

# Die Beschaffenheit der Partikel, resultierend aus Öl-Kontamination, in der Zapfluft von Flugzeugen

**Byron W. Jones, PhD, PE**  
Mitglied bei ASHRAE

**Dr. Shahin Nayyeri Amiri,**

**Dr. Jake W. Roth**

**Mohammad H. Hosni, PhD**  
Mitglied bei ASHRAE

©ASHRAE [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org) The Nature of Particulates in Aircraft Bleed Air Resulting from Oil Contamination, 2017 Winter Conference-Papers

Übersetzung von Gröger & Obst Vertriebs- und Service GmbH

## ZUSAMMENFASSUNG

Der ASHRAE Standard 161 besagt, daß zur Überwachung der Luftqualität in kommerziellen Flugzeugen, Zapfluftsensoren benötigt werden, um Kontaminationen durch Schmieröl zu erkennen. Ein möglicher Ansatz zur Erfüllung dieser Anforderung ist die Partikelerkennung. Ein vierteiliges experimentelles Programm wurde durchgeführt, um eine detaillierte Charakterisierung der Partikel, die entstehen, wenn die Zapfluft mit Schmieröl verunreinigt ist, zu entwickeln.

Der erste Teil des Programms verwendet einen Zapfluft-Simulator. Ein Hubkolbenverdichter, gefolgt von einem beheizten Rohr, wurde verwendet, um gesteuerte Temperatur- und Druckbedingungen zu erzeugen, welche mit der Zapfluft von einem Flugzeugtriebwerk vergleichbar sind. Aerosolisiertes Schmieröl wurde in den Luftstrom vor dem Kompressor injiziert, und die Partikeleigenschaften wurden nach dem erhitzten Rohr gemessen.

Der zweite und der dritte Teil des Programms verwendeten Turbinenwellenmotoren, welche auf einem Prüfstand montiert wurden.

Die Turbinenwellenmotoren wurden für eine kontrollierte Belastung mit einem Dynamometer verbunden. Aerosolisiertes Öl wurde in die Einlassluft gemischt und die resultierenden Partikeleigenschaften in der Zapfluft gemessen.

Der Verdichter im zweiten Teil des Programms, verwendete sowohl axiale als auch zentrifugale Kompressionsstufen, während der Verdichter, im dritten Teil des Programms, über eine einzelne Zentrifugalstufe verfügte.

Der vierte Teil des Programms nutzte eine Turbine eines militärischen Transportflugzeugs, der C-17 der US Air Force.

In die erste Stufe des Verdichters wurde Öl eingespritzt, und die Zapfluft aus der Turbine wurden zu einem Prüfstand umgeleitet. Am Prüfstand hat man die Zapfluft gekühlt und davon Proben genommen.

Partikelgröße, Verteilungen und Konzentrationen wurden mit aerodynamischer Partikelgrößenbestimmung und mittels der Rasterbeweglichkeits-Partikelgrößenbestimmung gemessen. Zusammen können diese Instrumente Konzentrationen und Größenverteilungen für Partikel im Bereich von 10 Nanometer bis 20 Mikrometer messen. Die Messungen zeigten, dass Öl-Verschmutzung im Verdichter unter den meisten Betriebsbedingungen zu einem Nebel sehr feiner Tröpfchen in der Zapfluft führten. Typischerweise sind diese Tröpfchen in einem Bereich von 10-150 Nanometer im Durchmesser. Bei sehr niedrigen

**Jones** and **Hosni** are professors in the Department of Mechanical Engineering and Nuclear Engineering at Kansas State University, **Nayyeri Amiri** is an instructor in the Department of Civil Engineering at Kansas State University, **Roth** is a systems engineer at Black and Veatch, Overland Park, KS.

Kontaminationsraten scheint es, dass viele der Tröpfchen sogar kleiner als 10 Nanometer sind.

Diese Forschungsergebnisse zeigen, dass die Entwicklung von Sensoren zur Erkennung von Ölkontaminationen in der Zapfluft von Flugzeugen sich auf die Detektion und Messung von Feinstpartikeln konzentrieren sollte.

Geringe Verschmutzungsgrade können eine höhere Empfindlichkeit gegenüber extrem ultrafeinen Partikeln von 10 Nanometer und kleiner erfordern.

## EINFÜHRUNG

Die überwiegende Mehrheit der Verkehrsflugzeuge verwendet Zapfluft von den Triebwerksverdichtern zur Belüftung und Druckbeaufschlagung der Kabine während des Fluges. Man kann zur Gewinnung von Zapfluft auch das Hilfstriebwerk benutzen. Dieses wird während des Aufenthaltes auf dem Boden, und in einige Phasen während des Fluges eingesetzt.

Wenn Verunreinigungen durch Schmieröl oder andere Flüssigkeiten in der Triebwerksluftansaugung oder durch Lagerdichtungsleckagen entstehen, dann wird auch die dem Flugzeug zugeführte Luft für die Kabine kontaminiert sein.

Zusätzlich können die Temperaturen, die im Turbinenkompressor an der Zapfluft-Entnahmestelle erreicht werden, so hoch sein, dass unter bestimmten Betriebsbedingungen, die Möglichkeit der thermischen Zersetzung (NRC 2002) besteht.

Niedrige Kontaminationsniveaus von Zapfluft stellen das Potenzial für chronische, nicht identifizierte Exposition dar.

Höhere Konzentrationen von Kontamination erzeugt ein sogenanntes Fume - Event, bei dem ein offensichtlicher Geruch oder manchmal sichtbarer Rauch oder Nebel im Flugzeug vorhanden ist. Bei sichtbarem Rauch muss die Flugbesatzung kritische Entscheidungen treffen.

Ein Feuer an Bord ist ein klarer Notfall, der eine sofortige Landung erfordert, selbst wenn die verfügbare Landebahn nicht ideal ist. Wenn der Rauch aber von Öl in der Zapfluft von einem Kompressordichtungsleck stammt, kann auf die Situation durch Isolierung der Quelle angemessen reagiert werden. Der Flug kann normalerweise ohne der dringenden Notwendigkeit einen sicheren Landeplatz zu finden, fortgesetzt werden.

Unglücklicherweise sind Flugzeuge normalerweise nicht mit einer Instrumentierung ausgestattet, die es ermöglicht, eine Kontamination der Zapfluft zu detektieren. Folglich kann die Flugbesatzung kritische Zeit verschwenden, wenn versucht wird, eine Zapfluftquelle zu isolieren, während tatsächlich ein Feuer an Bord vorhanden ist. Oder sie können eine unnötige Notlandung mit ihren zwangsläufigen Risiken machen, wenn die Rauch-Quelle mit minimaler Störung des Fluges isoliert werden könnte.

In weniger extremen Fällen kann eine Ölkontamination der Zapfluft zur Umkehr des Fluges oder zu ungeplanten Landungen mit ihren zwangsläufigen Kosten und Störungen führen (Shehadi et al. 2015a, Lebbin 2013).

Die Wahrscheinlichkeit eines Zapfluft-Fume-Events ist bei einem beliebigen Flug sehr niedrig; Shehadi et al (2015b) schätzten die Häufigkeit auf etwa eine von 5000 Flügen und Schmieröl ist nur eine von mehreren Ursachen.

Nichtsdestoweniger wäre die Fähigkeit, Ölverschmutzungen in Zapfluft zu erkennen und die Verursachende Turbine dieser Kontamination zu identifizieren, ein wertvoller Vorteil bei der Minimierung der Kontamination von Flugzeuginsassen.

