

Kapitel 1

1 Einleitung

Der Dieselmotor steht wegen seiner NO_x - und Partikelemission und deren möglicher Gesundheitsgefährdung immer wieder in der Diskussion. Alle bisherigen Strategien zur Schadstoffminderung zeigen einen Zielkonflikt zwischen Ruß- und NO_x -Emissionen auf. Eine Senkung der NO_x -Emissionen ist durch einen nachgeschalteten Mager-Katalysator möglich, die Reduzierung der Rußemissionen durch einen Rußfilter. Beide Aggregate führen zu erheblich höheren Kosten und Verlusten, die den Verbrauchsvorteil des Dieselmotors teilweise wieder aufzehren. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die innenmotorischen Prozesse so zu steuern, dass nur eines der beiden Abgasnachbehandlungssysteme verwendet werden muss. Da einmal gebildetes NO_x innenmotorisch praktisch nicht zu reduzieren ist, während Ruß im Prinzip innenmotorisch auch wieder oxidiert werden kann, liegt es nahe, sich auf die Reduzierung der Rußemissionen zu konzentrieren.

Es gibt zwei Regionen, in denen einmal gebildeter Ruß bei den bestehenden Brennverfahren nicht vollständig oxidiert wird.

1. Der wandferne Bereich des Brennraums

Die turbulente Durchmischung von mageren und fetten Gebieten in diesem Bereich des Brennraums ist zu späten Zeiten des Zyklus nicht intensiv genug. Dies gilt insbesondere bei Volllast, wenn relativ viel fettes Gemisch vorliegt.

Durch die Entwicklung moderner Hochdruckeinspritzsysteme und den daraus resultierenden höheren Strahlimpuls ist die Durchmischung stark verbessert worden, so dass die Rußemissionen in den letzten Jahren deutlich gesenkt werden konnten. Um die

verbleibenden Rußemissionen, insbesondere bei Teillast, weiter zu senken, ist daher eine Betrachtung der wandnahen Bereiche notwendig.

2. Wandnahe Bereiche des Brennraums

Die modernen Hochdruckeinspritzsysteme führen den Kraftstoffstrahl wegen der niedrigeren Dichte im Teillastbereich näher an die Wand der Kolbenmulde. Die Verbrennung findet daher stärker in der Nähe von kalten Brennraumwänden statt. In diesem Bereich kommt es durch Abkühlung der Flamme zu Löschvorgängen, bei denen gebildeter Ruß nicht mehr hinreichend oxidiert wird. Die bei modernen Dieselmotoren verbleibenden Rußemissionen sind daher, insbesondere bei Teillast, auf die wandnahen Schichten zurückzuführen. Um das Einfrieren der Rußoxidation zu vermeiden, sollten daher die Wände hinreichend heiß sein. Dies wurde in einer theoretisch-numerischen Doktorarbeit von Herrn Hergart [1], die am Institut für Technische Mechanik durchgeführt wurde, gezeigt. Gegenstand hier vorgelegten Arbeit soll es sein, diese theoretischen Aussagen anhand von Experimenten zu belegen.

Umfangreiche Motorversuche mit wärmeisolierten Kolben wurden bereits in den achtziger Jahren durchgeführt, hauptsächlich mit dem Ziel, die Wärmeverluste zu reduzieren und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die Aussagen der Untersuchungen waren sehr unterschiedlicher Natur und müssen teilweise als widersprüchlich bezeichnet werden. Obwohl die meisten Experimente mit isolierten Kolben durch einen geringeren Wandwärmefluss im Vergleich zum konventionellen, nicht isolierten Motor charakterisiert wurden, waren die Auswirkungen auf den Wirkungsgrad nicht eindeutig. Einige Wissenschaftler haben sogar einen erhöhten Wandwärmeübergang festgestellt [2; 3, 4]. Woschni et al. [2] äußert die Vermutung, dass eine ausreichend hohe Wandtemperatur zu einer erhöhten chemischen Aktivität in der Wandgrenzschicht führt, die einen verstärkten Wärmefluss zufolge hätte. Somit hat Woschni seine Beobachtungen mit denen von Nguyen [5] verbunden, der über das Auftreten eines sogenannten „Convection Vibe“ in der Wandgrenzschicht einer Propan-Luftflamme berichtet. Die Schwierigkeiten den Einfluss der Isolierung endgültig zu klären, liegen hauptsächlich darin, dass der Verbrennungsprozess stark verändert wird, wobei sich mehrere Verbrennungsparameter gleichzeitig ändern. Wie aus den Untersuchungen von Alkidas [6] und Nanlin et al. [7] folgt, ist es notwendig eine Optimierung unter den geänderten Randbedingungen vorzunehmen, um das volle Potential eines Motors mit wärmeisolierten Kolben zu entfalten. Im allgemeinen wird die Verbrennung in einem wärmeisolierten Motor durch einen kürzeren Zündverzug, reduzierten vorgemischten Anteil, eine verlängerte Verbrennungsdauer und durch eine erhöhte Abgasenthalpie gekennzeichnet [8, 9, 10]. Es ist weiterhin wohl bekannt, dass Isolierungsmaßnahmen den Ladungswechsel und dadurch die Leistung auf Grund des schlechteren Füllungs-

