

Bachelorarbeit

Mehmet Öcalan

Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen durch Mikroorganismen und Metalle

Mehmet Öcalan

**Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen
durch Mikroorganismen und Metalle**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Lufthansa Technik AG
VIP & Special Mission Aircraft Services
Weg beim Jäger 193
22335 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME
Zweitprüferin: Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi
Industrieller Betreuer: Dipl. Ing. Jörn Sundermann

Abgabedatum: 2021-09-29

DOI:

<https://doi.org/10.15488/19166>

URN:

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2021-09-29.015>

Associated URLs:

<https://nbn-resolving.org/html/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2021-09-29.015>

© This work is protected by copyright

The work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License: CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



Any further request may be directed to:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz, MSME

E-Mail see: <http://www.ProfScholz.de>

This work is part of:

Digital Library - Projects & Theses - Prof. Dr. Scholz

<http://library.ProfScholz.de>

Published by

Aircraft Design and Systems Group (AERO)

Department of Automotive and Aeronautical Engineering

Hamburg University of Applied Science

This report is deposited and archived:

- Deutsche Nationalbibliothek (<https://www.dnb.de>)
- Repository of Leibniz University Hannover (<https://www.repo.uni-hannover.de>)
- Internet Archive (<https://archive.org>)
Item: <https://archive.org/details/TextOecalan.pdf>

Kurzreferat

Zweck – Die Thesis soll einen umfassenden Überblick über das Kontaminationsgeschehen in den Flugzeugtrinkwassersystemen verschaffen sowie deren mögliche Ursachen aufdecken.

Methodik – Die verschiedenen Verunreinigungstypen im Flugzeugtrinkwasser werden recherchiert und ihre Anwesenheit durch zuverlässige Studien und Laborergebnisse überprüft. Desweiteren werden die eingesetzten Desinfektionsverfahren auf ihre Wirksamkeit untersucht.

Ergebnisse – Viele kommerzielle Flugzeuge befördern unsauberes Trinkwasser, welches von den festgelegten Grenzwerten deutlich abweicht. Es kommt nicht selten vor, dass Fluggesellschaften bei konkreten Verdachtsfällen die notwendige Desinfektionsmaßnahme nicht einleiten. Auch vorgeschriebene Folgeuntersuchungen werden oft nicht durchgeführt. Außerdem benötigt das Entkeimen der Flugzeugtrinkwasseranlage öfters mehrere Durchgänge, wodurch die Kosten der Wartung höher ausfallen.

Bedeutung in der Praxis – Trinkwassersysteme müssen in kürzeren Wartungsintervallen untersucht werden, um eine voranschreitende Verunreinigung aufzulösen. Außerdem müssen bessere Überwachungsprogramme ins Leben gerufen werden, die die Passagiere vor kontaminiertem Trinkwasser in Flugzeugen schützen.

Soziale Bedeutung – Passagiere und Besatzungsmitglieder sollten entsprechend der aktuellen Datenlage das Wasser an Bord nicht trinken.

Originalität – Die Arbeit gibt zum ersten Mal einen umfassenden Überblick über die mögliche Kontamination von Trinkwassersystemen an Bord von Flugzeugen.

Abstract

Purpose – The thesis is intended to provide a comprehensive overview of the contamination events in the aircraft drinking water systems as well as to uncover their possible causes.

Methodology – The different types of contamination in aircraft drinking water is investigated and their presence verified by reliable studies and laboratory results. Furthermore, the effectiveness of the disinfection processes used will be investigated.

Findings – Many commercial aircraft carry unclean drinking water that deviates significantly from the specified limits. It is not uncommon for airlines not to initiate the necessary disinfection measures in cases of concrete suspicion. Even the prescribed follow-up tests are often not carried out. In addition, the disinfection of the aircraft drinking water system often requires several passes, which results in higher maintenance costs.

Practical implications – Drinking water systems need to be inspected at shorter maintenance intervals to resolve advancing contamination. Better monitoring programs must also be put in place to protect passengers from contaminated drinking water on aircraft.

Social implications – Passengers and crew members should limit their use of drinking water as much as possible based on current data.

Originality – The work provides for the first time a comprehensive overview of the potential contamination of aircraft drinking water systems.

Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen durch Mikroorganismen und Metalle

Aufgabe für eine Bachelorarbeit

Hintergrund

Luftverkehrsgesellschaften sehen sich verstärkt mit dem Problem konfrontiert, dass das Trinkwasser an Bord von Flugzeugen mit Verunreinigungen wie Bakterien und Metallpartikeln kontaminiert ist. Bei regelmäßigen Untersuchungen des Trinkwassers liegen die gemessenen mikrobiologischen Werte teilweise weit über den vorgeschriebenen Grenzwerten aus der deutschen Trinkwasserverordnung. Dabei ist das Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* ein wichtiger Parameter bezüglich der Güte des Trinkwassers in Flugzeugen. Personen mit geschwächtem Immunsystem können an Pneumonie erkranken. In der Praxis zeigt sich, dass auch nach ordnungsgemäß durchgeführter Anlagendesinfektion die Grenzwerte der deutschen Trinkwasserverordnung weiterhin überschritten werden. Vor allem betrifft diese Flugzeuge mit geringer Nutzung (z.B. VIP-Flugzeuge), die eine geringere Nutzung der Trinkwasseranlage aufweisen als Passagierflugzeuge bei üblicher Auslastung. Besonders in Zeiten der Corona-Pandemie werden viele Flugzeuge über mehrere Monate geparkt oder gelagert. Hierfür werden die Wassersysteme gemäß den Handbüchern entleert, es verbleibt aber eine nicht vermeidbare Restmenge an Flüssigkeit im Tank und dem Leitungssystem. Dadurch können sich Bakterien auch während des Parkens des Luftfahrzeuges im Wassersystem bilden, was aktuell Probleme bei der Wiederinbetriebnahme der Flugzeuge aufwirft. Generell werden die Trinkwasseranlagen von Flugzeugen gemäß Wartungshandbuch desinfiziert und dann mikrobiologisch untersucht. Für die Reinigung der Wassersysteme stehen abhängig vom Flugzeugtyp und Hersteller verschiedene Verfahren zur Auswahl, die unterschiedlich wirksam sind und die Materialien des Systems unterschiedlich stark angreifen. Neben der mikrobiologischen Kontamination wird eine Kontamination des Trinkwassers mit Metallen beobachtet. Die Metallpartikel (Chrom, Nickel, Eisen, ...) sind von unterschiedlicher Größe darunter auch Nanoteilchen ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Aufgabe

Durch die Bachelorarbeit soll die aktuelle Problematik der Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen dargestellt werden. Desinfektionsmethoden sollen beschrieben werden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Systemverträglichkeit. Ursachen der Kontamination sollen ermittelt werden (insbesondere der metallischen Kontamination). Wege zu durchgehend sauberem Trinkwasser an Bord sollen aufgezeigt werden. Hier geht es sowohl um die Vermeidung von

Kontamination als auch um die grundsätzliche Beseitigung einer eingetretenen Kontamination (über den Wasserwechsel hinaus). Dabei sollen folgende Arbeitspunkte beachtet werden:

1. Literaturrecherche: Mikrobiologische Kontamination und Desinfektion von Trinkwassersystemen. Systematische Darstellung der Möglichkeiten.
2. Literaturrecherche: Metallische Kontamination des Triebwerköls, der Kabinenluft und des Trinkwassers von Flugzeugen. Metallische Kontamination des Leitungswassers (in Deutschland und in anderen Ländern). Metallische Kontamination während des Transports in Tankfahrzeugen. Systematische Darstellung der Kontaminationsmöglichkeiten.
3. Literaturrecherche: Chemische Kontamination des Trinkwassersystems in Flugzeugen.
4. Literaturrecherche: Systemarchitekturen von Flugzeug- und Trinkwassersystemen im Hinblick auf die Ursachen metallischer Kontamination (auch unter Berücksichtigung der Bedruckung von Trinkwassersystemen). Systematische Darstellung anhand ausgewählter unterschiedlicher Flugzeugmuster.
5. Zusammenfassende Darstellung der internen und externen Studien und Laborberichte zur Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen. Dies gegliedert nach dem Nutzungsprofil von Kurzstrecken-, Langstrecken- und VIP-Flugzeugen.
6. Darstellung der Wirksamkeit und der negativen Auswirkungen von Desinfektionen (u.a. Korrosion von Leitungen; Versprödung von Schläuchen und Dichtungen).
7. Diskussion der Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen, der Gefahren und der Lösungsmöglichkeiten.

Die Ergebnisse sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Es sind die DIN-Normen zur Erstellung technisch-wissenschaftlicher Berichte zu beachten.

Die Arbeit wird angefertigt bei Lufthansa Technik AG, Hamburg. Industrieller Betreuer ist:

Dipl. Ing. Jörn Sundermann
Aircraft Engineer – Cabin

Lufthansa Technik AG
VIP & Special Mission Aircraft Services
HAM T/ZV23

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Bilder.....	10
Verzeichnis der Tabellen.....	12
Liste der Abkürzungen.....	13
Verzeichnis der Begriffe und Definitionen.....	15
1 Einleitung	16
1.1 Motivation.....	16
1.2 Begriffsdefinition.....	16
1.3 Ziel der Arbeit.....	17
1.4 Literaturübersicht.....	17
1.5 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Mikrobiologische Kontamination des Trinkwassers	19
2.1 Einführung.....	19
2.2 Mikroorganismen im Trinkwasser.....	21
2.3 Trinkwasserverordnung.....	22
2.4 Indikatorkeime.....	23
2.5 Trinkwasserversorgungskette und Hygiene.....	25
2.5.1 Lieferkette bis zum Abfertigungsbereich.....	26
2.5.2 Wassertransfergeräte.....	26
2.5.3 Flugzeugtrinkwassersystem.....	27
2.6 Desinfektion von Trinkwassersystemen.....	28
2.6.1 Wasserstoffperoxid.....	29
2.6.2 Ozon.....	30
2.6.3 Chlor.....	31
2.6.4 Heißwasserspülung.....	32
2.7 Entnahme einer Wasserprobe.....	32
2.8 Lösungsmöglichkeiten für Keimreduktion.....	35
3 Metallische Kontamination des Trinkwassers	39
3.1 Gesetzeslage zu Verunreinigungen im Flugzeug.....	39
3.2 Metallische Verunreinigung des Triebwerköls.....	40
3.3 Metallische Kontamination der Zapflut.....	46
3.4 Metallische Kontamination anhand einer Filterkartusche.....	50
3.5 Metallische Kontamination des Leitungswassers.....	53
3.6 Metallische Kontamination in Wassertankfahrzeugen.....	56
4 Chemische Kontamination des Trinkwassers	59
5 Systemarchitekturen von Flugzeugtrinkwassersystemen	66

5.1	Trinkwassersystem einer Airbus A321	68
5.2	Trinkwassersystem einer Boeing 787.....	71
6	Studien über die Kontamination des Flugzeugtrinkwassers	72
6.1	Studie des Hunter Colleges New York.....	72
6.1.1	Große Fluggesellschaften	73
6.1.2	Regionale Fluggesellschaften.....	76
6.2	Studie der Universität Limerick	79
6.3	Interne Studie eines VIP-Flugzeugs	83
7	Wirksamkeit von Desinfektionsmitteln	84
7.1	Wasserstoffperoxid.....	84
7.2	Chlor.....	84
7.3	Ozon	86
7.4	Diskussion	86
8	Zusammenfassung und Ausblick	88
	Literaturverzeichnis	89
	Anhang A: Ergebnisse der Studie des Hunter Colleges in New York City	101

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1	Treffen der Legionäre in einem Hotel in Philadelphia (LTM 2014).....	19
Bild 2.2	Gelagerte Flugzeuge der Lufthansaflotte (FAZ 2020).....	20
Bild 2.3	Biofilm (Aquafree 2019).....	21
Bild 2.4	Auszählen von KBE (Geissmann 2013).....	21
Bild 2.5	Wasserversorgungskette im Luftverkehr (nach WHO 2009).....	25
Bild 2.6	Trinkwassertankfahrzeug (nach HFGSE 2021).....	26
Bild 2.7	Trinkwasserservicepanel (nach Skydiving 2021).....	29
Bild 2.8	Ozon-Erzeuger (LHT 2016).....	30
Bild 2.9	Anschluss-Wasserservicepanel (LHT 2016).....	30
Bild 2.10	Anschlussschema Ozon-Erzeuger (nach LHT 2016).....	31
Bild 2.11	Heißwassereinspeisung (LHT 2016).....	32
Bild 2.12	Mikrobiologische Untersuchung einer Trinkwasserprobe (LHT 2016).....	34
Bild 2.13	Biochip (Flickr 2006).....	35
Bild 2.14	Membranfiltration (nach Hydroblue 2021).....	36
Bild 2.15	Brause mit Membranfilter (LHT 2016).....	37
Bild 2.16	Filterinstallation Lavatory (LHT 2016).....	37
Bild 2.17	Comprex-Testaufbau im hinteren Cargo Compartment (LHT 2016).....	38
Bild 3.1	Schmierölsystem (links) und Öllagersumpf (rechts) (nach Aeromodelbasic 2012 und nach ExxonMobil 2016).....	41
Bild 3.2	Schmierstoffsystem mit drei Lagersümpfen (Linke 2014).....	42
Bild 3.3	Zahnradpumpe (Flight Mechanic 2021).....	43
Bild 3.4	Metallpartikel im Triebwerköl (Scholz 2021a).....	44
Bild 3.5	Oil Debris Monitor (Muir 1996).....	45
Bild 3.6	Position der Lager im CFM56 – Triebwerk (Lufthansa 1999).....	46
Bild 3.7	Zapfluftsysteem (Airbus 320 Theory 2016).....	47
Bild 3.8	Labyrindichtung (Michaelis 2016 und Voth 2018).....	48
Bild 3.9	Materialzusammensetzung eines Triebwerks (nach Husband 2007).....	48
Bild 3.10	Durchflussbegrenzer (Hansen 2019).....	49
Bild 3.11	Wirbel, Engl. Ground vortex (StackExchange 2015).....	49
Bild 3.12	Kontaminierte Wasserfilterkartusche (LHT 2020).....	50
Bild 3.13	Spektroskopische Untersuchung eines Metallgefüges (LHT 2020).....	51
Bild 3.14	Lochkorrosion (Nazari 2018).....	52
Bild 3.15	Spannungskorrosion (Loss 2015).....	52
Bild 3.16	Abweichungen der metallischen Parameter im Trinkwasser (nach UBA 2021)	54
Bild 3.17	Metallische Kontamination des Leitungswassers in den USA (nach Felton 2021).....	55
Bild 3.18	Hauptbestandteile eines Edelstahl.....	56
Bild 3.19	Selbstheilung der beschädigten Passivschicht (Schweissfachhandel 2021).....	57
Bild 3.20	Wassertank aus EN 1.4401 (Vestergaard 2021).....	58

Bild 4.1	Querschnitt eines Triebwerks (P&W 2014)	59
Bild 4.2	Trinkwasserbedruckungssystem (Scholz 2014a).....	60
Bild 4.3	Wege der Verunreinigungen (Scholz 2021a)	60
Bild 4.4	Flugzeugabgase (Xu 2020).....	61
Bild 4.5	Schnittstelle Triebwerk und Tragfläche (Scholz 2021a)	61
Bild 4.6	Wasserextraktor (Scholz 2021a).....	62
Bild 4.7	Luftkanälenvergleich (Scholz 2021a).....	62
Bild 4.8	Triebwerkswartungsintervalle von 2004 ... 2014 (Aviation Week 2016)	63
Bild 5.1	Toilettes Service Panel (Lacey 2009).....	66
Bild 5.2	Entleerungsmast (Aviation Book 2019)	66
Bild 5.3	Turbokompressor B707 (NAHM 2021)	67
Bild 5.4	Eintrittsöffnungen DC-8 (Finney 2004)	67
Bild 5.5	Schema der Wasserversorgungsanlage von A321 (Scholz 2013a)	69
Bild 5.6	Integrierter Kompressor im Trinkwassersystem (LHT 2021b)	70
Bild 5.7	Trinkwassersystem einer Boeing 787 (Monarch 2016).....	71
Bild 5.8	Wasserpumpen der Boeing 787 (Monarch 2016).....	71
Bild 6.1	Flottengröße und ADWR-Verstöße (major) (nach Platkin 2019)	73
Bild 6.2	Mikrobiologische Kontamination (major) (nach Platkin 2019)	74
Bild 6.3	Trinkwasserbewertung (major) (nach Platkin 2019).....	75
Bild 6.4	Flottengröße und ADWR-Verstöße (regional) (nach Platkin 2019)	76
Bild 6.5	Mikrobiologische Kontamination (regional) (nach Platkin 2019)	77
Bild 6.6	Trinkwasserbewertung (regional) (nach Platkin 2019)	78
Bild 6.7	Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (nach Handschuh 2015)...	81
Bild 6.8	Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (nach Handschuh 2015)...	82
Bild 7.1	Lochkorrosion (Wikipedia 2021j)	85

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1	Indikatorkeime gemäß TrinkwV 2020 – Anlage 1 Teil I / II	23
Tabelle 2.2	Exponentielles Wachstum von Keimen (Wikipedia 2021c).....	23
Tabelle 3.1	Metallische Parameter gemäß TrinkwV 2020 - Anlage 2/3	40
Tabelle 3.2	Vergleich der TrinkwV mit anderen internationalen Wassernormen (WHO 2017, Wikipedia 2021e, Mee 1997, Vikaspedia 2021)	40
Tabelle 3.3	Konzentration von Abrasivmetallen (ppm) (Kaisan 2019)	45
Tabelle 3.4	Nichteinhaltung der metallischen Parameter 2019 (UBA 2021).....	53
Tabelle 3.5	Kontamination des Leitungswassers in Indien (Chakrabarty 2010).....	55
Tabelle 3.6	Rostträge Edelstähle in der Wasserwirtschaft (ISER 2007).....	57
Tabelle 4.1	Untersuchungsergebnisse der Kabinenluft einer Boeing 757 (Muir 2011).....	64
Tabelle 5.1	Druckluftquellen ausgewählter Flugzeugmustern (LHT 2021a).....	67
Tabelle 6.1	Versuchsreihe A (Handschuh 2015).....	79
Tabelle 6.2	Versuchsreihe B (Handschuh 2015).....	79
Tabelle 6.3	Abnahme des Chlorgehalts in Versuchsreihe A und B (Handschuh 2015).....	80
Tabelle 6.4	Chlorgehalt in der vorderen/hinteren Galley (Handschuh 2015)	80
Tabelle 6.5	Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (Handschuh 2015)	81
Tabelle 6.6	Versuchsreihe a (LHT 2015)	83
Tabelle 7.1	Gegenüberstellung der einzelnen Desinfektionsverfahren	87
Tabelle A.1	Ergebnisse der Studie von Platkin I/II (major) (Platkin 2019).....	101
Tabelle A.2	Ergebnisse der Studie von Platkin II/II (major) (Platkin 2019).....	101
Tabelle A.3	Ergebnisse der Studie von Platkin I/II (regional) (Platkin 2019).....	102
Tabelle A.4	Ergebnisse der Studie von Platkin II/II (regional) (Platkin 2019).....	102

Liste der Abkürzungen

A	Airbus
Abs.	Absatz
ADWR	Aircraft Drinking Water Rule
Aft	hinten
AMM	Aircraft Maintenance Manual
APU	Auxiliary power unit
ATA	Air Transport Association of America
B	Boeing
BAe	British Aerospace
C	Carboneum (Kohlenstoff)
C ₁₁	radioaktiver Isotop des Kohlenstoffs
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
ca.	circa
Cd	Cadmium
Cl	Chlor
Cr	Chrom
Cu	Cuprum (Kupfer)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitoring
EG	Europäische Gemeinschaft
EHEC	Enterohämorrhagische Escherichia coli
EN	Europäische Normen
EPA	Environmental Protection Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FDA	Food and Drug Administration
Fe	Ferrum (Eisen)
FH	Flight Hours
Fwd	forward (vordere)
H	Hydrogenium (Wasserstoff)
h	hour (Stunde)
IATA	International Air Transport Association
IDQP	IATA Drinking-Water Quality Pool
ISO	International Standards Organization
KBE	Kolonie-bildende Einheiten
KF	Kurzstreckenflugzeug
KLM	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij
l	Liter
Lav	Lavatory

LF	Langstreckenflugzeug
LHT	Lufthansa Technik
m	Meter
mg	Milligramm
min.	Minuten
ml	Milliliter
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Nitrogenium (Stickstoff)
NO	Stickstoffmonoxid
N/A	Not available
Nb	Niob
Ni	Nickel
NN	Nicht detektierbar
NPDWR	National Primary Drinking Water Regulations
O	Oxygen (Sauerstoff)
Pb	Plumbum (Blei)
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
S	Schwefel
SCNAT	Akademie der Naturwissenschaften Schweiz
Si	Silicium
SOAP	Spectrometric oil analysis programme
TBP	Tributylphosphat
TCE	Trichlorethen
tcl	Gesamtchlor
TCP	Trikresylphosphat
TrinwV	Trinkwasserverordnung
UFP	Ultrafine particles
UV	Ultraviolettstrahlung
V	Vanadium
V	Volt
VIP	Very Important Person
VOC	Volatile organic compounds
WHO	Weltgesundheitsorganisation
WVG	Wasserversorgungsgebiete
z. B.	zum Beispiel
Zn	Zink

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

Desinfektion

"Die Desinfektion ist eine Hygienemaßnahme, die dazu dient, Krankheitserreger abzutöten [...] und dadurch ihre Anzahl auf oder in einem Objekt bzw. auf einer biologischen Oberfläche deutlich zu reduzieren. Angestrebt wird dabei ein Zustand, in dem eine Infektion nicht mehr wahrscheinlich ist. Bei einer wirksamen Desinfektion werden mindestens 84 bis 99,9 % der Keime abgetötet bzw. inaktiviert." (DocCheck 2021)

Kurzstreckenflugzeug

"Als Kurzstreckenflugzeug wird heutzutage ein Verkehrsflugzeug bezeichnet, das bei Flugstrecken ohne Zwischenlandung bis etwa 2000 km am wirtschaftlichsten einzusetzen ist." (Wikipedia 2021a)

Lagern (Storage) von Flugzeugen

"Das Einlagerungsverfahren dient der Erhaltung von abgestellten Luftfahrzeugen, die kurzfristig voraussichtlich nicht wieder in Betrieb genommen werden. Dies bedeutet, dass die Aufgaben des Einlagerungsvorgangs detailliertere Schritte erfordern und im Vergleich zum Parkvorgang mehr Zeit in Anspruch nehmen. Allerdings reduziert sich die Anzahl der wiederkehrenden Wartungsaufgaben, wodurch weniger Eingriffe an gelagerten Flugzeugen erforderlich sind. Beispielsweise sind Triebwerksläufe und eine Reihe anderer Betriebskontrollen bei einem gemäß einem Lagerungsverfahren konservierten Luftfahrzeug nicht erforderlich, wie dies der Fall ist, wenn Triebwerke, Avionikcomputer oder andere Hauptkomponenten aus dem Luftfahrzeug entfernt werden." (Airbus 2020)

Langstreckenflugzeug

"Ein Langstreckenflugzeug ist ein Flugzeug, das bei Flugstrecken ohne Zwischenlandung ab etwa 3000 bis 3500 Kilometer am wirtschaftlichsten einzusetzen ist." (Wikipedia 2021b)

Parken von Flugzeugen

"In einigen Fällen muss das Flugzeug in einem Zustand gehalten werden, der eine schnelle Wiederaufnahme des Flugbetriebs ermöglicht. In diesem Fall ist das Parkverfahren so anzuwenden, dass der Arbeitsaufwand zur Vorbereitung des Flugzeugs auf den Flugbetrieb minimiert wird. Es ist zu beachten, dass Flugzeuge, bei denen nur Parkverfahren angewendet werden, immer noch eine Reihe von wiederkehrenden Wartungsarbeiten erfordern, die sicherstellen, dass das Flugzeug in einem "flugbereiten" Zustand bleibt." (Airbus 2020)

Zapfluft

"Luft, die durch Öffnungen im Verdichtergehäuse oder dem Brennkammergehäuse aus dem Hauptgasstrom entnommen wird. Mit Bleed Air werden Triebwerksbauteile gekühlt und das Druckluftsystem des Flugzeuges versorgt." (Linke 2014)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Verkeimungen in Trinkwassersystemen stellen schon seit Beginn der Luftfahrt ein imminentes Problem dar. Im Zuge meiner anfänglichen Recherchen bin ich auf mehrere Fachartikel gestoßen, die seit über 20 Jahren ständig wiederkehrende Probleme von verunreinigtem Flugzeugtrinkwasser aufgreifen, welche bis heute weiterhin aktuell sind.

Studien aus den letzten Jahrzehnten veröffentlichten immer wieder Trinkwasserwerte aus Flugzeugen, die oft von den nationalen Grenzwerten abwichen. Die Environmental Protection Agency (EPA), eine Behörde der Regierung zum Schutz der menschlichen Gesundheit, hat in den USA 327 nationale- und internationale Fluglinien untersucht. Etwa jede siebte Untersuchung hat die Anwesenheit von Keimen in einer hohen Konzentration bestätigt (MUIR 2011). Auch die kanadische Gesundheitsbehörde hat im Jahr 2016 nach einer umfangreichen Feldstudie die Erkenntnis gewonnen, dass eine Vielzahl von Flugzeugen verunreinigtes Trinkwasser befördern (Handschuh 2015).

Mein Interesse diese Arbeit zu schreiben lag darin, die Ursachen für das Verkeimungsgeschehen im Trinkwassersystem aufzudecken und mit geeigneten Methoden die Trinkwasserbeschaffenheit zu verbessern.

1.2 Begriffsdefinition

Der Titel der Thesis "Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen durch Mikroorganismen und Metalle" wird im Folgenden Wort für Wort genau erklärt.

Kontamination

Bei Kontaminationen handelt es sich um eine Verschmutzung eines Mediums, in unserem Fall Trinkwasser, durch Mikroorganismen oder andere schädliche Stoffe.

Trinkwasser

Nach der Trinkwasserverordnung handelt es sich dabei um hygienisch sauberes Wasser, welches für den menschlichen Gebrauch wie Trinken, Kochen und Duschen vorgesehen ist (TrinkwV 2020).

Flugzeug

Nach der "International Civil Aviation Organization" wird der folgende Begriff im ICAO Dokument 9110 wie folgt definiert:

"A power-driven heavier than air aircraft, deriving its lift in flight chiefly from aerodynamic reactions on surfaces which remain fixed under given conditions of flight." (ICAO 2012)

Mikroorganismen

Die Akademie der Naturwissenschaften (SCNAT) definiert Mikroorganismen wie folgt:

"Mikroorganismen sind mikroskopisch kleine Lebewesen. Zu den Mikroorganismen gehören unter anderem Bakterien, Mikroalgen und viele Pilze wie die Bäckerhefe. Manchmal werden auch Viren zu den Mikroorganismen gezählt." (SCNAT 2021)

Metall

Der Duden liefert folgende Definition:

"(zu den chemischen Elementen gehörender) nicht durchsichtiger, Wärme und Elektrizität gut leitender, [fester] dehn- und schmelzbarer Stoff (der als Material für etwas dient)" (Duden 2018)

1.3 Ziel der Arbeit

Im Rahmen der Thesis werde ich die Problematik der Kontamination des Trinkwassers in Flugzeugen darstellen und die möglichen Ursachen aufzeigen, die mit geeigneten Maßnahmen behoben werden können. Darüber hinaus will ich darauf aufmerksam machen, dass die gängigen Desinfektionsverfahren aus den Flugzeughandbüchern nicht mehr ausreichend sind und somit den gegebenen Umständen angepasst werden müssen. Zudem ist das behandelnde Gebiet in vielen Bereichen der Luftfahrt noch gänzlich unberührt und bedarf deswegen einer guten Aufklärung.

1.4 Literaturübersicht

Für die Thematik der Kontamination ist das bewährte Fachbuch "Wasser" von Höll 2002 sehr hilfreich und verlässlich gewesen. Herr Höll gibt dem Leser auf über 934 Seiten einen breiten Überblick über die verschiedenen Kontaminationstypen und stellt einen tiefgründigen Einblick in die unterschiedlichen Facetten des Desinfizierens dar.

Ergänzend dazu habe ich die Fachliteratur "Trinkwasserdesinfektion" von Roeske 2007 genutzt, in der das Desinfizieren mit Ozon, Chlor und Wasserstoffperoxid praxisnah und verständlich erklärt wird.

Bezüglich der Verunreinigung von Kabinenluft und Flugzeugtrinkwasser sind die wissenschaftlichen Ausarbeitungen von Scholz eine sehr gute Hilfe gewesen, um neue Erkenntnisse außerhalb der Fachliteratur zu gewinnen.

Das Werk "Systeme von Turbofan – Triebwerken" von Linke 2014 ist sehr empfehlenswert, um die Theorie im Bereich des Triebwerks durch anschauliche Bilder besser zu verstehen.

1.5 Aufbau der Arbeit

Im ersten Abschnitt geht es um die verschiedenen Kontaminationsmöglichkeiten durch biologische und chemische Partikel. Im mittleren Teil werden Systemarchitekturen von Trinkwassersystemen dargestellt. Zum Schluss werden die einzelnen Desinfektionsverfahren bewertet und die Problematik der Kontamination hinreichend ausdiskutiert.

- | | |
|--------------------|--|
| Abschnitt 2 | trägt alle Ergebnisse der Recherche über die mikrobiologische Kontamination und Desinfektion von Trinkwassersystemen in Flugzeugen zusammen. |
| Abschnitt 3 | zeigt die Möglichkeiten einer metallischen Kontamination des Triebwerköls, der Kabinenluft und des Trinkwassers. |
| Abschnitt 4 | behandelt die chemische Kontamination von Trinkwassersystemen in Flugzeugen. |
| Abschnitt 5 | präsentiert verschiedene Systemarchitekturen von Trinkwassersystemen. |
| Abschnitt 6 | stellt zwei große externe Studien und eine interne Laborreihe vor. |
| Abschnitt 7 | befasst sich mit der Wirksamkeit von Desinfektionsmitteln und den negativen Auswirkungen in Hinblick auf das Trinkwassersystem. |
| Abschnitt 8 | fasst das ganze Thema zusammen und gibt einen Ausblick. |
| Anhang A | enthält die Parameter aus der Studie des Hunter Colleges, um den Abschnitt 6 besser nachzuvollziehen. |

2 Mikrobiologische Kontamination des Trinkwassers

2.1 Einführung

Wasserbedingte Infektionen können durch verschiedenartige Mikroorganismen verursacht werden. Dazu gehören Parasiten, die mit dem bloßen Auge zu erkennen sind, Bakterien und Pilze, die mithilfe eines Mikroskops nachgewiesen werden und Viren, die durch ein Spezialmikroskop gesehen werden können.

Die Fluggesellschaft KLM hat erstmals im Jahr 2001 Legionellen in einem Trinkwassersystem einer Boeing-Maschine nachgewiesen. Dies war ein Zufallsfund, da Untersuchungen von Trinkwasseranlagen zum damaligen Zeitpunkt noch nicht behördlich vorgeschrieben waren. Trotz der nachgewiesenen und als unbedenklich eingestuften Konzentrationen der humanpathogenen Keime, hat die Airline von der Gesundheitsbehörde verlangt, Analysen des Trinkwassers zukünftig behördlich anzuordnen, da solche Keime eine schwere Lungenentzündung hervorrufen können (During 2001).

Legionellen sind weltweit das größte wasserbedingte Infektionsproblem in den Trinkwasserversorgungsanlagen und nahezu ubiquitär im Wasser vorhanden. Benannt wurden die Keime nach einem epidemischen Ausbruch bei einem ehemaligen Treffen der US-Kriegsveteranenvereinigung (Bild 2.1) im Jahr 1976, als sich 180 amerikanische Legionäre im Nachhinein über eine schwere Lungenentzündung beklagten. Es stellte sich heraus, dass die Klimaanlage, welche die Empfangshalle mit kontaminierten Aerosolen ausfüllte, die Infektionsquelle für die Seuche gewesen ist (Roeske 2007).



Bild 2.1 Treffen der Legionäre in einem Hotel in Philadelphia (LTM 2014)

Legionellen sind in erwärmten Wasserleitungen anzutreffen und vermehren sich besonders bei Temperaturen zwischen 30 °C ... 45 °C. Während ihr Wachstum unterhalb einer Temperatur von 20 °C stagniert, werden sie ab 60 °C massiv abgetötet. Übertragen werden sie durch zerstäubtes, vernebeltes Wasser (z.B. Duschen in VIP-Flugzeugen) und gelangen in die Lunge, in der sie je nach Keimmenge und Gesundheitszustand des Patienten schwere Lungenentzündungen hervorrufen können, die unbehandelt tödlich enden können (Roeske 2007).

Das Flugzeugtrinkwasser ist bis heute nur wenig erforscht und so werden oft neue Arten von Bakterien gefunden und typisiert. Vor allem ruhiges und stehendes Trinkwasser sind für Mikroorganismen optimal, da sie sich dadurch besser vermehren und bei entsprechendem Nährstoffangebot sich die Population innerhalb einer halben Stunde verdoppeln kann. Genau diese Tatsache wird den vielen geparkten und gelagerten Flugzeugen (Bild 2.2) während der Coronapandemie zum Verhängnis, da sich Keime im Trinkwassersystem trotz vollständiger Entleerung und der nicht vermeidbaren Restmenge an Trinkwasser weiter unaufhaltsam vermehren können. Dadurch entstehen an den Innenwänden der Leitungen stark resistente Biofilme, die mit den gängigen Desinfektionsmethoden sehr schwer zu entfernen sind (Roeske 2007).



Bild 2.2 Gelagerte Flugzeuge der Lufthansaflotte (FAZ 2020)

Daher sind entsprechende Maßnahmen zum Schutz der Passagiere und Besatzungsmitglieder, der schnellen Erkennung von pathogenen Keimen und deren effizienter Eliminierung von großer Bedeutung. Dies erfordert vor allem ein gut koordiniertes sowie interdisziplinäres Handeln verschiedener Fachrichtungen aus der Medizin, der Biologie und der Technik (Höll 2002).

Bisher werden die Trinkwassersysteme der Flugzeuge gemäß dem Flugzeughandbuch und den IATA-Richtlinien alle drei Monate desinfiziert. Dafür stehen verschiedene Chemikalien wie Ozon und Chlordioxid zur Verfügung, die durch ihre oxidative Wirkung die Mikroorganismen innerhalb einer kurzen Einwirkzeit eliminieren. Allerdings reicht hier selten ein Desinfektionsvorgang aus, um die Anlage wirklich keimarm zu bekommen. Daher werden meistens mehrere Desinfektionsvorgänge durchgeführt oder die Verweilzeit von Desinfektionsmitteln im System verlängert

2.2 Mikroorganismen im Trinkwasser

Das Trinkwasser schaut rein und genusstauglich aus und ist dennoch nie keimfrei, sondern im Allgemeinen keimarm. Zu den Keimen werden neben Bakterien auch Algen, Pilze und Protozoen gezählt. Viren werden aufgrund ihrer Größe und ihrer Rolle im Trinkwasser zu den Mikroorganismen gezählt, obwohl sie keine Lebewesen sind und somit keinen eigenen Stoffwechsel besitzen. Da sie auf Wirtszellen angewiesen sind, sind sie im Trinkwasser nur in sehr geringen Mengen zu finden, welche dennoch für eine Infektion ausreichend sein können. Zudem können die Mikroorganismen im Trinkwassersystem als *freilebend* oder *in Biofilm eingebunden* eingeteilt werden, wobei letzteres häufiger auftritt. Dabei ist ein Biofilm (Bild 2.3) eine Ansammlung von lebenden Kleinstlebewesen, die durch eine äußere gallertartige Schicht vor anströmendem Wasser geschützt wird. Er lässt sich sehr schwer entfernen, da er um den Faktor 150 ... 3000 resistenter ist als die freilebenden Keime (Roeske 2007, Höll 2002).

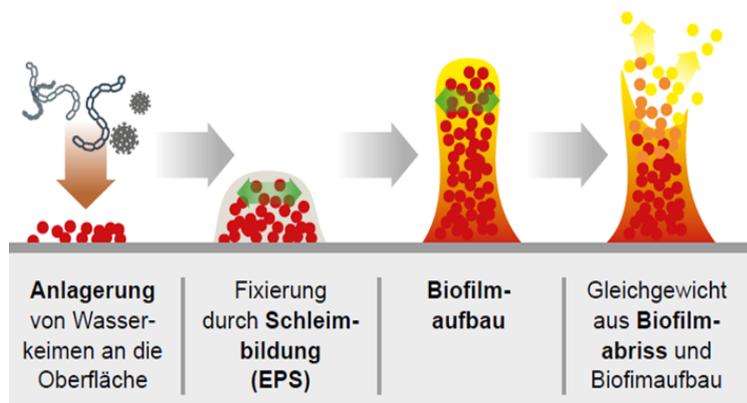


Bild 2.3 Biofilm (Aquafree 2019)

Die koloniebildende Einheit (KBE) (Bild 2.4) ist in der Trinkwasserhygiene ein wichtiges Instrument, um die Trinkwasserbeschaffenheit zu beurteilen. Dabei handelt es sich um Keime, die sich im Rahmen der Kultivierung (Vermehrung) zu einer Kolonie bilden. Diese werden im Anschluss ausgezählt und mit den Grenzwerten für die entsprechende Probertemperatur verglichen. Näheres dazu folgt in Abschnitt 2.4 "Indikatorkeime" (Höll 2002).

