



DIÄT FÜR
FETTE FLAMMEN

Ruß ist nicht gleich Ruß

Partikelmessungen an Flugzeugantrieben helfen den Triebwerksingenieuren bei der Entwicklung moderner Gasturbinen

Von Claus Wahl

Die Zeiten der schwarzen Rußfahnen hinter startenden Flugzeugen sind vorbei. Die Antriebe der Flugzeuge, die Gasturbinen, sind leiser, effektiver und schadstoffärmer geworden. Sie stoßen heute pro Kilogramm verbranntem Treibstoff deutlich weniger Partikelmasse aus, als es moderne Diesel-PKW, die der EURO-Norm IV genügen, tun. Dennoch werden Fluggasturbinen ständig weiterentwickelt. Das Ziel sind höhere Wirkungsgrade und damit niedrigerer Treibstoffverbrauch, geringerer Lärm und weniger Schadstoffemissionen. Treibstoffkosten und emissionsabhängige Landegebühren setzen die TriebwerksHersteller unter Innovationsdruck. Die Vorteile für Mensch und Umwelt liegen auf der Hand.

Ruß entsteht, wenn bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen nicht genügend Sauerstoff vorhanden ist, um den Kohlenstoff vollständig zu Kohlendioxid (CO₂) zu oxidieren. Es heißt dann, die Flamme brennt „fett“. Mit mehr Luftzufuhr lässt sich das Rußproblem nicht lösen. Fluggasturbinen werden bereits mit erheblichem Luftüberschuss betrieben. Die Sache ist komplizierter: Spritzt man flüssigen Treibstoff in eine solche Brennkammer ein und die einzelnen Tröpfchen zünden, dann herrscht nach kürzester Zeit um die Tröpfchen herum Luftmangel. Dadurch entstehen lokale „fette Zonen“. Dort bilden sich Rußteilchen, die dann während der restlichen Verweildauer in der Brennkammer nicht mehr vollständig abbrennen.

Das Rußproblem ist also eigentlich ein Mischungsproblem. Die Gemischaufbereitung und die Verbrennungsführung wurden und werden des-

halb ständig verbessert. Immer feinere Tröpfchen führen zu immer kleineren Rußteilchen. Selbst diese haben während der kurzen Verweilzeit in der Brennkammer kaum eine Chance, vollständig abzubrennen. Höhere Temperaturen in der Brennkammer fördern ebenfalls den Ausbrand. Allerdings stößt man wegen Materialproblemen und erhöhter Stickoxid (NO_x)-Bildung auch hier an Grenzen.

Die Herausforderung für die Triebwerksingenieure besteht darin, die vielen unterschiedlichen Parameter wie Wirkungsgrad, Lärm, Baugröße, Gewicht und Verbrennungsführung so zu optimieren, dass alle Anforderungen erfüllt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Fluggasturbinen bei unterschiedlichsten Last- und Umgebungsbedingungen zuverlässig funktionieren müssen. So beim Rollen am Boden, bei der Start- oder Landephase und in Reise-

flughöhe, wo Außentemperaturen von minus 50 Grad Celsius und ein Luftdruck von etwa 200 Millibar herrschen.

Die Entwicklung einer modernen Gasturbine mit schadstoffarmen Brenner- und Brennkammerkonzepten erfordert also erheblichen Simulations- sowie Testaufwand. In einem mehrjährigen iterativen Prozess wird immer wieder simuliert, gemessen und verbessert. Die Rußemissionen sind dabei nur ein Teilaspekt. Die Betriebssicherheit steht immer im Vordergrund.

Die Gasturbine verbrennt wesentlich sauberer als andere Antriebe, da die Flamme kontinuierlich brennt. Bei kolbenmotorischer Verbrennung hat man ein ständiges Zünden und Erlöschen der Flamme. Das Erlöschen führt zu erhöhten Emissionen, vergleichbar dem Erlöschen einer Kerzenflamme.

Im Vergleich zu heute von modernen Flugzeugen ausgestoßenen Rußpartikelgrößen von zehn bis 40 Nanometern sind Blütenpollen mit 10 bis 40 Mikrometern 1000 mal größer.

