



Technische  
Universität  
Braunschweig



**IFAS** Institut für Flugantriebe  
und Strömungsmaschinen

---

Bachelorarbeit

# Analyse der Entstehungsmechanismen von Ölnebel in Flugzeugkabinen

Viola Voth

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Friedrichs  
Betreuerin: Dipl.-Ing. Melanie Achmus



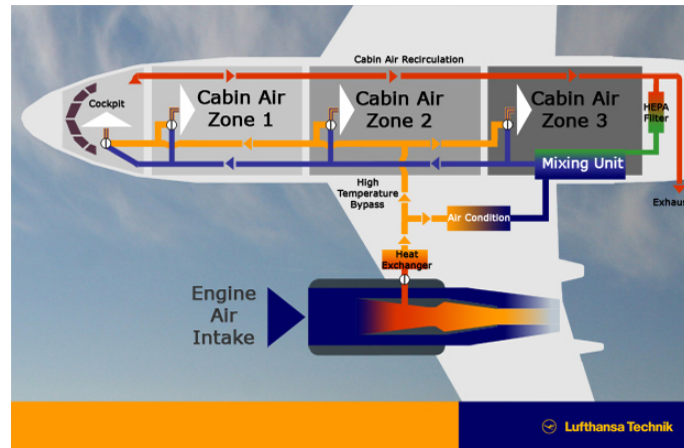


**Bachelorarbeit**  
**für Viola Voth**

**Analyse der Entstehungsmechanismen von Ölnebel in  
Flugzeugkabinen**

Die Bereitstellung der Kabinenluft moderner Flugzeuge wird durch die Entnahme von Zapfluft aus dem Verdichter realisiert. Die Luft wird auf einem hohen Druck- und Temperaturniveau in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters abgezapft und anschließend, wie in Abbildung 1 dargestellt, von Wärmetauschern auf etwa 200 Grad Celsius vorgekühlt. Die heiße Luft wird der Klimaanlage zugeführt, in der sie auf ein für den Menschen angenehmes Niveau abgekühlt wird. Anschließend wird sie in eine Mischkammer geleitet, in der bereits genutzte Umluft aus der Kabine mit der Frischluft in einem bestimmten Verhältnis gemischt und wieder in die Flugzeugkabine geleitet wird. Die Tatsache, dass die Kabinenluft aus dem Verdichter des Flugtriebwerks entnommen wird, dessen Komponenten teilweise ölgeschmiert sind, führt dazu, dass im Passagierraum in seltenen Fällen Ölgeruch oder gar Ölnebel wahrgenommen werden. Diese Vorfälle werden als Fume Events bezeichnet.

Es stellt sich die Frage, wie es möglich sein kann, dass Ölnebel über die Zapfluft in die Passagierkabine gelangt und wann dies der Fall ist. Dieser Fragestellung soll im Rahmen dieser Arbeit nachgegangen werden. Hierzu ist es zum einen nötig, das System der Kabinenbelüftung zu betrachten und den Weg der abgezapften Luft bis in die Kabine im Detail zu verfolgen und zu klären, welche Leckagemechanismen das Vermischen der Zapfluft mit dem Öl ermöglichen. Zum anderen muss der Begriff des Ölnebels genauer definiert werden. Woraus besteht dieser Nebel und wie kann er entstehen? Zudem soll erörtert werden, welche Vorkehrungen in Form von Filtern oder Partikeldetektoren in aktuellen Flugzeugen ergriffen werden um Fume Events zu verhindern oder zu detektieren.



**Abbildung 0.1.:** Schematische Darstellung der Zirkulation der Kabinenluft in Passagierflugzeugen [Lufthansa Technik]

Folgende Aufgabenteile sind im Einzelnen zu bearbeiten:

1. Ausführliche Literaturrecherche zum Thema Ölnebel und Luftversorgung in Flugzeugkabinen
2. Darstellung des Aufbaus von Kabinenbelüftungssystemen
3. Analyse der Ölleckagemechanismen in Flugtriebwerken, Herausstellen der Wege, über die Ölnebel in Kabine gelangen kann sowie Analyse typischer Flugzustände, bei denen derartige Ereignisse auftreten
4. Beschreibung und Analyse der Zusammensetzung und Entstehung von Ölnebel
5. Analyse und Diskussion von verfügbaren Vermeidungsmaßnahmen
6. Schriftliche Zusammenfassung der gesammelten Informationen und Ergebnisse in einem Bericht

#### Literatur:

1. Scholz, D. *Aircraft Cabin Air and Engine Oil - An Engineering View*, Cabin Air Conference 2017
2. Jones, B.W. *The Nature of Particulates in Aircraft Bleed Air Resulting from Oil Contamination*, ASHRAE, 2017
3. Magoha, P.W. *Incident-Response Monitoring Technologies for Aircraft-Cabin Air Quality*, Dissertation, 2012

---

*Anmerkungen:*

Der Bearbeitungsumfang und die Bearbeitungsdauer dieser Arbeit richten sich nach der zurzeit gültigen Bachelor-Prüfungsordnung für den Studiengang Maschinenbau an der Technischen Universität Braunschweig. Eine Veränderung der Aufgabenstellung bleibt den Prüfenden vorbehalten. Kurz vor oder nach Abgabe der schriftlichen Ausarbeitung sind die Ergebnisse der Arbeit den Prüfenden in einem Vortrag zu präsentieren. Termin nach Vereinbarung (innerhalb von 2 Wochen vor bzw. nach Abgabe). Drei Exemplare der Arbeit bleiben Eigentum des Instituts. Die Arbeit ist zusätzlich in digitaler Form (PDF-Dateiformat) abzugeben. Der Verkehr mit dritten Personen oder mit Firmen über den Gegenstand der Arbeit ist nur mit Genehmigung des Unterzeichners gestattet. Übernommene Textstellen, Diagramme, Abbildungen, Zahlenwerte u.ä. sind mit vollständiger Quellenangabe zu versehen. Es sind die „Hinweise für die Anfertigung von studentischen Arbeiten am IFAS“ zu beachten.

*Weitere Vereinbarungen zwischen Student und Institut:*

Soweit mir das Institut zur Durchführung meiner Studien-/ Abschlussarbeit instituts-eigenes - ausdrücklich als vertraulich bezeichnetes Know-how zur Verfügung stellt (u.a. auch Zeichnungen, Berechnungen, Software), verpflichte ich mich mit meiner Unterschrift, dieses Know-how als vertraulich zu behandeln. Eine Veröffentlichung und/ oder Verwertung des Gegenstandes meiner Arbeit werde ich, soweit das genannte Know-how betroffen ist, nur im Rahmen einer vorherigen schriftlichen Vereinbarung mit dem Institut vornehmen.

Die mir zur Durchführung meiner Arbeit überlassenen Arbeitsmittel (einschließlich Schlüssel) werde ich nur zweckentsprechend nutzen und nach Beendigung der Arbeit umgehend ordnungsgemäß zurückgeben. Insbesondere verpflichte ich mich, bei den Tätigkeiten, die ich im Institut ausführe, mir von der am Institut vorhandenen Software keine Kopien zum privaten Gebrauch zu ziehen, generell Kopien nur in Übereinstimmung mit den Lizenzbedingungen des Herstellers anzufertigen und die gesetzlichen Bestimmungen zum Urrechtsschutz zu beachten. Darüber hinaus werde ich keine Daten die mir im Rahmen meiner Arbeit zugänglich gemacht wurden auf privaten Datenträgern speichern.

Mir ist bekannt, dass die von mir abzugebende Arbeit und ggf. weitere Exemplare üblicherweise in der Institutsbibliothek bzw. Universitätsbibliothek eingestellt werden und damit öffentlich zugänglich sind. Bei berechtigtem Interesse (z.B. Patentanmeldung) wird das Institut, wenn ich zuvor rechtzeitig einen schriftlichen Antrag stelle, die erste Veröffentlichung meiner Arbeit bis zu einem mit dem Institut noch zu vereinbarenden Zeitpunkt zurückstellen. Soweit dies in einem Ausnahmefall nicht möglich sein sollte, wird mir dies vom Institut unverzüglich mit einer entsprechenden Begründung schriftlich mitgeteilt.

Ich räume der Universität an den Ergebnissen meiner Arbeit ein einfaches Nutzungsrecht für Forschung und Lehre ein. In diesem Zusammenhang erkläre ich mich bereit, alle im Rahmen meiner Arbeit erstellten Unterlagen, Materialien, Laboruntersuchungen und Zwischenergebnisse - soweit diese zum Verständnis und zur Nachvollziehbarkeit meiner Arbeit erforderlich sind - sowie Software und Software-Listings, einschließlich des Quellcodes, dem Institut zur Einsicht und zur Anfertigung eine Kopie zur Verfügung zu stellen.

---

Bei einer Verwertung meiner Arbeitsergebnisse im urheberrechtlichen Sinne (z.B. Verbreitung, Vervielfältigung, Weiterentwicklung) werde ich, soweit ich nicht ausdrücklich darauf verzichte, durch Nennung meines Namens als Urheber bezeichnet.

Braunschweig, den 04. April 2018

---

Prof. Dr.-Ing. J. Friedrichs

---

Unterschrift Student(in)

Ausgabe am: 12. April 2018

Rückgabe am: 12. Juli 2018

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Viola Voth, geb. am 19.12.1996, an Eides statt, die vorliegende Studienarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Braunschweig, 12.Juli 2018





## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie Öldampf über die Frischluft in die Flugzeugkabine gelangen kann. Die Frischluft wird im Verdichter des Triebwerks entnommen und über Wärmeübertrager und Klimaanlage auf eine für den Menschen geeignete Umgebungsbedingung gebracht. Die für die Aufbereitung der Frischluft notwendigen Komponenten, wie Precooler, Klimapacks, Kabinenbelüftung, Filtersysteme und Schmierölkreislaufsystem, werden in dieser Arbeit im Hinblick auf den technischen Aufbau und die Funktionsweise erläutert. Darüber hinaus werden das Dichtungssystem der Triebwerkslager mit Sperrluft sowie der chemische Aufbau des Schmieröls betrachtet. Im Ergebnis kommt die Arbeit zu dem Schluss, dass für die Kontamination der Frischluft mit Schmieröl das Triebwerkslager verantwortlich ist. Dies ist bedingt durch die Konstruktion des Lagers sowie die verschiedenen Betriebsbedingungen während der unterschiedlichen Flugphasen im Haupttriebwerk und der APU. Es treten also konstruktionsbedingt immer kleine Mengen an Schmieröl aus. Durch mechanischen Verschleiß oder ein umgekehrtes Druckgefälle kann sich diese Menge erhöhen und so zu einem Fume Event führen. Abschließend werden Maßnahmen zur Detektion bzw. zur Verminderung bzw. Vermeidung von Öldämpfen in der Kabine aufgezeigt, wie zapflufffreie Frischluftsysteme, Filtersysteme und Monitoring-Systeme.



## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the issue, how oil vapor can reach the aircraft cabin via fresh air. The outside air is taken from the compressor of the engine and via heat exchanger and air conditioner is brought to a suitable quality for human environment. In this thesis the necessary components for the processing of the outside air, such as the precooler, air conditioning, cabin ventilation, filter systems, and lubricant oil system, are examined at the level of technical structure and operation. Furthermore the sealing air sealant system of the engine bearings as well as the chemical composition of the lubricating oil are examined. As a result, this thesis concludes that the engine bearing is responsible for the contamination of the cabin air with lubricating oil. This is due to the design of the bearings as well as the different operating conditions during various in-flight phases in main engine and APU. Due to their design, small quantities of lubricating oil always escape. Mechanical wear or an inverted pressure gradient can increase this amount and therefore lead to a fume event. Finally measures of detection, reduction, or avoidance of oil vapors in cabin air are examined, such as bleed-air free fresh air systems, filter systems, and monitoring modalities.



# Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meiner Betreuerin, Dip.-Ing. Melanie Achmus, für die tolle und engagierte Betreuung bedanken.

Bei Prof. em. Helmut Ringsdorf möchte ich mich für das persönliche Gespräch über die Schmierölszusammensetzung im Ölsystem in Mainz bedanken.

Ein weiteres Dankeschön gilt Dipl.-Ing. Fabian Ahrendts vom Thermodynamik-Institut der TU Braunschweig, der mir die Prozesse in den Klimapacks erläutert hat.

Danken möchte ich des Weiteren Prof. Dieter Scholz von der HAW Hamburg für das informative Gespräch und Prof. Johannes Ludwig für seine hilfreichen Links.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>v</b>
<b>Nomenklaturverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xx</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Ursachen für Fume Events . . . . .	3
<b>2. Die Kabinenluft</b>	<b>5</b>
<b>3. Bereitstellung der Kabinenluft</b>	<b>7</b>
3.1. Zapfluftsysteem . . . . .	9
3.2. Kabinenbelüftungssystem . . . . .	15
3.3. Filtersysteme . . . . .	17
<b>4. Lagerung der Triebwerkskomponenten</b>	<b>25</b>
4.1. Aufbau eines Triebwerkslagers . . . . .	26
4.2. Das Dichtungssystem der Lagerkammern . . . . .	28
4.3. Das Schmierölsystem . . . . .	31
4.4. Das Schmieröl . . . . .	35
<b>5. Entstehung von Öldämpfen in der Flugzeugkabine</b>	<b>41</b>
5.1. Wie gelangt Ölnebel aus den Lagern in die Kabinenluft? . . . . .	41
5.2. Ursachen für Öldampf in der Kabine während der Flugphase . . . . .	44
5.3. Entstehung von Ölkontaminationen durch die APU . . . . .	53
5.4. Analyse typischer Flugphasen, bei denen Fume Events aufgetreten sind . . . . .	55
5.5. Berechnung des Ölanteils in der Kabinenluft . . . . .	57
<b>6. Kontaminierte Kabinenluft: Studienlage</b>	<b>61</b>
<b>7. Maßnahmen gegen Öldämpfe in der Flugzeugkabine</b>	<b>67</b>
7.1. Alternativen zum Zapfluftsysteem . . . . .	67
7.2. Monitoringsystem zur Überwachung der Luftqualität . . . . .	72
7.3. Filtersysteme . . . . .	73
7.4. Messung des Druckgefälles . . . . .	76
7.5. Messung des Spaltabstandes der Öldichtung . . . . .	76
7.6. Sensoren vor der Mischkammer . . . . .	76
<b>8. Zusammenfassung</b>	<b>77</b>
<b>9. Fazit und Ausblick</b>	<b>79</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>89</b>
A.1. Gesamtdarstellung der Kabinenbelüftung . . . . .	89

A.2. Mögliche Schmierölkontaminationen . . . . .	91
A.3. Statistik zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen . . . . .	93
A.4. Studien zur Luftqualität in Flugzeugen . . . . .	93



# Nomenklaturverzeichnis

## Lateinische Formelzeichen

$A_{Fan}$	Luftansaugfläche des Fans	$m^2$
$D_{Fan}$	Fan-Laufschaukel Außendurchmesser	m
$h_{Reiseflug}$	Reisehöhe des Flugzeuges	km
$m_{Kabine}$	Schmierölmasse in der Kabine	g
$n_{Lager, Einfluss}$	Betrachtete Lageranzahl	-
$n_{Lager}$	Anzahl der Lager im Triebwerk	-
$\dot{V}_{Kabine}$	Frischluf-Volumenstrom in die Kabine	$m^3/s$
$v_{Reiseflug}$	Geschwindigkeit des Flugzeuges	m/s
$x_{Lager, Einfluss}$	Verhältnis Lageranzahl	-

## Griechische Formelzeichen

$\mu$	Bypassverhältnis	-
$\rho_{Schmieröl}$	Dichte des Schmieröls	$kg/m^3$

## Abkürzungen

ANA	1-Naphthylamin
APU	Auxiliary Power Unit
BFU	Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung
BNA	$\beta$ - Naphthalinamin
CO	Kohlenmonoxid
CS	Certification Specifications
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DODPA	Diocetyldiphenylamin
DOPCP	Diorthocresylphosphat
EASA	European Aviation Safety Agency

ECS	Environmental climate system
EU	Europäische Union
HD	Hochdruck
HEPA	High efficiency particulate air
MOPCP	Monoorthocresylphosphat
ND	Niederdruck
OZC	Ozonen-Katalysator
PAN	N-phenyl- $\alpha$ -Naphthylamin
PBN	Phenyl- $\beta$ -Naphthylamin
PE	Pentaerythritol
TBP	Tributylphosphat
TCP	Tricresylphosphat
TMP	Trimethylolpropan
VOC	Flüchtige organische Verbindung
VOZC	VOC/Ozonen-Katalysator

# Abbildungsverzeichnis

0.1. Schematische Darstellung der Zirkulation der Kabinenluft in Passagierflugzeugen [Lufthansa Technik] . . . . .	ii
1.1. Gemeldete Vorfälle mit Rauch, Geruch und gesundheitlichen Beeinträchtigungen in den Jahren 2006 bis 2013 [14] . . . . .	1
1.2. Technische Ursachen der gemeldeten Fume Events im Zeitraum von 2006 bis 2013 [14] . . . . .	3
3.1. Übersicht über die Zapfluftverteilung . . . . .	8
3.2. Übersicht über die einzelnen Komponenten und den einströmenden und ausströmenden Luftmassenstrom eines Turbinen-Strahltriebwerks mit eingezeichneter Zapfluftentnahme [79], bearbeitet mit Paint . . . . .	9
3.3. Schematische Darstellung der Zapfluftentnahmestelle im Hochdruckverdichter [55], bearbeitet mit Paint . . . . .	10
3.4. Darstellung der Zapfluftentnahme über den Precooler bis zu den Klimapacks	11
3.5. Schematische Darstellung eines Kreuzstromwärmeübertragers [48], bearbeitet mit Paint . . . . .	12
3.6. Schaubild über den Verlauf der Zapfluft in den Klimapacks, mit Daten aus [74], [77] . . . . .	13
3.7. Klimapacks des A320 [52] . . . . .	15
3.8. Aufbau der Luftversorgung für die Flugzeugkabine [74], bearbeitet mit Paint	16
3.9. Schematischer Aufbau der Kabinenbelüftung [74] . . . . .	17
3.10. Platzierung der einzelnen Filtersysteme im Überblick . . . . .	18
3.11. Prinzipskizze der einzelnen Filterwirkweisen [15], bearbeitet mit Paint . . .	19
3.12. Aufbau eines Filterelementes [83], bearbeitet mit Paint . . . . .	20
3.13. Aufbau eines kombinierten Filtersystems mit integriertem HEPA- und Aktivkohlefilter [25], bearbeitet mit Paint . . . . .	22
3.14. Aufbau und Funktion eines Ozonenkatalysators [4], bearbeitet mit Paint .	23
4.1. Schematische Darstellung der drei Wellen mit ihren jeweiligen Lagerungen	25
4.2. Schematische Darstellung der drei Wellen im Trent 972 mit ihren jeweiligen Lagerungen [8], bearbeitet mit Paint . . . . .	26
4.3. Schematischer Aufbau der Luft- und Schmierölkammer [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	27
4.4. Aufbau der Luft- und Schmierölkammer sowie der Wellensysteme des vierten und fünften Lagers im Triebwerk [35], bearbeitet mit Paint . . . . .	27
4.5. Schematischer Aufbau der Luft- und Schmierölkammer [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	28
4.6. Strömungsverlauf der Sperrluft in einer Labyrinthdichtung [61], bearbeitet mit Paint . . . . .	30
4.7. Aufbau einer Labyrinthdichtung im Triebwerk [61], bearbeitet mit Paint . .	30
4.8. Aufbau einer Karbondichtung [61], bearbeitet mit Paint . . . . .	31
4.9. Darstellung des Schmierölweges im Bevorratungssystem . . . . .	32
4.10. Prinzip des Entlüftungssystems . . . . .	33
4.11. Rücktransport des Schmieröls aus den Lagersümpfen in den Schmieröltank	34
4.12. Chemischer Aufbau von N-Phenyl- $\alpha$ -Naphthylamin (PAN) . . . . .	37
4.13. Chemischer Aufbau des TCP Moleküls [70] . . . . .	38

4.14.	Schematische Darstellung der Wechselwirkung des TCP Moleküls mit der Welle . . . . .	39
4.15.	Aufbau der Schutzschicht der TCP Moleküle zwischen den Wellensystemen und den Kugellagern . . . . .	40
5.1.	Weg des Ölnebels aus der Schmierölkammer in die Flugzeugkabine . . . . .	42
5.2.	Verlauf der Luft durch das Triebwerk CFM56-7B bei dichten Lagern [54], bearbeitet mit Paint . . . . .	42
5.3.	Verlauf der Luft durch das Triebwerk CFM56-7B bei undichten Lagern [54], bearbeitet mit Paint . . . . .	43
5.4.	Funktionsprinzip des Daltonschen Gesetzes . . . . .	45
5.5.	Leckagemassenstrom des Ölnebels aus der Schmierölkammer in die Luftkammer [35], bearbeitet mit Paint . . . . .	46
5.6.	Spaltabstand zwischen den Rotorblättern und Gehäuse während der Beschleunigung und Abbremsung eines Triebwerks [47], bearbeitet mit Paint .	47
5.7.	Qualitativer Verlauf des Spaltabstandes der Labyrinthdichtung [47], [35], bearbeitet mit Paint . . . . .	48
5.8.	Druck- und Temperatureinfluss auf die Karbondichtung [61] . . . . .	50
5.9.	Lagerung der Welle in den Klimapacks (Air Cycle Machine) [63], bearbeitet mit Visio . . . . .	51
5.10.	Druckverhältnisse bei einer fehlerhaften Öldruckpumpe im Schmierölsystem [75], bearbeitet mit Paint und Visio . . . . .	52
5.11.	Prinzipskizze der APU mit den einzelnen Komponenten [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	53
5.12.	Querschnitt der APU [75] . . . . .	55
5.13.	Übersicht über das Auftreten von Ölkontaminationen nach Flugphasen in den Jahren 2006 bis 2013 in deutschen Flugzeugen [14], bearbeitet mit Paint	56
5.14.	Vergleich mehrerer Studien zum Auftreten von Hydrokarbonverbindungen während des Fluges [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	59
6.1.	VOC-Gehalt im Blut von Fume Events Patienten (links) und einer nicht geflogenen Kontrollgruppe (rechts) [40] . . . . .	63
6.2.	VOC-Gehalt im Blut von Patienten innerhalb der ersten 24h nach einem Fume Events (links) im Vergleich zu dem VOC-Gehalt im Blut nach einigen Tagen (rechts) [40] . . . . .	64
6.3.	Auftretende Symptome nach einem Fume Event [40], bearbeitet mit Paint	64
6.4.	Gemeldete Symptome von Piloten nach einem Fume Event [14] . . . . .	65
7.1.	Vergleich der Kabinenbelüftungssysteme . . . . .	68
7.2.	Subsysteme, die bei der B787 mit Strom betrieben werden, statt mit Zapfluft [33], bearbeitet mit Paint . . . . .	69
7.3.	Prinzipskizze der B787: Luftversorgung für Passagiere und Crew [78], bearbeitet mit Paint . . . . .	70
7.4.	Entnahmestelle der Kabinenluft bei einer B787 [49], bearbeitet mit Paint .	71
7.5.	Filtersysteme in den aktuellen Kurzstreckenflugzeugen (links) und Langstreckenflugzeugen (rechts) [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	74
7.6.	Filtersysteme, die in Zukunft während eines Fume Events eine Schmierölkontamination in der Flugzeugkabine deutlich vermindern würden [75], bearbeitet mit Paint . . . . .	75
A.1.	Symptome, die unter „Parästhesien“ zusammengefasst werden und nach einem Fume Event von Dr. Heutelbeck diagnostiziert worden sind [22] . . .	93
A.2.	Symptome, die unter „Kognitive Einschränkungen“ zusammengefasst werden und nach einem Fume Event von Dr. Heutelbeck diagnostiziert worden sind [22] . . . . .	93

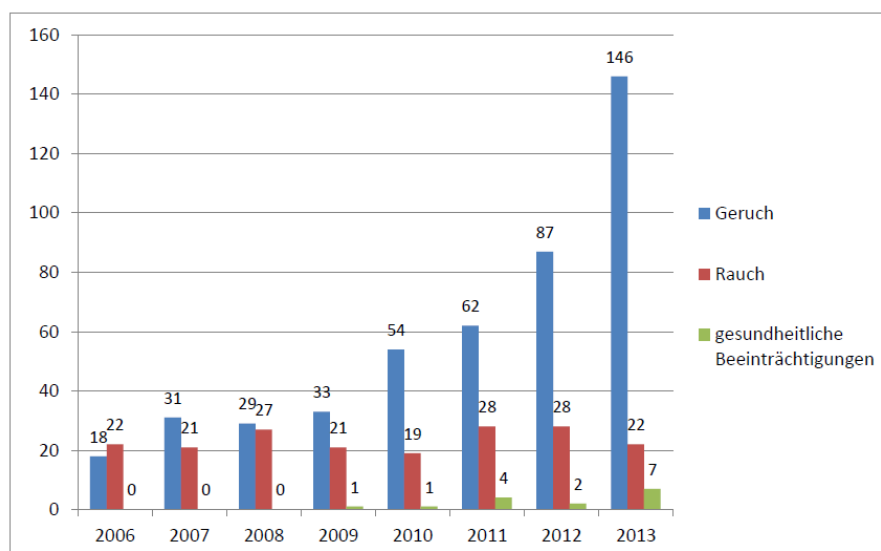
# Tabellenverzeichnis

A.1. Luftqualität in Flugzeugen [60] . . . . .	94
--	----



# 1. Einleitung

Die Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU) fasst Ereignisse, bei denen im Cockpit oder in der Flugzeugkabine Geruch, Rauch oder Nebel auftreten, unter dem Begriff „Fume Events“ zusammen und nimmt Meldungen solcher Vorfälle auf. Dabei werden auch Ereignisse ohne Rauch- oder Geruchsentwicklung berücksichtigt, bei denen sich bestimmte Beschwerden wie zum Beispiel Unwohlsein, Kopfschmerzen, Benommenheit, Händezittern oder Ähnliches bemerkbar machen [14]. Bei den 663 Fume Events, die im Zeitraum von 2006 bis 2013 im Rahmen einer BFU-Studie betrachtet worden sind, wurde in 460 Fällen eine Geruchs- und in 188 Fällen eine Rauchentwicklung gemeldet. In 15 Fällen gab es gesundheitliche Beschwerden, die nicht durch Rauch und Geruch verursacht, jedoch den Fume Events zugeschrieben wurden. Abbildung 1.1 zeigt die gemeldeten Vorfälle der Jahre 2006 bis 2013 [14].



**Abbildung 1.1.:** Gemeldete Vorfälle mit Rauch, Geruch und gesundheitlichen Beeinträchtigungen in den Jahren 2006 bis 2013 [14]

Auffällig ist die innerhalb von 7 Jahren stetig steigende Anzahl der Meldungen pro Jahr. Diese Zunahme ist möglicherweise auf die zunehmende Sensibilisierung von Crewmitgliedern und Passagieren zurückzuführen, denn Fume Events werden seit 1953 beobachtet,

seit die ersten Flugzeuge ihre Kabinenluft über die Zapfluft gewinnen [1]. Zu erwähnen ist, dass gesundheitliche Beschwerden von Vielfliegern wie der Kabinenbesatzung 105 Mal, von Piloten 66 Mal, von Fluggästen hingegen nur 21 Mal gemeldet wurden [14].

Im Ergebnis kommt die Studie der BFU zu der Schlussfolgerung, dass die Kabinenluft durch Fume Events verunreinigt werden kann und dies bei Besatzung und Passagieren zum Teil zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen und einer Minderung der Arbeitsleistung geführt hat [14].

Insgesamt kam es bei 29 der 663 Fume Events zu einer schweren Störung, die eine Benutzung der Sauerstoffmasken im Cockpit notwendig machte. Als eine schwere Störung wird ein Ereignis definiert, bei dem sich fast ein Unfall ereignet hätte, bzw. eines der folgenden Kriterien festgestellt wurde: Rauch oder Feuer im Flugzeug; Benutzung der Sauerstoffmasken; Ausfall eines Besatzungsmitgliedes [14]. Bei der Untersuchung dieser schweren Störungen konnte die BFU in 2 Fällen zweifelsfrei Ölleckagen als Ursache für die Fume Events feststellen [14]. Dies ist insofern relevant, da bislang keine Messungen der Luftqualität während des Fluges vorgenommen werden, die z.B. eine Verunreinigung der Kabinenluft durch Ölleckagen anzeigen würden. Die fehlende Dokumentation der Luftqualität erschwert die einwandfreie Feststellung von Fume Events und macht das Thema zum Politikum: Während Airlinebetreiber die Existenz von Öldampf in der Kabinenluft anzweifeln, spricht beispielsweise die Gewerkschaft der Piloten, Cockpit, von einer Gesundheitsgefährdung [82]. Es stellt sich die Frage, ob und wenn ja, wie es möglich ist, dass Ölnebel in die Fluggastkabine gelangt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der Entstehungsmechanismen von Öldampf in Flugzeugkabinen, die durch Ölleckagen im Hydrauliksystem oder der Auxiliary Power Unit (APU) entstehen können. Dabei werden zunächst die formalen Anforderungen an die Kabinenluft sowie die Vorschriften der Zulassungsbehörden an die Luftqualität erläutert. In einem weiteren Schritt wird der technische Ablauf der Luftversorgung eines einwandfrei funktionierenden Flugzeugs beschrieben. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Lagerung der Triebwerkskomponenten wie des Verdichters, der Turbine sowie des Fans. Hier stehen vor allem die reibungsarme Lagerung und Kühlung im Vordergrund. Dann wird die Frage behandelt, wie in seltenen Fällen Öldämpfe oder Ölgerüche in die Kabine gelangen können. Hier wird eine Unterscheidung zwischen dem Auftreten von Öldämpfen bzw. Ölgerüchen während des Fluges bzw. am Boden getroffen. Im Anschluss werden die Auswirkungen von Öldampf kontaminierter Kabinenluft anhand verschiedener Studien betrachtet, um abschließend Alternativen zum Zapfluftsystem vorzustellen.



## 1.1. Ursachen für Fume Events

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Fume Events, die durch Ölkontaminationen infolge einer Ölleckage entstehen. Der Vollständigkeit halber werden in Abbildung 1.2 alle in der BFU-Studie aufgeführten Ursachen für das Auftreten von Fume Events genannt.

System	Anzahl	Beispiele
APU	24	Öl, Enteisungsflüssigkeit
Avionik	13	Lüfter
Brand	9	
ECS	23	Lüfter
Elektr. Systeme	33	Lüfter, andere Bauteile
Elektr. Systeme der Kabine	21	Lampen
externe Verunreinigungen	11	Trockeneis, Zigaretten, Passagiergepäck
Kaffeemaschine	11	Verschmutzungen / defekt
Öfen	24	Verschmutzungen oder Fremdkörper
Systemfehler	9	Undichtigkeiten von Hydraulik- oder Kraftstoffleitungen
eingebrachte technische Stoffe	8	Kleber, Enteisungsflüssigkeit
Triebwerk	13	
Triebwerk - Kompressor waschen	11	
Triebwerk - Ölüberfüllung	3	
Triebwerk - Vogelschlag	10	
Sonstiges	5	nicht einer der o.g. Gruppen zuzuordnen
nicht festgestellt	42	
unbekannt	386	
keine	3	

**Abbildung 1.2.:** Technische Ursachen der gemeldeten Fume Events im Zeitraum von 2006 bis 2013 [14]

In 9 Fällen war eine undichte Leitung mit Hydraulikflüssigkeit oder Kraftstoff als Ursache für ein Fume Event festgestellt worden. Durch diese Undichtigkeit konnte Flüssigkeit aus der jeweiligen Leitung austreten und in die Flugzeugkabine gelangen. Menschen können auf die Inhaltstoffe dieser Flüssigkeiten unter anderem mit Übelkeit, Kopfschmerzen, Verwirrheitszuständen, Halluzinationen bis hin zur Bewusstlosigkeit reagieren [13].

Auch Enteisungsflüssigkeiten, die bei niedrigen Temperaturen auf das Flugzeug gesprüht werden, um die Tragflächen und Triebwerke zu enteisen, können durch die APU oder die Triebwerke in die Kabinenluft gelangen und Fume Events verursachen. Weitere Ursachen für Fume Events können technische Defekte an der APU oder an den elektrischen Systemen in der Kabine, wie z.B. in der Galley, sein [14].

Bei insgesamt 431 Meldungen wurde eine technische Ursache für die Fume Events „nicht festgestellt“ (n=42), war „unbekannt“ (n=368) oder wurde mit „keine“ (n=3) angegeben. Diese Fälle wurden nicht weiter untersucht. Hier ist zu fragen, ob nicht Öldampf aus dem Zapfluftsysteem für einen Teil dieser Rauch- oder Geruchsereignisse verantwortlich sein könnte.



## 2. Die Kabinenluft

Das EU-Parlament formuliert in der Verordnung Nr. 216/2008 für die Kabinenluft in Passagierflugzeugen: „Die Fluggasträume müssen für die Fluggäste angemessene Beförderungsbedingungen und einen ausreichenden Schutz vor allen erwarteten Gefahren im Flugbetrieb oder bei Notfallsituationen einschließlich Feuer, Rauch und giftige Gase sowie Gefahren aufgrund eines plötzlichen Druckabfalls schaffen.“ Dies bedeutet bezüglich der Kabinenluft, dass diese frei von giftigen Gasen und Rauch sein muss. Als exekutives Organ des EU-Parlamentes ist die European Aviation Safety Agency (EASA) auf Grundlage der EU-Verordnung 1592/2002, inzwischen ersetzt durch die Verordnung Nr. 216/2008, im Jahr 2002 gegründet worden. Sie wird kontrolliert vom Europäischen Parlament und ist zuständig für die Zulassung und Überwachung von Großflugzeugen in der EU [27]. Die EASA erlässt Bau- und Zulassungsrichtlinien, die in den Certification Specification, kurz CS-25, festgehalten werden. Die Anforderungen an die Qualität der Kabinenluft ist in insgesamt drei Richtlinien, CS 25.831, CS 25.832 und CS 25.841 festgelegt worden. In der CS 25.831 heißt es, dass die Kabinenluft frei von schädlichen oder gefährlichen Gasen oder Dämpfen sein muss.

Zu den Grenzwerten der Kabinenluft finden sich in den drei Spezifikationen folgende Angaben:

- Der Frischluftanteil muss mindestens  $0,28 \text{ m}^3/\text{min}$  pro Person betragen
- Der Kohlenmonoxid Anteil in der Kabine muss niedriger als 5 ppm sein
- Der Kohlendioxid Anteil in der Kabine muss kleiner als 0,5 % pro Volumen sein
- Der Ozongehalt ( $\text{O}_3$ ) in der Kabine darf oberhalb einer Flugfläche von 320 ( $\sim 9758$  ft) niedriger als 0,25 ppm und während eines 3 h Fluges oberhalb einer Flugfläche von 270 ( $\sim 8243$  ft) niedriger als 0,1 ppm sein
- Der Kabinendruck muss höher als 0,75 bar sein. Dies entspricht einer maximalen Höhe von 2438 m ( $\sim 8000$  ft)

Zusätzlich zur vorgeschriebenen sauberen Luft, muss ein Flugzeug nach der CS 25.1309 mit Monitoren und Sensoren ausgestattet sein, um bei unsicheren Betriebsbedingungen oder einem Ausfall von einzelnen Systemen den Piloten ein Warnhinweis geben zu können. Dies bedeutet, dass bei einem Ausfall oder einer Störung des Kabinenklimateuerungssystems die Crewmitglieder gewarnt werden.

Derzeit wird die Kabine hinsichtlich des Luftdrucks überwacht, wie es in der EU-Verordnung Nr.216/2008 vorgesehen ist. Der Frischluftanteil, Kohlenmonoxid- und Kohlendioxid sowie der Ozongehalt der Kabinenluft werden nicht gemessen [34].

### 3. Bereitstellung der Kabinenluft

Die Reiseflughöhe von Passagierflugzeugen liegt zwischen 11 und 15 km. In diesen Höhen besitzt die Umgebungsluft eine Temperatur von  $\sim -57$  °C und einen von der Höhe abhängigen Druck, welcher auf 11 km Höhe  $\sim 0,23$  bar beträgt und auf 15 km Höhe auf  $\sim 0,12$  bar abfällt [38]. Aufgrund dieser Umgebungsbedingungen ist eine permanente Luftversorgung für Crew und Passagiere unabdingbar. Die Luftversorgung ist technisch komplex und erfolgt über die Triebwerke.

Die Triebwerke sind also sowohl für die Bereitstellung von Schub als auch für die Luft- und Energieversorgung zuständig. Die Außenluft wird über den Fan und den Verdichter aus der Umgebung angesaugt und dann im Fan sowie dem Nieder- und Hochdruckverdichter komprimiert. Durch diesen Vorgang steigt der Druck und die Temperatur. Die heiße, komprimierte Luft gelangt dann in die Brennkammer, in der Brennstoff (Kerosin) hinzugemischt und verbrannt wird. Durch die Verbrennung dehnt sich das Brennstoff-Luft-Gemisch aus. Durch diese Expansion wird die entstandene Energie in der Turbine in eine Wellenbewegung umgesetzt. Die Turbine und der Verdichter sind je nach Triebwerk auf einer, zwei oder drei verschiedenen Wellen montiert, wobei die Turbine durch ihre Wellenrotation den Verdichter antreibt. Ein Viertel der Turbinenleistung wird typischerweise in der Schubdüse in kinetische Energie umgewandelt und sorgt so für den Schub und die Fortbewegung des Flugzeuges. Etwa drei Viertel der erzeugten Leistung wird für den Antrieb des Verdichters und der Hilfsaggregate (wie z.B. das Bordnetz) genutzt [8], [20].