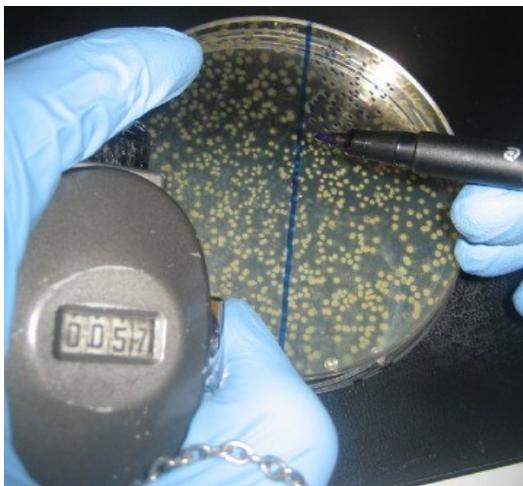


Bild 2.4 Auszählen von KBE (Geissmann 2013)

2.3 Trinkwasserverordnung

Um die Konsumenten vor den Einflüssen durch mikrobiologisch kontaminiertes Trinkwasser zu schützen, ist am 01.01.2003 die deutsche Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2020) in Kraft getreten, die durch wesentliche Überwachungsparameter aus der Mikrobiologie und Chemie eine Beurteilung der Trinkwasserqualität zulässt und den Konsumenten vor Schadstoffen schützt.

Die TrinkwV schreibt vor, dass humanpathogene Mikroorganismen nicht in einer Konzentration auftreten dürfen, in der sie den Menschen physisch und psychisch schädigen können (§5 Abs. 1). Dabei besteht Einigkeit darüber, dass die Konzentration der humanpathogenen Mikroorganismen maßgeblich das Gefahrenpotential bestimmt. Dafür setzt die TrinkwV klare Richtlinien, indem sie für eine stetige gute Trinkwasserqualität neben Indikatorparameter auch eine Reihe von chemischen und biologischen Kennwerten festlegt, deren Konzentration im Trinkwasser einen fest definierten Grenzwert nicht übersteigen darf. Deswegen müssen auffällige Parameter, die sich knapp unter dem Grenzwert aufhalten, gemäß dem Minimierungsgebot, so weit wie möglich reduziert werden, damit in absehbarer Zeit deren Konzentration nicht ansteigen kann.

Flugzeugtrinkwassersysteme werden gemäß der TrinkwV in der Neufassung vom 10. März 2016 als mobile Versorgungsanlage (§3 Abs. 2 Satz d) mit Wassertank, Rohrleitungen und Entnahmestelle/n (§3 Abs. 3) definiert. Das Trinkwasser, welches durch die Anlage befördert wird, dient nicht nur der Nutzung für den direkten Verzehr, sondern auch dem Gebrauch für häusliche und hygienische Angelegenheiten, wie bspw. die Zubereitung von Mahlzeiten oder die Körperpflege (§3 Abs. 1 Satz a).

Der Betreiber eines Flugzeuges oder einer Flotte liegt in der Pflicht, dass alle Trinkwasseranlagen im regelmäßigen Turnus ordnungsgemäß entkeimt werden. Eine Abweichung vom Grenzwert hat der zuständige Betreiber dem Gesundheitsamt unverzüglich mitzuteilen (§13 Abs. 4), welches die Anlage nach einer raschen Risikoabschätzung entweder eingeschränkt freigeben oder eine Stilllegung anweisen, die durch eine sachgemäße Desinfektion und anschließender Testung wiederaufgehoben werden kann. Für die Desinfektion von Flugzeugtrinkwassersystemen dürfen nur Desinfektionsmittel verwendet werden, die in den zugelassenen Wartungsbüchern (AMM) des Flugzeuges aufgelistet sind.

Ferner wird das Trinkwasser in den USA kollektiv durch die folgenden Behörden reguliert:

- *Environmental Protection Agency (EPA)*: reguliert Systeme, die das Flugzeug mit Trinkwasser versorgen
- *Food and Drug Administration (FDA)*: überwacht das Trinkwasser, welches für die Zubereitung von Essen verwendet wird
- *Federal Aviation Administration (FAA)*: kontrolliert die Einhaltung der Wartungen der Fluggesellschaften

Im Jahr 2005 reformierte die EPA gemeinsam mit der Air Transport Association (ATA) die sogenannte "Aircraft Drinking Water Rule" (ADWR), um eine saubere und sichere Trinkwasserversorgung in amerikanischen Flugzeugen zu gewährleisten.

2.4 Indikatorkeime

Um die Anwesenheit von Krankheitserregern nachzuweisen, wird eine entnommene Wasserprobe durch eine Trinkwasseruntersuchungsstelle nach der TrinkwV auf vier ausgewählte Indikatorkeime untersucht, deren Vorhandensein Aufschluss über weitere pathogene Keime, wie z.B. Legionellen, geben kann. Die klassischen, fäkalen Indikatorkeime mit ihren Grenzwerten können aus der Tabelle 2.1 entnommen werden. Diese mikrobiologischen Parameter verteilen sich stets homogen im Wasser und qualifizieren sich besonders aufgrund ihrer hohen Anzahl als Indikatoren. Auch durch ihre höhere Resistenz gegen Umwelteinflüsse im Vergleich zu humanpathogenen Keimen eignen sie sich zur frühzeitigen Erkennung von kontaminiertem Trinkwasser. Nicht zu unterschätzen ist zudem ihr exponentielles Wachstum bei gutem Nährboden. So gibt es Keime, deren Anzahl sich innerhalb von 20 Minuten verdoppeln. Hier spricht man von einer Generationszeit. In der Tabelle 2.2 ist das exponentielle Wachstum von Keimen aufgezeigt, welches erst während der Wartung der Trinkwasseranlage festgestellt werden kann und die Entkeimung somit schwieriger gestaltet (Höll 2002, TrinkwV 2020, Wikipedia 2021c).

Tabelle 2.1 Indikatorkeime gemäß TrinkwV 2020 – Anlage 1 Teil I / II

Nummer	Parameter	Maßeinheit	Grenzwert
1	Escherichia coli	KBE/100 ml	0
2	Enterokokken	KBE/100 ml	0
3	Pseudomonas aeruginosa	KBE/100 ml	0
4	Clostridium perfringens	KBE/100 ml	0
5	Koloniezahl bei 36 °C	KBE/ml	100
6	Koloniezahl bei 22 °C	KBE/ml	1000

Tabelle 2.2 Exponentielles Wachstum von Keimen (Wikipedia 2021c)

Dauer	Anzahl der Keime
20 min.	2
40 min.	4
1 h	8
3 h	512
5 h	32.768
7 h	2.097.152

Weiterhin ist für ein qualitativ hochwertiges Trinkwasser die Anzahl der koloniebildenden Einheiten bei den Bebrütungstemperaturen 22 °C und 36 °C von großer Bedeutung, weil sie einen Gesamtüberblick über die mikrobiologische Belastung des Trinkwassers geben. Erstere darf eine Konzentration von 1000 KBE pro Milliliter aufweisen, während bei der höheren

Temperatur nur eine Konzentration von 100 KBE erlaubt ist, da mit Zunahme der Temperatur auch die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass im Trinkwasser humanpathogene Keime enthalten sein können. Daher sollte vor allem die Keimanzahl bei 36 °C so niedrig wie möglich ausfallen, um etwaige gesundheitliche Schäden der Passagiere und Besatzung zu vermeiden (Roeske 2007).

Nichtsdestotrotz können die Untersuchungsergebnisse immer nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Probenahme wiedergeben und maßgeblich durch folgende Faktoren beeinflusst werden. Wenn die Temperaturen niedrig sind und auch der Nährstoffgehalt des Trinkwassers gesunken ist, sind die Lebensbedingungen für Mikroorganismen ungünstig, so dass ihre Zahl drastisch abnimmt. Darüber hinaus kann das Vermischen von Trinkwasser aus unterschiedlichen Flughafenwasserquellen eine Verkeimung fördern.

Die oben erwähnten Keime aus der Tabelle 2.1 werden nachfolgend detailliert vorgestellt.:

Escherichia coli und *Enterkokken* sind Bakterien, welche beim Menschen grundsätzlich im Darm vorkommen und bei der Verdauung unterstützen. Sie können über diverse Wege in das Trinkwasser gelangen. Dazu gehört eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit im Trinkwassersystem, wodurch sich die Keime von den Biofilmen ablösen können. Außerdem betroffen sind Anlagen, die über eine längere Zeitdauer nicht genutzt worden sind und wieder in Betrieb genommen werden. Eine Studie der Auburn University hat herausgefunden, dass *E. coli* bis zu 96 Stunden auf den Armlehnen eines Flugzeuges überleben können. Die Kolibakterien können nach der Toilettennutzung durch die Hände an Armaturen, Türklingen und andere Oberflächen weitergegeben werden. Bei nicht fachgerechter Desinfektion der Oberflächen besteht hier das Potential, das sich die Besatzung oder ein Passagier mit *E.coli* anstecken kann (Höll 2002, Clardy 2014).

Pseudomonas aeruginosa sind aufgrund ihrer hervorstechenden Eigenschaft der Anspruchslosigkeit wahre Überlebenskünstler, da sie sowohl in trockenen als auch feuchten Umgebungen lange überleben können. Viele der *Pseudomonas aeruginosa*-Stämme haben im Laufe der Zeit eine hohe Resistenz gegen die üblichen Antibiotika gebildet. Vor allem ältere Menschen und immungeschwächte Menschen können nach einer Infektion eine Lungenentzündung entwickeln. In einer Untersuchung der US Food and Drug Administration hat man herausgefunden, dass *P. aeruginosa* an den Innenwänden von Wasserleitungen 300 mal resistenter sind als im Trinkwasser (Lohmann 2021).

Seit 1. Januar 2003 wird das Trinkwasser auch auf *Clostridium perfringens* untersucht. Durch die Bildung von Sporen ist das Bakterium umweltresistent und im Wasser gut nachweisbar. Der pathogene Keim stellt erstmal keine Gefahr dar, dies ändert sich jedoch schlagartig, wenn das kontaminierte Wasser für die Zubereitung von Mahlzeiten im Flugzeug verwendet wird. Dabei erzeugt das Mikroorganismus hoch gefährliche Enzyme, die zu schwerverlaufenden Gasbränden führen kann, dessen Nichtbehandlung tödlich endet (Höll 2002).

2.5 Trinkwasserversorgungskette und Hygiene

Die Anwesenheit von Krankheitserregern im Trinkwasser stellt für alle Fluggesellschaften ein hartnäckiges Problem dar, für deren Lösung ein vertiefter Kenntnisstand in der Trinkwasserhygiene erforderlich ist. Zudem gibt es auch Fälle, in denen die Herkunft und der Transport von humanpathogenen Keimen unbekannt bleibt. Wichtig ist hier vor allem das rechtzeitige Erkennen von Keimen in Trinkwasseranlagen, welches in der Praxis eine große Herausforderung darstellt, da die TrinkwV für geringe Wasserabgabemengen von weniger als 10 m³/Tag nur eine jährliche umfassende Prüfung vorschreibt. Das Ergebnis der jährlichen Prüfung stellt jedoch, wie bereits erwähnt, nur eine Momentaufnahme dar, besitzt lediglich eine geringe Aussagekraft und Trends einer möglichen Verkeimung sind nicht identifizierbar. Um hier die Gefahrenabwehr besser zu gestalten, ist ein klar definierter Beprobungsrhythmus mit viel kleineren Zeitabständen von weniger als drei Monaten eine gut geeignete Methode (TrinkwV 2020).

Das Bild 2.5 stellt die Trinkwasserversorgungskette im Luftverkehr dar. Im Folgenden werden die Möglichkeiten der Kontamination des Trinkwassers von dem Wasserversorger bis zur Entnahmestelle im Flugzeug dargestellt. Der Fokus der Betrachtung liegt dennoch beim Flugzeugtrinkwassersystem.

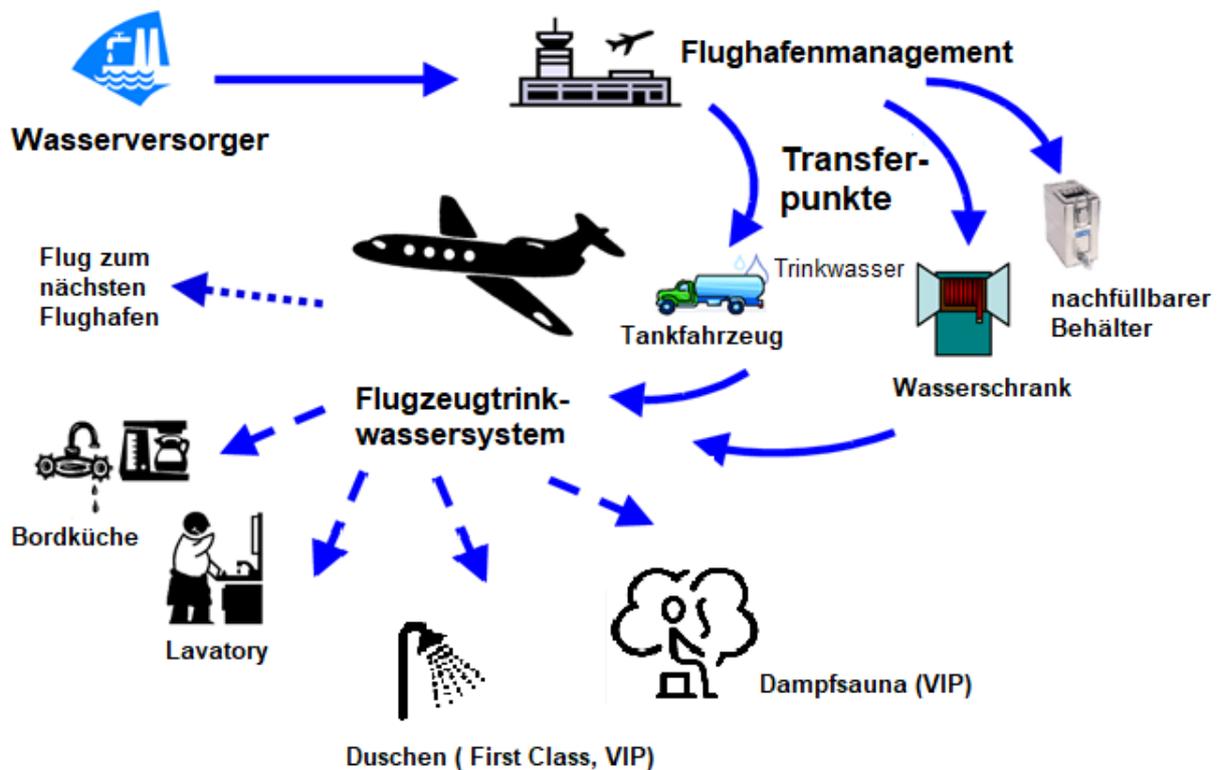


Bild 2.5 Wasserversorgungskette im Luftverkehr (nach WHO 2009)

2.5.1 Lieferkette bis zum Abfertigungsbereich

In modernen Industriestaaten werden die Flughäfen durch den örtlichen Wasserversorger mit hygienisch sauberem Trinkwasser beliefert, deren Qualität im Rahmen der Deklarationspflicht seitens des zuständigen Wasserversorgers einsehbar ist. Anders sieht es bei den sogenannten Schwellenländern aus, die durch Wassermangel, schlechte Trinkwasserqualität und mangelhafte Wasserinfrastruktur geprägt sind.

Ab der Übergabestelle am Flughafengebäude hat der Betreiber des Airports gemäß der TrinkwV dafür zu sorgen, dass das Trinkwasser auch innerhalb des eigenen Wasserversorgungsnetzes weiterhin sauber und genusstauglich bleibt. Dafür werden entweder rostträge Edelstahl- oder kunststoffbeschichtete Kupferleitungen genutzt. Im Allgemeinen testet das Flughafenmanagement alle drei Monate das Trinkwasser auf die Anwesenheit von biologischen Parametern und zusätzlich zwei Mal im Jahr nach chemischen Parametern. Notfallpläne aus der IATA Drinking-Water Quality Pool (IDQP) verhelfen bei einer akuten Kontamination zu einer schnellen und nachhaltigen Abhilfe (TrinkwV 2020, IATA 2013).

2.5.2 Wassertransfergeräte

Im Abfertigungsbereich von Flughäfen sind verschiedene Befüllungsmodule zu finden, wie der Wasserschrank, das Wassertankfahrzeug (Bild 2.6), die Karre oder die festinstallierte Füllstation. Typischerweise wird der bordeigene Wassertank durch ein Wassertankfahrzeug mittels einer Schlauchverbindung befüllt. Um das Risiko einer Kontamination so weit wie möglich zu reduzieren, wird der Tankbehälter täglich gespült und wichtige Bereiche wie das Sieb und die Entlüftungsöffnungen werden monatlich kontrolliert. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Befüllvorgang immer vor dem Absaugen des Abwassers stattfindet, da ansonsten das frische Trinkwasser durch infektiöse Aerosole verunreinigt werden könnte (IATA 2013).

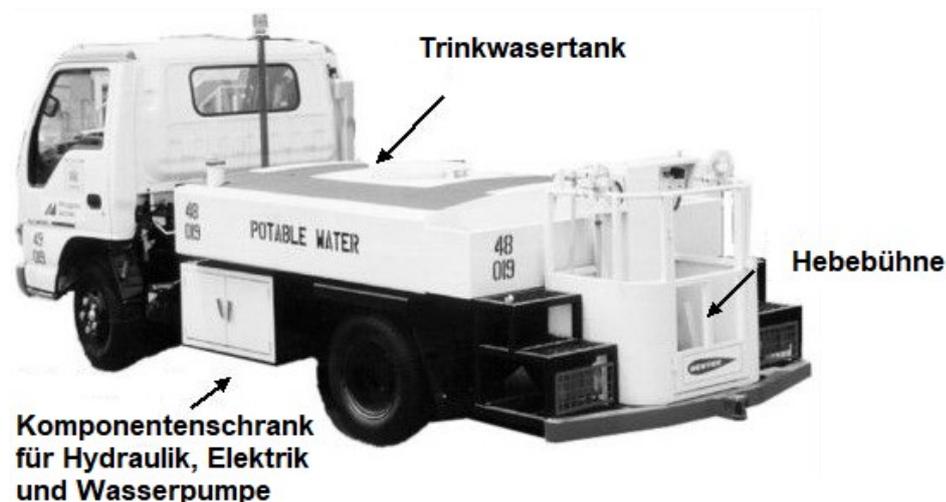


Bild 2.6 Trinkwassertankfahrzeug (nach HFGSE 2021)

Einige Flughäfen, wie z.B. der Los Angeles International Airport, bieten ihren Kunden eine direkte terminalnahe Befüllung durch eine kurze Schlauchverbindung zu einem Wasser-schrank an. Der Vorteil hierbei ist, dass der Zwischenbehälter des Tankfahrzeugs nicht benötigt wird, wodurch das Risiko einer Verunreinigung des Trinkwassers deutlich verringert wird. Nach der Benutzung der Befüllungsschläuche sind diese den Vorgaben entsprechend zu spülen und anschließend in einer dafür vorgesehenen Box, knickfrei und mit einer Kappe verschlossen aufzubewahren (IATA 2013).

2.5.3 Flugzeugtrinkwassersystem

Beim Befüllen des bordeigenen Wassertanks ist stets darauf zu achten, dass der Vorgang nur über einen Rückflussverhinderer stattfindet, da ansonsten kontaminiertes Trinkwasser aus dem Flugzeug in den Zwischenbehälter des Fahrzeugs gelangen und dadurch eine Kettenkontamination ausgelöst werden kann. Innerhalb der Trinkwasseranlage ist dafür zu sorgen, dass das Leitungswasser nicht wärmer als 20 °C ist, da sich die Mikroorganismen bis zu einer Temperatur von 45° bei ausreichendem Nährangebot stark vermehren können. Ein langer Aufenthalt des Flugzeuges in subtropischen Gebieten kann zu einer Erhöhung der Trinkwassertemperatur führen, weshalb in solchen Situationen eine Zunahme der Keime unvermeidbar ist (IATA 2013).

Eine regelmäßige Wartung der Trinkwasseranlage wie das Erkennen von Undichtigkeiten, organischen Ablagerungen und korrosiven Stellen verringert die Wahrscheinlichkeit einer Verkeimung. Darüberhinaus sorgt eine ausreichende Konzentration von Chlor im Trinkwasser für einen gewissen Schutz gegen Keime. Die TrinkwV erlaubt nur 0,3 mg pro Liter Trinkwasser, hingegen wird in den USA das Leitungswasser mit bis zu 4 mg/l Chlor versetzt, welches einer Erhöhung um 1333 % entspricht. Um das Desinfektionsmittel vor der Zersetzung zu schützen, sollten Licht, Wärme und Schadstoffe während des Transports so weit wie möglich vermieden werden (TrinkwV 2020, IATA 2013).

Die WHO empfiehlt an Transferpunkten regelmäßig Selbstaudits durchzuführen, um eine Verkeimung der Trinkwasseranlage von vornherein zu verhindern. Auch eine schnelle Fließgeschwindigkeit des Trinkwassers kann Partikel aus den Biofilmen mitreißen und sie entweder an eine andere Stelle im Leitungssystem transportieren, wo sie sich weiterhin vermehren können, oder im besten Fall werden die losgelösten Partikel kurz vor der Entnahmestelle durch dort installierte Aktivkohlefilter aufgefangen. Dieser sorgt nebenbei auch für eine geschmackliche Neutralisierung des Trinkwassers und muss regelmäßig ausgewechselt werden, da sich die Keime ansonsten in dem Filter stark vermehren können. Infolgedessen kann ein Filterdurchbruch stattfinden (IATA 2013).

VIP-Flugzeuge werden im Gegensatz zu Passagierflugzeugen wenig genutzt, so dass deren Trinkwassersysteme daher eine geringere Nutzungsdauer haben. Eine ehemalige Regierungs-

maschine B747-8 von Katar hat in einem Zeitraum von drei Jahren genau 436 Flugstunden (Steinke 2018) zurückgelegt, was einer monatlichen Flugdauer von ca. 12 Stunden entspricht. Im Vergleich dazu gibt Flightradar24 für eine B747-8 der Lufthansa vor Corona die monatlichen Flugstunden mit ca. 255 an. Aufgrund dieser Tatsache ist das Potential einer Verkeimung wegen der geringen Durchflussrate bei VIP-Flugzeugen viel höher.

Bei einer längeren Parkzeit empfiehlt es sich demnach, die Restmenge aus der Trinkwasseranlage ablaufen zu lassen, da Restwasser sehr verunreinigungsfördernd ist. Trotzdem sorgen die feuchten Innenwände der Leitungen und die nicht vermeidbare Restmenge an Flüssigkeit, die in einem Leitungsabschnitt verbleibt, für das Wachstum der Keime. Angesichts dieser Erkenntnisse stellt sich die Frage, ob die geparkten/gelagerten "Corona-Flugzeuge" einem höheren Risiko einer Verkeimung als VIP-Flugzeuge ausgesetzt sind, da die Nutzungsdauer vorübergehend viel geringer ist. Eine mögliche Folge davon ist, dass in naher Zukunft beim "De-Storage" stark kontaminierte Trinkwassersysteme auf die Wartungssparte treffen könnten, die vor der Wiederinbetriebnahme aufwändig desinfiziert und beprobt werden müssten.

2.6 Desinfektion von Trinkwassersystemen

Trinkwasseranlagen in Flugzeugen werden im Turnus von drei Monaten desinfiziert und anschließend auf die Anwesenheit von Indikatorkeimen untersucht. Dabei ist eine Desinfektion ein technisches Vorgehen, um mögliche pathogene Keime sowie andere Mikroben in der gesamten Anlage zu eliminieren. Es stehen verschiedene Entkeimungsverfahren zur Auswahl, die sich in ihrer Anwendung und Wirksamkeit grundsätzlich unterscheiden. Die Maßnahme ist in der Regel durch die Flugzeughandbücher (AMM) und gesetzlichen Vorgaben (TrinkwV) geregelt. Es ist sehr wichtig, dass alle Vorgaben eingehalten werden, da schon kleine Abweichungen das Endergebnis negativ beeinflussen können, sodass die Desinfektion erneut erfolgen muss. Des Weiteren handelt es sich bei der Laboruntersuchung der Wasserprobe lediglich um ein zeitlich begrenztes Ergebnis, welches das gesamte Geschehen nicht repräsentativ darstellen kann. Auch die Wassertemperatur spielt bei der Untersuchung eine entscheidende Rolle, da sich Keime bei warmen Temperaturen und günstigem Nährboden gut vermehren können und somit in der Auswertung höher beziffert werden (Roeske 2007, LHT 2016).

Der Flugzeughersteller stellt in seinen Aircraft Maintenance Manual (AMM) (Airbus 2015) eine Reihe von Desinfektionsmitteln vor, aus der eins ausgewählt werden muss:

- Wasserstoffperoxid
- Ozon
- Chlordioxid und Chloramin
- Calcium- und Natriumchlorit

Im Rahmen der Thesis werden nur die ersten vier genannten Desinfektionsmittel näher erläutert, da sie bei der Lufthansa Technik am häufigsten Anwendung finden.

2.6.1 Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid H_2O_2 ist eine chemische Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff und wird als wässrige, farblose Lösung mit einer Konzentration von $< 20\%$ unter den Handelsnamen Herlisil im AMM bei den Desinfektionsverfahren aufgelistet. Ihre Wirkung entfaltet sich nach der Photolyse, bei der durch Einwirkung von Ultraviolettstrahlen Hydroxyl-Radikale ($\cdot OH$) entstehen, die eine stärkere Oxidationswirkung als das Wasserstoffperoxid selbst besitzen und somit eine gute mikrobizide Wirkung aufweisen. Nach der erfolgten Desinfektion zerfällt das Herlisil in Wasser und Sauerstoff, sodass keine belastenden Nebenprodukte zu befürchten sind (Wikipedia 2021d, Herlisil 2009).

Als nächstes wird der Desinfektionsvorgang mit Herlisil kurz skizziert (Airbus 2015):

- Flugzeug wird mit Strom versorgt
- Trinkwasserservicepanel (Bild 2.7) wird geöffnet
- Trinkwassersystem wird entleert
- System wird gemäß AMM mit der Desinfektionslösung gefüllt
- System wird gemäß AMM gespült
- System wird gemäß AMM erneut mit der Desinfektionslösung aufgefüllt
- Desinfektionslösung muss gemäß AMM einwirken
- Desinfektionslösung wird entleert
- System wird mit Frischwasser gespült, um Desinfektionsmittelrückstände zu entfernen

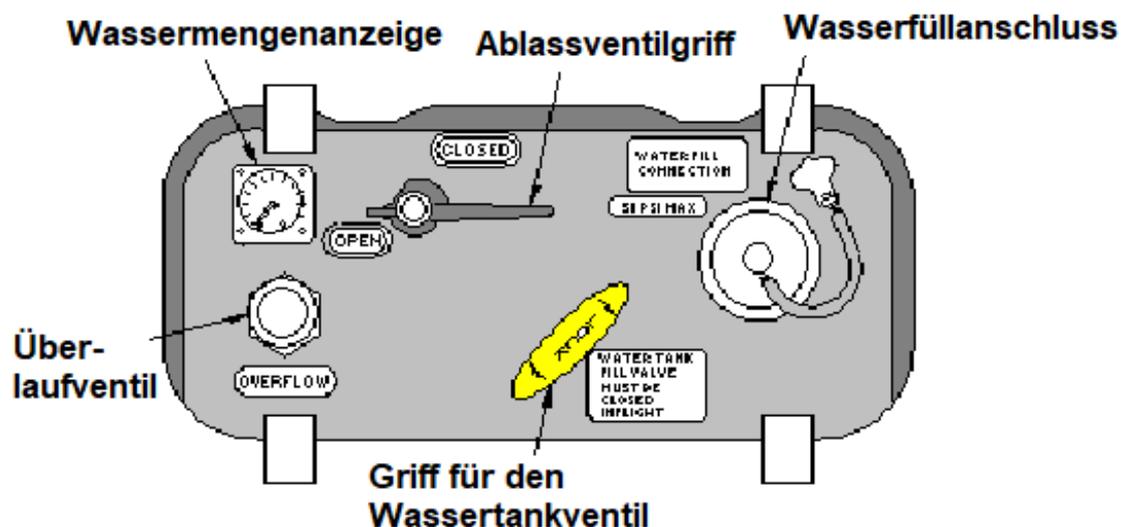


Bild 2.7 Trinkwasserservicepanel (nach Skydiving 2021)

2.6.2 Ozon

Ozon zur Desinfizierung von Trinkwasseranlagen hat sich in der Wasserhygiene sehr gut etabliert und zählt bis heute zu den bewährten Methoden für die Eliminierung von Keimen. Entdeckt wurde das Ozon durch Prof. Christian F. Schönbein aus Basel im Jahr 1839, der bei der Elektrolyse des Wassers einen stechenden, schwefligen Geruch wahrgenommen hat und ihn als einen eigenständigen Stoff deklariert hat. Erste experimentelle Anwendung fand das Gas im Jahr 1886 in einer Wasserversorgungsanlage in Frankreich. Später wurde in der Schweiz die erste Desinfektionsanlage mit Ozon aufgebaut (Roeske 2007).

Das Ozon (O_3) wird direkt am Flugzeug durch den Erzeuger (Bild 2.8) mittels stiller elektrischer Entladung bereitgestellt und dem zirkulierenden Wasser beigemischt. Dabei wird das ozonbelastete Wasser in die Trinkwasseranlage des Flugzeuges befördert (Bild 2.9) und kehrt anschließend wieder zurück in den Erzeuger, in dem das ozonarme Wasser wieder aufkonzentriert wird. Im Bild 2.10 ist ein Anschlussschema des Ozonerzeugers abgebildet. Die Wirkung von Ozon basiert auf der Spaltung in ein Sauerstoffpaar (O_2) und einem sehr reaktionsfreudigen atomaren Sauerstoffatom (O), welcher eine starke oxidative Wirkung aufweist und Bakterien und Viren nach einer Mindesteinwirkungszeit deutlich effektiver abtötet als Chlor. Nach einer vordefinierten Einwirkzeit wird das System durch das Öffnen der Zapfstellen mit dem ozonhaltigen Wasser gespült. Die verbleibende Ozonkonzentration an den Entnahmestellen wird als Indikator für die Sauberkeit des Trinkwassersystems gemessen. Anschließend wird das Ozon-Wassergemisch aus der Anlage abgelassen und in mehreren Spülvorgängen mit Wasser gespült (LHT 2016).



Bild 2.8 Ozon-Erzeuger (LHT 2016)



Bild 2.9 Anschluss-Wasserservicepanel (LHT 2016)

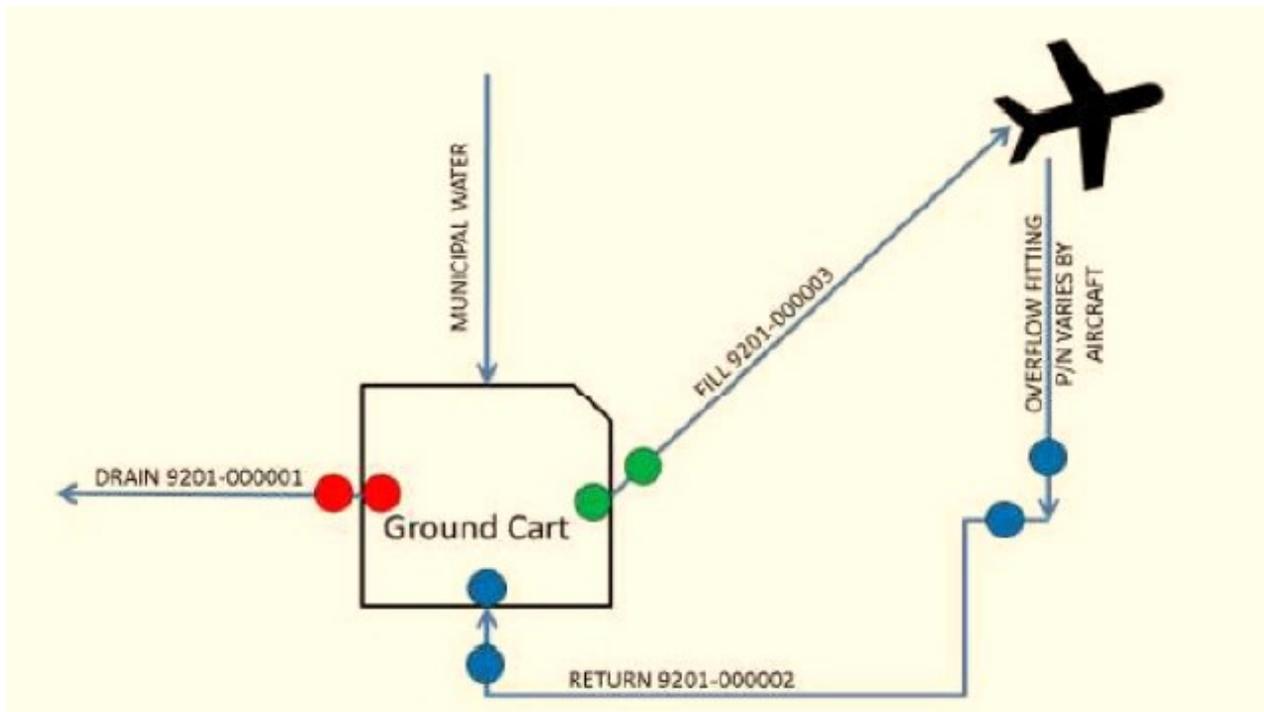


Bild 2.10 Anschlussschema Ozon-Erzeuger (nach LHT 2016)

Hässelbath hat in dem Versuch „Desinfizieren von Schwimmbecken“ herausgefunden, dass Ozon die Keime zehnmal schneller abtötet als Chlor. Entscheidend beim Einsatz von Ozon ist die exakte Beimischung, weil schon kleinste Veränderungen die Wirksamkeit spürbar beeinträchtigen können. Ferner ist auf eine saubere flüssige Verdrängungsströmung zu achten (Höll 2002).

2.6.3 Chlor

Nachdem im Jahr 1974 bekannt wurde, dass bei der Chlorung gefährliche Nebenprodukte wie Trihalogenmethane entstehen können, ist man auf Chlordioxid (ClO_2) umgestiegen, welches bei der Anwendung keine Haloforme bildet. Außerdem weist das Molekül eine sehr hohe antimikrobielle Wirksamkeit im Vergleich zu Chlor auf und entfernt auch hartnäckige Biofilme zuverlässig. Angesichts der hohen Beständigkeit des Desinfektionsmittels lässt sich über eine lange Einwirkzeit eine hohe Konzentration im Wasser aufrecht erhalten, sodass auch in den entlegenen Stellen der Anlage das Mittel ankommt und somit eine Wiederverkeimung unterbindet. Auch Chloramin ist eine antiseptische Chemikalie mit einem breiten Wirkungsspektrum und verursacht ebenfalls keine Resistenzbildung von Keimen wie Chlor (Roeske 2007).

2.6.4 Heißwasserspülung

Eine Systemreinigung (Bild 2.11) kann gemäß Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) Arbeitsblatt 551 auch mit heißem Wasser erfolgen, welches bei 70 °C Mikroorganismen nach etwa drei Minuten zuverlässig abtötet, da diese bei Temperaturen über 45 °C irreversibel zu denaturieren beginnen. Im Rahmen eines Projektes bei der LHT hat das Verfahren bei zwei Flugzeugen mit einer hohen Keimbelastung die Minimierung der Parameter unterhalb der Grenzwert erfolgreich bewirkt (Schicht 2021).