Besser geführte Verbrennungsprozesse in Gasturbinen senken die Schadstoffemissionen und führen zu kleineren Rußteilchen. Die mittleren Durchmesser der emittierten Rußpartikel liegen heute zwischen zehn und 40 Nanometern (nm). Dies bedingte wiederum die Entwicklung neuer Messmethoden zur Detektion von Feinstaub in Verbrennungsabgasen. Im Vergleich zur guten alten „Rußzahl“, wie sie der Schornsteinfeger an der heimischen Heizung bestimmt, hat sich auch hier einiges getan. Heutige Rußmessgeräte bestimmen nicht nur die Rußmasse, sondern messen komplette Rußpartikelgrößenverteilungen und Anzahlkonzentrationen bis hinunter zu zwei Nanometer Partikeldurchmesser. Selbst Online-Messungen der Partikelgrößenverteilung sind möglich.

Die Partikel werden beispielsweise nach dem Mobilitätsdurchmesser klassifiziert und mittels äußerst

empfindlicher Elektrometer detektiert. Solche Geräte erlauben die kontinuierliche und schnelle Messung von Partikelgrößenverteilungen im Bereich von 5,6 bis 560 nm. Damit liegt das so genannte EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer) genau im relevanten Messbereich für Partikel aus technischen Verbrennungsprozessen. Es können zehn komplette Partikelgrößenverteilungen pro Sekunde gemessen werden.

Neben den begleitenden Rußmessungen bei Brennkammerentwicklungen werden auch immer wieder aktuelle, im Service befindliche, Triebwerke mit der neuen Messtechnik vermessen. Dies dient vor allem der Modellvalidierung, aber auch dazu, die Datenbasis für Klimaforscher zu erweitern und den technischen Fortschritt zu dokumentieren. Als Beleg für die flexible Einsetzbarkeit der neuen Rußmesstechnik sind im Folgenden zwei Anwendungen näher beschrieben.

Online Partikelmessung bei der Vorbeifahrt einer Do 328

Ein Beispiel zur Messung eines transienten Vorgangs ist die Partikelmessung an einem auf dem Taxiway vorbeifliegenden Flugzeug (Do 328). Werden bei entsprechender Windrichtung die Abgasschwaden an der Messstelle vorbeigetrieben, so wird ein deutlicher Anstieg der Partikelkonzentration registriert. Da aber nicht nur die Anzahlkonzentration, sondern alle 0,1 Sekunden eine komplette Partikelgrößenverteilung gemessen wird, lässt sich der komplette zeitliche Verlauf der Partikelgrößenverteilungen dreidimensional darstellen.

Die Messung ergab im Abstand von zehn Metern zum Taxiway eine maxi-



Online-Partikelmessung bei der Vorbeifahrt einer Do 328

male Konzentration von zehn Millionen Partikeln pro Kubikzentimeter mit einem mittleren Durchmesser von 13 Nanometern. Dies entspricht einer Rußmasse von nur 27 Mikrogramm je Kubikmeter.

Die Messungen wurden in Zusammenarbeit vom DLR und dem Bundesamt für Zivilluftfahrt der Schweiz (BAZL) am Flughafen Bern-Belp durchgeführt.

Messungen an Kolbenmotoren von Kleinflugzeugen

Bei der Verbrennung von Flugbenzin, einem speziell für die Verwendung in Flugmotoren hergestellten Ottokraftstoff, erwartet man eigentlich keine Partikelemissionen. Da aber Flugmotoren nach Herstellervorgaben aus Kühlungsgründen oftmals fett betrieben werden müssen und fette Verbrennung zu Rußbildung führen kann, wurden Partikelmessungen an Kleinflugzeugen durchge-

führt. Vorversuche zeigten Partikelemissionen ähnlich denen von Dieselfahrzeugen! Die Messkampagne wurde als Zusammenarbeit des schweizerischen Bundesamts für Zivilluftfahrt (BAZL), der Firma Hjelmcö Oil aus Schweden und des DLR durchgeführt.

Bei den Tests kamen zwei Kraftstoffe zum Einsatz. Zum einen der Standardkraftstoff AVGAS (Abkürzung für Aviation Gasoline) 100/130LL (Die Zahlen 100/130 geben die Oktanzahl an, LL bedeutet Low Lead, wenig Blei), wie er heute weltweit bei Flugzeugen mit Kolbenmotoren verwendet wird. Als zweiter Kraftstoff wurde ein unverbleiter Kraftstoff der Firma Hjelmcö Oil eingesetzt mit der Bezeichnung AVGAS 91/96UL (UL: unleaded).