Bei kritischen Entscheidungsprozessen im Falle einer ernsthaften Rauchentwicklung in der Kabine wäre die Fähigkeit, Ölverschmutzungen in Zapfluft zu erkennen, ebenfalls eine große Hilfe. Dieser Bedarf wird bei ASHRAE erkannt.

Der Standard 161 (ASHRAE 2013) besagt, daß Sensoren zur Erkennung von Zapfluftkontamination erforderlich sind. Leider gibt es keine Sensoren, die ohne weiteres verfügbar sind und nachweislich Ölkontaminationen von Zapfluft zuverlässig erkennen können.

Eine Reihe von Projekten wurde durchgeführt, um die Art von Verunreinigungen zu bewerten, die aus Öl in Zapfluft resultieren.

Diese Experimente befassten sich mit der chemischen Beschaffenheit, und der Beschaffenheit der Partikel (Tröpfchen) in der Kontamination, die schließlich in die Zapfluft gelangt.

Für die Projekte gab es mehrere Ziele:

- Quantifizierung der resultierenden chemischen Exposition,
- Identifizierung von chemischen Tracern zur Detektion und Charakterisierung der daraus resultierenden Partikel.

**Dieser Beitrag befasst sich nur mit den Ergebnissen der Partikelcharakterisierung aus diesen Experimenten.**

## EXPERIMENTELLER APPARAT I

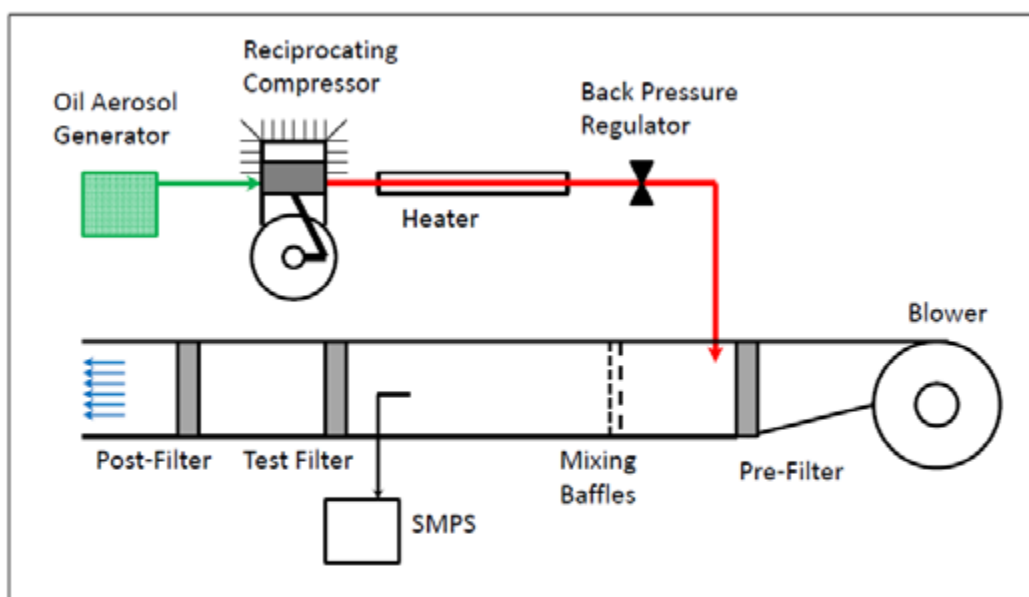


Figure 1. Bleed air simulator.

Das erste Projekt verwendete einen Zapfluft-Simulator (BAS), welcher charakteristische Zapfluft herstellen kann. Diese kann mit Öl kontaminiert werden. Dieses Gerät wurde für ein vorheriges Projekt entwickelt, bei dem die Luftfiltermedien des Luftfahrzeugs einer kontrollierten Verunreinigung ausgesetzt werden mussten, die repräsentativ für das ist, was bei einer Verschmutzung der Flugzeugkabine zu erwarten wäre (Eckels et al 2014). Ein vereinfachtes Diagramm der Vorrichtung ist in **Abbildung1** dargestellt.

Eine Reihe von Aerosolisierungsdüsen wurde verwendet, um einen feinen Ölnebel zu erzeugen. Die resultierende nebelbeladene Luft wurde in einem Kolbenkompressor auf einen regelbaren Druck komprimiert. Nach dem Kompressor erhöhte eine Heizeinrichtung die Temperatur des Luftstroms auf einen ebenfalls regelbaren Wert.

Diese Vorrichtung ermöglicht, daß Druck und Temperatur mehr oder weniger unabhängig kontrolliert werden und Sie erlaubt die Untersuchung von sowohl Temperatur - als auch Druckwirkungen auf die chemische Zusammensetzung und den Partikeleigenschaften der kontaminierten, simulierten, Zapfluft.

Zuvor veröffentlichte Ergebnisse zeigten, dass die optische Partikelerkennung und Größenbestimmung in dieser Anwendung aufgrund der geringen Partikelgröße nicht gut funktioniert (Mann et al 2014).

Außerdem funktionierte ein Kondensations-Partikelzähler auf Wasserbasis nicht gut, vermutlich aufgrund der Schwierigkeit, Wasser auf Ölpartikel zu kondensieren. Es wurde gezeigt, dass ein Rasterbeweglichkeitspartikelgrößensystem (SMPS) und ein aerodynamisches Partikelgrößenbestimmungssystem (APS) gut funktionieren und übereinstimmende Ergebnisse liefern. Zusammen ermöglichen diese Messgeräte die Charakterisierung von Größenverteilungen im Bereich von 10 Nanometer bis 20 Mikrometer. Die gleichen SMPS und APS, die für die BAS-Experimente verwendet wurden, wurden auch für die anderen drei Projekte verwendet. Da die überwiegende Mehrheit der Partikel, die mit einer Ölkontamination nachgewiesen wurden, in einem Größenbereich unterhalb der Leistungsgrenzen des APS lagen,

In diesem Artikel werden nur die SMPS-Daten vorgestellt. Ausführlichere Beschreibungen des BAS-Versuchsaufbaus werden von Mann et al. (2014) und Magoha (2012) bereitgestellt.

---

Der Zapfluft-Simulator BAS ist ein gutes Gerät, mit welchem man einfach, und günstig, kontrollierte Bedingungen zur Bewertung von mit Öl verunreinigter Zapfluft generieren kann.

Aber der Zapfluft-Simulator BAS hat auch Beschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit, mit der er Zapfluft simuliert. Insbesondere verwendet er einen Kolbenkompressor, um die Luft zu komprimieren. Da dieser Kompressor Typ absichtlich gekühlt wird, um den Wirkungsgrad der Kompression zu erhöhen, ist die Temperatur der Luft aus dem Kompressor nicht repräsentativ für die Zapfluft eines Flugzeugs.

Somit wurde eine separate Heizung benötigt.

Flugzeugtriebwerke verwenden Hochgeschwindigkeits - Turbinen Rotorblätter, um die Luft zu komprimieren, und es gibt keine Kühlung dieser Luft im Inneren des Verdichters.

Die für die Aerosolerzeugung verantwortlichen Schermechanismen in einem Hubkolbenverdichter können sehr groß sein, verglichen mit denen eines Turbinenverdichters. Des Weiteren erhöht der BAS-Erhitzer die Temperatur durch einen Wärmeübertragungsprozess, während der Temperaturanstieg für die Zapfluft bei einem Flugzeugs durch die Kompression der Luft entsteht.

Aus diesen Gründen wollte man, die Ergebnisse des Zapfluft-Simulators BAS mit Zapfluft von einem Turbinentriebwerk bestätigen.