grads negativ beeinflusst. Dies kann allerdings zum Teil durch bessere Nutzung der Abgasenergie kompensiert werden.

Bisher haben nur wenige Untersuchungen auf dem Gebiet des wärmegeprägten Motors auf die Emissionsminderung fokussiert. In den zu diesem Thema veröffentlichten Arbeiten ist meist eine Abnahme von Ruß und eine Zunahme von Stickoxiden (NO_x) zu verzeichnen [11, 12, 13]. Hinsichtlich der anderen dieselmotorisch relevanten Emissionen, wie Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid, sind die Aussagen nicht eindeutig. In einer Studie von Voss et al. [14] wird ein System zur Rußreduzierung vorgestellt, in dem relevante Motorbauteile, wie z.B. der Kolben, mit einer termischen Beschichtung aus plasma-aufgetragenem Zirkoniumdioxid (PSZ) versehen werden. Messungen unter Verwendung von beschichteten Komponenten zeigten eine deutliche Abnahme des festen Rußanteils im Vergleich zu dem konventionellen Motor.

Ausreichend niedrige Rußemissionen bieten den Spielraum, z.B. durch erhöhte Abgasrückführung oder spätverstellte Einspritzung, auch noch die Stickoxide zu reduzieren.

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist es, die theoretisch-numerischen Voraussetzungen über den Einfluss der Wandtemperatur auf die Rußoxidation in den wandnahen Schichten eines Dieselmotors mit Common-Rail-Einspritzung zu nutzen, um Schadstoffminderungspotentiale durch Isolierung der Kolbenmulde aufzuzeigen. Der Einfluss von Isoliermaßnahmen auf die Muldenwandtemperatur soll optisch mit Hilfe eines Infrarot-Einfarben-Pyrometers berührungsfrei gemessen werden. Um die sehr niedrigen Rußkonzentrationen im Teillastbereich zuverlässig erfassen zu können, soll zu Beginn des Forschungsvorhabens ein Opazimeter mit hoher Messgenauigkeit entwickelt und gebaut werden. Weitere Emissionen, z.B. NO_x , und der Verbrauch sollen mit vorhandenen Standardmesstechniken erfasst werden.

Anschließend wird die Wirkungsweise der partiellen Isolierung der Kolbenmulde auf die Rußbildung und -oxidation mit Hilfe einer zyklusaufgelösten Emissionsspektroskopie (ZES) untersucht. Dieses Verfahren ermöglicht eine qualitative Erfassung der OH-Radikale und der Rußstrahlung während des Verbrennungsablaufs [15, 16].

Die angewandten optischen und thermodynamischen Methoden an einem DI-Dieselmotor können einen Beitrag zur Aufklärung der im Brennraum stattfindenden Vorgänge leisten und zu einem ökonomisch und ökologisch optimalen Prozessablauf führen.

Kapitel 2

2 Grundlagen zur dieselmotorischen Verbrennung

In diesem Kapitel werden Aspekte des dieselmotorischen Arbeitsprozesses diskutiert, die die Grundlage für diese Arbeit bilden und den heutigen Stand der Dieselmotorentechnik repräsentieren. Zunächst wird genauer auf die Stickstoff- und Rußbildung und Rußoxidation im Dieselmotor eingegangen und anschließend wird die Wirkungskette der Gemischbildung, Zündung und Verbrennung bis hin zur Schadstoffbildung dargestellt. Die wichtigsten Möglichkeiten zur innermotorischen Minderung von Ruß- und Stickoxidemissionen werden am Ende des Kapitels behandelt.