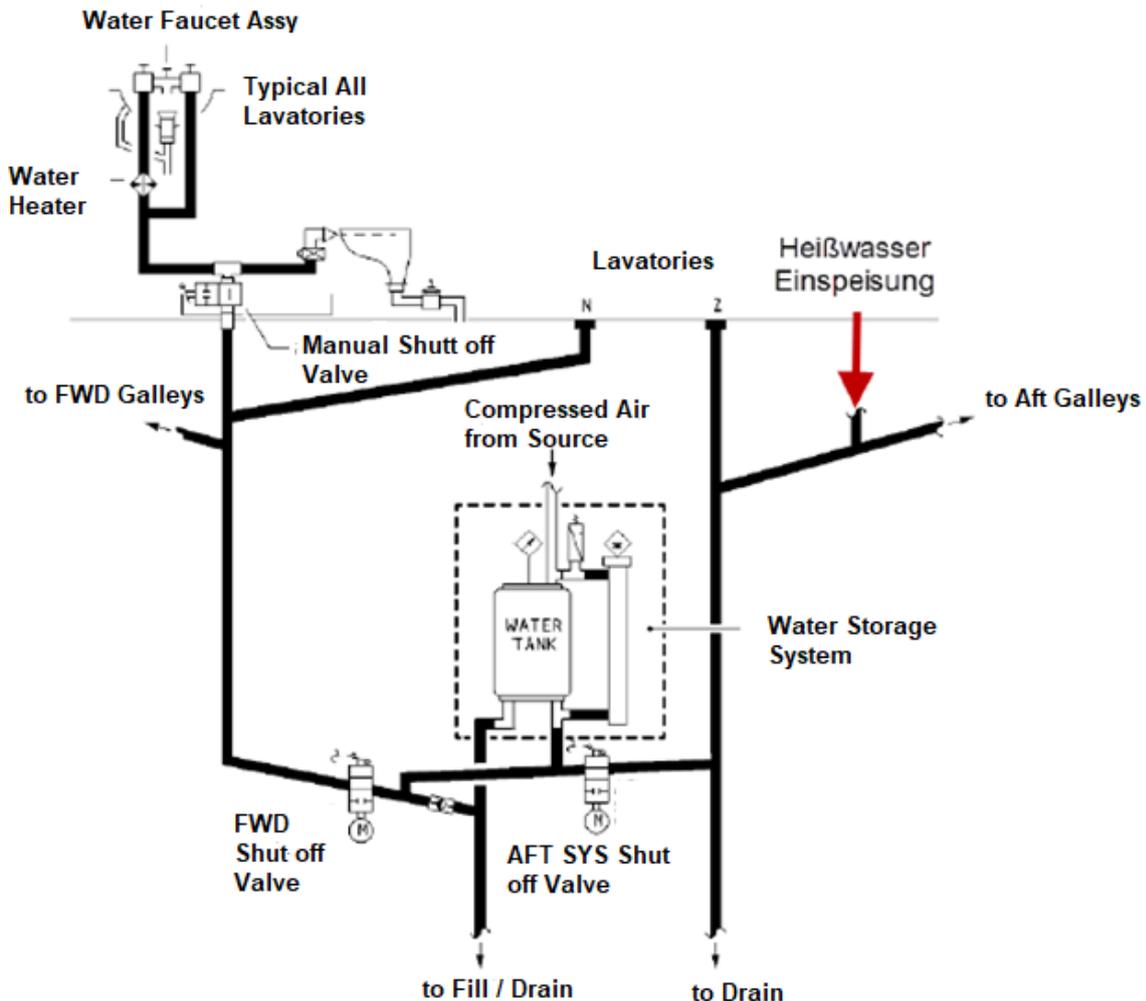


Bild 2.11 Heißwassereinspeisung (LHT 2016)

2.7 Entnahme einer Wasserprobe

Die Entnahme einer Wasserprobe ist gemäß DIN EN 19458 (UBA 2018) durch fachkundiges Personal durchzuführen, um nach der Analyse eine genaue und aussagekräftige Beurteilung des Trinkwassers zu erhalten. Dazu entnimmt eine entsprechend geschulte Person nach der durchgeführten Desinfektion die geforderten Wasserproben an mehreren repräsentativen Wasserentnahmestellen im Flugzeug. Dafür entfernt sie zunächst, falls vorhanden, den Perla-

tor und weitere Vorrichtungen, die eine Entnahme erschweren könnten. Anschließend wird die Auslaufstelle des Wasserhahns durch Abflämmen desinfiziert. Danach wird die Entnahmemarmatur durch Ablauf von einem Liter Wasser gespült und die Probe in ein steriles Probenahmegefäß gefüllt und dicht verschlossen. Um die Temperatur der Probe zu ermitteln, wird das Trinkwasser in einen Becher gefüllt und schließlich die gemessene Temperatur in dem Protokoll schriftlich festgehalten. Nach Entnahme sind die Proben so schnell wie möglich dunkel und gekühlt ins nächstgelegene Labor zu bringen und zu untersuchen. Dies sollte im Idealfall am selben Tag stattfinden oder spätestens nach 48 Stunden, da die Probe ansonsten verfällt. Neben der biologischen Untersuchung im Labor werden sensorische Parameter vor Ort erfasst. Es wird geprüft, ob das Wasser getrübt oder geruchlos ist. Um die Probe eindeutig zu kennzeichnen, wird die Luftverkehrsgesellschaft, die Registrierung und der Flugzeugtyp schriftlich im Protokoll festgehalten. Anschließend vergleicht das beauftragte Labor die Werte aus der Analyse mit den gesetzlich vorgeschriebenen Güteanforderungen. Falls der Befund auf coliforme Keime positiv ausgefallen ist, so ist der Betreiber des Flugzeuges verpflichtet, einen erneuten Test durchzuführen, um festzustellen, ob auch *E. coli* im Trinkwasser nachweisbar sind. Um kein Risiko einzugehen, wird eine Wiederholungsprobe nach 24 Stunden vorgeschrieben. Nachfolgend wird ein Desinfektions- und Spülvorgang durchgeführt, um die Trinkwasseranlage schließlich freizugeben (Höll 2002, LHT 2016).

Nach erfolgter Untersuchung der Probe gibt das Labor einen entsprechenden Bericht heraus:

Tabelle 1: Mikrobiologische Untersuchung von Trinkwasserproben (nach TrinkwV 2001)

Auftraggeber, Datum:	Lufthansa Technik AG, Weg beim Jäger 193, 22335 Hamburg	01.04.2016
Operator:	██████████	Registration: ██████████ A/C type: A 319
Entnahmestelle:	██████████	Kundenreferenz: ██████████
Probennummer LHT:	██████████	Probenahmedatum/zeit: ██████████ ██████████
Probenehmer/in:	██████████	Eingangsdatum/zeit: ██████████ ██████████
Auswertung durch:	██████████	Auswertungsdatum: ██████████
Probenahme nach DIN EN 19458 ¹ :	TW-System Flugzeug (B)	
	Desinfektion: ja	Perlator entfernt: ja
	extern (akkreditiert!)	Ablauf [I]: > 5

Trinkwasserparameter:	Ablaufzeit [sec]: > 180	Temperatur [°C]: 12,5	Freies Chlor [mg/l]: 0,09
* sensorische Parameter	nicht getrübt*		geruchlos*

Mikrobiologischer Parameter	Prüfmethode	Konzentration	Einheit	Grenzwert laut TrinkwV 2001
Gesamtkeimzahl bei 36°C	TrinkwV 2001 (2011)	4	KBE/ml	100
Gesamtkeimzahl bei 22°C	Anl. 5 l d) bb) ¹	13	KBE/ml	1000
Escherichia coli	DIN EN ISO 9308-1 ¹	0	KBE/100 ml	0
Coliforme Keime	DIN EN ISO 9308-1 ¹	0	KBE/100 ml	0
Enterokokken	DIN EN ISO 7899-2 ¹	0	KBE/100 ml	0
Pseudomonas aeruginosa	DIN EN ISO 16266 ¹	0	KBE/100 ml	0
Clostridium perfringens	TrinkwV 2001 Anl. 5 ¹	0	KBE/100 ml	0

Legende: KBE = Kolonie-bildende Einheiten

Bewertung: Die Qualität der Wasserprobe entspricht den mikrobiologischen Anforderungen der deutschen Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001 (TrinkwV 2001, „Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.“) Anhang 1, Teil 1 und Anhang 3, Teil 1. Die Probenahme erfolgte in Übereinstimmung mit der DIN EN ISO 19458:08-2006¹.

Bild 2.12 Mikrobiologische Untersuchung einer Trinkwasserprobe (LHT 2016)

2.8 Lösungsmöglichkeiten für Keimreduktion

In erster Linie ist es von großer Bedeutung, dass der flughafeneigene Wasserversorger täglich das Trinkwasser am Transferbereich mithilfe eines professionellen Schnelltestes auf eine saubere Qualität hin überprüft, da die Studie von Handschuh 2015 (Kapitel 6) zeigen wird, dass insbesondere vor dem Befüllen die Verkeimung stark zugenommen hat und in der Trinkwasseranlage anschließend fortgesetzt wurde. Ebenfalls wäre es vorteilhaft, dass Fluggesellschaften regelmäßig ihr Trinkwasser an den Entnahmestellen im Flugzeug eigenständig überprüfen und bei konkreten Verdachtsfällen die Wartung vorziehen können. Allerdings dauert eine erfolgreiche Desinfektion mehrere Tage, sodass die Fluggesellschaften diesen Vorgang eher im Rahmen einer geeigneten Liegezeit (C-Check) veranlassen und bis dahin das Trinkwassersystem stilllegen.

Eine weitere Möglichkeit der Trinkwasserüberwachung in naher Zukunft sind sogenannte Biochips (Bild 2.13), die eine frühzeitige Erkennung von Keimen ermöglichen und beim Überschreiten eines Schwellenwertes in der Flugbegleitertafel einen visuellen Alarm ausgeben. Solche Biochips enthalten genetisches Material, welches mit der Ziel-DNA komplementär ist. Hierbei sei gesagt, dass nur Keime registriert werden, deren DNA-Einzelstrang auch in dem Chip immobilisiert sind. Denkbar wäre hier, dass Chips auch mit allen bekannten Sequenzen der Indikatorkeime belegt werden, um dadurch die Anwesenheit anderer Mikroorganismen nachzuweisen. Um solche Chips in die Trinkwassersysteme zu überführen, hängt es aktuell vor allem von den Kosten, der Implikation und der Notwendigkeit ab.

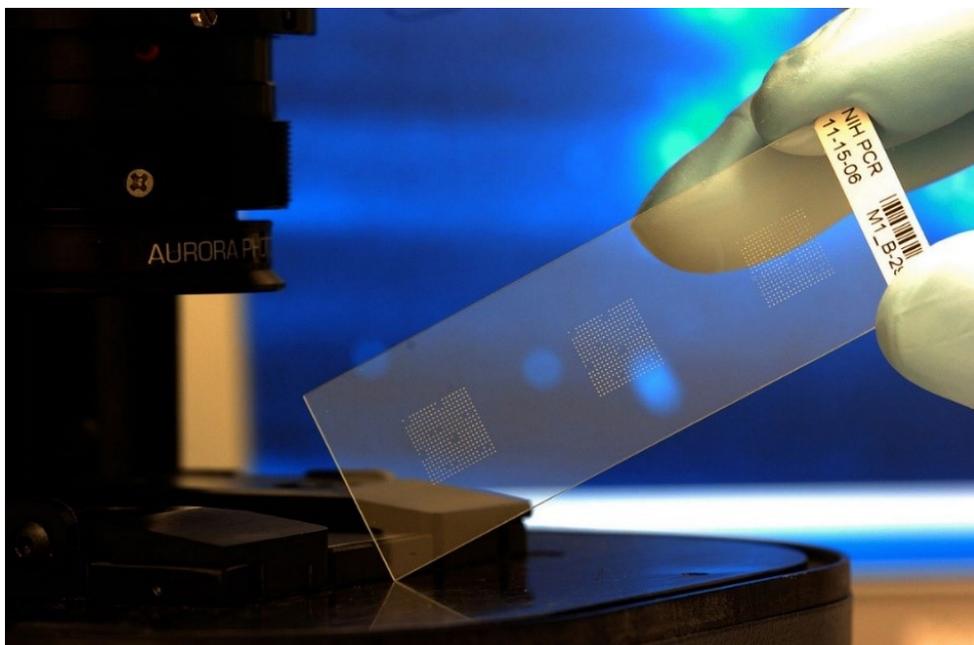


Bild 2.13 Biochip (Flickr 2006)

In der Wasseraufbereitung werden seit längerem auch Membranen (Bild 2.14) eingesetzt, welche in Druckröhren in Form von gebündelten Hohlfasern oder Flachmembranen (z.B. Kissen, Platten) eingebaut sind, um schwerpunktmäßig biologische Verunreinigungen zu entfer-

nen. Der Einsatz dieser Technik ist insbesondere für Fluggesellschaften wirtschaftlich und eine gute Alternative zu den UV-Desinfektionsanlagen, da die Aufbereitung von 1000 l Trinkwasser etwa 0,1 € an Kosten verursacht (ZDF 2014). Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Membrantypen durch ihre Porengröße, wodurch partikuläre Wasserinhaltsstoffe durch den begrenzten Porendurchmesser an der Mantelfläche der Kapillaren zurückgehalten werden (z.B. 99,99 % Rückhaltegrad bei Legionellen). In der Mikrobiologie wird hauptsächlich die Ultrafiltration eingesetzt, deren Porengröße im Bereich $0,01 \mu\text{m} \dots 0,1 \mu\text{m}$ liegt. Die zurückgehaltenen Partikel bilden auf der Oberfläche der Membran anschließend einen Belag, welcher nach einem festgelegten Zeitintervall gespült werden muss. Um das Risiko von Biofouling zu senken, wird der Spülung ein Desinfektionsmittel zugesetzt (LHT 2015).

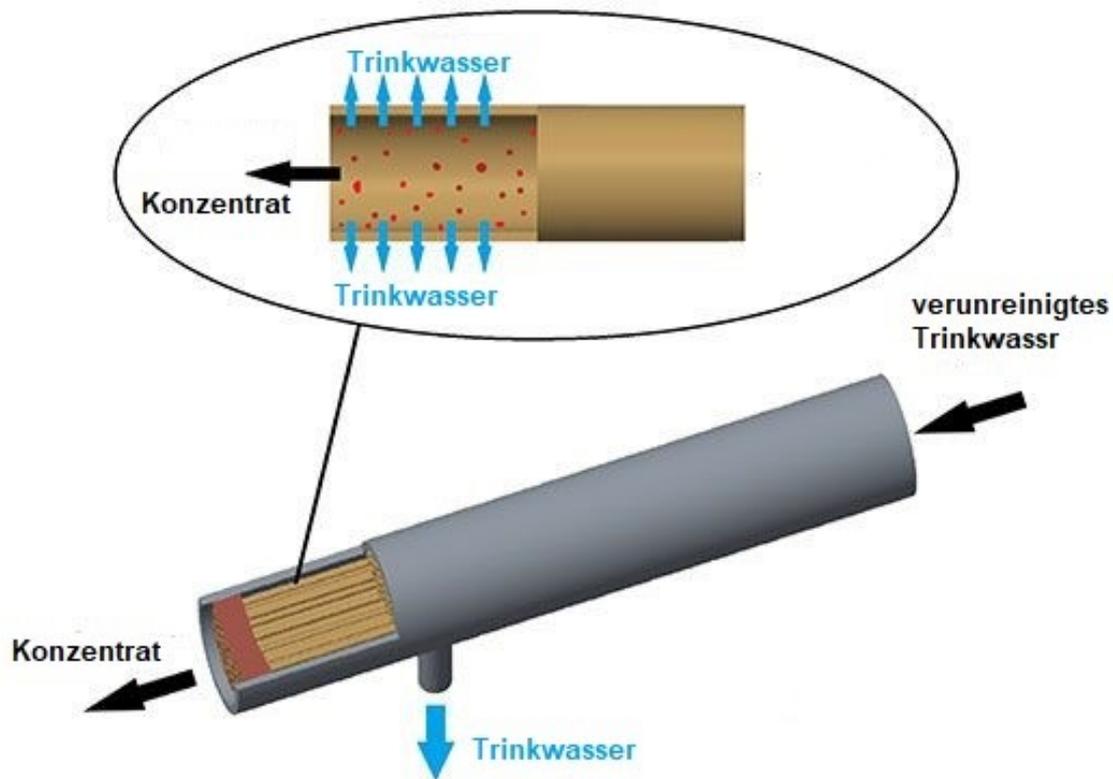


Bild 2.14 Membranfiltration (nach Hydroblue 2021)

Diese endständigen Membranfiltermodule wurden in der Lavatory und Galley einer privaten VIP-Maschine (Bild 2.15) installiert. Die Ergebnisse der nachfolgenden Trinkwasseruntersuchungen zeigten, dass die Keimanzahl gegenüber keinem Filter von 100 KBE pro ml auf gegen Null gefallen ist. Auch wäre es denkbar, den Filter in der Kaltwasserzuleitung (Bild 2.16) zu integrieren (LHT 2015).



Bild 2.15 Brause mit Membranfilter
(LHT 2016)

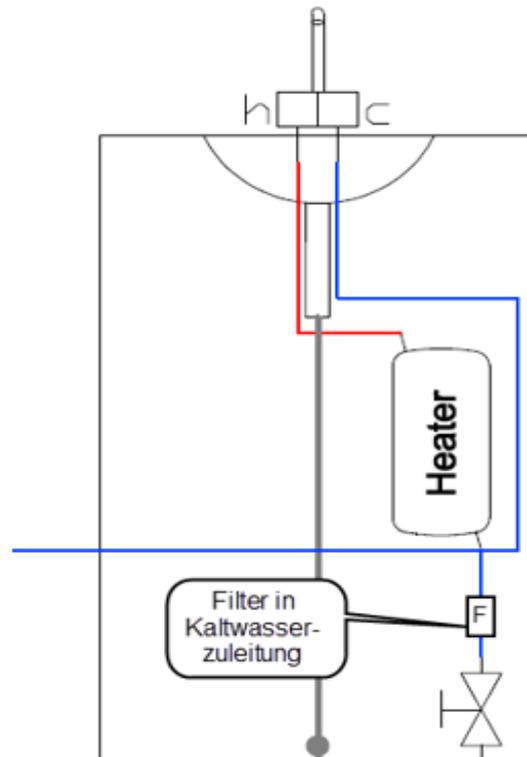


Bild 2.16 Filterinstallation Lavatory
(LHT 2016)

Zudem sehen sich derweil viele Fluggesellschaften mit dem Problem konfrontiert, dass sie ihre Trinkwassersysteme nur mühsam mit mehreren Vorgängen oder einer längeren Verweilzeit der Desinfektionsmittel gereinigt bekommen. Um die folgende Desinfektion effizienter zu gestalten, wurde ein alternatives Verfahren "Comprex©" als Voranwendung durchgeführt (Bild 2.17), welches mithilfe von modulierten Luftimpulsen in den Trinkwasserleitungen Wasserverdrängung und Verwirbelungen hervorruft. Dies führt dazu, dass an den Innenwänden der Rohre hohe Scher- und Schleppspannungen auftreten, die die biologischen Ablagerungen effizient und schnell wegspülen und den darauffolgenden Desinfektionsvorgang somit unterstützen können (LHT 2016).



Bild 2.17 Complex-Testaufbau im hinteren Cargo Compartment (LHT 2016)

Dennoch sollte das primäre Ziel sein, die Kontaminationsherde ausfindig zu machen und mit den einzelnen Schnittstellen wie z.B. den Wasserversorgern am Flughafen und Wartungsfirmen zusammen zu arbeiten, um starke Verkeimungen, wie sie derweil in Trinkwassersystemen vorzufinden sind, in Zukunft zu vermeiden.

3 Metallische Kontamination des Trinkwassers

3.1 Gesetzeslage zu Verunreinigungen im Flugzeug

Neben Mikroorganismen können auch feine Metallpartikel im Trinkwasser nachgewiesen werden, welche je nach Art und Menge eine gesundheitliche Gefahr für die Passagiere und Besatzung darstellen kann. In der TrinkwV werden deswegen für ausgewählte Metalle spezifische Grenzwerte festgelegt, welche neben gesundheitlichen Aspekten auch technische und ästhetische Motive verfolgt. So führt eine erhöhte Konzentration von Mangan zu Verschlämmungen in Trinkwassersystemen und Eisen zu einem tintigen-metallischen Beigeschmack des braungefärbten Trinkwassers (UBA 2017). Darüberhinaus gibt es natürlich auch weitere Gefahrenstoffe, die in der TrinkwV nicht erwähnt werden, aber mit der Konzentrationsklausel indirekt abgedeckt werden. Sie besagt, dass Metalle nur in einer unbedenklichen Konzentration im Trinkwasser auftreten dürfen, sodass auch für die Gesundheit kurz- und langfristig mit keinen Folgen zu rechnen ist (TrinkwV 2020).

Ferner stehen in der Verordnung der europäischen Gemeinschaft Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Februar 2008 klare und strenge Vorgaben für die Kabinenluft und das Trinkwasser. Dort wird gefordert, dass die Fluggesellschaften

für die Fluggäste angemessene Beförderungsbedingungen und ausreichenden Schutz vor allen erwarteten Gefahren im Flugbetrieb [...] schaffen. (EASA 2008)

Dies bedeutet, dass die Zapfluft für die Bedruckung des Trinkwassersystems frei von schädlichen und gefährlichen Stoffen sein muss. Darunter fällt auch die metallische Verunreinigung der Zapfluft durch Abtragung von Komponentenmaterial aus dem Triebwerk, welche sowohl das Trinkwasser als auch die Kabinenluft kontaminieren kann. Entsprechend der Vorschrift CS-E-690 (EASA 2020) wird sogar verlangt, dass die Luft für Bedruckung auf Reinheit und aus Mängeln hervorgehende Verschmutzungen untersucht werden muss, um eine Kontamination des Trinkwassers zu unterbinden. Dennoch wird die Trinkwasserproblematik seitens der Luftfahrtbehörden wenig bis kaum angesprochen, obwohl die Datenlage zu den Trinkwasserevents an Bord von Flugzeugen eindeutig und gleichzeitig beunruhigend ist.

Vielmehr stellt die Trinkwasserverordnung sicher, dass das Flugzeugtrinkwasser auch bedenkenlos gebraucht werden kann. In der Tabelle 3.1 sind dafür die Grenzwerte für die metallischen Parameter aus der TrinkwV aufgelistet und in Tabelle 3.2 die Differenzen der Grenzwerte zu den anderen nationalen Behörden angegeben. Bei einer positiven Abweichung wird der Grenzwert des jeweiligen Landes mit einer grauen Schattierung versehen, wodurch insgesamt auffällt, dass die TrinkwV strengere Anforderungen an das Trinkwasser stellt als die anderen Richtlinien. In den USA zum Beispiel ist sauberes Trinkwasser keine Selbstverständlichkeit, weswegen die Grenzwerte dort so hoch festgelegt sind.

Tabelle 3.1 Metallische Parameter gemäß TrinkwV 2020 - Anlage 2/3

Anl. 2 Teil I	Grenzwert [mg/l]	Anl. 2 Teil II	Grenzwert [mg/l]	Anl. 3	Grenzwert [mg/l]
Bor	1	Antimon	0,005	Aluminium	0,2
Chrom	0,05	Arsen	0,01	Eisen	0,2
Quecksilber	0,001	Cadmium	0,003	Mangan	0,05
Selen	0,01	Kupfer	2	Natrium	200
Uran	0,01	Nickel	0,02		
		Blei	0,01		

Tabelle 3.2 Vergleich der TrinkwV mit anderen internationalen Wassernormen (WHO 2017, Wikipedia 2021e, Mee 1997, Vikaspedia 2021)

Parameter	WHO [mg/l]	USA [mg/l]	China [mg/l]	Kanada [mg/l]	Indien [mg/l]
Aluminium	- 0,1	0	N/A	Kein Limit	Kein Limit
Antimon	+0,001	+0,001	+0,001	+0,001	Kein Limit
Arsen	0	0	0	0	+0,04
Blei	0	+0,05	0	0	+0,09
Bor	+1,4	N/A	0	+4	0
Cadmium	+0,002	+0,002	+0,002	+0,002	0
Chrom	0	+0,05	0	0	0
Eisen	Kein Limit	+0,1	N/A	+0,1	N/A
Kupfer	0	-0,7	-1	-1	-0,5
Mangan	+0,05	+0,05	+0,05	+0,05	+0,05
Natrium	0	-180	N/A	0	Kein Limit
Nickel	+0,05	+0,05	+0,05	Kein Limit	Kein Limit
Quecksilber	+0,005	+0,001	+0,004	0	0
Uran	+0,005	+0,02	0	+0,09	+0,02

Bis heute bestimmen integrierte Sensoren ausschließlich den Luftdruck, um die Belüftung zu koordinieren. Überwachungsbedürftige Parameter, wie zum Beispiel Kohlenmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Ozon und eine große Zahl von Schadstoffen werden im Cockpit und in der Kabine gewöhnlich nicht aufgezeichnet, obwohl eine Einbaupflicht solcher Sensoren erforderlich ist. Darüberhinaus werden nur für die chemischen Verbindungen CO, CO₂ und O₃ Grenzwerte angegeben, während für andere Stoffe, die mithilfe der Zapfluft in die Kabine oder in das Trinkwasser gelangen können, keine Grenzwerte existiert (Scholz 2021a).

3.2 Metallische Verunreinigung des Triebwerköls

Um die Möglichkeit einer Verunreinigung des Trinkwassers mit Metallpartikeln durch die zum Bedrucken des Wassertanks erforderliche Zapfluft zu untersuchen, muss zunächst festgestellt werden, inwieweit das Triebwerköl mit Metall verunreinigt ist.

Das Schmieröl sorgt im Triebwerk für einen verschleiß- und störungsfreien Betrieb und wird innerhalb eines geschlossenen, rezirkulierenden System an die Komponenten wie das Lager

und das Zahnrad befördert. Für die Rotorlagerung werden üblicherweise Kugel- und Rollenlager verwendet, welche in abgedichteten Lagergehäusen positioniert sind. Dort werden über mehrere Öldüsen die Lager mit dem Schmieröl versorgt. Einige Triebwerksmodelle besitzen am Austritt der Öldüse einen Siebfilter, der nochmal grobe Partikel auffängt, um jegliche Schäden im Lager abzuwenden (Linke 2014).

Damit das Öl generell im Lagersumpf verbleibt, wird um das Lagergehäuse eine Labyrinthdichtung (Spaltdichtung) angeordnet. Diese Art der Dichtungen werden vor allem bei hohen Relativgeschwindigkeiten eingesetzt, um jeglichen Abrieb von Material zu verhindern. Dabei dringt die sogenannte Sperrluft durch den oberen linken Spalt (Bild 3.1) in das Lagergehäuse und strömt zu den Dichtungen sowie in den Lagersumpf. Das heiße Öl wird nach dem Gebrauch über eigene Rücklaufleitungen aus dem Sumpf durch eine Filtereinrichtung befördert (Bild 3.2), welcher Partikel in der Größenordnung von 0,015 mm ... 0,065 mm abfängt. Grobe Metallpartikel mit einer Größe von 0,02 mm ... 1 mm werden durch den Spandektoren erkannt und aufgehalten (Linke 2014).

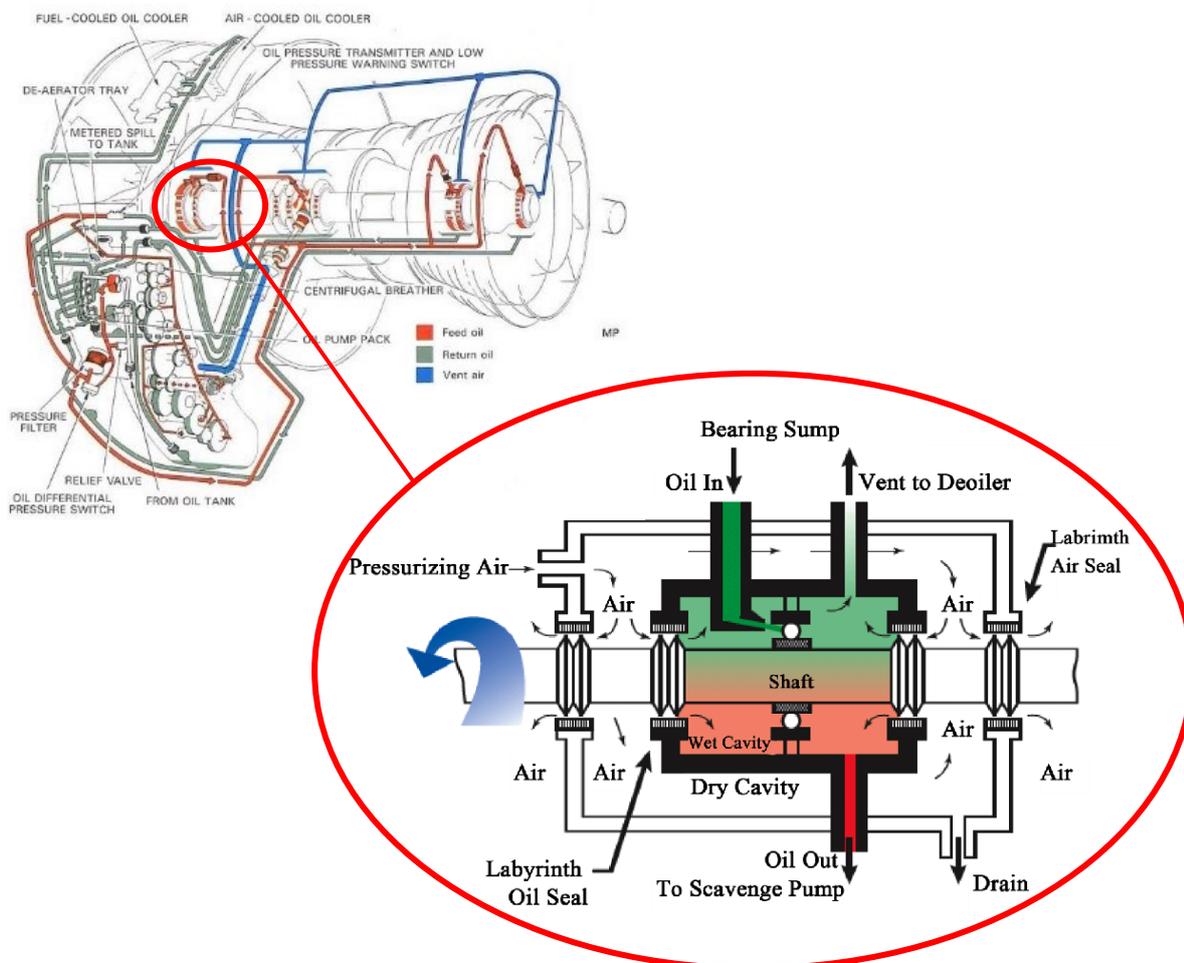


Bild 3.1 Schmierölsystem (links) und Öllagersumpf (rechts)
(nach Aeromodelbasic 2012 und nach ExxonMobil 2016)

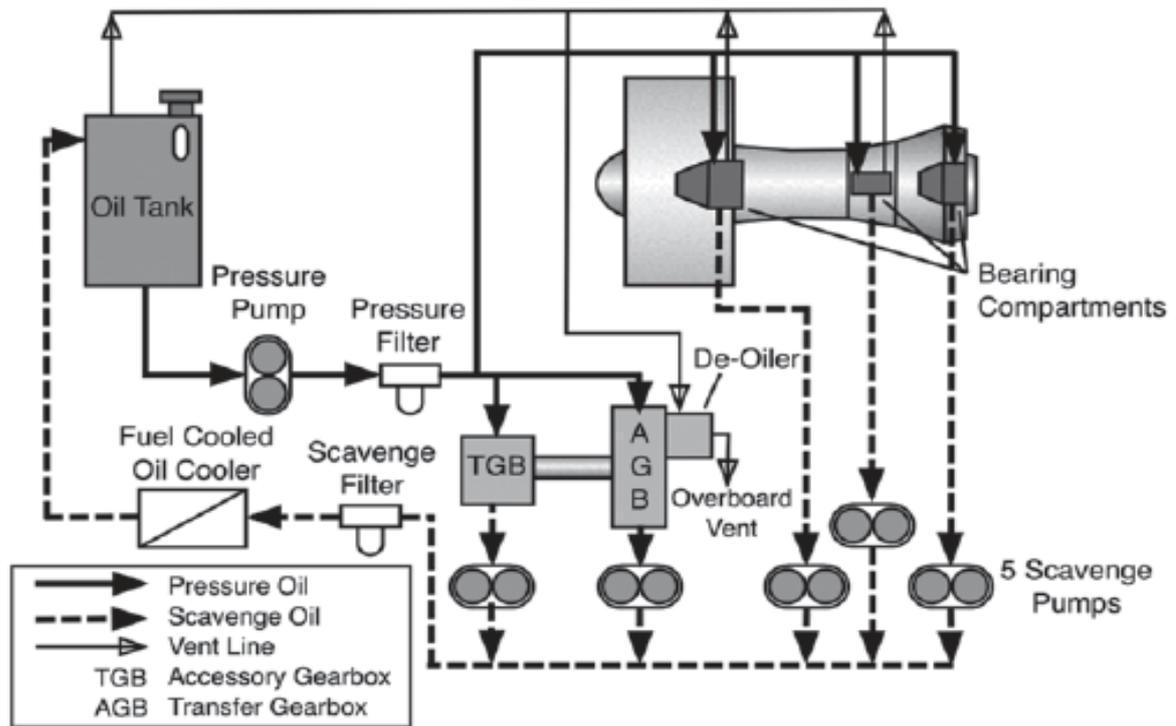


Bild 3.2 Schmierstoffsystem mit drei Lagersümpfen (Linke 2014)

Das fast vollständig gefilterte Öl wird mittels Rückholpumpen in den Kalttankssystem geleitet, um wieder für die Kühlung und Schmierung eingesetzt zu werden. Im Laufe der Betriebszeit können wichtige Bauteile im Triebwerk wie Lager, Dichtung und Zahnrad korrodieren, verschleßen und abgetragen werden. Die mikroskopisch kleinen Partikel verweilen im Ölkreislauf und können durch den Sandstrahleffekt neuen Abrieb und raue Stellen an den Oberflächen der Bauteile verursachen. Beginnt ein Filter zu verstopfen, so erhält der Pilot im Cockpit im ECAM Display das Wort "clog" angezeigt. Diese Info wird dann an die Technik weitergeben (Linke 2014).

Im Übrigen bestehen die in den Rückholpumpen befindlichen Zahnräder aus 32Cr-MO-V13-Stahl und weisen eine sehr hohe Warmfestigkeit und Anlaßbeständigkeit auf. Das Material hat folgende Zusammensetzung (%): C 0,3; Si 0,31; Mn 0,5; Cr 3,21; Mo 0,44; Ni 0,11 und V 0,1, wovon einige in der untersuchten Ölprobe von Dr. Gatti (Scholz 2021a) nachgewiesen worden sind. Im Bild 3.3 ist so eine Zahnradpumpe abgebildet, welche aus einem Gehäuse und zwei ineinander greifenden Zahnradwellen besteht. Durch anspruchsvolle Betriebsbedingungen wie Verschleiß durch abrasive Bestandteile, Vibrationen oder hohe Temperaturen erodieren die Einzelteile und geben somit feine Metallpartikel in den Ölstrom ab, die innerhalb der Maschenweite von der Filterstation abgefangen werden können (Cologna 2019).

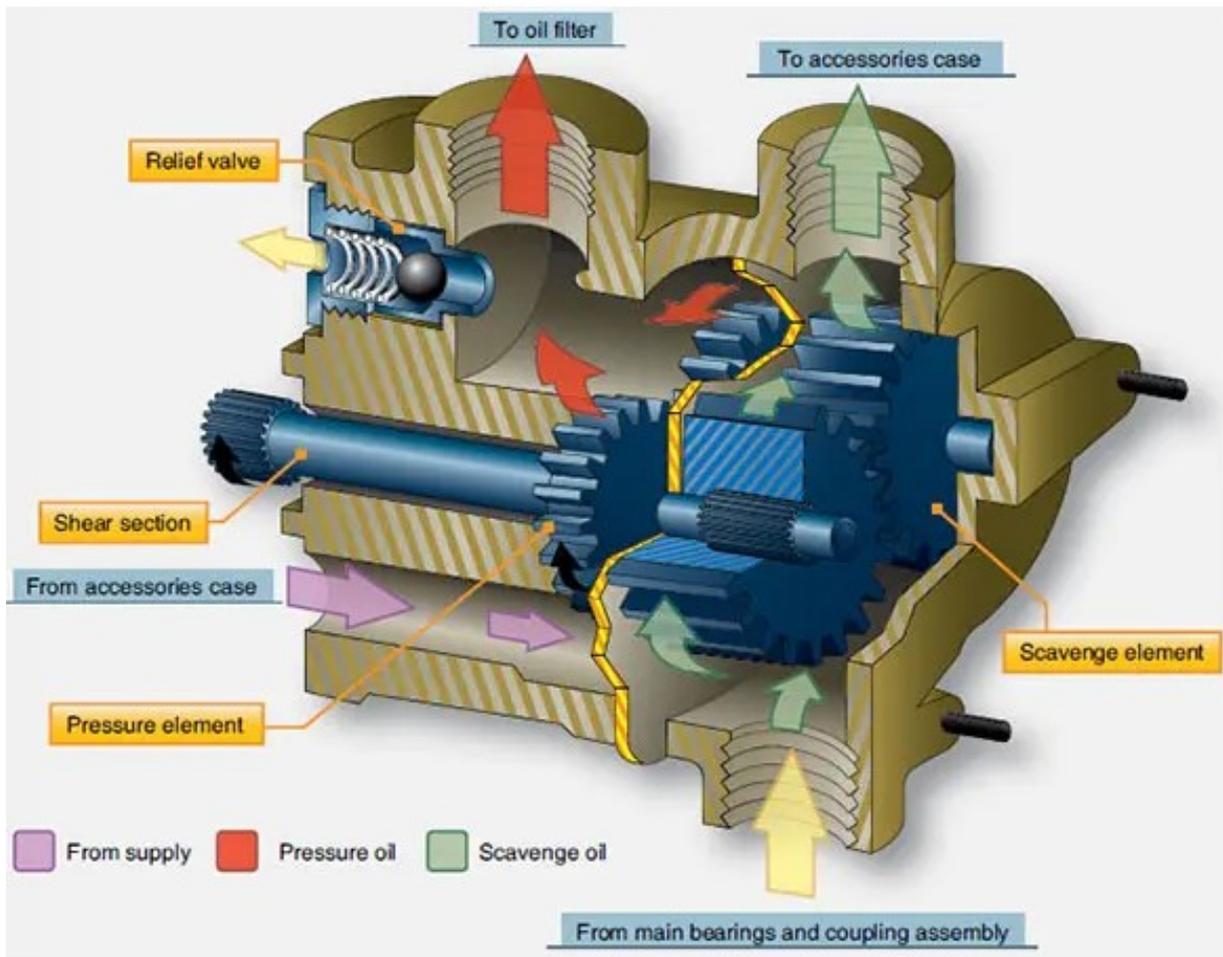


Bild 3.3 Zahnradpumpe (Flight Mechanic 2021)

Im Bereich des Lagers, welche üblicherweise aus Stahl und Aluminium angefertigt worden sind, kann es durch Gleitreibung und -lagerung zu einem geringen Abtragen von Komponentenmaterial kommen. Da das Schmieröl durch Leitungen gepumpt wird, die einen geringen Durchmesser haben und die Düsen verhältnismäßig klein sind, können schon vorhandene Abriebpartikel im Ölstrom für weiteren Verschleiß sorgen, sodass das Verschleißverhalten des Schmierölsystems deutlich zunimmt (Linke 2014).