Große kommerzielle Flugzeugtriebwerke sind sehr teuer in Beschaffung, Unterhalt und Betrieb, und kamen somit nicht in Frage.

Für diesen Zweck war jedoch ein kleiner Turbowellenmotor verfügbar. Dieser Motor hat eine Nennleistung von 300 PS (220 KW), nutzt sechs Stufen der axialen Kompression und eine Stufe der Zentrifugalkompression.

Dieses Triebwerk wird typischerweise für kleine Hubschrauber sowie für stationäre Anwendungen verwendet. Es wird in diesem Bericht als C-18-Motor bezeichnet.

Das Triebwerk wurde auf einem Prüfstand montiert und wie in **Abbildung 2** gezeigt konfiguriert.

Es war mit einem Dynamometer verbunden, um mit kontrollierbarer Last zu laufen. Die Entlüftungsluft wurde von der Triebwerkszapfluftöffnung abgezogen und durch einen Flugzeugvorkühler geleitet, um so eine Probe entnehmen zu können.

Die gleichen Aerosolisierungsdüsen, die für den BAS verwendet wurden, wurden auch hier verwendet, um einen Öl Nebel zu erzeugen, der in die Motoreinlassluft eingespritzt wurde.

An verschiedenen Probenahmeöffnungen konnte man Luft sowohl vor als auch nach der Öleinspritzung entnehmen. Eine detailliertere Beschreibung der experimentellen Apparatur wird von Roth präsentiert (2015).

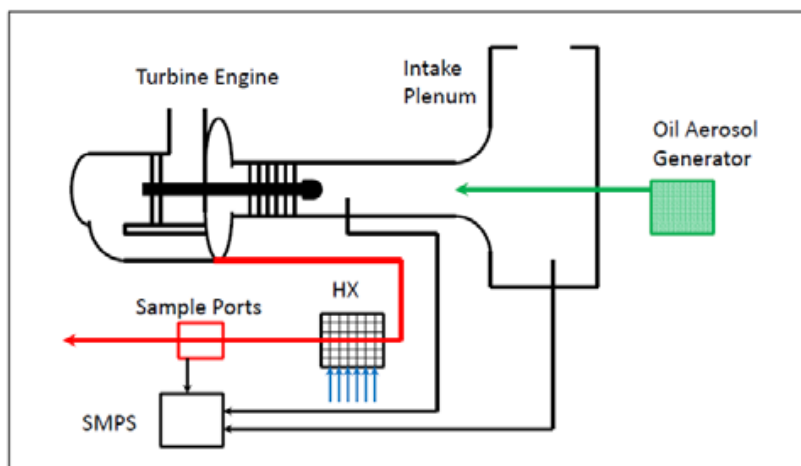


Figure 2. Test stand engine configuration.

Es stellte sich heraus, dass die C-18-Turbine nicht in der Lage war, die für die Untersuchung der Zapfluftverschmutzung notwendigen Drücke und Temperaturen zu erzeugen. Folglich wurde eine leistungsfähigere Version der gleichen Turbine beschafft. Diese Maschine hatte eine Nennleistung von 500 PS (370 KW). Sie wird in diesem Artikel als der C-28B-Turbine bezeichnet. Der Aufbau der C-28B-Turbine ist der gleiche wie jener der C-18-Turbine, außer dass Sie einen einstufigen Zentrifugalkompressor ohne axiale Kompressionsstufen verwendet. Das Triebwerk wurde auf dem gleichen Prüfstand mit dem gleichen Probennahme-Aufbau wie das C-18-Triebwerk montiert. Die C-18- und C-28B-Triebwerksprojekte lieferten sehr nützliche Daten für Ölverschmutzungen in der Zapfluft. Durch den Einsatz von Prüfstands-Triebwerke konnten die Bedingungen kontrolliert, und Experimente für viele Bedingungen durchgeführt werden. Allerdings gab es immer noch die Frage, ob die Ergebnisse repräsentativ für die Kontamination in einer großen Verkehrsflugzeugturbine sind, welche um ein vielfaches größer ist als die C-18-Turbine, und die C-28B-Turbine. Durch zufällige Umstände ergab sich die Möglichkeit, am Programm VIPR (Vehicle Integrated Propulsion Research) der NASA teilzunehmen, um neue Technologien für das Betriebssicherheits-Management zu testen und zu bewerten. VIPR war ein sehr großes Programm, an dem nicht nur die NASA beteiligt war, sondern auch die US Air Force, die FAA und einige private Unternehmen. Experimente wurden an einer Turbine eines Air Force C-17 Transportflugzeugs durchgeführt. Das VIPR-Programm bot die Möglichkeit, Ölverschmutzungsdaten zu sammeln, die andernfalls unerschwinglich teuer gewesen wären. Der Zapfluftaspekt der Experimente war nur ein kleiner Teil des gesamten VIPR Programms. Die Daten wurden am Boden von einer Turbine gesammelt, die an einem einsatzfähigen Flugzeug montiert war. Ein vereinfachtes Diagramm des Versuchsaufbaus wird in **Abbildung 3** gezeigt.

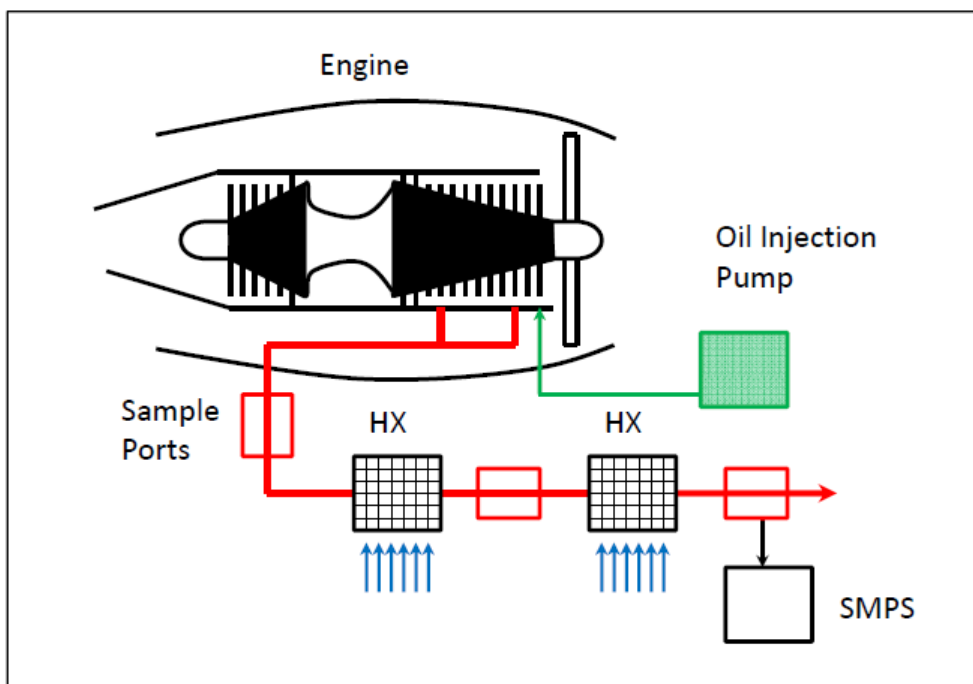


Figure 3. Configuration for VIPR experiments.

Zerstäubtes flüssiges Öl wurde über eine oder mehrere Düsen eingespritzt, welche in einer Wartungsluke nahe der Vorderseite des Verdichters angebracht war.

Es gibt zwei Zapfluftanschlüsse an der Turbine, den Niederdruckanschluss und den Hochdruckanschluss.