Die meisten Hilfsaggregate werden durch die komprimierte Luft aus dem Verdichter versorgt. Aus dem Luftstrom, der vom Verdichter durch das Triebwerk befördert wird, werden bis zu 25 % entnommen. Diese Luft wird als Zapfluft bzw. Sekundärluft bezeichnet und übernimmt entweder eine Abdichtungs-, Kühlungs- oder Belüftungsfunktion [61]. Diese beinhaltet unter anderem:

- die Kühlung von Lagerkammern und Triebwerkskomponenten
- die Ölkühlung und Ölabdichtung

- die Kontrolle der Spaltabstände zwischen Verdichter- und Turbinenschaufeln zum Gehäuse
- den Vereisungsschutz der Flugzeugflügel
- die Verhinderung von Beschlägen an den Fenstern
- die Druckversorgung des Hydrauliksystems
- die Ventilation der Luft in der Druckkabine
- die Temperaturregelung und Druckregelung in der Kabine [61], [76], [74]

Knapp 80 % der entnommenen Zapfluft werden nach dem Gebrauch für die einzelnen Flugzeugsysteme wieder in den Hauptluftstrom zurückgeführt. Die restlichen 20 % werden für die Luftversorgung in der Flugzeugkabine (2 – 8 %) und den Vereisungsschutz (12 – 18 %) der Flügel genutzt, und werden nach dem Gebrauch nicht in den Hauptluftstrom zurückgeführt, siehe Abbildung 3.1 [60], [61]. Die für den Vereisungsschutz genutzte Zapfluft wird über Ventile in die Umgebung abgegeben. Die verbrauchte Kabinenluft wird zu ~50 % aufbereitet und dem System wieder zurückgeführt (Rezirkulation). Die anderen ~ 50% werden über Ventile in die Umgebung abgegeben [61]. Da eine Reduzierung der Zapfluft um 1 % eine Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauches (SFC= specific fuel consumption) um 0,4 % bewirkt, ist das Bestreben groß, die abgesaugte Zapfluftmenge zu minimieren, indem der rezirkulierende Luftmassenstrom maximiert wird [16], [61]. Durch die Minimierung wird die Leistung und Effizienz des Triebwerks gesteigert [61].

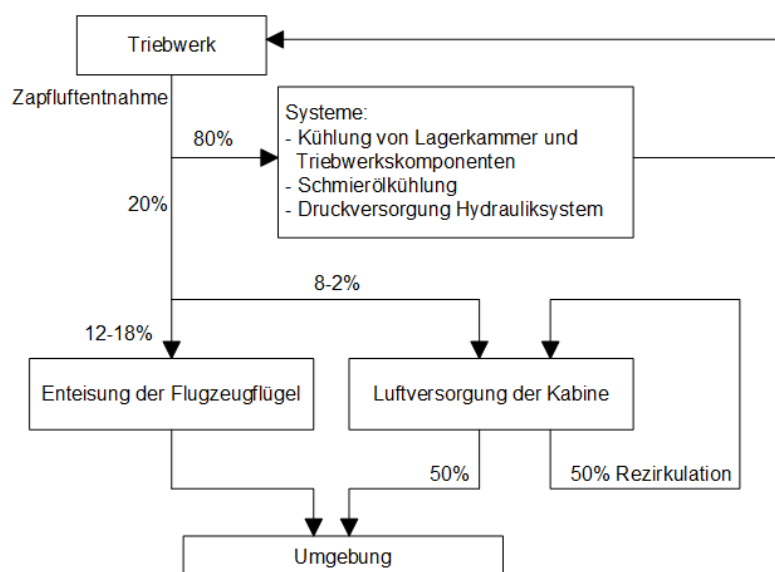
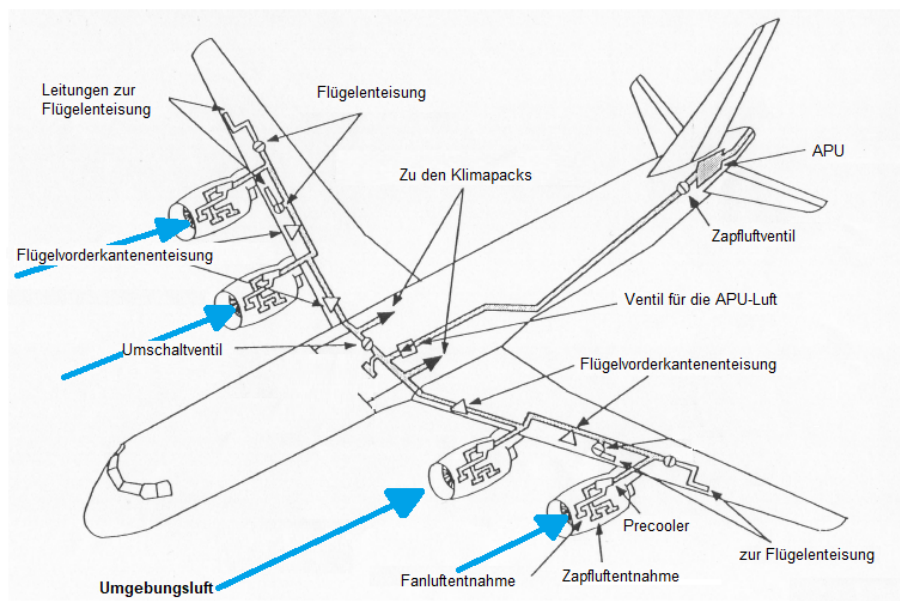


Abbildung 3.1.: Übersicht über die Zapfluftverteilung

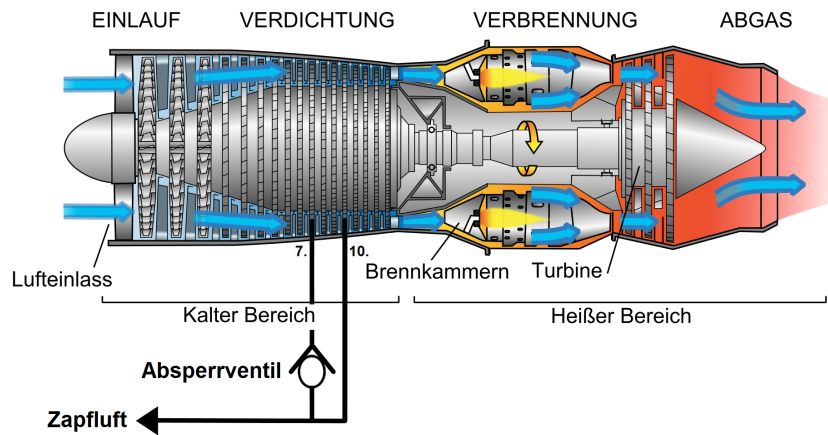
Die Luftversorgung der Flugzeugkabine ist in Abbildung 3.2 vereinfacht dargestellt. Umgebungsluft wird in die Triebwerke und anschließend in das Flugzeuginnere gesogen und über verschiedene Systeme auf für den Fluggast angenehme  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $0,75\text{ bar}$  aufbereitet. Die so aufbereitete Zapfluft gelangt über Leitungen in die Flugzeugkabine, wo sie Crew und Passagiere mit frischer Luft versorgt. Die mit Kohlendioxid angereicherte, verbrauchte Luft wird dann über Ventile auf der Unterseite der Kabine entweder erneut aufbereitet oder nach außen abgegeben. In den folgenden Unterkapiteln werden das Zapfluftsystem, das Kabinenbelüftungssystem und die Aufbereitung der Kabinenluft in der Rezirkulation näher erläutert. Eine Gesamtdarstellung der Kabinenbelüftung findet sich im Anhang A.1.



**Abbildung 3.2.:** Übersicht über die einzelnen Komponenten und den einströmenden und ausströmenden Luftmassenstrom eines Turbinen-Strahltriebwerks mit eingezeichneter Zapfluftentnahme [79], bearbeitet mit Paint

## 3.1. Zapfluftsystem

Für die Luftversorgung in der Kabine wird komprimierte Zapfluft aus dem Hochdruckverdichter (HD-Verdichter) entnommen. Dieser Zapfluftanteil beträgt zwischen  $2 - 8\%$  des Verdichter-Luftmassenstroms [60]. Je nach Triebwerksdrehzahl wird die Zapfluft dem Verdichter entweder bei einer niedrigen Stufe (Niederdruckverdichter) oder einer höheren Stufe im Hochdruckverdichter entnommen. Die Entnahmestufe im HD-Verdichter ist dabei abhängig vom Triebwerkstyp. Beim IAE V2500, das unter anderem im A320 verbaut ist, wird die Zapfluft für die Kabinenluft nach der 7. bzw. 10. Verdichterstufe entnommen.



**Abbildung 3.3.:** Schematische Darstellung der Zapfluentnahmestelle im Hochdruckverdichter [55], bearbeitet mit Paint

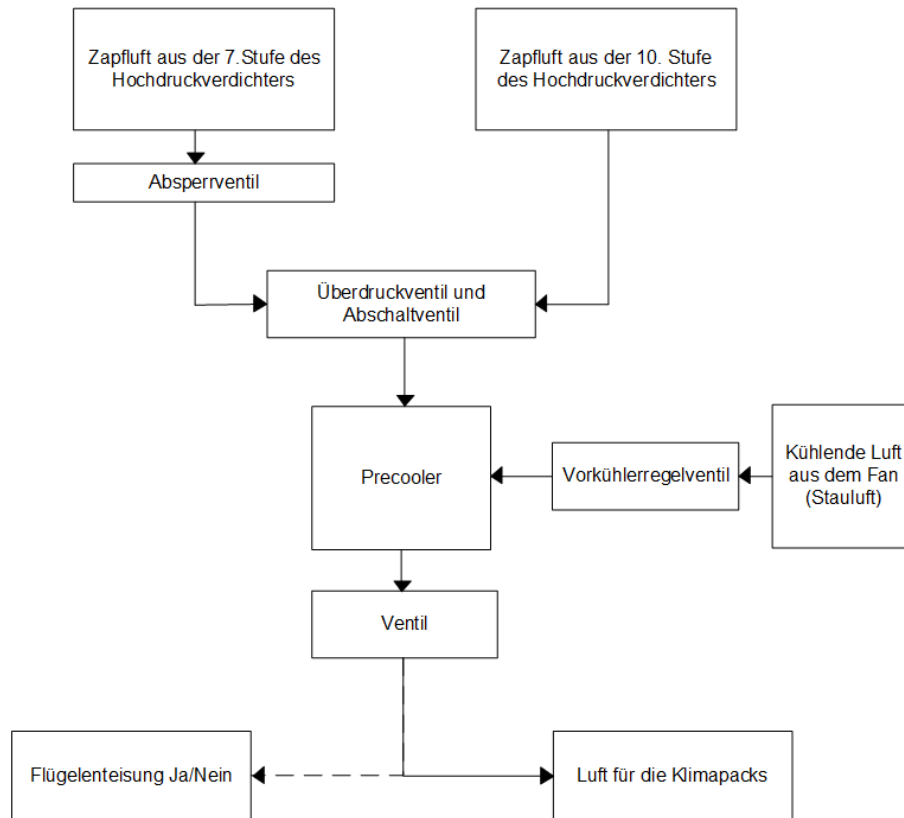
Beim GE CF6-80C2, welches im A300-600 und im A310 verbaut ist, wird die Zapfluffür die Kabinenluft aus der 8. und 14. HD-Verdichterstufe entnommen [8].

Die folgende Erläuterung des Zapfluffentnahmesystems für die Bereitstellung der Kabinenluft wird am Beispiel der V2500 vorgenommen. Bei hoher Drehzahl wird die Zapfluffür der 7. Verdichterstufe und bei niedriger Drehzahl der 10. Verdichterstufe entnommen. Falls die Zapfluffür aus der 10. Stufe entnommen wird, wird durch den hohen Druck ein Absperrventil geschlossen, um ein Rückströmen in den Verdichter über die 7. Stufe zu verhindern, siehe Abbildung 3.3 und 3.4 [8].

Nach der Zapfluffentnahme aus dem Hochdruckverdichter passiert die Luft ein Überdruckventil, das die Zapfluffür auf einen Druck von 3,1 bar begrenzt [8]. Zusätzlich ist an dieser Stelle ein Abschaltventil verbaut, das gegebenenfalls die Luftzufuhr des jeweiligen Triebwerks in die Kabine verhindern kann. Dieses Ventil kann vom Cockpit aus betätigt werden. Anschließend wird die Luft durch einen Precooler geleitet, indem die Luft von 500 °C auf 180 °C abgekühlt wird [8].

Sollen gleichzeitig auch die Flügel vor Vereisung geschützt werden, wird das entsprechende Ventil für die Flügelenteisung geöffnet und der Precooler kühlt die Luft auf lediglich 232 °C statt auf 180 °C herunter [8]. Der Precooler ist ein Luft-Luft-Kreuzstromwärmeübertrager, der mit kalter Fanluft gekühlt wird [77]. Wie Abbildung 3.4 zeigt, wird die kalte Luft aus dem Fan entnommen. Über das pneumatisch gesteuerte Vorkühlerregelventil kann der einströmende, kühlende Massenstrom eingestellt werden. Hierüber wird die einzustellende Temperatur im Precooler reguliert [8]. Ein Kreuzstromwärmeübertrager basiert auf dem System eines Plattenwärmeübertragers. Die zu kühlende Fanluft entzieht der heißen Zapfluffür Wärmeenergie. Bei einem Kreuzstromwärmeübertrager werden die Zapfluffür und



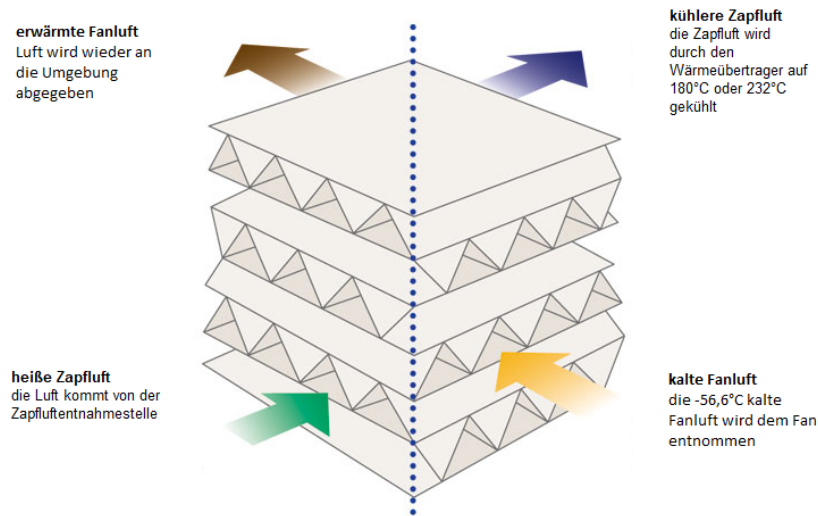


**Abbildung 3.4.:** Darstellung der Zapfluftentnahme über den Precooler bis zu den Klimapacks

die Fanluft getrennt voneinander im 90 Grad Winkel zueinander geleitet, siehe Abbildung 3.5 [80], um eine möglichst hohe Übertragung der Energieströme zu erzeugen [51].

Nach dem Precooler gelangt die Luft über ein Leitungssystem in die Klimapacks. Diese haben die Aufgabe, die 180 °C heiße und auf einem Druckniveau von 3,1 bar befindliche Luft auf Kabinendruck zu entspannen. Dieser Prozess ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Ein Teil der heißen Zapflut, auch Trimmluft genannt, wird über eine Bypassleitung umgeleitet und dem System im späteren Verlauf zugeführt. Diese Umleitung ist in Abbildung 3.6 als grüner Pfeil dargestellt. Der restliche Teil der Zapflut passiert den primären Wärmeübertrager. In diesem Wärmeübertrager wird die Zapflut von 180 °C auf 113 °C gekühlt. Als kühlendes Medium wird Stauluft verwendet, die von außen durch ein Gebläse angesogen wird. In Reiseflughöhe besitzt die Stauluft eine Temperatur von -57 °C. Der Wärmeübertrager ist wie der Precooler in Form eines Kreuzstromwärmeübertragers aufgebaut, siehe Abbildung 3.5.

Im Anschluss an den primären Wärmeübertrager wird die Zapflut in einem Verdichter auf 4,7 bar komprimiert. Der Verdichter sitzt zusammen mit dem Gebläse und der Turbine auf einer Welle (Air Cycle Machine). Die Welle mit den montierten Komponenten wird



**Abbildung 3.5.:** Schematische Darstellung eines Kreuzstromwärmeübertragers [48], bearbeitet mit Paint

über die Turbine angetrieben. Durch die Kompression der Zapfluft im Verdichter steigt die Temperatur von 113 °C auf 183 °C an. Die Druckerhöhung ist notwendig, um im späteren Prozess die maximale Arbeit in der Turbine zu erzeugen. Je größer die Druckdifferenz in der Turbine ist, desto mehr Arbeit wird gewonnen [51]. Um die Zapfluft bei gleichem Druck von 4,7 bar wieder zu kühlen, passiert die Luft den Hauptwärmeübertrager (lila in 3.6). Auch dieser wird, wie der primäre Wärmeübertrager, durch Stauluft gekühlt, wird aber aus Konstruktionsgründen in Form eines Kreuzgegenströmers gebaut, um hohe Wirkungsgrade zu erlangen [51]. Die Zapfluft hat nach diesem Prozess eine Temperatur von 50 °C [74].

Es stellt sich die Frage, warum dem Verdichter ein primärer Wärmetauscher vorgeschaltet ist. Durch die Kompression im Verdichter erhöht sich die Temperatur der Zapfluft. Um Gewicht zu sparen und eine bestmögliche Wärmeübertragung zu erzeugen, wird Aluminium als Material für Wärmeübertrager im Flugzeug verwendet [51]. Bei diesem Material dürfen die Temperaturen der Zapfluft nicht zu hoch sein, weshalb der primäre Wärmeübertrager vor dem Verdichter verbaut werden muss. Darüber hinaus wird nach dem Hauptwärmeübertrager die Zapfluft über zwei weitere Wärmeübertrager gekühlt, um die Zapfluft zu entfeuchten. Um Energie zu sparen, ist eine niedrige Temperatur nach dem Hauptwärmeübertrager anzustreben. Die Entfeuchtung der Zapfluft ist notwendig, um Schäden an der Elektronik, der Isolation und der Struktur des Flugzeuges sowie das Beschlagen der Kabinenfenster zu verhindern. Durch einen Hochdruckwasserabscheider wird die Luftfeuchtigkeit auf 1 – 2 % relative Feuchtigkeit entfeuchtet [76].

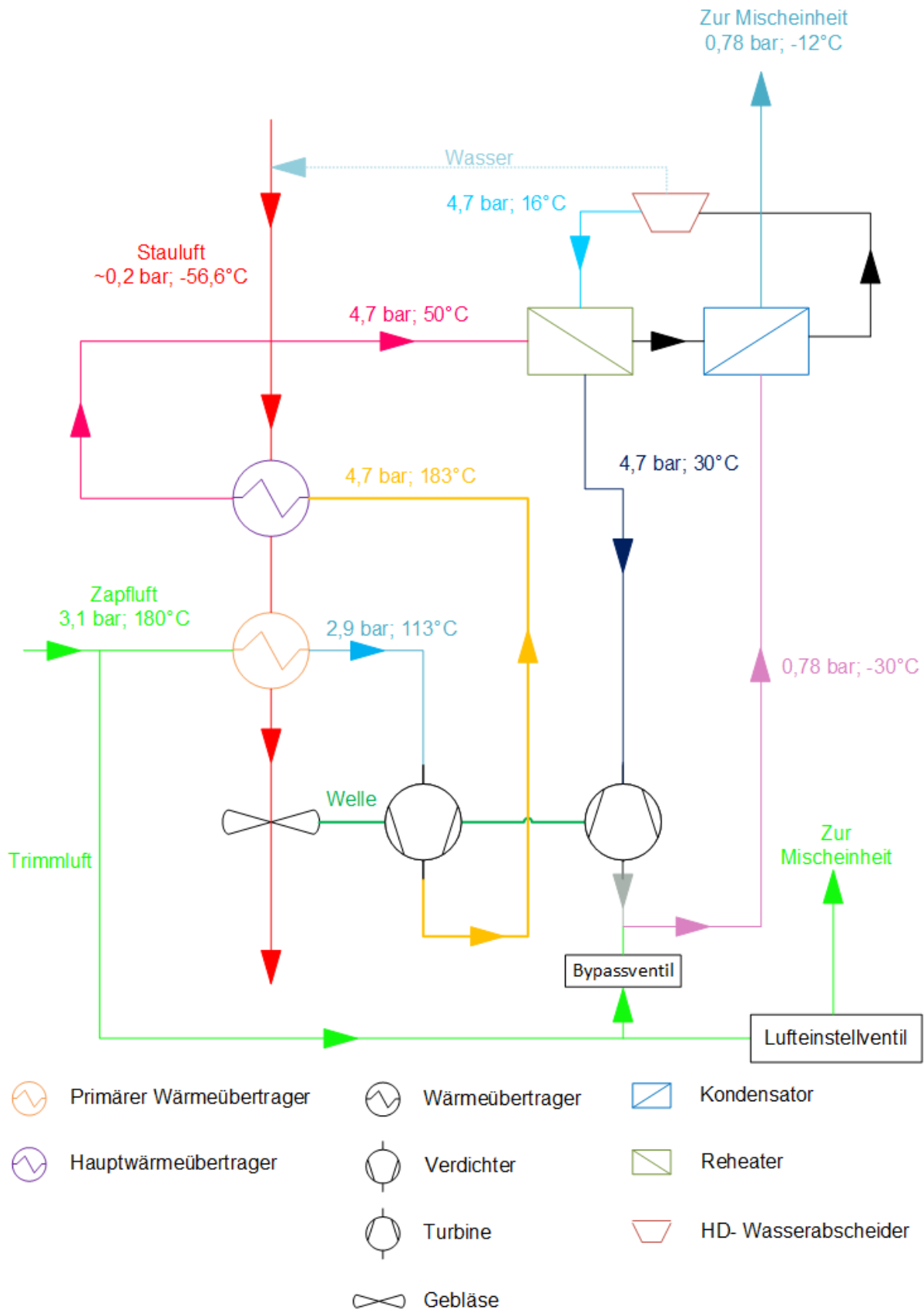


Abbildung 3.6.: Schaubild über den Verlauf der Zapfluft in den Klimapacks, mit Daten aus [74], [77]

Um die Zapfluft mittels Kondensation zu entfeuchten, wird diese Luft zuerst im Reheater gekühlt. Im Reheater überträgt der einströmende und zu entfeuchtende Zapfluftmassenstrom seine Energie an den kreuzenden Strom. Dabei wird die Temperatur des zu entfeuchtenden Zapfluftmassenstroms gesenkt und die des kreuzenden von  $16\text{ °C}$  auf  $30\text{ °C}$  erhöht. Im Anschluss passiert der Zapfluftmassenstrom einen zweiten Wärmeübertrager, den Kondensator. Im Kondensator wird die Wärmeenergie der Zapfluft an den  $-30\text{ °C}$  kalten kreuzenden Zapfluftmassenstrom übertragen. Durch diese zweite Temperatursenkung kondensieren die Wassermoleküle in der Zapfluft, wodurch sich Wassertropfen bilden. Die Wassertropfen werden im anschließenden Hochdruck-Wasserabscheider und mittels Zentrifugalabscheider nach außen geschleudert und gesammelt [51]. Das abgeschiedene Wasser wird über eine Leitung der Stauluft zugeführt. Dabei wird das Wasser auf den primären Wärmeübertrager und den Hauptwärmeübertrager aufgesprüht. Dadurch wird die Wärmeübertragung erhöht [2]. Aus der Mitte des Hochdruckwasserabscheiders wird die entfeuchtete Zapfluft entnommen und wieder als kreuzender Wärmestrom in den Reheater geleitet [54]. Im Anschluss an den HD-Wasserabscheider gelangt die entfeuchtete Zapfluft, als „kreuzender“ und kühlender Massenstrom durch den Reheater, wodurch sich die Temperatur von  $16\text{ °C}$  auf  $30\text{ °C}$  erhöht. Durch den hohen Druck, der durch die Verdichterstufe erzeugt worden ist, expandiert die Zapfluft in der Turbine bis auf Kabinendruck. Dabei wird durch die hohe Druckdifferenz von  $3,95\text{ bar}$  Arbeit gewonnen, die wiederum den Verdichter und das Gebläse antreibt. Das Gebläse benötigt zwischen  $15$  und  $30\%$  der Turbinenleistung [51]. Durch diese Expansion wird die Temperatur auf  $-30\text{ °C}$  abgesenkt. Da sich bei diesen Temperaturen Eis bilden kann, kann der Turbinenausstrittsluft über ein Bypassventil heiße Trimmflucht zugemischt werden, um die Eisbildung des verbleibenden Wassers zu verhindern [51].

Im letzten Schritt wird die kalte Luft durch den Kondensator als kreuzenden Wärmestrom geleitet. Dabei nimmt die kalte Zapfluft die Wärmeenergie des zu entfeuchtenden Zapfluftmassenstroms auf. Die Temperatur erhöht sich auf  $-12\text{ °C}$ .

Die im A320 verbauten Klimapacks sind in der Abbildung 3.7 zu sehen. Die Abmaße betragen circa  $L=1\text{m}$ ,  $B=2\text{m}$  und  $H=1\text{m}$  [53].

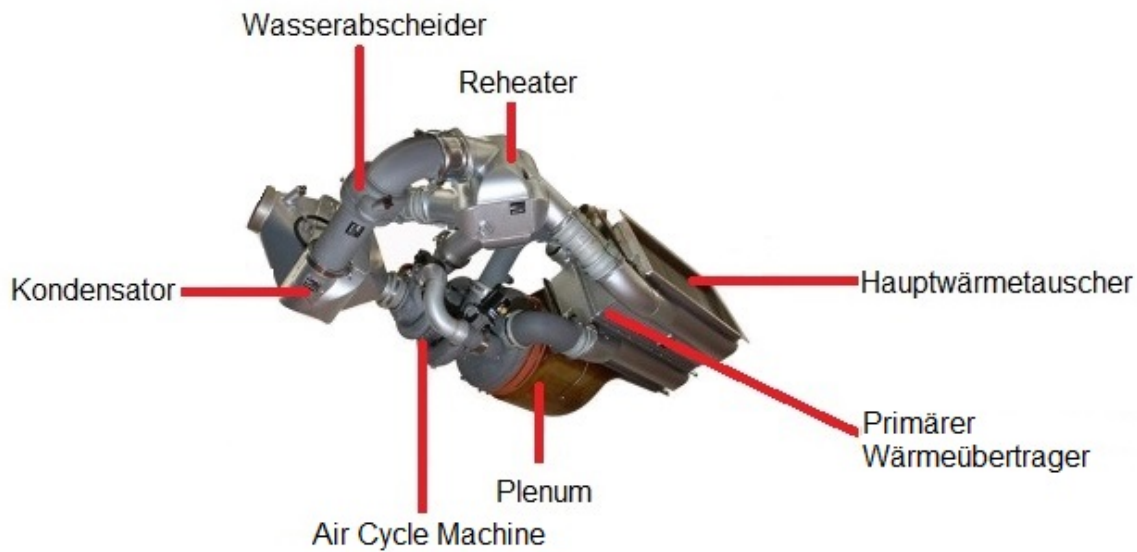


Abbildung 3.7.: Klimapacks des A320 [52]

## 3.2. Kabinenbelüftungssystem

Nach dem Passieren der Klimapacks strömt die aufbereitete Luft in eine Mischeinheit. Hier wird die  $-12\text{ °C}$  kalte Zapfluft mit der rezirkulierenden Luft aus der Kabine und der Trimmluft gemischt, siehe Abbildung 3.8. Der rezirkulierende Anteil der Kabinenluft beträgt bei modernen Flugzeugen zwischen 40 und 50 % [75]. Über ein Lufteinstellventil wird die Kabinenluft auf eine vom Flugast als angenehm empfundene Temperatur von  $21\text{ °C}$  eingestellt. Diese Temperatur wird über den Electronic Centralised Aircraft Monitor reguliert und kann von der Bordcrew manuell um  $\pm 2\text{ °C}$  verstellt werden [57]. Das Flugzeug ist je nach Größe in verschiedene Klimazonen unterteilt. Es gibt die Cockpitzone, die separat mit Luft versorgt wird und die Kabinenzonen. Die Anzahl der Kabinenzonen ändert sich je nach Flugzeugtyp. So besitzt der A320 2 verschiedene Zonen, der A330/340 wartet sogar mit 6 Zonen auf [57]. Die verschiedenen Zonen ermöglichen eine unabhängige Temperaturregelung. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Sitzdichte, je enger die Sitze nebeneinander angeordnet sind, desto schneller erwärmt sich die Kabinenlufttemperatur [57].

Die Frischluft gelangt über Ventile in Höhe der Gepäckablage in die Kabine, siehe Abbildung 3.9. Jede Sekunde gelangen pro Passagier knapp  $7,8\text{ l}$  „frische“ Luft aus der Mischeinheit in die Kabine [76]. Die Frischluft strömt mit einer Geschwindigkeit von  $0,2\text{ m/s}$  aus den Kabinenluftventilen heraus. Darüber hinaus ist jeder Sitzplatz mit einem zusätzlichen Luftventil versehen, das nach dem persönlichen Belieben reguliert werden

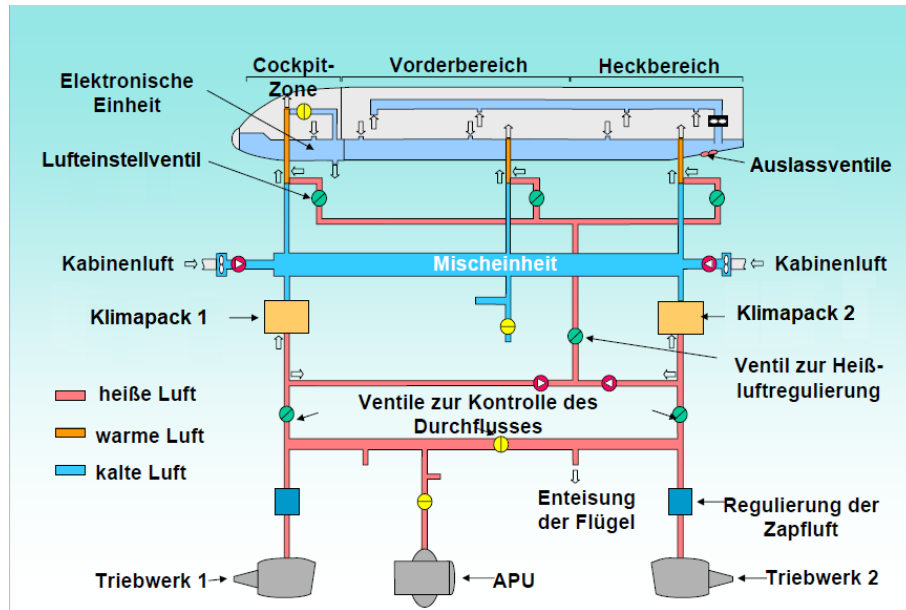


Abbildung 3.8.: Aufbau der Luftversorgung für die Flugzeugkabine [74], bearbeitet mit Paint

kann. Diese Ventile haben eine maximale Luftaustrittsgeschwindigkeit von 1 m/s [76]. Die verbrauchte Kabinenluft wird unterhalb der Sitze (an den Dado-Panels) in den Dreiecksbereich abgesaugt. Etwa die Hälfte dieser Luft wird in die Rezirkulation geleitet, der Rest landet in der Bilge, wo die verbrauchte Luft über zwei Auslassventile an die Umgebung abgegeben wird [89].

Das System der Rezirkulation ist seit 1970 im Einsatz. In dieser Zeit hat sich der Anteil der rezirkulierenden Luft auf bis zu 50 % erhöht. Durch die höhere Rezirkulation wird Kraftstoff gespart, da weniger Zapflut aus dem HD-Verdichter entnommen werden muss. Bei einer Rezirkulationsrate von 50 % spart ein Flugzeug pro Jahr durchschnittlich 50.000€ an Kraftstoffkosten ein [62]. Zusätzlich kommt es zu einer Erhöhung der relativen Feuchtigkeit von 1 – 2 % auf 5 – 20 %, da die rezirkulierende Luft durch das Ein- und Atmen befeuchtet wird und die Luftfeuchtigkeit in der wiederverwendeten Kabinenluft erhalten bleibt [68],[5].

Bevor die wiederverwendete, rezirkulierende Luft wieder in die Mischeinheit gelangt, wird sie über Filter gereinigt. Welche Filtersysteme dabei im Einsatz sind, wird in Kapitel 3.3 erläutert.

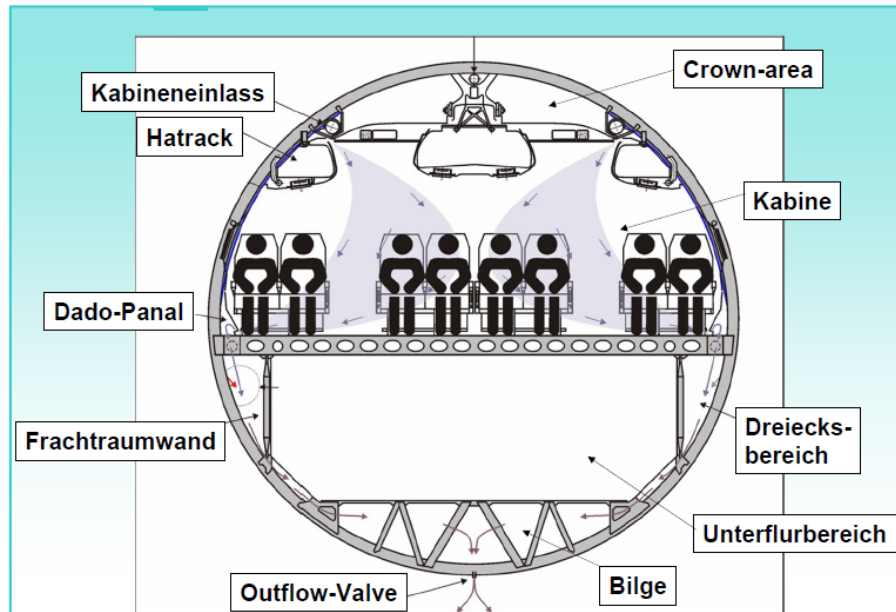


Abbildung 3.9.: Schematischer Aufbau der Kabinenbelüftung [74]

### 3.3. Filtersysteme

Die im Flugzeug verwendeten Filtersysteme können je nach Ort der Montage, in zwei Arten unterteilt werden. Zum einen gibt es Filtersysteme in der Rezirkulation, zum anderen das Filtersystem im Zapfluftsysteem. In Abbildung 3.10 sind die beiden Filtersysteme im Gesamtkontext abgebildet.

Dabei unterscheiden sich auch die Aufgaben der Filtersysteme. In der Rezirkulation sollen die Filter Bakterien, Viren, Gerüche und Partikel, wie Fasern, Staub und Hautpartikel aus der Kabinenluft herausfiltern, sie sollen sozusagen die wiederverwendete Kabinenluft von „menschlichen Spurenelementen“ reinigen. Ein Beispiel: Ein Passagier verliert pro Minute bis zu 30.000 Bakterien über die Haut [62]. Bei über 100 Passagieren und einer Flugdauer von 1 Stunde kommt eine enorme Bakterien-Belastung zustande. Dies erklärt die Notwendigkeit gut funktionierender Filter.

#### 3.3.1. Filtersysteme in der Rezirkulation

Die Anzahl der Filter in der Rezirkulation ist abhängig vom Flugzeugtyp und maximaler Passagieranzahl. So besitzt der Airbus A320 mit 164 Sitzen zwei Filter, die Boeing 777 mit bis zu 550 Plätzen acht Filter. Um die Qualität der rezirkulierenden Luft zu verbessern, besitzen neuere Flugzeuge sogar noch eine höhere Anzahl an Filtern [62]. Die in der

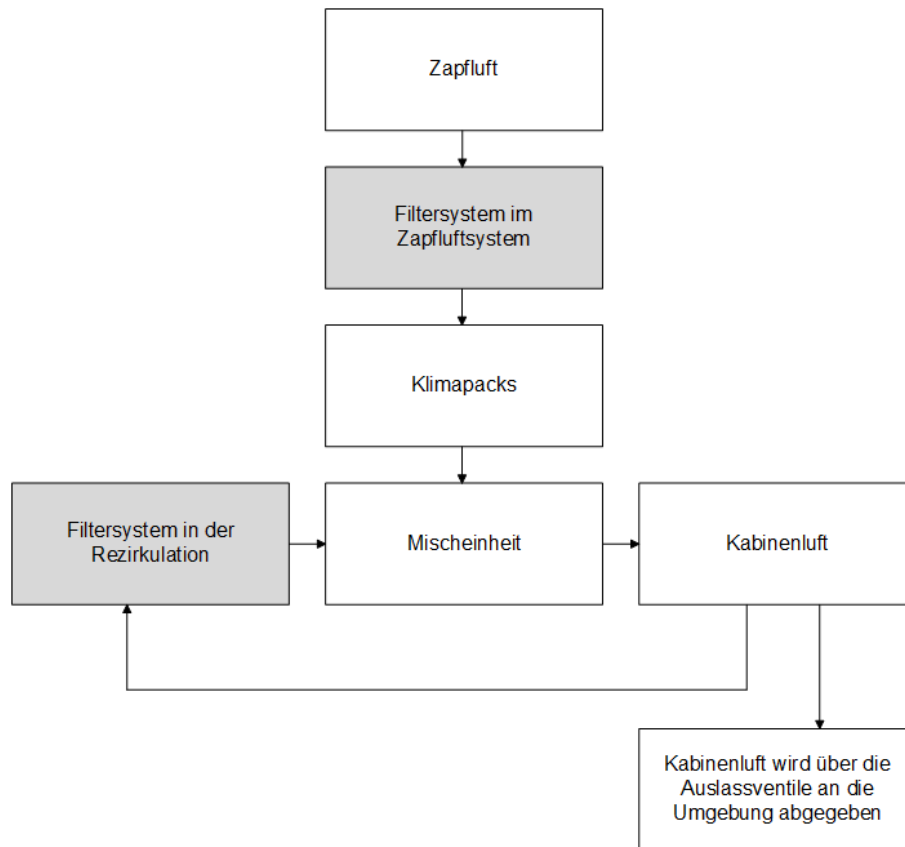


Abbildung 3.10.: Platzierung der einzelnen Filtersysteme im Überblick

Rezirkulation verwendeten Filter sind immer sogenannte HEPA-Filter, die die wiederverwendete Kabinenluft von Bakterien, Viren und Partikeln reinigt. Um Gerüche wie z.B. Schweiß aus der Luft zu filtern, werden optional Aktivkohlefilter eingesetzt.