2.1 Schadstoffbildung

Bei vollständiger Verbrennung werden Kohlendioxid und Wasserdampf neben Restsauerstoff und Stickstoff als Abgas emittiert. Obwohl diese Stoffe ungiftig sind, wird die Freisetzung großer Mengen an Kohlendioxid im Hinblick auf dessen Klimaeinfluss inzwischen kritisch bewertet. In realen technischen Verbrennungssystemen treten eine Reihe weiterer, nicht erwünschter Nebenprodukte auf. So führt der Einsatz schwefelhaltiger Kraftstoffe zu Schwefeldioxidemissionen, hohe Flammentemperaturen zur Bildung von Stickoxiden. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Ruß werden als weitere Schadstoffe angesehen. Ihre Entstehung und die Möglichkeiten der Reduzierung werden im Folgenden ausführlicher diskutiert.

2.1.1 Stickoxid

Stickoxide (NO_x) entstehen hauptsächlich aus dem in der Luft enthaltenen Stickstoff als Folge verschiedener chemischer Reaktionen bei der Verbrennung mit Sauerstoff. In ihrer Einstufung sind sie als Gift- und Reizgas anzusehen. Die Stickoxidemissionen des Dieselmotors setzen sich im Wesentlichen aus NO und NO_2 zusammen. Hierbei spielen Temperatur, Kraftstoffart und Sauerstoffanteil die Hauptrolle. Die NO_x -Bildung nimmt bei höheren Temperaturen stark zu.

2.1.2 Partikel

Bei der unvollkommenen Verbrennung von Dieselkraftstoffen (in geringerem Ausmaß auch von Benzin) entstehen Partikel. Darunter ist im Sinne der Gesetzgeber die Gesamtheit jener Abgasbestandteile mit Ausnahme von Wasser zu verstehen, die sich (bei einer Temperatur von 51.7°C) mittels eines definierten Filters im verdünnten Abgasstrom auffangen lässt [EU1987, EPA 1984, EPA 1997]. Der Begriff Partikel steht also für ein Konglomerat verschiedener Substanzen wie Ruß, angelagerter Kohlenwasserstoffe und anorganischer Verbindungen, die überwiegend aus verschiedensten Bestandteilen wie Schmiermitteladditiven, Metallabrieb, Wasser, Salzen bestehen. Bei der Betrachtung eines unverdünnten Abgasstromes erkennt man nach Farbe und Intensität des Rauches folgende Typen:

- Schwarzrauch, der einen Ausstoß von festem Kohlenstoff bedeutet,
- Blaurauch, der meist in der Warmlaufphase bei niedriger Lufttemperatur auf einen überwiegenden Anteil unverbrauchter Kohlenwasserstoffe, zurückzuführen ist,
- Weißrauch, der auf einen großen Anteil kondensierter Wassertröpfchen, im kalten Motor und Abgassystem gebildet, hinweist.

2.1.3 Rußbildung und Rußoxidation

Rußemission tritt bei der Verbrennung unter extremem Luftmangel auf und ist aufgrund des örtlich sehr inhomogenen Gemisches typisch für die Verbrennung im Dieselmotor. In jedem Fall ist bei der Auslegung des Verbrennungsprozesses aber darauf zu achten, dass die Zwischenprodukte durch ausreichende Verweilzeit in sauerstoffreichen heißen Zonen durch Oxidationsreaktionen wieder abgebaut werden können, bevor sie den Brennraum verlassen. Dies gelingt bei schneller Abkühlung der Flamme, z.B. im Expansionshub eines Dieselmotors oder in der Nähe kalter Wände, nicht immer vollständig, und es kommt folglich zur Emission von Ruß und unverbrannten Kohlenwasserstoffen.