Die Turbine und der Zapfluftverteiler wurden so modifiziert, dass der gewählte Zapfluftanschluss ferngesteuert werden konnte. Die Zapfluft wurde zu einem Mess- und Prüfstand auf dem Boden unter der Turbine umgeleitet.

Die Zapfluft wurde in zwei Stufen gekühlt, um eine Probenahme bei verschiedenen Temperaturen zu ermöglichen, die für verschiedene Orte im Zapfluftsystem repräsentativ sind.

Die Zapfluft wurde unter Verwendung von Vorkühlungswärmetauschern für Flugzeugzapfluft gekühlt.

Die Partikel wurden in der letzten Stufe gemessen, in der die Zapfluft auf, für SMPS und APS akzeptable Werte, abgekühlt wurde.

Die Turbine wurde mit einem Leistungspegel betrieben, der dazu bestimmt war, Zapfluftbedingungen zu erzeugen, welche für den Betrieb einer Turbine bei Verkehrsflugzeugen repräsentativ sind.

## EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

In den vier Projekten wurde eine große Menge an Daten gesammelt, und in diesem Dokument werden aus Platzgründen nur repräsentative Ergebnisse präsentiert.

Mit dem BAS wurden Daten gesammelt, indem der Druck konstant gehalten und die Temperatur variiert wurde oder aber es wurde die Temperatur konstant gehalten und der Druck variierte.

**Abbildung 4** zeigt die Ergebnisse für einen typischen Druck von Flugzeugzapflucht.

Es wird beobachtet, dass die Temperatur einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die Größenverteilung als auch auf die Gesamtzahl der Partikel hat.

Es scheint, dass sich der Mechanismus der Partikelbildung um 250°C (480°F) ändert. Es wurde erwartet, dass die ultrafeinen Partikel ansteigen würden, wenn die Temperatur über den Punkt steigt, an dem das Öl zu verkohlen beginnt, etwa bei 280 ° C (530 ° F).

Ob der Anstieg bei den höheren Temperaturen auf diesen Effekt zurückzuführen ist, ist an dieser Stelle rein spekulativ. Die wichtigste Schlussfolgerung aus diesen Daten ist, dass der Großteil der Partikel nach Anzahl weniger als 150 Nanometer Durchmesser hat.

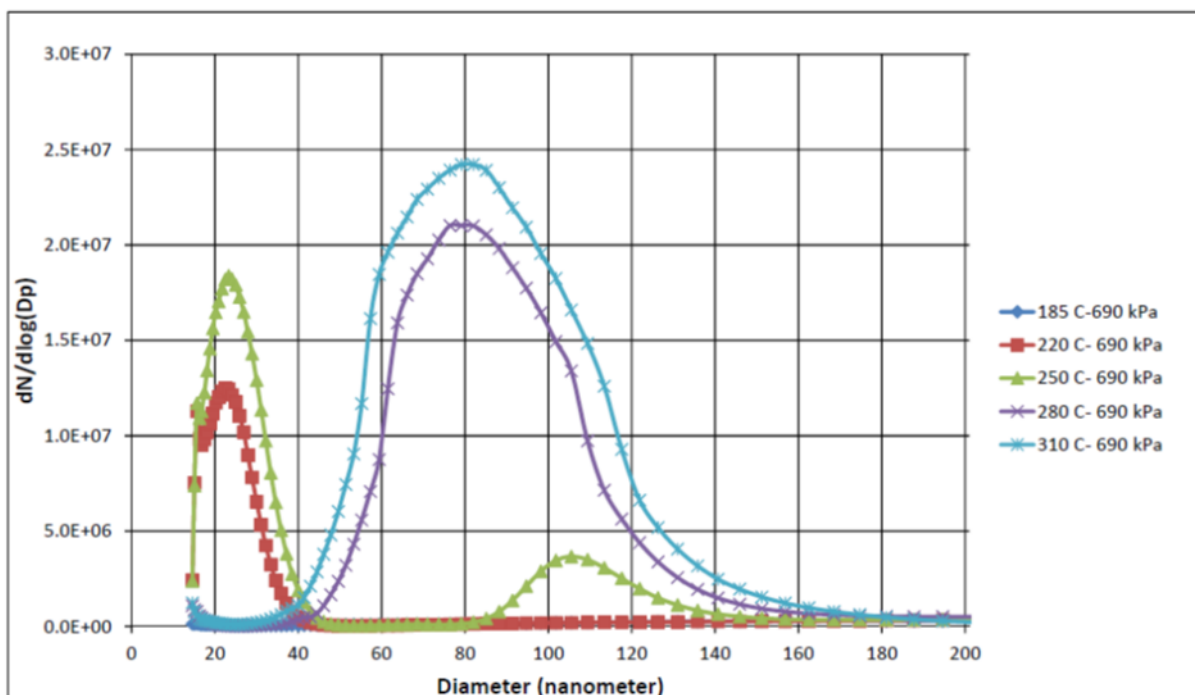


Figure 4. Bleed air simulator results.



**Abbildung 5** zeigt Daten der C-18-Turbine. In gewisser Weise zeigt sich hier ein ähnliches Phänomen wie bei der Auswertung der BAS-Daten.

Das heißt, die Anzahl der vorhandenen Partikel nimmt mit steigender Temperatur stark zu. Es scheint auch, dass sich dieses Phänomen irgendwann ausgleicht und die Konzentration sich trotz weiteren Temperaturerhöhungen nicht mehr viel ändert.

Die Zapflufttemperaturen der C-18-Turbine liegen alle weit unter dem Punkt, an dem eine Verkohlung des Öls zu erwarten wäre.

Die logische Folgerung ist, dass die zunehmende Anzahl von Partikeln mit steigender Temperatur nicht auf die Verkohlung des Öls zurückzuführen ist.

Bei jedem Turbinenmotor sind Temperatur und Druck im Kompressor nicht unabhängig, da beide Variablen zusammen mit der Motordrehzahl zunehmen, was seinerseits zu einer Steigerung der Leistung führt.

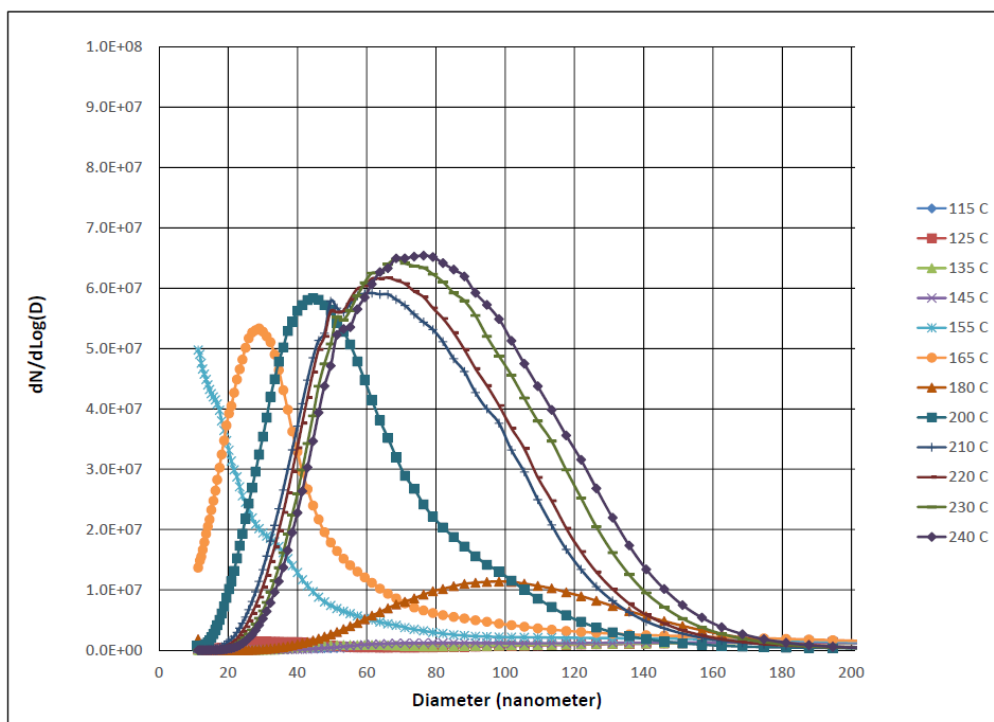


Figure 5. Results from C-18 engine.