Die durchschnittliche Verteilung der Partikel in Ölsystemen wird folgendermaßen dargestellt:

- 70 % der Partikel sind kleiner als 5 μm
- 20 % der Partikel sind 5 μm ... 10 μm groß
- 10 % der Partikel sind größer als 10 μm

Der größte Anteil entfällt auf die sehr feinen Partikel, die sowohl systembedingt als auch in Hinblick auf die metallische Kontamination der Zapfluft am problematischsten sind, weil sie die Filteranlage mit einer größeren Wahrscheinlichkeit passieren (Karberg 2021).

Die italienische Nanopathologin Frau Prof. Dr. Gatti von der Universität Modena und Reggio Emilia hat eine Ölprobe mit Hilfe eines spektroskopischen Ölanalyseprogrammes (SOAP)

untersucht und dabei herausgefunden, dass im Triebwerköl ein erhöhtes Vorkommen von Eisen und Chrom vorliegt.

Das Eisen (FE) ist das dominierende und am häufigsten auftretende Verschleißmetall im Schmieröl (Bild 3.4), welches für die Bewertung des Motorzustands eine wichtige Schlüsselrolle besitzt.

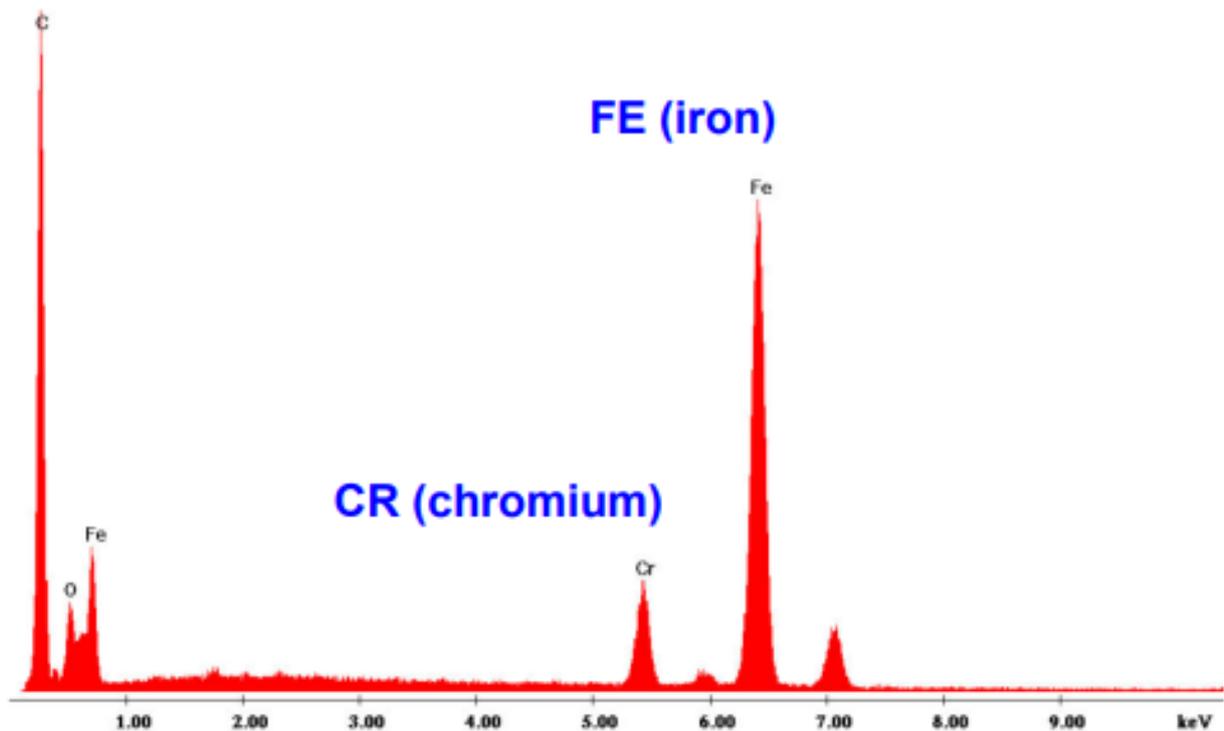


Bild 3.4 Metallpartikel im Triebwerköl (Scholz 2021a)

Seine Anwesenheit in einer Ölprobe deutet darauf hin, dass an Zahnrädern, Lagern und drehenden Lagerringen im Triebwerk ein langsam aber stetig fortschreitender Schaden stattgefunden hat. Die Größe dieser abgeriebenen Partikel liegt zwischen $1\ \mu\text{m}$... $5\ \mu\text{m}$, während natürlicher Verschleiß feine Partikel bis zu der Größenordnung von wenigen Nanometern (nm) verursacht. Darüber hinaus wird im Getriebe, das unter hohen Bedingungen arbeitet, Chrom (CR) eingesetzt, da dieses den Grundwerkstoff vor einer Korrosion schützt und ihm zusätzlich eine hohe Festigkeit verleiht. Mithilfe der ermittelten Metalle und ihrer Menge aus der untersuchten Probe kann die zu begutachtende Baugruppe ausfindig gemacht werden, um einen gravierenden Schaden frühzeitig zu verhindern (Linke 2014, Scholz 2021a).

Auch Prof. Dr. Kaisan von der Universität in Zaria aus dem Fachbereich Mechanik hat im Jahr 2019 jeweils eine Ölprobe aus einem Passagier- (A1) und Trainingsflugzeug (A2) entnommen und im Labor untersuchen lassen. In der folgenden Tabelle 3.3 sind die metallischen Bestandteile der Ölproben angegeben (Kaisan 2019).

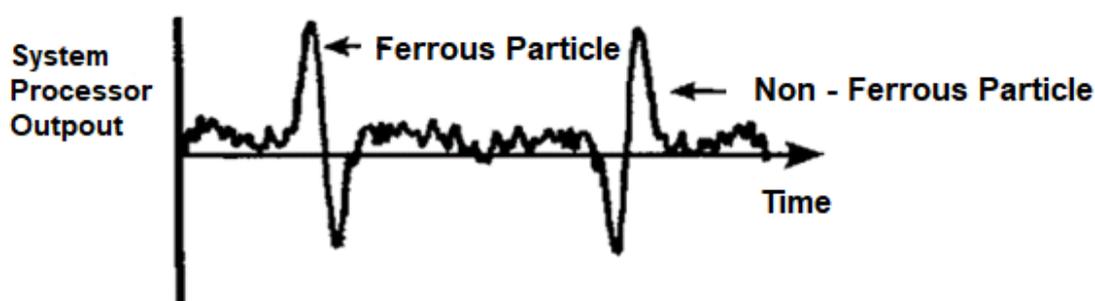
Tabelle 3.3 Konzentration von Abrasivmetallen (ppm) (Kaisan 2019)

Flugzeug	Eisen [Fe]	Blei [Pb]	Mangan [Mn]	Kupfer [Cu]	Zink [Zn]	Chrom [Cr]	Cadmium [Cd]
A1	0,1914	0,1032	0,0101	0,0009	0,002	0,117	0,0176
A2	0,1777	0,1011	0,0132	0,0012	0,0086	0,453	0,0008

Eine aussagekräftige Metallanalyse erfolgt üblicherweise auf der Grundlage von Veränderungen der metallischen Kennwerte. Im Schmiersystem einer Passagiermaschine (A1) wurde eine höhere Eisenkonzentration als im Trainingsflugzeug (A2) ermittelt. Dies ist ein Warnhinweis, dass im Bereich eines Lagers, eines Zahnrades oder im Leitungsabschnitt ein höherer Verschleiß stattgefunden hat. Außerdem kann ein abrupter Anstieg wie in A2 der Elemente Chrom oder Nickel auf eine fortschreitende Korrosion im Ölsystem hinweisen, welche für den Menschen schädlich sind (Kaisan 2019). Die Teilergebnisse Eisen und Chrom spiegeln sich in den Ergebnissen von Gatti (Bild 3.4) wider.

Die Größe der abrasiven Partikel sind meistens kleiner als 1 nm und können je nach Motortyp und Alter des Öls minimal davon abweichen. Aufgrund dieser Dimensionen kann die metallische Kontamination des Schmieröls durch die Filteranlage des Schmiersystems nicht aufgehalten werden und die Metallpartikel bleiben bis zum Ölwechsel in der Schwebel. Um die Lebensdauer der Triebwerkskomponenten zu steigern, ist beim Ölwechsel eine Öldiagnose ähnlich einem Bluttest durchzuführen, bei der kleinste Verschleißmetalle nachgewiesen werden können, um mit der gewonnenen Information das verschleißte Bauteil rechtzeitig auszutauschen und ggf. die Wartungsintervalle anzupassen (Kaisan 2019).

In den neuesten Triebwerken sind Sensoren eingebaut, die mithilfe eines induktiven Messverfahrens die vorkommenden Abriebpartikel im Ölstrom nach Größe und Art über die Zeit aufzeichnen. Die Daten ermöglichen eine Darstellung einer Tendenz über die Menge der Abriebpartikel im Ölkreislauf. Kommt es zu einer abrupten Abweichung vom Trend (Bild 3.5), kann diese Tatsache einen Hinweis auf eine schnellfortschreitende Erosion geben und eine außerplanmäßige Wartung veranlassen (Linke 2014).

**Bild 3.5** Oil Debris Monitor (Muir 1996)

3.3 Metallische Kontamination der Zapfluft

Das Zapfluftsystem versorgt das Flugzeug über die Triebwerke mit komprimierter heißer Außenluft. Die Zapfluft wird anschließend über die Klimaanlage als Atemluft in die Kabine geleitet. Außerdem wird sie für die Beheizung der Flügelvorderkante und für die Druckbeaufschlagung des Wassertanks genutzt. Am Beispiel des CFM56-Triebwerk (Bild 3.6) wird das Zapfluftsystem erläutert. Das Triebwerk besitzt jeweils eine Hochdruck- und eine Niederdruckwelle, welche mit den Kompressoren und Turbinenstufen auf fünf Lagern angeordnet sind. Die vorderen beiden Lager befinden sich im Bereich des Fans und Boosters, das dritte und vierte Lager im Bereich der Hochdruckturbinen und das hintere Lager im Bereich der Niederdruckturbinen. Damit in erster Linie kein Öl aus dem Lagersumpf entweicht, sorgt das Entlüftungssystem im Ölsystem für die Absaugung der unerwünschten Luft aus dem Sumpf. Dadurch nimmt der Druck im Lager ab, wodurch eine große Druckdifferenz zum Lagergehäuse entsteht. Dieses Druckgefälle sorgt für eine hohe Dichtwirkung (Linke 2014, Scholz 2018).

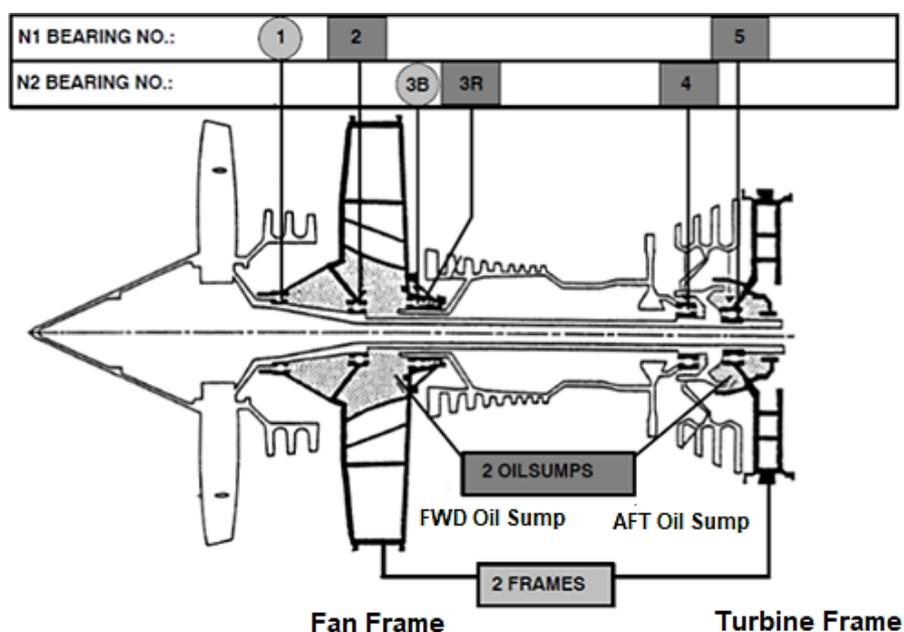


Bild 3.6 Position der Lager im CFM56 – Triebwerk (Lufthansa 1999)

Die Entnahme der komprimierten Zapfluft erfolgt aus der 5. beziehungsweise 9. Stufe des Hochdruckverdichters und wird durch das Hochdruckabsperrentil gesteuert. Bei niedriger Drehzahl wird die Zapfluft automatisch aus der hinteren Stufe (Hochdruckanschluss) entnommen, weil der Druck an dieser Stelle am höchsten ist und bei höheren Drehzahlen aus der 5. Stufe (Mitteldruckanschluss), da hier ein ausreichender Druck vorliegt, weswegen die Entnahme aus der letzten Stufe gestoppt wird (Voth 2018).

Als nächstes wird die abgezapfte Luft über die Abluftleitung (Bild 3.7) zum Überdruckventil befördert, wo der Druck auf 3 bar geregelt wird. Danach passiert die komprimierte Luft den Vorkühler und wird von 500 °C auf 180 °C abgekühlt. Die komprimierte, gekühlte Zapfluft wird an die Klimapacks und zum Bedruckungssystem des Wassertanks geleitet. Zur Tempera-

turregelung in der Kabine wird die Zapfluft mit der Zuluft vermischt und schließlich in die Kabine geleitet (Linke 2014).

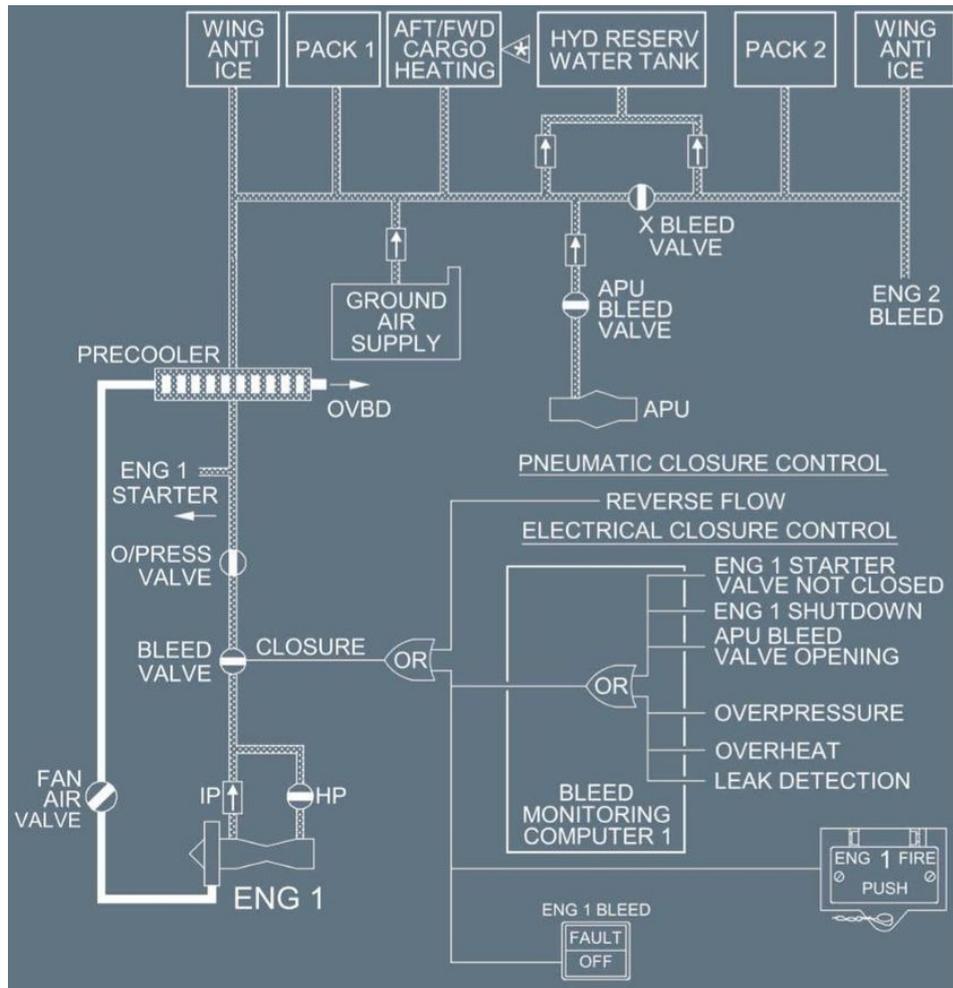


Bild 3.7 Zapfluftsystem (Airbus 320 Theory 2016)

Im Bild 3.1 war bereits zu sehen, dass der Lagersumpf und die Luftkammer jeweils durch zwei Labyrinthdichtungen fast vollständig abgedichtet sind. Die Öldüse am Lager mit ihrer kleinen Austrittsfläche und die hohe Geschwindigkeit der Welle lassen die feinen Öltröpfchen zerstäuben und verwirbeln, wodurch ein sogenannter Ölnebel entsteht.

Wie aus dem Bild 3.8 ersichtlich ist, ist die Spalte zwischen dem Stator und dem Rotor für den Luftvolumenstrom ziemlich entscheidend. In dem Abschnitt A ist die Durchdringungsfläche sehr klein, wodurch der Luftstrom beschleunigt wird und es im Bereich der Flanken zu einem kurzzeitigen Druckabfall kommt. Trotz ausgeklügelter Technik und großer Sorgfalt ist es nicht unüblich, dass geringe Ölmengen als Leakagestrom entgegengesetzt der Sperrluftstromrichtung über die Luftleitung in den Verdichter gelangen (Linke 2014). Das austretende Öl besitzt neben gefährlichen Zusatzstoffen wie z.B. TCP auch giftige Metall-Nanopartikel, die zusätzlich durch die Abtragung von Komponentenmaterial im Bereich des Triebwerks entstanden sind. Auch die APU, als alternative Druckluftquelle, die in Bezug auf Lager und Dichtungen so ähnlich aufgebaut ist wie das Triebwerk, befördert auf gleicher Weise kontaminierte Zapfluft (Scholz 2021b).

Nach Scholz 2018 gelangt etwa 2 % des Ölverbrauchs durch die Dichtungen in den Verdichter, wo es mit der heißen, komprimierten Verdichterluft zu einem zündfähigen Gemisch reagiert, die die Oberflächen angreift und anschließend in das Pneumatiksystem gelangt. Kurz vor der Bedruckung des Wassertanks wird die Zapflut durch einen Luftfilter grob gefiltert, wobei feine Metallpartikel ihn ungehindert passieren können. Es wurde beobachtet, dass das Trinkwasser in der Lavatory einer kommerziellen Flugmaschine (A320) visuell verunreinigt ist, weswegen es nicht unwahrscheinlich ist, dass feine Metallpartikel durch die Zapflut in das Trinkwasser gelangen (Scholz 2018).

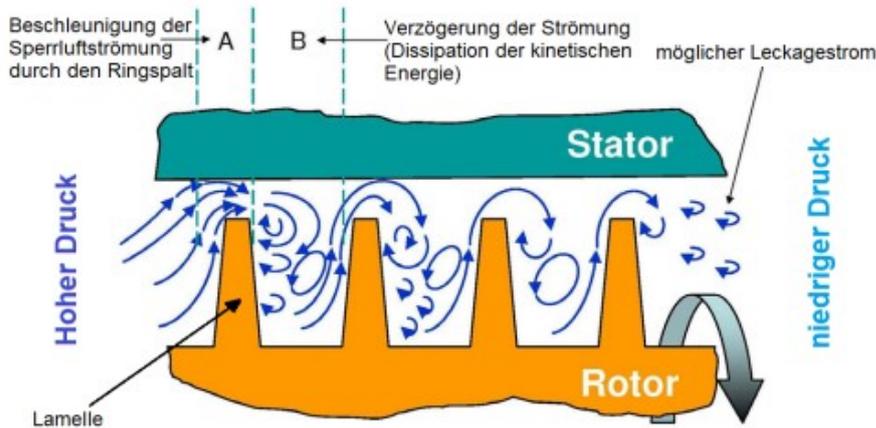


Bild 3.8 Labyrinthdichtung (Michaelis 2016 und Voth 2018)

Gatti hat im Rahmen umfangreicher Untersuchungen im Schmieröl, in den Hepafiltern und in der Kabinenluft eine Reihe von nervenschädigenden Metallen nachgewiesen. Dabei handelt es sich häufiger um Titan, Aluminium und Eisen, die in Kohlenstoffresten eingehüllt sind (Scholz 2020). Ein möglicher naheliegender Grund für das erhöhte Auftreten von Titan sind der Fan und die Rotoren des Hochdruckverdichters, die genau aus diesem Material bestehen (Bild 3.9) und aufgrund der hohen mechanischen Bewegungen und des geringen Abstands zur Innenwand mit der Zeit ebenfalls verschleifen.

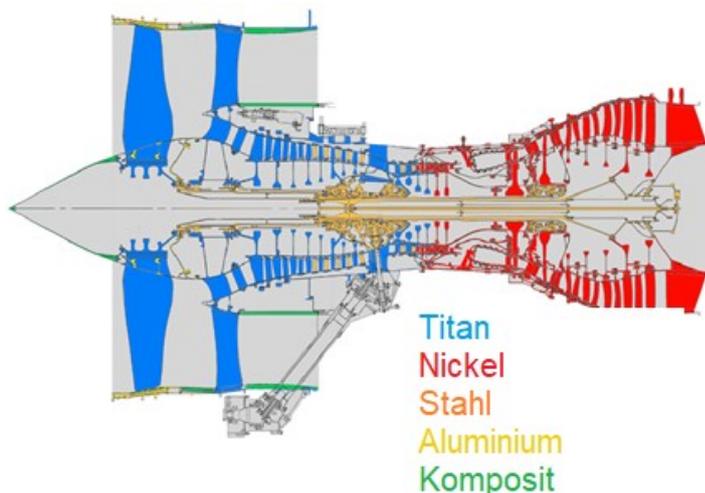


Bild 3.9 Materialzusammensetzung eines Triebwerks (nach Husband 2007)

In Bild 3.10 ist ein Durchflussbegrenzer aus dem Zapfluftsystem zu sehen, der fein glänzende Partikel aufgehalten hat. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um metallische Partikel aus dem Triebwerk. Dies ist ein weiterer Indiz dafür, dass die Zapfluft verschieden große Metallpartikel durch das Pneumatiksystem befördert.



Bild 3.10 Durchflussbegrenzer (Hansen 2019)

In Bild 3.11 sind vereinzelte Strömungen an den Oberflächen, der Flugzeugzelle und am Boden zu sehen, die kurz unter dem Einlass des Triebwerks zu zwei starken Wirbeln fusionieren. Diese sind in der Lage, Verunreinigungen aus der näheren Umgebung in das Triebwerk zu saugen, wodurch aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Partikel ebenfalls Schäden am Verdichter auftreten können. Auch hier besteht die Möglichkeit, dass die abgestoßenen Partikel schließlich in das Pneumatiksystem gelangen und die Zapfluft metallisch belasten.

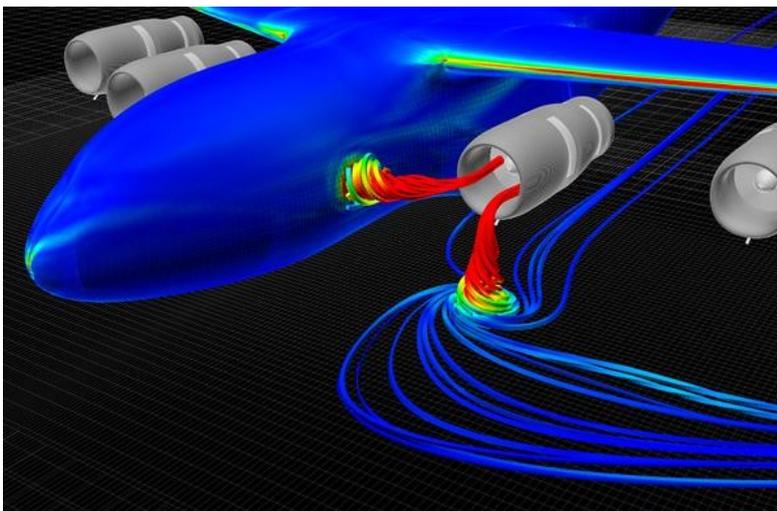
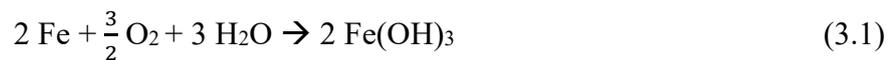


Bild 3.11 Wirbel, Engl. Ground vortex (StackExchange 2015)

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass metallisch verunreinigte Zapfluft auch die Kabinenluft und das Trinkwasser belasten kann. Daher wurde im nächsten Abschnitt eine Filterkartusche aus dem Trinkwassersystem einer Boeing B747-8 bei einer Routinewartung labortechnisch auf die Anwesenheit von Metallen untersucht.

3.4 Metallische Kontamination anhand einer Filterkartusche

Auf der Grundlage einer kontaminierten Wasserfilterkartusche aus dem Trinkwassersystem einer Boeing 747-8, bei der während einer Routineuntersuchung eine Undichtigkeit im Trinkwassersystem entdeckt wurde, soll im Folgenden die metallische Verunreinigung des Trinkwassers in Flugzeugwassersystemen untersucht werden. Anhand des Bildes 3.12 ist klar erkenntlich, dass sich auf der Mantelfläche der Filterkartusche Korrosionsprodukte abgelagert haben. Bei näherer Betrachtung ist ein metallisches Gefüge zu entdecken, das sich aus verschiedenen kristallinen Körnern zusammensetzt. Im Zuge einer spektroskopischen Laboruntersuchung konnten die Bestandteile des Mikrogefüges ermittelt werden. Rostfreie Edelstahlrohre sind immer ein Gemenge aus verschiedenen Legierungselementen und dem Grundwerkstoff Eisen. Die erhöhte Eisen- und Chromkonzentration (Bild 3.13) ist ein Indiz dafür, dass sich die Chromoxidschicht an der Innenwand der Trinkwasserleitungen und des Tankes gelöst hat und das Eisen mit Sauerstoff und Wasser zu einem rostbraunen Eisen(III)-hydroxid (Gl. 3.1) reagiert ist, das sich folglich als eine braune Schicht auf der Oberfläche des Filters abgelagert. Bei der Abgabe eines Wassermoleküls entsteht dabei ein Eisen(III)-hydroxidoxid (Gl. 3.2), welches sich ebenfalls auf der Mantelfläche niederlässt (Wikipedia 2021f).



Weiterhin können auch Eisenoxide in Leitungsabschnitten gebildet werden (Gl. 3.3, Gl. 3.4):

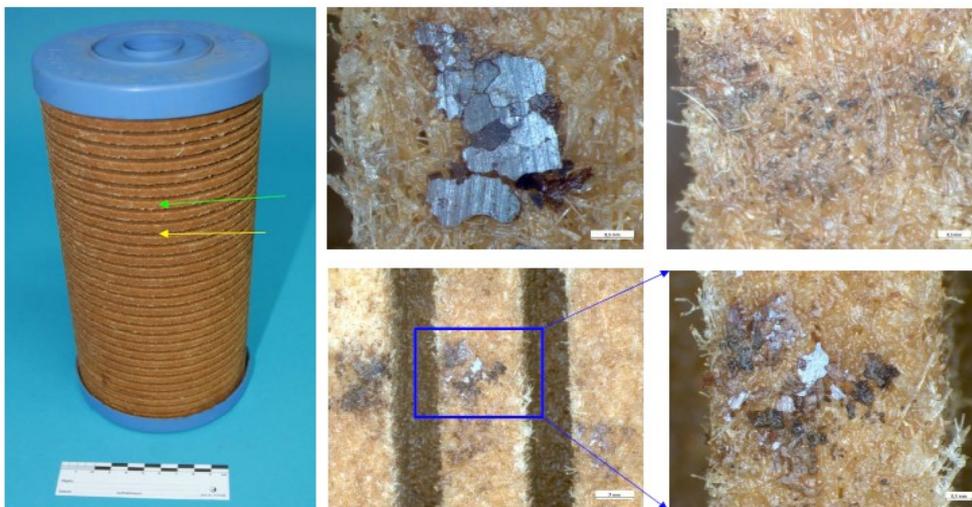
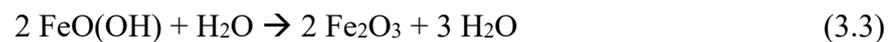


Bild 3.12 Kontaminierte Wasserfilterkartusche (LHT 2020)

Die Ursachen für die Beschädigung der Passivschicht und dem Materialverlust können verschiedene Begleitstoffe des Leitungswassers sein. Das Labor der Lufthansa Technik hat aus einer entnommenen Probe aus der Filtereinrichtung verschiedene Mineralsalze nachgewiesen, die vor allem Calcium, Chlor, Schwefel und Natrium als Element enthalten (LHT 2020).

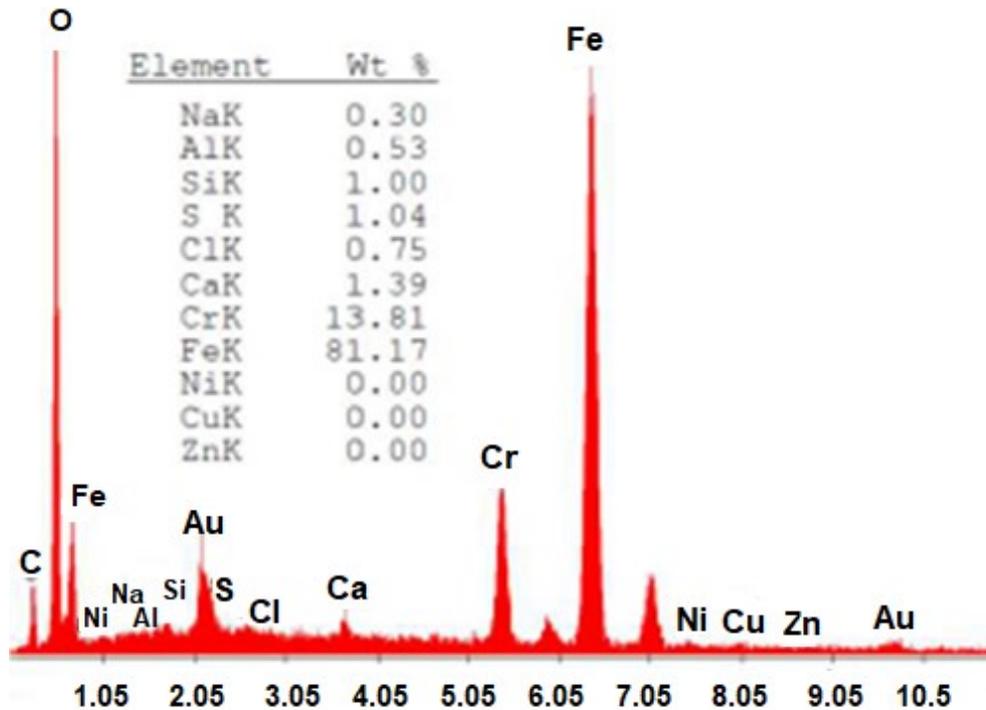


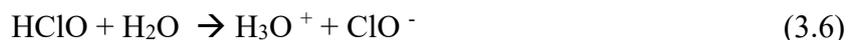
Bild 3.13 Spektroskopische Untersuchung eines Metallgefüges (LHT 2020)

Das in der Analyse gefundene Chlor wird größtenteils aus dem im Wasser vorhandenen Chlorid stammen, welches die Passivschicht angreift. Das Chlor liegt unter Normalbedingungen als zweiatomiges Molekül (Cl_2) vor und wird generell im Rahmen der Wasseraufbereitung in das Trinkwasser beigemischt, um es zu desinfizieren. Im Folgenden soll anhand der Gleichungen 3.5 ... 3.7 die Entstehung von Chloridionen erklärt werden (Wikipedia 2021h).

Bei der Einleitung von Chlor in das Trinkwasser entsteht eine hypochlorige Säure und eine Salzsäure (Gl. 3.5):



Die hypochlorige Säure dissoziiert zu einem Oxonium-Kation und Hypochlorit-Anion ClO^- (Gl. 3.6):



Die Salzsäure kann unter der Reaktion mit dem Wasser zu einem Oxonium-Kation und Chloridion reagieren (Gl. 3.7):



Das hierbei entstandene Chloridion ist einfach negativ geladen und kann aufgrund voller Elektronenschale keine weiteren Elektronen mehr aufnehmen. Im Fachjargon spricht man in diesem Fall von einer Edelgaskonfiguration. Da für eine Oxidation neben dem Elektronendonator, in diesem Fall Eisen, ein Elektronenakzeptor benötigt wird, fällt Chlorid als Oxidationsmittel weg. Dennoch kann es die Korrosionsparameter positiv beeinflussen, sodass die Oxidation besser verläuft. Loss 2015 führt folgende Korrosionsparameter ein:

- *Leitfähigkeit des Korrosionsmediums*
- *Gehalt an gelösten Gasen im Korrosionsmedium*
- *Bildung von mehr oder weniger löslichen Metallsalze*
- *Störung von Passiv – oder Deckschichten*
- *Stabilisierung von Konzentrationselementen*

Vor allem eine hohe Konzentration von Chloridionen kann die Chromoxidschicht dermaßen stören, sodass die darunter liegende Eisenschicht stark korrosiv angreifbar ist und oxidieren kann. Aus der Lochkorrosion (Bild 3.14) kann sich binnen kurzer Zeit eine Spannungskorrosion (Bild 3.15) entfalten, die sich entlang der Korngrenzen des Gefüges bewegt (Song 2017).

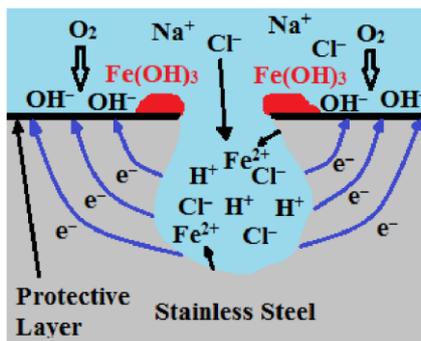


Bild 3.14 Lochkorrosion (Nazari 2018)

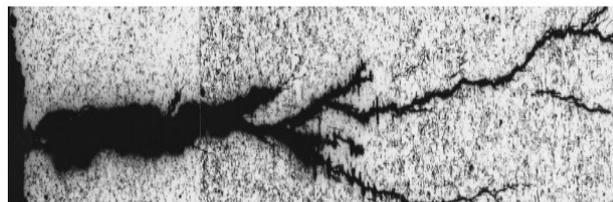


Bild 3.15 Spannungskorrosion (Loss 2015)

Eine andere mögliche Form der Korrosion ist die Biokorrosion, die durch die bakterielle Sulfatreduktion unter vollständigem Ausschluss von Sauerstoff stattfindet. Die Anwesenheit von gelösten Sulfaten SO_4^{2-} (Schwefelverbindung) und Sulfat-reduzierenden Bakterien können die dünne, schützende Schicht aus Wasserstoff, welche sich auf den zweiwertigen Eisenionen abgelagert hat, oxidieren lassen. Dabei entsteht Wasser, Hydroxidionen und Hydrogensulfidionen (Wikipedia 2021i):



Diese Hydrogensulfidionen HS^- können mit den Eisenanionen Fe^{2+} zu Eisen(II)sulfid FeS reagieren Gl (3.9), welches sich als schwarzer Fleck an den Innenwänden von Wasserleitungen erkennbar macht.



Die weiteren Begleitstoffe wie Natrium und Calcium treten als gelöste Mineralstoffe auf und haben keinen negativen Einfluss auf den Edelstahl.

In den vorherigen Unterkapiteln wurde bereits erklärt, dass die Außenluft im Verdichter des Triebwerks sowohl durch den Ölnebel aus den Dichtungen als auch durch metallischen Abrieb aus den rotierenden Bauteilen belastet werden kann. Ein Luftfilter vor der Bedruckung des Wassertanks sorgt allerdings dafür, dass die hierfür verwendete Zapfluft grob gefiltert wird. Doch kleinste Nanopartikel aus dem Pneumatiksystem könnten diesen Luftfilter passieren. Aber aufgrund der Tatsache, dass für die Bedruckung wenig Zapfluft benötigt wird und das Laborergebnis für die Filterkartusche in diesem Fall Metalle in geringen und ungefährlichen Mengen aufweist, müssen erst weitere Untersuchungen veranlasst werden, um die Situation klar und sicher einzuschätzen.

Ein möglicher Grund für eine dermaßen stark verunreinigte Filtereinrichtung könnte das Trinkwasser am jeweiligen Heimatflughafen sein, welches durch ineffiziente Meerentsalzungsanlagen (Podbregar 2019) gewonnen wird. Es ist denkbar, dass das chlorbelastete Trinkwasser für eine starke Oxidation gesorgt hat.