### HEPA-Filter

Die rezirkulierende Luft wird zuallererst mit Hilfe eines HEPA-Filters von Bakterien, Viren, Feinstaub und Pollen befreit. HEPA steht für High Efficiency Particulate Air und besteht aus einem engmaschigen Netz aus Mikroglassfasern mit stets derselben Fasergröße [62]. Das Besondere an diesem Filter ist, dass er auf vier verschiedenen physikalischen Effekten beruht, die in Abbildung 3.11 näher erläutert sind.

Der Siebeffekt basiert auf der Funktion eines Siebes. Besitzen die Partikel einen größeren Durchmesser als die Maschengröße der Filterfasern, bleiben diese vor den Fasern hängen. So können Partikel mit einer Größe  $> 3 \mu\text{m}$  abgehalten werden [15]. Schwere Partikel werden durch den Trägheitseffekt umgelenkt, da sie der schnellen Richtungsänderung des Luftstroms nicht folgen können. Dadurch treffen sie früher oder später auf eine Faser, deren



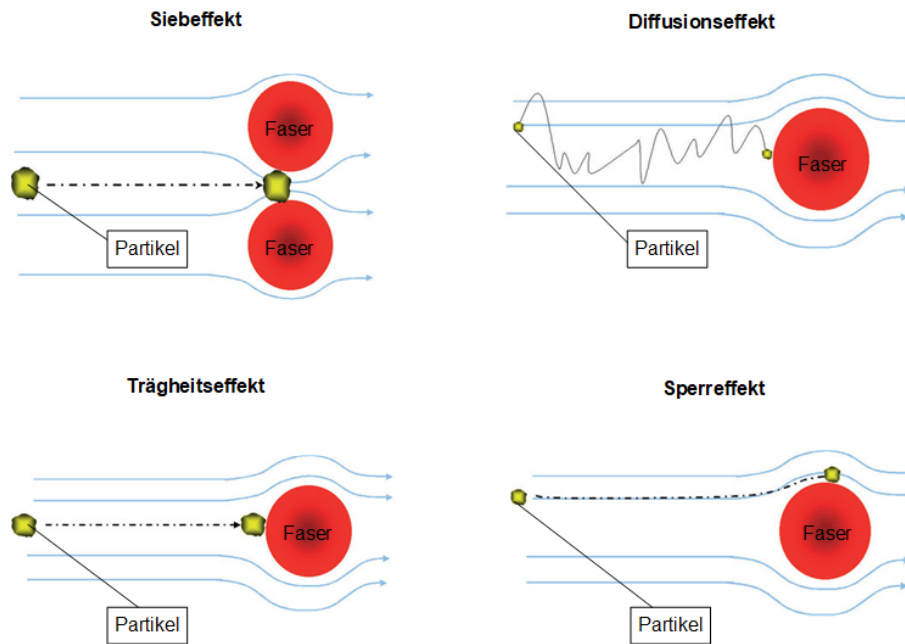


Abbildung 3.11.: Prinzipskizze der einzelnen Filterwirkweisen [15], bearbeitet mit Paint

Adhäsionskräfte dann für ein Anhaften der Partikel sorgt. Dieser Effekt funktioniert am besten bei Partikelgrößen von  $0,3 - 10 \mu\text{m}$  [62]. Partikel mit einem Durchmesser zwischen  $1 \mu\text{m}$  und  $0,1 \mu\text{m}$  (Bakteriengröße) werden mittels Diffusionseffekt aus der Luft gefiltert [62]. Aufgrund ihres geringen Durchmessers werden sie durch die Brownsche Molekularbewegung beeinflusst, d.h. sie stoßen ständig mit anderen Gasmolekülen zusammen und werden so permanent abgelenkt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Partikelteilchen auf eine Faseroberfläche treffen. Dort bleiben sie durch Adhäsionskräfte haften. Dann gibt es noch den Interceptionseffekt, der auch Sperreffekt genannt wird. Nähert sich ein Partikel mit einem Durchmesser von  $D$  einer Faser, so wird das Partikelteilchen ab einem Abstand von  $D/2$  durch Adhäsionskräfte von der Faser angesogen [46]. Mit Hilfe dieses Effekts können Verunreinigungen von bis zu  $0,01 \mu\text{m}$  (Virengröße) aus der Luft gefiltert werden. Mitunter kommen auch mehrere Effekte gleichzeitig zum Tragen.

Um die Effizienz des HEPA-Filters zu steigern, wird die Oberfläche des Filters erhöht, indem dünne Fasernetze übereinander gelegt werden und sogenannte Filtermatten entstehen. Um die Filterfläche weiter zu erhöhen, werden diese Filtermatten zusätzlich gefaltet und in einen Rahmen gespannt, siehe Abbildung 3.12. Durch die gefaltete Struktur der Filtermatten wird die Fläche im Rahmen deutlich erhöht. Ein solches Filterelement hat in der Luftfahrt meist eine Größe von  $0,91 \times 0,6 \text{ m}$  und eine Dicke von  $0,076 \text{ m}$ . Es wiegt ca.  $2,5 \text{ kg}$  und darf insgesamt  $4500 \text{ h}$  lang in Benutzung sein, bevor es ausgewechselt werden muss [62]. Die HEPA-Filter werden der besseren Unterteilung wegen in Filterklassen eingeordnet. Filterklassen geben Auskunft über den Abscheidegrad des jeweiligen

Filters. Der Abscheidegrad beschreibt das Verhältnis der Partikel-Anzahl vor und nach dem Filter [46]. Je mehr Partikel abgeschieden werden, desto höher ist der Abscheidegrad. Die Klasse H13 lässt z.B. 0,05 % der Partikel durch den Filter, während ein H14 Filter nur noch 0,005 % Partikel passieren lässt. 99,95 bzw. 99,995 % der Partikel werden also vom Filter abgeschieden. Dabei kommt es auch auf die Größe der Partikel an. Die im Flugzeug verwendeten Filter entfernen rund 99,999 % aller Viren und Bakterien [57] mit einer Partikelgröße von  $0,3 \mu\text{m}$ . Die „American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers“ (ASHRAE) ist ein Berufsverband für Heizungs-, Kühlungs- und Klimaanlage-Ingenieure in den USA, der in Flugzeugen einen HEPA-Filter mit einer Klasse von mindestens H13 empfiehlt. Das bedeutet, dass bei einer  $0,3 \mu\text{m}$  Partikelgröße mindestens ein Wirkungsgrad von 99,97 % erfüllt, wenn nicht sogar übertroffen werden soll [62]. Da es aber bis heute keine Flugtauglichkeitsnorm für die Filterklasse in der Rezirkulation gibt, ist die H13-Klasse lediglich eine Empfehlung. Dennoch wird in den neueren und modernen Flugzeugen diese Filterklasse verwendet. Es gibt jedoch auch noch eine Anzahl an älteren Flugzeugen, die entweder HEPA-Filter mit einer geringeren Filterklasse verwenden oder ihre rezirkulierende Luft überhaupt nicht filtern und zusammen mit der Zapfluft wieder in die Kabine leiten. Der Anteil der ungefilterten, rezirkulierten Luft ist in diesen Flugzeugen allerdings deutlich geringer als in den modernen Flugzeuge, die einen Rezirkulations-Anteil von 50 % haben [66].

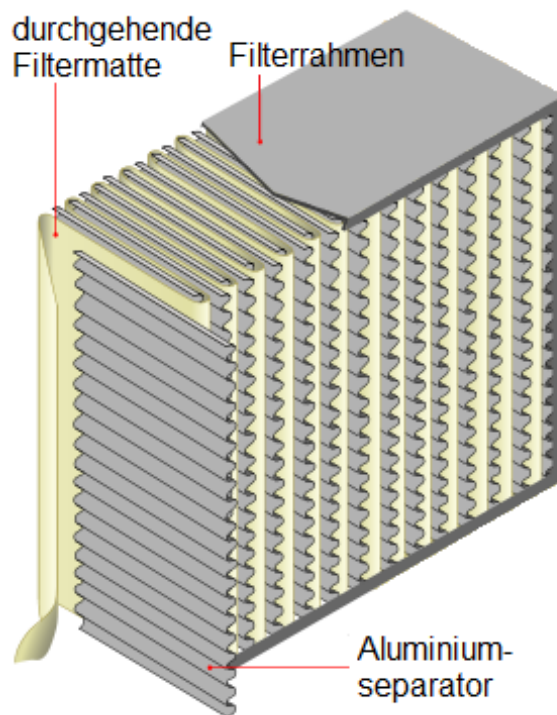


Abbildung 3.12.: Aufbau eines Filterelementes [83], bearbeitet mit Paint

HEPA-Filter sind in allen modernen Flugzeugen Standard. In vielen Fliegern werden darüber hinaus Aktivkohlefilter verbaut, um die Luft von Gerüchen wie Schweiß, Angebranntem aus der Küche, WC-Gerüchen oder ähnlichem zu reinigen.

#### **Aktivkohlefilter**

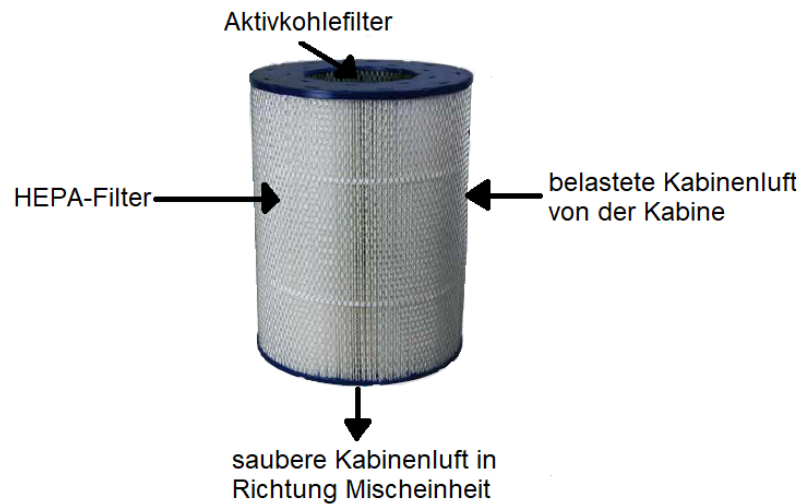
Da Aktivkohle nur in partikelfreier Luft als Filter funktioniert, werden Aktivkohlefilter stets nach den HEPA-Filtern optional in die Rezirkulationsschleife verbaut. Die Aufgabe der Aktivkohlefilter ist es, gasförmige Verunreinigungen aus der Kabinenluft herauszufiltern [60], [11]. Zu den gasförmigen Verunreinigungen zählen die bereits oben erwähnten Gerüche, aber auch flüchtige organische Stoffe (VOC). Unter VOCs werden organische Verbindungen zusammengefasst, die einen Siedepunkt  $\leq 252$  °C besitzen (gemessen bei Standardatmosphärendruck). Eine weitere Unterteilung erfolgt nach den spezifischen Siedepunkten. „Very Volatile Organic Compounds“ (VVOCs) haben einen Siedepunkt, der unter 50 °C liegt, der Siedepunkt von „Volatile Organic Compounds“ (VOCs) liegt zwischen 50 und 150°C und der von „Semi Volatile Organic Compounds“ (SVOCs) zwischen 150 und 250 °C. VOCs und VVOCs treten dabei als Gas auf, während SVOCs in einer Kombination aus Gas und ultrafeinem Kondensat vorkommen [10].

Der Aktivkohlefilter besteht aus einzelnen Patronen, die mit Aktivkohle in Form von Granulat befüllt sind. Aktivkohle wird durch starkes Erhitzen aus Torf, Holz oder Stein hergestellt [31]. Bedingt durch die poröse Struktur des Granulats verfügt Aktivkohle über eine außerordentlich hohe innere Oberfläche von bis zu 1000 – 1500 m<sup>2</sup>/g [46], an die sich VOCs- und Geruchsmoleküle durch Adsorption anlagern und so aus der Luft herausgefiltert werden.

VOC-Moleküle können unter anderem durch Verbrennungsprodukte in der Küche des Flugzeuges entstehen, aber auch z.B. durch das Verbrennen von Ölnebel, einem Luft-Schmieröl-Gemisch im Triebwerk. Die durch Verbrennung von Ölnebel entstandenen VOC-Moleküle können insgesamt mit einer Effizienz zwischen 65 und 73 % aus der rezirkulierenden Luft gefiltert werden [75].

Der Aktivkohlefilter eignet sich insbesondere für Anwendungen bei Temperaturen bis zu 70°C [12]. Ist die Einsatztemperatur höher, nimmt die Effizienz des Filters ab.

Einige Filterhersteller wie Pall Aerospace schalten die beiden Filterarten (HEPA- und Aktivkohlefilter) in Reihe und verbauen sie in einem Gehäuse, siehe Abbildung 3.13, wodurch auch die Wartung erheblich erleichtert wird. Ein kombinierter Filter wiegt ca. 5kg und erzeugt eine Luftqualität, die mit der Außenluft vergleichbar ist [51]. Die kombinierten Filter von Pall sind aktuell im A320/A330 und im A340 von Airbus im Einsatz [12], [67].



**Abbildung 3.13.:** Aufbau eines kombinierten Filtersystems mit integriertem HEPA- und Aktivkohlefilter [25], bearbeitet mit Paint

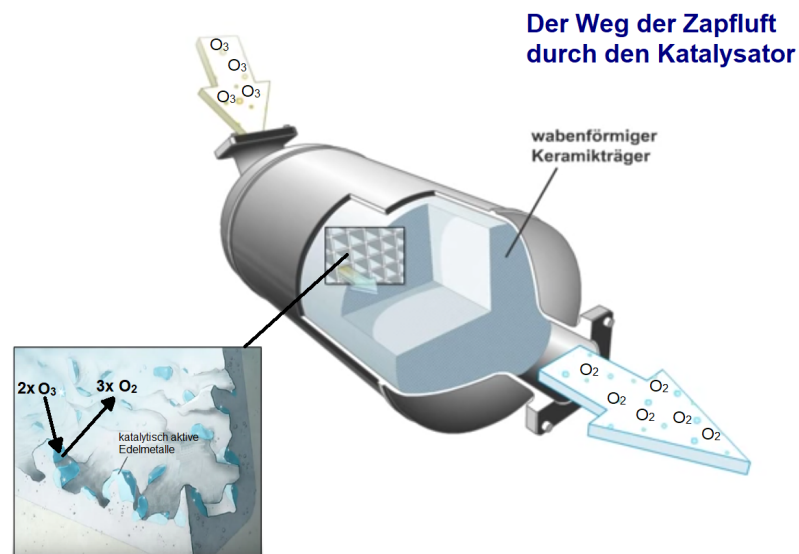
### 3.3.2. Filtersysteme im Zapfluftsystem

Im Zapfluftsystem geht es vorrangig darum, die abgezapfte Luft von Ozon- und flüchtigen organischen Molekülen (VOCs) zu reinigen. Eine bewährte Möglichkeit, diese Stoffe aus der Zapfluft herauszufiltern, bieten Katalysatoren.

#### Katalysatoren zur VOC- und Ozonenentfernung

Zu unterscheiden ist zwischen dem Ozonen-Katalysator (OZC) und dem kombinierten VOC/Ozonen- Katalysator (VOCZ) [12]. Der OZC wird seit 10 Jahren standardmäßig in jedes Langstreckenflugzeug verbaut, da diese höher fliegen als Kurzstreckenflugzeuge und der Ozongehalt der Luft mit zunehmender Höhe steigt. Das Prinzip des OZC beruht auf dem Prinzip der Oxidation. Dabei werden 2 Ozonmoleküle ( $O_3$ ) durch Oxidation in 3 Sauerstoffmoleküle ( $O_2$ ) umgewandelt [12]. Wie in Abbildung 3.14 zu sehen ist, bestehen Katalysatoren aus einem zylinderförmigen Behälter. Dieser ist von innen mit einer wabenförmigen Keramikstruktur beschichtet. Der Innenraum dieses Zylinders ist mit vielen dünnwandigen Wabenstrukturen, meistens aus Platin, durchzogen, durch die die Zapfluft hindurch strömt. Das Platin übt eine katalysatorische Wirkung auf die Ozon-Moleküle aus. Ohne dass das Platin selbst reagiert, werden die Ozonmoleküle zu Sauerstoff oxidiert [4].

Der VOCZ ist optional für den A320/ A330 /A340 und A380 erhältlich (Hersteller BASF)



**Abbildung 3.14.:** Aufbau und Funktion eines Ozonenkatalysators [4], bearbeitet mit Paint

[12]. Durch diesen Katalysator können VOC-Moleküle, verursacht durch die Pyrolyse von Schmieröl, Hydraulikflüssigkeit oder Vereisungsmitteln, teilweise aus dem Zapfluftsystem gefiltert werden. Die vom Schmieröl stammenden VOC-Moleküle besitzen eine Größe zwischen 10 und 70 nm [45] und werden den SVOCs zugeordnet. Trotz dieser geringen Größe können diese vom VOCZ-Katalysator durch Oxidation aus der Zapfluft entfernt werden. Die Oxidation basiert dabei auf demselben Prinzip wie beim OCZ. Durch die Oxidation spalten sich VOC-Moleküle in Kohlendioxid und Wasser auf [12].

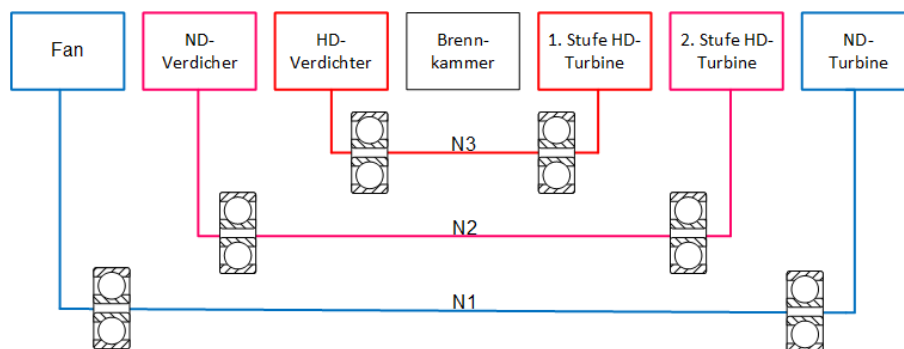
Die OZC und VOCZ werden vor den Klimapacks verbaut, da ihre Effizienz bei einer Temperatur über  $200^{\circ}C$  optimal ist [12].

Der Vorteil dieses Systems ist, dass kein elektrischer Strom benötigt wird. Jedoch muss die Verweilzeit der Zapfluft im Katalysator lang genug sein, um eine vollständige Oxidation zu bewirken [11]. Der Druckverlust über dem Katalysator wirkt sich nachteilig auf die Energiebilanz und damit auf den Wirkungsgrad des Zapfluftsystems aus. Wie der HEPA- und der Aktivkohlefilter müssen auch diese Filter nach einer bestimmten Zeit gewechselt werden [11].



## 4. Lagerung der Triebwerkskomponenten

Gemäß Kapitel 3 wird die Zapfluft aus verschiedenen Stufen des HD-Verdichters entnommen. Am Beispiel des Triebwerkes Trent 972, das im A380 verbaut ist, wird die 1. Stufe der HD-Turbine zusammen mit dem HD-Verdichter auf der Welle N3 gelagert [72]. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass der Fan zusammen mit der Niederdruckturbinen auf einer separaten Welle N1 gelagert ist. Der Niederdruckverdichter (ND-Verdichter) ist mit der 2. Stufe des HD-Verdichters auf der Welle N2 gelagert, siehe schematische Abbildung 4.1. Alle drei Wellen arbeiten unabhängig voneinander und die Welle N3 dreht entgegengesetzt zu den beiden Wellen N1 und N2 [8]. Neben den dreiwelligen Triebwerken existieren auch Triebwerke mit zwei bzw. nur einer Welle. Das V2500 von Rolls-Royce ist ein zweiwelliges Triebwerk, bei dem der Fan, der ND-Verdichter und die ND-Turbine auf einer Welle montiert sind, während der HD-Verdichter und die HD-Turbine auf einer zweiten Welle montiert sind [64].



**Abbildung 4.1.:** Schematische Darstellung der drei Wellen mit ihren jeweiligen Lagerungen

Zur Lagerung der drei Wellen des Trent 972 sind insgesamt 8 Lager notwendig. Diese sind in der Triebwerksdarstellung in Abb. 4.2 erkennbar.

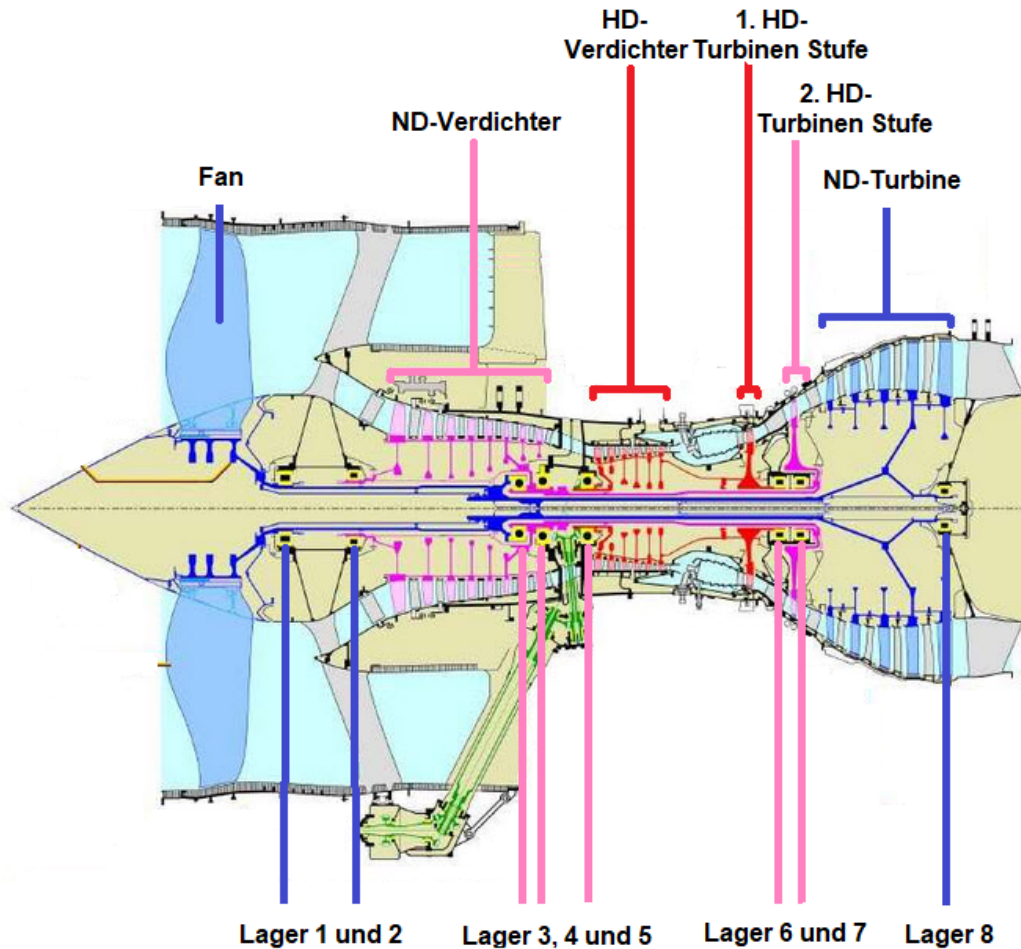


Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung der drei Wellen im Trent 972 mit ihren jeweiligen Lagerungen [8], bearbeitet mit Paint

## 4.1. Aufbau eines Triebwerkslagers

Ein typisches Triebwerkslager besteht aus einem Lagergehäuse, das in eine Luft- und eine Schmierölkammer unterteilt ist, wie Abb. 4.3 zeigt. Die Schmierölkammer beinhaltet das Schmierölgehäuse, das Kugellager sowie die für die Schmierung notwendigen Zu- und Abflussleitungen. Bei allen Triebwerkslagern werden Kugellager/Rotorlager verwendet [8]. Wie bei jedem Lager werden auch die Triebwerkslager mit Schmieröl geschmiert, um einen frühzeitigen Verschleiß zu verhindern. Die Luftkammer dichtet die Schmierölkammer gegenüber der Umgebung mit Luft ab. Es herrscht Überdruck gegenüber der Schmierölkammer, um so den Austritt von Ölnebel in die Luftkammer zu verhindern (Dichtung 1 in Abbildung 4.3) [60]. Ölnebel entsteht durch die Verwirbelung des Schmieröls aufgrund der hohen Rotationsrate der Welle in der Schmierölkammer und durch das feine Zerstäuben des Schmieröls in der Düse. Die feinen Schmieröltröpfchen vermischen sich



mit Luft. Chemisch gesehen wird dieses Gemisch als Aerosol bezeichnet. Aerosol ist der „technische“ Ausdruck eines Mehrphasensystems, in dem eine oder mehrere kondensierte Phase(n) sehr fein in einem Gas verteilt sind [9]. In diesem Fall entspricht das in kleinen Tröpfchen vorliegende Schmieröl der kondensierten Phase, das sich in der Luft, die über die Dichtung in die Schmierölkammer einströmt, verteilt.

Das vierte und fünfte Lager des Triebwerks zeigt Abb. 4.4. Hier wird die Lagerung der zwei unterschiedlichen N2 und N3 Wellen zwischen dem ND-Verdichter und dem HD-Verdichter dargestellt. Die Abdichtung zwischen der Schmierölkammer und der Luftkammer wird im folgenden Kapitel erläutert.

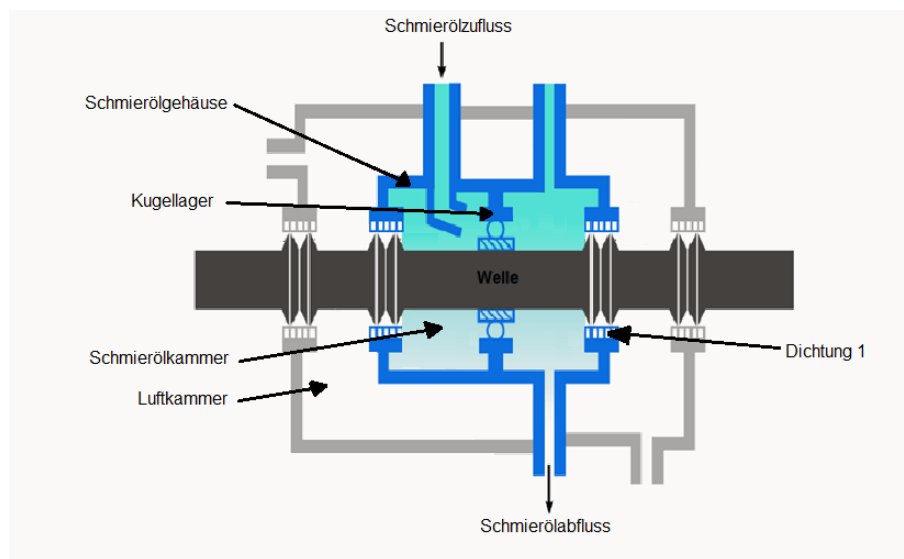


Abbildung 4.3.: Schematischer Aufbau der Luft- und Schmierölkammer [75], bearbeitet mit Paint

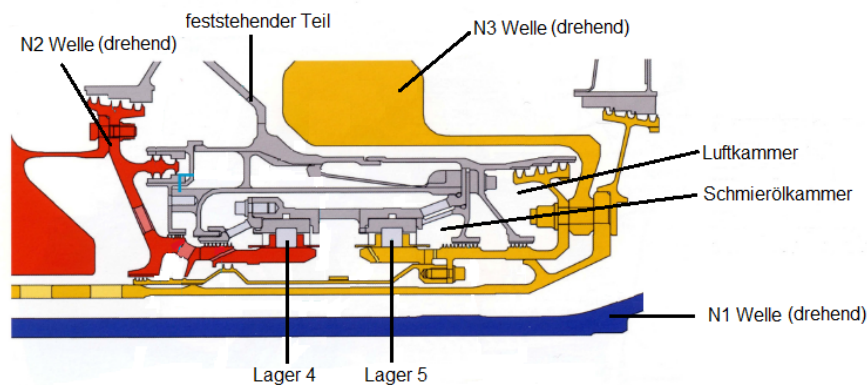


Abbildung 4.4.: Aufbau der Luft- und Schmierölkammer sowie der Wellensysteme des vierten und fünften Lagers im Triebwerk [35], bearbeitet mit Paint

## 4.2. Das Dichtungssystem der Lagerkammern

Um ein Austreten des Schmieröls aus den Lagerkammern zu verhindern, werden Dichtungen verwendet. Aufgrund der hohen Umdrehungszahl der Welle können dabei nur spezielle Dichtungen, wie die Labyrinthdichtung oder die Karbondichtung zum Einsatz kommen, siehe Abbildung 4.5. Diese Dichtungen müssen verschiedene Funktionen erfüllen:

- die Verhinderung des Eindringens von Feuchtigkeit und Schmutz in die Schmieröl-kammer
- die Verhinderung des Austretens von Ölnebel aus der Schmierölkammer in die Luft-kammer
- die Minimierung des Luftmassenstroms in die Schmierölkammer, um die Effizienz des Triebwerks zu verbessern [61]

Die Schmierölkammer wird abgedichtet durch zwei Labyrinth- oder Karbondichtungen. Die Luftkammer ist von der Umgebung über zwei Labyrinthdichtungen getrennt, siehe Abb.4.5. Die unterschiedlichen Dichtungsarten der Labyrinth- und Karbondichtung werden im Folgenden beschrieben.

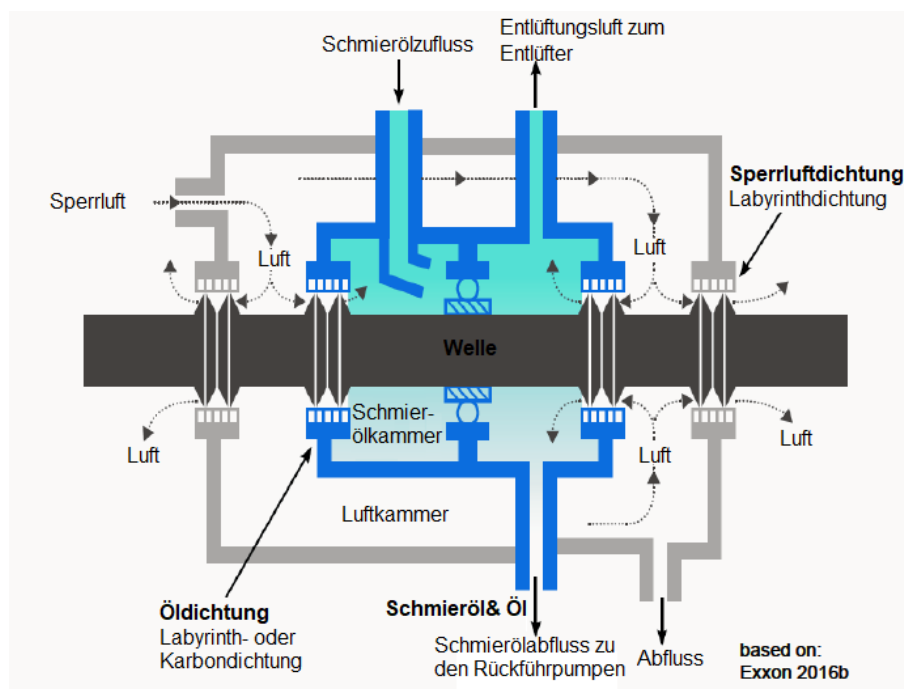


Abbildung 4.5.: Schematischer Aufbau der Luft- und Schmierölkammer [75], bearbeitet mit Paint

### 4.2.1. Labyrinthdichtung

Labyrinthdichtungen werden für alle äußeren Luftdichtungen und je nach Triebwerk auch für die inneren Öldichtungen an den Lagerkammern verwendet, siehe Abb. 4.5. Eine Labyrinthdichtung besitzt dabei ein geripptes rotierendes Element, welches sich an dem Rotor bzw. der Welle befindet und einen feststehenden Part, den Stator [61]. Wie in Abb. 4.6 zu sehen, ist der Rotor aus einer Vielzahl von Lamellen (dem Labyrinth) aufgebaut. Der Stator besteht aus einem weichen abreibbaren Material [60]. Beim ersten Lauf des Rotors reiben die Lamellen leicht gegen den Stator, schneiden so in diesen ein und erzeugen einen kleinen Spalt. Aufgrund des Spaltes zwischen den Lamellen und dem Stator zählt die Labyrinthdichtung zu den berührungslosen Dichtungen [60]. Dies bedeutet, dass die Schmierölkammer durch den Spalt (Lamelle-Stator) nicht komplett von der Luftkammer getrennt ist. Um ein Austreten von Ölnebel aus der Schmierölkammer zu verhindern, muss die Luftkammer einen höheren Druck gegenüber der Schmierölkammer aufweisen. Die Luftkammern der Lager 3, 4 und 5 im Trent 972 werden dabei über eine Leitung mit Luft aus dem Bereich zwischen dem Nieder- und Hochdruckverdichter versorgt. Diese Luft wird als Sperrluft bezeichnet. Da in der Schmierölkammer ein geringerer Druck als in der Lagerkammer herrscht, gelangt ein Teil der Sperrluft in die Schmierölkammer, siehe Abbildung 4.5 [61]. Der Luftmassenstrom strömt dabei immer entlang des Druckabfalls und dichtet so das Lager ab. Der Abstand des Spaltes zwischen Rotor und Stator ist dabei entscheidend für die durchströmende Sperrluftmassenstrommenge. Je kleiner der Spalt, desto weniger Sperrluft gelangt in die Schmieröllagerkammer, wodurch die Wahrscheinlichkeit bei einer funktionstüchtigen Dichtung sinkt, dass Ölnebel austritt. Durch diesen Aufbau wirken die scharfkantigen Lamellen in der Dichtung für die Sperrluft und ggf. für den Ölnebel wie mehrere Widerstände. Entsprechend Abb. 4.6 wird die Luft in dem kleinen Spalt zwischen Rotor und Stator aufgrund der Verringerung der Öffnungsfläche beschleunigt und sofort danach wieder durch den anschließenden Hohlraum abgebremst [8]. Dabei entsteht über jeder Dichtungslamelle ein Druckabfall, der zu einer begrenzten Strömung von einer Seite der Dichtung zur anderen führt. Der Sperrluftmassenstrom in den Lagern muss minimiert werden, um die Effizienz des Triebwerks zu verbessern [61].

Die Labyrinthdichtungen werden oft für die Abdichtung von den Schmieröl- und Luftkammern verwendet, da sie unter anderem kostengünstig sind, eine geringe Komplexität aufweisen, wenig Bauraum benötigen, einen geringen Verschleiß haben und unter extremen Bedingungen, wie hohen Einsatztemperaturen, hohen Drücken und hohen Drehzahlen einsatztauglich sind [8], [61].

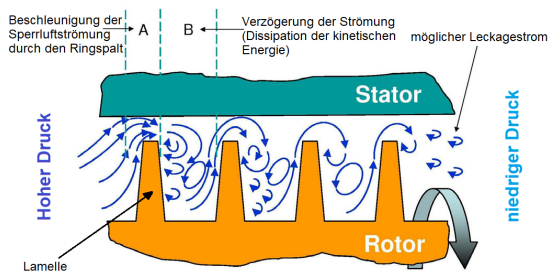


Abbildung 4.6.: Strömungsverlauf der Sperrluft in einer Labyrinthdichtung [61], bearbeitet mit Paint

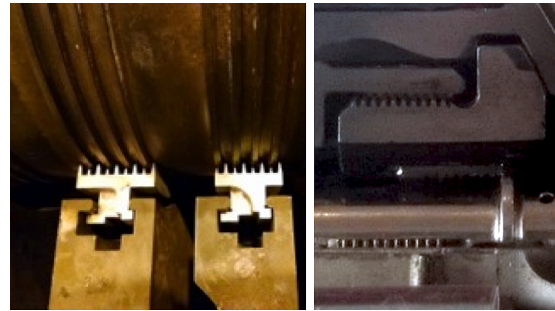


Abbildung 4.7.: Aufbau einer Labyrinthdichtung im Triebwerk [61], bearbeitet mit Paint

### 4.2.2. Karbondichtung

Für die Öldichtung wird neben der Labyrinthdichtung alternativ die Karbondichtung verwendet, siehe Abb. 4.5. Wie die Labyrinthdichtung besitzt auch diese Dichtung dieselben Aufgaben und Funktionen. So dichtet auch sie die Schmieröllagerkammer ab, begrenzt den Sperrluftverlust und verhindert, dass Ölnebel aus der Schmierölkammer in den Kabinenluftstrom gelangt [17]. Im Vergleich zu der Labyrinthdichtung besitzt die Karbondichtung jedoch eine bessere Dichtwirkung bei hohen Einsatztemperaturen. Ihr Nachteil ist, dass sie teurer, komplexer und wartungsintensiver ist [69]. Wie die Labyrinthdichtung besteht auch die Karbondichtung aus einer rotierenden Welle und einem feststehenden Stator. Die Dichtung bildet sich zwischen einer feststehenden und einer rotierenden flachen Oberfläche aus, siehe Abb. 4.8 [7]. Beide Oberflächen müssen dabei komplett eben sein, um Leckagen zu verhindern. Der statische Teil besteht aus einem Kohlenstoffring, der ständig an dem flachen Oberflächenstück/Dichtungsring der rotierenden Welle reibt. Mehrere Federn werden verwendet, um über die Federkraft genug Belastung aufzubringen, um den Kohlenstoffring an den Dichtungsring der Welle zu pressen. Anders als bei der Labyrinthdichtung muss die Karbondichtung mit Schmieröl geschmiert werden, um eine hohe Lebensdauer zu erreichen [35], [61]. Dabei wird eine kleine Menge an Dichtungsschmieröl über die flachen Flächen in den Dichtungsspalt gedrückt, der zwischen dem rotierenden Dichtungsring und dem stationären Karbonring angeordnet ist. Aufgrund der Schmierung wird die Karbondichtung auch als Flüssigkeitsdichtung bezeichnet. Um die austretende Schmierölmenge gering zu halten, muss die Menge an Dichtungsschmieröl minimiert werden [84]. Dieser dünne Ölfilm im Dichtungsspalt besitzt typischerweise eine Dicke unter  $1 \mu\text{m}$ . Dabei soll der Ölfilm ausreichend dick sein, um eine hohe Lebensdauer zu garantieren, aber auch so dünn wie möglich sein, um Leckagen zu minimieren [61]. Die aus der Schmieröllagerkammer austretende Schmierölmenge beträgt einige ppm/min bis  $10 \text{ cc/min}$  [7].