**Abbildung 6**, welche die Massenverteilung zeigt, erklärt, warum die Konzentration mit steigender Temperatur oder Drehzahl zunimmt.

Bei niedrigen Geschwindigkeiten befindet sich der Großteil der Masse in den größeren Partikeln und wenn die Geschwindigkeit zunimmt, werden die größeren Partikel offensichtlich in kleinere Partikel geschert. Angesichts der kubischen Beziehung zwischen Masse und Durchmesser und der Größenänderung kann die gleiche Menge an Masse zu einer Zunahme der Teilchenanzahl um einige Größenordnungen führen, wenn sie in die kleineren Teilchen geschert werden. Wie bei den BAS-Daten ist einer der Schlüsselbefunde beim C-18-Motor, dass der Großteil der Partikel nach Anzahl weniger als 150 Nanometer Durchmesser hat.

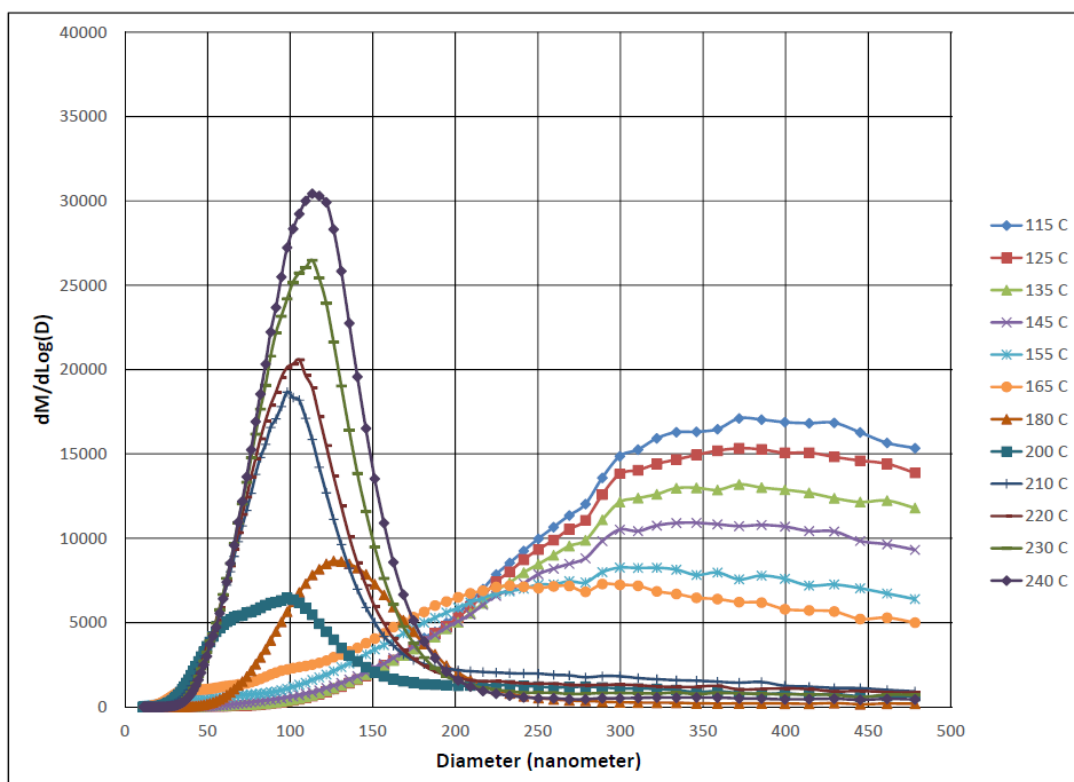


Figure 6. Mass distribution with C-18 engine.

Die C-18-Turbinendaten lieferten nützliche Einblicke in die Beschaffenheit der Teilchen, die in Zapfluft erwartet werden können, und in die Phänomene, bei denen diese sehr kleinen Teilchen erzeugt werden. Aber, die Zapflufttemperaturen, die mit diesem Triebwerk erreicht werden konnten, lagen unter denen, die man bei große Zapfluftsysteme für kommerzielle Flugzeuge erwarten würde und Sie liegen auch unterhalb den Werten, bei denen erwartet wird, dass eine Verkohlung des Öls auftritt. Da es wichtig war, die chemische Beschaffenheit der Zapfluftverunreinigungen unter den erhöhten Temperaturbedingungen zu bestimmen, wurde die C-28B-Version dieser Turbine benutzt, und Daten wurden auf demselben Teststand gesammelt.

Der C-28B-Turbine war in der Lage, Zapfluftdrücke und entsprechende Temperaturbereiche abzudecken, die von den meisten großen Flugzeugtriebwerken zu erwarten sind.

Wie in **Abbildung 7** zu sehen, wurden Temperaturen von bis zu 320°C erreicht. Die Daten der C-28B-Turbine stimmen gut mit dem C-18-Turbine überein und scheinen zu bestätigen, dass weitere Erhöhungen der Geschwindigkeit und der Temperatur wenig Einfluss auf die Größenverteilung der erzeugten Partikel haben.

