KrF excimer laser excitation", SAE Technical Paper Series No. 1999-01-3545 (1999).
12. F. Hildenbrand, C. Schulz, J. Wolfrum, F. Keller und E. Wagner, "Laser diagnostic analysis of NO formation in a direct injection Diesel engine with pump-line nozzle and common-rail injection systems", Proc. Combust. Inst. **28**, 1137-1144 (2000).
13. F. Hildenbrand, C. Schulz, F. Keller und E. Wagner, "Laser-induced fluorescence imaging of NO in a DI Diesel engine using KrF excimer radiation", in *Proceedings of Towards Clean Diesel Engines* (Paris, June, 2000).
14. F. Hildenbrand, C. Schulz, F. Keller, G. König und E. Wagner, "Quantitative laser diagnostic studies of the NO distribution in a DI Diesel engine with PLN and CR injection systems", SAE Technical Paper No. 2001-01-3500 (2001).
15. G. König, F. Keller, E. Wagner, F. Hildenbrand, C. Schulz, J. Boltz und D. Brüggemann, "Untersuchung der NO- und Russkonzentrationsverteilung in einem modernen Nutzfahrzeug-Dieselmotor mittels laserspektroskopischer Methoden", in *Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik (BEV), Heft 1*, A. Leipertz, Editor (ESYTEC Energie- und Systemtechnik Erlangen GmbH, Haus der Technik e.V., 13./14. März, 2001), S. 213-222.
16. G. Josefsson, I. Magnusson, F. Hildenbrand, C. Schulz und V. Sick, "Multidimensional laser diagnostic and numerical analysis of NO formation in a gasoline engine", Proc. Combust. Inst. **27**, 2085-2092 (1998).
17. G. Herzberg, *Molecular spectra and molecular structure. I. Spectra of diatomic molecules*, 2 ed (Krieger, Malabar, Florida, 1950).
18. G. W. Bethke, "Oscillator strengths in the far ultraviolet. I. Nitric oxide", J. Chem. Phys. **31**, 662 (1959).

19. T. J. McGee, G. E. Miller, J. Burris und T. J. McIlrath, "Fluorescence branching ratios from the A v'=0 state of NO", J. Quant. Spectros. Radiat . Transfer **29**, 333 (1983).
20. S. R. Langhoff, C. W. Bauschilcher und H. Partridge, "Theoretical study of the NO A-X system", J. Chem. Phys. **89**, 4909 (1988).
21. J. R. Reisel, C. D. Carter und N. M. Laurendeau, "Einstein coefficients for rotational lines of the (0,0) band of the NO $A^2\Sigma^+$-$X^2\Pi$ system", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **47**, 43-54 (1992).
22. P. H. Paul, "Calculation of transition frequencies and roational line strengths in the γ-bands of nitric oxide", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Tranfer **57**, 581-589 (1997).
23. F. R. Gilmore, "Potential energy curves for N_2, NO, O_2 and corresponding ions", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer **5**, 369-390 (1965).
24. M. Knapp, A. Luczak, V. Beushausen, W. Hentschel, P. Manz und P. Andresen, "Quantitative in-cylinder NO LIF measurements with a KrF excimer laser applied to a mass-production SI engine fueled with isooctane and regular gasoline", SAE Technical Paper Series No. 970824 (1997).
25. F. Hildenbrand, *Quantitative Bestimmung von NO-Konzentrationsverteilungen in einem DI-Dieselmotor*, in *Physikalisch-Chemisches Institut*. 2000, Ruprecht-Karls-Universität: Heidelberg.
26. C. Schulz, V. Sick, J. Heinze und W. Stricker, "Laser-induced fluorescence detection of nitric oxide in high-pressure flames using A-X(0,2) excitation", Appl. Opt. **36**, 3227-3232 (1997).
27. J. E. Harrington und K. C. Smyth, "Laser-induced fluorescence measurements of formaldehyde in a methane/air diffusion flame", Chem. Phys. Lett. **202**, 196 (1992).
28. S. Böckle, J. Kazenwadel, T. Kunzelmann, D.-I. Shin und C. Schulz, "Single-shot laser-induced fluorescence imaging of formaldehyde with XeF excimer excitation", Appl. Phys. B **70**, 733-735 (2000).
29. S. Böckle, J. Kazenwadel, T. Kunzelmann, D.-I. Shin, C. Schulz und J. Wolfrum, "Simultaneous single-shot laser-based imaging of formaldehyde, OH and temperature in turbulent flames", Proc. Combust. Inst. **28**, 279-286 (2000).
30. S. Yamagishi und M. Tsuchiya, "LIF measurements of formaldehyde in flame by YAG THG", Proc. of COMODIA 94, 511-514 (1994).
31. N. Graf, J. Gronki, C. Schulz, T. Baritaud, J. Cherel, P. Duret und J. Lavy, "In-Cylinder Combustion Visualization in an Auto-Igniting Gasoline Engine using Fuel Tracer- and Formaldehyde-LIF Imaging", SAE Technical Paper Series No. 2001-01-1924 (2001).
32. H. Kosaka, V. H. Drewes, L. Catalfamo, A. Aradi, N. Lida und T. Kamimoto, "Two-dimensional imaging of formaldehyde formed during the ignition process of a Diesel fuel spray", SAE Technical Paper Series 2000-01-0236 (2000).
33. W. Koban, *Entwicklung und Anwendung eines laserinduzierten Zwei-Tracer-Fluoreszenzverfahrens zur zweidimensionalen Abbildung lokaler Sauerstoffkonzentrationen*, in *Diplomarbeit, Physikalisch-Chemisches Institut*. 2001, Ruprecht-Karls-Universität: Heidelberg.
34. H. Krämer, S. Einecke, C. Schulz, V. Sick, S. R. Nattrass und J. S. Kitching, "Simultaneous mapping of the distribution of different fuel volatility classes using tracer-LIF and NIR tomography in an IC engine", SAE Transactions, Journal of Fuels & Lubricants **107**, 1048-1059 (1998).