Bei den beiden Kleinflugzeugen, die auf dem DLR-Flughafen Oberpfaffenhofen getestet wurden, handelt

es sich um eine Robin DR400 (HB-EYS) des Bundesamts für Zivilluftfahrt, Bern (Schweiz), und um eine Piper 28 Warrior II der Firma Hjelmcö Oil (SE-KEI).

Die Messungen an beiden Flugzeugen zeigten deutlich höhere Emissionen für den verbleiten Kraftstoff, sowohl für die Anzahlkonzentration als auch für den Durchmesser. Folglich ist auch die emittierte Partikelmasse für den Standardkraftstoff deutlich höher. Wie weitere Untersuchungen ergeben haben, wird das im Kraftstoff enthaltene Blei hauptsächlich als Bleibromidpartikel emittiert. Wo immer möglich, sollte daher der unverbleite Kraftstoff verwendet werden.

Autor:

Dr. rer. nat. Claus Wahl ist Gruppenleiter Chemische Analytik im Institut für Verbrennungstechnik des DLR in Stuttgart.



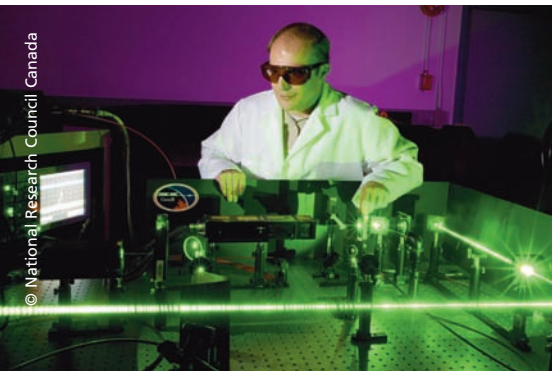
Tests auf dem Flughafen Oberpfaffenhofen

Signale aus der Flamme

Lasermesstechnik für die In-situ-Diagnose rußender Flammen

Von Klaus Peter Geigle

Mit modernen Lasermessverfahren kann die Rußbildung direkt an ihrem Entstehungsort in der heißen Verbrennungszone von Flammen untersucht werden. Anders als Sondenmesstechniken, die für Messungen im Abgas von Motoren, Triebwerken oder auch in der freien Umwelt gut geeignet sind, können sie direkt zur Aufklärung der komplexen Mechanismen der Rußbildung beitragen. Vorteile sind die hohe Präzision ohne Beeinflussung der untersuchten Flamme sowie extrem hohe räumliche und zeitliche Auflösung.



Im Laserlabor des kanadischen Partner-Instituts

Messwerte direkt aus dem Brennraum sind wichtige Informationen, wenn man die Verbrennungstechnologie weiterentwickeln will. Erst wenn Klarheit über alle Teilprozesse herrscht, die an der Umsetzung des Brennstoffs beteiligt sind, kann man sie berechenbar machen. Die Wissenschaftler haben den Ehrgeiz, Turbulenz, Strahlung und Chemie gezielt zu beeinflussen. Dabei lässt sich der

Gesamtvorgang derzeit trotz steigender Rechnerleistungen nur unter Zuhilfenahme vereinfachender Annahmen simulieren.

Bei der Vorhersage von Verbrennungssimulationen ist man auf gut definierte Experimente zur Validierung angewiesen. Für die entsprechende Datenbasis sind sowohl Kennwerte aus dem Abgas als auch direkt aus der Flamme wichtig. Die Ergebnisse von Rußmessungen direkt in technischen Brennkammern dienen außerdem dazu, die Wärmebelastung der Brennkammerwände besser abzuschätzen. Dabei spielt die Rußwärmestrahlung eine bedeutende Rolle. Sie ist aus dem Alltag von Kerzenflammen oder unsauber brennenden Gasthermen durch ihre charakteristisch gelb-orange Färbung bekannt. Kerzenflammen enthalten übrigens eine Größenordnung von etwa 10^{10} Rußpartikeln pro Kubikmillimeter mit typischen Größen zwischen 10 und 40 Nanometern.