Ein großes Problem dieser Dichtungsart ist, dass sich durch die Berührung der Flächen viel Wärmeenergie bildet. Die durch Reibung entstehende Wärme wird über das Ölsystem abgeführt [54].

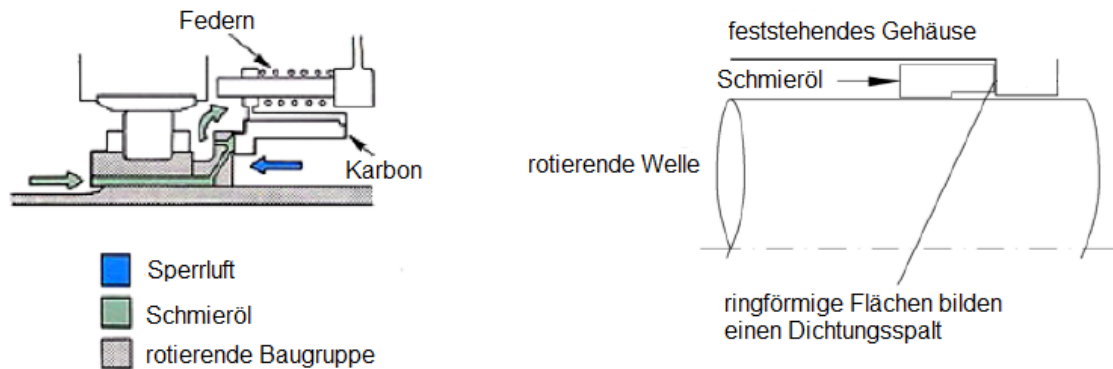


Abbildung 4.8.: Aufbau einer Karbondichtung [61], bearbeitet mit Paint

## 4.3. Das Schmierölsystem

Die in Kapitel 4.1 erwähnten Kugellager werden zur Reduzierung des Verschleißes mit Schmieröl versorgt. Das Schmierölsystem ist ein in sich geschlossenes rezirkulierendes System im Triebwerk, bei dem das Schmieröl durch eine Ölpumpe zu den einzelnen Lagern transportiert wird [60]. Die Hauptaufgaben dieses Systems sind unter anderem:

- die reibungsarme Lagerung der Welle
- die kontinuierliche Schmierölaufuhr und Entnahme in den Lagern
- das Kühlen der Lager
- das Entfernen von Verschmutzungen aus den Lagern
- der Korrosionsschutz [8]

Um dieses System zu überwachen, sind verschiedene Sensoren im Schmieröltank und den einzelnen Filtern montiert. Diese überwachen die Temperatur, den Schmieröldruck, die Ölmenge und die Filterdruckdifferenz (Druck vor dem Filter in Bezug zum Druck nach dem Filter). Die Sensordaten werden an das Cockpit gesendet, im Bordcomputer gespeichert und sind so für die Piloten einsehbar [29]. Das Schmierölsystem kann in drei Untersysteme

unterteilt werden: Das Bevorratungs- und Versorgungssystem, das Rücklaufsystem und das Entlüftungssystem [54]. Diese Systeme werden im Folgenden in genannter Reihenfolge erklärt.

### 4.3.1. Bevorratungs- und Versorgungssystem

Das Bevorratungs- und Versorgungssystem ist für die Bereitstellung der Lager mit Schmieröl zuständig.

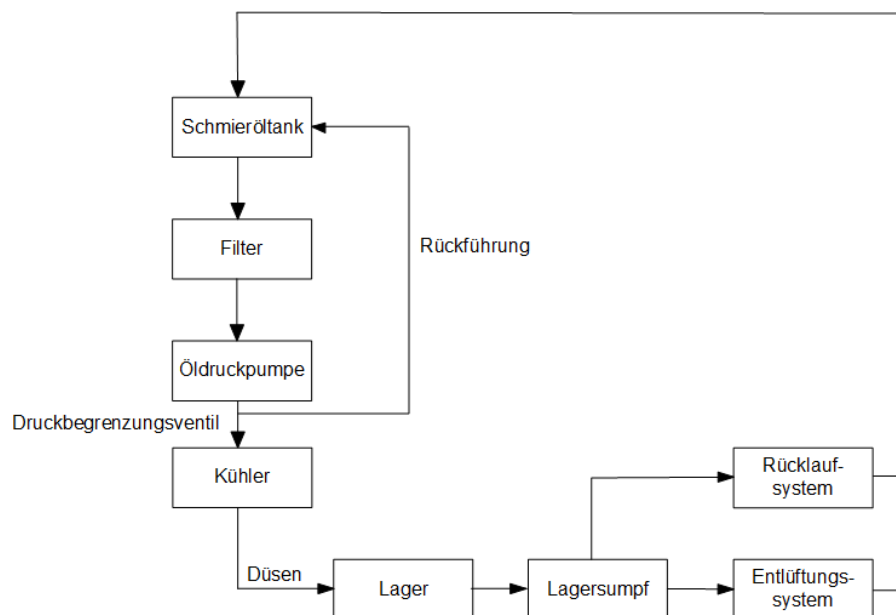


Abbildung 4.9.: Darstellung des Schmierölweges im Bevorratungssystem

Wie Abbildung 4.9 zeigt, wird das Schmieröl durch eine Öldruckpumpe aus dem Schmieröltank befördert. Das Schmieröl passiert dabei am Tankauslass einen Filter, der Verunreinigungen zwischen 0,015 und 0,065 mm Größe filtert [54], um die Öldruckpumpe vor Verunreinigungen zu schützen [8]. Die Öldruckpumpe basiert auf dem Prinzip einer Zahnradpumpe, die bei einer Umdrehung der Pumpe, bzw. des Weiterdrehens eines Zahnes, einen bestimmten Volumenbetrag an Schmieröl pumpt [8]. Je nach Umdrehungszahl wird mehr oder weniger Schmieröl gefördert und der Druck steigt oder fällt im gesamten Schmierölssystem. Am Beispiel des V2500-A5 Triebwerkes variiert der von der Schmieröldruckpumpe eingestellte Druck im System je nach Flugphase. Im Reiseflug besitzt das System einen Druck von  $\sim 18$  bar [54]. Um das System vor zu hohen Drücken zu schützen, wird ein Druckbegrenzungsventil nach der Pumpe montiert. Dieses Ventil sorgt ab einem Druck von 31 bar dafür, dass ein Teil des Ölstromes über die Rückführung zurück in den Tank geleitet wird [8]. Das Schmieröl besitzt im Reiseflug sowohl im Schmieröltank als auch

im Filter und in der Öldruckpumpe eine Temperatur von über 120 °C, da durch die Erwärmung des Schmieröls in den Schmierölkammern keine Kühlung in der Rückführung stattfindet. Da das Schmieröl erst nach der Öldruckpumpe gekühlt wird, wird das gesamte System als Heißtanksystem bezeichnet [54]. Um die Lager im Anschluss zu kühlen, wird das Schmieröl in einem Brennstoff-Öl-Wärmeübertrager auf 110 – 120 °C gekühlt [54]. Das Schmieröl gibt seine Wärme an den Brennstoff im Wärmetauscher ab. In manchen Triebwerken wird auch ein Luft-Öl-Wärmeübertrager verwendet. Dieser Wärmeübertrager benötigt allerdings bei gleicher Kühlleistung ein größeres Bauvolumen. Deshalb werden Brennstoff gekühlte Ölkühler bevorzugt [54]. Über speziell ausgerichtete Düsen wird das Schmieröl direkt auf die einzelnen Lager gesprüht, siehe Abbildung 4.9. Nach Beendigung der Schmier- und Kühlaufgaben wird das Schmieröl zu den Sumpfen in jeder Lagerkammer geleitet. Von diesen Ölsumpfen gelangt das Schmieröl in das Entlüftungssystem.

### 4.3.2. Das Entlüftungssystem

Ein weiteres Untersystem ist das Entlüftungssystem. Dieses ist für die Trennung des Schmieröls von der Luft zuständig. Zum Schutz vor einem Ölnebel-Austritt aus der Schmierölkammer, werden diese mit Dichtungen (Labyrinth- oder Karbondichtungen) abgedichtet. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben worden ist, gelangt Sperrluft in die Schmierölkammer.

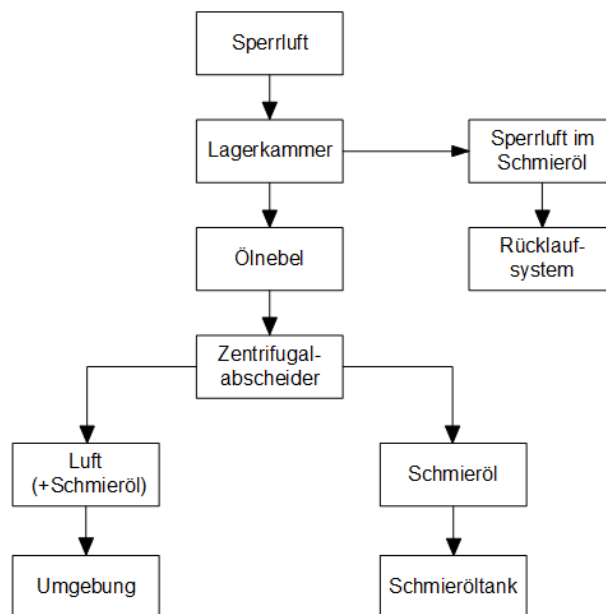


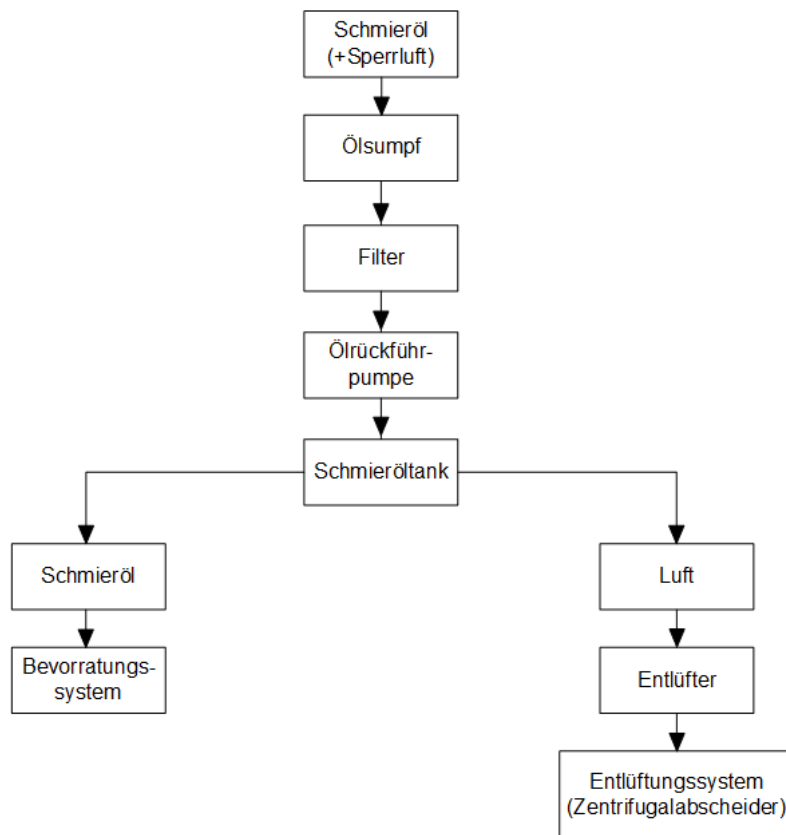
Abbildung 4.10.: Prinzip des Entlüftungssystems

Wie im Schaubild 4.10 zu sehen ist, verbindet sich ein geringer Teil der Sperrluft mit dem Schmieröl in der Lagerkammer und wird dem Rücklaufsystem zugeführt. Der größte

Teil der Sperrluft vermischt sich mit dem Schmieröl und bildet den Ölnebel. Da der Ölnebel über dem Ölsumpf steht, wird dieser aus der Schmierölkammer abgelassen und zum Zentrifugalabscheider geleitet. Hier wird die Luft vom Schmieröl getrennt. Mittels Zentrifugalkraft werden die schwereren Öltropfen nach außen geschleudert, am Boden des Abscheiders gesammelt und wieder in den Schmieröltank zurückgeführt. Aus der Mitte des Abscheiders wird die Luft entnommen und von Bord gelassen [54]. Diese Luft ist dabei immer noch schwach mit Schmieröl kontaminiert. Eine vollkommene Trennung von Schmieröl und Luft ist nicht möglich. Insgesamt gehen auf diesem Weg rund 0,1 bis 0,5 l/h über Bord. Dieser Anteil entspricht dem Schmierölverbrauch des Triebwerkes [54].

### 4.3.3. Rücklaufsystem

Das Rücklaufsystem sorgt für das Abpumpen des Ölsumpfs aus der Schmierölkammer und die Rückführung in den Schmieröltank. Das gesammelte Schmieröl wird über eine Ölrückförpumppe aus der Ölwanne herausgezogen und zurück in den Schmieröltank geführt.



**Abbildung 4.11.:** Rücktransport des Schmieröls aus den Lagerstämpfen in den Schmieröltank



Der zum Tank zurückfließende Schmierölstrom ist eine Mischung aus Schmieröl und Sperrluft [54]. Bevor die Mischung die Ölrückförpumppe passiert, wird diese durch einen Filter geleitet, um eventuell Abriebe von der Welle oder dem Lager zu filtern und die Pumpe so vor Partikeln zu schützen. Die Ölrückförpumppe basiert auf dem Prinzip einer Zahnradpumpe äquivalent zur Öldruckpumpe [54]. Die Schmierölrückflusströme aus den verschiedenen Lagerkammern werden nach der Pumpe in einer Leitung gesammelt und weiter in den Schmieröltank geleitet [8]. Im Schmieröltank wird das Schmieröl von eventuell mitgeführter Luft über einen Entlüfter befreit. Der Entlüfter saugt die Luft an, die sich oberhalb des Schmieröls sammelt. Über eine Leitung gelangt diese zu dem Entlüftungssystem. Dabei wird die Luft, die mit Schmieröl kontaminiert ist, über die Entlüftungsleitung in den Zentrifugalabscheider geleitet [54]. Wenn das Schmieröl nicht über das Rücklaufsystem aus den Lagerwannen entfernt werden würde, würde das Schmieröl durch die Lageröldichtungen in den Kompressor gedrückt werden. Eine solche Leckage kann zu Verbrennungen und Fehlfunktionen des Dichtungslagers führen und könnte so zu einem Fume Event führen [32], [61].

## 4.4. Das Schmieröl

Für das Schmierölsystem werden ausschließlich synthetisch hergestellte Schmieröle verwendet, da diese Temperaturen von  $-40$  bis  $+250$  °C und einem Druck von bis zu 18 bar standhalten müssen [54]. Die Schmieröle werden durch einen speziellen Herstellungsprozess produziert [30] und verfügen im Vergleich zu anderen Schmierölen über Vorteile wie eine höhere Temperaturbeständigkeit, eine höhere Fließfähigkeit sowie eine Pumpfähigkeit auch bei niedrigen Temperaturen [60]. Durch diese Eigenschaften senken synthetische Schmieröle den Verschleiß, verlängern die Lebensdauer der Lager und reduzieren so den Kraftstoffverbrauch und die Motorwartung [58], [30]. Das Schmieröl übernimmt im Schmierölsystem Aufgaben wie z.B.:

- das Reinigen und Schmieren der Lager
- das Abdichten der Lagerkammern
- die Hemmung von Korrosion und Oxidation
- das Einbringen von chemischen Additiven, um die Lager vor Schäden zu schützen [60]

Um diese Aufgaben zu erfüllen, besteht das Schmieröl aus einer Grundbasis, Antiverschleißadditiven, Korrosionsinhibitoren und Antioxidantien, die im Folgenden anhand des

Schmieröls Mobil Jet Oil 2 erklärt werden. Dieses Schmieröl wurde 1963 von ExxonMobil entwickelt und hält einen Marktanteil von über 50 % [60]. Da synthetische Schmieröle eine Reihe von toxischen Inhaltsstoffen, wie Neurotoxine und Hautsensibilisatoren beinhalten, werden in diesem Kapitel auch mögliche gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen betrachtet. Da von den Schmierölherstellern keine exakten Angaben über die Menge der Inhaltsstoffe bekannt gegeben werden, ist eine genaue Beurteilung der Toxikologie des Schmieröls nicht möglich [60].

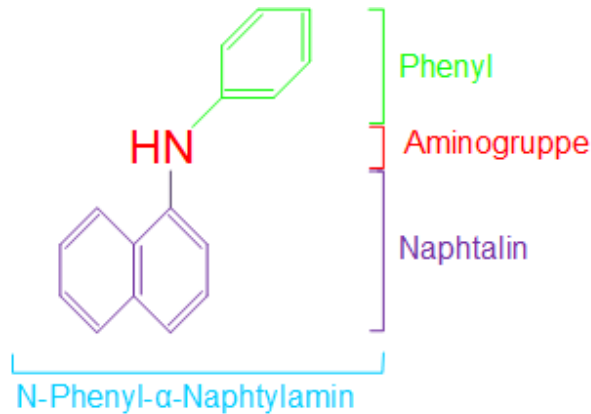
### 4.4.1. Die Grundbasis

Das Schmieröl besteht zu 95 % aus einer Grundbasis, die eine Mischung aus drei Hauptinhaltsstoffen ist. Diese Inhaltsstoffe sind eine Veresterung der Grundstoffe Pentaerythritol (PE), Dipentaerythritol und/oder Trimethylolpropan (TMP/TMPE) [41]; [85]. Diese sind aus langen Kohlenwasserstoffketten aufgebaut, die sich lediglich durch die unterschiedliche Anlagerung von Stoffen an die Kohlenwasserstoffketten unterscheiden. Ein großer Vorteil dieses Basisstoffes ist es, dass er hohen Temperaturen standhält, ohne dass die Kohlenwasserstoffketten brechen [58]. Je nach Hersteller variiert diese Grundbasis. Eine exakte Zusammensetzung wird von den Ölherstellern nicht bekannt gegeben, das ist Betriebsgeheimnis. Es gibt lediglich Annahmen über die Zusammensetzung. Beim Schmieröl Exxon 85 wird angenommen, dass der Basisstoff aus ungefähr 60 % Trimethylolpropanester (TMP) und 35 % Dipentaerythritol besteht [60].

Bekannt ist, dass TMP eine Reizung der Augen und der Atemwege verursachen kann [60]. Da es sich beim Exxon 85 Schmieröl um eine Veresterung von TMP, PE oder Dipentaerythritol handelt, kann nicht ohne weiteres ein direkter Rückschluss von den Schmierölprodukten auf die gesundheitlichen Beeinträchtigungen von Fluggästen mit den oben beschriebenen Symptomen gezogen werden.

### 4.4.2. Antioxidantien

Durch die teilweise sehr hohen Temperaturen von über 240 °C im normalen Betrieb, würde es ohne die Hinzugabe von Additiven zu einem schnellen Alterungsprozess des Schmieröls kommen [54]. Wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, besteht die Grundbasis des Schmieröls aus langen Kohlenwasserstoffmolekülen. Bei sehr hohen Temperaturen brechen diese langen Ketten und es entstehen freie hochreaktive Valenzen [81]. Als Valenzen werden freie Stellen in der äußersten Hülle der Moleküle bezeichnet. Da jedes Molekül bestrebt ist, eine volle äußere Hülle zu besitzen, werden freie Valenzen sofort durch andere Atome aufgefüllt. Wie in Kapitel 4.2 bereits kurz erwähnt, gelangt durch die Dichtungen Sperrluft



**Abbildung 4.12.:** Chemischer Aufbau von N-Phenyl- $\alpha$ -Naphthylamin (PAN)

in die Lagerkammern. Der Sauerstoff der Luft würde sich umgehend an die freien Enden der Ketten anlagern (Oxidation) und dadurch die Konsistenz des Schmieröls durch lack-, harz- und schlammartige Ablagerungen dickflüssiger werden lassen [81]. Um eine frühzeitige Oxidation des Schmieröls zu verhindern, werden dem Schmieröl Antioxidantien wie N-Phenyl- $\alpha$ -Naphthylamin (PAN) beigemischt. Der Anteil der Antioxidantien beträgt ungefähr 1 % der Gesamtlösung [41]. Das Additiv besteht aus den drei Bestandteilen: Phenyl, Naphtalin und einer Aminogruppe, siehe Abbildung 4.12. Alle drei Bestandteile für sich können sehr gut Sauerstoff binden. In der Kombination im PAN binden sie den Sauerstoff jedoch viel schneller [70].

Bei der Benutzung von Antiverschleißadditiven ist zu beachten, dass die anfängliche Menge mit der Zeit abnimmt. Gerade bei den langen Ölwechselintervallen, wie es mittlerweile in der Luftfahrt üblich ist, nimmt deshalb die Oxidationsgeschwindigkeit des Schmieröls zu [81].

Auch im Mobil Jet Oil 2 wird PAN als Antiverschleißadditiv verwendet. Die technische Reinheit von PAN beträgt knapp 99 %. Der Rest sind Verunreinigungen, wie  $\beta$ -Naphthalinamin (3–50 ppm) (BNA), Phenyl- $\beta$ -Naphthylamin (500–5000 ppm) (PBN), 1-Naphthylamin (100–500 ppm) (ANA), Aniline (100–2500 ppm) und 1, 1-Dinaphthylamin (kleiner als 1000 ppm)[86].

Beim Menschen ist ab einer Konzentration von 1 % mit dem Antioxidantien-Additiv PAN eine Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich [60]. Die eben genannten Verunreinigungen BNA und PBN werden als krebserregend eingestuft [60]. So wurde bei Personen, die mit einem Rostschutzöl gearbeitet haben, das insgesamt 0,5 % PAN enthielt, eine höhere Wahrscheinlichkeit für verschiedene Formen von Krebs diagnostiziert. Im Gegensatz hierzu wurde bei einer Langzeitstudie bei Mäusen und Ratten mit dem Stoff PAN keine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Krebs festgestellt [88]. Aufgrund der widersprüchlichen

Aussagen lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang nachweisen. PAN wird von dem Menschen über die Haut und die Einatmung aufgenommen und im Körper durch chemische Prozesse umgewandelt [87]. Dabei bewirkt PAN eine Hautempfindlichkeit [58]. Bei einer einmaligen Einnahme hat PAN eine niedrige Toxizität.

#### 4.4.3. Antiverschleißadditive

Zusätzlich zu den Antioxidantien werden dem Schmieröl noch Antiverschleißadditive beigemischt, um die Komponenten vor dem schnellen Verschleiß zu schützen. Wird das Lager und die Welle nicht vollständig mit Schmieröl benetzt, berühren sich die beiden Komponenten und es kommt zu einem erhöhten Verschleiß [81]. Der Anteil der Additive beträgt in der Gesamtlösung knapp 3 % [85]. Als Additive werden unter anderem Triarylphosphat und Tricresylphosphat (TCP) eingesetzt [60]. Beim Mobil Jet Oil 2 besteht das Additiv aus TCP. Anhand des TCPs wird die Funktionsweise der Additive im Folgenden erklärt. Der Aufbau ist in Abbildung 4.13 zu sehen. An die polare Phosphorguppe sind drei unpolare Methylphenylgruppen über den Sauerstoff angelagert. Je nachdem, an welcher Stelle sich die Cresylgruppe anlagert, wird zwischen ortho-, meta- oder para-TCP unterschieden [60]. Die Lage dieser Cresylgruppe entscheidet dabei über die Toxizität des TCPs. Das Cresyl ist eine hochverzweigte Kohlenwasserstoffkette und in der Abbildung 4.14 in der Farbe Türkis dargestellt [70].

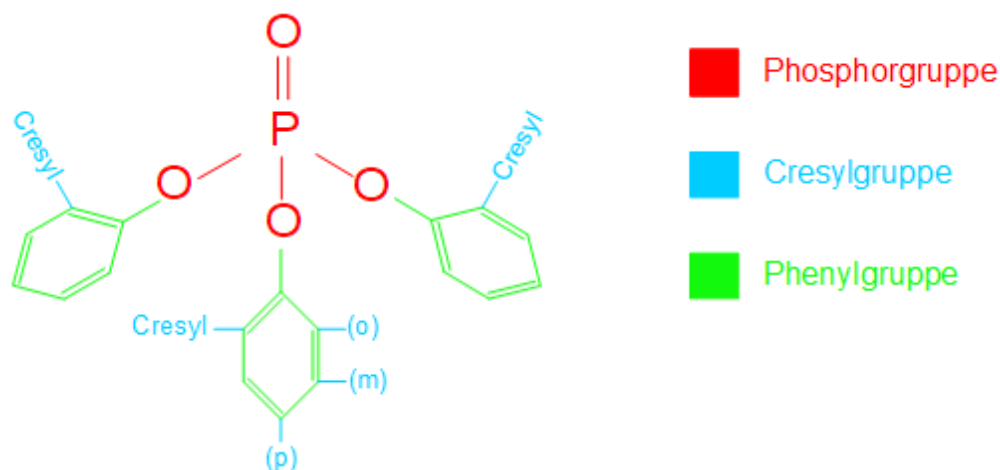
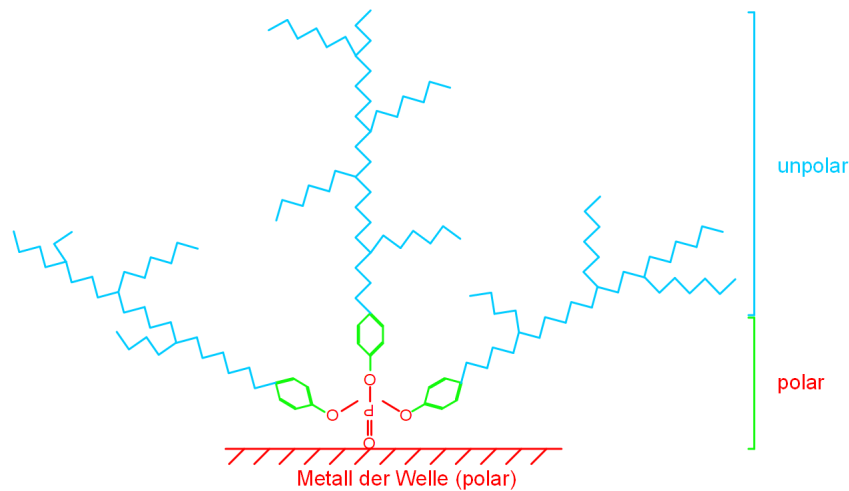


Abbildung 4.13.: Chemischer Aufbau des TCP Moleküls [70]

Auch das Material der Triebwerkswelle besteht aus einer polaren Gruppe, sodass sich die Phosphatgruppe aktiv an die polare Welle anlagert. Es kommt zu einer Anziehung zwischen dem Phosphat und der Welle. Die unpolaren Kohlenwasserstoffe des Cresyls

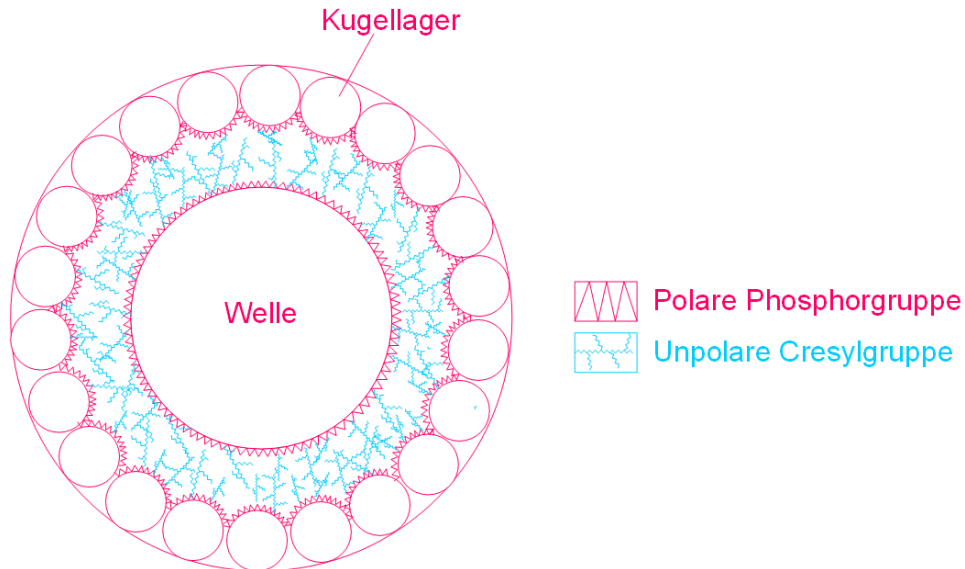
sind dabei bestrebt, das polare Metall nicht zu berühren. Sie bewegen sich in den Raum hinein, siehe Abbildung 4.14.



**Abbildung 4.14.:** Schematische Darstellung der Wechselwirkung des TCP Moleküls mit der Welle

Das TCP baut zwischen den Komponenten, wie den Kugeln des Lagers und der Welle, eine dünne Schicht auf, die im normalen Betrieb eine feste Schicht an den Komponenten bildet [81]. Kommt es aufgrund eines Schmierölmangels zu einem direkten Kontakt zwischen Welle und Lager, bilden die angelagerten Moleküle einen Schutz vor Abrieb, da die angelagerten Phosphorgruppen sich auch bei einem Schmierölmangel nicht von dem Metall trennen. Die unpolaren Seitenketten bilden eine Schutzschicht zwischen den Komponenten, siehe Abbildung 4.15. Ein Verschleiß wird so verhindert.

Beim Menschen können Organophosphate eine Verengung der Atemwege, eine Störung des Sauerstofftransportes im Blut oder sogar eine Atemlähmung auslösen. Symptome hierfür sind unter anderem Schwierigkeiten beim Atmen, ein hoher Puls, bläuliche Lippen, apathisches Verhalten, Bewusstlosigkeit. Es können auch Kopfschmerzen, Schwindel, Schläfrigkeit und Verwirrung auftreten [42], [85]. Darüber hinaus kann eine hohe Organophosphat-Belastung/ Vergiftung auch chronische Symptome verursachen, wie Kopfschmerzen, geistige Erschöpfung, Depressionen, Angstzustände, Reizbarkeit, verminderte Konzentration, eingeschränkte Wachsamkeit, reduzierte Informationsverarbeitung, Gedächtnisstörungen und Sprachstörungen [85]. Gerade ToCP wirkt auf den Menschen neurotoxisch und wird als krebserzeugend eingestuft [58]. Als ToCP wird dasjenige TCP bezeichnet, bei dem die Cresylgruppe am dichtesten am Sauerstoffmolekül gelagert ist. Aufgrund seiner neurotoxischen Wirkung versuchen Schmierölhersteller, den Anteil des ToCPs möglichst gering zu halten. Der Anteil beträgt knapp 0,01 % (93ppm) [85]. Auch andere Arten der Cresylphosphate sind für den Menschen neurotoxisch, wie die Di-/Monocresylphosphate, bei



**Abbildung 4.15.:** Aufbau der Schutzschicht der TCP Moleküle zwischen den Wellensystemen und den Kugellagern

diesen Cresylphosphaten entscheidet die Lage der Cresylgruppe über die Toxizität. Die DoCPs sind fünfmal neurotoxischer und die MoCPs zehnmal neurotoxischer als die ToCPS [60]. Die Gesamtoxizität des TCPs hängt daher von der spezifischen Zusammensetzung ab [85].

- ToCP tritt in einer Konzentration von 0,005 ppm im Mobil Jet Oil 2 auf
- DoCP (Diorthocresylphosphat) in einer Konzentration von 6 ppm
- MoCP (Monoorthocresylphosphat) in einer Konzentration von 3070 ppm [85]

Allgemein ist TCP geruchs- und farblos, sein Siedepunkt liegt bei 410 °C, bei einer höheren Temperatur zerfällt das TCP [85].

Neben den Antiverschleißadditiven, den Antioxidantien und den Korrosionsinhibitoren befinden sich im Schmieröl noch weitere Stoffe wie Benzamin, 4-Octyl-N- (4-Octylphenyl), Dioctyldiphenylamin (DODPA), das auch als Antioxidantienadditiv wirkt [60], N-Phenylbenzolamin und Reaktionsprodukte mit 2,4-Trimethylpenten / Diphenylamine Alkyle. Dieses Gemisch an Stoffen macht ungefähr 0,1 – 1 % der Gesamtlösung des Öls aus.

# 5. Entstehung von Öldämpfen in der Flugzeugkabine

Während des Fluges oder dem Be- und Entladen des Flugzeuges am Boden können Schmierölgerüche und Öldämpfe die Flugzeugkabine kontaminieren. Treten Schmierölkontaminationen in der Kabine während des Fluges auf, sind Dichtungsleckagen im Triebwerk verantwortlich. Werden Schmierölgerüche oder Öldämpfe im Flugzeug während des Be- und Entladens am Flughafen wahrgenommen, sind Dichtungsleckagen in der APU verantwortlich.

In den ersten beiden Unterkapiteln werden zunächst die Kontaminationsmöglichkeiten der Flugzeugkabine durch das Triebwerk erläutert. Dabei wird der Weg des Ölnebels in die Kabine dargestellt. Die Kontaminationsmöglichkeiten sind in einem Schaubild im Anhang A.2 dargestellt. Anschließend wird die Schmierölkontamination durch die APU erläutert.

## 5.1. Wie gelangt Ölnebel aus den Lagern in die Kabinenluft?

Wenn Ölnebel den kleinen Spalt der Öldichtung aus dem Lager passiert, wird die Sperrluft in der Luftkammer mit diesem Nebel kontaminiert. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, gelangt die kontaminierte Sperrluft über die Sperrluftdichtung in den Bereich zwischen den Nieder- und Hochdruckverdichter. Dort vermischt sich die mit Ölnebel kontaminierte Sperrluft mit dem Luftmassenstrom aus dem ND-Verdichter und gelangt in den HD-Verdichter. Im HD-Verdichter pyrolysiert der in der Luft enthaltene Ölnebel zu Öldampf. Pyrolyse bezeichnet dabei das Zerfallen der Schmieröl-Moleküle im Ölnebel durch die hohen Temperaturen im HD-Verdichter. Die Schmierölpartikel im Dampf sind dabei kleiner als  $1 \mu\text{m}$  [73]. Chemisch gesehen, entsteht durch das Zerfallen der feinen Ölpartikel in der Luft, ein gasförmiger Zustand des zerfallenen Schmieröls [9]. Das zerfallene Schmieröl

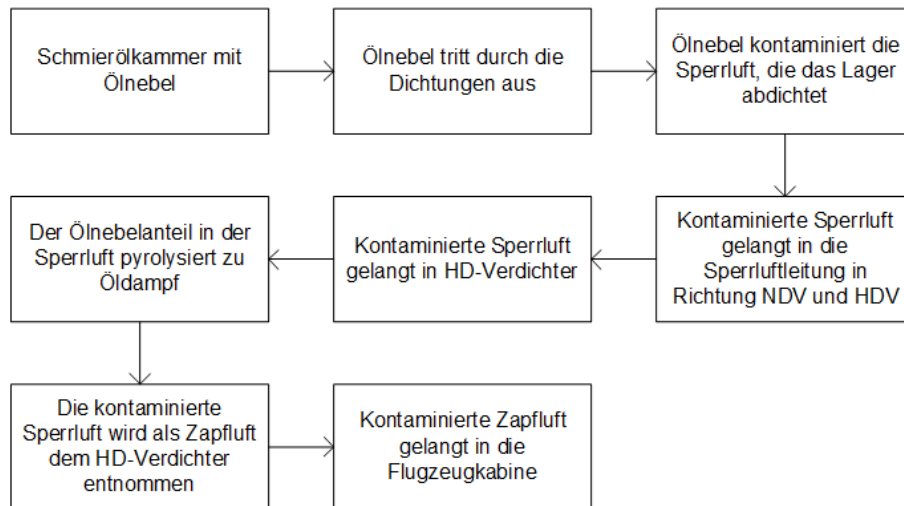


Abbildung 5.1.: Weg des Ölnebels aus der Schmierölkammer in die Flugzeugkabine

liegt in einer gasförmigen Phase in der Luft vor. Der Einfachheit halber wird im folgenden Text dieser Zustand weiter als Öldampf bezeichnet.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wird aus dem HD-Verdichter die Luft für die Kabine entnommen. Die kontaminierte Sperrluft wird als Zapfluft in einer Stufe des Hochdruckverdichters entnommen und gelangt über den Precooler zu den Klimapacks und anschließend in die Mischeinheit. Von dort wird die kontaminierte Zapfluft über die Ventile in die Kabine geleitet. Die Flugzeugkabine ist kontaminiert.