Die Reaktionen, die zur Ruß- bzw. Partikelbildung führen, sind quantitativ nur unvollständig geklärt. In den letzten Jahren sind auf diesem Gebiet mehrere Arbeiten erschienen [17, 18]. Die darin verwendeten Reaktionsmechanismen beschreiben vor allem die Bildung und das Wachstum polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (engl. Polycyclic aromatic hydrocarbons PAH). Koagulation von PAH führt zur Bil-

dung von Rußpartikeln, die durch weitere PAH-Anlagerung, Koagulation mit anderen Rußpartikeln und chemische Oberflächenreaktionen weiter wachsen. Die Oxidation mit O_2 und OH ermöglicht den Rußabbau. Im Folgenden sollen diese Teilschritte näher betrachtet werden. In Abbildung 2.1 sind die Beziehungen dieser Prozesse untereinander dargestellt.

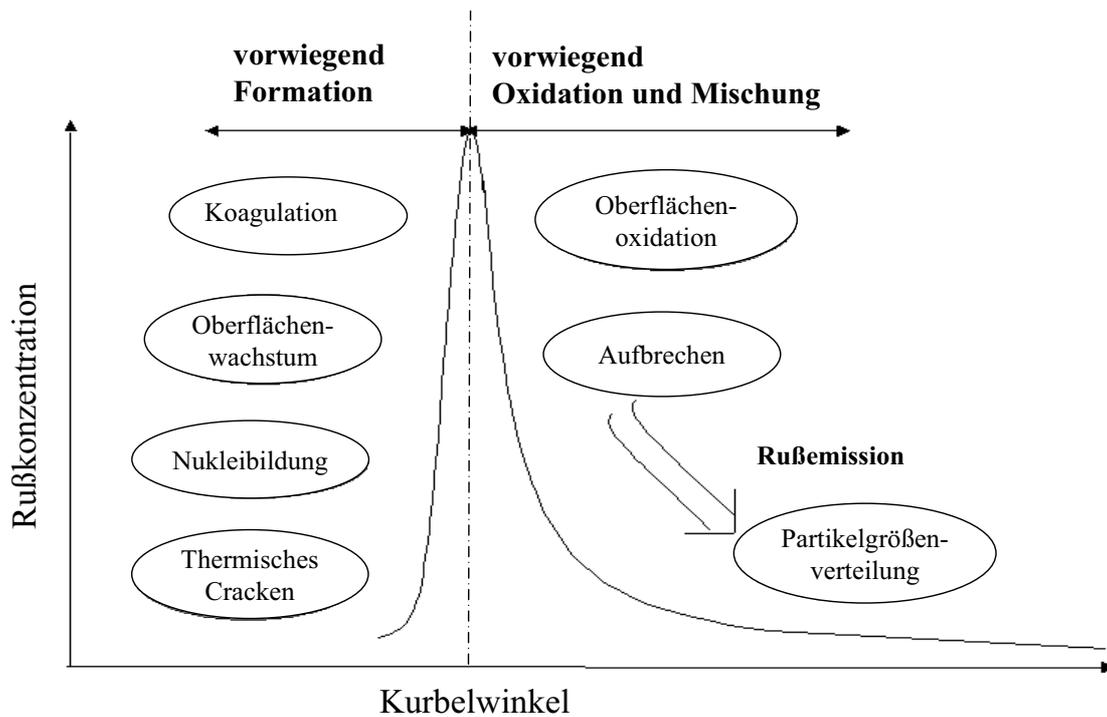


Abbildung 2. 1: Rußbildung und Rußoxidation im Dieselmotor [19]

Rußbildung

Sowohl durch Oxidationsprozesse als auch durch thermische Pyrolyse werden die Kraftstoffmoleküle unter sauerstoffarmen Bedingungen zu Acetylen ($H-C\equiv C-H$) abgebaut [20, 18]. Dabei wird Wasserstoff vom Molekül abgespalten, so dass zunächst kleine, geringer gesättigte Kohlenwasserstoffe entstehen. Diese Reaktionen sind endotherm und damit stark temperaturabhängig. Das Acetylen führt über Reaktionen mit CH oder CH_2 zu C_3H_3 , das dann durch Rekombination und Umlagerung einen sogenannten aromatischen Ring bilden kann. Durch weitere Anlagerung von Acetylen können dann größere Ringstrukturen entstehen. Derartige Kondensationsprozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sie umso mehr vom Luftverhältnis abhängen, je mehr Aufbauschritte benötigt werden [21]. Diese Prozesse laufen sehr schnell ab und führen bei weiterem Wachstum zu Ruß. Mit fortschreitendem Wachstum nimmt das H/C -Verhältnis aber in der Regel ab. Trotz der Vielfalt kann Ruß doch oft durch eine logarithmisch-normale Verteilung der molaren Massen beschrieben werden. Diese so-

nannten Nuclei weisen eine Größe von 1-10 Nanometer auf. Für die Partikelbildung besteht eine glockenförmige Temperaturabhängigkeit, die auf zwei Tatsachen beruht:

Erstens benötigt die Rußbildung Radikale als Vorläufer (C_3H_3). Diese Radikalenbildung und daher auch die Rußbildung werden bei niedrigen Temperaturen unterdrückt (siehe Abbildung 2.2).

Zweitens zerfallen die Rußvorläufer bei hohen Temperaturen wieder oder werden oxidiert. Schlussfolgerung ist, dass die Rußbildung in einem Temperaturfenster von ca. 1400-2500 K abläuft.

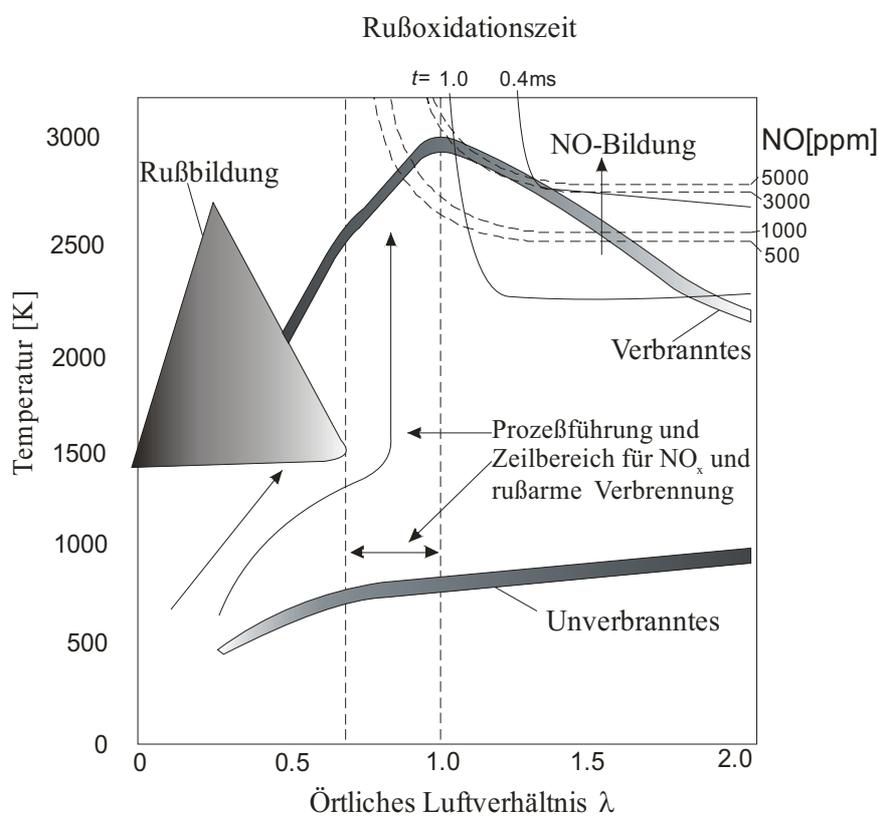


Abbildung 2.2: Rußbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung [20, 22]

Oberflächenwachstum

Das Oberflächenwachstum bezeichnet die nach der Keimbildung fortschreitende Anlagerung im Wesentlichen von Acetylen und Polyacetylen aus der Gasphase an die Oberflächen der Primärpartikel unter weiterer Dehydrierung. Hieraus folgt ein abnehmendes H/C-Verhältnis. Das Rußmassenwachstum ist deshalb nach Abschluss der Keimbildung hauptsächlich vom Oberflächenwachstum abhängig. Die Anzahl der Teilchen bleibt konstant, der Partikeldurchmesser und die Partikelmasse steigen. So

werden ca. 95 % der gesamten Rußmasse durch das Oberflächenwachstum gebildet [23].