35. S. Einecke, C. Schulz, V. Sick, A. Dreizler, R. Schießl und U. Maas, "Two-dimensional temperature measurements in an SI engine using two-line tracer LIF", SAE Technical Paper Series No. 982468 (1998).
36. D. Frieden, V. Sick, J. Gronki und C. Schulz, "Quantitative oxygen imaging in an engine", Appl. Phys. B **75**, 137-141 (2002).
37. H. Haken und H. C. Wolf, *Molekülphysik und Quantenchemie. Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*, 3 ed (Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1998).
38. W. Demtröder, *Laserspektroskopie. Grundlagen und Techniken*, 3 ed (Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1993).
39. T. Dreier, A. Dreizler und J. Wolfrum, "The application of a raman-shifted tunable KrF excimer laser for laser-Induced fluorescence combustion diagnostics", Appl. Phys. B **55**, 381-387 (1992).
40. L. A. Melton, "Soot diagnostics based on laser heating", Appl. Opt. **23**, 2201-2208 (1984).
41. J. E. Dec, A. O. z. Loye und D. L. Siebers, "Soot distribution in a D.I. Diesel engine using 2-D laser-induced incandescence imaging", SAE Technical Paper Series No. 910224 (1991).
42. J. E. Dec und C. Espey, "Ingnition and early soot formation in a DI Diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics", SAE Technical Paper Series No. 950456 (1995).
43. J. E. Dec und C. Espey, "Soot and fuel distribution in a D.I. diesel engine via 2-D imaging", SAE Technical Paper Series No. 922307 (1992).
44. J. E. Dec, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser-Induced Incandescence, Elastic Scattering, and Flame Luminosity", SAE Technical Paper Series No. 920115 (1992).
45. R. L. Vander Wal, "Laser-induced incandescence: Detection issues", Appl. Opt. **35**, 6548-6559 (1996).
46. R. L. Vander Wal und K. A. Jensen, "Laser-induced incandescence: excitation intensity", Appl. Opt. **37**, 1607-1616 (1998).
47. J. Appel, B. Jungfleisch, M. Marquardt, R. Suntz und H. Bockhorn, "Assessment of soot volume fractions from laser-induced incandescence by comparison with extinction measurements in laminar, premixed, flat flames", Proc. Comb. Inst. **26**, 2387-2395 (1996).
48. B. Axelsson, R. Collin und P.-E. Bengtsson, "Laser-induced incandescence for soot particle size measurements in premixed flat flames", Appl. Opt. **39**, 3683-3690 (2000).
49. T. Ni, J. A. Pinson, S. Gupta und R. J. Santoro, "Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence", Appl. Opt. **34**, 7083-7091 (1995).
50. D. J. Bryce, N. Ladommatos und H. Zhao, "Quantitative investigation of soot distribution by laser-induced incandescence", Appl. Opt. **39**, 5012-5022 (2000).
51. S. Will, S. Schraml und A. Leipertz, "Two-dimensional soot-particle sizing by time-resolved laser-induced incandescence", Opt. Lett. **20**, 2342-2344 (1995).
52. S. Schraml, S. Dankers, K. Bader, S. Will und A. Leipertz, "Soot temperature measurements and implications for time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII)", Combust. Flame **120**, 439-450 (2000).

53. R. L. Vander Wal, "The Effects of Rapid Heating of Soot: Implications When Using Laser-Induced Incandescence for Soot Diagnostics", Combust. Flame **102**, 200-204 (1995).
54. R. L. Vander Wal, T. M. Ticich und A. B. Stephens, "Optical and microscopy investigations of soot structure alterations by laser-induced incandescence", Appl. Phys. B **67**, 115-123 (1998).
55. M. Hofmann, *Untersuchung der Laserinduzierten Inkandeszenz an rußenden Flammen unter erhöhtem Druck*, in *Diplomarbeit, Physikalisch-Chemisches Institut*. 2001, Universität Heidelberg: Heidelberg.
56. B. Mewes und J. M. Seitzman, "Soot volume fraction and particle size measurements with laser-induced incandescence", Appl. Opt. **36**, 709-717 (1997).
57. S. Will, S. Schraml, K. Bader und A. Leipertz, "Performance characteristics of soot primary particle size measurements by time-resolved laser-induced incandescence", Appl. Opt. **37**, 5647-5658 (1998).
58. M. Hofmann, W. G. Bessler, C. Schulz und H. Jander, "Laser-induced incandescence (LII) for soot diagnostics at high pressure", Appl. Opt., in press (2003).
59. P. Roth und A. V. Filippov, "In situ ultrafine particle sizing by a combination of pulsed laser heatup and particle thermal emission", J. Aerosol Sci. **27**, 95-104 (1996).
60. C. K. Rhodes, ed. *Excimer Lasers*, 2 ed. Topics in Applied Physics (Springer, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1984).
61. F. K. Kneubühl und M. W. Sigrist, *Laser*, 4 ed (Teubner, Stuttgart, 1995).
62. J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, New York-St. Louis-San Francisco and others, 1988).
63. J. Warnatz, U. Maas und R. W. Dibble, *Verbrennung*, 2 ed (Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1997).
64. Y. Yoshihara, A. Kazakov, H. Wang und M. Frenklach, "Reduced mechanism of soot formation - Application to natural gas-fueled Diesel combustion", in *Proc. Combust. Inst. 25* (1994).
65. M. Frenklach und H. Wang, "Detailed modeling of soot particle nucleation and growth", in *Proc. Combust. Inst. 23* (1990), 1559-1566.
66. H. Bockhorn, http://www.uni-karlsruhe.de/Uni/forschung/index.html. 2003.
67. J. A. Miller und C. T. Bowman, "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion", Prog. Energy Combust. Sci. **15**, 287-338 (1989).
68. I. Glassman, *Combustion*, 3 ed (Academic Press, San Diego-London-Boston-New York-Sydney-Tokyo-Toronto, 1996).
69. F. Hildenbrand, C. Schulz, V. Sick, G. Josefsson, I. Magnusson, Ö. Andersson und M. Aldén, "Laser spectroscopic invesitigation of flow fields and NO-formation in a realistic SI engine", SAE Technical Paper Series No. 980148 (1998).
70. L. Herrmann, F. Keller, G. König, E. Wagner, W. Bessler, F. Hildenbrand, J. Schorr, C. Schulz, J. Wolfrum, J. Bolz und D. Brüggemann, "Laserspektroskopische Methoden zur Untersuchung des Einflusses der Gemischbildung auf NO- und Russkonzentration im Dieselmotor", in *Laserdiagnostische und plasmatechnologische Grundlagen zur Verminderung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch von DI-Verbrennungsmotoren, ISBN 3-00-006781-7*, VDI-TZ, Editor Düsseldorf, 2000), S. 89-104.
71. Y. Zeldovich, "The oxidation of nitrogen in combustion and explosions", Acta Physicochimica USSR **21**, 577-628 (1946).