Um den Weg der kontaminierten Sperrluft in einem Schnittbild des Triebwerks nachzuvollziehen, ist dieser in Abbildung 5.2 farblich dargestellt. In dem Schnittbild ist der Weg der Luft durch das Triebwerk bei dichten Lagern abgebildet.

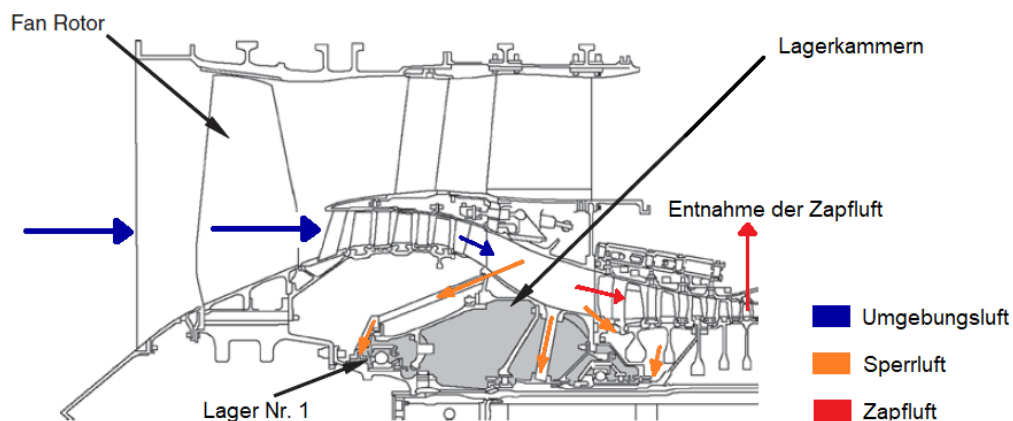


Abbildung 5.2.: Verlauf der Luft durch das Triebwerk CFM56-7B bei dichten Lagern [54], bearbeitet mit Paint



Bei einer Kontamination der Sperrluft gelangt der Ölnebel über den orange farbigen Pfad in den Bereich entgegen der Pfeilrichtung zwischen Niederdruck- und Hochdruckverdichter, siehe Abbildung 5.3. Dort vermischt er sich mit der blau gekennzeichneten Umgebungsluft, die vom Fan kommt und bildet die Zapfluft. Die kontaminierte Zapfluft wird in der 5. oder 9. HD-Verdichterstufe entnommen, je nach Umdrehungszahl der Wellen. Für die Kontamination der Kabinenluft durch Öldämpfe sind im Trent 972 aufgrund der Dreiwelligkeit des Triebwerkes die ersten fünf Lager von Relevanz. Bei einem zweiwelligen Triebwerk, wie z.B. beim PW6000 (A320), sind die ersten 3 Lager für eine Kontamination der Zapfluft verantwortlich. Ist eines dieser Lager undicht und verliert größere Mengen an Ölnebel, kommt es zu einer Schmierölkontamination. Sind die hinteren drei Lager von undichten Lagerdichtungen betroffen, kann die Kabinenluft nicht kontaminiert werden, da diese nicht durch den Hochdruckverdichter gelenkt wird. Dennoch ist dieser Zustand problematisch, da der austretende Ölnebel mit heißen Komponenten der Turbine in Verbindung kommt. Dies kann im schlimmsten Fall zu einem Brand des Ölnebels und einem Turbinenbrand führen. Wird eine Leckage bei einem der Lager erkannt, führt dies immer zu einem Ausbau des Triebwerkes [54].

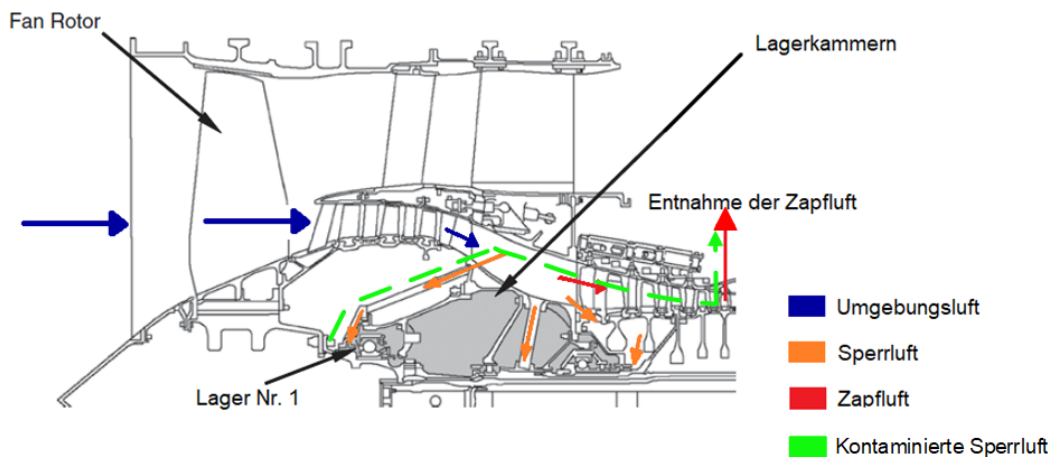


Abbildung 5.3.: Verlauf der Luft durch das Triebwerk CFM56-7B bei undichten Lagern [54], bearbeitet mit Paint

## 5.2. Ursachen für Öldampf in der Kabine während der Flugphase

Für das Auftreten von Öldämpfen in der Kabine sind mehrere Ursachen verantwortlich. Diese können Auswirkungen hervorrufen, wie:

- Eine hohe Luftleckage über der Dichtung, die eine minimierende Triebwerksleistung bewirkt
- Die Aufnahme von Partikeln, durch die Komponenten beschädigt werden können [36]
- Eine schlechte Reaktion auf die Dynamik der Welle (permanente Erhöhungen der Dichtungsspielräume durch Wellenauslenkungen bei Stopp-/ Start-/ Übergangsbedingungen) [16], [61]
- Große Freiräume in der Dichtung durch die wechselnden thermischen Bedingungen [56]

Im Folgenden werden die einzelnen Ursachen erklärt.

### 5.2.1. Mechanischer Abrieb

Die erste mögliche Ursache für das Auftreten von Öldampf in der Flugzeugkabine ist der mechanische Abrieb der Dichtungen. Durch Reibung unter Vibration, grobe Landungen und wechselnde thermische Bedingungen nimmt die Dichtungswirkung mit zunehmender Laufzeit immer weiter ab [56]. Bei den beiden Dichtungsarten, die in Kapitel 4.2 vorgestellt worden sind, führt dieser mechanische Abrieb zu einer Vergrößerung des Spaltes in der Dichtung. Durch diese Vergrößerung kann Ölnebel leichter aus der Schmierölkammer entweichen und so die Sperrluft kontaminieren. Dabei tritt eine akute Kabinenluftkontamination bedingt durch austretenden Ölnebel nur auf, wenn die Dichtung durch mechanischen Verschleiß einen vergrößerten Spalt besitzt. Das Austreten von Ölnebel wird durch die folgenden Ursachen begünstigt.

### 5.2.2. Das Daltonsche Prinzip

Eine weitere Ursache für das Austreten von Ölnebel in die Luftkammer ist das Daltonsche Prinzip. Dieses besagt, dass jedes Gas einen konstanten Partialdruck anstrebt [35]. Um

ein Austreten des Ölnebels aus der Schmierölkammer zu verhindern, herrscht im normalen Betrieb ein positiver Druckgradient zwischen der Luftkammer und der Schmierölkammer. Dennoch kann Ölnebel entgegen diesem Druckgefälle aus der Schmierölkammer austreten. Dies geschieht nach dem folgendem Prinzip: Angenommen, in der Schmierölkammer herrscht ein Luftdruck von 1 bar, der sich aus den einzelnen Partialdrücken des Ölnebels und der Sperrluft zusammensetzt und ein Luftdruck in der Luftkammer von 5 bar. Dann kann aufgrund des eben genannten Prinzips Ölnebel entgegen des Druckgradienten aus der Schmierölkammer austreten. In Abbildung 5.4 ist dieses Prinzip schematisch gezeigt. Zunächst befinden sich in der Schmierölkammer 0,2 bar Ölnebel und 0,8 bar Sperrluft. Über die Labyrinth- oder Karbondichtung ist diese Kammer mit der Luftkammer verbunden. Um denselben Partialdruck auf beiden Seiten der Dichtung zu erzeugen, gelangt Ölnebel über die Dichtung in die Luftkammer. In der Abbildung 5.4 wird der Ölnebel durch rote Punkte dargestellt. Anfangs beträgt der Partialdruck des Ölnebels in der Schmierölkammer 0,2 bar und in der Luftkammer mit der Sperrluft 0 bar. Im nächsten Schritt gelangt durch das Gesetz von Dalton, Ölnebel entgegen dem Druckgradienten in die Luftkammer. In der schematischen Darstellung würden in diesem Falle zwei rote Kugeln in die Luftkammer wandern. Es würde immer noch ein Druck von 5 bar herrschen, wobei sich dieser Druck diesmal aus 0,2 bar Ölnebel und 4,8 bar Sperrluft zusammensetzt.

Dieses Phänomen wird durch den jeweiligen Spaltabstand in der Dichtung beeinflusst. Ist der Spalt sehr groß, so kann der Ölnebel leicht entgegen des Druckgefälles in die

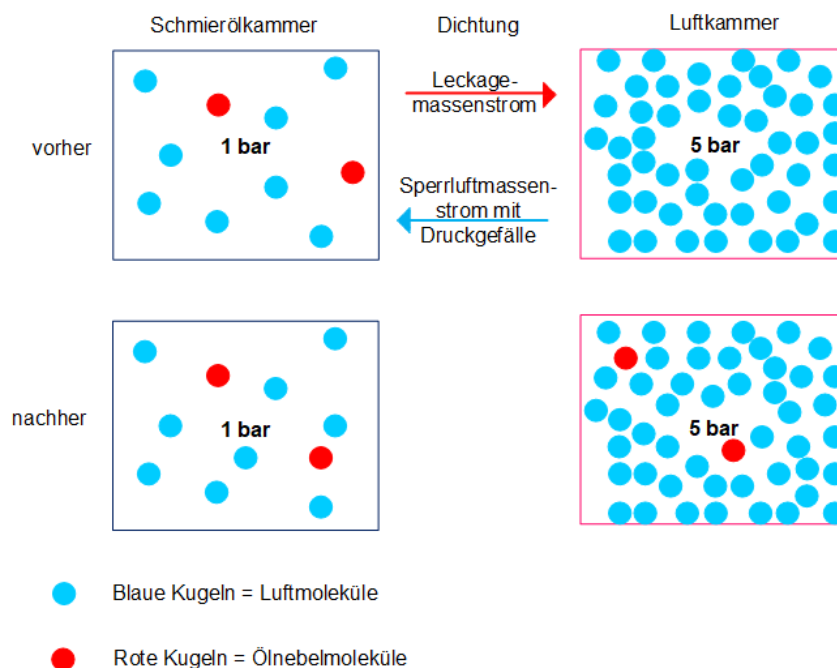


Abbildung 5.4.: Funktionsprinzip des Dalton'schen Gesetzes

Luftkammer wandern. Ist der Spalt jedoch sehr klein, wie es generell bei Dichtungen in der Luftfahrt im normalen Gebrauch vorgesehen ist, so kann der Ölnebel nur in minimalen Mengen aus der Schmierölkammer austreten. Es kommt zu kleinen Leckagen des Ölnebels in die Luftkammer. Dieser Ölnebelmassenstrom über der Dichtung wird auch als Leckagestrom bezeichnet. In Abbildung 5.5 ist dieser Leckagemassenstrom über einer Labyrinthdichtung eingezeichnet. Auch hier sind die unterschiedlichen Partialdrücke abgebildet [35].

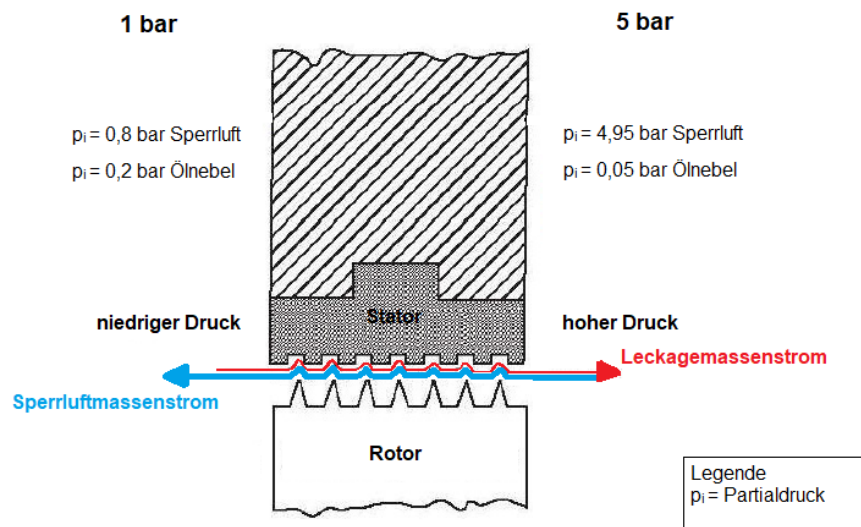
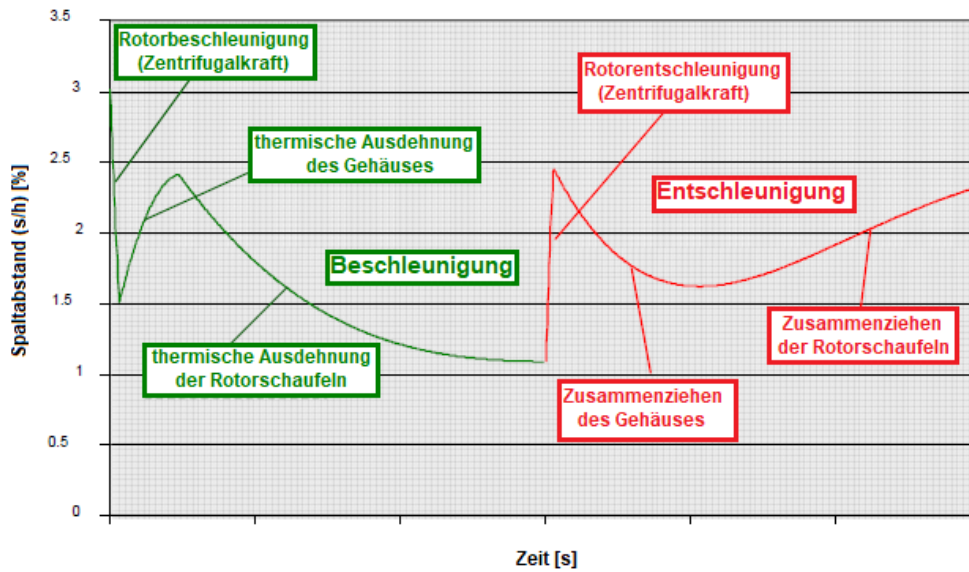


Abbildung 5.5.: Leckagemassenstrom des Ölnebels aus der Schmierölkammer in die Luftkammer [35], bearbeitet mit Paint

### 5.2.3. Leckage über der Labyrinthdichtung

Eine weitere Ursache für das Austreten von Ölnebel aus der Schmierölkammer könnte der variierende Spalt in den Labyrinthdichtungen abhängig von den verschiedenen Flugphasen sein. Auch bei den Rotoren im Fan, im Kompressor oder der Turbine variiert der Spalt je nach Flugzustand zu dem jeweiligen Gehäuse. Dieser Zusammenhang wird in der Abbildung 5.6 für die Beschleunigung und das Abbremsen des Triebwerks deutlich. Anhand dieser Darstellung wird der variierende Spaltabstand zwischen den Rotoren vom Fan bzw. Kompressor und Gehäuse erklärt.

Durch die Beschleunigung der Rotoren im Triebwerk nimmt die Zentrifugalkraft auf die Rotorblätter des Verdichters oder des Fans mit zunehmender Drehzahl zu. Durch diese Kraft dehnen sich die in sich verdrehten Rotorblätter aus, indem sie sich leicht entdrehen.



**Abbildung 5.6.:** Spaltabstand zwischen den Rotorblättern und Gehäuse während der Beschleunigung und Abbremsung eines Triebwerks [47], bearbeitet mit Paint

Durch diese minimale Entdrehung verkleinert sich der Abstand zwischen Rotorblatt und Gehäuse.

Bei einem zu kleinen Spalt würde die Gefahr bestehen, dass die Rotoren das Gehäuse berühren und so beschädigen. Ein zu großer Spalt hingegen vergrößert den Kerosinverbrauch des Flugzeuges [54]. Durch die Wärmezufuhr dehnen sich das Gehäuse und die Rotoren aus. Da das Gehäuse weniger Masse besitzt als die Rotorblätter, dehnt sich dieses schneller aus. Der Abstand zwischen Gehäuse und Rotorblättern nimmt zu. Diese Spaltzunahme wird durch den Anstieg der grünen Linie in der Abbildung 5.6 deutlich. Durch die höhere Masse der Rotoren nimmt die Ausdehnung durch die Erwärmung im Vergleich langsamer zu. Erst nach einer gewissen Zeit dehnen sich auch diese aus. Der Abstand zwischen Gehäuse und Rotoren verringert sich wieder. Bei einem Abbremsen der Rotoren z.B. für den Landeanflug, dreht sich der eben beschriebene Prozess um. Dies wird in der Abbildung 5.6 an der roten Linie erkennbar [54].

Äquivalent zu den rotierenden Rotoren und der feststehenden Gehäuse existiert auch zwischen den Lamellen auf der rotierenden Welle und dem feststehenden Gehäuse in der Labyrinthdichtung ein Spalt. Durch den in Abbildung 5.6 aufgezeigten Zusammenhang wird auch in der Labyrinthdichtung ein sich verändernder Spalt abhängig von der Zeit vermutet. Wie dies vonstatten geht, soll anhand des oben beschriebenen Kurvenverlaufes erklärt werden. Dabei sind die Kurvenverläufe in der Abbildung 5.7 qualitativ abgebildet.

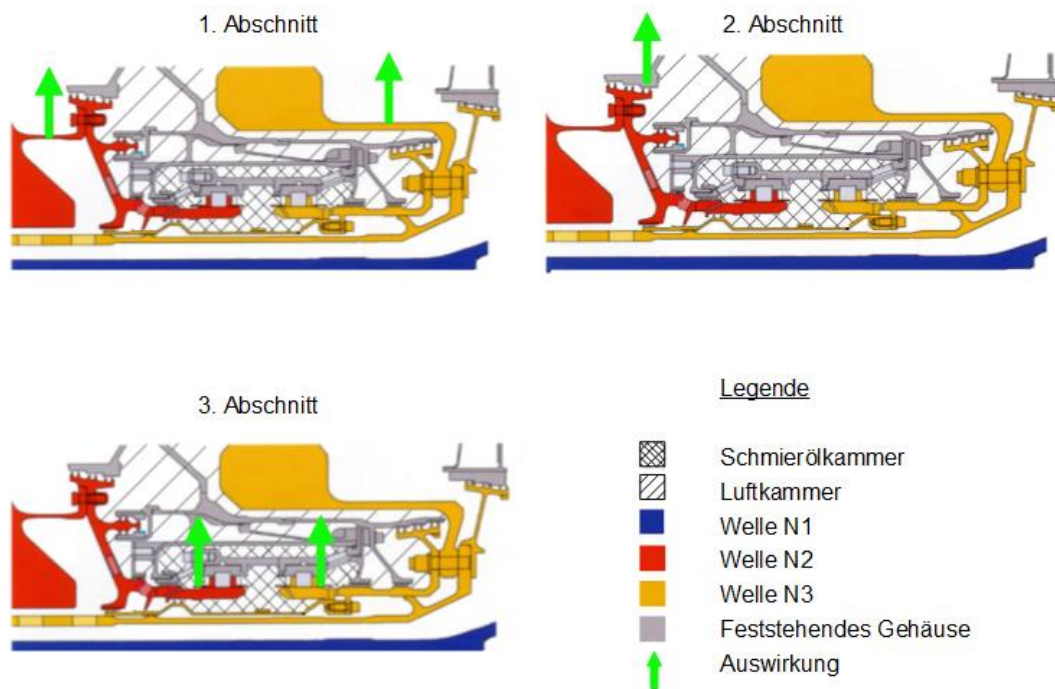
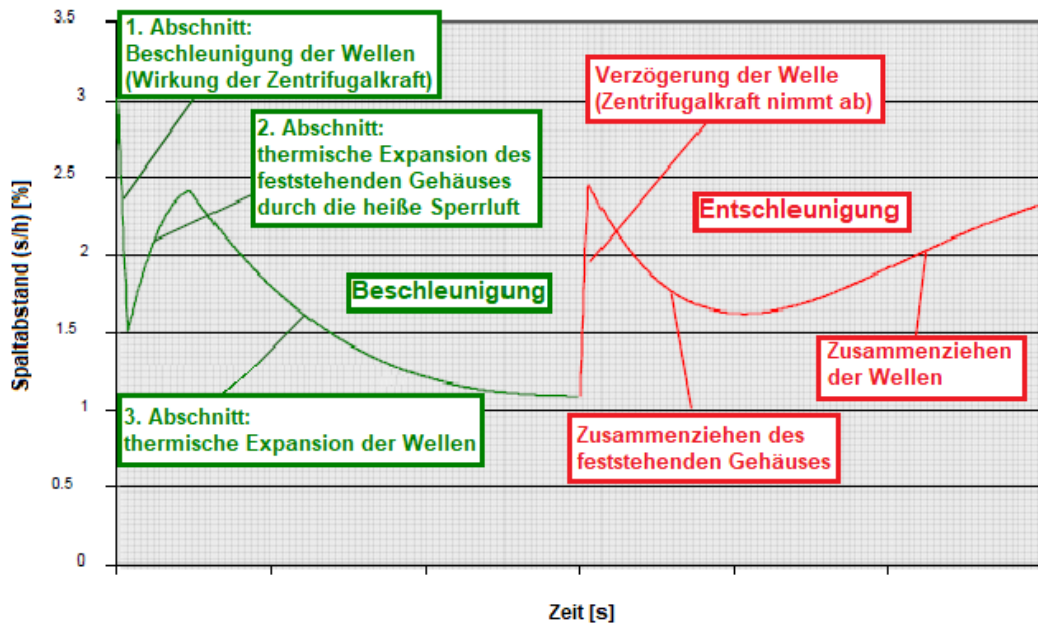


Abbildung 5.7.: Qualitativer Verlauf des Spaltabstandes der Labyrinthdichtung [47], [35], bearbeitet mit Paint

Äquivalent zu der Längung der Rotorblätter wird vermutet, dass sich die Welle und damit die Lamellen ausdehnen und der Spalt der Labyrinthdichtung beim Beschleunigen des Triebwerks zuerst kleiner wird. Diese Abnahme des Spaltabstandes erfolgt durch die Zentrifugalkraft. Werden die einzelnen Wellen während des Starts beschleunigt, wirkt die

Zentrifugalkraft. In Abbildung 5.7 ist die N2 Welle abgebildet. Der in der Abbildung gezeigte Ausschnitt der Wellen ist der Abbildung 4.4 entnommen. In dieser Abbildung wird das 4. Lager des Trent 972 abgebildet, das unter anderem für eine Kontamination mit Öldampf in der Kabine verantwortlich sein könnte. Die Auswirkung der Zentrifugalkraft auf die Wellen wird in Abschnitt 1 erklärt. Durch die Zentrifugalkraft längt sich die rotierende Komponente. Durch diese minimale Veränderung wird der Dichtungsabstand kleiner. Der Leckagemassenstrom durch die Dichtungen nimmt ab.

Die Reduzierung des Spaltabstandes durch die Zentrifugalkraft (Abschnitt 1, Abbildung 5.7) wird überlagert durch eine Vergrößerung des Spaltabstandes durch thermische Ausdehnung des feststehenden Gehäuses. Während des Beschleunigungsvorganges erhöht sich die Temperatur der Sperrluft durch die Komprimierung im ND-Verdichter. Dieses bewirkt eine Temperaturerhöhung und damit die Ausdehnung des feststehenden Gehäuses, das in grau abgebildet ist. Dadurch erhöhen sich die Spaltabstände in den Dichtungen (Abschnitt 2). Die Ausdehnungsgeschwindigkeit ist abhängig von den Wärmeausdehnungskoeffizienten und den unterschiedlich großen Massen der Gehäusestruktur. Da die Temperaturzunahme des Luftsystems schneller als die des Ölsystems erfolgt, dehnt sich das feststehende Gehäuse schneller aus.

Im Abschnitt 3 dehnen sich die Welle N2 und N3 aufgrund der Temperaturerhöhung des Schmierölsystems aus. Das Schmieröl im Schmierölsystem wird durch den heißen Sperrluftmassenstrom und der Rotation der Wellen erwärmt. Das Schmierölsystem erwärmt sich auf diese Weise bis zu einer Temperatur von knapp 110 °C [54]. Durch eine Öl-Brennstoff-Pumpe im Schmierölsystem wird das System nach der Erwärmung kontinuierlich auf diese Temperatur gekühlt. Da die Erwärmung des Schmierölsystems jedoch langsamer ist als die Erwärmung der Luftkammer, dehnen sich die Wellen im Vergleich zum feststehenden Gehäuse langsamer aus. Durch die Ausdehnung der Wellen minimiert sich der Spalt in der Öldichtung nach einer gewissen Zeit, siehe Abbildung 5.7 Abschnitt 3.

Bei einem Abbremsen der Welle verläuft dieser Prozess in umgekehrter Reihenfolge.

### 5.2.4. Leckage über der Karbondichtung

Im vorangehenden Unterkapitel ist die Auswirkung der verschiedenen Flugphasen auf den Spalt der Labyrinthdichtung erklärt worden, der durch thermische Bedingungen und wirkende Zentrifugalkräfte größer oder kleiner wird. Da die Karbondichtung aufgrund ihrer Geometrie nicht von der Zentrifugalkraft beeinflusst wird, kann das eben vermutete Prinzip nicht angewendet werden. Bei der Karbondichtung verändern sich in Folge von

Wärme oder Druck die Flächen des Rotors und des Stators. Durch diesen Einfluss verformen sich die Flächen. Die Leckage von Schmieröl über der Karbondichtung erhöht sich, wodurch Schmieröl einfacher in die Luftkammer gelangen kann [35]. In der Abbildung 5.8 sind diese beiden Einflüsse schematisch gezeigt. Durch Druck bilden sich konkave Ebenen, weshalb sich die aneinanderliegenden Flächen verformen. Auch bei erhöhter Temperatur verformen sich die Flächen. Ebenso tritt ein erhöhter Schmierölanteil aus.

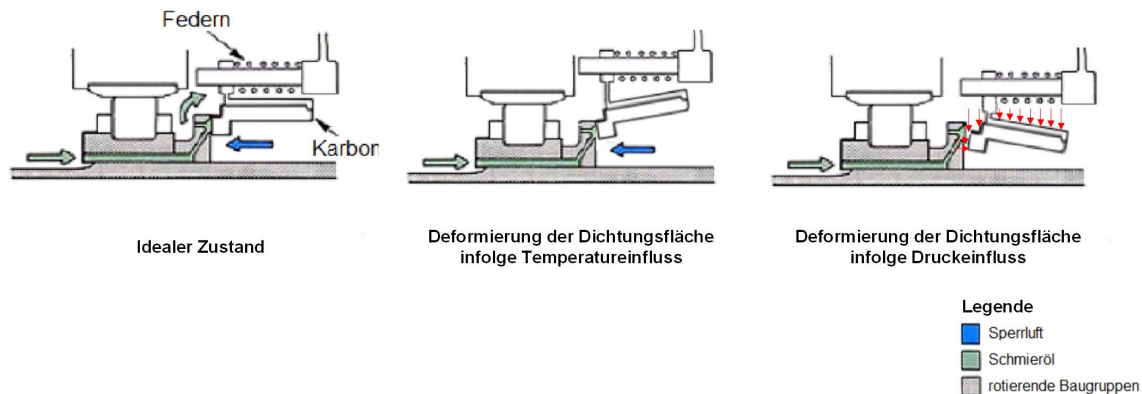
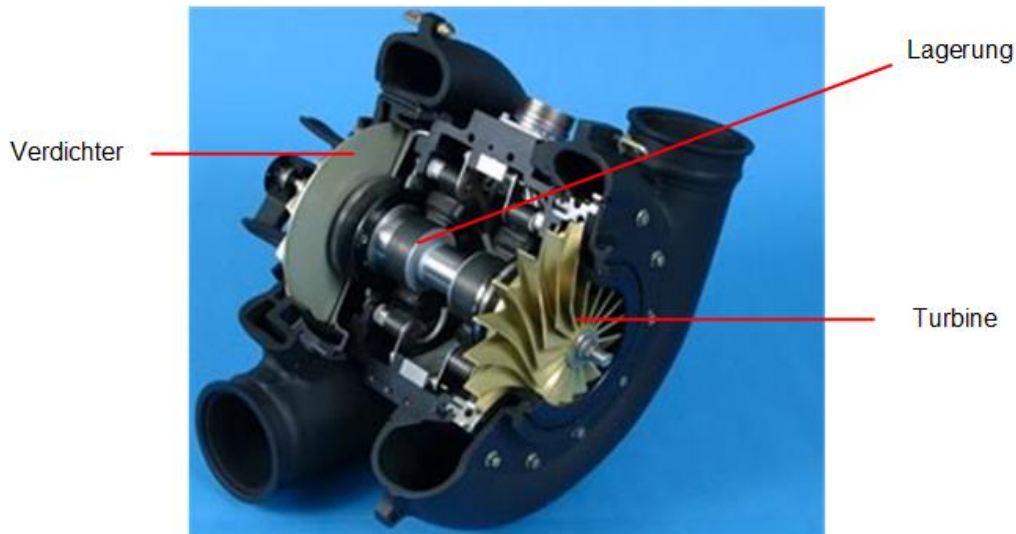


Abbildung 5.8.: Druck- und Temperatureinfluss auf die Karbondichtung [61]

### 5.2.5. Lagerung der Welle in den Klimapacks

Eine weitere Kontaminationsmöglichkeit der Zapfluft kann durch die Lagerung der Verdichter-Turbinen-Einheit in den Klimapacks erfolgen, siehe Abbildung 5.9. Das System der Klimapacks ist in Kapitel 3.1 näher beschrieben. Die Lagerung der Welle, auf der Ventilator, Verdichter und Turbine montiert sind, kann sowohl durch Luftlagerung als auch durch Schmieröllagerung gelagert werden. Die Schmierölgelagerte Lagerung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie in den Triebwerkslagern. Dabei kann auch hier Ölnebel aus den Lagerkammern austreten. Da der Temperaturbereich zwischen  $-30$  und  $183$  °C liegt, ist eine Pyrolyse des Ölnebels nicht möglich. Dennoch kann der Ölnebel über die Mischeinheit die Kabinenluft kontaminieren.



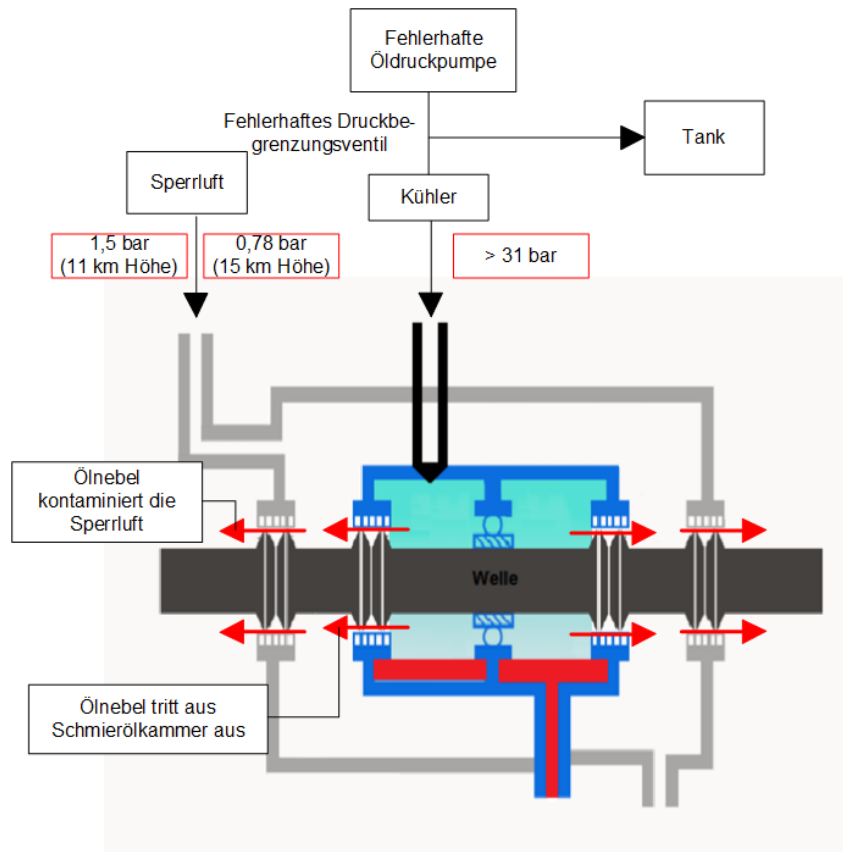


**Abbildung 5.9.:** Lagerung der Welle in den Klimapacks (Air Cycle Machine) [63], bearbeitet mit Visio

### 5.2.6. Fehlerhafte Öldruckpumpe, einschließlich Druckbegrenzungsventil im Schmierölsystem

Neben den Dichtungen in den Lagern, könnte auch ein zu hoher Öldruck im Schmierölsystem für einen Austritt des Ölnebels aus den Lagern verantwortlich sein. Wie im Kapitel 4.3 erklärt worden ist, wird über eine Öldruckpumpe das Schmieröl während des Reise- fluges auf einen konstanten Druck von  $\sim 18$  bar komprimiert [54]. Durch Düsen wird das komprimierte Schmieröl auf die Lager gesprüht. Je nach Schmieröldruck vor der Düse verändert sich auch der Druck in der Schmierölkammer. Um ein Austreten von Ölnebel aus dieser Kammer zu verhindern, muss in der Luftkammer ein höherer Druck als in der Schmierölkammer herrschen.

Während des Reisefluges bewegt sich ein Langstreckenflugzeug in Höhen zwischen 11 und 15 km. Je nach Höhe verändert sich der Umgebungsdruck. In 11 km Höhe besitzt die Umgebungsluft einen Druck von 0,23 bar, in 15 km Höhe einen Druck von 0,12 bar [38]. Der Druck in der Sperrluftkammer ist dabei abhängig von dem Druck zwischen Nieder- und Hochdruckverdichter. Bei einem Passagierflugzeug beträgt das Verdichterdruckverhältnis über einer Fan- bzw. Verdichterstufe 1,3 [44]. Im A320 wird das Triebwerk PW6000 von Pratt & Whitney verwendet. Dieses besitzt eine Fanstufe und vier Niederdruckverdichterstufen. Bei einem angenommenen Verdichterdruckverhältnis von 1,3 beträgt die Komprimierung der Umgebungsluft über die eine Fanstufe und die vier Verdichterstufen zusammen 6,5. Je nach Umgebungsdruck ändert sich der Druck der Sperrluftkammer. In 11 km



**Abbildung 5.10.:** Druckverhältnisse bei einer fehlerhaften Öldruckpumpe im Schmierölsystem [75], bearbeitet mit Paint und Visio

Höhe besitzt diese einen Druck von knapp 1,5 bar, in 15 km Höhe einen Druck von 0,78 bar. Dies bedeutet, dass der Druck in der Schmierölkammer kleiner als 1,5 bzw. 0,78 bar betragen muss. Bei einer fehlerhaften Öldruckpumpe, die durch ein Komponentenversagen eine höhere Förderleistung des Schmieröls verursacht, kann der Druck nach der Öldruckpumpe bis zu 31 bar betragen [8]. Ab diesem Druck öffnet das Druckbegrenzungsventil und ein Teil des Schmieröls wird wieder in den Tank geleitet. Bis zu einem Schmieröldruck von 31 bar vor den Düsen ist der Druck in der Schmierölkammer  $< 0,78$  bar. Die Düsen beschleunigen das Schmieröl, wobei der Druck abnimmt. Je nach Durchmesser der Düse wird die Beschleunigung beeinflusst. Da die Düsengeometrie nicht bekannt ist, kann der Druck in der Schmierölkammer nicht berechnet werden. Wenn neben der fehlerhaften Öldruckpumpe das Druckbegrenzungsventil ebenfalls fehlerhaft ist, könnte der Druck vor der Düse  $> 0,78$  bar betragen. Es würde ein Druckgefälle aus der Schmierölkammer in die Sperrluftkammer vorliegen. In diesem Zustand würde Ölnebel über die Öldichtungen in die Luftkammer austreten. Wie in Kapitel 4.3 wird die Schmieröldruckdifferenz im Filter nach dem Schmierölaustritt gemessen und bei Überschreitung eines Sollwertes im Cockpit angezeigt.