Koagulation

Das Größenwachstum durch Teilchenkollision wird als Koagulation bezeichnet. Die Teilchenanzahl sinkt, die Masse bleibt konstant und es entstehen nahezu sphärische Partikel [24]. Dabei hat die Koagulation einen entscheidenden Einfluss auf die Größenverteilung des Rußes. Die Größenverteilung von Partikeln im Abgas lässt sich durch eine logarithmisch-normale Verteilungsfunktion beschreiben.

Agglomeration

Die Agglomeration beschreibt die Bildung von kettenförmigen Strukturen, die entstehen, wenn in der Gasphase nicht mehr ausreichend Kohlenwasserstoffe vorhanden sind oder die Reaktivität der Partikel abnimmt. Während der Verbrennungs- und Expansionsphase ist keine der beiden Bedingungen erfüllt. Daher bilden sich Agglomerate erst nach einer gewissen Verweilzeit außerhalb des Brennraums [25].

Oxidation

Die bisher beschriebenen Teilprozesse behandeln das Wachstum bzw. die Umbildung von Partikeln. Parallel zu diesen Vorgängen werden der überwiegende Teil des entstandenen Rußes bzw. der Vorläufer noch innerhalb des Zylinders wieder oxidiert. Die hohe spezifische Oberfläche der Partikel ermöglicht eine effektive Oxidation. Dieser Prozess führt zum Ausbrand der Partikel und somit zur Abnahme des Rußvolumenbruchs f_v sowie der Partikelanzahldichte N_T . Damit ergeben sich formal folgende Zusammenhänge [26]:

$$\frac{dN_T}{dt} = \text{Nukleation} - \text{Koagulation} - \text{Oxidation} \quad (2.1)$$

Während man Nukleation, Oberflächenwachstum und Oxidation als chemische Prozesse einordnen kann, handelt es sich bei den anderen Prozessen um physikalische Stoßvorgänge ohne chemische Umsetzung.

Die Rußoxidation war in der Vergangenheit bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [27, 28, 29]. Als wichtigste Oxidatoren werden Sauerstoff und Radikale wie das OH genannt. Unterhalb von ca. 1800 K ist der Einfluss des Sauerstoffs auf die Partikellebenszeit vernachlässigbar gering. Die Oxidationszeiten steigen mit

sinkender Temperatur exponentiell an und liegen dann in einem Bereich, der im Brennraum ein „Überleben“ zahlreicher Rußteilchen erwarten lässt. Es ist also hinsichtlich der Rußoxidation zielführend, möglichst lange in der Expansionsphase mit hohen Temperaturen zu arbeiten.

2.2 Gemischbildung

Voraussetzungen für niedrige Rohemissionen sind:

- eine optimierte Vermischung von Luft und Kraftstoff,
- die richtige zeitliche Einbringung des Kraftstoffs,
- eine möglichst hohe Sauerstoffkonzentration,
- genügend hohe Temperaturen im Brennraum
- eine ausreichende Verweilzeit bei dieser Bedingung.

Dies erfordert eine sorgfältige Abstimmung der Gemischbildungsparameter des Motors und Einspritzsystems.

Für das gewählte Einspritzsystem ist eine Optimierung der Düsengeometrie (Lochanzahl, Lochdurchmesser, hydraulischer Durchfluss, Strahlrichtung und Ks-Faktor) und der variablen applizierbaren Größen (Spitzbeginn, Einspritzdruck, Einspritzverlauf und Mehrfacheinspritzung) erforderlich. In der Abbildung 2.3 ist sowohl das die Einspritzstrahlen beeinflussende Strömungsfeld und die makroskopische Struktur eines Strahls dargestellt (links) aber auch das expandierte Kraftstoff-Luft-Gemisch während der Verbrennung (rechts).

Durch den Einspritzvorgang wird der Kraftstoff in sehr kleine Tröpfchen zerstäubt und entsprechend der Düsengeometrie im Brennraum verteilt. Wegen des hohen Einspritzdruckes vor der Düse tritt der Brennstoff mit hoher Geschwindigkeit und entsprechend hoher Turbulenz aus. Durch die große Relativgeschwindigkeit zur hochverdichteten Luft im Zylinder, unterstützt durch die Turbulenz im Strahl, zerfällt der Strahlrand sofort in kleine Tröpfchen.