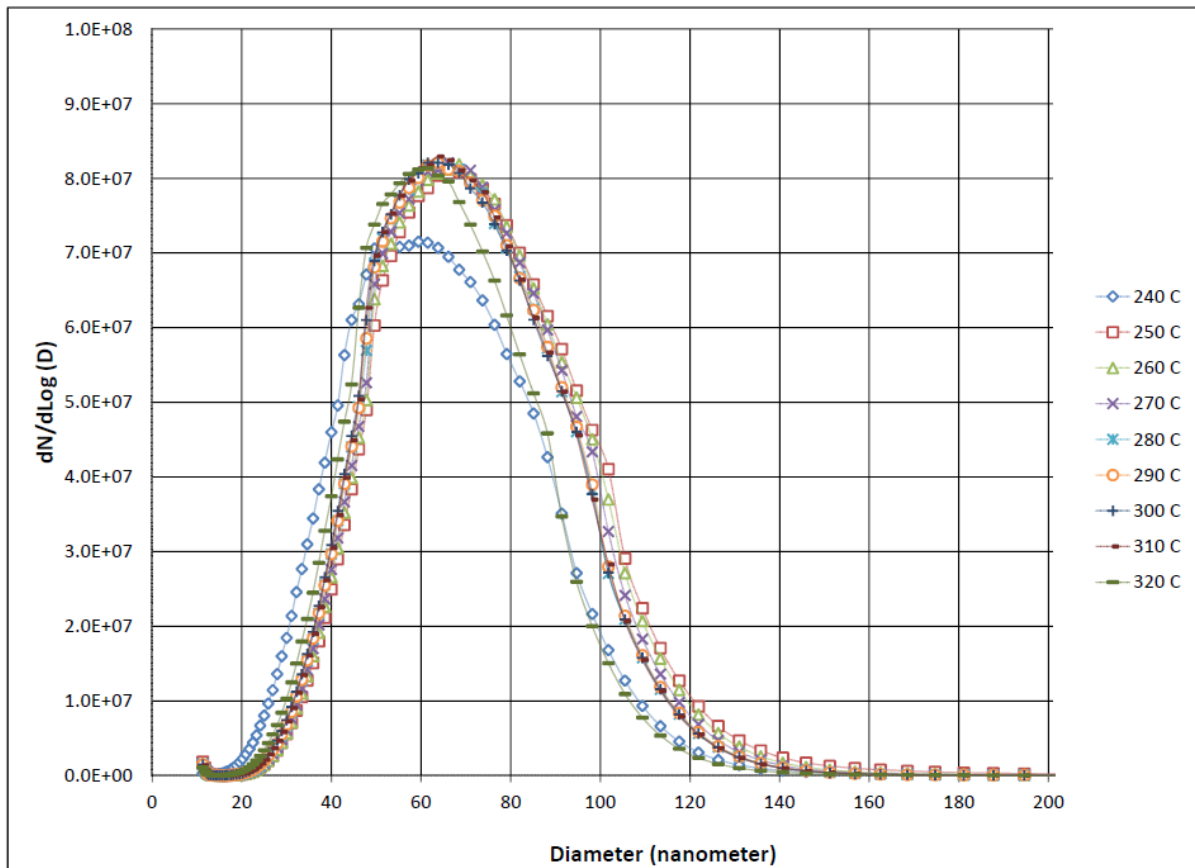


Figure 7. Results from C-28 engine.

Als Teil des experimentellen Verfahrens wurden Tests durchgeführt, um zu bestimmen, wie schnell sich die Partikelgrößenverteilung ändert, nachdem die Öleinspritzung ein- oder ausgeschaltet wurde.

Diese Information wird benötigt, um zu bestimmen, wie viel Zeit benötigt wird, um stabile Messungen mit gleichbleibenden Bedingungen sicherzustellen.

Die Ergebnisse eines dieser Tests sind in **Abbildung 8** dargestellt und liefern weitere Einblicke in die Phänomene der Partikelerzeugung in der Turbine

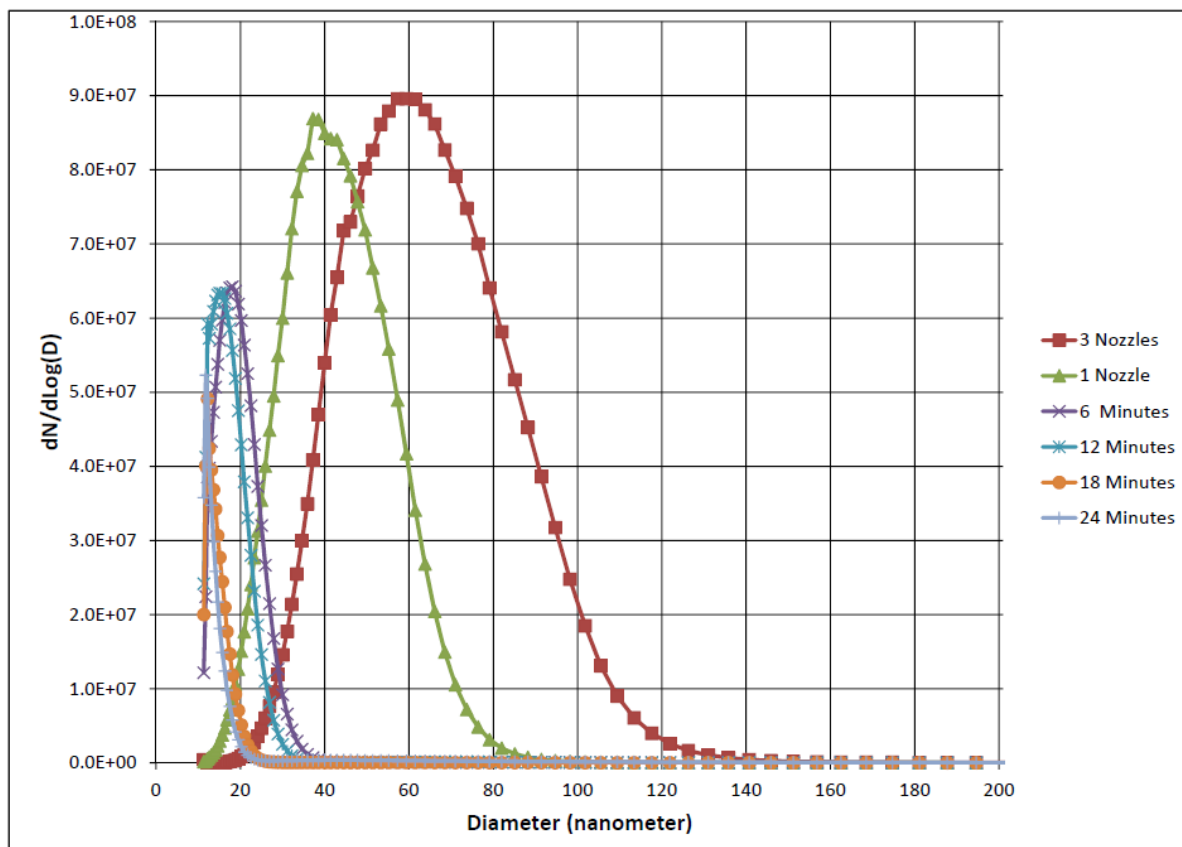


Figure 8. Decay behavior with C-28 engine.

Der Öl-Aerosol-Generator bestand aus einer Reihe von drei identischen Venturi-Aerosolisierungsdüsen und konnte mit einer, zwei oder drei Düsen betrieben werden, welche die benötigten Aerosole erzeugten.

Wenn nicht anders angegeben, waren bei allen Daten, die bei dem BAS, der C-18-Turbine und der C-28B-Turbine gesammelt wurden, immer alle drei Düsen in Betrieb.

Der in **Abbildung 8** gezeigte Test begann mit dem Betrieb aller drei Düsen. Dann wurden zwei Düsen abgeschaltet und es wurde abgewartet bis sich die Bedingungen stabilisierten. Die Peak Konzentration änderte sich von Partikel mit ca. 60 Nanometer auf Partikel mit ca. 40 Nanometer, wobei nur eine geringe Änderung in der Partikelanzahl beobachtet wurde. Die Verringerung der Größe von 60 auf 40 Nanometer ergibt, bei ungefähr gleichbleibender Anzahl von Teilchen, nur noch 1/3 der Masse.

Nachdem die Einzeldüsen-Daten gesammelt wurden, wurden alle Düsen ausgeschaltet und ein Größen-Scan wurde alle sechs Minuten für 24 Minuten durchgeführt.

Unerwarteter Weise nahm die Anzahl der Partikel ab. Interessanterweise nahm auch die Partikelgröße ab, aber die Abnahme der vorhandenen Masse war mehr von der Größenabnahme bestimmt, als von der Anzahlabnahme.

Die C-18-Daten und die C-28B-Daten führen zu der Hypothese, dass bei den meisten, uns interessierenden Leistungspegeln, die große Mehrheit der Öl Tröpfchen nicht durch den Verdichter strömt, ohne auf der Oberfläche innerhalb des Verdichters aufzutreffen. Diese auftreffenden Tröpfchen bilden einen Ölfilm auf der Oberfläche und neue Tröpfchen werden von diesem Film abgeschert.