## 5.3. Entstehung von Ölkontaminationen durch die APU

Eine weitere Ursache von Schmierölkontaminationen in der Flugzeugkabine ist die APU, die meistens bei ausgeschalteten Triebwerken arbeitet. Die APU ist ein Hilfstriebwerk, das im Heck des Flugzeuges montiert ist [75],[8]. Das Hilfstriebwerk basiert auf dem Prinzip einer Gasturbine und erzeugt Energie. Über Generatoren, Pumpen und Verdichter kann elektrische, hydraulische oder pneumatische Energie produziert werden [77]. Die Aufgaben der APU am Boden (Flughafen) sind unter anderem:

- die elektrische Energie für die Bordelektronik
- die pneumatische Energie für die Klimaanlage
- die pneumatische Energie für das Starten der Triebwerke bereitzustellen [8]

Die APU ist bis zu einer Höhe von 14,5 km einsatztauglich und wird auch während des Fliegens als Reserve für elektrische und pneumatische Energie verwendet [8]. Die APU einer A340 ist prinzipiell wie folgt aufgebaut:

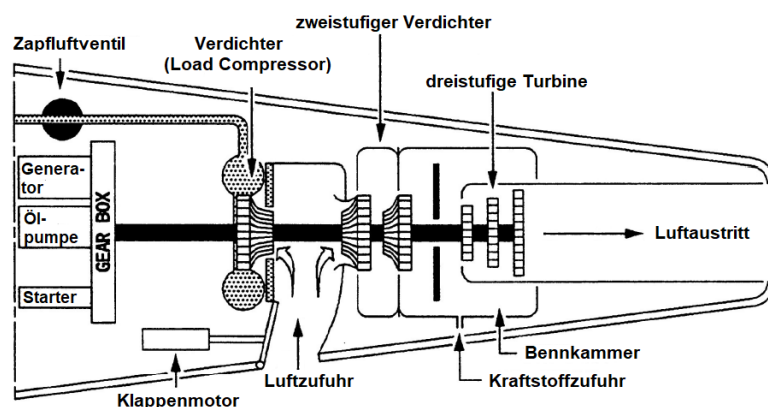


Abbildung 5.11.: Prinzipskizze der APU mit den einzelnen Komponenten [75], bearbeitet mit Paint

Dabei sind alle Systeme auf einer Welle montiert und gliedern sich in die drei Hauptsysteme:

- Antriebseinheit (Power Section)
- Druckluftversorgung (Load Compressor) für das pneumatische System
- Hilfsgeräte (Accessory gearbox section) [8]

Gestartet wird die APU über Batterien, die über einen Gleichstromstartermotor, kurz Starter, die Welle mit einer konstanten Drehzahl antreiben [77]. Der Starter zählt mit zu den Hilfsgeräten und ist in der Gearbox angeordnet, siehe Abbildung 5.11. Ist die Welle einmal in Bewegung, wird die Brennkammer aktiviert [76]. Über Leitungen gelangt der Kraftstoff aus den Tanks in den Flügeln zu der APU und wird in die Brennkammer eingespritzt [77]. Nachdem diese aktiviert worden ist, kann die Welle ohne Hilfe des Starters weiterlaufen. Durch die Verbrennung von Kraftstoff (Kerosin) wird die Turbine in Bewegung gebracht und erzeugt Energie in Form von Wellenenergie. Diese Energie wird an den Verdichter und die Hilfsgeräte übertragen. Die Umkehr-Ringbrennkammer, die dreistufige Turbine und die zwei getrennten Verdichter bilden die Antriebseinheit. Die Energie, die in der Turbine freigesetzt wird, wird auf die Verdichter übertragen. Der erste Verdichter ist der Load Compressor, der für das pneumatische System zuständig ist. Der zweite Verdichter ist beim A340 ein zweistufiger Verdichter, der die zugeführte Außenluft für die Brennkammer komprimiert [77]. Das pneumatische System erzeugt durch den Load Compressor Zapfluft, die für die Klimaanlage und das Starten der Triebwerke genutzt wird. Über das Öffnen einer Klappe in der Flugzeugstruktur gelangt frische Außenluft in die APU. Diese Klappe wird über einen Klappenmotor betrieben, der in Abb. 5.11 zu sehen ist. Der Verdichter leitet bei einem geöffneten Zapfluftventil die Zapfluft über Leitungen zu den Klimapacks, siehe Abb. 5.11 (gepunktete Leitung) [8]. Des Weiteren zählen zu den Hilfsgeräten ein Generator, eine Ölpumpe und der Starter. Der Generator produziert für das Bordnetz elektrische Energie. Dabei wird die Wellenbewegung in elektrische Energie umgewandelt. Der Generator läuft dabei durch die konstante Drehzahl der Welle mit einer Frequenz von 400 Hz und einer Wechselleistung von 9 kW [77]. Auch die Welle der APU muss über zwei Kugellager gelagert werden. Die Lager sind jeweils direkt hinter den beiden Verdichtern positioniert, siehe Abbildung 5.12. Da auch die Lager der APU durch Schmieröl geschmiert und gekühlt werden müssen, können Ölleckagen aus den Lagern auftreten [75]. Auch die APU-Lager sind vom Aufbau und Schmierung den Triebwerkagerungen ähnlich. Treten Schmierölleckagen auf, wird das Schmieröl erhitzt, pyrolysiert und gelangt über die Klimapacks in die Flugzeugkabine.

Eine weitere Möglichkeit der Kabinenkontamination ist das Einsaugen von verunreinigter Umgebungsluft am Flughafen durch die APU. Durch das Ausstoßen von Verbrennungsgasen und Schmierölrückständen durch die Abgase der Triebwerke landender und startender Flugzeuge, wird die Umgebungsluft des Flughafens kontaminiert. Im APU-Betrieb kann diese kontaminierte Umgebungsluft eingesaugt werden und die Kabine verunreinigen.

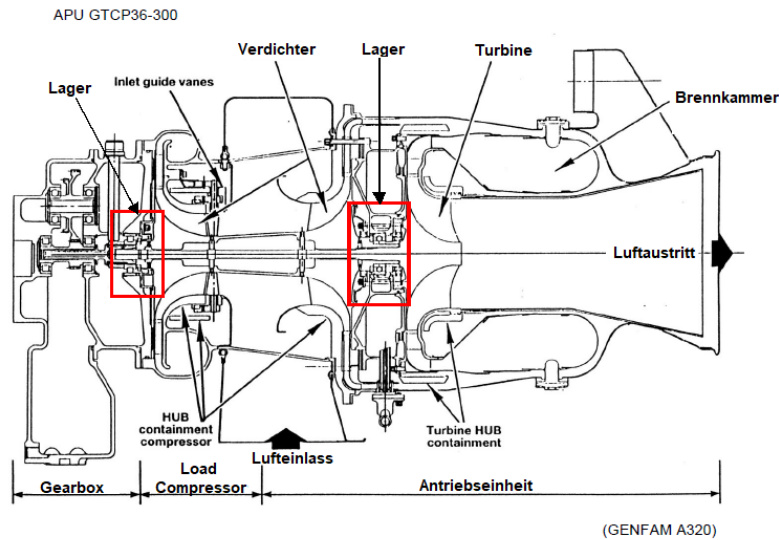
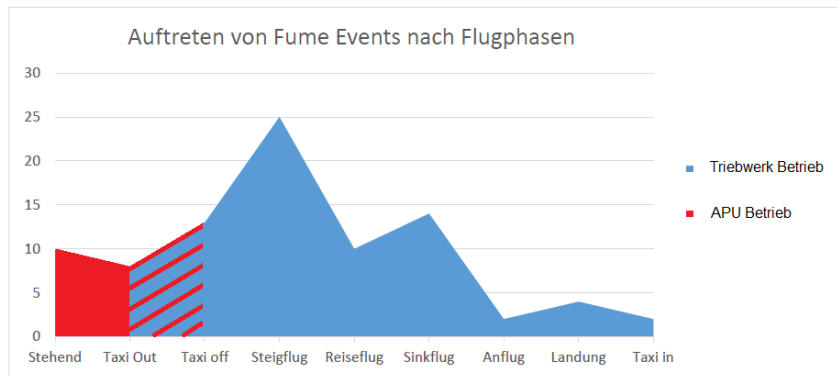


Abbildung 5.12.: Querschnitt der APU [75]

## 5.4. Analyse typischer Flugphasen, bei denen Fume Events aufgetreten sind

Aufgrund des Daltonschen Prinzips, der Leckage über der Labyrinthdichtung durch die variierenden Flugphasen, der Leckage über der Karbondichtung, der Lagerung der Welle in den Klimapacks und den Dichtungen in der APU tritt Ölnebel fortlaufend aus der Schmierölkammer in kleinen Mengen aus. Dies führt zu minimalen Schmierölkontaminationen der Frischluft in der Flugzeugkabine durch Öldämpfe während des Fluges. Diese Konzentrationen können über Sensoren gemessen werden, sind für den Menschen aber so nicht wahrnehmbar. Unter dem Begriff Fume Events werden Ereignisse gezählt, bei denen in der Flugzeugkabine Gerüche, Rauch oder Nebel auftritt oder es zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Passagiere oder der Flugzeugbesatzung kommt [14]. Diese Vorfälle werden erst durch höhere Mengen an austretendem Ölnebel ausgelöst. Erst durch einen mechanischen Abrieb in den Triebwerksdichtungen oder den APU-Dichtungen, einer Druckumkehr zwischen Luftkammer und Schmierölkammer infolge einer fehlerhaften Öldruckpumpe einschließlich Druckbegrenzungsventil, kann Ölnebel in großen Mengen aus der Kammer austreten und die Kabine kontaminieren.

Die BFU hat in ihrer Studie Fume Events, die durch Ölkontaminationen verursacht worden sind, mit dem Auftreten des jeweiligen Flugzeitpunkts kombiniert. In Abbildung 5.13 werden die in den Jahren 2006 bis 2013 aufgetretenen Fume Events, die durch Ölleckagen verursacht worden sind, über der Flugphase abgebildet [14].



**Abbildung 5.13.:** Übersicht über das Auftreten von Ölkontaminationen nach Flugphasen in den Jahren 2006 bis 2013 in deutschen Flugzeugen [14], bearbeitet mit Paint

In den Abschnitten „stehend“ bis „Taxi out“ treten Fume Events auf, die durch die APU verursacht worden sind, da dort die APU ausschließlich für die Luftversorgung zuständig ist. Die von der APU verursachten Fume Events sind in der Abbildung 5.13 rot markiert. Die Triebwerke sind in diesem Abschnitt ausgeschaltet. Im Steigflug treten die meisten Fume Events (25 gemeldete) auf. Erklären lässt sich dieses Phänomen durch den variierenden Spaltabstand der Triebwerksdichtungen, siehe 5.2.4 und 5.2.3. Wie in Kapitel 5.2.3 erläutert, nimmt der Spaltabstand in der Labyrinthdichtung durch die Zentrifugalkraft zuerst ab und anschließend durch thermische Expansion wieder zu. Da die Wirkung der Zentrifugalkraft relativ schnell durch die thermische Expansion ausgeglichen wird, könnte der Anstieg der Fume Events im Steigflug durch diesen Prozess erklärt werden. Der anschließende Abfall der Anzahl der Fume Events während des Reisefluges kann durch den kleiner werdenden Spalt der Dichtungen erklärt werden, siehe Abbildung 5.7. Während des Sinkfluges kehrt sich das erläuterte Prinzip um, der Spalt vergrößert sich wieder und die Anzahl der Fume Events nimmt, wie in Abbildung 5.13 zu sehen, wieder zu.

Damit ein Fume Event auftritt, muss auch die Öldichtung (Labyrinth- oder Karbondichtung) durch mechanischen Abrieb geschädigt sein. Dabei wird das Austreten des Ölnebels bei einem größeren Spaltabstand in der Dichtung begünstigt. Bei einer Druckumkehr zwischen Schmierölkammer und Luftkammer kommt es unabhängig von der Flugphase immer zu einem Fume Event.

## 5.5. Berechnung des Ölanteils in der Kabinenluft

Eine erste Abschätzung der auftretenden Ölmenge in der Kabinenluft während eines Reisefluges ist von Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg auf der Air Cabin Conference in London im letzten Jahr vorgestellt worden. Dabei sind folgende Annahmen getroffen worden.

- Schmierölverbrauch des Triebwerks:  $\dot{V}_{Schmieröl} = 0,5 \text{ l/h} = 0,1389 \text{ ml/s}$
- Austritt der Schmierölmenge in die Luftkammer:  $x_{Dichtung} = 2\%$
- Dichte des Schmieröls:  $\rho_{Schmieröl} = 1,0035 \text{ kg/m}^3$
- Reisefluggeschwindigkeit:  $v_{Reiseflug} = 295 \text{ m/s}$
- Reiseflughöhe:  $h_{Reiseflug} = 11 \text{ km}$
- Machzahl:  $Ma = 0,76$

Für den Betriebspunkt ist die Annahme getroffen worden, dass das Schmierölssystem pro Stunde 0,5 l Schmieröl verliert [54]. Diese Menge ist in Kapitel 4.3.2 als Schmierölmassestrom angegeben worden, der über das Entlüftungssystem über Bord gelassen wird.  $x_{Dichtung}$  ist eine Annahme für den Verlust des Schmieröls aus der Schmierölkammer in die Lagerkammer [75]. Des Weiteren wird eine Reisefluggeschwindigkeit von 295 m/s angenommen.

Die Abschätzung für die austretende Ölmenge wird für einen A320 mit einem Triebwerk CFM-56 ermittelt. Bei diesem Flugzeug gelten folgende Triebwerksdaten:

- Anzahl der Lager im Triebwerk:  $n_{Lager} = 6$
- Anzahl der Lager, die für eine Kontamination infrage kommen:  $n_{Lager,Einfluss} = 3$
- prozentualer Einfluss, der für eine Kontamination infrage kommenden Lager:  

$$x_{Lager,Einfluss} = \frac{n_{Lager,Einfluss}}{n_{Lager}} = 0,5 \mu = \frac{\dot{m}_{Bypass}}{\dot{m}_{Hauptstrom}} = 5,5$$
- Durchmesser des Fans:  $D_{Fan} = 1,55 \text{ m}$

Mit  $n_{Lager}$  wird die Gesamtanzahl der Lager im Triebwerk bezeichnet und mit  $n_{Lager,Einfluss}$  die Anzahl der Lager, die für eine Ölkontamination in der Kabine in Frage kommen. Also die, die vor der Zapfluftentnahme im HD-Verdichter montiert sind.

Prof. Scholz hat für seine Abschätzung das Verhältnis zwischen der Schmierölmasse in der Kabine  $m_{Schmieröl,Kabine}$  und dem Volumen in der Kabine  $V_{Kabine}$  berechnet.

Die Schmierölmasse in der Kabine  $m_{Kabine}$  setzt sich dabei zusammen aus dem Verbrauch,

$$\dot{m}_{Schmieröl} = \dot{V}_{Schmieröl} \cdot \rho_{Schmieröl} \quad (5.1)$$

der Leckagerate aus der Schmierölkammer  $x_{Dichtung}$  und dem Einfluss, der für eine Kontamination infrage kommenden Lager  $x_{Lager,Einfluss}$ . Die Schmierölmasse berechnet sich dabei mit der Formel:

$$m_{Kabine} = \dot{m}_{Schmieröl} \cdot x_{Dichtung} \cdot x_{Lager,Einfluss} = 0,001394\text{g/s} \quad (5.2)$$

Das Luftvolumen in der Kabine wird mit der Formel

$$V_{Kabine} = \frac{A_{Triebwerk} \cdot Ma_{Reiseflug} \cdot a(h_{Reiseflug}) \cdot n_{Triebwerk}}{1 + \mu} = 0,13028\text{m}^3/\text{s} \quad (5.3)$$

berechnet. Dieser ist abhängig von der Machzahl, der Reisefluggeschwindigkeit und dem Bypassverhältnis.

Der Anteil des Schmieröls in der Kabine berechnet sich durch die Division der beiden Ergebnisse  $m_{Kabine}$  und  $V_{Kabine}$

$$\frac{m_{Kabine}}{V_{Kabine}} = \frac{\dot{m}_{Schmieröl} \cdot x_{Dichtung} \cdot x_{Lager,Einfluss}}{A_{Triebwerk} \cdot Ma_{Reiseflug} \cdot a(h_{Reiseflug}) \cdot n_{Triebwerk}} \cdot (1 + \mu) = 10,7\mu\text{g/m}^3 \quad (5.4)$$

Dieser Wert ist mit der Summe der gemessenen aromatischen Hydrokarbonverbindungen einiger Studien verglichen worden, die bei einer Ölkontamination unter anderem als Indikator verwendet werden. In der Studie ist auch die Kabinenluft der A321 untersucht worden, wobei der errechnete Wert lediglich um  $4 \mu\text{g/m}^3$  vom gemessene Wert abweicht. Es gibt eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Schmierölmenge in der Kabine und dem gemessenen Wert.



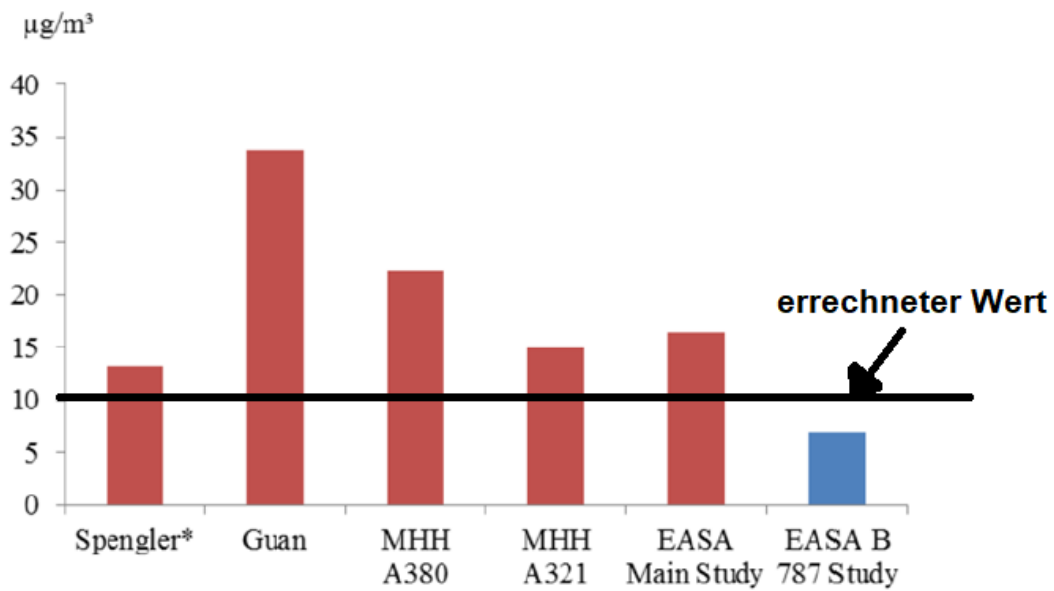


Abbildung 5.14.: Vergleich mehrerer Studien zum Auftreten von Hydrocarbonverbindungen während des Fluges [75], bearbeitet mit Paint



## 6. Kontaminierte Kabinenluft: Studienlage

Seit den 1960er Jahren wird die Kabinenluft moderner Verkehrsflugzeuge direkt und ungefiltert aus den Triebwerken entnommen [23]. Durch den technischen Aufbau der Dichtungen in den Triebwerkslagern und den zuvor erläuterten Diffusionsprozessen (Daltonsches Prinzip) sowie den variierenden Spaltabständen der Dichtungen, sind Ölkontaminationen der Kabinenluft in geringen Mengen unausweichlich. Bereits 1976 bemängelt die UK Civil Aviation Authority in ihren „British Civil Airworthiness Requirements“ Probleme des Zapfluftsystems im Zusammenhang mit schädlichen Dämpfen. Diese treten besonders beim Flugzeugtyp „BAe 146“ auf [23]. Ein Jahr später (1977) wird in der medizinischen Fachzeitschrift „Clinical Toxicology“ ein erster Krankheitsfall beschrieben mit dem Titel „Human intoxication following inhalation exposure to synthetic jet lubricating oil“ (Vol. 11, 423-426). Nach einem Fume Event war ein Crewmitglied handlungsunfähig geworden [23]. Ähnliche Erfahrungen finden sich im „Aerospace Information Report“ (AIR 1539, 30/1/81) der Society of Automotive Engineers (SAE) von 1981: „Engine compressor bearings upstream of the bleed ports are the most likely sources of lube oil entry in the engine air system and thence into the bleed system contaminating the cabin/cockpit air conditioning system.“ Zusammengetragen wurden diese Informationen von dem Toxikologen Prof. Chris Winder und Dr. Susan Michaelis in ihrem Aufsatz Aircraft Air Quality Malfunction Incidents, der allerdings erst 2005 veröffentlicht wurde. In ihrer Doktorarbeit „Health and Flight Safety Implications from Exposure to Contaminated Air in Aircraft“ (2010) analysiert Susan Michaelis insgesamt 55 Studien aus den Jahren 1983 bis 2009 zur Luftqualität in Flugzeugkabinen. In 14 der 55 analysierten Studien wird eine Ölleckage als Ursache von verunreinigter Kabinenluft genannt, siehe Anhang A.4. Neben VOCs, CO<sub>2</sub>, CO und Aldehyden wird in diesen Studien immer auch TCP detektiert. TCP wurde schon 1958 von Dietrich Henschler, Professor für Toxikologie und Pharmakologie, als hochtoxische Substanz klassifiziert und ist seitdem in der Arbeits- und Umweltmedizin bekannt [39]. In der vorliegenden Arbeit wird TCP als Leitindikator für die Kontamination der Kabinenluft durch Ölnebel verwendet.

TCP wurde auch in einem erst 2017 von der EASA veröffentlichten Report mit dem

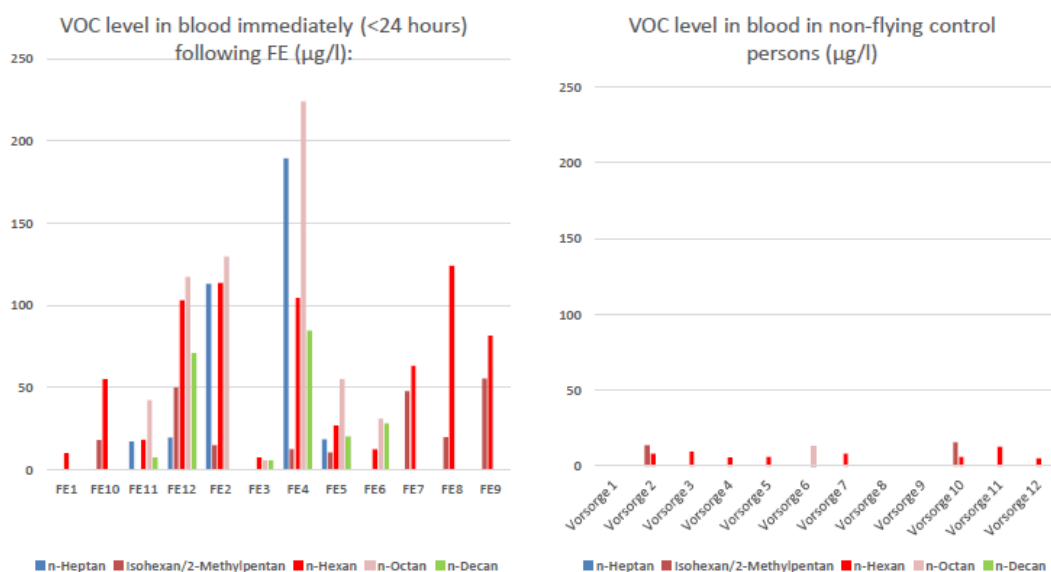
Titel „Characterisation of the toxicity of aviation turbine engine oils after pyrolyse“ über die Kontamination der Kabinenluft durch Pyrolyse des Schmieröls gefunden. Für diesen Report wurden 8 Studien aus den Jahren 1988 bis 2014 rekapituliert [41]. In 2 der 8 Studien wurde sogar das hochtoxische ToCP detektiert. In der Studie von Crump et al. (2011) wurde die Kabinenluft auf 100 Flügen, die auf 5 unterschiedlichen Flugzeugtypen durchgeführt worden sind, auf VOCs, Patikel und CO untersucht. Auf diesen Flügen wurde in 5 % der Fälle ToCP festgestellt. Der höchste gemessene Wert von ToCP lag bei  $22,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der durchschnittliche TCP-Wert in der Kabinenluft wurde mit  $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  detektiert. Wolfgang Rosenberger, CTA der Medizinischen Hochschule Hannover, hat im Jahr 2013 ebenfalls eine Studie zur Qualität der Kabinenluft mit dem Fokus auf TCP und ToCP durchgeführt. Dabei wurden auf 26 Flügen 90 Kabinenluftproben genommen. Hier wurde in 15 % aller Proben ToCP in einem Spektrum von 2 bis  $65 \text{ ng}/\text{m}^3$  detektiert. Der Großteil der TCP-Messungen lag zwischen 17 bis  $167 \text{ ng}/\text{m}^3$ .

Festzustellen ist, dass in allen betrachteten Studien TCP als Leitindikator detektiert worden ist. Dies stützt die oben ausgeführte These, dass Ölnebel aus den Schmierölkammern austritt und in die Kabine gelangt und dort (meist in geringen Konzentrationen) aufzufinden ist.

Diese Annahme bestätigen auch Studien, die im Labor zum Pyrolyseverhalten von Schmieröl durchgeführt worden sind. Eine dieser Studien stammt von Prof. Christiaan van Netten, einem Toxikologen von der British Columbia University in Vancouver. Er hat die Pyrolyseprodukte von zwei verschiedenen Schmierölen (Exxon 2380 und Castor 5000) untersucht. Dabei wurde das Schmieröl bei unterschiedlichen Temperaturen, Zeiten und Drücken pyrolysiert und anschließend analysiert. Bei einem dieser Versuche ist das Schmieröl 1 Minute lang auf  $525 \text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt worden. Diese Temperaturen entsprechen denen, die im HD-Verdichter auftreten [60]. Dabei entstanden unter anderem Pyrolyseprodukte wie  $\text{CO}_2$  mit einem Wert von über 100 ppm, CO mit einem Wert von über 100 ppm sowie TCP. Van Netten fand darüber hinaus, dass Formaldehyde bei  $325 \text{ }^\circ\text{C}$  entstehen und CO bei  $425 \text{ }^\circ\text{C}$  freigesetzt wird [24]. Auch in den anderen Studien sind die bereits erwähnten toxischen Produkte CO und TCP, aber auch Aldehyde, VOCs, PAN, SVOCs detektiert worden.

Statistisch gesehen kommt es bei jedem 5000. Flug zu einem Fume Event, das bedeutet, dass es zu einem Auftreten von wahrnehmbarer Rauchentwicklung kommt, die mit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung einhergehen können [45]. Prof. Johannes Ludwig und Dr. Christina Berndt gehen in ihrem erst kürzlich veröffentlichten SZ-Artikel über Fume Events und die Folgen für Vielflieger wie Piloten und Bordcrew von einem Verhältnis von 1 zu 2000 aus [6]. 2013 starteten in Deutschland etwa 8200 Flugzeuge täglich. Das heißt, es kommt zu 1 bis 4 Fume Events pro Tag [37].

Seit 2014 gibt es am Institut für Arbeit-, Sozial- und Umweltmedizin der Universitätsklinik Göttingen eine „Fume Events-Sprechstunde“. Dort werden vor allem Piloten und Crewmitglieder mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen infolge eines Fume Event untersucht [22]. In ihrem Vortrag mit dem Titel „Health disorders after „fume events“ of aircraft crew members: facts and fiction“ stellten Dr. Astrid Heutelbeck (UMG Göttingen), Lygia Budnik (Universität Hamburg) und Xaver Baur (UKE Hamburg) einige ihrer Untersuchungsergebnisse vor. Die Befunde von 9 Fume Events Patienten zeigen, wie hoch der VOC-Gehalt im Blut im Vergleich zu 12 Kontrollpersonen ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.1 zu sehen und zeigen, dass der Maximalwert z.B. von n-Hexan bei über 200  $\mu\text{g/l}$  lag. Bei der Kontrollgruppe lag der Wert bei lediglich 10  $\mu\text{g/l}$ .



**Abbildung 6.1.:** VOC-Gehalt im Blut von Fume Events Patienten (links) und einer nicht geflogenen Kontrollgruppe (rechts) [40]

Auffällig sind die kurzen Halbwertszeiten der gemessenen Werte im menschlichen Blut. Nach einem Fume Event ist eine zügige Blutuntersuchung anzuraten, um eine mögliche toxische Belastung nachweisen zu können. Die Halbwertszeiten sind in der Abbildung 6.2 zu sehen.

Zusätzlich zur Blutanalyse werden die Fume Events Patienten hinsichtlich ihrer Symptome befragt, siehe Abbildung 6.3. Dabei gaben von 203 untersuchten Personen 89 % Kopfschmerzen, 93 % kognitive Einschränkungen, 78 % Einschränkungen in der Atmung, 48 % Herzprobleme, 74 % Gastrointestinale Symptome und 85 % Paraesthesien an, siehe Abbildung 6.3.

Unter kognitiven Beeinträchtigungen werden Symptome zusammengefasst wie Konzentrationsstörungen, Vergesslichkeit, Wortfindungsstörungen und Koordinationsprobleme. Un-

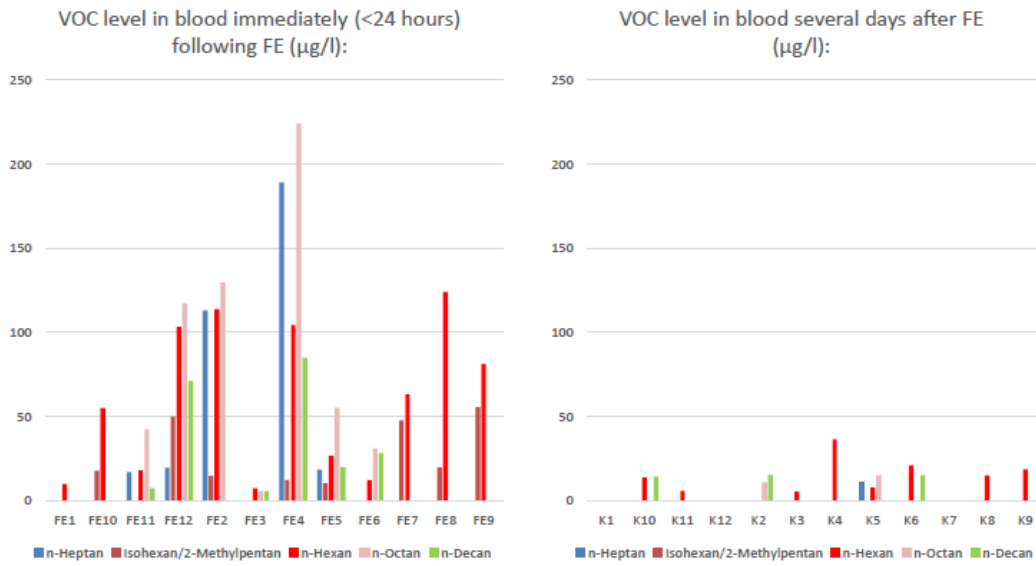


Abbildung 6.2.: VOC-Gehalt im Blut von Patienten innerhalb der ersten 24h nach einem Fume Events (links) im Vergleich zu dem VOC-Gehalt im Blut nach einigen Tagen (rechts) [40]

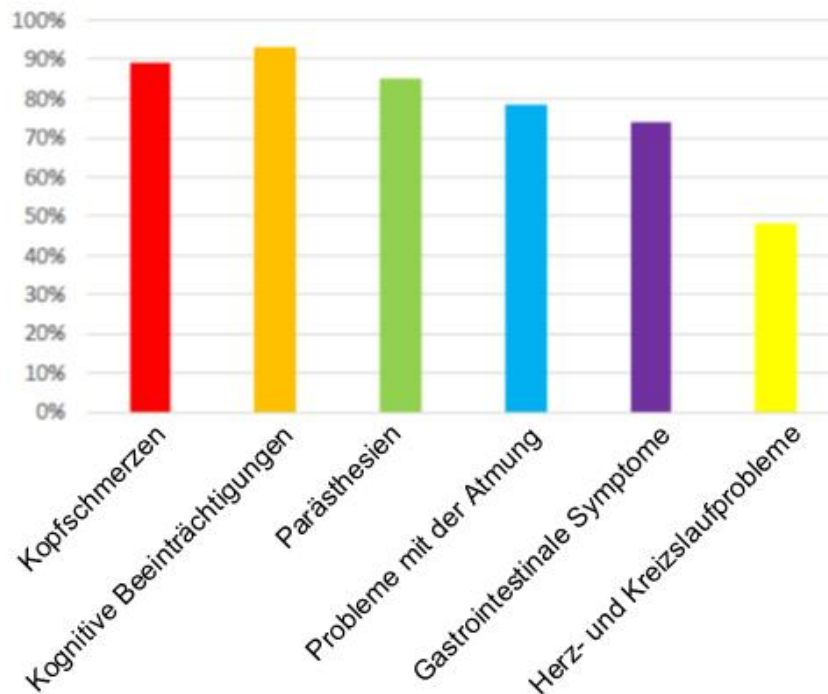
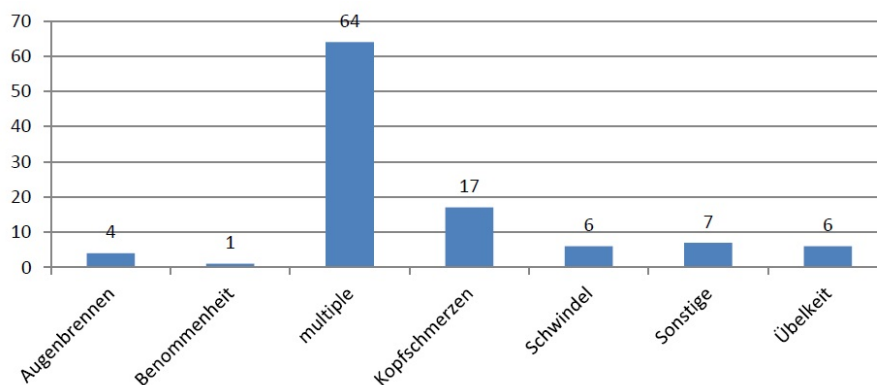


Abbildung 6.3.: Auftretende Symptome nach einem Fume Event [40], bearbeitet mit Paint

ter Parästhesien werden Kribbeln, Muskelzucken, Taubheit, Krämpfe und eingeschlafene Extremitäten gefasst. Zu den gastrointestinalen Symptomen zählen Beschwerden wie z.B. Übelkeit, Durchfall oder Erbrechen. Die Oberbegriffe kognitive Beeinträchtigung und Parästhesien werden in der jeweiligen Häufigkeit in der Abbildung A.3 im Anhang gezeigt. Auch die BFU hat in ihrer Studie betroffene Piloten, Crewmitglieder und Passagiere befragt und sehr ähnliche bzw. gleiche Symptome ermittelt. Dabei gaben 7 von 35 betroffenen Piloten Kopfschmerzen, 8 Schwindel, 3 Übelkeit und 6 von ihnen Augenbrennen als Symptom an. 32 der 35 betroffenen Piloten litten an mehreren der genannten Symptome.



**Abbildung 6.4.:** Gemeldete Symptome von Piloten nach einem Fume Event [14]

Ein weiterer Beleg für die Auswirkung von Öldämpfen auf den menschlichen Organismus ist der Tod des Piloten Richard Westgard im Jahr 2012. Richard Westgard wurde 1969 in England geboren und erlangte 1996 seine Fluglizenz [21]. Er flog für British Airways und verstarb nach zehnjähriger Krankheit im Dezember 2012. Der Kapitän litt unter Symptomen, die mit denen des aerotoxischen Syndroms übereinstimmten und vermachte seinen Körper der Wissenschaft zur Ergründung des aerotoxischen Syndroms. Die Obduktion wurde von drei Ärzten M.B. Abou-Donia (Duke University Medical Center, Durham), F.R.W. van de Goot (Symbiant BV, Wilhelminalaan) and M.F.A. Mulder (Aviation Medical Consult, Karbouwstraat) durchgeführt. Diese veröffentlichen ihre Obduktions-Ergebnisse unter dem Titel „Autoantibody markers of neural degeneration are associated with post-mortem histopathological alterations of a neurologically injured pilot“. Die von Westgate zu Lebzeiten beschriebenen Symptome passten nicht nur auf die Diagnose des aerotoxischen Syndroms, sondern auch auf Erkrankungen wie eine Herzmuskelentzündung, eine Leukämie, multiple Sklerose oder einer Insektenvergiftung. Da diese Krankheiten aber vor seinem Tod ausgeschlossen wurden, liegt das aerotoxische Syndrom als Ursache von Westgates frühem Tod nahe [21]. Dafür spricht insbesondere der im Obduktionsbericht festgestellte Abbau von Nervengewebe im Rückenmark, Kleinhirn

und der Hirnrinde und erklärt die von Westgate geäußerten Symptome.

Die seit 1976 betrachteten Studien zur Kontamination der Kabinenluft deuten darauf hin, dass es zu einer Kontamination der Kabinenluft durch Öldampf kommen kann. Insbesondere die Arbeit von Heutelbeck, Budnik und Baur zeigt, dass der VOC-Gehalt im Blut von Fume Events-Patienten deutlich höher ist als der einer Kontrollgruppe. Welche Auswirkungen Fume Events tatsächlich auf die Gesundheit von Betroffenen haben, auch langfristig gesehen, ist aufgrund der geringen Fallzahl (n=9) nur bedingt zu sagen. Hier sind weitere Daten, auch im Interesse der Vielflieger, notwendig, um eine abschließende Bewertung vornehmen zu können.