Sowohl Partikelgrößen als auch -konzentrationen in der Flamme sind den Wissenschaftlern mit der so genannten Laserinduzierten Inkandescenz (LII) zugänglich. Mit einem kurzen Laserpuls werden die Rußpartikel gegenüber ihrer heißen Umgebung (oranges Leuchten) bis auf Weißglut über 4.000 Grad Celsius erhitzt. Die zugeführte Energie wird in der Folge – unter anderem als Strahlung – inner-

„Wir freuen uns über die Gelegenheit der Zusammenarbeit mit den DLR-Kollegen. Gemeinsam können wir die Prozesse der Rußemissionen aus industriellen Brennern besser verstehen und haben die Möglichkeit, gemeinsam die erforderlichen Messtechniken zu optimieren. Unsere Erfahrungen ergänzen sich, was einen signifikanten Wissenssprung erwarten lässt, der von keiner der beteiligten Gruppen allein so schnell zu schaffen wäre“.

Greg Smallwood, vom kanadischen Partnerinstitut CPET des National Research Council

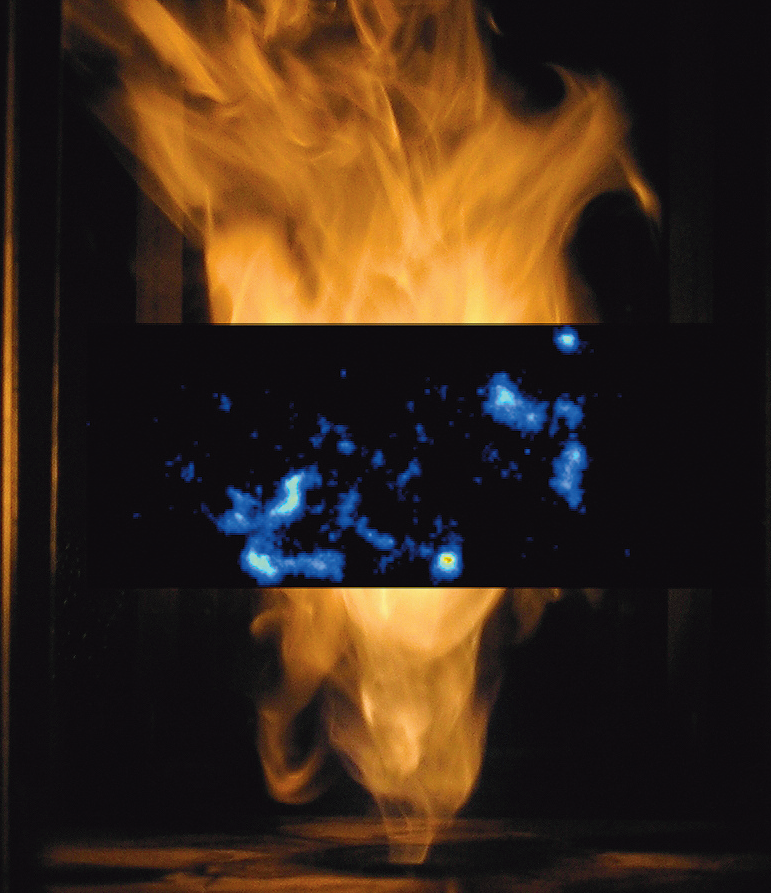
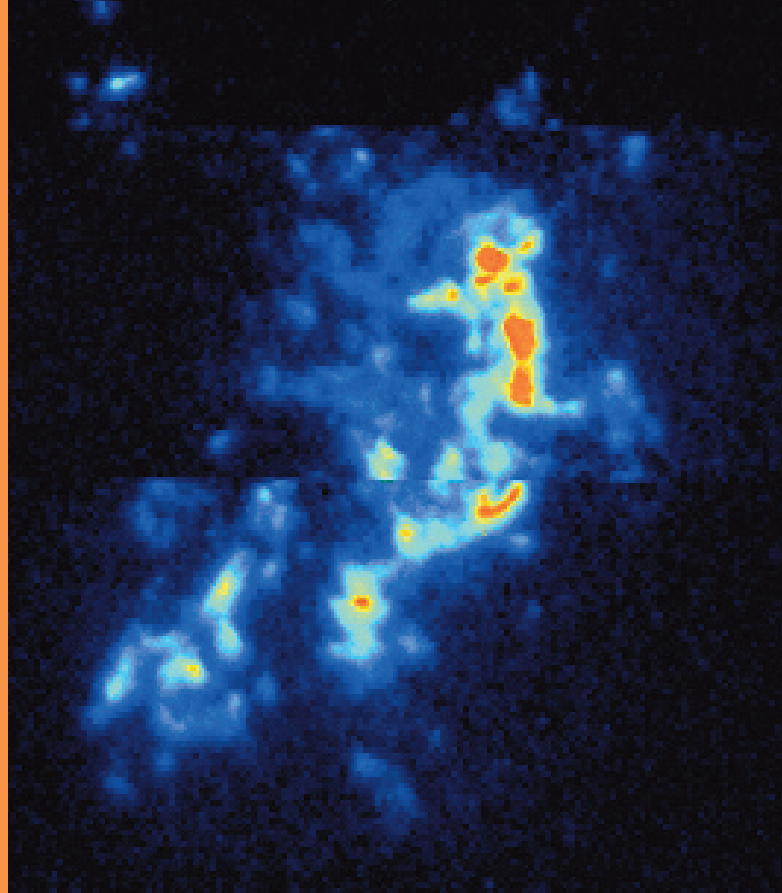