3.5 Metallische Kontamination des Leitungswassers

Wasser, welches durch Leitungen befördert wird, wird als Leitungswasser bezeichnet und unterliegt gleichzeitig der TrinkwV, weswegen es auch als Trinkwasser betitelt werden kann. Das Umweltbundesamt veröffentlicht alle drei Jahre einen Bericht über die Trinkwasserqualität in Deutschland, in dem das Wasser aus jenen Wasserversorgungsgebieten untersucht wird, welche durchschnittlich mehr als 1000 m³ Trinkwasser befördern oder mehr als 5000 Kunden damit versorgen. Insgesamt wurden aus 2485 Trinkwasserversorgungsgebieten, die für 73,1 Millionen Menschen das Trinkwasser bereitstellen, Proben entnommen. In der Tabelle 3.4 sind die metallischen Überwachungsparameter mit der Anzahl der Wasserversorgungsgebiete (WVG) aufgelistet, die den entsprechenden Grenzwert nicht einhalten konnten (UBA 2021).

Tabelle 3.4 Nichteinhaltung der metallischen Parameter 2019 (UBA 2021)

Parameter	Aluminium	Ammonium	Antimon	Arsen	Blei	Bor	Cadmium	Chrom	Eisen	Kupfer	Mangan	Natrium	Nickel	Quecksilber	Selen	Uran
Anzahl der WVG	37	37	48	46	39	46	47	39	20	46	24	28	26	42	49	46

Die größte Gefährdung einer metallischen Kontamination geht immer vom Zustand des Leitungssystems und dem verwendeten Material der Rohrleitungen aus. Vor 1945 wurden beispielsweise in den Gebäuden häufig Bleirohre verbaut, die bis heute in einigen alten Häusern noch zu finden sind. Darüber hinaus können sich Stoffe wie Selen durch agrarwirtschaftliche Maßnahmen aus dem Boden lösen und dann in den Wasserkreislauf eindringen. Die prozentuale Verteilung der Nichteinhaltung von metallischen Kennwerten im Trinkwasser in Deutsch-

land sind im Bild 3.16 dargestellt. Herausgeber ist das Umweltbundesamt (UBA). In mehr als 98 % der Wasserversorgungsgebieten (WVG) in Deutschland befinden sich die metallischen Parameter unter dem Grenzwert.

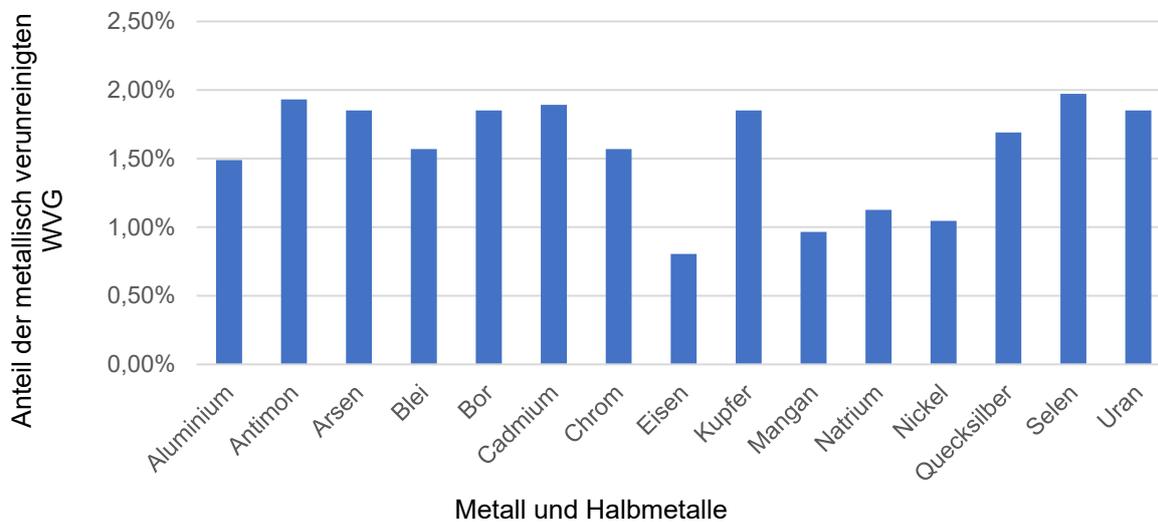


Bild 3.16 Abweichungen der metallischen Parameter im Trinkwasser (nach UBA 2021)

Nachfolgend werden die Untersuchungsberichte der Länder USA und Indien hinsichtlich der metallischen Kontamination des Trinkwassers vorgestellt. In den USA ist verunreinigtes Trinkwasser bis heute eines der größten Umweltprobleme überhaupt. Die Wasserinfrastruktur befindet sich gegenwärtig in einem veralteten und somit schlechten Zustand. Tatsächlich werden derzeit mehrere Millionen US-Bürger mit Leitungswasser versorgt, welches durch Bleirohre geleitet wird. Daher ist ein Austausch aller Bleirohre schlichtweg unumgänglich, sodass durch ein von dem neuen US-amerikanischen Präsidenten Joe Biden (2021) erlassenes Hilfspaket in Höhe von 1,2 Billionen USD unter anderem das Wassernetz auf den aktuellen Stand der Technik bringen soll (Ridderbush 2021).

Im Interesse der Verbraucher hat der gemeinnützige Verein "Consumer Reports" gleichzusetzen mit der deutschen Verbraucherzentrale, im Rahmen einer großangelegten Trinkwasseruntersuchung von 120 zufällig ausgewählten Haushalten eine Trinkwasserprobe entnommen und sie anschließend auf die Anwesenheit der Schwermetalle Arsen und Blei (Bild 3.17) untersucht (Felton 2021).

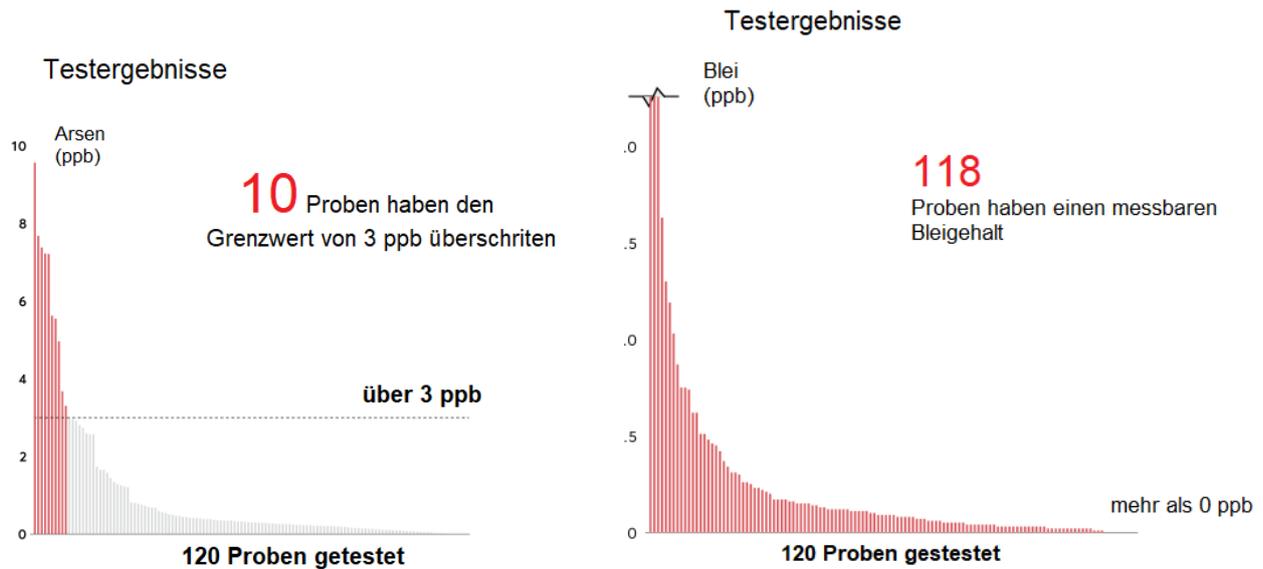


Bild 3.17 Metallische Kontamination des Leitungswassers in den USA (nach Felton 2021)

In jeder achten Probe war ein messbarer Arsengehalt vorhanden und zehn der Proben haben den empfohlenen Grenzwert von 3 ppb überschritten, was etwa 8 % aller Proben ausmacht und den Prozentwert aus Deutschland mit 1,57 % um das 5-fache übersteigt (Felton 2021).

Während in Deutschland und an einigen Orten der USA das Leitungswasser für häusliche und hygienische Zwecke bedenkenlos verwendet werden kann, ist das Leitungswasser in Indien oft nicht trinkbar, da die Ästhetik des Wassers schon einen gelb-schwarzen Farbton aufweist. Dies deutet daraufhin, dass das Leitungswasser mit verschiedenen gefährlichen Schadstoffen kontaminiert ist. Des Weiteren ist es noch üblich, dass vielerorts das Leitungswasser nur für drei Stunden freigegeben wird. Um die Folgen der Stagnation auszugleichen, wird das Wasser erst einmal für eine lange Zeit laufen gelassen, um danach eine tolerierbare Trinkwasserqualität zu erhalten. In dem Bundesstaat Assam wurde im Distrikt Kamrup an 44 zufälligen Stellen eine Wasserprobe entnommen und die Konzentration von Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Mangan und Zink bestimmt (Tabelle 3.5) (Chakrabarty 2010).

Tabelle 3.5 Kontamination des Leitungswassers in Indien (Chakrabarty 2010)

Parameter	Mittelwert [ppm]	Maximum [ppm]
Arsen	6,725	33,39
Blei	0,027	0,2
Cadmium	0,025	0,42
Kupfer	0,01	0,18
Mangan	0,17	1,25
Zink	0,101	1,328

84 % aller Proben zeigten einen hohen Gehalt an Cadmium. Außerdem überschritten ein Drittel der Proben den indischen Grenzwert von Blei: 0,015 ppm. Etwa mehr als die Hälfte der Proben hatten eine zu hohe Mangankonzentration (Grenzwert: 0,05 ppm). Diese hohen Werte ergeben sich aufgrund der hohen Umweltbelastung in Indien. Nicht selten kommt es zu illega-

len Entsorgungen von Industriemüll, welcher hohe Mengen an Cadmium und Blei besitzt. Dieser Müll wird auch als Dünger an die Bauern verkauft, wodurch das Grundwasser stark kontaminiert wird. Zudem ist die Wasserinfrastruktur sehr schlecht und noch heute werden vielerorts Bleirohre genutzt. Darüber hinaus ist es nicht unüblich, dass das natürliche Arsen durch den Menschen aus den Gesteinen gelöst wird und dann in einer sehr hohen Konzentration in das Grundwasser gelangt. Hier wird deutlich, dass der falsche Umgang mit Ressourcen das wertvollste Gut, das Trinkwasser, schwer belasten kann (Chakrabarty 2010).

Genau diese Analysen der einzelnen Trinkwasserressourcen in verschiedenen Ländern bietet insbesondere den Fluggesellschaften eine grobe Empfehlung darüber, an welchem Flughafen sie in Zukunft kein Trinkwasser aufnehmen sollten.

3.6 Metallische Kontamination in Wassertankfahrzeugen

In diesem Abschnitt soll geklärt werden, ob das Trinkwasser während des Transports in den Behältern von Wassertankfahrzeugen metallisch verunreinigt werden kann. Generell bestehen die Wasseraufbewahrungsbehälter aus blankem rostfreiem Edelstahl. Das Wort "rostfrei" ist im wortwörtlichen Sinne nicht korrekt, da das Material auch unter ungünstigen Bedingungen korrodieren kann und deshalb das Attribut "rostträge" den Edelstahl präziser charakterisiert. Rostträge Edelstähle werden aus verschiedenen Legierungselementen hergestellt. Eines der wichtigsten Beimischungen neben dem Grundwerkstoff Eisen ist Chrom (Bild 3.18). Es sorgt bei einem Mindestanteil von $\geq 10,5\%$ für einen optimalen Korrosionsschutz. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Edelstahls ist Kohlenstoff, der das Material härtet. Um eine inkristalline Korrosion durch den beigesetzten Kohlenstoff nach dem Schweißen zu unterbinden, wird dem Mischmetall Titan oder Niob hinzugefügt. Fügt man darüber hinaus noch die Legierungsmetalle Nickel und Molybdän hinzu, so wird die Oxidationswirkung verstärkt (Wikipedia 2021g).

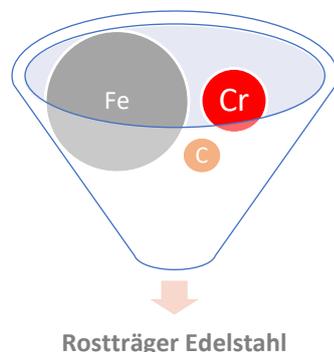


Bild 3.18 Hauptbestandteile eines Edelstahles

Die Korrosionsbeständigkeit von Edelstahl basiert auf einer sehr feinen, festhaftenden Chromoxidschicht, die sich bildet, wenn das Material mit dem Sauerstoff in Berührung kommt. Diese Passivschicht schützt den Grundwerkstoff vor jeglichen chemischen und physikalischen

Angriffen. Ungünstige Bedingungen wie ein zu hoher Chlorgehalt von mehr als 50 mg/l im Kaltwasser können die Oberfläche angreifen, die sich allerdings wieder selbst heilt (Bild 3.19) und weiterhin einen gewissen Schutz bietet (Wikipedia 2021f).

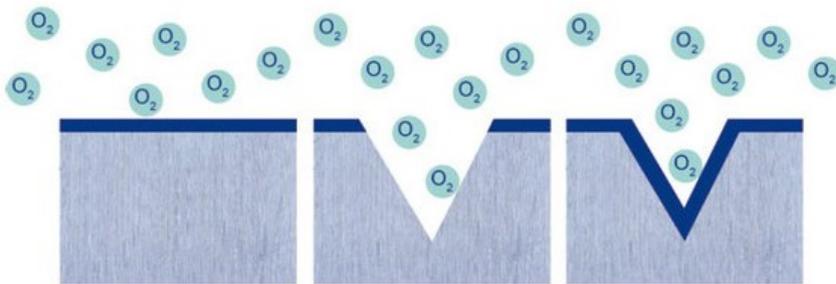


Bild 3.19 Selbstheilung der beschädigten Passivschicht (Schweissfachhandel24 2021)

In der folgenden Tabelle 3.6 ist eine Reihe von rostträgen Edeltählen aufgelistet, die für den Transport von Trinkwasser geeignet sind. Diese wiederum sind unterteilt in Ferrite und Austenite der Form V2A (CrNi-Stähle) und V4A (CrNiMo-Stähle) (ISER 2007).

Tabelle 3.6 Rostträge Edeltähle in der Wasserwirtschaft (ISER 2007)

Stahlgruppe	EN Kurzname	EN Werkst.-Nr.	Hauptlegierungsbestandteile in % (Mittelwert)			
			Cr	Ni	Mo	Andere
Ferrite	X3CrTi17	1.4510	17			Ti
	X3CrNb17	1.4511	17			Nb
	X2CrMoTi18-2	1.4521	18,5		2,15	Ti
Austenite (V2A)	X5CrNi18-10	1.4301	18,5	9,25		N
	X2CrNi18-9	1.4307	18,5	9,25		N
	X5CrNi19-11	1.4306	19	11		N
	X6CrNi18-10	1.4541	18	10,5		N
Austenite (V4A)	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	17,5	11,5	2,25	N
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	17,5	11,5	2,25	N
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	17,5	10,5	2,25	Ti
	X2CrNiMo 18-14-3	1.4435	18	13,75	0,03	N

Meine Recherchen zufolge besteht der Wassertank von Tankfahrzeugen (Bild 3.20) oft aus austenitischen Stählen mit der EN-Nummer 1.4301 und 1.4401. Optisch sind die beiden Werkstoffe voneinander nicht zu unterscheiden. Wie aus der Tabelle 3.6 zu entnehmen ist, enthält das zweite Metall noch Molybdän als Legierungselement, wodurch der Korrosionswiderstand, vor allem gegenüber Chloriden, deutlich verbessert wird. Gemäß EN 12502-4 ist die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Korrosion bei rostträgen Edeltählen niedrig. Eine metallische Kontamination durch den Einsatz von rostträgen Edeltählen für den Trinkwassertank ist somit sehr unwahrscheinlich, da durch die Zusammensetzung von verschiedenen Legierungen eine sichere Barriere zwischen Metall und Trinkwasser gegeben ist (ISER 2007).



Bild 3.20 Wassertank aus EN 1.4401 (Vestergaard 2021)

4 Chemische Kontamination des Trinkwassers

Die Bedruckung des Trinkwassersystems erfolgt üblicherweise mit Außenluft. In Reiseflughöhe saugen die leistungsstarken Flugzeugtriebwerke (Bild 4.1) Luft aus der Umgebung ein und komprimieren sie im eigenen Verdichter, bevor sie in die Brennkammer gelangt. Danach passiert die komprimierte Luft über die Turbine wieder in die Atmosphäre. Ein Teil der Luft aus dem Hauptstrom (core flow) wird innerhalb des Triebwerkes als sogenannte Zapfluft (bleed air) entnommen und als Kabinen- und Druckluft umfunktioniert, um beispielsweise Druck auf das Trinkwassersystem zu beaufschlagen (Scholz 2014a).

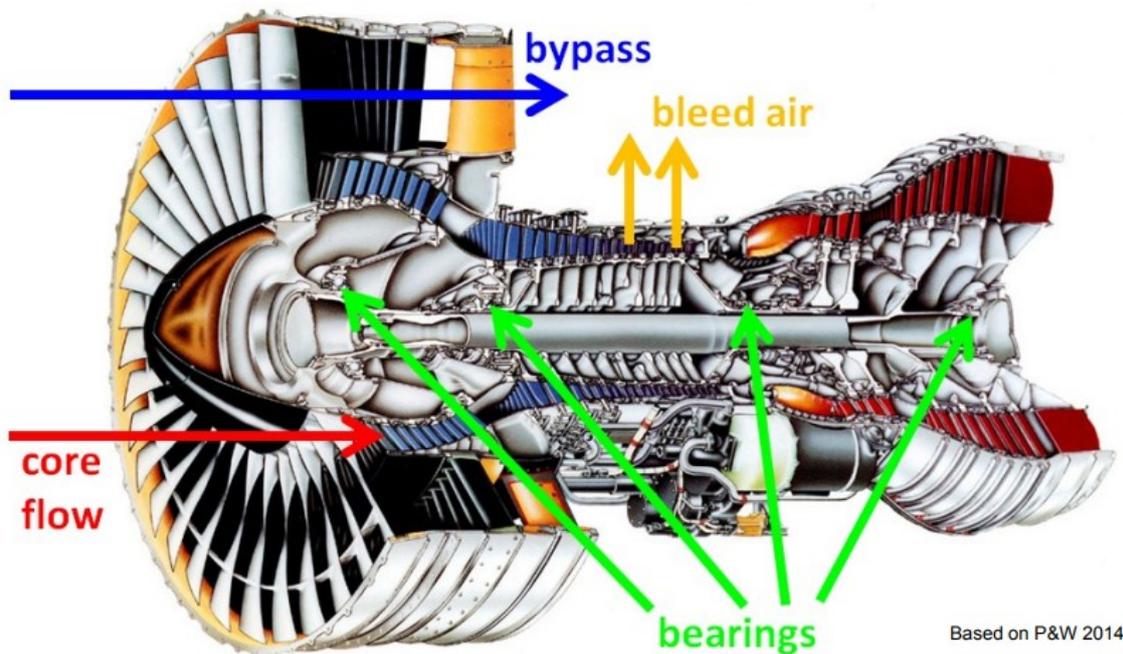


Bild 4.1 Querschnitt eines Triebwerks (P&W 2014)

Bei diesem Vorgang kommt es nicht selten vor, dass geringe Ölmengen aus den berührungslosen Labyrinthdichtungen (bearings) austreten und schließlich im Verdichter bei hohen Temperaturen von etwa 400 °C pyrolysieren. Dieser Effekt kann durch Verschleiß zusätzlich verstärkt werden. Das austretende Öl besitzt neben organischen Verbindungen (VOC) und ultrafeinen Partikeln (UFP) meist hoch gesundheitlich bedenkliche Additive, wozu Trikre-sylphosphat (TCP) dazugehört, das besonders in isomeren Formen als hoch toxisch eingestuft wird. Weitere 127 Stoffe (VOC) wurden in einer Studie der Europäische Agentur für Flugsicherheit EASA schriftlich festgehalten. Das verbrannte Öl gelangt mit der heißen, komprimierten Luft zum Teil über die Zapfluftentnahmeöffnungen in das Pneumatiksystem, in der es auf dem Weg in die Kabine und das Trinkwassersystem offensichtliche Spuren hinterlässt. Es gibt bisher einen gemeldeten Fall, bei dem das Trinkwasser in der Bordtoilette einer A320 schwarz gefärbt gewesen ist, was ein Indiz für eine Ölverschmutzung sein kann. Ursächlich für die konstruktionsbedingten Leckagen sind vor allem die undichten Labyrinthdichtungen, die durch einen kleinen Spalt das Hinausströmen von Ölnebel nicht verhindern können. Dies

geschieht immer dann, wenn der Druck im Kompressor geringer ist als der im Ölsystem, denn dann wird das Öl nicht am Ausfließen gehindert (Scholz 2021a, EASA 2017).

Die Schadstoffe in der Zapfluft können über einen Wasserfilter und ein Rückschlagventil ungehindert in das Trinkwassersystem (Bild 4.2) gelangen. Bei dem Filter handelt es sich um eine Filterkerze, die Partikel in der Größenordnung zwischen $1\ \mu\text{m}$... $25\ \mu\text{m}$ aufhalten kann. Daher können gängige Schadstoffe der Größenordnung $100\ \text{nm}$ problemlos den eingebauten Wasserfilter passieren. Hilfreich sind in solchen Fällen VOC Filter, der die Schadstoffkonzentration um etwa $80\ \%$ reduzieren kann. Am besten wird dieser an der blau-markierten Stelle positioniert, um das Trinkwassersystem so weit wie möglich hygienisch sauber zu halten (Luftreinigerdepot 2021).

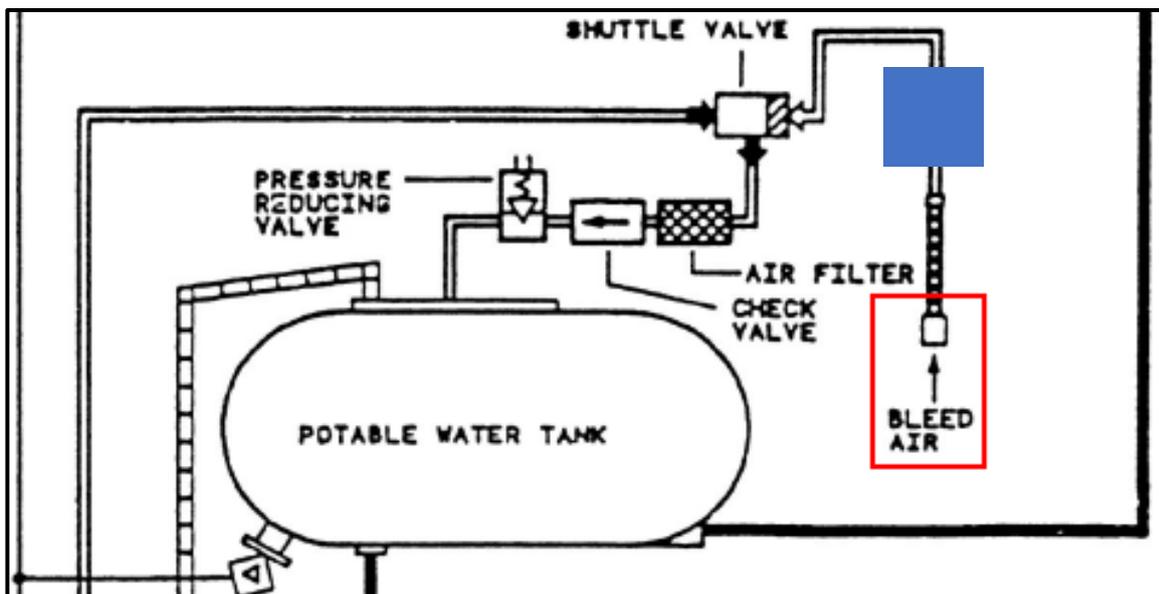


Bild 4.2 Trinkwasserbedruckungssystem (Scholz 2014a)

Im Bild 4.3 werden verschiedene Möglichkeiten skizziert, wie die Zapfluft bzw. das Trinkwasser chemisch kontaminiert werden kann. Hydraulikflüssigkeit, Enteisungsflüssigkeit, Öl und Kerosin können sich auf der Oberfläche des Flughafens befinden, die unter ungünstigen Umständen mit dem Triebwerk in das Pneumatiksystem aufgenommen werden können.

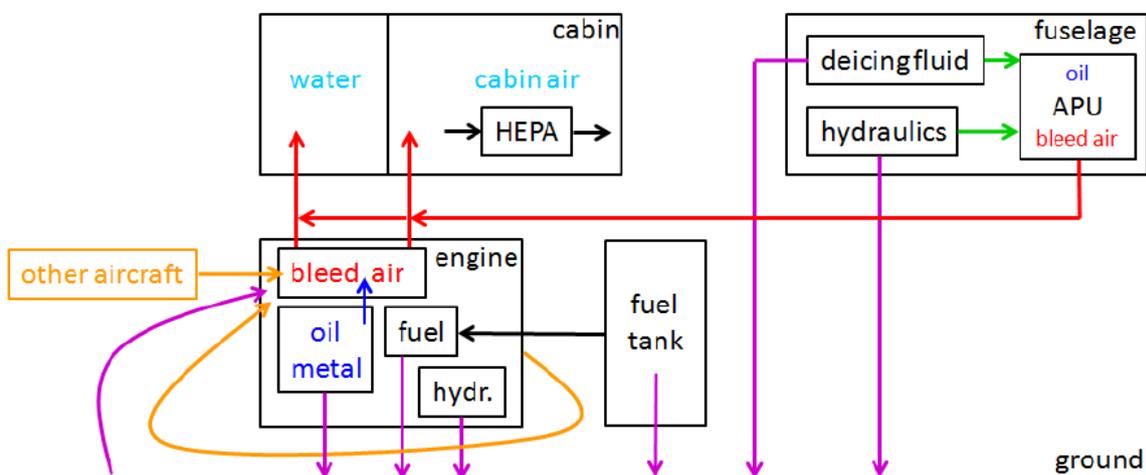


Bild 4.3 Wege der Verunreinigungen (Scholz 2021a)

Außerdem können auf dem Flughafengelände verschiedene Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffmonoxid (NO) von anderen Flugzeugen in das Triebwerk eingesaugt werden, die aufgrund ihrer ultrafeinen Dimension im Zuge der Bedruckung in das Trinkwassertank gelangen können. Im Bild 4.4 werden die einzelnen Emissionen den verschiedenen Flugphasen zugeordnet und dabei ist im unteren Diagramm deutlich zusehen, dass bis zum Abheben des Flugzeuges die Abgase konstant ansteigen. Weiterhin fällt auf, dass kohlenstoffhaltige Abgase vermehrt auf dem Flughafen abgegeben werden, während des Abflugs stickstoffhaltige Verbindungen in die Luft gepustet werden (Xu 2020). Deswegen sollten Flugzeuge vor allem im Startprozess genügend Abstand zueinander haben, damit nicht zu viele Abgase aufgenommen werden.

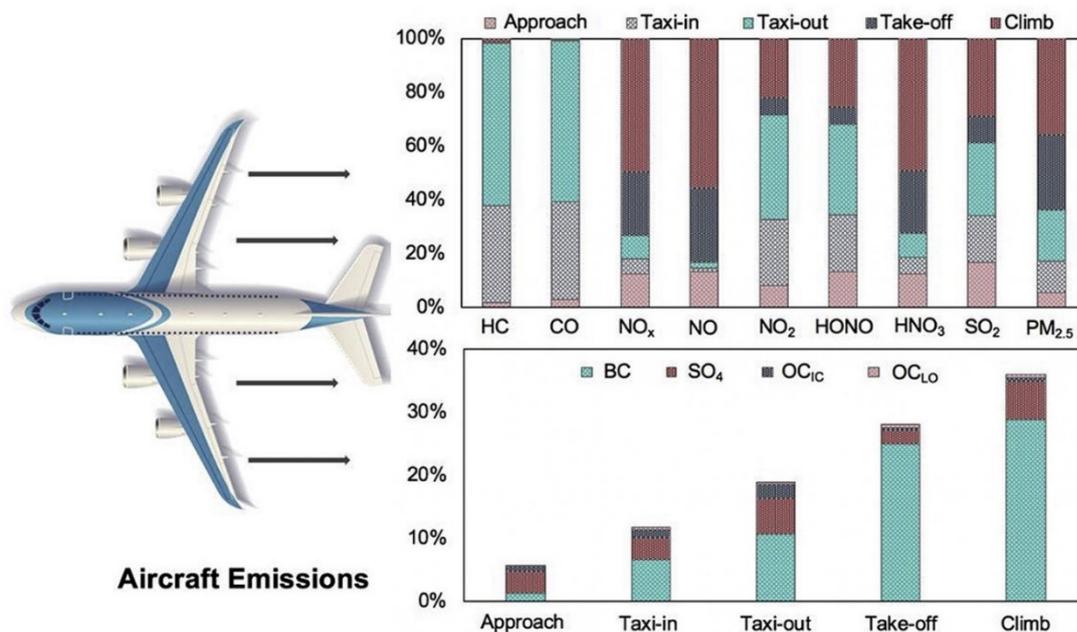


Bild 4.4 Flugzeugabgase (Xu 2020)

Im weiteren Verlauf werden visuelle Begutachtungen aus dem Pneumatiksystem aufgezeigt, die das Ausmaß der Verschmutzung durch Ölleckagen klar und unstrittig darstellen. Im Bild 4.5 sind an der Schnittstelle zwischen Triebwerk und Tragfläche die Kanäle für Zapf- und Gebläseluft zu sehen. Es ist klar erkennbar, dass die Innenfläche der Zapfluftleitung mit einem braunen Belag versehen ist, während die andere ziemlich sauber ist. Bei dem braunen Fleck handelt es sich vermutlich um Ölrückstände aus den Dichtungen (Scholz 2021a).

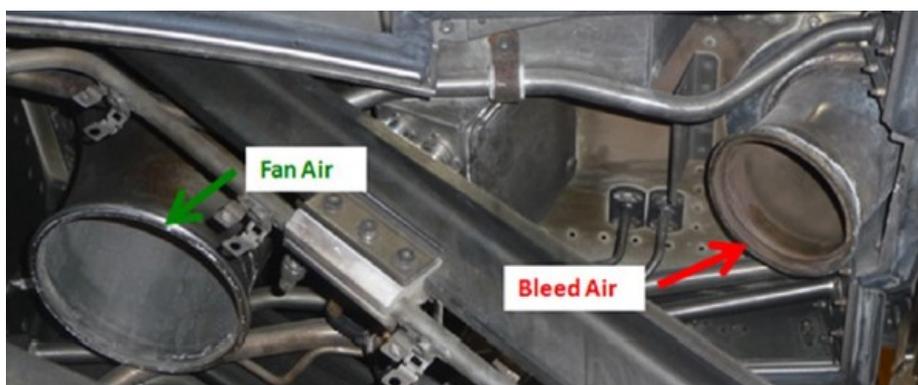


Bild 4.5 Schnittstelle Triebwerk und Tragfläche (Scholz 2021a)

Stromabwärts befindet sich ein Wasserextraktor (Bild 4.6), der hingegen nur einen schwarzen Belag aufweist. Der Grund für die Farbveränderung ist, dass das pyrolysierte Öl bei 400 °C eine braune Schicht an den Innenflächen verursacht und in diesem Fall, bei ca. 200 °C, eine schwarze Farbe annimmt (Scholz 2021a).



Bild 4.6 Wasserextraktor (Scholz 2021a)

Im Bild 4.7 sind zwei Luftkanäle aus einem Passagierflugzeug zu sehen. Links ist eine neue Leitung zu erkennen und rechts befindet sich eine schwarz-kontaminierte Leitung des Typs BAe 146, welche stromabwärts Luft an die Klimateinheiten befördert. Ab hier sollten alle Beweise ausreichend sein, um der akuten Problematik eine hohe Aufmerksamkeit zu widmen.



Bild 4.7 Luftkanälenvergleich (Scholz 2021a)

Die EASA schreibt gemäß CS-E 690b vor, dass die Zapfluft für die Belüftung als auch Bedruckung untersucht werden müssen. Inwiefern die Luftreinheit konkret überprüft wird, bleibt bisher unbekannt. Weiterhin hat die Luftfahrtbehörde nur für Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) maximale Konzentrationen definiert (CS 25.831b), die allerdings aufgrund der fehlenden Sensoren nicht gemessen werden können. Genau diese fehlende Sicherheit wird im gesamten Pneumatiksystem benötigt, um bei unüblichen Abweichungen präventive Maßnahme zu ergreifen, um Besatzung und Passagiere rechtzeitig und nachhaltig zu schützen. Daher sollte die Einbaupflicht laut CS-25.1309c auch konsequenter eingehalten werden (EASA 2017).

Ferner beinhaltet die TrinkwV klare und strenge Vorgaben, die im §6 "Chemischen Anforderungen" Absatz 1 festgehalten werden:

Im Trinkwasser dürfen chemische Stoffe nicht in Konzentrationen enthalten sein, die eine Schädigung der menschlichen Gesundheit besorgen lassen.

Im Klartext bedeutet dies, dass der lebenslange Konsum des Flugzeugtrinkwassers unter Beachtung der Grenzwerte keine Gefahr für die Gesundheit darstellen darf. Um dies zu garantieren, sind umfangreiche Wasseruntersuchungen als bisher notwendig.

Darüber hinaus kann sich im Laufe des Betriebs eines Triebwerks das Spiel der Dichtungen aufgrund von unterschiedlichen Kräften, wie beispielsweise Reibung und Vibrationen, vergrößern. Das führt dazu, dass der Ölverbrauch zunimmt und Leckagen vermehrt auftreten können. Das Bild 4.8 zeigt einen Zeitraum von 10 Jahren (2004 ... 2014), in der sich die Wartungspraxis eines CFM56-7B Triebwerks dahin geändert hat, dass sie nun etwa doppelt so lange an den Tragflächen verweilen, bis sie gewartet werden, wodurch ein schleichender Motorschaden zu spät bemerkt wird (Scholz 2019).



Bild 4.8 Triebwerkswartungsintervalle von 2004 ... 2014 (Aviation Week 2016)

Daher ist es ratsam, die Wartungsintervalle von Triebwerken zu verkürzen, um verschleißbedingtes Austreten von Öl rechtzeitig zu unterbinden. Nach Anderson 2019 gibt es etwa geschätzte 5,6 Kontaminationsfälle der Zapfluft bei 100.000 Flügen, allerdings kann die Quote auch höher fallen, weil die Dunkelziffer unbekannt bleibt.

Um die Verschmutzungen im Pneumatiksystem besser aufzufassen, wird nun eine Studie der Universität Cranfield unter der Leitung von Helen Muir OBE, Professorin für Luft- und Raumfahrtpsychologie vorgestellt, in der die Zapfluft bzw. Kabinenluft von fünf Flugzeugen des Typs: A319/320/321, BAe 146 und Boeing 757 bei 100 Flügen in unterschiedlichen Flugphasen auf verschiedene chemische Stoffe untersucht worden ist. Die Daten wurden anschließend in der Reihenfolge der Konzentration geordnet. Danach wurden beispielsweise die ersten 10 % der geringen Konzentrationen betrachtet und die letzte höchste Konzentration innerhalb d Gruppe (10 %) eingetragen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.1 aufgelistet. In vielen Fällen war eine Konzentration nicht nachweisbar (NN). Betrachtet man die Gruppe (95 %) so war die höchste Konzentration bei Toluol $9,9 \mu\text{m}^3$ (Muir 2011).

Tabelle 4.1 Untersuchungsergebnisse der Kabinenluft einer Boeing 757 (Muir 2011)

Chemikalien (202 Proben)	Konzentration in $\mu\text{g m}^{-3}$					
	10 %	50 %	75 %	95 %	Mittelwert	Maximum
TCP	NN	NN	NN	NN	0,14	22,8
Andere TCPs	NN	NN	NN	NN	0,09	14,9
TBP	NN	NN	NN	1,1	0,24	1,9
Toluol	NN	1,2	3,7	9,9	2,51	18,4
m+p Xylene	NN	0,2	1,1	4,3	0,88	8,4
Limonene	NN	0,4	1,5	6,2	2,01	150,7
TCE	NN	NN	0,4	1,9	0,36	6,1
C ₁₁	NN	NN	0,6	3,11	0,57	14,7

Die Konzentrationen von Toluol, Limonene, Xylene und TCE waren im Ergebnis vergleichbar mit den Mengen, die üblicherweise in Haushalten aufgezeichnet werden, so Houtzager 2017. In mehr als 95 % der Proben aus der Kabine wurde kein TCP, ein Additiv von Schmieröl, nachgewiesen. Der höchste TCP-Wert wurde in der Steigphase mit $22,8 \mu\text{g/m}^3$ aufgezeichnet (Muir 2011).

In anderen Untersuchungen, wie von Van Netten 1998, in der die Kabinenluft einer BAe 146 auf die Anwesenheit von TCP untersucht wurde, stellte sich ebenfalls heraus, dass die Atemluft frei von TCP ist. Anders sieht es bei dem Report von Houtzager 2013 aus, bei dem 37 der 80 Luftproben aus den Flugzeugtypen der Reihe B737 positiv auf die TCP-Isomere im Nanogrammereich pro Kubikmeter getestet worden sind.