72. N. Peters und S. Donnerhack, "Structure and similarity of nitric oxide production in turbulent diffusion flames", in *Proc. Combust. Inst. 18* (Pittsburgh, 1981), 33.
73. H. G. Pitsch, *Modellierung der Zündung und Schadstoffbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung mit Hilfe eines interaktiven Flamelet-Modells*. 1998, RWTH Aachen.
74. R. C. Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*, 54 ed, ed. R.C. Weast (CRC Press, Cleveland, 1973).
75. N. Garland, *Assignment of formaldehyde laser-induced fluoresecence spectrum from the Sandia engine experiments*. 1984, SRI International: Menlo Park, CA, USA.
76. P. J. Ashman und B. S. Haynes, "Formaldehyde formation in small gas burners", Combust. Sci. and Texh. **116-117**, 359-373 (1996).
77. W. S. Chiu, S. M. Shahed und W. T. Lyn, "A transient spray mixing model for Diesel combustion", SAE 760128, SAE Transactions **85**, 502-512 (1976).
78. S. W. Bensen, "The kinetics and thermochemistry of chemical oxidation with application to combustion and flame", Prog. Energy and Combust. Sci. **7**, 125-134 (1981).
79. J. E. Dec, "A conceptual model of DI Diesel combustion based on laser-sheet imaging", SAE Technical Paper Series 970873 (1997).
80. D. Siebers und B. Higgins, "Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions", SAE Technical Paper Series 2001-01-0530 (2001).
81. B. Higgins, D. Siebers und A. Aradi, "Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior", SAE Technical Paper Series 2000-01-0940 (2000).
82. P. F. Flynn, R. P. Durrett, G. L. Hunter, A. O. zur Loye, O. C. Akinyemi, J. E. Dec und C. K. Westbrook, "Diesel combustion: An integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation", SAE Technical Paper Series 1999-01-0509 (1999).
83. H. J. Curran, W. J. Pitz, C. K. Westbrook, C. V. Callahan und F. L. Dryer, "Oxidation of automotive primary reference fuels at elevated pressures", in *Proc. Combust. Inst. 27* (1998), 379-387.
84. C. K. Westbrook, H. J. Curran, W. J. Pitz, J. F. Griffiths, C. Mohamed und S. K. Wo, "The effect of pressure, temperature, and concentration on the reactivity of alkanes: experiments and modeling in a rapid compression machine", in *Proc. Combust. Inst. 27* (1998), 371-378.
85. J. E. Dec und C. Espey, "Chemiluminescence imaging of autoignition in a diesel engine", SAE Technical Paper Series 982685 (1998).
86. H. G. Wagner, *Soot formation - An overview*. Particulate carbon formation during combustion, ed. D.C. Siegla und G.W. Smith (Plenum Press, New York, 1981).
87. J. E. Dec und E. B. Coy, "OH radical imaging in a DI Diesel engine and the structure of the early diffusion flame", SAE Technical Paper Series 960831 (1996).
88. N. Peters, *Turbulent Combustion* (Cambridge University Press, 2000).
89. C. Krüger, *Validierung eines 1D-Spraymodells zur Simulation der Gemischbildung in direkteinspritzenden Dieselmotoren*, in *RWTH Aachen*. 2001.
90. H. Pitsch, Y. P. Wan und N. Peters, "Numerical investigation of soot formation and oxidation under Diesel engine conditions", SAE Technical Paper Series 952357 (1995).
91. H. Pitsch, H. Barths und N. Peters, "Three-dimensional modeling of NOx and soot formation in DI-Diesel engines using detailed chemistry based on the Interactive Flamelet Approach", SAE Technical Paper Series 962057 (1996).

92. H. Barths, H. Pitsch, N. Peters und M. e. Sheh, "Comparision of the Representative-Interactive Flamelet Model and the Magnussen Model for combustion and pollutant formation in DI-Diesel engines to experiments", in *Proceedings of the 3rd International Conference on High Performance Computing in the Automotive Industry* (1997).
93. H. Barths, C. Antoni und N. Peters, "Three-dimensional simulation of pollutant formation in a DI-Diesel engine using multiple Interactive Flamelets", SAE Technical Paper Series 982459 (1998).
94. H. Barths, H. Pitsch und N. Peters, *3D simulations of DI Diesel combustion and pollutant formation using a two-component reference fuel*. Oil & Gas and Technology-Rev. Vol. 54 (Institut Francais du Pétrole, Paris, 1999, 233-244).
95. C. Hasse, H. Barths und N. Peters, "Modeling the effect of split injections in Diesel engines using Representative Interactive Flamelets", SAE Technical Paper Series 1999-01-3547 (1999).
96. C. A. Hergart, H. Barths und N. Peters, "Modeling the combustion in a small-bore Diesel engine using a method based on Representative Interactive Flamelets", SAE Technical Paper Series 1999-01-3550 (1999).
97. U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth und R. Uthurusamy, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining* (AAAI/MIT Press, Cambridge, 1996).
98. W. Klösgen und J. M. Zytkow, *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery* (Oxford University Press, Oxford, 2002).
99. D. Leineweber, *Persönliche Korrespondenz*. 2002: Bayer AG Leverkusen.
100. S. Wrobel, "Data Mining und Wissensentdeckung in Datenbanken", KI, Nr. 1, 6-9 (1998).
101. M. Lusti, *Data Warehouesing und Data Mining* (Springer-Verlag, Heidelberg, 2002).
102. *SAS Enterprise Miner Reference Manual, Version 4.1*. 2003.
103. C. Espey, J. E. Dec, T. A. Litzinger und D. A. Santavicca, "Planar laser Rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a Diesel jet", Combustion and Flame **109**, 65-86 (1997).
104. H. Krämer, S. Einecke, C. Schulz, V. Sick, S. R. Nattrass und J. S. Kitching, "Simultaneous mapping of the distribution of different fuel volatility classes using tracer-LIF and NIR tomography in an IC engine", SAE Transactions 982467, Journal of Fuels & Lubricants **107**, 1048-1059 (1998).
105. J. U. Kim, B. Golding, H. J. Schock, P. Keller und D. G. Nocera, "Exciplex fluorescence visualisation systems for pre-combustion diagnostics of an automotive gasoline engine", SAE Technical Paper Series 960826, 295-301 (1996).
106. P. G. Felton, F. V. Bracco und M. E. A. Bardsley, "On the quantitative application of exciplex fluorescence to engine sprays", SAE Technical Paper Series 930870 (1993).
107. C.-N. Yeh, T. Kamimoto, S. Kobori und H. Kosaka, "2-D imaging of fuel vapor concentration via exciplex-based fluorescence technique", SAE Technical Paper Series 932652 (1993).
108. F. Großmann, P. B. Monkhouse, M. Ridder, V. Sick und J. Wolfrum, "Temperature and pressure dependences of the laser-induced fluorescence of gas-phase acetone and 3-pentanone", Appl. Phys. B **62**, 249-253 (1996).
109. W. Koban, *Persönliche Korrespondenz: Absorptionsspektren 5-Nonanon und 2-Decanon*. 2002: PCI Heidelberg.