Je dicker der Film ist, desto größer sind die Tröpfchen, die von dem Film abgeschert wurden. Somit sind die Tröpfchen bei den höheren Einspritzraten größer und werden fortschreitend

kleiner, wenn die Öleinspritzung stoppt, und sich der Film verbraucht. Wenn diese Hypothese zutrifft, hat dieses Phänomen wichtige Konsequenzen für das Erfassen von Ölkontaminationen in der Zapfluft.

Selbst bei, von der Masse her, geringen Kontaminationsraten, ist eine große Anzahl von Partikeln zu erwarten. Da diese aber sehr klein sind, möglicherweise 10 Nanometer und weniger, wäre es sehr wichtig diese erfassen zu können, um auch geringe Kontaminationsraten nachzuweisen.

Daten, die von den VIPR-Experimenten gesammelt wurden, werden in **Abbildung 9** gezeigt. Diese Daten wurden unter gleichbleibenden Betriebsbedingungen gesammelt. Hierbei war die Turbine auf einen Leistungspegel eingestellt, der dafür geeignet war, Zapfluftbedingungen zu liefern, wie sie unter Flug-Bedingungen repräsentativ sind.

Das SMPS benötigt ungefähr 2 Minuten, um Daten zu sammeln und um die Größenverteilung festzustellen.

Die Kurven in dieser Figur stammen von aufeinanderfolgenden Messungen.

Es ist ersichtlich, dass die Bedingungen ziemlich stabil waren, somit wurden auch ähnliche Daten erwartet. Obwohl diese Daten etwas langweilig sind, sind sie vielleicht die wichtigsten aller präsentierten Daten, da sie an einem tatsächlichen großen Flugzeugtriebwerk gesammelt wurden, das bei typischen Flugbedingungen betrieben wird. In der Tat, die Triebwerke der Air Force C-17 sind im Wesentlichen die gleichen Triebwerke wie die einer Boeing-757.

Es ist beruhigend zu sehen, dass die Daten, die mit diesem Großen Triebwerk gesammelt wurden, sehr gut mit den Daten übereinstimmen, die mit den Prüfstands-Turbinen gesammelt wurden.

Nicht nur sind die Partikelgrößenverteilungen nahezu gleich, auch die Anzahlkonzentration ist ungefähr gleich. Diese Übereinstimmung der Ergebnisse gibt die Sicherheit, dass die Daten, welche auf dem Prüfstand ermittelt wurden, insbesondere bei der C-28B-Turbine, repräsentativ für große Flugzeuge sind.

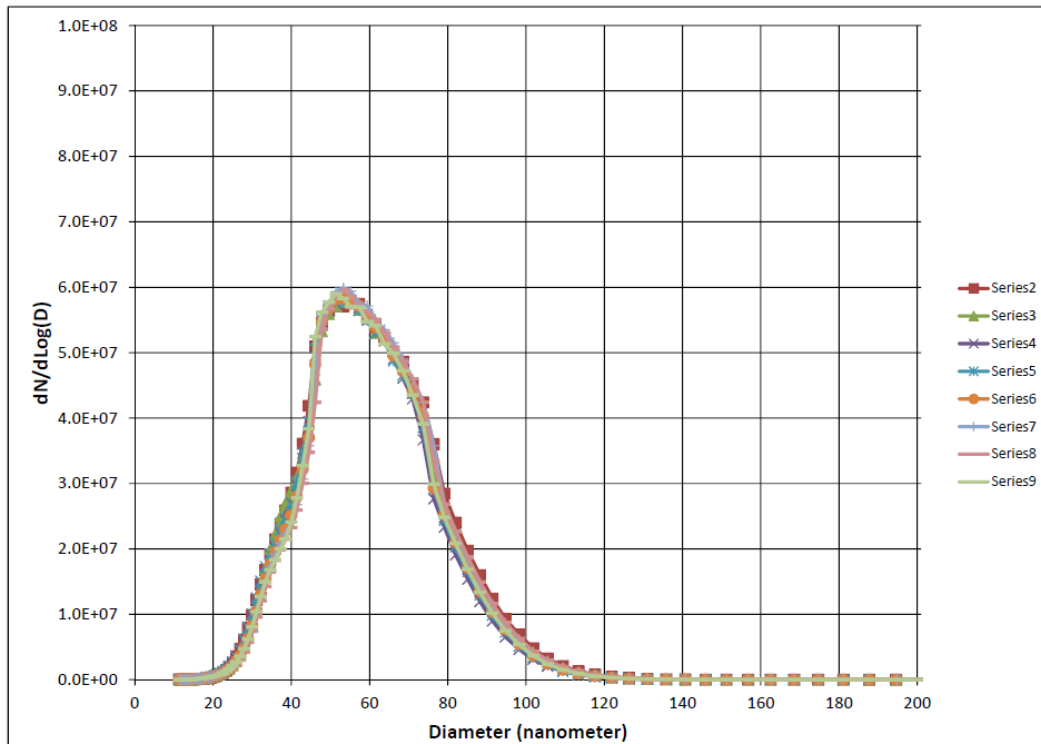


Figure 9. Results from VIPR experiments.

Eine wichtige Überlegung für die Erkennung von Ölkontaminationen ist, wie diese Partikelkonzentrationen mit Hintergrundkonzentrationen ohne Öleinspritzung verglichen werden.

Die Gesamtpartikelkonzentration für die in **Abbildung 9** gezeigten Daten beträgt ungefähr  $2 \times 10^7$  Teilchen /  $\text{cm}^3$ . Im Vergleich dazu wurde die Gesamtpartikelkonzentration in der Umgebungsluft gemessen. Dort betrug diese zum Zeitpunkt der Experimente etwa  $1 \cdot 10^4$  Teilchen /  $\text{cm}^3$  und die Konzentration in der Zapfluft ohne Ölinjektion betrug etwa  $1 \cdot 10^3$  Teilchen /  $\text{cm}^3$ .

Somit waren die Konzentrationen, die gemessen wurden, wenn die Ölkontamination vorhanden war, ungefähr vier Größenordnungen größer als wenn die Ölkontamination nicht vorhanden wären.

Es war auf den ersten Blick etwas überraschend, dass die Anzahl von Partikeln in der Zapfluft niedriger war, als die in der Umgebungsluft.

Die Partikel in der Umgebungsluft waren jedoch viel größer als diejenigen, die in der Zapfluft zu sehen waren, und sie bestehen höchstwahrscheinlich aus Feststoffen, nicht aus Flüssigkeit. Es ist wahrscheinlich, dass sie auf Oberflächen im Verdichter auftreffen oder widrigenfalls gar nicht bis zum Zapfluftanschluss gelangen.

Die VIPR-Experimente wurden auf der Edwards Air Force Base in einem trockenen Seebett in der Mohave High Desert durchgeführt.

Außer vielleicht von etwas Staub aus dem Seebett, ist die Luft sauber und frei von industriellen Verunreinigungen.

Außerdem wurde der VIPR-Testturbine vor Beginn der VIPR-Experimente vollständig überholt und befand sich vermutlich in einem Top-Betriebszustand ohne Dichtungslecks.

Die Partikelgesamtkonzentrationen ohne Öl in der Zapfluft waren bei den C-28B- und C-18-Turbinen nicht so niedrig wie bei der VIPR-Turbine.

Der Teststand für die C-28B- und C-18-Turbinen befand sich in einem Industriepark und die Konfiguration war derart, dass ein erneutes Mitreißen der Motorabgase nicht vollständig vermieden werden konnte.