Einzelstudien zeigen, dass die Ergebnisse der Untersuchungen verschieden ausfallen können. Das liegt an unterschiedlichen Faktoren, wie Typ des Triebwerks, Alter und Zustand des Flugzeuges, eingesetzte Messinstrumente, Erwartungshaltung und Interpretation der Forscher. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass das Trinkwasser innerhalb des Systems chemisch

belastet werden kann. Dies könnte auch dem zugrunde liegen, dass vor der Bedruckung keine optimale Filterung von Schadstoffen stattfindet.

Obwohl renommierte Wissenschaftler, wie Dr. Scholz, auf das kontroverse Problem mehrmals unermüdlich hingewiesen haben, wird bislang nur wenig und schleppend etwas unternommen. Auch die gemeinnützige Organisation für Technik und Wissenschaft: Society of Automotive Engineers (SAE) hat bereits im Jahr 1991 darauf aufmerksam gemacht, dass die abgezapfte Luft aus dem Triebwerk mit dem Motoröl verunreinigt werden kann. Seitens der Industrie wird das Problem nur bedingt wahrgenommen, indem nur neue Flugzeuge mit Kompressoren ausgestattet werden, während bestehende weitere Jahrzehnte ungefilterte Zapfluft befördern (Scholz 2018).

5 Systemarchitekturen von Flugzeugtrinkwassersystemen

Um die Besatzungsmitglieder und Passagiere mit frischem Trinkwasser zu versorgen, werden gemäß der Air Transport Association of America (ATA) 38 dafür vier Untersysteme benötigt (Scholz 2013b):

- *Das Wasserbedruckungssystem* übt Druck auf den Wassertank aus
- *Das Trinkwassersystem* speichert und versorgt Passagiere mit Trinkwasser
- Die Abwasseranlage entsorgt das Waschbeckenabwasser
- Das Toilettensystem befördert die Fäkalien aus dem WC in den Abwassertank

In dem folgenden Flussdiagramm ist die Wasserversorgung eines Passagierflugzeuges schemenhaft dargestellt. Die verschiedenen Bedruckungssysteme werden anhand der beiden Flugzeugmuster A321 und B787 in den beiden Unterkapiteln vorgestellt.

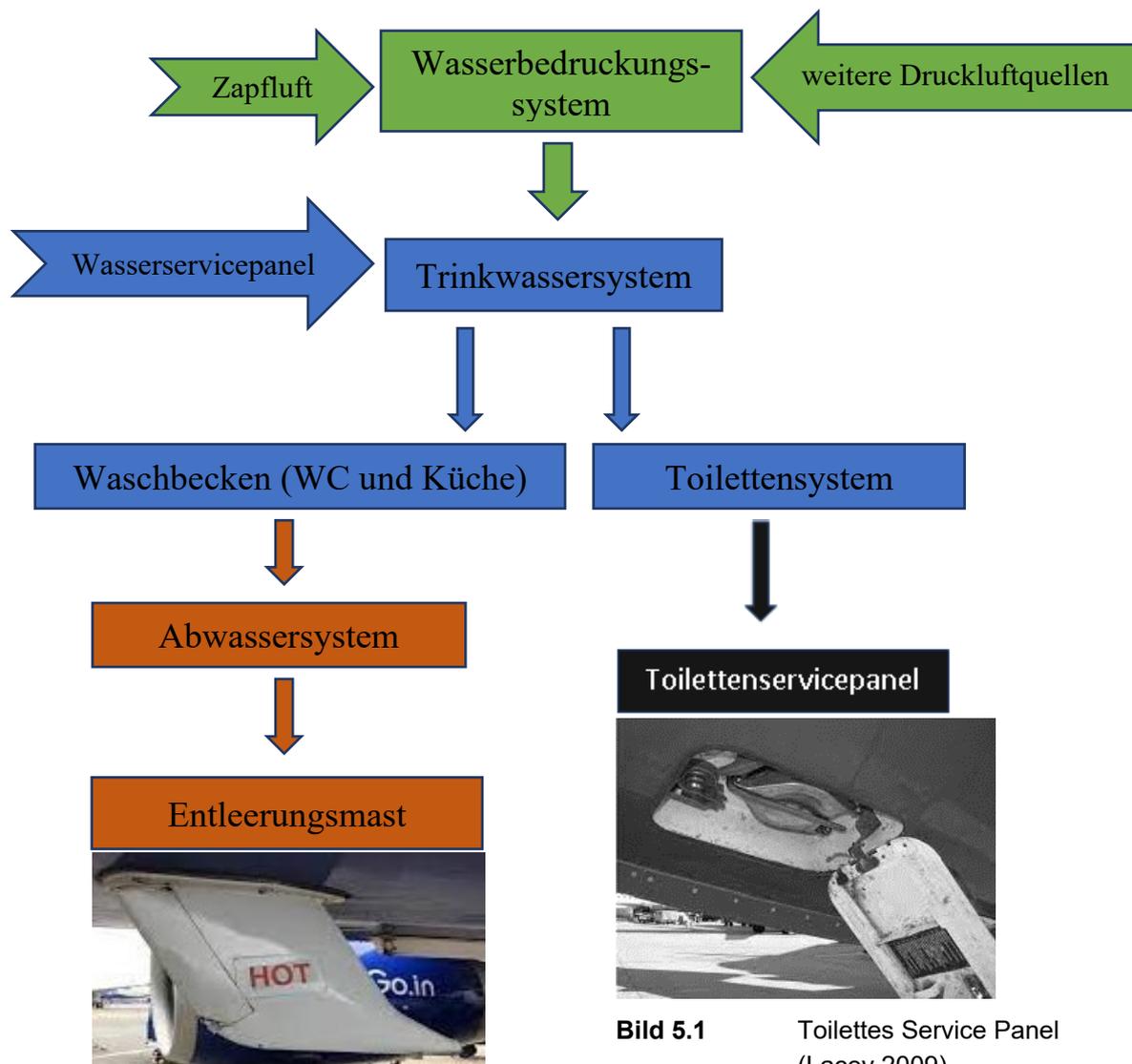


Bild 5.2 Entleerungsmast (Aviation Book 2019)

Bild 5.1 Toilettes Service Panel (Lacey 2009)

Zu Beginn der zivilen Luftfahrt wurde die Umgebungsluft jenseits des Triebwerks abgezapft und in das Pneumatiksystem eingespeist. Beispielsweise wurden an den drei Triebwerken der Boeing 707 (ausgenommen Triebwerk 1) (Bild 5.3) jeweils ein Turbokompressor montiert, der die Außenluft einsaugt und verdichtet und sie für die Druckbeaufschlagung zur Verfügung stellt. Der entscheidende Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass die Luft keinen Kontakt mit Triebwerksflüssigkeiten hat. Auch die Douglas DC-8 Maschine (Bild 5.4) hat sich damals diesem Grundsatz angeschlossen und die Außenluft über zwei Einlassöffnungen an der Flugzeugnase eingeführt. Die eingespeiste Luft wurde anschließend über zapfluftangetriebene Kompressoren auf Kabinendruck verdichtet.



Bild 5.3 Turbokompressor B707
(NAHM 2021)



Bild 5.4 Eintrittsöffnungen DC-8
(Finney 2004)

Im Folgenden werden anhand ausgewählter Flugzeugtypen die Luftversorgung der Flugzeugkabine und insbesondere die Bedruckungsarten des Trinkwassersystems tabellarisch (Tab. 5.1) vorgestellt.

Tabelle 5.1 Druckluftquellen ausgewählter Flugzeugmustern (LHT 2021a)

Flugzeugtyp	Luftversorgung Kabine	Trinkwasserbedruckung
B727, B737, B757, B767, B777	Zapfluft	Zapfluft/Kompressor
B747-8	Zapfluft	Pumpe
B787	Kompressor	Pumpe
A310	Zapfluft	Zapfluft/Kompressor
A320, A330, A340	Zapfluft	Zapfluft/Kompressor(Optional)/ externe Versorgung am Boden
A350	Zapfluft	Zapfluft/Pumpe/ externe Versorgung am Boden
A380	Zapfluft	Kompressor

Dabei fällt auf, dass die herkömmlichen turbojetangetriebenen Luftfahrzeuge wie die Boeing B737 und Airbus A320 das Trinkwassersystem mit Zapfluft bedrücken. Boeing baut dennoch zusätzlich einen Kompressor ein, um den Druck im Wassersystem sicherzustellen, wenn keine Zapfluft aus den Triebwerken oder der APU verfügbar ist, der Flieger aber unter Strom steht (z.B. am Gate). Airbus hingegen bietet den Kompressor nur bis auf eine Ausnahme (A310) als Option an, die der Kunde extra in Auftrag stellen muss, andernfalls wird keiner eingebaut, sodass die wünschenswerte Redundanz nicht vorliegt. Darüberhinaus können die meisten

Trinkwassersysteme der Airbusflugmaschinen ebenfalls durch ein externes Bedruckungsgerät am Boden bedruckt werden (LHT 2021a).

Nun geht der Trend dahin, die Zapfluftbedruckung durch Pumpen und eigenständige Kompressoren abzulösen, um das Fliegen effizienter zu gestalten und gleichzeitig eine Kontamination des Trinkwassers zu vermeiden. Boeing stattet seine neuesten Trinkwassersysteme (B747-8 und B787) mit elektrischen Pumpen aus, die neben einer hohen Zuverlässigkeit eine Kontamination des Trinkwassers mit chemischen Stoffen somit ausschließen.

Airbus fährt in seiner Ausstattungsstrategie zweigleisig und baut in das Trinkwassersystem der neuesten Flugzeuge entweder Kompressoren oder Pumpen ein. Bei einer Airbus A350 beispielsweise wird am Boden im Trinkwassertank mittels Zapfluft oder eines externen Versorgers ein Vordruck von ca. 32,5 psig erzeugt, welcher im Flug durch eine elektrisch betriebene Zentrifugalpumpe auf 40 psig erhöht wird, damit das Trinkwasser im Kreislauf zirkulieren kann. Darüberhinaus ist die Airbus A380 die einzige Flugmaschine, die für die Trinkwasserbedruckung ausschließlich Kompressoren einsetzt, während sie weiterhin für die Klimatisierung der Kabine Zapfluft verwendet (LHT 2021a).

Ein gutes Vorbild in dieser ganzen Thematik ist die Flugmaschine Boeing B787, die sich nun endgültig von der Zapfluft verabschiedet hat und nun Kompressoren für die Klimatisierung der Kabine einsetzt und Pumpen für das Bedrucken des Trinkwassersystems nutzt. Dies führt dazu, dass sowohl in der Kabinenluft als auch im Trinkwasser keine Kontamination stattfinden kann und somit nachhaltig die Gesundheit des Flugpersonals und der Passagiere geschützt ist (LHT 2021a).

5.1 Trinkwassersystem einer Airbus A321

Im Folgenden wird das Trinkwassersystem einer A321 beschrieben und im nächsten Unterkapitel 5.2 die wesentlichen Unterschiede gegenüber des Wassersystems der Boeing 787 aufgezeigt. Danach wird eine Einschätzung abgegeben, ob durch die jeweiligen Bedruckungsarten das Trinkwasser metallisch belastet werden kann.

Das Trinkwassersystem eines Airbus A321 (Bild 5.5) besteht im Wesentlichen aus einem Tank aus glasfaserverstärktem Kunststoff sowie einem Leitungssystem, welches zum größten Teil aus Rohrleitungen aus Edelstahl sowie im Bereich der Anschlüsse der Bordküchen und Toiletten aus Silikonschläuchen besteht. Der Trinkwassertank ist im hinteren Bereich des Flugzeuges unter dem Kabinenfußboden installiert und wird über das Water Service Panel mit Trinkwasser gefüllt oder auch entleert. Die Druckbeaufschlagung des Tanks erfolgt entweder über das Zapfluftsystem, welches entweder über die Triebwerke oder die APU versorgt wird, oder über einen Druckanschluss für eine externe Druckquelle.

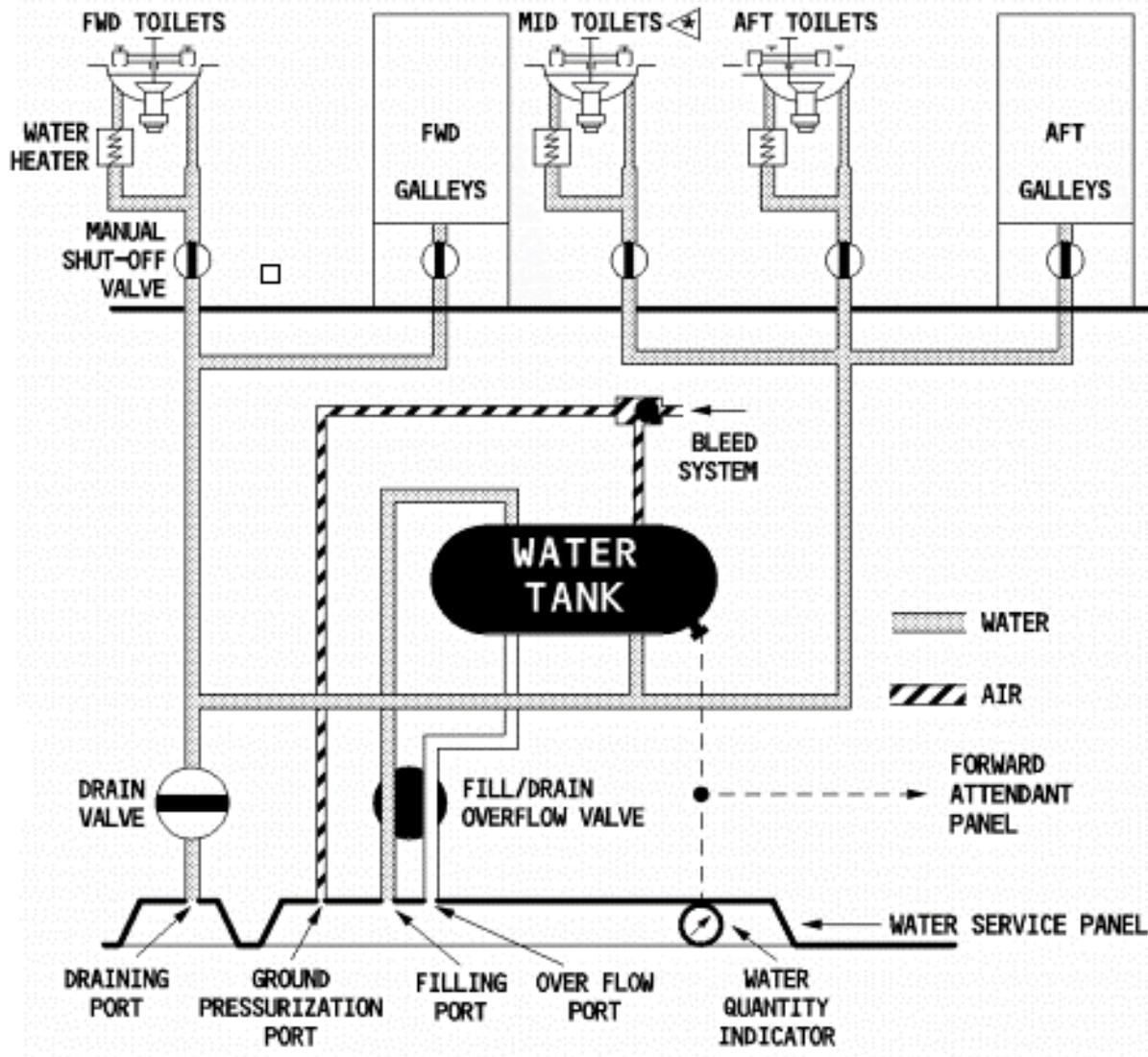


Bild 5.5 Schema der Wasserversorgungsanlage von A321 (Scholz 2013a)

Als Option ist ein Kompressor (Bild 5.6) zur Druckbeaufschlagung des Tanks möglich, der Verunreinigungen aus dem Triebwerk vermeiden kann. Anschließend wird das Trinkwasser zu den Verbrauchern in der Flugzeugkabine gefördert (Airbus 2015).

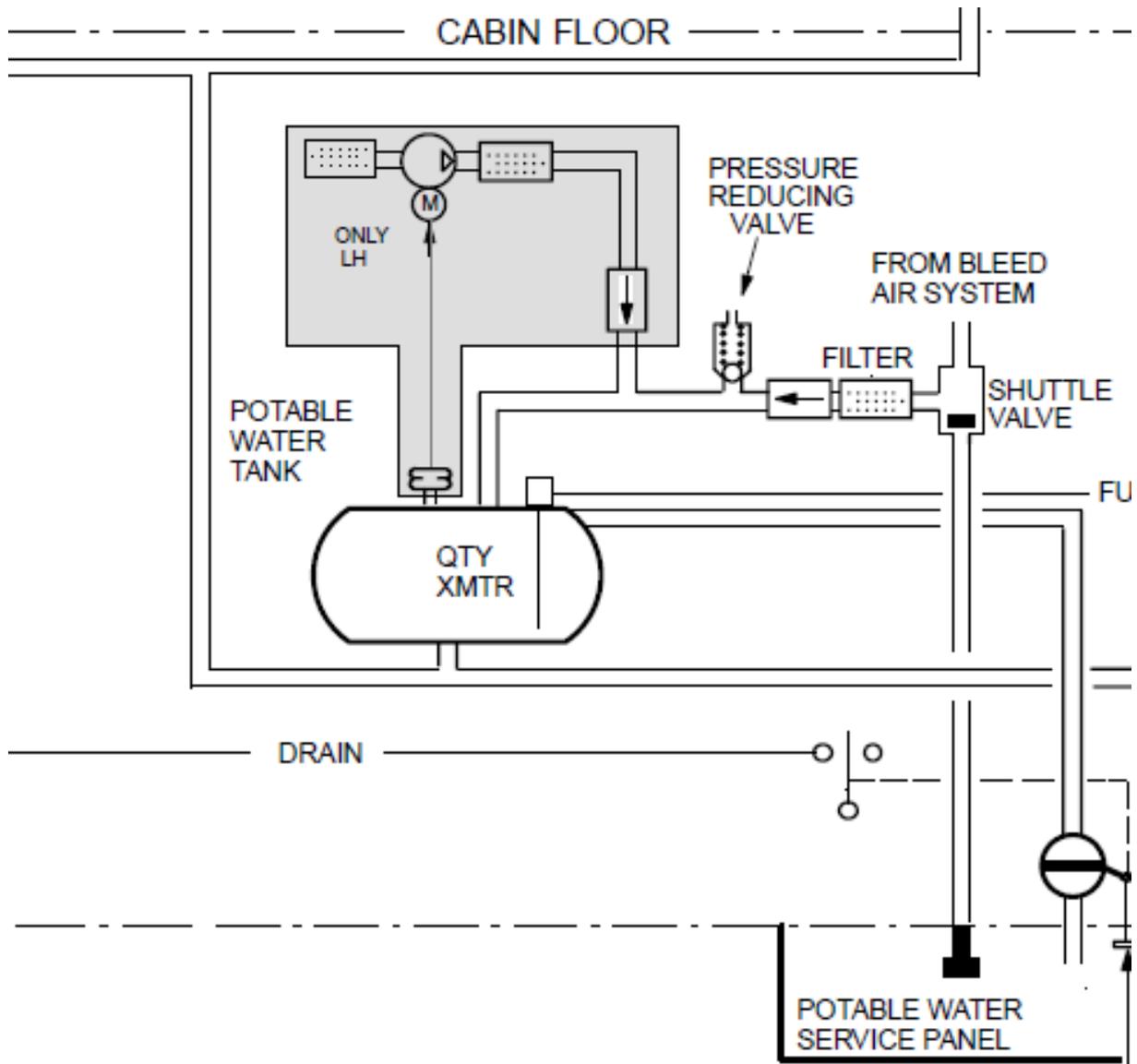


Bild 5.6 Integrierter Kompressor im Trinkwassersystem (LHT 2021b)

Um das Leitungswasser während des Fluges vor dem Erfrieren zu bewahren, werden die Leitungen isoliert und beheizt. Ein Mengengeber im Tank gibt den Füllstand am Trinkwasserpanel und an der Flugbegleitertafel an. Läuft Trinkwasser aus dem Überlaufventil aus, so ist der Trinkwassertank bis zum Anschlag voll (Airbus 2015).

Die in Kapitel 3 untersuchte Filterkartusche zeigt deutlich, dass auch das Flugzeugtrinkwasser einen ungewöhnlichen Anstieg von bestimmten Metallen verzeichnen kann. Hier sind jedoch weitere umfassende Untersuchungen durchzuführen, um zu prüfen, ob Metallpartikel in gefährlichen Mengen im Pneumatiksystem bzw. in der Zapfluft oder im Trinkwassersystem verweilen.

5.2 Trinkwassersystem einer Boeing 787

Die Boeing 787 benötigt für die Erzeugung des Wasserdruckes keine Zapflucht im Trinkwassersystem (Bild 5.7), sondern nutzt hierfür zwei parallel angeordnete elektrische Pumpen (Bild 5.8), wovon eine im Standby-Modus ist. Die Pumpen sorgen für eine ständige Zirkulation des Trinkwassers im Bereich des Tanks. Das Besondere an dem Trinkwassersystem ist die integrierte Wasseraufbereitung durch eine eingebaute UV-Einheit, die die freilebenden Bakterien inaktiviert. Zudem besteht keine Gefahr einer chemischen oder metallischen Verunreinigung des Trinkwassers, da kein Kontakt zur Zapflucht besteht (Monarch 2016).

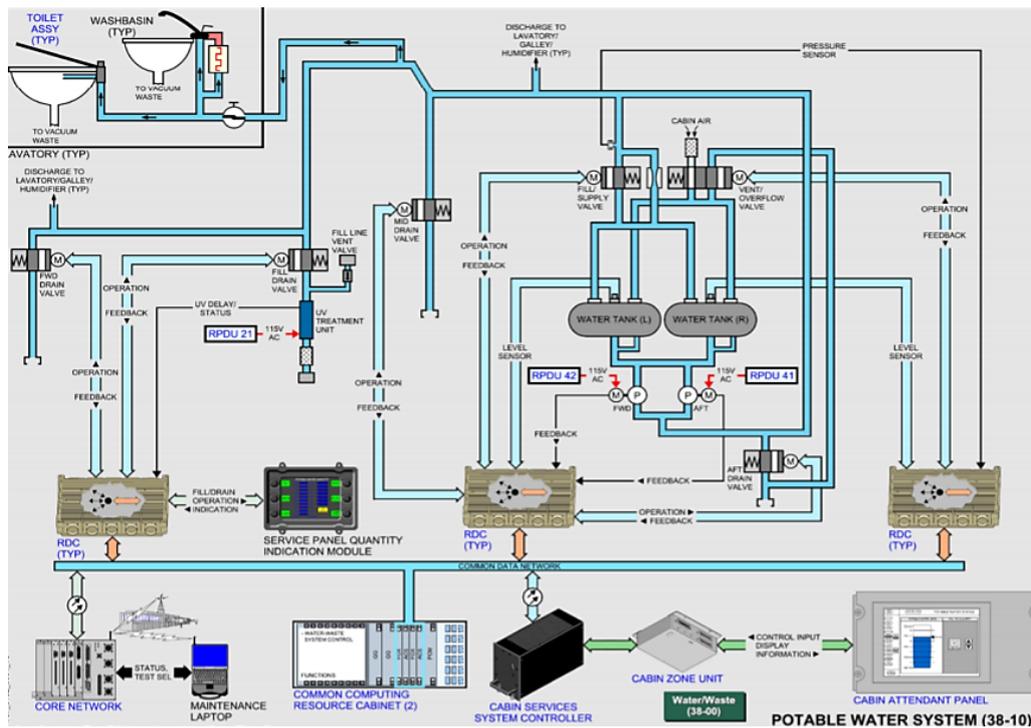


Bild 5.7 Trinkwassersystem einer Boeing 787 (Monarch 2016)

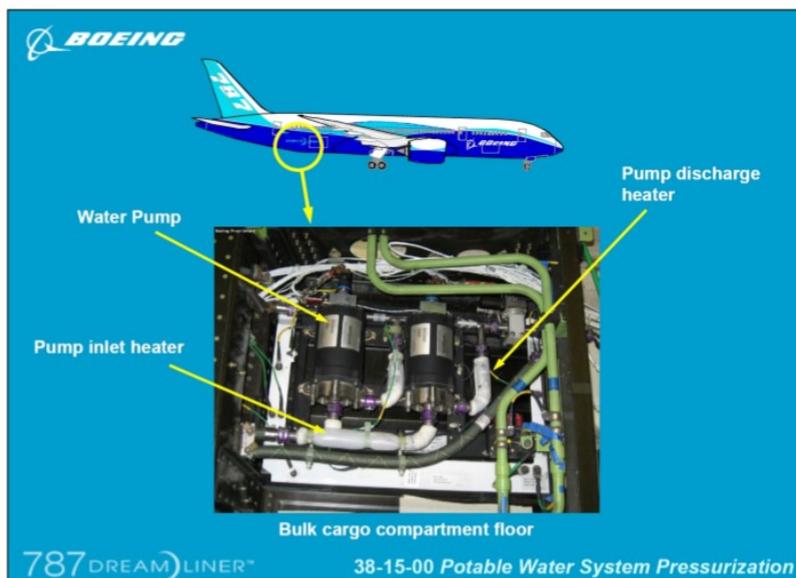


Bild 5.8 Wasserpumpen der Boeing 787 (Monarch 2016)

6 Studien über die Kontamination des Flugzeugtrinkwassers

Behörden und Institute haben sich in der Vergangenheit mit der Frage beschäftigt, ob das Trinkwasser an der Entnahmestelle im Flugzeug sauber und sicher ist. Um in der Trinkwasserhygiene neue Erkenntnisse zu gewinnen, wurden im Rahmen mehrerer Studien systematisch umfangreiche Daten gesammelt, die neben der Trinkwasserqualität auch weitere Kriterien betreffen, wie vergangene Verstöße gegen die Trinkwasserverordnung und die Bereitschaft der Großfluggesellschaften, die Studie konstruktiv zu unterstützen. Auch wenn die Studien lokal beschränkt sind und nur bestimmte Fluggesellschaften ansprechen, stellen sie die Problematik klar und repräsentativ dar. Die Wichtigkeit solcher Studien muss vor allem auch durch die Behörden und Flugzeughersteller wahrgenommen werden, um hier nachhaltige Lösungsmöglichkeiten zu schaffen und die Gesundheit der Besatzung und Passagiere zu schützen. Folgende Studien werden in diesem Abschnitt vorgestellt:

- Studie des Hunter Colleges New York City (Platkin 2019)
- Studie der Universität von Limerick (Handschuh 2015)
- Lufthansa Technik (LHT 2015)

6.1 Studie des Hunter Colleges New York

Das Hunter College New York City Food Policy Center hat im Zusammenarbeit mit DietDetective.com unter der Führung von Platkin (2019) im Rahmen einer umfangreichen Studie aus dem Zeitraum 2012 ... 2019 die Trinkwasserqualität von 10 großen und 13 regionalen amerikanischen Fluggesellschaften untersucht. Neben der Einhaltung der "Aircraft Drinking Water Rules" (ADWR) wurden auch weitere Aspekte wie die Flottengröße, Anzahl der durch die EPA aufgezeichneten Verstöße gegen die Trinkwasserrichtlinien und die Mitwirkung an der Studie, berücksichtigt. Abschließend erhielten die teilnehmenden Fluggesellschaften einen sogenannten Wassergesundheitswert zugeteilt. Die Bewertungsskala reicht von 0 (schlecht) bis 5 (sehr gut), wobei eine Note mit dem Wert 3 schon als gut eingestuft wird.

Bei der Durchführung dieser großangelegten Studie hat das Forschungsteam allerdings seitens der Fluggesellschaften sehr wenig oder kaum Unterstützung erhalten, was daran liegen könnte, dass die Trinkwasserproblematik schon seit Jahren bekannt ist und die Fluggesellschaft nicht an konstruktiven Maßnahmen interessiert sind, da sie mit ihrem Namen nicht mit schlechter Trinkwasserqualität in Verbindung gebracht werden wollen. Weiterhin schreibt Herr Platkin in seiner Studie, dass Fluggesellschaften generell dazu neigen, ihre vorgeschriebenen Trinkwasseruntersuchungen nach einer Desinfektion nicht durchzuführen oder das System erst gar nicht desinfizieren. Falls ein Befund doch positiv ausfällt, werden gesetzlich vor-

geschriebene Wiederholungs- und Folgeproben nicht veranlasst. Auch beklagt er sich darüber, dass die EPA bei den Sanktionen tolerant ist und Verstöße nicht unbedingt weiterverfolgt.

6.1.1 Große Fluggesellschaften

Das Verkehrsministerium der Vereinigten Staaten gliedert Fluggesellschaften, deren jährlicher Gewinn mehr als eine Milliarde US-Dollar beträgt, als "Major Airlines" ein. Die drei größten Airlines in dieser Kategorie sind American Airlines, Delta Air Lines und United Airlines.

In dem Bild 6.1: "Flottengröße und ADWR-Verstöße" werden die Flottengröße und die Verstöße normiert auf ein Flugzeug gegen die ADWR-Richtlinien dargestellt. Da es sich wie immer um Stichproben handelt und somit nicht jedes Flugzeug ausgeleuchtet werden kann, ist es naheliegend, dass es eine hohe Dunkelziffer gibt und die erfassten Daten nicht unbedingt das komplette Bild der Situation widerspiegeln.

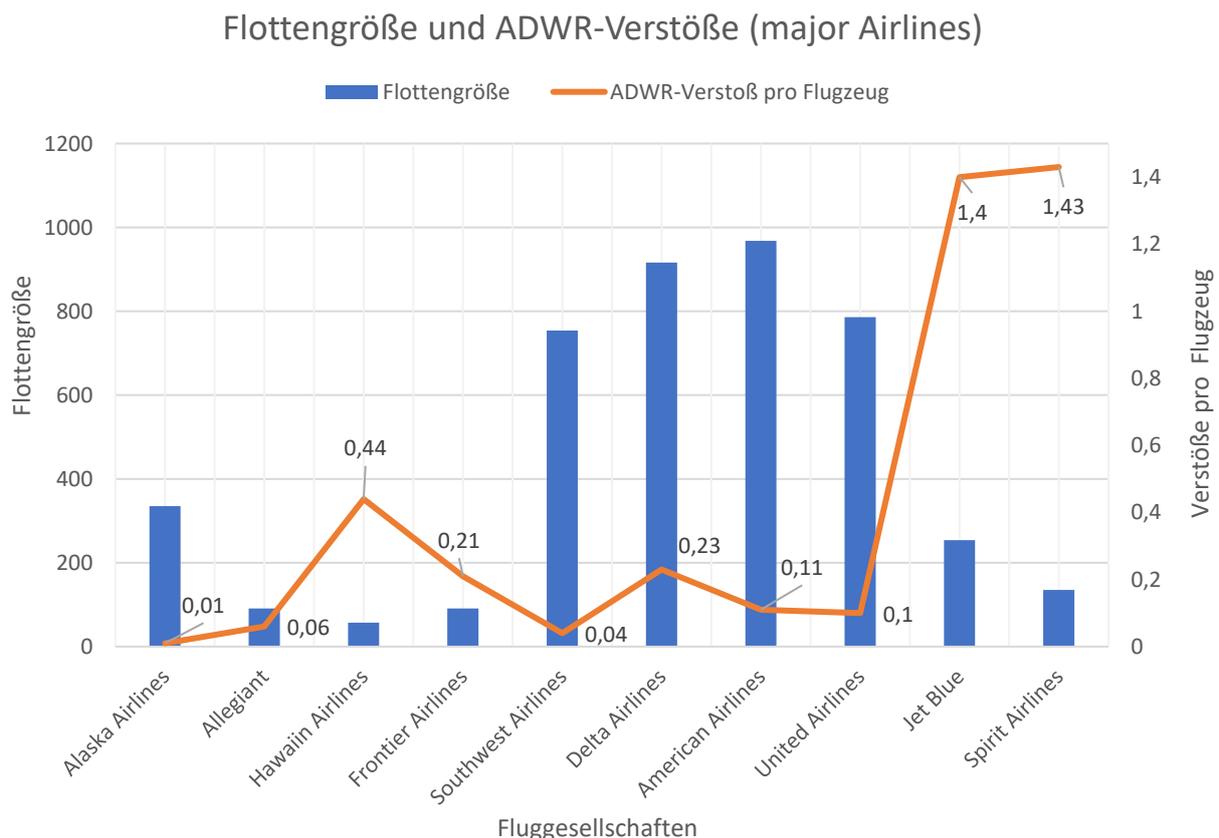


Bild 6.1 Flottengröße und ADWR-Verstöße (major) (nach Platkin 2019)

Aus Bild 6.1 geht hervor, dass Alaska Airlines die wenigsten Verstöße (insgesamt zwei) pro Flugzeug (Flottengröße: 335) aufweist. Auffällig sind die Kennzahlen der Billigfluggesellschaften, Spirit Airlines und JetBlue, die deutlich über dem Durchschnitt von 0,403 Verstößen

liegen und daher besorgniserregend sind. Somit hat es in jedem Flugzeug der beiden Fluggesellschaften im Testzeitraum rein statistisch mehr als einen Verstoß gegen die Wasserrichtlinie gegeben. Insgesamt kann man festhalten, dass in dieser Kategorie in einem Zeitraum von acht Jahren auf zehn Flugzeuge genau 2,35 aufgezeichnete Verstöße fallen.

In dem Bild 6.2 sind die Anzahl der positiven Befunde von Escherichia coli und coliformen Keimen in Form eines Balken angegeben. Es fällt auf, dass die Menge der Befunde für E. coli sehr gering ausfällt. Das liegt daran, dass das Wartungsunternehmen erst bei einem positiven Vorfall von coliformen Keimen speziell nach E. coli sucht. Ob bei einem Verdachtsfall auch diese Folgeprobeuntersuchung durchgeführt worden ist, wird in der Studie an mehreren Stellen bezweifelt. Als Haupttendenz lässt sich feststellen, dass mit Zunahme der Flottengröße auch die Quote "Befunde pro Flugzeug" zunimmt.

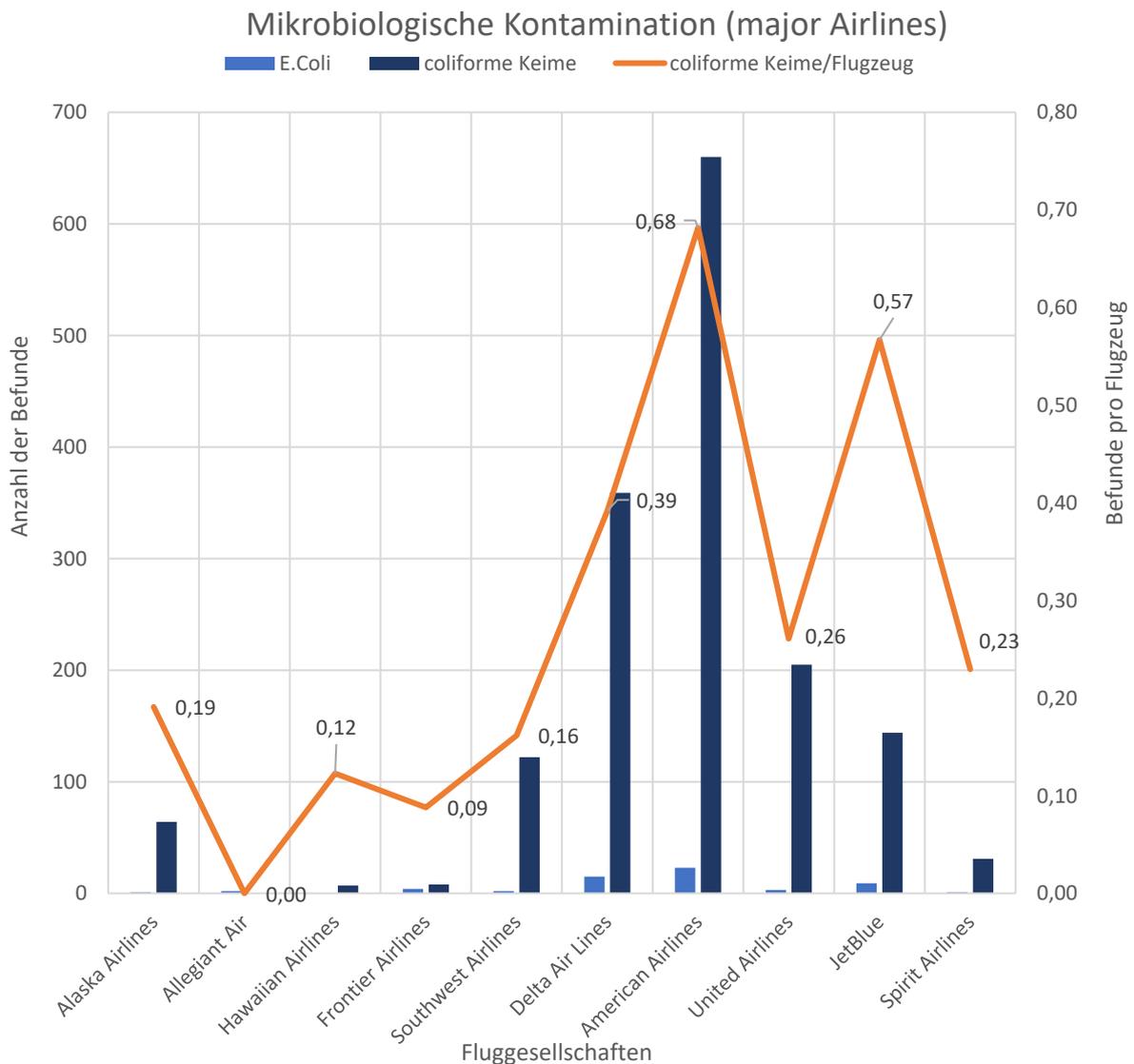


Bild 6.2 Mikrobiologische Kontamination (major) (nach Platkin 2019)

Dem Bild 6.2 ist zu entnehmen, dass die drei größten Fluggesellschaften der Welt, American Airlines, Delta Airlines und United Airlines, eine hohe Anzahl von positiven Befunden pro Flugzeug aufweisen. Mindestens jedes vierte Flugzeug dieser Gesellschaften hatte im Überprüfungszeitraum einen gemeldeten Befund. An der Spitze befindet sich American Airlines mit sieben gemeldeten Zwischenfällen bei zehn Flugzeugen in acht Jahren. Ein möglicher und nahliegender Grund für die hohen Zahlen ist die geringe Bereitschaft die Trinkwasseranlage ordnungsgemäß zu führen und bei konkreten Hinweisen das jeweils passende Wartungsintervall durchzuführen.