110. M. Staudt, U. Meingast und U. Renz, *Ansaugverhalten von Common-Rail-Einspritzstrahlen bei verdunstenden Bedingungen und Wandeinfluss*, in *Spray 2001*. 2001: Hamburg. S. II.3-1/II.3-8.
111. U. Meingast und U. Renz, "Fuel Film Thickness Measurements under Diesel Engine Conditions", in *ILASS-Europe 2001* (Zurich, Switzerland, 2001), 824-829.
112. U. Meingast, L. Reichelt und U. Renz, "Measuring Transient Wall Heat Flux under Diesel Engine Conditions", in *COMODIA 2001, 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines* (Nagoya, Japan, 2001), 140-146.
113. U. Meingast, L. Reichelt, C. Schugger und U. Renz, "Measurements and Numerical Simulation of a High Pressure Diesel Spray with Spray/Wall Interaction", in *ICMF-2001, 4th Int. Conf. on Multiphase Flow* (New Orleans, LA, USA, 2001).
114. M. Staudt und U. Renz, "Gemischverteilung und Turbulenzgenerierung in hochdichten Kraftstoffsprays für schadstoffarme DI-Brennverfahren", in *VDI-Tagung "Laserdiagnostische und plasmatechnologische Grundlagen zur Verminderung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch von DI-Verbrennungsmotoren* (Düsseldorf, Germany, 2000), 17-33.
115. Landolt-Börnstein, *Eigenschaften der Materie in ihren Aggregatzuständen*. Tabellen (Springer-Verlag, Berlin, 1962).
116. J. R. Partington, *An Advanced Treatise on Physical Chemistry*. Vol. 9 (Longmans, Green, London, 1953).
117. A. I. Vogel, "Physical properties and chemical constitution of aliphatic hydrocarbons", J. Chem. Soc. **9**, 133-142 (1946).
118. W. C. Gardiner, Y. Hidaka und T. Tanzawa, "Refractivity of combustion gases", Combustion and Flame **40**, 213-219 (1981).
119. G. Grünefeld, *Skriptum zur Vorlesung: "Technische Optik II"*. 2001: RWTH Aachen. S. 31.
120. K. C. Smyth und C. R. Shaddix, "The elusive History of m = 1.57 - 0.56i for the Refractive Index of Soot", Combust. Flame **107**, 314-320 (1996).
121. T. T. Charalampopoulos, H. Chang und B. Stagg, "The effects of temperature and composition on the complex refractive index of flame soot", Fuel **68(9)**, 1173-1179 (1989).
122. T. T. Charalampopoulos und J. D. Felske, "Refractive indices of soot particles deduced from in-situ laser light scattering measurements", Combustion and Flame **68**, 283-294 (1987).
123. C. Schulz, J. B. Jeffries, D. F. Davidson, J. D. Koch, J. Wolfrum und R. K. Hanson, "Impact of UV absorption by CO_2 and H_2O on NO LIF in high-pressure combustion applications", Proc. Comb. Inst. **29**, 2725-2742 (2002).
124. C. Schulz, J. Gronki, J. D. Koch, D. F. Davidson, J. B. Jeffries und R. K. Hanson, "Temperature-dependent absorption by CO_2: implications for UV diagnostics in high-temperature flames", Trends in Optics and Photonics **69**, FC2/1-FC2/3 (2002).
125. C. Schulz, J. D. Koch, D. F. Davidson, J. B. Jeffries und R. K. Hanson, "Ultraviolet absorption spectra of shock-heated carbon dioxide and water between 900 and 3050 K", Chem. Phys. Lett. **355**, 82-88 (2002).
126. A. G. Gaydon und I. R. Hurle, *The shock tube in high-temperature chemical physics* (Chapman and Hall, London, 1963).