# 7. Maßnahmen gegen Öldämpfe in der Flugzeugkabine

In den letzten Jahren sind einige neue Systeme entwickelt worden, um das Eindringen von Öldämpfen in die Flugzeugkabine zu verhindern. Dabei kann zwischen Systemen unterschieden werden, die aktuell auf dem Markt sind, die sich in der Testphase befinden und jenen, die in näherer Zukunft zur Detektion bzw. zum Monitoring eingesetzt werden könnten:

1. Das zapfluftfreie System der B787 von Boeing befindet sich auf dem Markt
2. Elektrische Klimapacks der Firma Liebherr befinden sich in der Testphase
3. Systeme, die Ölkontaminationen detektieren oder in der Intensität vermindern können, d.h. Monitoringsysteme zur Überwachung der Kabinenluft, Messung des Druckgefälles, Messung des Spaltabstandes, Sensoren vor der Mischeinheit und der Filtersysteme wären notwendig, sind aber noch nicht erprobt

## 7.1. Alternativen zum Zapfluftsystem

Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, gibt es als Alternative zum Zapfluftsystem, die zapfluftfreien Systeme. Unterschieden wird zwischen dem zapfluftfreien System der B787, das seit 2011 in den Triebwerken Anwendung findet und dem System der Firma Liebherr, das sich noch in der Entwicklung befindet.

### 7.1.1. Das zapfluftfreie System der B787

Im Jahr 2011 ist das neueste Modell von Boeing, die Boeing 787, auch Dreamliner genannt, zugelassen worden [18]. Dabei verzichtet Boeing auf eine Zapfluftentnahme aus den Triebwerken und betreibt die einzelnen Subsysteme durch elektrischen Strom, siehe Abbildung 7.2. Zu den Subsystemen zählen:

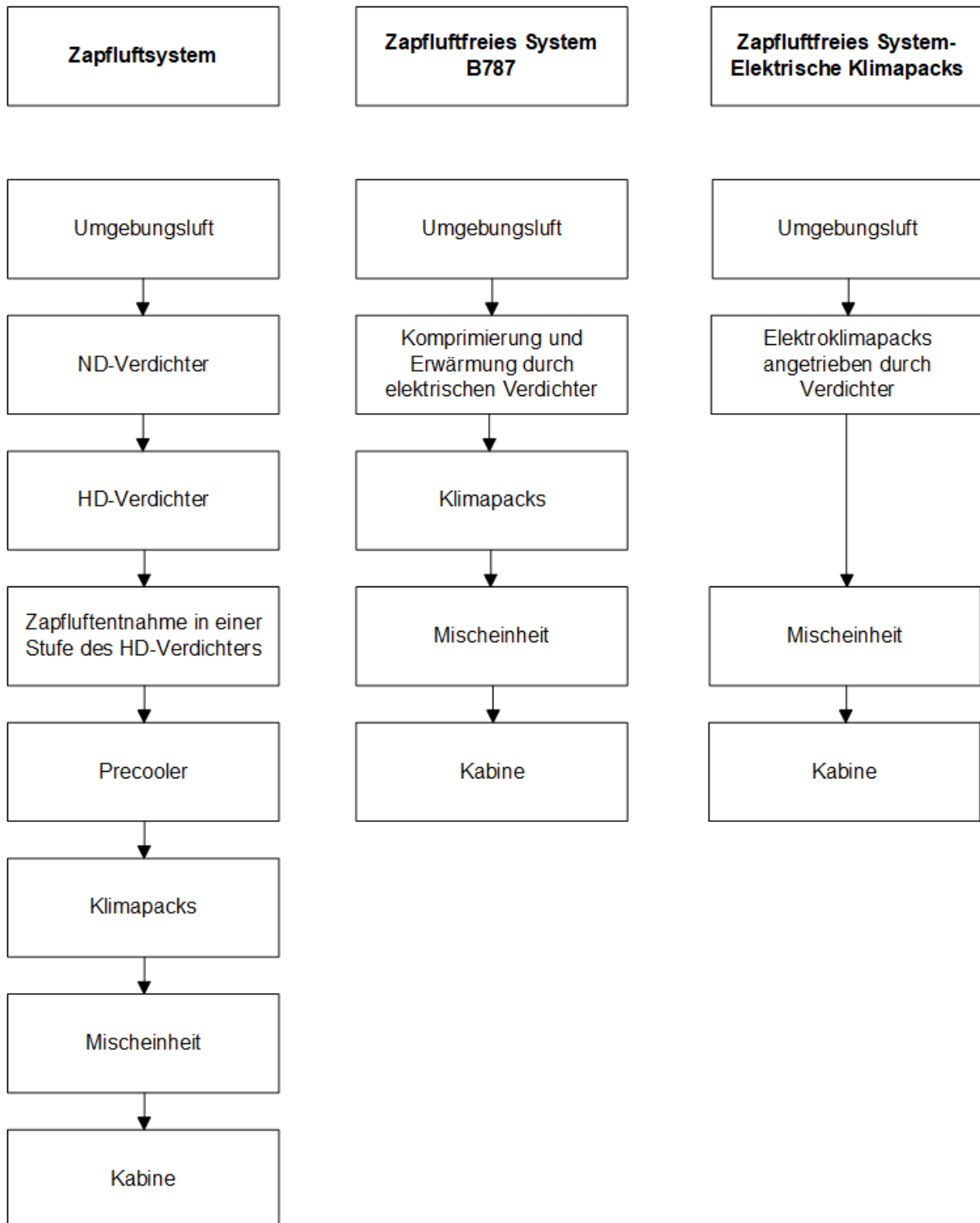
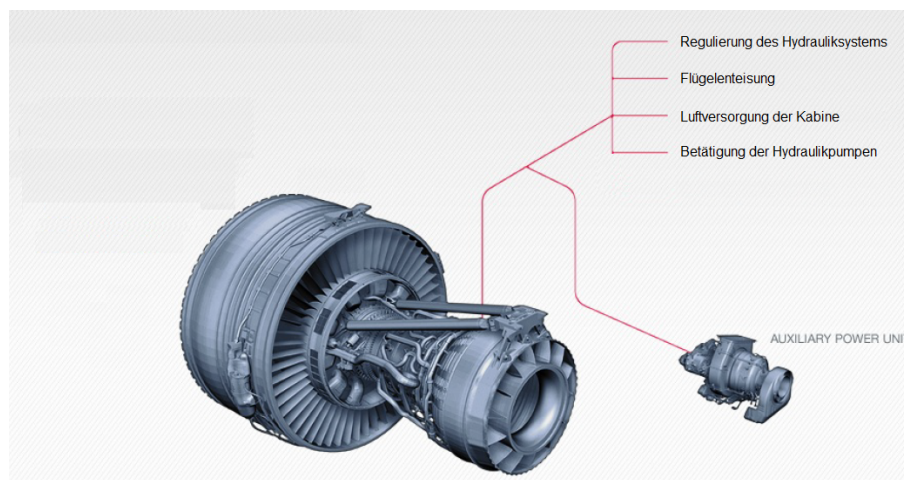


Abbildung 7.1.: Vergleich der Kabinenbelüftungssysteme

- die Luftversorgung in der Kabine
- die Druckregulierung des Hydrauliksystems
- die Flügelenteisung
- die Betätigung der Hydraulikpumpen
- der Motorstart [33]



**Abbildung 7.2.:** Subsysteme, die bei der B787 mit Strom betrieben werden, statt mit Zapfluft [33], bearbeitet mit Paint

Lediglich die Triebwerksenteisung und die Druckregulierung des hydraulischen Tanks werden noch durch die Zapfluftentnahme im Triebwerk reguliert [78]. Durch diese neue Technik sowie die Reduzierung des Gewichtes der Flugzeughülle durch den Verbau von Kohlefasern spart Boeing bis zu 3 % Treibstoff ein [71]. Die Kraftstoffreduzierung wird erreicht durch:

- die Reduzierung der Wartungskosten durch das Eliminieren des komplizierten Zapfluftsystems und der Vereinfachung des Triebwerkaufbaus
- die höhere Reichweite der Flugzeuge durch eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauches
- die Gewichtsreduzierung durch die Eliminierung des pneumatischen System, dem Precooler, den Steuerventilen und den Leitungen
- die Reduzierung der Zapfluftentnahme und der entsprechenden Leistungszunahme und Treibstoffreduzierung [78]

Die Boeing 787 besitzt 2 Triebwerke. An jedem Triebwerk sind zwei Startgeneratoren/Wellengeneratoren montiert, die mit der Turbinenwelle verbunden sind. Je nach Umdrehungszahl der Triebwerkswelle erzeugen die Generatoren eine Wechselspannung von 235kV mit einer Frequenz zwischen 360 und 800 Herz [78]. Die Generatoren speisen ihre Spannung in eine Verteilungseinheit (XFR in Abbildung 7.3) ein.

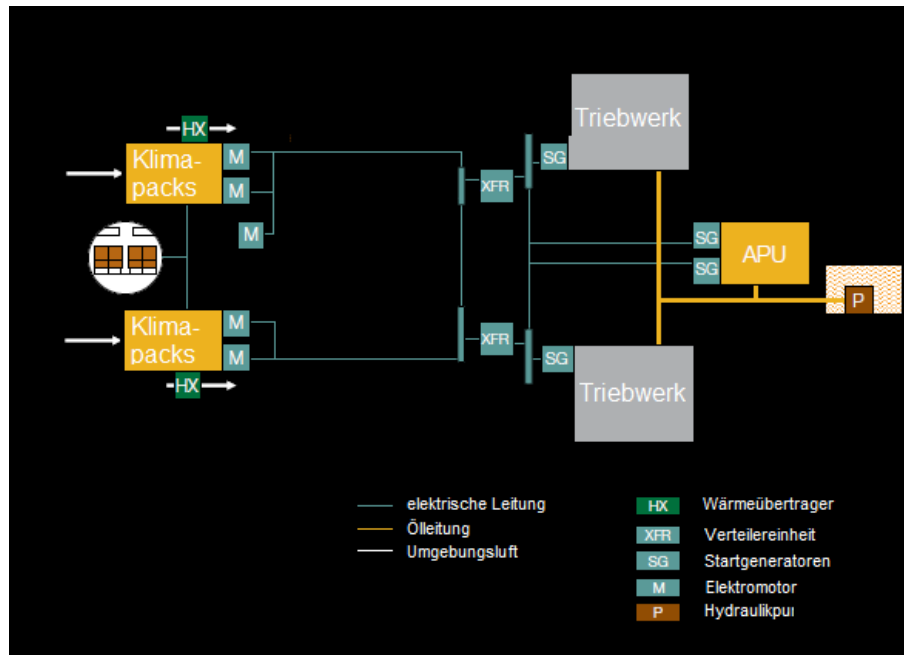


Abbildung 7.3.: Prinzipskizze der B787: Luftversorgung für Passagiere und Crew [78], bearbeitet mit Paint

Von diesen Verteilern wird der Strom an die verschiedenen Subsysteme weitergeleitet. Für die Frischluftversorgung in der Kabine wird aus der Wechselstromverteilereinheit ein Teil des Stroms in einer Transformator-Gleichrichtereinheit in Gleichspannung umgewandelt. Die Gleichspannung beträgt 270 V (DC), da der nachfolgende Verdichter über einen Gleichspannungs-Motor betrieben wird [78]. Die Frischluft gelangt über spezielle Kabinenlufteinlässe in das Innere des Flugzeugrumpfes (siehe Abbildung 7.4) und wird in dem Verdichter über einen Motor auf 3,1 bar komprimiert und auf 180 °C erwärmt. Anschließend gelangt die Luft in die Klimapacks und von dort in die Mischeinheit [78]. Die Klimapacks entsprechen dem beschriebenen System in Kapitel 3.1.

In einem 2017 veröffentlichten EASA Report über die Qualität der Kabinenluft wurden insgesamt 69 Flüge betrachtet. Dabei wurde unter anderem der TCP Gehalt der Kabinenluft - sozusagen als Leitindikator für eine Öldampf-Kontamination der Kabinenluft - gemessen. 60 Flüge fanden auf Flugzeugen mit dem Zapfluftsystem statt, 9 Flüge wurden mit dem zapfluftfreien System B787 durchgeführt. Bei den Flugzeugen mit dem Zapfluftsystem wurde ein durchschnittlicher TCP-Gehalt (TmCP und TpCP) von 0,009  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Abbildung 7.4.:** Entnahmestelle der Kabinenluft bei einer B787 [49], bearbeitet mit Paint

und ein maximaler TCP-Wert von  $1,515 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ermittelt. Bei dem zapfluftfreien System der B787 wurde dagegen sogar ein höherer durchschnittlicher TCP Wert von  $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen, aber ein deutlich geringerer Maximalwert von  $0,403 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [28].

Dieses Ergebnis ist überraschend, da nicht zu erklären ist, woher das detektierte TCP auf den zapfluftfreien Flügen stammen könnte. Erstens ist die Welle in den Klimapacks der B787 luftgelagert, zweitens wird die Kabinenluft nicht über die Triebwerke gewonnen. Die Frischluftzufuhr für die Kabine befindet sich am Bug des Flugzeuges. Insofern ist eine Begründung für das Auftreten von TCP in der B787 noch offen. Da die Studie lediglich auf den Daten von 9 Flügen basiert, sind weitere Daten inklusive eines genau definierten Studiensettings notwendig, um hier eine aussagekräftige Bewertung vorzunehmen. Die gemessenen TCP-Werte auf den Flügen mit dem Zapfluftsystem bestätigen hingegen die Vermutung, dass stets kleine Mengen an Ölnebel aus den Schmieröllagerkammern aufgrund der Dichtungsgeometrie austreten.

### 7.1.2. Elektrische Klimapacks

Nicht nur Boeing forscht an neuen elektrischen Klimasystemen. Wie oben kurz beschrieben, hat auch Liebherr ein neues Klimatisierungssystem entwickelt, das im Juli 2016 erstmals unter realen Bedingungen an einer ATR 72 und einem A320-Prototypen (MSN001) getestet worden ist [75].

Bei diesem System wird wie bei der B787 statt Zapfluft Frischluft verwendet. Der Unterschied zwischen den beiden Systemen liegt in den Klimapacks. Bei der Boeing 787 wird die einströmende Verdichterluft über einen Verdichter zuerst auf 3,1 bar komprimiert und auf 180 °C erhitzt. Anschließend gelangt die komprimierte Luft in die konventionellen Klimapacks, in der sie auf 0,78 bar entspannt und auf -12 °C gekühlt wird.

B787 Ansatz:

Außenluft -> Verdichter + Strom -> heiße Druckluft strömt in die konventionellen Klimapacks -> klimatisierte Luft gelangt über die Klimapacks in die Kabine [19]

Im Vergleich zu diesem System besteht das System von Liebherr darin, den elektrisch betriebenen Verdichter direkt in die Klimapacks zu integrieren. Der elektrisch angetriebene Turboverdichter wird insgesamt mit einer Leistung von 50 kW betrieben und über eine Leistungselektronik geregelt [75]. Dies bedeutet, dass die Frischluft direkt in die elektrisch betriebenen Klimapacks geleitet wird, ohne vorher komprimiert und erhitzt zu werden, siehe Abbildung 7.1. Nach den Klimapacks gelangt die nun klimatisierte Frischluft in die Kabine. Durch dieses neue System werden viele Komponenten gespart, wie z.B. der Precooler und die Ventile.

Liebherr Ansatz:

Außenluft -> elektrisch angetriebene Klimapacks mit luftgelagerter Welle -> klimatisierte Luft in der Kabine [19]

Da sich das Klimapack von Liebherr noch in der Entwicklungsphase befindet, sind weitere Details bezüglich der Klimapacks noch nicht bekannt.

## 7.2. Monitoringsystem zur Überwachung der Luftqualität

Zusätzlich zu den neuen Filtersystemen und zapfluftfreien Systemen sind auch Systeme zur Überwachung der Luftqualität neu entwickelt worden. Die Firma FliteTrak aus England baut ein Monitoringsystem mit dem Namen FliteTrak's ViatorAir, bei dem sich die Sensoren zur Messung der Luftqualität in den Flugzeugsitzen befinden. Die von den Sensoren aufgenommenen Daten werden an ein Gerät oder Tablet der Flugbegleiter weitergeleitet [43]. Dabei können nicht nur Druck, Temperatur und Feuchtigkeit der Luft gemessen werden, sondern auch die einzelnen Inhaltstoffe der Kabinenluft wie NH<sub>3</sub>, Nitrogenoxide (NO<sub>x</sub>) Alkohol, Benzene, Rauch, CO<sub>2</sub>, Ozon, Propan, Butan, Methan und TCP [3]. Die von den Sensoren aufgenommenen Daten werden an das Endgerät gesendet und können je nach Kundenwunsch entsprechend angezeigt werden. Die Daten werden auf dem Endgerät gespeichert und können bei Bedarf heruntergeladen werden. Seit 2012

wird dieses System erfolgreich in Zügen getestet und kann so die Zugbetreiber auch in der vorausschauenden Wartung unterstützen [59]. Im Moment stellt das Unternehmen seine Technologie bei den Fluggesellschaften vor.

Ein solches System würde die Flugzeugbesatzung in die Lage versetzen, verlässliche Daten über die Qualität der Kabinenluft zu erhalten.

## 7.3. Filtersysteme

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, gibt es verschiedene Möglichkeiten, Filtersysteme zu verbauen. Es wird zwischen Filtersystemen in der Rezirkulation und im Zapfluftsystem unterschieden, siehe Abbildung 3.10.

### Filtersysteme in Kurzstreckenflugzeugen

In den Kurzstreckenflugzeugen wird die Kabinenluft lediglich in der Rezirkulation gefiltert, siehe Abbildung 7.5. Bei diesen werden immer HEPA-Filter zur Reinigung der Kabinenluft von Bakterien, Viren, Pollen usw. verbaut und optional Aktivkohlefilter. Bei einem Fume Event und Öldampf-kontaminierter Kabinenluft kann diese erst in der Rezirkulation über den Aktivkohlefilter gefiltert werden. Ist kein Aktivkohlefilter verbaut, wird die rezirkulierende Luft nicht gereinigt. Der Aktivkohlefilter befreit die Kabinenluft mit einer knapp 70 %igen Effizienz von Öldampf [75]. D.h. auf Kurzstreckenflügen mit einem Fume Event, wird die möglicherweise mit Öldampf belastete Kabinenluft erst von den Passagieren, der Crew und den Piloten eingeatmet, bevor diese in der Rezirkulation gefiltert wird.

Die kombinierten HEPA-/Aktivkohlefilter werden schon seit ein paar Jahren in der Rezirkulation verbaut. Seit Oktober 2017 testen Lufthansa, Condor und Tuifly neu entwickelte HEPA/-Aktivkohle Kombi-Filter, über die auch VOCs entfernt werden können, die aus Verbrennungsrückständen von Schmierölen stammen können [50]. Diese Filtersysteme werden von dem amerikanischen Filterhersteller Pall produziert und werden unter dem Namen Advanced Cabin Air Filter (ACAF) vermarktet [26]. Bei einem akuten Fume Event reduziert dieser Filter in der Rezirkulation die Belastung durch die Kontamination drei- bis viermal schneller als ohne diese Filter [65].

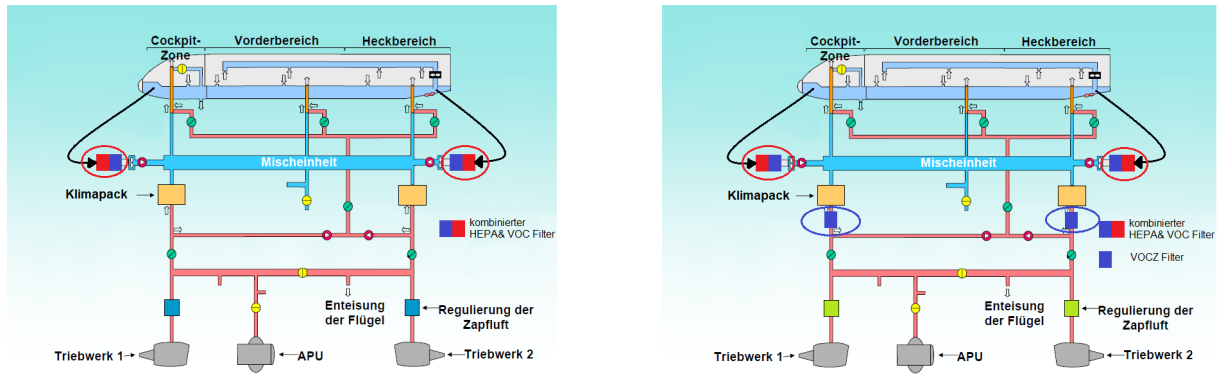


Abbildung 7.5.: Filtersysteme in den aktuellen Kurzstreckenflugzeugen (links) und Langstreckenflugzeugen (rechts) [75], bearbeitet mit Paint

## Filtersysteme in Langstreckenflugzeugen

Zusätzlich zu den HEPA-/ und Aktivkohlefiltern in der Rezirkulation werden in den Langstreckenflugzeugen Ozon-Konverter im Zapfluffsystem verbaut. Da die Langstreckenflugzeuge in größeren Höhen unterwegs sind, steigt auch die Ozon-Belastung. Optional können VOC-Konverter zusammen mit den Ozon-Konvertern vor den Klimapacks verbaut werden (VOCZ-Konverter). Diese können VOC-Moleküle, die z.B. durch Verbrennungen von Ölnebel entstehen können, aus der Zapfluff filtern [12]. Die VOCZ-Konverter werden vom Chemieunternehmen BASF hergestellt. Da die VOCZ-Konverter vor den Klimapacks verbaut sind, kann bei einem Fume Event dennoch über die Trimmlufftleitung eine Kontamination der Kabinenluft über das Lufteinstellventil stattfinden. Auch diese Filtermöglichkeiten, die ebenfalls in Kapitel 3.3 beschrieben worden sind, bieten gegenüber einem auftretenden Fume Event keinen kompletten Schutz. Die Konverter vermindern jedoch die Öldampf-Belastung.

## Zukünftige Positionierung von Filtersystemen

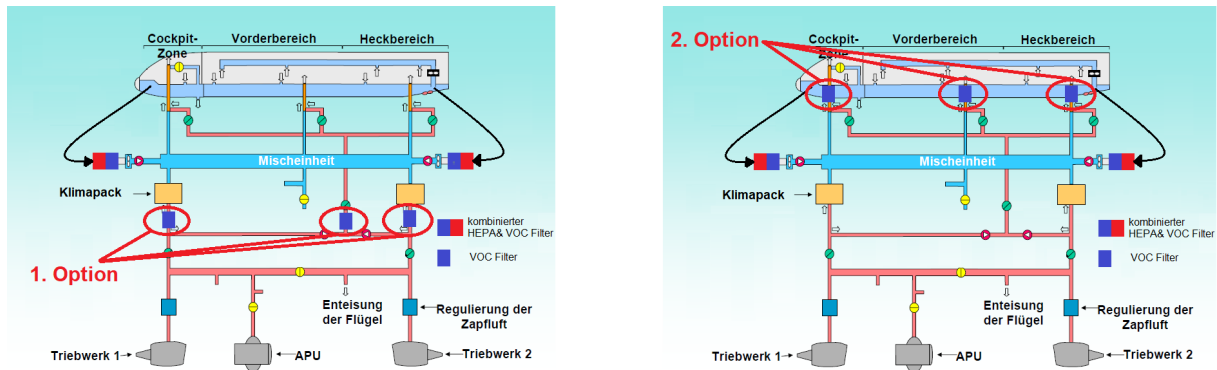
Um bei einem Auftreten von Fume Events die Flugzeuginsassen weiter zu schützen, müssen meines Erachtens weitere Filtersysteme verbaut werden.

### 1. Möglichkeit

Um die VOC-Belastung in der Mischeinheit zu minimieren, müssten zusätzlich zu den VOC-Konvertern vor den Klimapacks, VOC-Konverter in der Trimmlufftleitung verbaut werden, siehe Abbildung 7.6 „Option 1“. Da die VOCZ-Konverter auf dem Prinzip der Oxidation beruhen und für diesen Prozess Temperaturen um die 200 °C notwendig sind,



müssen diese vor den Klimapacks verbaut werden. Da auch der Trimmluftmassenstrom eine Temperatur von  $180^{\circ}\text{C}$  hat, könnte, entsprechend Abbildung 7.6, ein VOCZ-Konverter „leicht“ verbaut werden. Dennoch kann auch im späteren Verlauf in den Klimapacks die Zapfluft mit Ölnebel kontaminiert werden. Ist die Air Cycle Machine nicht luftgelagert, kann Ölnebel über die Dichtungen in die Zapfluft gelangen und diese kontaminieren. Dieses Schmieröl würde zwar nicht mehr pyrolysieren, könnte aber über die Vermischung mit der Zapfluft in die Kabine gelangen.



**Abbildung 7.6.:** Filtersysteme, die in Zukunft während eines Fume Events eine Schmierölkontamination in der Flugzeugkabine deutlich vermindern würden [75], bearbeitet mit Paint

## 2. Möglichkeit

Eine weitere Überlegung wäre die Montage der VOC-Filter vor dem direkten Eintritt in die Kabine. Da im Anschluss an die Filter keine Kontaminationsmöglichkeiten vorhanden wären, könnte die Kabinenluft auf diesem Weg von Schmierölkontaminationen gefiltert werden, siehe Abbildung 7.6 „Option 2“. Jedoch existieren im Moment noch keine VOC-Filter, die im Tieftemperaturbereich die VOC-Moleküle aus der Luft filtern können. Trotz dieser Filterbauarten, die in Kapitel 3.3 erläutert worden sind, können diese bei einem akuten Fume Event, den Fluggastrum nur bedingt schützen. Ein Großteil der Schmierölkontamination würde durch die VOC-Konverter aus der Zapfluft gefiltert werden. Eine kompletter Schutz ist aber ausgeschlossen. Ein Teil wird immer in die Kabine gelangen.

Jedoch verringert jedes weitere Filtersystem eine Kontamination der Kabine mit Öldampf bzw. Schmierölen. Die in den Kurzstreckenflugzeugen verbauten HEPA/-Aktivkohlefilter schützen ohne eine zusätzliche Montage von VOC-Filtern vor den Klimapacks die Kabine überhaupt nicht vor einer Schmierölkontamination. Die kontaminierte Kabinenluft wird erst in der Rezirkulation von den VOC-Molekülen gereinigt.

## 7.4. Messung des Druckgefälles

Darüber hinaus würde das Messen des Druckgefälles über der Öldichtung mittels Sensoren, die die Crew vor einer Druckumkehr zwischen Luftkammer und Schmierölkammer warnen. In einem solchen Fall würde automatisch Ölnebel aus der Schmierölkammer austreten und die Kabinenluft kontaminieren. Ein Fume Event wäre unvermeidlich. Durch eine Überwachung des Druckgefälles könnte ein solcher Fall detektiert werden und das Auftreten von Ölnebel könnte durch eine Druckerhöhung der Sperrluft verhindert werden. Die Druckerhöhung könnte durch die Entnahme der Sperrluft von einer anderen Stelle im HD-Verdichter oder einem vorrätigen Sperrluftdruckspeicher erfolgen. Eine weitere Alternative zur Erhöhung des Sperrluftdruckes wäre die kurzfristige Erhöhung des Schubs, um das Verdichterdruckverhältnis und somit den Sperrluftdruck zu erhöhen. Ein Fume Event wäre auf diesem Wege verhinderbar bzw. in der Intensität vermindierbar.

## 7.5. Messung des Spaltabstandes der Öldichtung

Darüber hinaus könnte der Spaltabstand in der Öldichtung und der Sperrluftdichtung gemessen werden. Durch die verschiedenen Flugphasen ändert sich dieser durch verschieden angreifende Kräfte und Temperaturen kontinuierlich. Zur Messung des Spaltabstandes könnte ein Laser verwendet werden. Da jedoch bereits eine Stufenlabyrinthdichtung, die das Austreten von Ölnebel von der Schmierölkammer in die Luftkammer weiter vermindern würde, zu komplex für das Triebwerk ist und zu viel Bauraum kosten würde, wird selbst diese „einfache“ Option nicht verwendet. Von daher ist es fraglich, ob die Triebwerkshersteller einen Laser installieren würden.

## 7.6. Sensoren vor der Mischkammer

Eine weitere Option wären Sensoren, die nach den Klimapacks verbaut werden. Diese würden zwar kein Fume Event verhindern, aber die Besatzung vor einer Kontamination warnen. Gegebenenfalls hätte v.a. die Besatzung die Möglichkeit, die Sauerstoffmasken aufzusetzen. Diese Sensoren würden auch eine mögliche minimale Kontamination der Kabinenluft durch Ölverschmutzungen in den Klimapacks messen können und sind vermutlich leichter zu installieren als in den Dichtungen der Luft- bzw. Schmierölkammer.

## 8. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der Analyse der Entstehungsmechanismen von Ölnebel in Flugzeugkabinen befasst. Einleitend sind die gesetzlichen Anforderungen an die Kabinenluft sowie die Vorschriften der Zulassungsbehörden an die Luftqualität betrachtet worden. Dann wurde ausführlich der technische Aufbau des Luftversorgungssystems erläutert, einschließlich der Zapfluftentnahme aus dem Hochdruckverdichter, der Aufbereitung in den Klimapacks sowie der Luftzufuhr über die Mischeinheit in die Flugzeugkabine. Darüber hinaus wurden die Filtersysteme in der Rezirkulation wie HEPA- und Aktivkohlefilter zur Aufbereitung der verbrauchten Kabinenluft erklärt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Lagerung der Triebwerkskomponenten wie z.B. dem Hochdruckverdichter. Eine typische Lagerung besteht aus dem Kugellager, das sich in einer Schmierölkammer befindet. In dieser wird dem Lager kontinuierlich Schmieröl zur Kühlung, Korrosionshemmung und Verschleißminderung zugeführt. Um einen Austritt dieses Schmieröls in Form von Ölnebel aus der Schmierölkammer in die Umgebung zu verhindern, wurden die beiden dafür verwendeten Dichtungssysteme, Labyrinth- und Karbondichtung, dargestellt. Der chemische Aufbau des Schmieröls und seine Zusätze wie Antioxidantien und Antiverschleißadditive wurden in einem separaten Unterkapitel behandelt, ebenso die möglichen gesundheitsgefährdenden Auswirkungen auf die Besatzungsmitglieder und Passagiere. Um der Fragestellung nachzugehen, auf welchem Weg Öldampf in die Flugzeugkabine gelangen kann, wurde detailliert der Weg des Ölnebels aus der Schmierölkammer der Triebwerkslager in die Flugzeugkabine beschrieben. Infolge der Partialdruckunterschiede (Daltonsches Prinzip) und variierender Flugphasen sowie durch die konstruktionsbedingten geringfügigen Undichtigkeiten in den Labyrinth- und Karbondichtungen, treten stets kleinere Mengen an Ölnebel aus der Schmierölkammer aus. Höhere Mengen an Ölnebel können durch Verschleiß der Dichtungen auftreten. Dieser Verschleiß kann verursacht werden durch erhöhte Reibung, grobe Landungen, wechselnde thermische Bedingungen oder durch eine Druckumkehr zwischen Luft- und Schmierölkammer durch eine fehlerhafte Öldruckpumpe einschließlich des Druckbegrenzungsventils. Dies kann zu einem Fume Event führen. Unter Fume Events werden Ereignisse subsumiert, bei denen in der Flugzeugkabine Gerüche, Rauch oder Nebel auftreten oder es zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung der Passagiere oder der Flugzeugbesatzung kommt. Verschiedene Flugzustände haben da-

bei einem großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Fume Events. Besonders im Steig- bzw. im Sinkflug treten Fume Events gehäuft auf. Dies ist auf den variierenden Spaltabstand zwischen Lamelle und Gehäuse der Labyrinthdichtung aufgrund von Zentrifugalkräften und thermischer Ausdehnung zurückzuführen. In Kapitel 6 wurden die Auswirkungen einer Schmierölkontamination in der Flugzeugkabine auf den Menschen anhand mehrerer Studien dargestellt. Auftretende Symptome nach einem Fume Event können unter anderem Kopfschmerzen, kognitive Einschränkungen, Atemprobleme und Herz-Kreislaufprobleme sein. Im letzten Kapitel wurden Maßnahmen zur Vermeidung von Öldämpfen in der Flugzeugkabine beschrieben. Hier standen zwei Alternativsysteme zum Zapfluftsysteem im Fokus: Das zapfluftfreie System der B787 von Boeing und die von der Firma Liebherr neu entwickelten elektrisch angetriebenen Klimapacks. Zur Überwachung der Luftqualität wurde ein Monitoring-System der Firma FliteTrak vorgestellt. Bei diesem können mittels Sensoren neben Druck und Temperatur auch die einzelnen Inhaltsstoffe der Kabinenluft, wie z.B. TCP, gemessen werden. Zur Reduzierung der Schmierölmenge in der Kabine wurden unterschiedliche Positionierungen der Filtersysteme vorgestellt. Zur Zeit werden bei den meisten Flugzeugen lediglich Filter in der Rezirkulation verwendet. Da diese nach der Flugzeugkabine angeordnet sind, können sie kein Fume Event verhindern. Eine Möglichkeit wäre, die Montage der Filter vor dem direkten Eintritt in die Kabine zu montieren. Weitere Vorschläge wären die Messung des Druckgefälles zwischen Luft- und Schmierölkammer, die Messung des Spaltabstandes der Öldichtung sowie der Einbau von Sensoren zur Messung der Luft-Qualität vor der Mischeinheit.

## 9. Fazit und Ausblick

Die heutigen Passagierflugzeuge gewinnen ihre Kabinenluft mit Ausnahme der Boeing 787 über das Zapfluftsystem, wobei in seltenen Fällen Fume Events durch Ölkontaminationen entstehen können. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der Entstehungsmechanismen von Ölnebel in Flugzeugkabinen. Vermutet wird, dass Öldampf ausschließlich beim Auftreten von Fume Events in der Flugzeugkabine nachgewiesen werden kann. Bei der Untersuchung der Ursachen von Fume Events und der Untersuchung diverser Studien zeigt sich jedoch, dass Öldampf immer in geringen Mengen in der Flugzeugkabine enthalten ist, nicht nur während eines Fume Events. Verantwortlich dafür ist der Aufbau der Lagerdichtungen im Triebwerk. Durch die hohe Umdrehungszahl der Welle werden berührungslose Labyrinthdichtungen oder Flüssigkeits-geschmierte Karbondichtungen in der Lagerkammer verwendet. Diese Dichtungen sind aber niemals leckagefrei. Daher tritt immer Ölnebel in geringen Mengen aus der Schmierölkammer aus und kontaminiert die Flugzeugkabine. Diese Kontamination ist in verschiedenen Studien nachgewiesen worden. Zukünftig wäre es sinnvoll, weitere Studien zur Qualität der Kabinenluft auf Flügen durchzuführen. Dies gilt sowohl für Flugzeuge mit dem Zapfluftsystem, aber auch für zapfluftfreie Flugzeuge wie die B787. Bisher sind innerhalb einer Studie nur die Daten relativ weniger Flüge zusammengetragen worden, wie z.B. in der „Preliminary cabin air quality measurement campaign“ - Studie mit insgesamt 69 Flügen. Zu untersuchen wäre in diesem Zusammenhang auch die Auswirkung möglicherweise kontaminierter Kabinenluft auf die Gesundheit von Urlaubsfliegern, Vielfliegern und Dauerfliegern (Piloten und Crewmitglieder). Experten schätzen, dass bei jedem 2000. bis 5000. Flug ein Fume Event auftritt [4], [40]. Bisher wurden jedoch noch keine Daten während eines Fume Events erhoben. Das würde sich durch ein flächendeckendes Monitoring-System ändern. Darüber hinaus liegt ein Zusammenhang zwischen dem toxischen Öldampf (TCP als Leitindikator) in der Flugzeugkabine und dem Auftreten des aerotoxischen Syndroms nahe, das zeigt die Analyse oben genannter Studien. Öldampf-Kontaminationen der Kabinenluft sind nicht nur gesundheitsgefährdend, sondern können auch zu sicherheitsrelevanten Situationen führen und widersprechen der CS-25.831, die eine Kabinenluft „frei von schädlichen oder gefährlichen Gasen oder Dämpfen“ fordert. Deshalb wird eine generelle Umstellung des Zapfluftsystems auf das Stauluftsystem wie bei der B787 gefordert, um das Auftreten

von Fume Events zu verhindern. Da die Flugzeuge mit Zapfluftsyste $m$  nicht auf das neue Stauluftsystem nachgerüstet werden können, sind Maßnahmen zur Detektion und zur Verminderung eines Fume Events gefragt. Detektoren könnten zur Messung des Druckgefälles in den Lagern und der Messung der Luftqualität vor dem Eintreten in die Kabine verbaut werden. Zur Verminderung der Luftkontamination werden Filtersysteme benötigt, die nicht nur die rezirkulierende Luft filtern, sondern auch die Zapfluft vor dem Eintreten in die Mischeinheit. Um die Kabinenluft hinsichtlich gefährlicher Stoffe zu überwachen, ist ein Monitoring-System nötig, das die Kabinenluft permanent überwacht und wichtige Daten sammelt. Der englische Monitoring-Hersteller FliteTrak hat ein System entwickelt, das seit 2012 erfolgreich in Zügen getestet wird. Darüber hinaus wäre eine Reduzierung der Wartungsintervalle hilfreich, um Lagerdichtungen präventiv auszuwechseln.