Foto einer turbulenten rußenden Flamme bei erhöhtem Druck, eingebledet: das mittels Laser erzeugte Bild



Schnappschuss einer Rußverteilung in der gesamten Flamme mittels laserinduzierter Inkandeszenz (LII)

halb von Bruchteilen einer millionstel Sekunde wieder an die Umgebung abgegeben. Aus der Abklingdauer kann man auf die Partikelgröße und aus der Signalintensität auf die Konzentration schließen. Mit geeigneten Optiken lässt sich der Laserstrahl zu einem einige Zentimeter hohen und sehr dünnen Lichtschnitt formen. Dieser erfasst die räumliche Verteilung der Rußkonzentration in einer Ebene und macht, anders als Sondenmesstechniken, auch turbulente Strukturen in der Flamme sichtbar. Bei erhöhtem Druck – wie er bei technischer Verbrennung typisch ist – nehmen molekulare Stöße und Partikelkollisionen zu. Eine stärkere Rußbildung ist die Folge.

Ein weiterer wichtiger Flammenparameter ist die lokale Temperatur. Auch hier liefert die Lasermesstechnik ein wertvolles Werkzeug: ein Punktmessverfahren, den Fachleuten bekannt als kohärente Anti-Stokes Raman Streuung (CARS). In einer

Modifikation der Stuttgarter Forscher ist es das einzige Verfahren, das hochpräzise Temperaturinformationen aus rußenden Flammen liefert. Andere potentielle laserbasierte Techniken scheitern an Störungen durch „dreckige“ Flammenbestandteile (= Rußpartikel). Für CARS ist das Fokussieren und Überlagern dreier verschiedener Laserstrahlen am Messort erforderlich. Speziell in turbulenten Flammen stellt dies höchste Anforderungen an die Strahljustage. Das erzeugte CARS-Signal hat selbst wieder Lasereigenschaften (räumlich gerichtet, einfarbig, allerdings bei relativ geringer Intensität) und lässt auf die Temperatur schließen.

Für die Weiterentwicklung von Messtechniken zur Anwendung in rußenden Flammen startet das DLR-Institut für Verbrennungstechnik unter dem Dach der Helmholtz-Gemeinschaft eine Kooperation mit dem kanadischen Partnerinstitut des National Research Council. Außerdem sollen

weitere Messtechniken entwickelt und optimiert werden, um die Präzision von LII-Messungen im Rahmen der Datenauswertung weiter zu erhöhen und zusätzliche Informationen zu Validierungszwecken zu gewinnen. Von Interesse sind Parameter wie der Agglomerationsgrad der zunächst gebildeten runden Primärpartikel, aber auch die exakte Umgebungstemperatur oder das Strömungsfeld. Ein Detailaspekt des laserinduzierten Prozesses ist die Untersuchung der Oberflächenfragmente, welche die Rußpartikel nach Bestrahlung mit dem intensiven Laserpuls verlassen.

Autor:

Dr. rer. nat. Klaus Peter Geigle aus dem DLR-Institut für Verbrennungstechnik arbeitet an der Weiterentwicklung von Lasermesstechniken und deren Anwendung in rußenden Flammen.