Messungen im belüfteten Testraum mit der C-18-Turbine zeigten, dass sich die Partikelkonzentration im Testraum beim Betrieb der Turbine schon vor der Öleinspritzung um mehrere Größenordnungen erhöhte, im Vergleich zu den Umgebungskonzentrationen vor dem Betrieb der Turbine.

Nichtsdestoweniger waren die Gesamtpartikelkonzentrationen in der Zapfluft mit Öleinspritzung immer noch um ein bis zwei Größenordnungen größer als die Werte mit laufender Turbine, aber ohne Öleinspritzung.

## **SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN**

Aus diesen Experimenten wird deutlich, dass eine Ölkontamination zu einer großen Anzahl von Partikeln in der Zapfluft führt.

Darüber hinaus ist das Verhältnis von Signal zum Hintergrundrauschen des Messgerätes sehr hoch und macht die Partikelerkennung zu einer vielversprechenden Methode für Erkennung von Ölverschmutzungen in der Zapfluft.

Aus diesen Experimenten wird auch deutlich, dass die erzeugten Teilchen sehr klein sind, wahrscheinlich hat ein Großteil der Partikel einen Durchmesser von 50 bis 70 Nanometern, welche auch den Hauptteil der Ölkontamination ausmachen. Die gesammelten Daten stammen von vier sehr verschiedene Systeme.

Der BAS verwendete einen Kolbenverdichter und eine Heizung, um simulierte Zapfluftbedingungen zu erzeugen.

Die C-18 Turbine hatte einen Kompressor mit 6 axialen Stufen und einer Zentrifugalstufe.

Der C-28B-Turbine hatte eine einzelne Zentrifugalstufe.

Der VIPR-Motor hatte einen Rotor und einen zweiteiligen Verdichter mit mehreren axialen Stufen in jedem Teil.

Angesichts der Tatsache, dass diese verschiedenen Systeme ähnliche Ergebnisse lieferten, ist die Zuverlässigkeit der Daten repräsentativ für Flugzeugturbinen im Allgemeinen, aber Sie sind nicht einzigartig für eine bestimmte Marke und ein bestimmtes Modell einer Turbine oder einer Turbinenkonstruktion.

Es ist wichtig, Ölkontaminationen während akuter Ereignisse zu erkennen, und diese Daten weisen darauf hin, dass es kein Problem geben sollte, Verunreinigungen durch Partikel zu erkennen, die während dieser Ereignisse vorhanden sind.

Das Erkennen von chronischen Leckagen mit sehr geringen Ölverlust ist sehr wichtig, um eine längere Exposition zu vermeiden, und um eine sich entwickelnde Fehlfunktion zu erkennen, bevor eine kritische Flugsituation entsteht.

Die hier beschriebenen Experimente zielen nicht spezifisch auf diese Kontamination mit geringer Konzentration ab. Es wurden jedoch einige nützliche Erkenntnisse gewonnen. Es scheint, dass die Partikelzahlen selbst bei geringeren Kontaminationsniveaus immer noch groß sind, aber die Partikelgröße wird, mit Absinken der Kontaminationsraten, zunehmend

kleiner, möglicherweise im Bereich von 10-20 Nanometer und sogar kleiner. Daher erfordert das Detektieren niedriger Kontaminationsniveaus unter Verwendung von Partikeln wahrscheinlich Sensoren, die diese sehr kleinen Partikel detektieren können.

Das SMPS-System, das zur Erfassung der Daten zur Partikelgrößenverteilung und Partikelkonzentration verwendet wurde, funktionierte gut.

Es ist jedoch eine Laborausstattung, die teuer ist, stabile Betriebsbedingungen erfordert und einen sachkundigen Wissenschaftler benötigt, um die Ausrüstung zu betreiben und um die Daten zu verarbeiten und zu interpretieren.

Daher ist das SMPS-System kein Kandidat für die Routine-Überwachung von Zapfluft auf Ölverschmutzung während des Fluges.

Nun, da die Beschaffenheit der Partikel, die aus der Kontamination von Zapfluft resultieren, bestimmt wurde, wird empfohlen, Untersuchungen durchzuführen, um eine kostengünstige, robuste und zuverlässige Sensortechnologie zu finden, die in der Flugzeugflotte zur Erkennung von Ölkontaminationen eingesetzt werden kann.

Die Anforderung, ultrafeine Partikel nachzuweisen, beschränkt die Technologie, die möglicherweise anwendbar ist. Ein Kondensationspartikelzähler (Condensation Particle Counter, CPC) ist das Partikelmessgerät im SMPS und kann Partikel in dem interessierenden Größenbereich eindeutig detektieren. Es wären jedoch erhebliche Änderungen erforderlich, um CPCs zur Verfügung zu stellen, die für die routinemäßige Flugzeugüberwachung geeignet sind.

Eine weitere vielversprechende Technologie ist die Ionisations-basierte Partikelerkennung, die weit verbreitet ist und in handelsüblichen Rauchmelder verwendet wird.

Diese Technologie ist effektiv beim Detektieren von Partikeln in dem Größenbereich von Interesse und ist einfach und zuverlässig.

## **Danksagung**

Diese Forschung wurde zum Teil vom Büro für Luft- und Raumfahrtmedizin der US-amerikanischen Luftfahrtbehörde (FAA) durch das nationale Kompetenzzentrum für Lufttransport für Forschung im intermodalen Transportumfeld finanziert.

Diese Unterstützung wird dankbar angenommen. Die Veröffentlichung dieser Informationen bedeutet keine Billigung der Ergebnisse durch die FAA oder Schlussfolgerungen.

Die Zusammenarbeit und Unterstützung der NASA und der Air Force während der VIPR-Experimente und die Einbeziehung der Bleed-Air-Experimente in das VIPR-Programm werden sehr geschätzt.

Die Vorrichtungen zur Messung der Zapfluft des VIPR-Prüfstandes wurde von Boeing entwickelt und gebaut, und Boeing leitete das VIPR-Zapfluft-Forschungsteam.

Das Öleinspritzsystem für den VIPR Motor wurde entworfen, gebaut und betrieben von der Auburn Universität.



## REFERENCES

- ASHRAE. 2013. ANSI/ASHRAE Standard 161-2013, *Air Quality Within Commercial Aircraft*, ASHRAE.
- Eckels, S., Jones, B., Mann, G., Mohan, K., Weisel, C. 2014, Aircraft Recirculation Filter for Air-Quality and Incident Assessment, *Journal of Aircraft*, Vol. 51, No. 1, pp. 320-326.
- Lebbin, P. 2013, Review of Canadian flight deck and cabin smoke and fire incidents, 2001–10, *SAE Intl J Aerospace* , 6: 286–298.
- Magoha, P.W. 2012, Incident-Response Monitoring Technologies for Aircraft Cabin Air Quality, Ph.D. Thesis, Kansas State University.
- Mann, G.W., Eckels, S.J., Jones, B.W., 2014. Analysis of particulate size distribution and concentrations from simulated jet engine bleed air incidents, *HVAC&R Research*, 20:7, 780-789.
- National Research Council. 2002, *The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew*, National Academy Press.
- Roth, J.W. 2015, Bleed Air Contamination Particulate Characterization, M.S. Thesis, Kansas State University.
- Shehadi, M., Jones, B., Hosni, M. 2015a, Bleed air contamination financial related costs on board commercial flights, *SAE International Journal of Aerospace*, 8(2): 2015 doi:10.4271/2015-01-9007.
- Shehadi, M., Jones, B. Hosni, M., 2015b, Characterization of the frequency and nature of bleed air contamination events in commercial aircraft.” *Indoor Air*, doi:10.1111/ina.12211.