# Literatur

- [1] Adriaensen, A.: *The International Perspective - London 2017*. London, 2017-09-19. URL: <https://tinyurl.com/ArieAdriaensen>.
- [2] Ahrendts, F.: *Klimapacks: Gespräch*. 2018-06-15.
- [3] Barnett, A.: *Monitoringsystem zur Überwachung der Luftqualität: Email*. 2018-06-08.
- [4] BASF: *Wie funktioniert ein Drei-Wege-Katalysator?* 2013. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=0G525W0Cx54> (besucht am 14.06.2018).
- [5] Bergau, L.: „Luftqualität an Bord von Verkehrsflugzeugen“. In: *Ärzteblatt*. Bd. 49/97. URL: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/8827/Flugmedizin-Luftqualitaet-an-Bord-von-Verkehrsflugzeugen> (besucht am 06.06.2018).
- [6] Berndt, C. und Ludwig, J.: „Das Kartell“. In: *Süddeutsche Zeitung* (2018-05-26), S. 11–13. URL: [http://www.anstageslicht.de/fileadmin/user\\_upload/Geschichten/Arbeitsmedizin/Das\\_Kartell\\_BUCH\\_ZWEI\\_260518.pdf](http://www.anstageslicht.de/fileadmin/user_upload/Geschichten/Arbeitsmedizin/Das_Kartell_BUCH_ZWEI_260518.pdf) (besucht am 28.06.2018).
- [7] Boyce, M. P.: „Gas Turbine Engineering Handbook“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016. URL: <https://tinyurl.com/Boyce-EngineeringHandbook> (besucht am 01.07.2018).
- [8] Bräunling, W. J. G.: *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*. 4. Aufl. VDI-Buch. Berlin u.a.: Springer Vieweg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-642-34539-5.
- [9] Bröring, M.: *Unterschied Öldampf-Ölnebel: Email*. 2018-06-15.
- [10] Bula, E. C.: *Cabin Air Quality*. 2017-05-01. URL: <http://www.defence.gov.au/DASP/Docs/AgencyConferenceDocumentation/PropulsionSymposium/2017/MrEricBulaCabinAirQuality.pdf>.

- [11] Bull, K.: *Cabin Air Filtration: Current Technologies and Future Solutions*. 2009. URL: [http://www.pall.de/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/Cabin\\_Air\\_-\\_ICE\\_Conf\\_Mar09\\_K\\_Bull\\_iss2.pdf](http://www.pall.de/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/Cabin_Air_-_ICE_Conf_Mar09_K_Bull_iss2.pdf).
- [12] Bull, K. und Roux, P.: „Cabin Air Filtration Systems: Novel Technological solutions for Commercial Aircraft“. In: *40th International Conference on Environmental Systems 2010*. Hrsg. von American Institute for Aeronautics and Astronautics. 2010. DOI: 10.2514/6.2010-6291.
- [13] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: „Merkblatt zur BK Nr. 1307: Erkrankung durch organische Phosphorverbindungen“. In: *Bundesarbeitsblatt*. Bd. 7/8/1979. URL: <https://tinyurl.com/BfAuS-organischePhosphor> (besucht am 12.06.2018).
- [14] Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung: *Studie über gemeldete Ereignisse in Verbindung mit der Qualität der Kabinenluft in Verkehrsflugzeugen*. Braunschweig, 2014. URL: [https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Statistiken/Tabellen-Studien/Tab2014/Studie\\_Fume\\_Events\\_2014.html](https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Statistiken/Tabellen-Studien/Tab2014/Studie_Fume_Events_2014.html) (besucht am 02.06.2018).
- [15] Camfil KG: *Filtertechnologien: Grundlagen der Filtertechnik*. Hrsg. von Camfil KG. 13.06.2018. URL: <https://www.camfil.de/Filtertechnologie/Grundlagen-der-Filtertechnik/Siebeffekt/>.
- [16] Chupp, R. E., Hendricks, R. C., Lattime, S. B. u. a.: „Sealing in turbomachinery“. In: *Journal of Propulsion and Power* 22(2) (2006), S. 313–349. ISSN: 0748-4658.
- [17] Chupp, R. E., Hendricks, R. C. und Steinetz, B. M.: „Gas Turbine Engines: Seals“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016. DOI: 10.1002/9780470686652.eae095.
- [18] Clark, S. F.: „787 Propulsion System“. In: *Aero Quarterly* 47(3) (2012), S. 05–13. URL: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012\\_q3/pdfs/AERO\\_2012q3.pdf](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q3/pdfs/AERO_2012q3.pdf) (besucht am 25.06.2018).
- [19] Coudrin, J.: *Electrical ECS: Email*. 2018-06-05.
- [20] Deutsches Luft-und Raumfahrtzentrum: *Wieso, weshalb, warum: Wie funktionieren Turbinen?* URL: [http://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6762/11106\\_read-25326/](http://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6762/11106_read-25326/) (besucht am 05.06.2018).
- [21] dokzentrum: *Betroffene kontaminierter Kabinenluft*. 2016. URL: <https://tinyurl.com/dokzentrum-Kabinenluft> (besucht am 30.06.2018).



- [22] dokzentrum: *Gesundheit, Wissenschaft und wirtschaftliche Interessen beim aerotoxischen Syndrom*. Hrsg. von ansTageslicht.de. 13.02.2017. URL: <https://tinyurl.com/dokzentrum-Gesundheit>.
- [23] dokzentrum: *Kontaminierte Kabinenluft: ein Gesundheitsproblem wird zur Gewissheit. Chronologie des "aerotoxischen Syndroms"*. 13.12.1016. URL: <https://tinyurl.com/dokzentrum-AerotoxischeSyndrom>.
- [24] dokzentrum: *Wer, wie, was, warum. Wer nicht forscht, bleibt dumm. "Kasuistik"-Studien in der Arbeitsmedizin*. 17.05.2018. URL: <http://www.anstageslicht.de/themen/gesundheit/krank-durch-arbeit-oder-das-schattenreich-von-arbeitsmedizin-und-gesetzlicher-unfallversicherung/wer-wie-was-warum-wer-nicht-forscht-bleibt-dumm-kausiastik-beim-aerotoxischen-syndrom/> (besucht am 30.06.2018).
- [25] Donaldson: *Air Purification System for Aribus A320*. 2015. URL: <https://www.donaldsonaerospace-defense.com/library/files/documents/pdfs/F112273-ENG-Air-Purification-System-Airbus.pdf> (besucht am 18.06.2018).
- [26] Eberwein, A. K.: *Filtertechnologien: Gespräch, Email*. 11.06.2018; 18.16.2018.
- [27] Europäische Union: *Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA)*. URL: [https://europa.eu/european-union/about-eu/agencies/easa\\_de](https://europa.eu/european-union/about-eu/agencies/easa_de) (besucht am 02.07.2018).
- [28] European Aviation Safety Agency: *Preliminary cabin air quality measurement campaign*. URL: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20CAQ%20Study%20Final%20Report\\_21.03.2017.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20CAQ%20Study%20Final%20Report_21.03.2017.pdf) (besucht am 28.06.2018).
- [29] Exxon Mobil: *Jet engine oil system*. 1.02.2017. URL: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/knowledge-library/resources/jet-engine-oil-system-1> (besucht am 31.05.2018).
- [30] Exxon Mobil: *Nutzfahrzeug Öle: Was ist ein synthetischer Schmierstoff?* URL: [http://www.mobiloil.de/Germany-German-LCW/heavydutyengineoils\\_why-mobil-delvac\\_synthetics.aspx](http://www.mobiloil.de/Germany-German-LCW/heavydutyengineoils_why-mobil-delvac_synthetics.aspx) (besucht am 30.06.2018).
- [31] F.A. Brockhaus GmbH: „Aktivkohle“. In: *Brockhaus Enzyklopädie*. Hrsg. von F.A. Brockhaus GmbH. Bd. 1. Mannheim, 1986, S. 293.
- [32] Federal Aviation Administration: „Aviation Maintenance Technician Handbook-Powerplant“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. Bd. 2. 2016. URL: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/media/FAA-H-8083-32-AMT-Powerplant-Vol-2.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/media/FAA-H-8083-32-AMT-Powerplant-Vol-2.pdf) (besucht am 01.07.2018).

- [33] Fehrm, B.: *Bjorn's Corner: Efficient systems*. Hrsg. von Leeham News and Comment. 5.02.2016. URL: <https://leehamnews.com/2016/02/05/bjorns-corner-efficient-systems/> (besucht am 25.06.2018).
- [34] Fischer, T.: *Anzeigen im Cockpit eines Flugzeuges zu Kabinenluftdaten: Gespräch*. 2018-05-28.
- [35] Flitney, R.: „A description of the types of high speed rotary shaft seals in gas turbine engines and the implications for cabin air quality“. In: *J. Biol. Phys. Chem* 14 (2014), S. 85–89. DOI: 10.4024/17FL14R.jbpc.14.04.
- [36] Flitney, R.: „Seals and sealing handbook“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016.
- [37] Fokus online: *Animation zeigt Europas kompletten Flugverkehr*. 2014. URL: [https://www.fokus.de/wissen/videos/wahnsinnige-zahlen-massenverkehr-ueber-europa\\_id\\_3677779.html](https://www.fokus.de/wissen/videos/wahnsinnige-zahlen-massenverkehr-ueber-europa_id_3677779.html) (besucht am 30.06.2018).
- [38] Hecker, P.: „Flugleistungen“. Skript. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [39] Henschler, D.: „Die Trikresylphosphatvergiftung: Experimentielle Klärung von Problemen der Ätiologie und Pathogenese“. In: *Klinische Wochenschrift* 36(14) (1958), S. 663–674. URL: <https://tinyurl.com/Henschler-TCP> (besucht am 28.06.2018).
- [40] Heutelbeck, A. R., Budnik, L. T. und Baur, X.: *Health disorders after "fume events" of aircraft crew member: facts and fiction*. Carpi, 2016-10-28. URL: [http://www.collegiumramazzini.org/download/2016/fri/RD-2016\\_PDF\\_Heutelbeck\\_Budnik-Baur\\_28102016.pdf](http://www.collegiumramazzini.org/download/2016/fri/RD-2016_PDF_Heutelbeck_Budnik-Baur_28102016.pdf).
- [41] Houtzager, M., Havermans, J., Noort, D. u. a.: *AVOIL Characterisation of the toxicity of aviation turbine engine oils after pyrolysis*. Hrsg. von European Aviation Safety Agency. 2017. URL: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20AVOIL\\_final%20report\\_final%20version\\_160217.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20AVOIL_final%20report_final%20version_160217.pdf) (besucht am 28.06.2018).
- [42] Infante, A.: *Informationsblatt bei Verdacht auf Organophosphatvergiftung: nach Eintritt von Beschwerden/Symptomen - auch ohne Geruchswahrnehmungen*. URL: <https://tinyurl.com/Infante-ersteHilfe> (besucht am 25.06.2018).
- [43] InsideMRO: *New developments in cabin air quality systems*. 7.02.2018. URL: <http://www.mro-network.com/mro-links/new-developments-cabin-air-quality-systems> (besucht am 25.06.2018).

- [44] Institut für Antriebstechnik: *Gegenläufige ummantelte Fans (CRTF)*. 4.12.2013. URL: [http://www.dlr.de/at/desktopdefault.aspx/tabid-9123/15735\\_read-38877/](http://www.dlr.de/at/desktopdefault.aspx/tabid-9123/15735_read-38877/) (besucht am 20.06.2018).
- [45] Jones, B. W., Amiri, P. S. N., Roth, P. J. W. u. a.: „The nature of particulates in aircraft bleed air resulting from oil contamination“. In: *2017 ASHRAE Winter Conference—Papers*. Hrsg. von ASHRAE. 2017. URL: [http://www.syndrome-aerotoxique.com/wp-content/uploads/2018/04/AVSA-jones-et-al\\_nature-of-particulates-in-oil-contaminated-bleed\\_2017\\_surl.pdf](http://www.syndrome-aerotoxique.com/wp-content/uploads/2018/04/AVSA-jones-et-al_nature-of-particulates-in-oil-contaminated-bleed_2017_surl.pdf) (besucht am 28.06.2018).
- [46] Keller, L.: *Leitfaden für Lüftungs-und Klimaanlageanlagen: Grundlagen der Thermodynamik, Komponenten einer Vollklimaanlage, Normen und Vorschriften*. Oldenbourg Industrieverlag, 2012.
- [47] Kern, M.: *Proof of Concept of a Mechanical Active Clearance Control System*. München, 2010-06-30. URL: [http://www.newac.eu/fileadmin/download/Workshop\\_2010/08\\_Proof\\_of\\_Concept\\_of\\_a\\_Mechanical\\_Active\\_Clearance\\_Control\\_System.pdf](http://www.newac.eu/fileadmin/download/Workshop_2010/08_Proof_of_Concept_of_a_Mechanical_Active_Clearance_Control_System.pdf).
- [48] KlimaCorner: *Die Struktur des Papierkreuzstromwärmetauschers*. URL: <https://tinyurl.com/Kreuzstromw-rmetauscher> (besucht am 19.06.2018).
- [49] Kopec, A.: *B787*. 2017. URL: <https://www.jetphotos.com/photo/8570531> (besucht am 01.07.2018).
- [50] Kortas, M. S.: *Neue Filtersysteme: Email*. 2018-06-18.
- [51] Lehle, W.: *Konzeption und Entwicklung von Flugzeugklimatisierungsanlagen*. Hrsg. von Liebherr Aerospace Lindenberg GmbH. Hamburg.
- [52] Liebherr: *Luftmanagementsysteme von Liebherr*. URL: <https://www.liebherr.com/de/che/produkte/aerospace-und-verkehrstechnik/aerospace/produkte-und-1%C3%B6sungen/luftmanagementsysteme/luftmanagementsysteme.html#!/lightbox/accordion-start-module=air-conditioning-acc-item-start-module+cabin-pressure-acc-item-start-module> (besucht am 28.06.2018).
- [53] Liebherr Aerospace: *Luftmanagementsysteme: Liebherr-Aerospace: No more hot air*. URL: <https://tinyurl.com/Liebherr-Luftmanagement> (besucht am 26.06.2018).
- [54] Linke-Diesinger, A.: *Systeme von Turbofan-Triebwerken: Funktionen der Triebwerkssysteme von Verkehrsflugzeugen*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [55] Loraine, T.: *Origins of Contaminated Air*. London, 2017-09-19. URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/3e3e4e\\_30dd2c6a9b4f4c5d9197373a24b7cc56.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/3e3e4e_30dd2c6a9b4f4c5d9197373a24b7cc56.pdf).

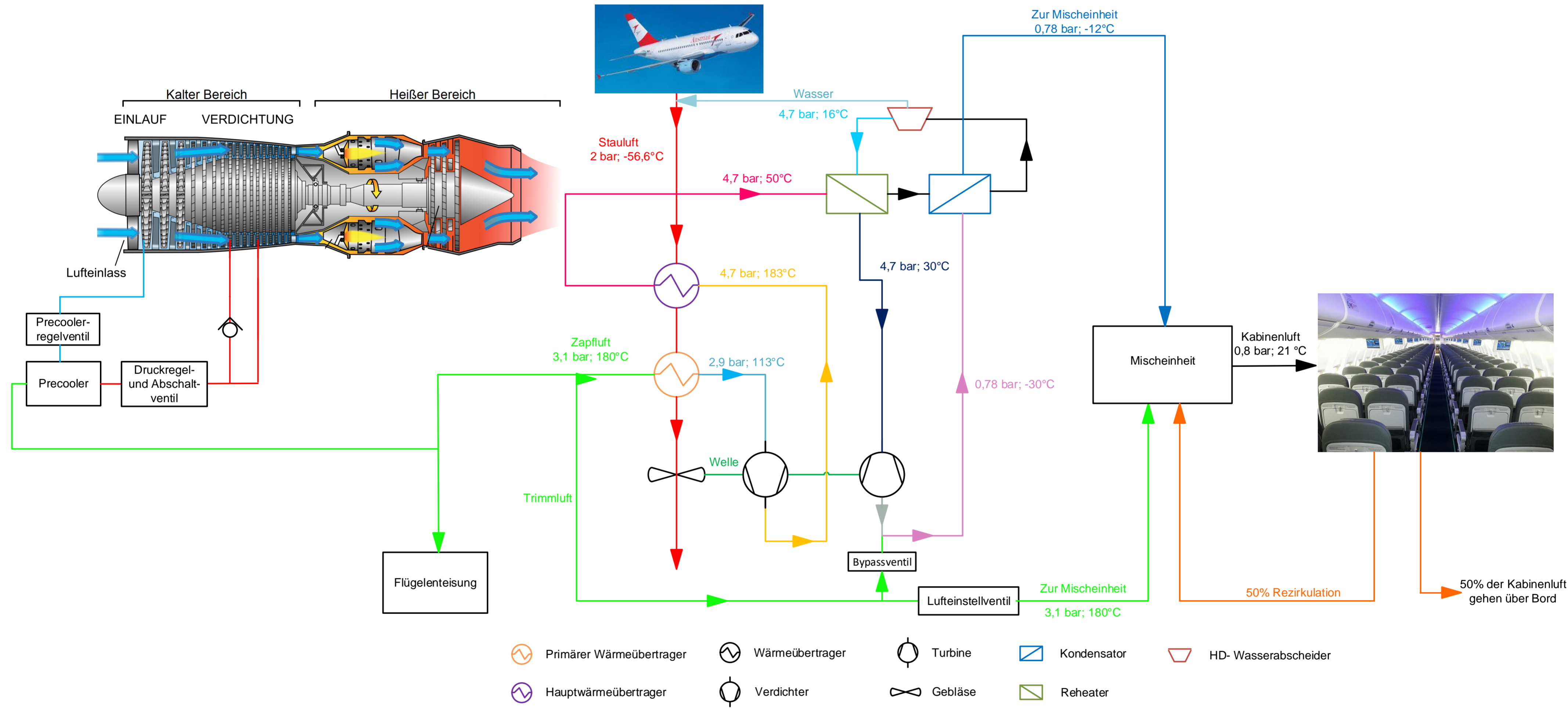
- [56] Ludwig, L. P.: „Gas path sealing in turbine engines“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016. URL: [https://ia800301.us.archive.org/14/items/nasa\\_techdoc\\_19780013166/19780013166.pdf](https://ia800301.us.archive.org/14/items/nasa_techdoc_19780013166/19780013166.pdf) (besucht am 01.07.2018).
- [57] Lufthansa Technik: *Atmen in 10.000 Metern Höhe: Die Luftversorgung der Flugzeugkabine*. URL: <https://www.lufthansa-technik.com/de/cabin-air-circulation> (besucht am 12.06.2018).
- [58] Magoha, P. W.: „Incident-response monitoring technologies for aircraft cabin air quality“. Dissertation. Manhattan, Kansas: Kansas State University, 2012. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/9402320.pdf> (besucht am 28.06.2018).
- [59] Marler, A.: *FliteTrak's SpriteAero: Internet of Sensing sniffs out aerospace*. 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fVxe2USdGnU> (besucht am 18.06.2018).
- [60] Michaelis, S.: „Health and Flight Safety Implications from Exposure to Contaminated Air in Aircraft“. Dissertation. Sydney: The University of New South Wales, 2010.
- [61] Michaelis, S.: „Implementation Of The Requirements For The Provision Of Clean Air In Crew And Passenger Compartments Using The Aircraft Bleed Air System“. Master of Science. Cranfield: Cranfield University, 2016. URL: [http://www.susanmichaelis.com/pdf/2016\\_Susan%20Michaelis\\_MSc%20Cranfield-Clean%20air%20requirements%20using%20bleed%20air%20system.pdf](http://www.susanmichaelis.com/pdf/2016_Susan%20Michaelis_MSc%20Cranfield-Clean%20air%20requirements%20using%20bleed%20air%20system.pdf) (besucht am 28.06.2018).
- [62] Michaelis, S. und Loraine, T.: „Aircraft Cabin Air Filtration and Related Technologies: Requirements, Present Practice and Prospects“. In: *Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces*. Hrsg. von Hocking, M. B. und Hocking, D. Berlin: Springer, 2005, S. 268–287.
- [63] o.A: *Air Cycle Machine*. URL: <http://topicstock.pantip.com/blueplanet/topicstock/2009/11/E8549734/E8549734.html> (besucht am 24.06.2018).
- [64] Onissen, H.: „Antriebe“. In: *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Rossow, C.-C., Wolf, K. und Horst, P. München: Hanser, 2014, S. 444–641.
- [65] Pall Aerospace: *Changing the Conversation in Cabin Air Filtration: Filtering the Fresh Air Supply*. 2017-09-01.
- [66] Pall Corporation: *Kabinenluft-Fragen und Antworten*. URL: <http://www.pall.de/main/aerospace-defense-marine/literature-library-details.page?id=46181> (besucht am 18.06.2018).

- [67] Pall Corporation: *Odour/VOC Removal Filters: Frequently Asked Questions*. Januar 2011. URL: <http://www.pall.de/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/AEOVOCEN.pdf>.
- [68] Pfluegler, A.: *Warum kann man in der Kälte den Atem sehen?* 14.01.2016. URL: <http://narrotibi.com/warum-kann-man-in-der-kaelte-den-atem-sehen/>.
- [69] Povinelli JR., V. P.: „Current Seal Designs and Future Requirements for Turbine Engine Seals and Bearings“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016. URL: <https://tinyurl.com/Povinelli> (besucht am 01.07.2018).
- [70] Ringsdorf, H.: *Schmierölzusammensetzung: Gespräch*. 2018-05-04.
- [71] Rolls-Royce: *Trent 1000: Powering the dream*. 2017. URL: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/civil-aerospace-downloads/280717-Trent%201000%20infographic.pdf> (besucht am 25.06.2018).
- [72] Rolls-Royce: *Trent 900: The clear market choice for the A380*. 4.08.2015. URL: <https://tinyurl.com/RollsRoyce-Trent900> (besucht am 27.06.2018).
- [73] Ruwac Industriesauger GmbH: *Sichere Handhabung von Öl, Ölnebel und Öldämpfen*.
- [74] Schmitz, G.: *Flugzeugklimatisierung unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen in Passagierflugzeugen*. Hamburg, 15.01.2004. URL: [http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dgldr/hh/text\\_2004\\_01%20\\_15\\_Klimatisierung.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dgldr/hh/text_2004_01%20_15_Klimatisierung.pdf) (besucht am 27.06.2018).
- [75] Scholz, D.: *Aircraft Cabin Air and Engine Oil-An Engineering View*. London, 2017-09-19. URL: <http://cabinair.profscholz.de/>.
- [76] Scholz, D.: „Flugzeugsysteme“. In: *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Rossow, C.-C., Wolf, K. und Horst, P. München: Hanser, 2014, S. 700–805.
- [77] Scholz, D.: „Flugzeugsysteme“. Skript. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2018.
- [78] Sinnott, M.: „787 no-bleed systems: Saving fuel and enhancing operational efficiencies“. In: *Aero Quarterly* 28(04) (2007), S. 6–11. URL: [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_07/AERO\\_Q407\\_article2.pdf](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/AERO_Q407_article2.pdf) (besucht am 25.06.2018).
- [79] Sönmez, K.: „Erstellung eines Kriterienkataloges zur Bewertung von Konzepten zur individuellen Sitzplatzklimatisierung in Passagierflugzeugen“. Diplomarbeit. Hamburg: Fachhochschule Hamburg, 2000-10-31. URL: <https://tinyurl.com/Soenmez-Diplomarbeit> (besucht am 19.06.2018).

- [80] Strobel Verlag: „Wie funktioniert eigentlich... Ein Kreuzstromwärmetauscher“. In: *IKZ-Praxis*. Hrsg. von Strobel Verlag. Bd. 8/2005. Arnsberg: Strobel Verlag, S. 5. URL: <https://www.ikz.de/ikz-praxis-archiv/p0508/050805.php> (besucht am 06.06.2018).
- [81] van Basshuysen, R. und Schäfer, F., Hrsg.: *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 8. überarbeitete Auflage. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-10902-8.
- [82] Vereinigung Cockpit: *Kontaminierte Kabinenluft*. URL: <https://www.vcockpit.de/themen-und-positionen/flight-safety/safesky-2015/kontaminierte-kabinenluft.html> (besucht am 02.07.2018).
- [83] Wikipedia: *Schwebstofffilter*. 21.01.2009. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwebstofffilter#/media/File:HEPA\\_Filter\\_diagram\\_de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwebstofffilter#/media/File:HEPA_Filter_diagram_de.svg) (besucht am 26.06.2018).
- [84] Wilcox, E.: „Api centrifugal compressor oil seals and support systems-types, selection, and field troubleshooting“. In: *Implementation of the requirements for the provision of clean air in crew and passenger compartments using the aircraft bleed air system*. Hrsg. von Michaelis, S. 2016. DOI: 10.21423/R1K076.
- [85] Winder, C. und Balouet, J.-C.: „The toxicity of commercial jet oils“. In: *Environmental research* 89(2) (2002), S. 146–164. DOI: 10.1006/enrs.2002.4346.
- [86] Winder, C., FONTEYN, P. und Balouet, J.: „Aerotoxic syndrome: A descriptive epidemiological survey of aircrew exposed to incabin airborne contaminants“. In: *Journal of Occupational Health and Safety* 18(4) (2002), S. 321–338. (Besucht am 28.06.2018).
- [87] Winder, C. und Michaelis, S.: „Aircraft Air Quality Malfunction Incidents: Causation, Regulatory, Reporting and Rates“. In: *Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces*. Hrsg. von Hocking, M. B. und Hocking, D. Berlin: Springer, 2005, S. 211–228.
- [88] Winder, C. und Michaelis, S.: „Crew Effects from Toxic Exposure on Aircraft“. In: *Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces*. Hrsg. von Hocking, M. B. und Hocking, D. Berlin: Springer, 2005, S. 229–248.
- [89] Wörner, M.: „Wärme- und Stofftransport in einer Flugzeugkabine unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtetransportes“. Dissertation. Hamburg-Harburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2006-11-13.

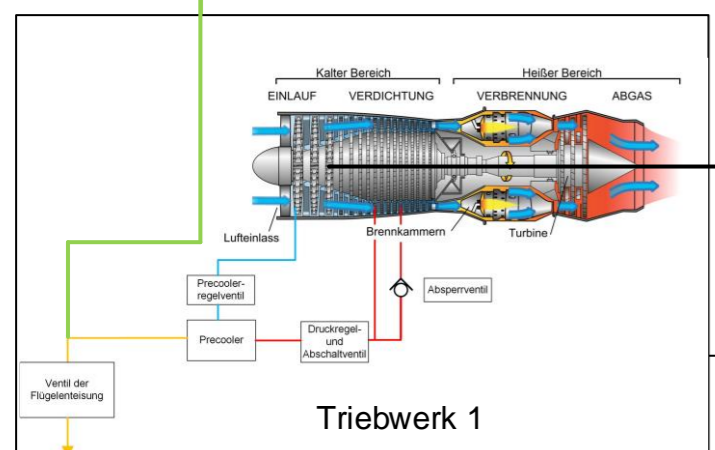
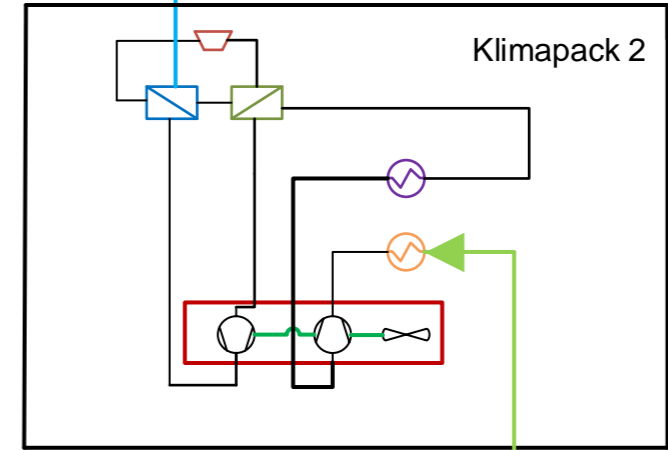
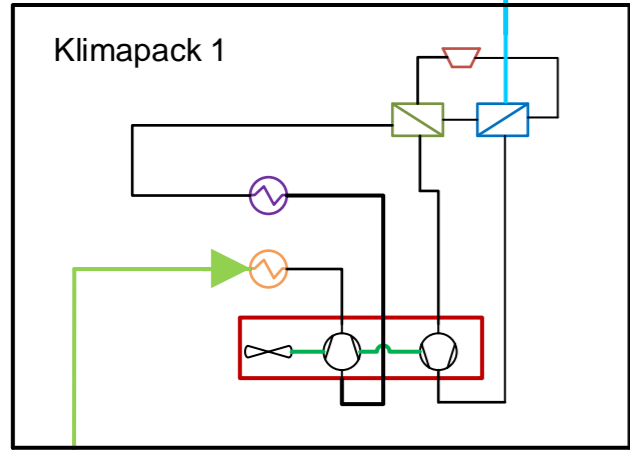
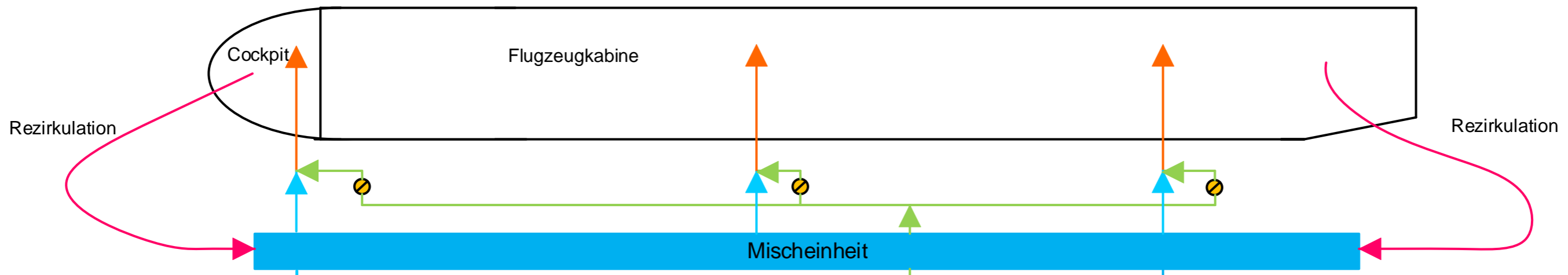
# **A. Anhang**

## **A.1. Gesamtdarstellung der Kabinenbelüftung**

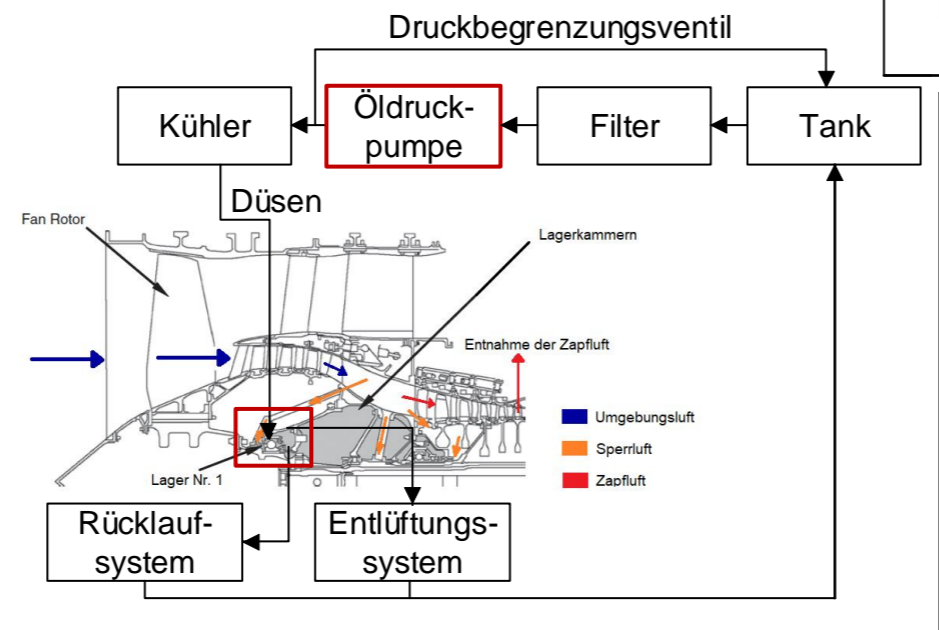
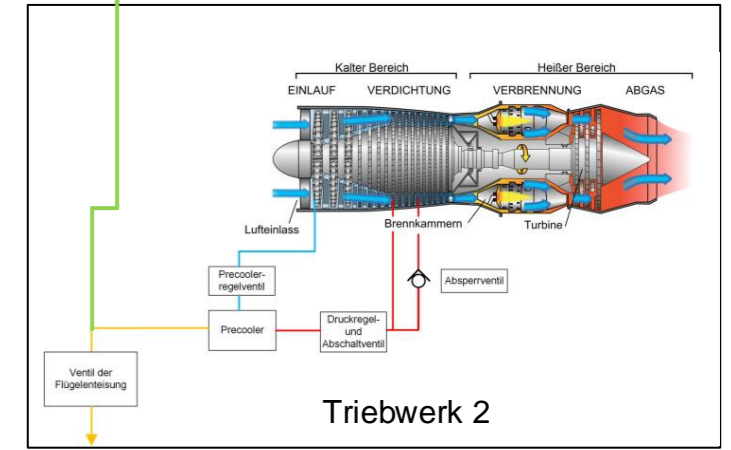
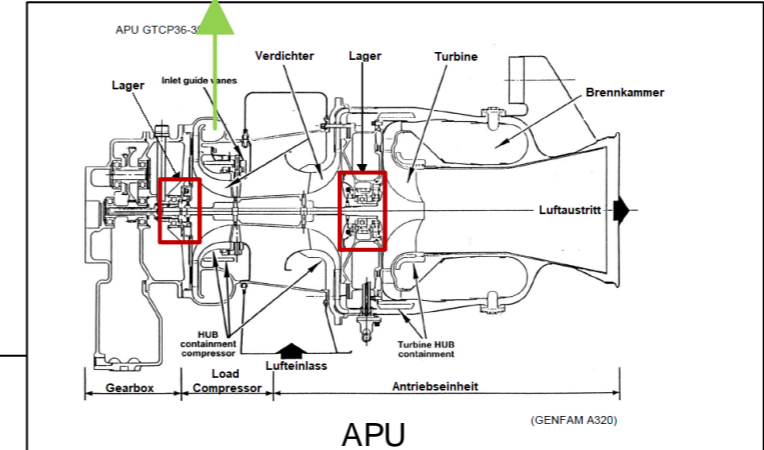




## **A.2. Mögliche Schmierölkontaminationen**



Vergrößerung



- Ventil
- Heiße Zapfluft
- Kalte Zapfluft
- 21°C warme Kabinenluft
- Rezirkulierende Luft
- Kontaminationsmöglichkeiten

## A.3. Statistik zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen

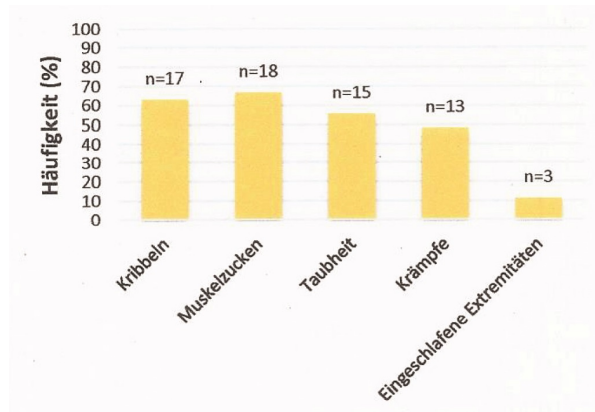


Abbildung A.1.: Symptome, die unter „Parästhesien“ zusammengefasst werden und nach einem Fume Event von Dr. Heutelbeck diagnostiziert worden sind [22]

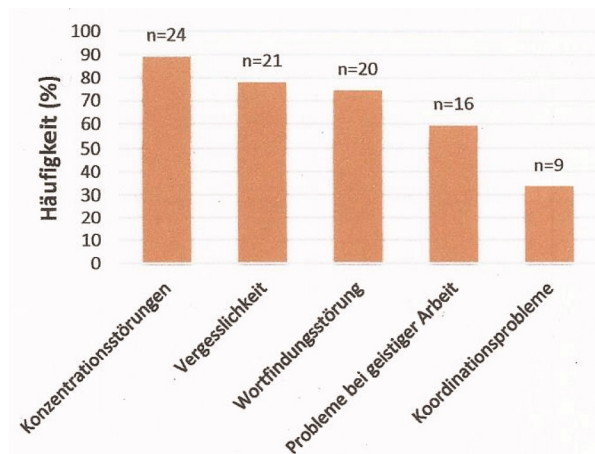


Abbildung A.2.: Symptome, die unter „Kognitive Einschränkungen“ zusammengefasst werden und nach einem Fume Event von Dr. Heutelbeck diagnostiziert worden sind [22]

## A.4. Studien zur Luftqualität in Flugzeugen

Tabelle A.1.: Luftqualität in Flugzeugen [60]

Jahr	Autor	Flugzeugtyp	Monitoring	Zwischenfälle	generelles Monitoring der Kabinenluft	Monitoring während Fume Event	TCP Detektion	Detektion anderer Inhaltstoffe	Öl als Quelle	gesundheitliche Beeinträchtigungen der Besatzung
1988	Kelso	Militärflugzeug	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Schmierölgase	Ja	Nein
1997	Lee G	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	einige Kohlenwasserstoffe	Ja	Nein
1997	Fox	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	CO, VOCs, TBP, SVOCs, andere Phosphorisomere	Ja	Nein
2000	Qantas	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
2000	Honeywell	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	VOCs, SVOCs, Hydrokarbone, CO, Formaldehyde, TPP, Schmierölkontaminationen	Ja	Nein
2004	CAA	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP	Ja	Nein
2005	Hanhela	Militär	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	PAN, DODPA, Trialkylphosphat	Ja	Nein
2005	van Netten	B757, BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP ind 6 von 7 Proben, TPP	Ja	Nein
2006	van Netten	B757	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP in 7 von 7 Proben	Ja	Nein
2007	Muir	B757, BAe 146	Ja	Ja	Nein	Ja (bei einer minimalen Kontamination)	Ja	TBP, VOC, SVOC, Jet2 Öl	Ja	Nein
2008	van Netten	BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP	Ja	Nein
2009	GCAQE	B747, B777, B737, A330, Dash 8, MD80, BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP ist in 31 von 40 Proben detektiert worden	Ja	Nein
2009	OHRCA ACER	Verschiedene	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	TCP ist in 17 von 56 Luftproben detektiert worden	Ja	Nein
2009	WDR	B757, B747, B737, A320/319, BAe 146	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	In 29 von 31 Proben ist TCP detektiert worden	Ja	keine Angabe