Im folgenden Bild 6.3 sind die Endnoten für die Fluggesellschaften aus der ersten Kategorie notiert. Die Autoren beurteilten die Trinkwasserqualität anhand von Noten von 0 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut). Alaska Airlines und Allegiant Air schnitten mit einer Bewertung von 3,3 am besten ab und gehören somit der Kategorie "sauberes Trinkwasser" an, in die auch Hawaiian Airlines mit 3,1 dazu gezählt wird. All die anderen Fluggesellschaften befördern Trinkwasser, welches sowohl für die Besatzung als auch für die Passagiere eine gesundheitliche Gefahr darstellt. Hier besteht großer Handlungsbedarf seitens Hersteller, Fluggesellschaften und Aufsichtsbehörden.

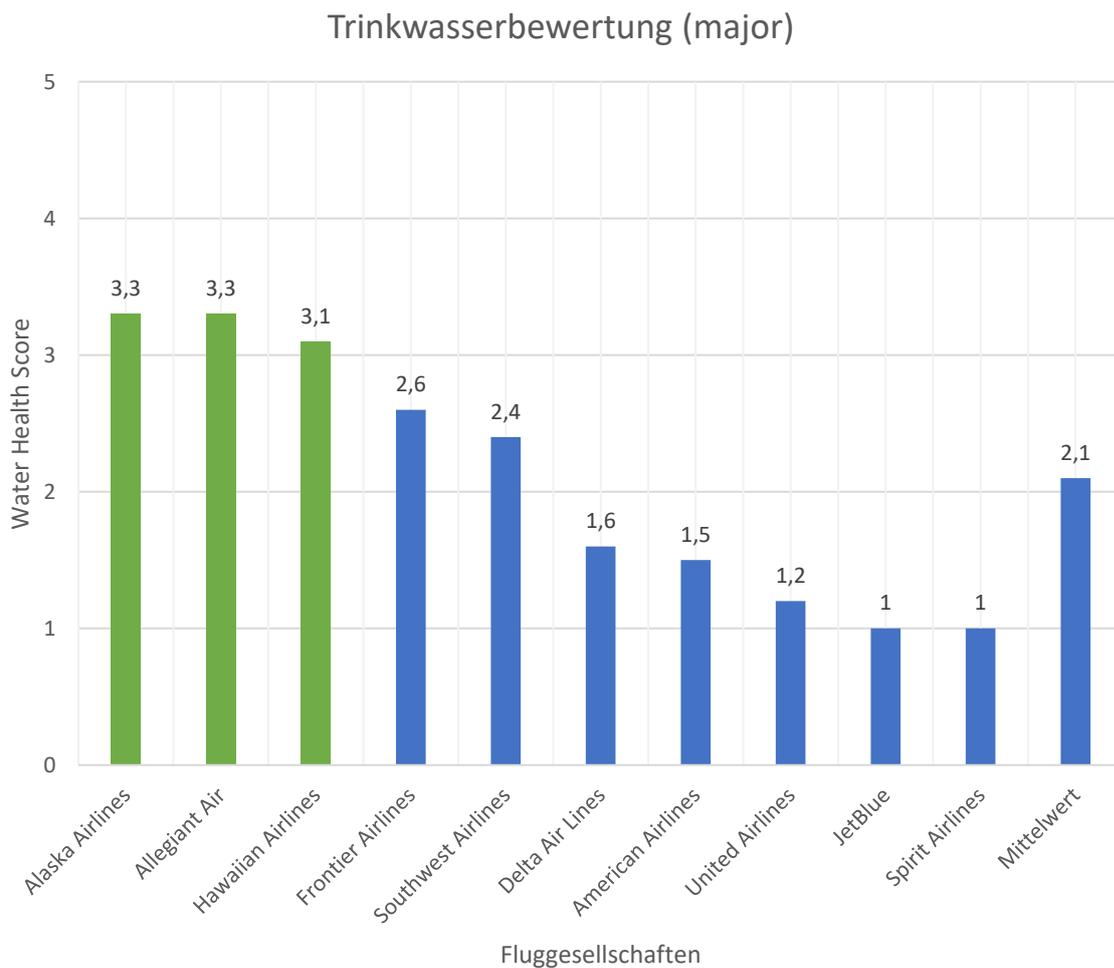


Bild 6.3 Trinkwasserbewertung (major) (nach Platkin 2019)

6.1.2 Regionale Fluggesellschaften

Regionale Fluggesellschaften sind auch bekannt als Pendlergesellschaften, die trotz geringer Nachfrage die Funktion haben, zwei Regionalflughäfen miteinander zu verbinden. Außerdem fungieren sie als Zubringer zu den Hubs, um die Passagiere an den Fernverkehr anzuschließen. Meistens handelt es sich um kleinere Flugzeuge, die in einer hohen Frequenz fliegen. Das folgende Diagramm zeigt anhand der blauen Balken die Flottengröße der ausgewählten amerikanischen Fluggesellschaften. Der orangefarbene Graph (Bild 6.4) gibt die Anzahl der Verstöße gegen die Trinkwassergrenzwerte normiert auf ein Flugzeug an.

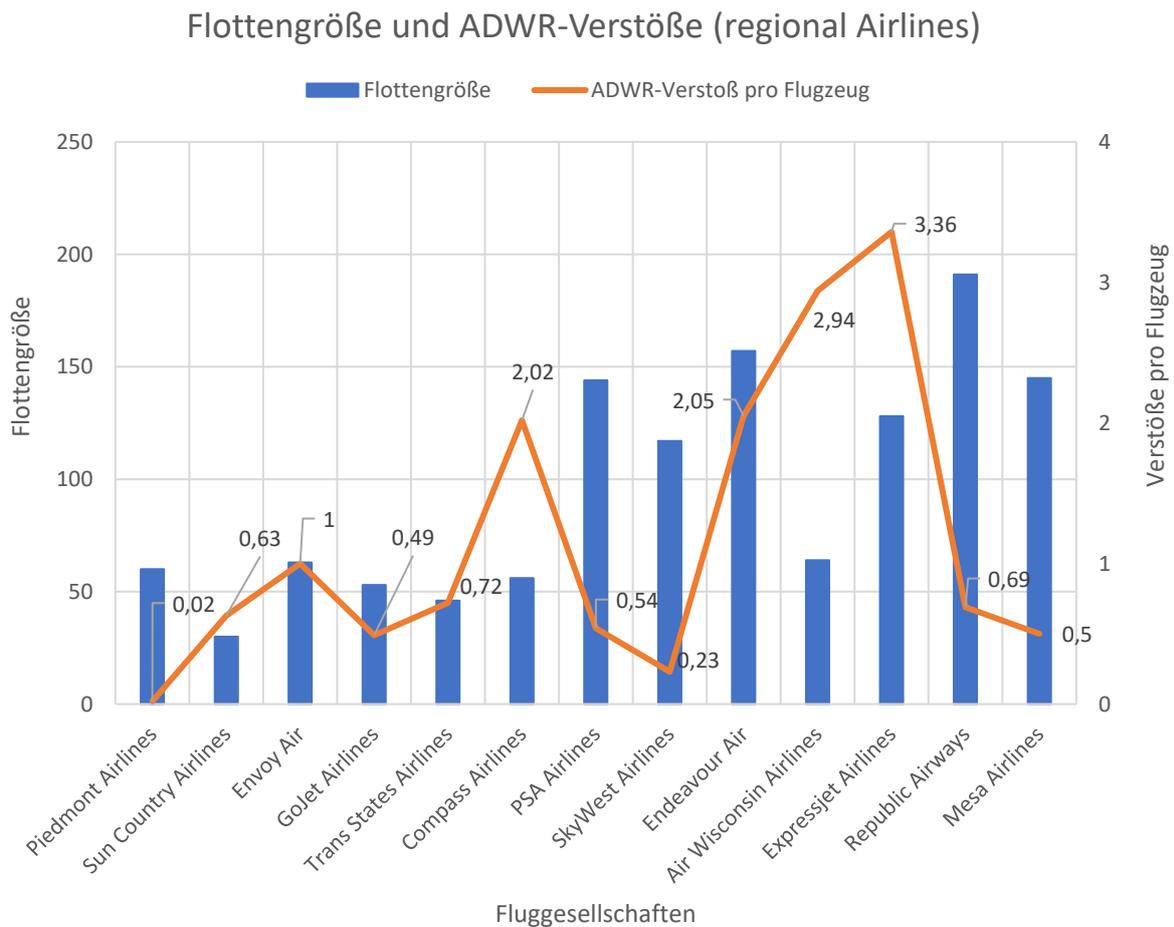


Bild 6.4 Flottengröße und ADWR-Verstöße (regional) (nach Platkin 2019)

Die regionale Versuchsreihe mit einer durchschnittlichen Flottengröße von 127 weist eine Verstoßquote von 1,17 pro Flugzeug auf. Im Vergleich zu den in Abschnitt 6.1.1 betrachteten Großfluggesellschaften, die eine Verstoßquote von 0,403 haben, entspricht dies einer Erhöhung um 290 %. Expressjet Airlines agiert als Vorreiter mit 3,36 Verstößen pro Flugzeug, gefolgt von Air Wisconsin Airlines, Endeavour Air und Compass Airlines, die alle pro Flugzeug mindestens zwei Verstöße gegen die Wasserrichtlinie zu verzeichnen haben.

Auch hier spielen nicht selten Versäumnisse von Korrektur-, Wiederholungs- und Folgeuntersuchungen eine entscheidende Rolle, wodurch die wachsende Verkeimung nicht rechtzeitig erkannt wird und sich langfristig in dem gesamten Trinkwassersystem ausbreiten kann.

Das vorliegende Bild 6.5 gibt Auskunft über die mikrobiologische Kontamination der Trinkwasseranlagen in den Flugzeugen der regionalen Fluggesellschaften.

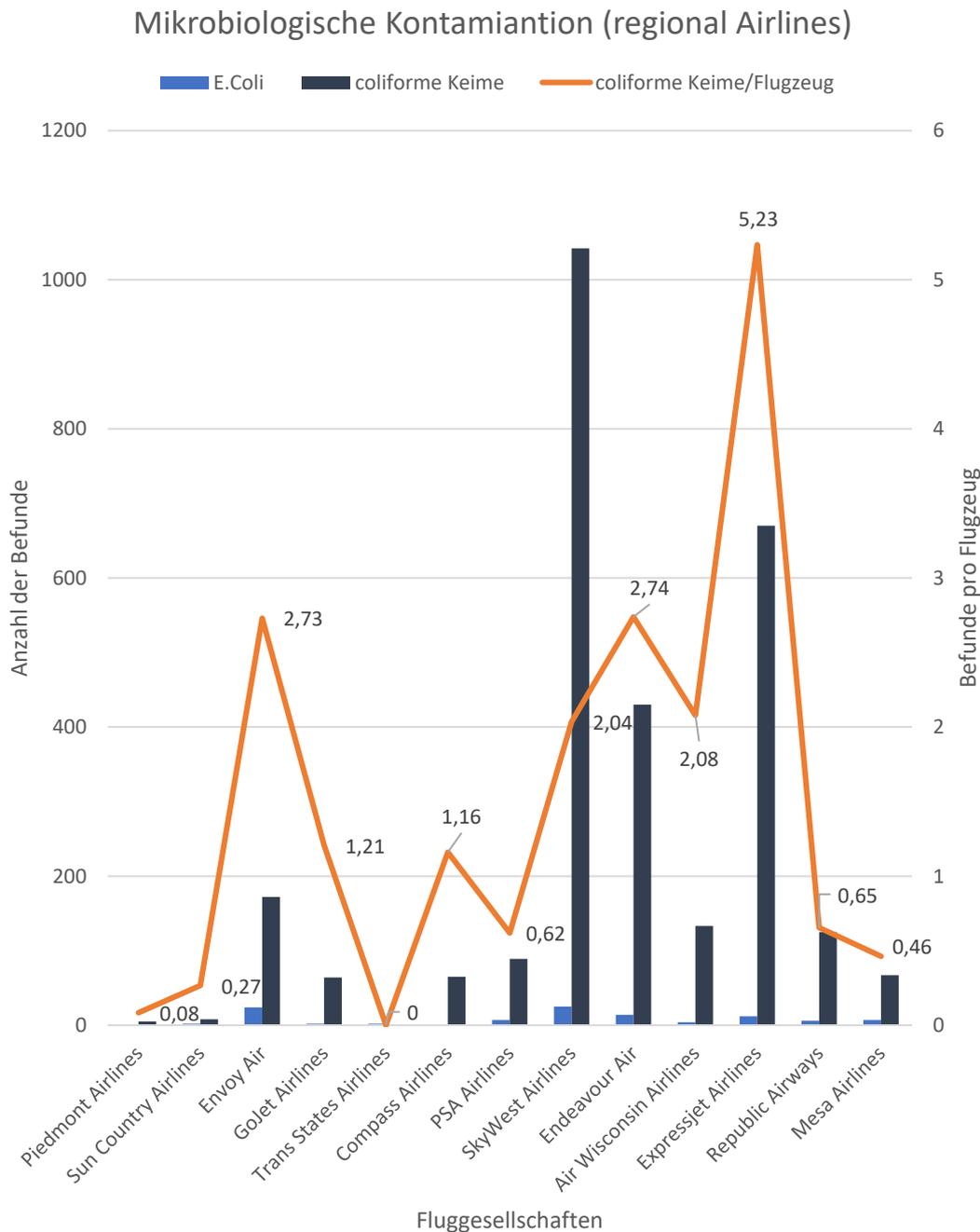


Bild 6.5 Mikrobiologische Kontamination (regional) (nach Platkin 2019)

Aus Bild 6.5 geht hervor, dass Airlines mit einer großen Flugzeugflotte einen sehr hohen mikrobiologischen Kontaminationsanteil besitzen. Ein Beispiel dafür ist Expressjet Airlines mit 670 positiven Testergebnissen bezüglich coliformer Keime während des Untersuchungszeitraums. Das bedeutet, dass jedes Flugzeug im Beobachtungszeitraum im Durchschnitt 5,23 positive Befunde erhalten hat. Im Vergleich zu den "Major Airlines" liegt das Verhältnis der positiven Befunde der Regionalfluggesellschaften zu der Flottengröße im Mittel um den Faktor 4,77 höher.

In der Rubrik "regionale Fluggesellschaften" hat nur Piedmont Airlines eine Bewertung von besser als 3 (Bild 6.6) erreicht und somit das Siegel "sauberes und sicheres Trinkwasser" erhalten, und alle anderen überprüften Airlines haben den Test nicht bestanden. Im Mittel liegt die Note bei 1,56 und ist um den Notenwert 0,54 schlechter als der Durchschnitt der Großfluggesellschaften (Durchschnitt 2,1). Beide Endergebnisse geben somit ein deutliches Signal an die Verantwortlichen, in naher Zukunft die Wartungsphilosophie besser zu gestalten, um die Verstöße gegen die Grenzwerte für Trinkwasser spürbar zu senken.

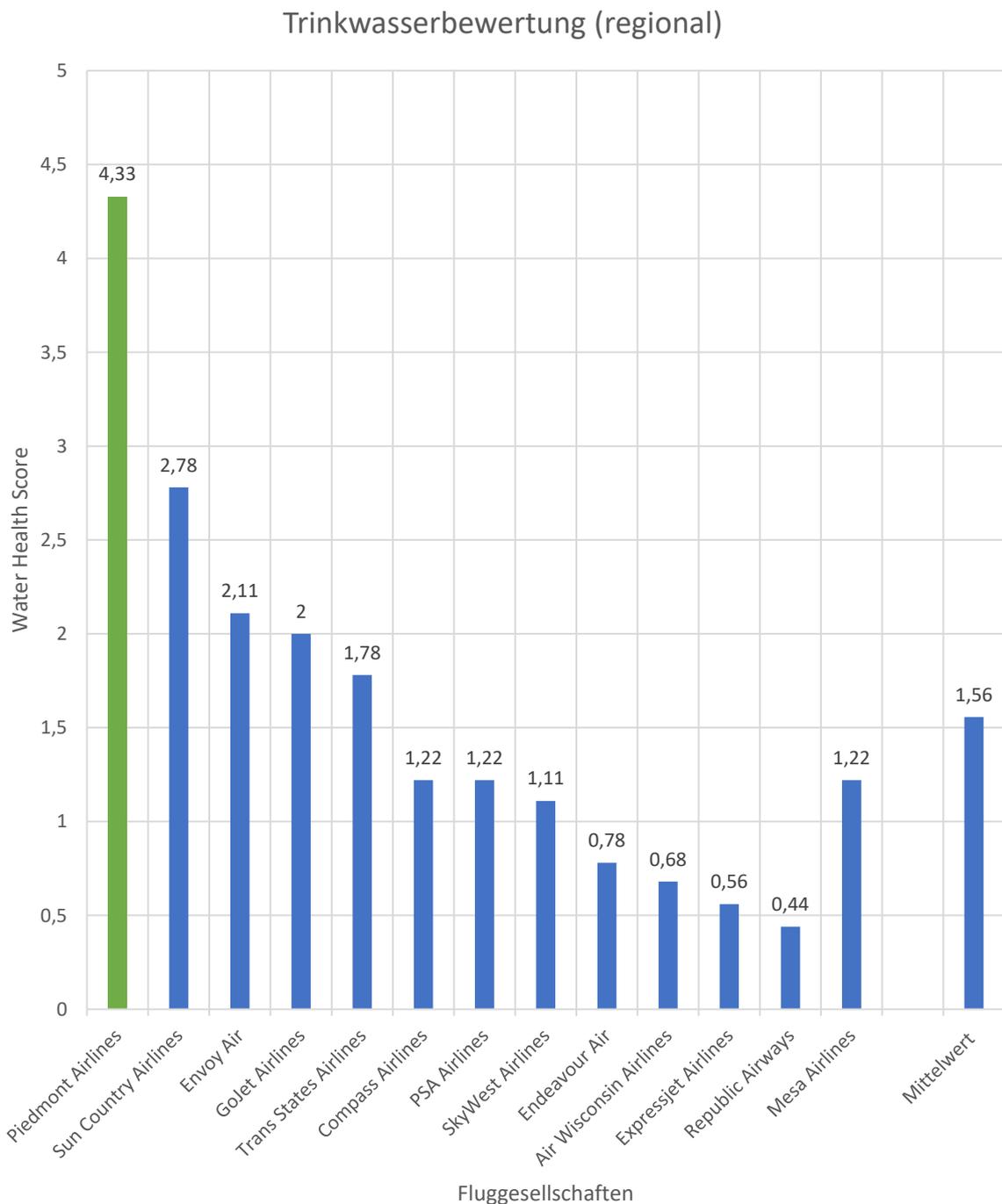


Bild 6.6 Trinkwasserbewertung (regional) (nach Platkin 2019)

6.2 Studie der Universität Limerick

Im Jahr 2010 hat das Wasserforschungsteam der Universität Limerick unter der Führung von Handschuh (2015) die Trinkwasserqualität in Flugzeugen, Wasserfahrzeugen und Flughafenwasserquellen im Bezug auf die Anwesenheit von humanpathogenen Bakterien untersucht. Dabei wurde die Studie in zwei Abschnitte geteilt.

Die Versuchsreihe A hat am 2. September 2010 begonnen und erstreckte sich über einen Zeitraum von 15 Wochen. Wöchentlich wurde aus dem vorderen und hinteren Bereich eines Kurz- und eines Langstreckenflugzeuges jeweils eine Wasserprobe entnommen, als es von seinem Zielflughafen wieder zurückkehrte. Die Typen der Flugzeuge werden in der Studie nicht erwähnt. Das Kurzstreckenflugzeug flog während der Untersuchungen im mitteleuropäischen Bereich und das Langstreckenflugzeug im regelmäßigen Turnus von Europa nach Nordamerika. Die Entnahme der Proben erfolgte beim Kurzstreckenflugzeug nach dem Befüllen des Wassertanks und beim Langstreckenflugzeug entweder davor oder danach. Die Befüllung beider Flugzeuge erfolgte mit dem gleichen Wassertankfahrzeug. Darüber hinaus wurden zusätzlich Proben aus dem Wassertankfahrzeug und der Flughafenwasserquelle entnommen, um die gesamte Lieferkette zu untersuchen und mögliche Kontaminationsherde aufzufinden (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Versuchsreihe A (Handschuh 2015)

Ort	Anzahl der Proben	Häufigkeit
Langstreckenflugzeug, Fwd & Aft	30	wöchentlich
Kurzstreckenflugzeug, Fwd & Aft	30	wöchentlich
Wassertankfahrzeug	15	wöchentlich
Wasserquelle (Flughafen)	15	wöchentlich
Insgesamt	90	

Versuchsreihe B (Tabelle 6.2) hat am 10. Januar 2011 begonnen. In dieser Versuchsreihe wurde die Trinkwasserqualität des gleichen Langstreckenflugzeuges wie in Versuchsreihe A täglich untersucht. Zusätzlich wurde weiterhin in einer wöchentlich Frequenz eine Probe aus einem Wasserfahrzeug und der Flughafenwasserquelle entnommen, die vom gleichen Flughafen stammt. Nach genau vier Wochen wurde auch diese Phase abgeschlossen. Das Labor hat in diesem Studienteil 64 Proben analysiert, was insgesamt zusammen mit der ersten Phase 154 untersuchte Proben ergibt.

Tabelle 6.2 Versuchsreihe B (Handschuh 2015)

Ort	Anzahl der Proben	Häufigkeit
Langstreckenflugzeug, Fwd & Aft	56	täglich
Wassertankfahrzeug	4	wöchentlich
Wasserquelle (Flughafen)	4	wöchentlich
Insgesamt	64	

Darüber hinaus wurde der Chlorgehalt des Trinkwassers bestimmt und der mittlere Wert mit der Wassertemperatur in der Tabelle 6.3 notiert.

Tabelle 6.3 Abnahme des Chlorgehalts in Versuchsreihe A und B (Handschuh 2015)

Versuchsreihe	Parameter		LF	KF	Wasserquelle	Wasserfahrzeug
A	Temperatur	[°C]	17,41	16,12	13,24	13,24
	tCl	[mg/l]	0,02	0,03	0,13	0,13
B	Temperatur	[°C]	13,53	-	8,18	8,45
	tCl	[mg/l]	0,11	-	0,41	0,27

Es sei jedoch an dieser Stelle angemerkt, dass die Chlordosieranlage in der Versuchsreihe B nicht einwandfrei funktionierte und dem Trinkwasser zu viel Chlor zugeführt hat, weswegen dieser Wert so hoch ausgefallen ist. Auffallend an der Datenlage ist die starke Abnahme des Chlorgehalts im Trinkwasser sowohl im Langstrecken- als auch in Kurzstreckenflugzeug. Ursachen für die Zersetzung des Chlors können Wärme, Licht und Verunreinigungen sein, wobei die mikrobiologische Verschmutzung des Trinkwassersystems eine naheliegende Ursache für den rapiden Rückgang des Desinfektionsmittels sein kann, dessen Auswirkungen in den Untersuchungsergebnissen wiederzuerkennen sind.

Die Untersuchungen der Proben zeigten ebenfalls eine kleine, aber nicht zu unterschätzende Differenz zwischen den Messwerten aus der vorderen und hinteren Galley (Tabelle 6.4). So weist die vordere Galley der beiden Flugzeugtypen immer eine Abweichung von 0,02 mg/l bzw. 0,04 mg/l auf. Die Beförderung des Trinkwassers erfolgt bei beiden Flugzeugen üblicherweise über separate Leitungspfade, die bei Kurzstreckenflugzeugen über einen Wassertank und bei Langstreckenflugzeugen über zwei verbunden sind, die sich meistens am Heck befinden. Es ist naheliegend, dass das Trinkwasser auf dem Weg in die vordere Galley aufgrund der mikrobiologischen Gegebenheiten der Leitungen chlorärmer wurde und somit einen gewissen Schutz gegen Keime verloren hat.

Tabelle 6.4 Chlorgehalt in der vorderen/hinteren Galley (Handschuh 2015)

Parameter		Kurzstreckenflugzeug		Langstreckenflugzeug	
		Fwd	Aft	Fwd	Aft
durchschnittlicher Chlorgehalt	[mg/l]	0,04	0,02	0,1	0,06
Differenz	[mg/l]	0,02	-	0,04	-

Ferner stellte man während der Versuchsreihe A fest, dass die Anzahl der koloniebildenden Einheit zwischen der Wasserquelle und dem Wasserversorgungsfahrzeug bei einer Temperatur von 22 °C durchschnittlich von 85 KBE/ml auf 11.643 KBE/ml zugenommen hat. Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 137. Die durchschnittliche Keimkonzentration lag beim Langstreckenflugzeug bei 7.973 KBE/ml und beim Kurzstreckenflugzeug bei 5.173 KBE/ml. Bis auf die Keimkonzentration in der Flughafenwasserquelle entsprachen die genannten durchschnittlichen Zahlen nicht den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung und stellten somit eine Gefahr für die Gesundheit dar.

In der Versuchsreihe B erhöhte sich im Schnitt die Keimanzahl von 7 KBE/ml aus dem Wassertankfahrzeug auf etwa 16.000 KBE/ml im Langstreckenflugzeug. Dies entspricht einer Zunahme um den Faktor 2286. In Tabelle 6.5 sind die untersuchten Stichproben aus der Versuchsreihe A nach der mikrobiologischen Belastung in sechs Kategorien (KBE/ml) eingeteilt. Die Keimbelastung wurde bei den Bebrütungstemperaturen 22 °C und 37 °C bestimmt, weshalb in der Tabelle, bis auf eine Ausnahme¹, doppelt so viele Befunde aufgezählt sind. Zudem ist eine Keimbelastung bei einer niedrigeren Temperatur weniger schlimm gegenüber einer höheren Temperatur, weswegen die TrinkwV bei einer Temperatur von 37 °C eine maximale Keimbelastung von 100 KBE/ml vorschreibt. Die **fett hinterlegten** Zahlen geben die Anzahl der Befunde an, die nicht der Trinkwasserverordnung entsprechen.

Tabelle 6.5 Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (Handschuh 2015)

Ort der Entnahme		Keimbelastung in [KBE/ml]						Total
		< 1	1 – 9	10 – 99	100 - 999	> 1000	> 10.000	
Wasserquelle	37 °C	12	3	0	0	0	0	15
	22 °C	10	2	1	2	0	0	15
Wassertankfahrzeug	37 °C	2	0	8	3	2	0	15 (5)
	22 °C	2	0	2	3	6	1	14 ¹ (7)
Langstreckenflugzeug	37 °C	1	1	0	2	13	13	30 (28)
	22 °C	1	1	0	2	16	10	30 (26)
Kurzstreckenflugzeug	37 °C	0	2	0	5	18	5	30 (28)
	22 °C	0	1	1	5	18	5	30 (23)

Dem Bild 6.7 ist zu entnehmen, dass das Trinkwasser aus der Flughafenwasserquelle eine sehr hohe Qualität (100 %) garantiert. Dabei wiesen 22 von 30 Proben eine Keimkonzentration von weniger als 1 KBE/ml auf und die restlichen Ergebnisse der Kategorie waren weiterhin unterhalb der Grenzwerte.

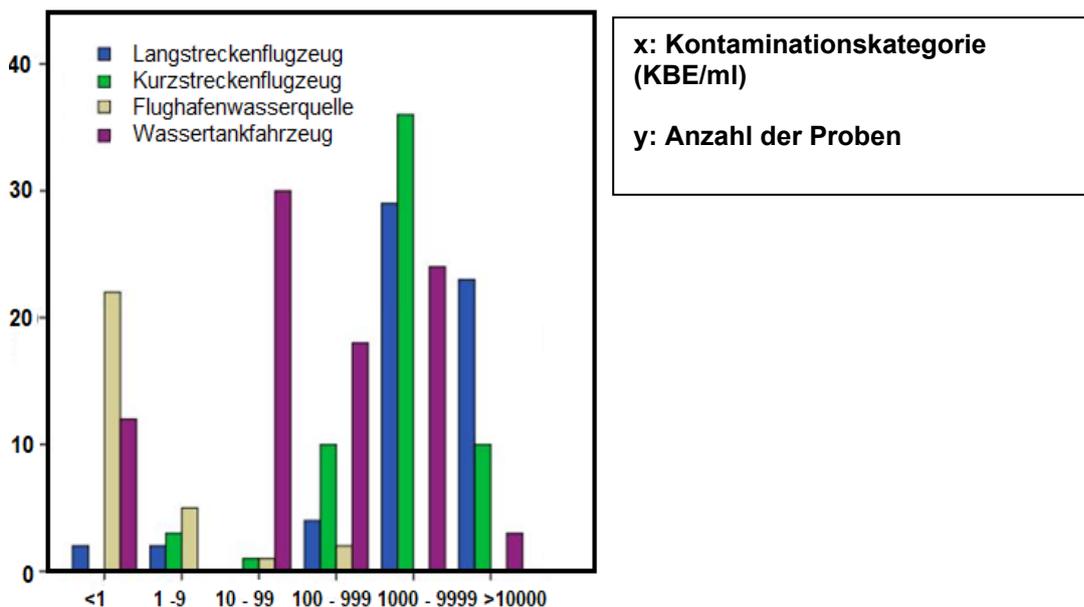


Bild 6.7 Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (Handschuh 2015)

Darüberhinaus hat sich die Trinkwasserqualität in den Behältern von Wassertankfahrzeugen signifikant verschlechtert. Nur 17 der 29 (59 %) untersuchten Proben erfüllten die Anforderungen der Trinkwasserverordnung. Durch den Wassertransfer hat die Trinkwasserqualität 41 % an Einbußen hinnehmen müssen, weswegen eine Einleitung von gründlichen Audits über die gesamte Lieferkette des Trinkwasser von großer Bedeutung sind.

Ferner ist eine Verschiebung der Balken der beiden Flugzeugtypen in Richtung höherer Keimkonzentration zu beobachten. Genau 54 von 60 Proben aus dem Langstreckenflugzeug wiesen eine bedenkliche Keimkonzentration von mehr als 100 KBE/ml auf. Das senkt die Trinkwasserqualität um den Wert von 0,49 auf 10 %. Das Kurzstreckenflugzeug, welches bei der vorletzten Kategorie: 1.000 ... 9.999 KBE/ml den größten Balkenwert (Bild 6.7) annimmt, schnitt insgesamt um 5 % besser ab als das Langstreckenflugzeug.

In der Versuchsreihe B (Bild 6.8) schnitten sowohl das Wassertankfahrzeug als auch die Wasserquelle gut ab. Des Weiteren ist hier ebenfalls eine Verschiebung der Balken im Zuge der Lieferkette in Richtung der höheren Konzentration festzustellen. Lediglich 2 von 111 Proben aus dem Langstreckenflugzeug erfüllten die Anforderungen der Trinkwasserverordnung.

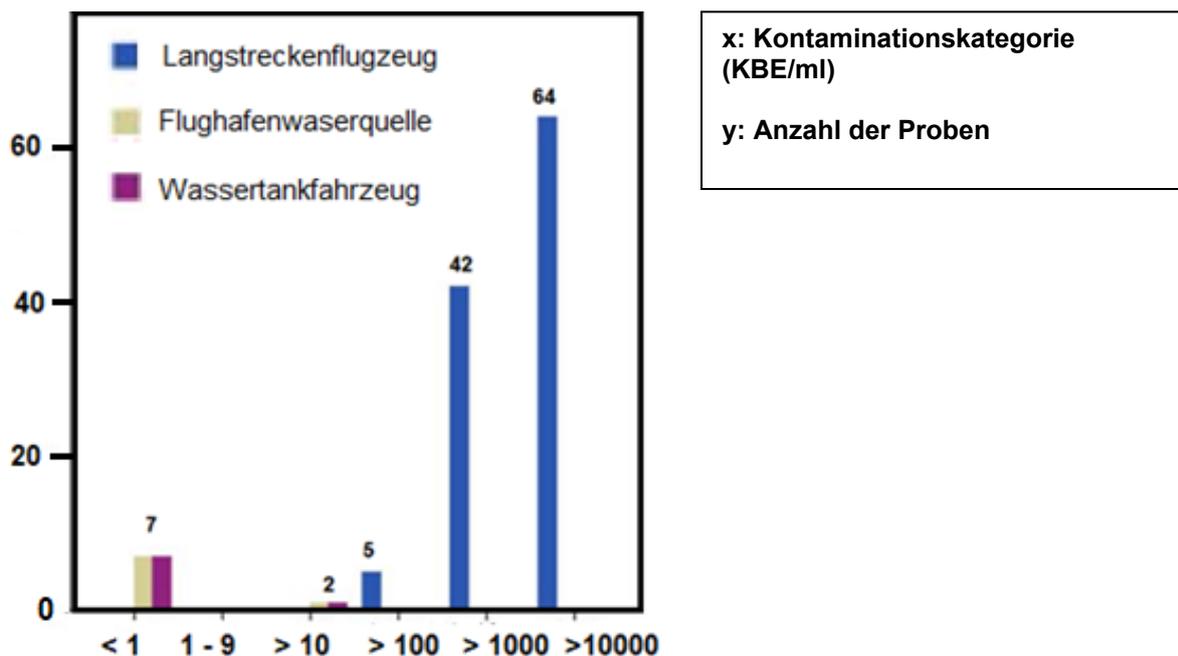


Bild 6.8 Verteilung der Keimbelastung in Versuchsreihe A (nach Handschuh 2015)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Verkeimungsgeschehen in den beiden Flugzeugen alarmierend gewesen ist. Während die Chlorkonzentration im Laufe der Trinkwasserlieferkette abgenommen hat, nahm das Bakterienwachstum einen exponentiellen Charakter an. Daher sind Audits an jedem Transferpunkt sehr wichtig, um einen starken Anstieg von Keimen wie zum Beispiel zwischen der Flughafenwasserquelle und dem Wassertankfahrzeug in der Versuchsreihe A zu unterbinden.

6.3 Interne Studie eines VIP-Flugzeugs

VIP Flugzeuge sind aufgrund ihres ungewöhnlichen Benutzungsprofils im Gegensatz zu kommerziellen Flugzeugen einem deutlich höheren Risiko einer hartnäckigen Verkeimung ausgesetzt. Der Grund dafür ist, dass solche Flugzeuge gelegentlich für Langstrecken genutzt werden und die meiste Zeit eher auf dem Vorfeld parken. Der geringe Durchfluss des Trinkwassers fördert die wachsende Verkeimung, da sich Keime in stagnierenden Leitungen am besten vermehren können. Auch wenn der Wassertank vollständig entleert wäre, bleibt eine nicht vermeidbare Restmenge an Flüssigkeit in der Anlage zurück, wodurch sich Keime zusätzlich während der Parkzeit vermehren können.

Wie man bereits aus den vorherigen Studien erfahren hat, liegt die Wahrscheinlichkeit einer hohen Verkeimung bei Langstreckenflugzeugen viel höher als bei Kurzstreckenflugzeugen. Die üblichen Verfahren im AMM sind für Flugzeuge mit geringem Flugaufkommen oder geringer Nutzungsdauer und Intensität nicht zielführend. Im Folgenden wird anhand eines VIP-Flugzeuges, welches im Rahmen einer jährlichen Überprüfung im Hangar stand, die Komplexität der Entkeimung dargestellt.

Bei einem VIP-Flugzeug des Typs A310 wurden während der Wartungsarbeiten an drei Entnahmestellen Wasserproben entnommen und anschließend labortechnisch untersucht. Als die Werte der Probe aus "Lav A" nach der erstmaligen Desinfektion mit Ozon nicht der Trinkwasserverordnung entsprachen (Tabelle 6.6; grau hinterlegt), wurde das Trinkwassersystem mithilfe von Herlisil desinfiziert. Da die Folgeprobe immer noch *P. aeruginosa* enthielt, erfolgte ein weiterer Desinfektionsvorgang, wodurch die *P. Aeruginosa* Konzentration wieder leicht angestiegen ist (LHT 2015).

Tabelle 6.6 Versuchsreihe a (LHT 2015)

Ort der Entnahme	P. Aeruginosa max. 0 KBE/ml	Anzahl bei 22°C max. 1000 KBE/ml	Anzahl bei 36°C max. 100 KBE/ml	Desinfektionsverfahren
Lav A	63	372	880	Ozonung
	3	0	2	Herlisil
	13	2	47	Herlisil
Galley 6	0	18	18	
Lav QL	0	4	20	

Dieser Fall zeigt sehr deutlich, dass Folgeuntersuchungen unersetzlich sind, um auch den Erfolg der Desinfektion zu garantieren. Es kommt nicht selten vor, dass Flugzeuge nach einmaliger Desinfektion die Anforderungen der Trinkwasserverordnung nicht erfüllen. Schon kleine Abweichungen bei der Durchführung können das Ergebnis negativ beeinflussen und die Verkeimung sogar fördern. Daher ist es ratsam, die Wartungsintervalle individuell nach dem Verkeimungsgeschehen zu verkleinern, um vor allem humanpathogene Keime wie *P. aeruginosa* zu vermeiden.