127. M. C. Thurber, F. Grisch, B. J. Kirby, M. Votsmeier und R. K. Hanson, "Measurements and modeling of acetone laser-induced fluorescence with implications for temperature-imaging diagnostics", Applied Optics **37**, 4963-4978 (1998).
128. H. Chang und T. T. Charalampopoulos, "Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot", Proc. R. Soc. Lond. A **430**, 577-591 (1990).
129. W. H. Dalzell und A. F. Sarofim, "Optical constants of soot and their application to heat flux calculations", Trans. ASME, J. Heat Transfer **91**, 100-104 (1969).
130. M. Versluis, N. Georgiev, L. Martinsson, M. Alden und S. Kroll, "2-D absolute OH concentration profiles in atmospheric flames using planar LIF in a bi-directional laser beam configuration", Appl. Phys. B **65**, 411 (1997).
131. Y. H. Won, T. Kamimoto, H. Kobayashi und H. Kosaka, "2-D soot visualization in unsteady spray flame by means of laser sheet scattering technique", SAE Technical Paper Series 910223 (1991).
132. H. Bockhorn, B. Jungfleisch, T. Lehre und R. Suntz, "Simultaneous assessment of particle size distributions and gas temperatures from time-resolved laser-induced incandescence", Conference Proceedings of the European Congress of Chemical Engineering (ECCE), Nuernberg, June 2001 (2001).
133. C. F. Kaminski, J. Hult, M. Richter, J. Nygren, A. Franke, M. Aldén, S. Lindenmaier, A. Dreizler, U. Maas und R. B. Williams, "Development of high speed spectroscopic imaging techniques for the time resolved study of spark ignition phenomena", SAE Technical Paper Series 2000-01-2833 (2000).
134. J. Gronki, C. Schulz und H. Scharr, "Correction of beam steering effects in 2d-laser-diagnostic measure-ments in combustion engines by image postprocessing", in *Eurotherm 71 on Visualization, Imaging and Data Analysis In Convective Heat and Mass Transfer* (Reims, 2002), in press.
135. S. Andersson, T. Sima, B. Peterson, F. Carlsson und B. Gustafsson, *Projekt-Bericht D-Level D7.1: Characterisation of cell background flow and temperature*. 2001, Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden.
136. N. Nodin, *Persönliche Korrespondenz: Simulation of the temperature field in the Chalmers spray cell*. 2001: Gothenburg, Sweden.
137. J. D. Naber, D. L. Siebers und K. R. Hencken, "The effects of high ambient density on Diesel spray penetration and spread", in *Joint Technical Meeting Central and Western States (USA) Sections of the International Combustion Institute* (San Antonio, 1995), 761-766.
138. A. G. Gaydon, *The spectroscopy of flames*, 2nd ed (Chapman and Hall, London, 1974).
139. W. G. Bessler, C. Schulz, T. Lee, J. B. Jeffries und R. K. Hanson, "Carbon dioxide UV laser-induced fluorescence in high-pressure flames", Chem. Phys. Lett., in press (2003).
140. W. G. Bessler, T. Lee, C. Schulz, J. B. Jeffries und R. K. Hanson, "UV laser-induced fluorescence of carbon dioxide in high-pressure flames", in *3rd Joint meeting of the US sections of the combustion institute* (Chicago, 2003).
141. M. Thurber und R. K. Hanson, "Pressure and composition dependence of acetone laser-induced fluorescence with excitation at 248, 266 and 308 nm", Appl. Phys. B **69**, 229-240 (1999).
142. F. Grossmann, P. B. Monkhouse, M. Ridder, V. Sick und J. Wolfrum, "Temperature and pressure dependences of the laser-induced fluorescence of gas-phase acetone and 3-pentanone", Appl. Phys. B **62**, 249-253 (1996).

143. S. Einecke, C. Schulz und V. Sick, "Measurement of temperature and equivalence ratio distribution using tracer LIF in IC engine combustion", Appl. Phys. B **71**, 717-723 (2000).
144. T. Schäfer, J. Kazenwadel, C. Schulz und J. Wolfrum, "Simultane Bestimmung mehrdimensionaler Temperatur- und OH-Konzentrationsfelder in turbulenten, nichtvorgemischten Drallflammen", in *TECFLAM-Seminar, Drallflammen und Industriecodeentwicklung, Band 13, Arbeitsgemeinschaft TECFLAM* (1997), 67-76.
145. J. Schorr, *Entwicklung laserspektroskopischer Verfahren zur Untersuchung der Tropfenverdampfung*, in *Physikalisch Chemisches Institut*. 1999, Universität Heidelberg: Heidelberg.
146. W. Koban, J. Schorr und C. Schulz, "Oxygen distribution imaging with a novel two-tracer laser-induced fluorescence technique", Appl. Phys. B **74**, 111-114 (2002).
147. G. Bruneaux, C. Lemenand und V. Ricordeau, *Database for fuel concentration without combustion. D-Level Deliverable 6.1.* 2002, Institut Francais du Pétrole: Paris.
148. H. Kosaka, T. Nishigaki, T. Kamimoto, T. Sano, A. Matsutani und S. Harada, "Simultaneous 2-d imaging of OH radicals and soot in a Diesel flame by laser sheet techniques", SAE TEchnical Paper Series 960834 (1996).
149. C. Hasse und S. Vogel, *Persönliche Korrespondenz: Modellrechnungen zur Formaldehydbildung in n-Decan Sprays unter dieselmotorischen Bedingungen*. 2003: RWTH Aachen.
150. N. Graf, *Dissertation*. 2003, Ruprecht-Karls-Universität: Heidelberg.
151. W. G. Bessler, C. Schulz, V. Sick und J. W. Daily, "A versatile modeling tool for nitric oxide LIF spectra", in *3rd Joint meeting of the US sections of the combustion institute* (Chicago, 2003).
152. M. P. B. Musculus, "Effects of the in-cylinder environment on diffusion flame lift-off in a diesel engine", SAE Technical Paper Series 2003-01-0074 (2003).
153. D. Siebers, B. Higgins und L. Pickett, "Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: oxygen concentration effects", SAE Technical Paper Series 2002-01-0890 (2002).
154. S. Vogel, *Persönliche Korrespondenz: Implementierung variabler Abhebehöhen in einem RIF-Modell*. 2003: RWTH Aachen.

Publikationsliste

Zeitschriften und Konferenzberichte

J. Gronki, J. von Saldern, T. Kunzelmann, W. Bessler, J. Koch, C. Schulz, M. Försth, L. C. Ganippa, S. Andersson, *Multi-species laser-based imaging of a Diesel spray,* SAE technical paper series, in Vorbereitung (2003).

J. Gronki, C. Schulz, *Imaging of the ignition process in a Diesel spray,* SAE technical paper series, in Vorbereitung (2003).

J. Gronki, C. Schulz, H. Scharr, *Correction of beam steering effects in 2d-laser-diagnostic measurements in combustion engines by image postprocessing*, in EUROTHERM Seminar 2002, Visualisation, Imaging and Data Analysis in Convective Heat and Mass Transfer, Reims/France (2002).

D. Frieden, V. Sick, J. Gronki, C. Schulz, *Quantitative oxygen imaging in an engine*, Appl. Phys. B 75, 137-141 (2002).

M. Hofmann, W.G. Bessler, J. Gronki, C. Schulz, H. Jander, *Investigations on laser-induced incandescence (LII) for soot diagnostics at high-pressure,* in OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) Vol 64, Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis, OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2002, ISBN 1-55752-698-2), FC1 (2002).

C. Schulz, J. Gronki, J.D. Koch, D.F. Davidson, J.B. Jeffries, R.K. Hanson, *Temperature-dependent absorption by CO2: Implications for UV diagnostics in high-temperature flames,* in OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) Vol 64, Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis, OSA Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2002, ISBN 1-55752-698-2), FC2 (2002).

N. Graf, J. Gronki, C. Schulz, T. Baritaud, J. Cherel, P. Duret, J. Lavy, *In-Cylinder Combustion Visualization in an Auto-Igniting Gasoline Engine using Fuel Tracer- and Formaldehyde-LIF Imaging*, SAE paper 2001-01-1924 (2001).

H. Köppel, J. Gronki, S. Mahapatra, *Construction scheme for regularized diabatic states,* J. Chem. Phys. 115(6), 2377-2388 (2001).

Weitere Konferenzbeiträge

Gordon Research Conference on Laserdiagnostics in Combustion 2001, Mount Holyokee, MA, USA, J. Gronki, J. von Saldern, T. Kunzelmann, W. Bessler, J. Koch, C. Schulz, M. Försth, L. C. Ganippa, S. Andersson, *Multi-species laser-based imaging of a Diesel spray.* (Posterpräsentation)

International Symposium on Combustion 2002, Sapporo, Japan, J. Gronki, J. von Saldern, T. Kunzelmann, W. Bessler, J. Koch, C. Schulz, M. Försth, L. C. Ganippa, S. Andersson, *Multi-species laser-based imaging of a Diesel spray.* (Posterpräsentation)

TCDE Towards Clean Diesel Engines Conference 2003, Eindhoven, Niderlande, J. Gronki, C. Schulz, *Multi-species laser-based imaging of a Diesel spray.* (Vortrag)

Forschungsreisen

Februar–Mai 2000:	Institut Français du Pétrole (IFP), Paris, Frankreich
Sept.–Dez. 2000:	Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden
Mai–Juli 2001:	University of Michigan, Ann Arbor, USA
Sept.–Dez. 2001:	ChalmersUniversity of Technology, Göteborg, Schweden
Mai–Juli 2002:	Stanford University, Kalifornien, USA

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit war für mich ein interdisziplinäre Herausforderung, für die ich Hilfe aus unterschiedlichen Bereichen benötigte. Zu ihrem Gelingen haben viele Personen beigetragen. Insbesondere gilt mein Dank:

Herrn Prof. Dr. Jürgen Wolfrum für die Aufnahme in seinen Arbeitskreis, seine Betreuung im Graduiertenkolleg des IWR und den zahlreichen Anregungen und Ideen, die sich in dieser Arbeit widerspiegeln.

Herrn Prof. Dr. Jochen Schirmer für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr. Hans Georg Bock für die Zweitbetreuung im Graduiertenkolleg des IWR.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Christof Schulz für seine hervorragende Betreuung, ständige Diskussionsbereitschaft, zahlreichen Ideen und Anregungen und seine Geduld während der Durchsicht dieser Arbeit. Dazu für die Vermittlung zahlreicher internationaler und interdisziplinärer Kooperationen, die das Wesen dieser Arbeit entscheidend geprägt haben.

Den Herren Prof. Volker Sick (University of Michigan), Prof. Ron Hanson (Stanford University) und Prof. Sven Andersson (Chalmers University of Technology, Göteborg) für die äußerst gastfreundliche Aufnahme in ihre Arbeitskreise und die sehr fruchtbare Zusammenarbeit.

Herrn Torbjörn Sima (Chalmers Göteborg) für seinen unermüdlichen und erfolgreichen Einsatz beim schwierigen Betrieb der Hochtemperatur-Hochdruckzelle während zweier Winterexpeditionen in Schweden und die ausgezeichnete Zusammenarbeit darüber hinaus.

Den Herren Doug Frieden und Udo Fissenewert (University of Michigan), Jon Koch und Dr. Jay Jeffries (Stanford University), Lionel C. Ganippa, Dr. Michael Försth, Bo Petersson (Chalmers Göteborg) für die hervorragende Zusammenarbeit.

Herrn Dr. Hanno Scharr (Firma *Intel Research*, Santa Clara, USA) für die spannende Kooperation und Hilfe auf dem Gebiet der elektronischen Bildverarbeitung.

Der Firma *SAS Institute GmbH* für das freundliche Gewähren einer kostenfreien, temporären Softwarelizenz für den *SAS* ® *Enterprise Miner*™ zu Forschungszwecken.

Den Mitgliedern des Heidelberger Graduiertenkollegs des IWR „Komplexe Prozesse: Modellierung, Simulation und Optimierung“ für die sehr fruchtbare und spannende Zusammenarbeit.

Den Mitarbeitern der Werkstätten und der Verwaltung, insbesondere Frau Marlen Lemcke und Frau Sylvia Boganski.

Der gesamten 2D-LIF-Gruppe für die exzellente Arbeitsatmosphäre und die gewährte tatkräftige Unterstützung während der durchgeführten Auslandsexpeditionen:
Herrn Dipl. Chem. Max Hofmann, Herrn Dipl. Chem. Wolfgang Bessler, Frau Dipl. Chem. Nicole Graf, Herrn Dipl. Phys. Jürgen Schorr, Herrn Dipl. Phys. Johann von Saldern, Herrn Dipl. Phys. Wieland Koban, Frau Dipl. Phys. Isabell Düwel, Herrn Dipl. Phys. Frank Zimmermann, Herrn Dipl. Chem. Axel Hoffmann, Herrn Dipl. Phys. Jan Kristof, Herrn Dr. Thomas Kunzelmann.