7 Wirksamkeit von Desinfektionsmitteln

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 2 behandelten Desinfektionsmittel auf ihre Wirksamkeit und Auswirkungen auf das Trinkwassersystem vorgestellt. Bei der chemischen Desinfektion weisen die einzelnen zugelassenen Desinfektionsmittel deutliche Unterschiede im Wirkungsbereich auf. Damit auch die jeweilige nachgewiesene Wirksamkeit während der Desinfektion erreicht wird, ist vor allem das genaue Befolgen der Herstellerhinweise und den Vorgaben seitens der Flugzeughersteller von großer Bedeutung, da schon kleinste Abweichungen beim Vorgehen das Endergebnis negativ beeinflussen können. Zudem können Desinfektionsmittel zerstörerische Eigenschaften aufweisen, die bis heute noch nicht vollständig erforscht sind.

7.1 Wasserstoffperoxid

Wirkung von Wasserstoffperoxid

Die Wirkung von Wasserstoffperoxid erwies sich in Keimträgerversuchen eher bakteriostatisch als bakterizid. Dies bedeutet, dass eher die Vermehrung und das Wachstum gehemmt und die Keime nicht vollständig inaktiviert wurden. Ihre abtötende Wirkung gegenüber im Biofilm etablierten Keimen hat sich als schwach erwiesen, weil die Biofilme nur zum Teil entfernt wurden, während der Rest weiterhin an der Innenwand haftend sich weiter vermehren konnte. Darüber hinaus kann die häufige Anwendung von Herlisil dazu führen, dass Biofilme weniger empfindlich auf Wasserstoffperoxid reagieren. Dieser Effekt wird noch einmal durch das Alter der Biofilme verstärkt, denn mit der Zeit werden die organischen Ablagerungen größer und stärker (Schulte 2003).

Auswirkungen von Wasserstoffperoxid

Die Auswirkungen durch das zugelassene Desinfektionsmittel Herlisil sind eher gering und führen vereinzelt zu Lochkorrosionen, wodurch die Chromoxidschicht angegriffen wird und das Rohrmaterial Eisen- und Nickelteilchen verliert. Diese abrasiven Teilchen sind im Trinkwasser oder am Filter nachweisbar. Die Korrosivität kann durch die Erhöhung der Wassertemperatur und der Konzentration beschleunigt werden (Makjan 2019, Herlisil 2009).

7.2 Chlor

Wirkung von Chlordioxid

Chlordioxid sorgt durch seine starke Oxidationskraft von 0,97 V für eine zuverlässige Entkeimung der Trinkwasseranlage und oxidiert dabei die Polysaccharidmatrix, die für den Zu-

sammenhalt des Biofilms verantwortlich ist und inaktiviert binnen weniger Sekunden sehr zuverlässig die darin lebenden Keime. Bernarde hat im Jahr 1965 die bakterizide Wirkung von Chlordioxid untersucht und festgestellt, dass es innerhalb von 60 Sekunden einen isolierten *E. coli* Stamm effektiv eliminieren kann. Des Weiteren erhöhe ein Anstieg der Wassertemperatur bei gleich bleibender Chlordioxidkonzentration die desinfizierende Wirkung, in dem sie die Kontaktzeit mit den Keimen stark reduziert. Resistenzen von Mikroorganismen gegenüber Chlordioxid sind aufgrund der unspezifischen Wirkungsweise des Desinfektionsmittels nicht möglich (NRC 1980, Höll 2002).

Auswirkungen von Chlordioxid

Die Inaktivierung der Keime in den Wasserleitungen erfolgt durch den Angriff von Chlordioxid (ClO_2) in den elektronenreichen Bereich der Mikroorganismen, wodurch das Chlordioxid zu einem Chlorit-Anion (ClO_2^-) reduziert wird. Außerdem kann es auch zur Bildung von Chlorid (Cl^-) und Chlorat (ClO_3^-) kommen. Hohe Konzentrationen von Chlorid-Ionen kann die metallische Oxidationsschicht an den Innenwänden der Rohre lokal angreifen und aufbrechen, was schlussendlich zu einer Loch- und Spannungskorrosion (Bild 7.1) führen kann. Begünstigt wird dieser Prozess durch erhöhte Temperaturen, geringes Elektrodenpotential des Materials und niedrige Fließgeschwindigkeiten. Gleichzeitig findet eine starke Beanspruchung der Schweißnähte, Dichtungen und Lötstellen statt, wodurch mit der Zeit die Bauteile ausgewechselt werden müssen (Höll 2002, Hemme 2021).

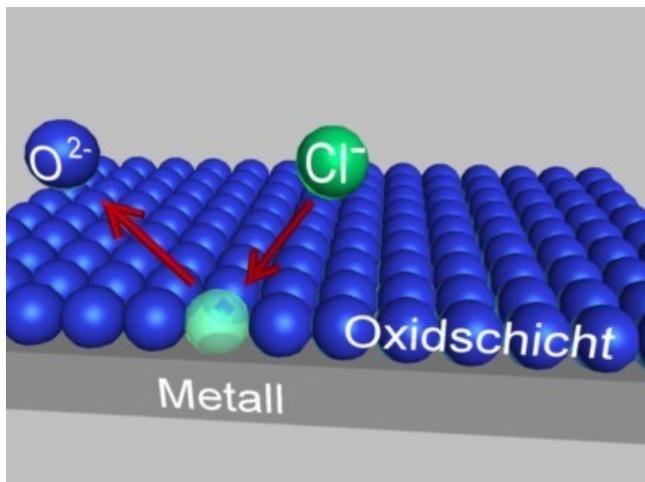


Bild 7.1 Lochkorrosion (Wikipedia 2021j)

Wirkung von Chloramin

Die desinfizierende Wirkung von Chloramin ist aufgrund der niedrigen Abspaltung von hypochloriger Säure HOCl schwach und erweckt den Anschein, dass sie die Trinkwasseranlage zuverlässig desinfiziert. Die Chemikalie schafft es gerade, die Indikatorkeime wie *E. coli* und Coliforme zu inaktivieren, während andere humanpathogene Keime verschont bleiben. Vor allem die in Biofilmen befindlichen Parasiten werden von Chloramin nicht abgetötet (Höll 2002).

Auswirkungen von Chloramin

Die üblichen verwendeten Materialien für Trinkwassersysteme sind diesbezüglich korrosionsbeständig und haben somit keine nennenswerten Auswirkungen.

7.3 Ozon

Wirkung von Ozon

Ozon bewirkt aufgrund seines hohen Oxidationspotentials von 2,07 V eine zuverlässige Entfernung von Biofilmen in Trinkwasseranlagen und ist reaktiver als chlorhaltige Chemikalien. In einem Versuch von Hässelbarth 1980 wurde eine zehnmal schnellere Inaktivierung von E. Coli mit Ozon gegenüber Chlor beobachtet. Im Vergleich zu Chlor weist Ozon eine hohe Instabilität auf, weswegen es schneller mit organischen Verbindungen im Wasser reagiert. Aufgrund dieser Schnelligkeit kann es durchaus passieren, dass das Trinkwasser mit Zunahme des zurückgelegten Weges immer ozonarmer wird, sodass kurz vor den Entnahmestellen keine desinfizierende Wirkung mehr vorhanden ist. Nach der Oxidation mit Ozon kommt es zu schwer abbaubaren organischen Verbindungen in der Trinkwasseranlage, die durch mehrere Spülvorgänge aus der Anlage herausgespült werden müssen. Andernfalls dienen sie als Nahrungsquelle für Mikroorganismen (Roeske 2007, Höll 2002).

Auswirkungen von Ozon

Die Wirkung von Ozon auf bestimmte Werkstoffe ist bis heute noch wenig erforscht. Die Meinungen sind und waren immer sehr gespalten zwischen denen, die eine erhöhte Korrosion beobachtet haben und jenen, die keinerlei Veränderungen an der Oberfläche festgestellt haben. Allerdings ist bis heute bekannt, dass eine Ozonkonzentration von weniger als 7 mg/l bei den üblichen Edelstählen keinen Einfluss auf die Korrosionsrate hat. Jedoch kann das Ozon mit den Inhaltsstoffen von Gummierzeugnissen wie Dichtungen reagieren und die Integrität und den Aufbau des Materials zerstören (Pehkonen 2001).

7.4 Diskussion

In der folgenden Tabelle werden die ausgewählten Desinfektionsmittel in ihrer Wirksamkeit und in Hinblick auf ihre negativen Beeinflussungen auf die Trinkwassersystemkomponenten systematisch dargestellt. Es zeigt sich, dass das Desinfizieren mit Ozon am besten gelingt, da das Trinkwassersystem lediglich nur gering beansprucht wird und gleichzeitig eine sehr gute Desinfektion stattfindet.

Tabelle 7.1 Gegenüberstellung der einzelnen Desinfektionsverfahren

Desinfektionsmittel	Wirksamkeit	Negative Beeinflussungen
Wasserstoffperoxid	Befriedigend (bakterizid)	Gering (vereinzelt Lochkorrosionen)
Chlorhaltige Chemikalien	Gut (zuverlässige Entkeimung) Lange Depotwirkung	Starke Beanspruchung der Schweißnähte, Dichtungen und Lötstellen Loch- und Spannungskorrosionen treten öfters auf
Ozon	Sehr gut (reaktiver als chlorhaltige Chemikalien) Kurze Depotwirkung	Geringe Beanspruchung von Gummierzeugnissen Minimale Korrosionsförderung

8 Zusammenfassung und Ausblick

Routineuntersuchungen des Flugzeugtrinkwassers weisen öfters mikrobiologische Belastungen mit pathogenen Keimen auf und stellen die Fluggesellschaften damit weiterhin vor besonderen Herausforderungen, die mit dem aktuellen Stand der Technik noch nicht wirkungsvoll zu bewältigen sind.

Insbesondere Flugzeugtrinkwassersysteme mit einer geringen Nutzungsdauer, wie z.B. VIP-Flugzeuge, wiesen erhöhte Kontaminationswerte auf, weswegen solche Flugzeugarten mit besseren Hygienekonzepten auszustatten sind.

Um eine Verunreinigung so weit wie möglich zu reduzieren, sind Stichproben in der gesamten Lieferkette des Trinkwassers im Bereich des Flughafens unumgänglich.

Kontaminationen aus dem Pneumatiksystem, welches für die Bedruckung für das Trinkwassersystem fungiert, können für das Trinkwasser eine Gefahr darstellen, weswegen über eine professionelle Filterung nachgedacht werden muss.

Bestehende Flugzeuge werden sehr wahrscheinlich jahrzehntelang mit dem aktuellen Bedruckungssystem ohne gute Filterung weiterfliegen, während zukünftige Luftfahrzeuge Kompressoren oder Pumpen für die Bedruckung des Trinkwassersystems nutzen werden. Spätestens in 20 bis 30 Jahren wird das chemische und metallische Kontaminationsproblem aus der Welt geschaffen sein, während für die biologische Verunreinigung nachhaltige Umstrukturierungen notwendig sind.

Literaturverzeichnis

AIRBUS, 2015. Aircraft Maintenance Manual: Potable Water System-Servicing. Hamburg, Deutschland: Airbus Operations. Internes Dokument. (Kontakt: Lufthansa Technik).

AIRBUS, 2020. Aircraft Parking and Storage.

Verfügbar über: <https://safetyfirst.airbus.com/aircraft-parking-and-storage/>

Archiviert als: <https://perma.cc/WTS2-FXLH>

AIRBUS 320 THEORY, 2016. Engine Bleed System. In: *Facebook*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3iWsxpt>

Archiviert als: <https://perma.cc/GG66-32XA>

AEROMODELBASIC, 2012. *Full Flow System, a Full Flow Type Oil System*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3At1Uyo>

Archiviert als: <https://perma.cc/M39B-QBDA>

ANDERSON, Judith, 2019. Oil Fume Events on Aircraft: How Often? In: *International Aircraft Cabin Air Conference 2019* (Imperial College London, 2019-09-17/18).

Verfügbar über: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4464332>

AQUAFREE, 2019. *Was ist ein Biofilm?*

Verfügbar über: <https://www.aqua-free.com/de/magazin/was-ist-ein-biofilm>

Archiviert als: <https://perma.cc/LN6A-CLBP>

AVIATION BOOK, 2019. Drain Mast. In: *Facebook*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3iWLxEu>

Archiviert als: <https://perma.cc/P8SG-YDD5>

AVIATION MEDIA & IT, 2018. *Eine Boeing 747-8 als Staatsgeschenk*.

Verfügbar über: <https://www.aero.de/news-29980/Eine-747-8-als-Staatsgeschenk.html>

Archiviert als: <https://perma.cc/VQW5-T9T9>

AVIATIONWEEK, 2016. *CFM56 Engine's Performance, Extended Time-On-Wing Advantage*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3mVVQ8X>

Archiviert als: <https://perma.cc/BFD2-XYDU>

BRÄUNLING, Willy J.G., 2015. *Flugzeugtriebwerke*. Berlin, Deutschland: Springer.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34539-5> (closed)

CHAKRABARTY, Sutapa; SARMA, Hari, 2010. Heavy Metal Contamination of Drinking Water in Kamrup District, Assam, India. In: *Springer*. Assam, Indien: Gauhati University. Verfügbar über: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1750-7>

CLARDY, Mike, 2014. Auburn Researchers Say Harmful Bacteria Can Survive for a week inside Airliner Cabins. In: *Advance Local*. Auburn, USA: Auburn University. Verfügbar über: <https://bit.ly/3DrfQMt>
Archiviert als: <https://perma.cc/2AUN-T6J7>

COLOGNA, LD, 2019. *ASM Failure Analysis Case Histories: Air and Spacecraft*. USA: ASM International. Verfügbar über: <https://doi.org/10.31399/asm.fach.aero.9781627082174>

DOCHECK, 2021. *Desinfektion*. Verfügbar über: <https://flexikon.doccheck.com/de/Desinfektion>
Archiviert als: <https://perma.cc/TP56-GHJ8>

DUDEN, 2018. Das Bedeutungswörterbuch.

DURING, Rainer, 2001. Legionellen im Flugzeug. In: *Der Tagespiegel*. 24.03.2001. Verfügbar über: <https://bit.ly/3geP1jy>
Archiviert als: <https://perma.cc/E59K-G4N5>

EASA, 2008. *Regulation (EC) No 216/2008*. Verfügbar über: <https://bit.ly/3iIyc39>
Archiviert als: <https://perma.cc/66TV-889Y>

EASA, 2017. *CAQ-Preliminary Cabin Air Quality Measurement Campaign*. Verfügbar über: <https://bit.ly/30WuMn2>
Archiviert als: <https://perma.cc/798C-CW6K>

EASA, 2020. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines*. Verfügbar über: <https://bit.ly/3E6bEB3>
Archiviert als: <https://perma.cc/RL4G-MZFE>

EPA, 2008. *Aircraft Drinking Water Rule (ADWR)*. Verfügbar über: <https://bit.ly/3xxwaa8>
Archiviert als: <https://perma.cc/F944-N4QG>

EPA, 2021. *National Primary Drinking Water Regulations*. Verfügbar über: <https://bit.ly/353R2cQ>
Archiviert als: <https://perma.cc/CGU4-F955>

EXXONMOBIL, 2016. *Jet Engine Oil System, Part 2*.

Verfügbar über: <https://exxonmobil.co/3v3fiIo>

Archiviert als: <https://perma.cc/AXJ6-ZUGZ>

FAZ, 2020. *Das harte Ringen um die Lufthansa-Rettung*. Frankfurt, Deutschland: Frankfurter Allgemeine.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3lx4csh>

Archiviert als: <https://perma.cc/GC46-Q8NQ>

FELTON, Ryan, 2021. How Safe Is Our Drinking Water?. In: *Consumer Reports*. New York, USA.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3vbRvpN>

Archiviert als: <https://perma.cc/5XRD-WEYD>

FINNEY, Chris, 2004. Lufteinlässe der Klimaanlage bei einer DC8-63F. In: *Wikipedia*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3JyCgxP>

Archiviert als: <https://perma.cc/W9LQ-9ZBY>

FLICKR, 2006. *Biochip Technology*.

Verfügbar über: <https://www.flickr.com/photos/argonne/4728736844>

Archiviert als: <https://perma.cc/U3TB-6TH5>

FLIGHT MECHANIC, 2021. *Turbine Lubrication System Components-Oil Pump*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3AyuiPL>

Archiviert als: <https://perma.cc/MMD5-RSET>

FLIGHTRADAR24, 2021. *Lufthansa Fleet*.

Verfügbar über: <https://www.flightradar24.com/data/airlines/lh-dlh/fleet>

Archiviert als: <https://perma.cc/Z2U3-FEMV>

GEISSMANN, 2013. Koloniebildende Einheit. In: *Wikipedia*.

Verfügbar über: https://de.wikipedia.org/wiki/Koloniebildende_Einheit

Archiviert als: <https://perma.cc/H57C-FJGG>

HANDSCHUH, Harald; O'DWYER, Jean; ADLEY, Catherine C, 2015. Bacteria That Travel: The Quality of Aircraft Water. In: *mdpi*. Limerick, Irland: University of Limerick.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.3390/ijerph121113938>

HANSEN, Richard, 2019. Suspected Air Quality Problems on Board-Experiences and Actions. In: *International Aircraft Cabin Air Conference 2019* (Imperial College London, 2019-09-17).

Verfügbar über: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4464537>

HEMME, 2021. *Chlordioxid: Dosierfertige Chlordioxidlösung IN DIOX-3*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3ydb95>

Archiviert als: <https://perma.cc/WD5Z-BTU4>

HERLISIL, 2009. *Entkeimung von Wasserverteilungsanlagen*. Frankfurt am Main: Herlisil GmbH. Internes Dokument. (Kontakt: Lufthansa Technik)

HFSGE, 2021. *2500 Liter Potable Water Truck 2800 MM Height Provide Drink Water to Aircraft*.

Verfügbar über: <http://www.hfgse.com/msg.php?id=32>

Archiviert als: <https://perma.cc/EL48-TEZ7>

HÖLL, Karl, 2002. *Wasser. Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung*. Berlin, Deutschland: Walter de Gruyter.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1515/9783110226782> (closed)

HOUTZAGER, Marc und andere, 2013. *Investigation of Presence and Concentration of Tricresyl Phosphates in Cockpits of KLM Boeing 737 Aircraft during Normal Operational Conditions*. Den Haag, Niederlande: TNO. Report: 11976.

Verfügbar über: <https://bit.ly/36AZ124>

Archiviert als: <https://perma.cc/N6DE-9PBR>

HOUTZAGER, Marc und andere, 2017. *Avoil: Characterisation of the Toxicity of Aviation Turbine Engine Oils after Pyrolysis*. Projekt. Köln, Deutschland: EASA.

Verfügbar über: <https://bit.ly/35PljMU>

Archiviert als: <https://perma.cc/9AJP-UG2M>

HUSBAND, J., 2007. Developing an Efficient FEM Structural Simulation of a Fan Blade off Test in a Turbofan Jet Engine. In: *Semantic Scholar*. Saskatoon, Kanada: University of Saskatchewan.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3iU6D6j>

Archiviert als: <https://perma.cc/UC83-RGJR>

HYDROBLUE, 2021. *UF Membrane Filter*.

Verfügbar über: <https://www.hydrobluemem.com/products/uf-membrane-filter/>

Archiviert als: <https://perma.cc/32Y2-24W6>

ICAO, 2012. Aircraft Flight Mechanics. In: *Wikipedia*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3mR5A8e>

Archiviert als: <https://perma.cc/Z9KR-AVDD>

IATA, 2013: *Iata Drinking Water Quality Pool Safety Standards*. Internes Dokument (Kontakt: Lufthansa Technik).

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER), 2007. *Edelstahl Rostfrei für die Wasserwirtschaft*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/35OGRt3>

Archiviert als: <https://perma.cc/JF42-NKSU>

KAISAN, Muhammad Usman; ABUBAKAR, Shitu; NARAYAN, Muhammed Mustapha, 2019. Determination of Wear Metals Debris Concentration in Aircraft Engines. In: *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, no. 2.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1917.078219>

KARBERG & HENNEMANN, 2021. *Partikel im Öl*.

Verfügbar über: <https://www.cjc.de/partikel-im-oel/>

Archiviert als: <https://perma.cc/WY5E-CN9E>

LACEY, Steven, 2009. *Exposure to Human Waste from Spills While Servicing Aircraft Lavatories: Hazards and Methods of Prevention*. Chicago, USA: University of Illinois.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3JZAaaj>

Archiviert als: <https://perma.cc/2YDB-W8N7>

LHT, 2015. *Gegenüberstellung der Laborwerte*. Hamburg, Deutschland: Lufthansa Technik AG. Internes Dokument (Kontakt: Lufthansa Technik).

LHT, 2016. *Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur sicheren Desinfektion von Trinkwasseranlagen in Verkehrsflugzeugen mit der Flugbereitschaft [...] als Erprobungsträger*. Hamburg, Deutschland: Lufthansa Technik AG. Internes Dokument (Kontakt: Lufthansa Technik).

LHT, 2020. *EDX Analysis of Water Filter Contamination*. Hamburg, Deutschland: Lufthansa Technik AG. Internes Dokument (Kontakt: Lufthansa Technik)

LHT, 2021a. Re: Druckluftquellen verschiedener Flugzeuge [E-Mail]. From: joern.sundermann@lht.dlh.de, To: mehmet.oecalan2@haw-hamburg.de, 2021-09-29.

LHT, 2021b. Re: Bilder zum Trinkwassersystem [E-Mail]. From: joern.sundermann@lht.dlh.de, To: mehmet.oecalan2@haw-hamburg.de, 2021-03-15.

LUFTHANSA, 1999. *Lufthansa Technical Training: Training Manual A319/A320/A321, ATA 71-80, Engine CFM56-5A*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3DyiZcd>

Archiviert als: <https://perma.cc/EYC6-87WT>

LUFTREINIGERDEPOT, 2021. *Was bedeutet HEPA?*.

Verfügbar über: <https://www.luftreinigerdepot.de/fachbegriffe/hepa>

Archiviert als: <https://perma.cc/XR2A-4NY3>

LINKE-DIESINGER, Andreas, 2014. *Systeme von Turbofan-Triebwerken*. Berlin, Deutschland: Springer.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44570-9> (closed)

LOHMANN & RAUSCHER, 2021. *Pseudomonas Aeruginosa*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3LGx4bL>

Archiviert als: <https://perma.cc/UWF9-JYV5>

LOSS, P., 2015: *Chloride in der Korrosion - wie das Salz in der Suppe?*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3yFuRqy>

Archiviert als: <https://perma.cc/G67S-E8JX>

LTM, 2014. *Legionella Testing & Monitoring*.

Verfügbar über: <http://www.ltmmidlands.co.uk>

Archiviert als: <https://perma.cc/PN6Y-4K2E>

MAKJAN, S., BOONSRI, P., CHANNUIE, J., KANJANA, K., 2019. Effects of Hydrogen Peroxide on 304 Stainless Steel in High Temperature Water. In: *Journal of Physics*. vol. 1380, pp. 2-5.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012087>

MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT OF CHINA (MEE), 1997. *Environmental Quality Standards for Surface Water*.

Verfügbar über: <http://english.mee.gov.cn/SOE/soechina1997/water/standard.html>

Archiviert als: <https://perma.cc/G5AW-H2RD>

MUIR, D.; HOWE, B.CUMP, 1996. *In-Line Oil Debris Monitor (ODM) for the Advanced Tactical Fighter Engine*. USA: SAE International.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.4271/961308>

MUIR, Helen; WALTON, Christopher; CUMP, Derrick; HARRISON, Derrick, 2011. *Aircraft Cabin Air Sampling Study: Part 1 of the Final Report*. Vereinigtes Königreich: Cranfield University.

Verfügbar über: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/5305>

MONARCH, 2016. *BOEING 787-8, GENX / RR ATA 38 Water and Waste*. Luton, Vereinigtes Königreich: Monarch. Internes Dokument (Kontakt: Lufthansa Technik).

MICHAELIS, S., 2016. *Implementation of the Requirements for the Provision of Clean Air in Crew and Passenger Compartments Using the Aircraft Bleed Air System*. Cranfield, Vereinigtes Königreich: Cranfield University.

Verfügbar über: <https://purl.org/cabinair/MICHAELIS-2016>

National Airline History Museum (NAHM), 2021. *Classic Pratt and Whitney JT3D Engines*.

Verfügbar über: <https://www.pinterest.de/pin/476818679273895143/>

Archiviert als: <https://perma.cc/FWR7-6C88>

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 1980. *Drinking Water and Health*. vol. 2.

Washington D.C., USA: The National Academies Press. ISBN 978-0-30-902931-5.

NAZARI, Medhi; SHI, Xianming, 2018. *Vehicle Risks of Winter Road Operations and Best Management Practices*. Washington, USA: Washington State University.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1002/9781119185161.ch12>

P&W, 2014. PW 4000-94 Inch Fan Engine.

Verfügbar über: <http://newsroom.pw.utc.com/download/PW4000-94.jpg>

Archiviert als: <https://perma.cc/6QJ6-BWUX>

PEHKONEN, Antero, 2001. *The Effect of Dissolved Ozone on the Corrosion Behaviour of Some Stainless Steels*. Dissertation. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology.

Verfügbar über: <http://lib.tkk.fi/Diss/2001/isbn9512257637/>

Archiviert als: <https://perma.cc/S258-Q6QJ>

PLATKIN, Charles, 2019. *Airline Water Study 2019*. New York City, USA: Hunter College.

Verfügbar über: <https://dietdetective.com/airline-water-study-2019/>

Archiviert als: <https://perma.cc/8TFG-MX7Z>

PODBREGAR, Nadja, 2019. Die Schattenseiten der Entsalzung. In: *Scienexx*. 2019-01-16.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3K5sPWB>

Archiviert als: <https://perma.cc/DK82-AEWF>

RIDDERBUSCH, Katja, 2021. Veraltet und marode / wie die US-Infrastruktur modernisiert werden soll. In: *Deutschlandfunk*. 2021-11-09.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3qO0nQP>

Archiviert als: <https://perma.cc/GT2U-4AS6>

ROESKE, Wolfgang, 2007. *Trinkwasserdesinfektion*. München, Deutschland: Oldenbourg Industrieverlag.

RYAN, Felton; GILL, Lisa; KENDALL; Lewis, 2021. How Safe Is Our Drinking Water?. In: *Consumer Reports*. 2021-03-31.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3vMFgPg>

Archiviert als: <https://perma.cc/DZ8J-QRZ4>

SCHICHT, 2021. [...] *Thermische Desinfektion Einfach. Schnell. Ohne Chemie.*

Verfügbar über: <https://bit.ly/2TPy33J>

Archiviert als: <https://perma.cc/SY7J-K32E>

SCHOLZ, Dieter, 2013a. Pneumatikversorgung, ATA 36. In: *Flugzeugsysteme*.

Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <http://handbuch.profscholz.de>

Archiviert als: <https://perma.cc/7YGX-Y6UJ>

SCHOLZ, Dieter, 2013b. Wasser-/Abwasseranlage: Water/Waste, ATA 38. In: *Flugzeugsysteme*. Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <http://handbuch.profscholz.de>

Archiviert als: <https://perma.cc/C8WJ-RSRT>

SCHOLZ, Dieter, 2014a. Aircraft Cabin Air & Water Contamination/Quality – An Aircraft Systems Engineering Perspective. In: *QCAQE Meeting* (London, 2014-04-02). Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <http://purl.org/cabinair/AirAndWater>

SCHOLZ, Dieter, 2018. *Jet Engines-Bearings, Seals and Oil Consumption*. Aircraft Design and Systems Group (AERO). Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.31224/osf.io/fk5dq>

SCHOLZ, Dieter, 2019. Contaminated Aircraft Cabin Air - An Aeronautical Engineering Perspective. In: *AVSA Meeting* (Paris Charles de Gaulle Airport, 2019-05-27). Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <http://purl.org/cabinair/AVSA2019>

SCHOLZ, Dieter, 2020. Schadstoffe in der Kabinenluft - Report Mainz [video]. In: *YouTube*.

Verfügbar über: <https://www.youtube.com/watch?v=jHGu83gC6V4>

SCHOLZ, Dieter, 2021a. Hearing on the Operation of Air Conditioning in Aircraft Cabins and the Associated Air Quality. In: *ANSA Meeting* (Online, 2021-07-08). Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5083058>

SCHOLZ, Dieter, 2021b. Aircraft Cabin Air and Engine Oil - An Engineering Update. In: *ACA Conference* (Online, 2021-05-15). Hamburg, Deutschland: HAW Hamburg.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4743773>

SCHULTE, Simone, 2003. *Wirksamkeit von Wasserstoffperoxid gegenüber Biofilmen*. Dissertation. Duisburg, Deutschland: Universität Duisburg-Essen.

Verfügbar über: <https://d-nb.info/969833989/34>

Archiviert als: <https://perma.cc/GK7T-6XLA>

SCHWEISSFACHHANDEL24, 2021. *Warum rostet Edelstahl nicht?*

Verfügbar über: <https://www.schweissfachhandel24.de/Elektrolyt-Beizgeraete>

Archiviert als: <https://perma.cc/4NKM-RZY7>

SCNAT, 2021. *Mikroorganismen*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3v4zgT8>

Archiviert als: <https://perma.cc/4583-BHUN>

SKYDIVING, 2021. Re: Trinkwasserservicepanel. From: lingo89@hotmail.de, To: mehmet.oecalan2@haw-hamburg.de, 2021-03-19.

SONG, Yarong; JIANG, Guangming; CHEN, Ying; ZHAO; Peng; TIAN, Yimei, 2017.

Effects of Chloride Ions on Corrosion of Ductile Iron and Carbon Steel In Soil Environments. In: *nature portfolio*. Tianjin: Tianjin University.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07245-1>

STACKEXCHANGE, 2015. *How Does This Vortex Form inside a Jet Engine?*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3BDF2xI>

Archiviert als: <https://perma.cc/58X5-QB25>

STEINKE, Sebastian, 2018. Junger VIP-Jumbo steht zum Verkauf. In: *Flugrevue*. 2018-08-20.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3qMeypv>

Archiviert als: <https://perma.cc/S2XG-92KM>

TRINKWV, 2020. *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3qTGhFG>

Archiviert als: <https://perma.cc/BE2Z-8HU5>

UMWELTBUNDESAMT (UBA), 2017. *Toxikologie des Trinkwassers*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3gLWiJ8>

Archiviert als: <https://perma.cc/ESS9-RNS3>

UMWELTBUNDESAMT (UBA), 2021. *Bericht des Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch in Deutschland (2017-2019)*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/3qkFuMf>

Archiviert als: <https://perma.cc/5KUC-GAH9>

VAN NETTEN, Christian, 1998. *Air Quality and Health Effects Associated with the Operation of BAe 146-200 Aircraft*. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 1998, 13. vol., no. 10, pp. 733-739.

VESTERGAARD, 2021. *Small Water Service*.

Verfügbar über: <https://vestergaardcompany.com/product/water-service/sws/>

Archiviert als: <https://perma.cc/Z8YF-PL28>

VIKASPEDIA, 2021. *Water Quality and Standards*.

Verfügbar über: <https://bit.ly/36SUnA2>

Archiviert als: <https://perma.cc/AY8Q-CQ7U>

VOTH, Viola, 2018. *Analyse der Entstehungsmechanismen von Ölnebel in Flugzeugkabinen*. Bachelor Thesis. Braunschweig, Deutschland: Technische Universität Braunschweig.

Verfügbar über: <https://purl.org/cabinair/VOTH-2018>

WHO, 2009. *Guide to Hygiene and Sanitation in Aviation*.

Verfügbar über: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547772>

Archiviert als: <https://perma.cc/L9GG-WMXQ>

WHO, 2017. *Guidelines for Drinking-Water Quality*.

Verfügbar über: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Archiviert als: <https://perma.cc/E49N-AQNL>

WIKIPEDIA, 2021a. *Kurzstreckenflugzeug*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kurzstreckenflugzeug>

Archiviert als: <https://perma.cc/HMS2-29BR>

WIKIPEDIA, 2021b. *Langstreckenflugzeug*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Langstreckenflugzeug>

Archiviert als: <https://perma.cc/HK7G-JGK8>

WIKIPEDIA, 2021c. *Bakterielles Wachstum*.

Verfügbar über: https://de.wikipedia.org/wiki/Bakterielles_Wachstum

Archiviert als: <https://perma.cc/WDE3-GM5A>

WIKIPEDIA, 2021d. *Wasserstoffperoxid*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoffperoxid>

Archiviert als: <https://perma.cc/H32M-P39T>

WIKIPEDIA, 2021e. *Drinking Water Quality Standards*.

Verfügbar über: https://en.wikipedia.org/wiki/Drinking_water_quality_standards

Archiviert als: <https://perma.cc/K3S5-9XYC>

WIKIPEDIA, 2021f. *Rost*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rost>

Archiviert als: <https://perma.cc/K43A-VYN3>

WIKIPEDIA, 2021g. *Edelstahl*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl>

Archiviert als: <https://perma.cc/YVE5-ZJHS>

WIKIPEDIA, 2021h. *Chlorung*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Chlorung>

Archiviert als: <https://perma.cc/6FG5-SPD2>

WIKIPEDIA, 2021i. *Bakterielle anaerobe Korrosion*.

Verfügbar über: https://de.wikipedia.org/wiki/Bakterielle_anaerobe_Korrosion

Archiviert als: <https://perma.cc/CBH6-UCBR>

WIKIPEDIA, 2021j. *Lochfraßkorrosion*.

Verfügbar über: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lochfraßkorrosion>

Archiviert als: <https://perma.cc/UT55-S9WY>

XU, Hao; FU, Qingyan; YU, Yamei, 2017. Quantifying Aircraft Emissions of Shanghai Pudong International Airport with Aircraft Ground Operational Data. In: *ScienceDirect*. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University.

Verfügbar über: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114115>

ZDF, 2014. Membranfiltration / Ultrafiltration [video]. In: *YouTube*.

Verfügbar über: https://www.youtube.com/watch?v=Ho0MMVh_U6Y

Archiviert als: <https://perma.cc/J994-H6RC>

Alle verfügbaren Links wurden am 2021-09-29 auf ihre Aktualität hin überprüft.

Anhang A: Ergebnisse der Studie des Hunter Colleges in New York City

Dieser Anhang enthält eine Zusammenfassung über die einzelnen Parameter aus der Studie von Dr. Platkin. Aus ihr können folgende Kennwerte entnommen werden:

- Flottengröße
- ADWR-Verstöße
- Verstoß pro Flugzeug
- Zusammenarbeit
- positive Befunde von coliforme Keime und E.coli

Tabelle A.1 Ergebnisse der Studie von Platkin I/II (major) (Platkin 2019)

Fluggesellschaften	Flottengröße	ADWR- Verstöße	Verstoß pro Flugzeug	Zusammenarbeit
Alaska Airlines	335	2	0,01	schlecht
Allegiant	91	6	0,06	schlecht
American Airlines	968	108	0,11	schlecht
Delta Airlines	916	213	0,23	gut
Frontier Airlines	91	19	0,21	schlecht
Hawaiian Airlines	57	25	0,44	bemüht
Jet Blue	254	354	1,4	schlecht
Southwest Airlines	754	33	0,04	schlecht
Spirit Airlines	135	193	1,43	schlecht
United Airlines	786	79	0,1	schlecht

Tabelle A.2 Ergebnisse der Studie von Platkin II/II (major) (Platkin 2019)

Fluggesellschaften	E.coli	coliforme Keime
Alaska Airlines	1	64
Allegiant	2	0
American Airlines	23	660
Delta Airlines	15	359
Frontier Airlines	4	8
Hawaiian Airlines	0	7
Jet Blue	9	144
Southwest Airlines	2	122
Spirit Airlines	1	31
United Airlines	3	205

Tabelle A.3 Ergebnisse der Studie von Platkin I/II (regional) (Platkin 2019)

Regionale Fluggesellschaften	Flottengröße	ADWR-Verstöße	Verstoß pro Flugzeug
Piedmont Airlines	60	1	0,02
Sun Country Airlines	30	19	0,63
Envoy Air	63	63	1
GoJet Airlines	53	26	0,49
Trans States Airlines	46	33	0,72
Compass Airlines	56	113	2,02
PSA Airlines	144	73	0,54
SkyWest Airlines	512	117	0,23
Endeavour Air	157	322	2,05
Air Wisconsin Airlines	64	188	2,94
Expressjet Airlines	128	430	3,36
Republic Airways	191	132	0,69
Mesa Airlines	145	73	0,5

Tabelle A. 4 Ergebnisse der Studie von Platkin II/II (regional) (Platkin 2019)

Regionale Fluggesellschaften	E.Coli	coliforme Keime
Piedmont Airlines	0	5
Sun Country Airlines	2	8
Envoy Air	24	172
GoJet Airlines	2	64
Trans States Airlines	2	0
Compass Airlines	0	65
PSA Airlines	7	89
SkyWest Airlines	25	1042
Endeavour Air	14	430
Air Wisconsin Airlines	4	133
Expressjet Airlines	12	670
Republic Airways	6	125
Mesa Airlines	7	67