Anhang A: Software-Dokumentation

A1: Synchronisierte Multi-Kamerasteuerung

Funktion	sprayaufnahme()
Bibliotheken	Goete2_PrimaerRechner.cl, Goete2_SekundaerRechner.cl, Goete2_TertiaerRechner.cl

Diese Software wurde zur Automatisierung der Messungen an der Göteborger Hochdruck-Hochtemperatur-Zelle entwickelt und eingesetzt. Jede der obigen Bibliotheken enthält die Software zur Aufnahmesteuerung je eines der drei verwendeten Kamerarechner. Die Funktion „sprayaufnahme()“ ruft auf jedem dieser Rechner folgenden Benutzerdialog auf:

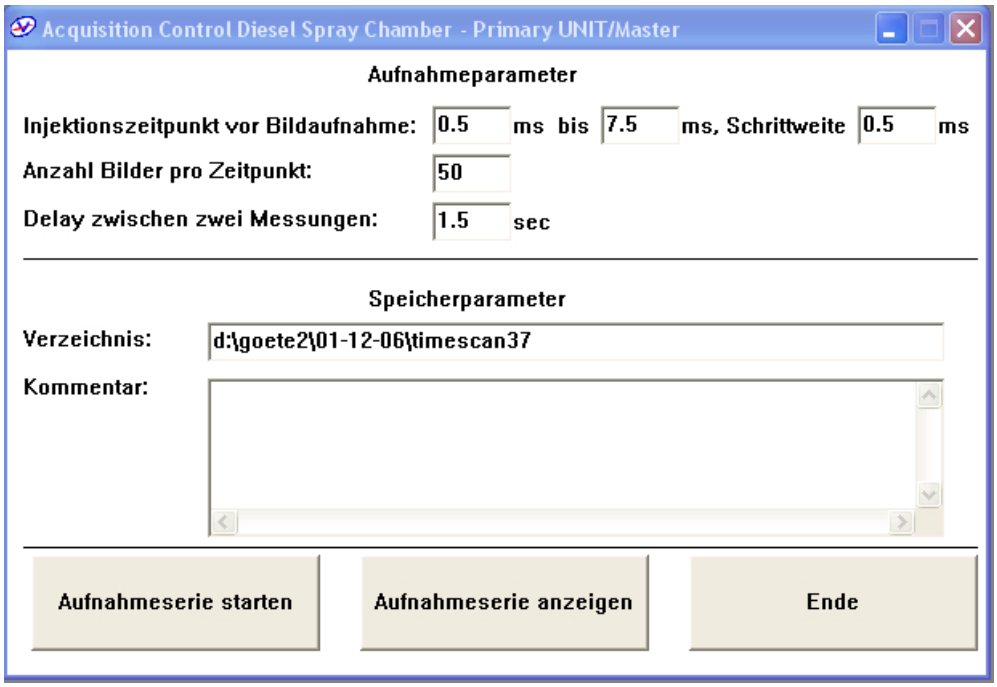

Abbildung A1.1: Benutzerdialog zur Synchronisation der Bild- und Analogdatenaufnahme

Das Programm synchronisiert die Aufnahmen von bis zu drei Kameras durch gegenseitige Bereitschaftsabfragen über die TTL I/O-Karten der Kamerarechner. Es steuert zudem den Dieselspray-Injektor und einen vierten Messrechner zur Analogdatenaufnahme an.

Es werden auf jedem der drei Kamera-Rechner die Aufnahmezeitpunkte (in ms nach der Injektion in die Sprayzelle, z. B. von 0,5 bis 7,5 ms), die Schrittweite (z. B. 0,5 ms), die Zahl der Bilder pro Zeitschritt und eine Wartezeit zwischen zwei Injektionen (zur Speicherung der Daten auf der Festplatte und zur Reinigung der Flusszelle) eingestellt. Im anzugebenden Zielverzeichnis werden zweifach indizierte Bilddateien gespeichert (Nummer des Zeitschritts und laufende Bildnummer). Ein elektronischer Kommentar kann ebenfalls im Zielverzeichnis abgelegt werden. Zum Start einer Aufnahmeserie müssen zuerst der Sekundär- und Tertiärrechner gestartet werden (Schaltfläche „Aufnahmeserie starten“). Diese gehen daraufhin in Bereitschaft bis der Primärrechner gestartet wird. Der Primärrechner empfängt ein externes Referenzsignal (*trigger*), das die Datenaufnahme und die Sprayinjektion mit den Laserpulsen synchronisiert. Dieses wird vom Primärrechner mit variablen Verzögerungen in Mikrosekundengenauigkeit an die beiden anderen Kamera-Rechner, den Messrechner zur Analogdatenaufnahme und die Injektionssteuerung weiterleitet. Die Auslösung der Kameras (Aktivierung des Bildverstärkers) erfolgt unabhängig davon durch das externe Referenzsignal mit Nanosekundenpräzision. Durch gegenseitige Bereitschaftsabfragen werden bei jeder folgenden Aufnahme nur dann Bilder aufgezeichnet, wenn alle drei Kamerarechner ihre vorangegangenen Aufnahmezyklen beendet haben und wieder aufnahmebereit sind.

Das Programm verändert das Akquisitions-Steuerprotokoll (*acquisition timing*) der *DaVis*-Software, um Verzögerungszeiten anzupassen. Die zugehörigen Akquisitions-Steuerprotokolle, welche im Programm jeweils mit dem Befehl „TakeImage()“ aufgerufen werden, sind unter den Dateinamen goete2_PrimaerRechner.acq, goete2_SekundaerRechner.acq und goete2_TertiaerRechner.acq abgelegt.

A2: Metaskripte zur automatisierten Auswertung großer Bildserien

Funktion	ausw_goete2()
Bibliotheken	auswertung.cl, auswertung_maske.cl util.cl lib.cl

Dieser Satz von Softwarebibliotheken enthält alle Routinen, die zur automatisierten Auswertung von 110.000 Einzelbildern der Göteborger Messungen verwendet wurden. Der Benutzer erstellt und verwaltet Metaskript-Dateien, die alle auswertungsrelevanten Attribute jeder einzelnen Versuchsserie enthalten und die sequentielle Abarbeitung der gewünschten Auswertungsschritte koordinieren. Die Metaskripte greifen dabei auf Funktionen zurück, die in diesen vier Bibliotheken gespeichert wurden. Das Programm ausw_goete2() ruft den Metaskript-Editor auf:

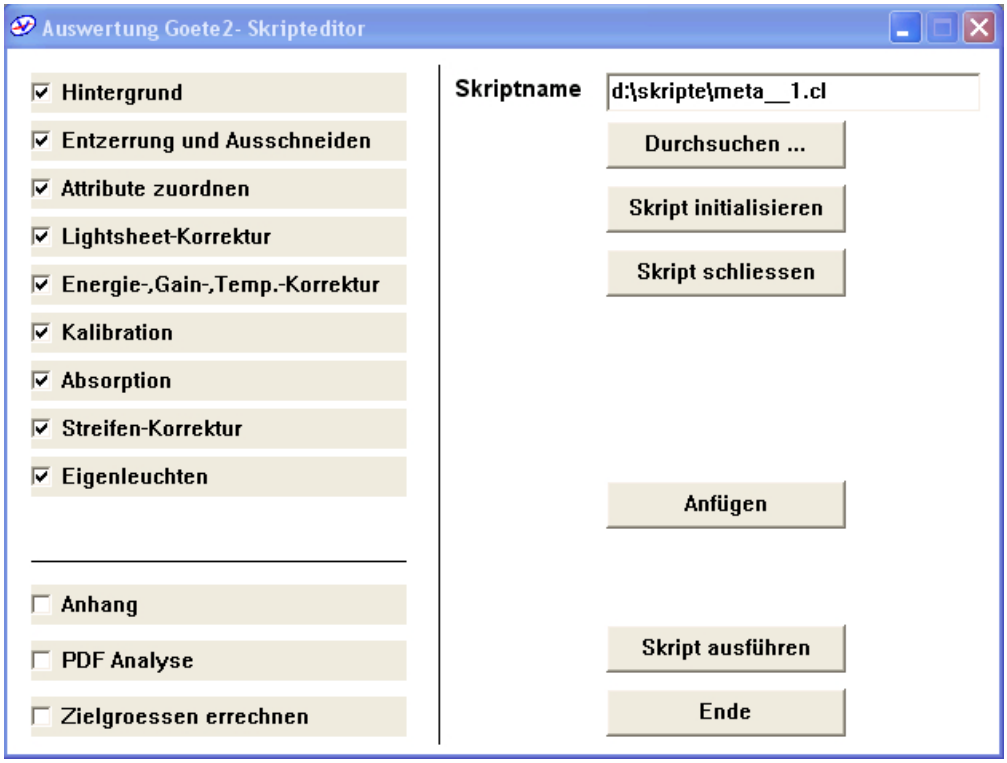

Abbildung A2.1: Metaskript-Editor zur automatisierten Auswertung großer Bildserien

Über diese grafische Benutzerschnittstelle werden Bildserien mit 0,1 oder 2 Laufindizes ausgewählt und in die Skriptdatei aufgenommen (Schaltfläche „Skript initialisieren“ zum Anlegen eines neuen Skripts oder Überschreiben eines alten Skriptes, „Anfügen“ zum Ergänzen des Skriptes um eine weitere Bildserie, „Skript schliessen“ zum Abschließen der Skriptdefinition). Der Benutzer wird durch eine Prozedur geleitet, in der jeder Bildserie individuelle Auswerteattribute und Auswertefunktionen zugeordnet werden, beispielsweise die Sequenz „Bild Ausschneiden und auf optische Verzerrungen korrigieren, dann auf Laserenergie korrigieren, kalibrieren und Streifenkorrektur durchführen“. Diese Zuordnung mit allen nötigen Parametern wird in der Skriptdatei (Abbildung A2.2) gespeichert, die später dann geladen (Eingabefeld „Skriptnamen“ oder Schaltfläche „Durchsuchen“) und ausgeführt werden kann (Schaltfläche „Skript ausführen“). Die Skriptdateien können indiziert werden, sodass sich beliebig viele Metaskripte mit beliebig vielen Bildserien und Bildern automatisch und wiederholbar „auf Knopfdruck“ ausführen lassen.

```
// Skript zur automatisierten Datenauswertung Expedition Goeteborg 2
static int protokoll_handle = 5520496;

void skriptfunktion()
{
    int i,j;
    string dateiname_alt, dateiname_neu;
    protokoll_handle=Open("d:\\Ausw_Goete2\\skripte\\protokolle\\skript_protokoll.txt","w");

    hintergrund ("d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6\\#_#", ".imx", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\ls
    entzerrung(1,"d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_0",".imx","d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_1",1,18,1,50,2,133,408,180,620,2);
    attribute_lesen(1, "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6\\#_mw", ".imx","d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6",
    temp_lesen(1,"d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6","d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\data\\pdcal\\calib54bar_#", "", "d:\
    attribute_zuordnen(1,"d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6","d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_1",".imx","d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp",1,1
    lskorr ("d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_2", ".imx", "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", "d:\\Ausw_Goete2\\ls_korrekturbilder\\ls_diesel_lii_0411C
    e_temp_gain_korr (1,"d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_3", ".imx", "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", 1, 18, 1, 50, 2, "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\
    absorptions_korrektur ("d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_4", ".imx", "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", 1, 18, 1, 50, 2, "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_t
    kalibration (1,2,"d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_5", ".imx", "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", 1, 18, 1, 50, 2, "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_
    streifen_korrektur ("d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_6", ".imx", "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp", 1, 18, 1, 50, 2, "d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\
    for (i=1;i<=18;i++)
    for (j=1;j<=50;j++)
    {
        dateiname_alt=string_indizieren("d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp\\#_#_korr_stufe_7.imx",i,j,2);
        dateiname_neu= string_indizieren ("d:\\ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6\\#_#_korr",i,j,2)+ ".imx";
        //InfoTextFile(protokoll_handle,dateiname_alt); //InfoTextFile(protokoll_handle,dateiname_neu);
        CopyFile(dateiname_alt, dateiname_neu);
        if(!FileExists(dateiname_neu)) {Message("Kopierfehler",0); Error(""); return;}
    }
    DeleteAllFiles("d:\\ausw_Goete2\\DaVis_tmp");
    neuer_mittelwert ("d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6\\#_#_korr", ".imx", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6", 1, 18, 1, 50, 2);
    hintergrund ("d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6\\mw_#_korr", ".imx", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\LII\\timescan6", "d:\\Ausw_Goete2\\01-11-06\\L


    // ***********************
    // Weitere Bildserien hier ...
    // ***********************

    Close(protokoll_handle);
}
```

Abbildung A2.2: Beispiel eines Metaskripts mit allen nötigen Parametern und Funktionsaufrufen zur automatischen, sequentiellen Nachbearbeitung einer Bildserie.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorgelegte Dissertation selbst verfasst und mich dabei keiner anderen als der von mir ausdrücklich bezeichneten Quellen und Hilfen bedient habe.

Heidelberg, den 03. Juni 2003

Joachim Gronki