

BV5-U

Ihr Zeichen: A5 150 967 61H 19
Ihre Nachricht vom: 01.11.2016
Unser Zeichen:
Bearbeitung: Herr Metzdorf
Telefon: 040 3980-1914
Fax: 040 3980-1992
E-Mail: ulrich.metzdorf@bg-verkehr.de
Datum: 16.12.2016

Stellungnahme

Versicherter: [REDACTED]
Ereignis vom 02.03.09.2015
Az. A5 150 967 61H 19

Sehr geehrte Damen und Herren,

die vorliegende Stellungnahme ist gegliedert in Allgemeine Informationen zur Smell-Event-Thematik und die Stellungnahme zur Arbeitsplatzexposition des Versicherten. Wir möchten durch die ausführliche Darstellung erreichen, dass die recht komplexen Hintergründe verständlich werden und stehen für Rückfragen gern zur Verfügung.

1. Allgemeine Informationen

1.1 Frischluftversorgung im Flugzeug und Geruchseignisse

Die Frischluftversorgung in Flugzeugen erfolgt am Boden über die APU (Auxiliary Power Unit) und während des Fluges mit sog. Zapfluft (engl. bleedair), die an den Triebwerken abgegriffen wird. Je nach Flugzeugausstattung passiert die Zapfluft Ozonkonverter, aber Filtersysteme im engeren Sinne werden an dieser Stelle nicht eingesetzt. Ein Teil der Kabinenluft wird rezirkuliert und dabei mit HEPA-Filtern gereinigt. Die Abkürzung HEPA steht für High Efficiency Particulate Airfilter und beschreibt einen Hochleistungsfilter primär für Partikelaerosole, wie Stäube und z.B. auch für Mikroorganismen. Es ist davon auszugehen, dass schwerflüchtige organische Verbindungen (semi-volatile organic compounds - SVOC) ebenfalls auf HEPA-Filtern abgeschieden werden, auch wenn jene für diesen Einsatzzweck kein definiertes Abscheideverhalten aufweisen. Staubgetragene SVOC werden sicher abgeschieden. Dies zeigt sich auch daran, dass auf dem Filtermaterial Ölkomponenten nach-

gewiesen werden konnten [68, 73]. Niedrigsiedende dampf- oder gasförmige Substanzen werden von HEPA-Filtern nicht oder nur wenig zurückgehalten, dies gilt insbesondere für Kohlenmonoxid. Die Luftaustauschrate im Flugzeug ist hoch, es ist bei Airbus von einem kompletten Luftaustausch etwa alle drei Minuten auszugehen. Der Zapfluftanteil im Cockpit ist höher als in der Kabine und kann bis zu 100% betragen. Die Atemluft in Flugzeugen ist in der Regel von guter, sogar sehr guter Qualität [93]. Durch internationale Vorschriften werden die Flugzeughersteller grundsätzlich veranlasst, die Zuführung qualitativ hochwertiger Luft sicherzustellen.

Durch Überfüllungen von Öl, fehlerhafte Dichtungsvorgänge, Fehlbedienungen und wahrscheinlich auch durch konstruktive Fehler an bestimmten Triebwerken kann es zum Eindringen von Öldämpfen, Ölaerosolen oder Bestandteilen thermisch zersetzter Öle in Kabine und Cockpit kommen. Es besteht kein vernünftiger Zweifel daran, dass es zu derartigen Vorfällen kommt. Die US Association of Flight Attendants hat Oil-Smell-Ereignisse seit 1976 festgestellt [4], es handelt sich folglich nicht um eine neue Problematik. Betroffen sind auch Militärflugzeuge [35, 76, 94]. Ein Teil der Öle kondensiert bereits in dem sehr komplexen System der Luftaufbereitung [3]. Oil-Smell-Ereignisse werden im Promillebereich bezogen auf die Anzahl von Flügen registriert [1, 9, 15, 43], wobei besonders die Startphase auffällt. Einige Flugzeugmodelle mit bestimmten Triebwerksausstattungen sind stärker betroffen. Zu nennen sind hier insbesondere British Aerospace BAe 146 mit Ereignissen im unteren Prozentbereich [0,8 bis 1,5%: 8], Boeing B757 [12] und zeitweise Airbus A340-600 sowie aktuell Airbus A380. Für die USA wurden Douglas DC9 und McDonnell Douglas MD 80 als auffällig eingestuft [43]. Beim A340-600 konnten die Probleme nach unseren Informationen weitgehend abgestellt werden. British Aerospace hat für die BAe 146 Informationsbroschüren über Troubleshooting und Modifikationen herausgegeben [20]. Wahrgenommen werden auffällige Gerüche; in seltenen Fällen sind bläuliche Aerosole sichtbar. Da Gerüche aber auf eine Vielzahl von unterschiedlichsten Ursachen zurückgehen können und nicht allein auf Öle zurückgeführt werden müssen (s. 1.2), wird die genannte Anzahl von Oil-Smell-Ereignissen etwas relativiert. Die Ursache für Gerüche ist in vielen Fällen allein mit Hilfe der Nase als Detektor nicht feststellbar. Auf der anderen Seite gab es wahrscheinlich eine Dunkelziffer nicht gemeldeter Vorfälle, die aber zahlenmäßig nicht abgeschätzt werden kann. Derzeit vorgenommene Standardisierungen beim Reporting werden einer Dunkelziffer sicherlich entgegenwirken.

Solange sich Flugzeuge am Boden befinden und Frischluft zugeführt wird, gelangt auch der typische Flughafengeruch ins Innere. Für diesen Geruch sind vor allem Kerosin sowie Abgase von Flugzeugtriebwerken, Flughafenfahrzeugen und Bodengeräten wie der GPU (Ground Power Unit) verantwortlich. Im Winter kommt noch die Enteisungsflüssigkeit hinzu. Umfangreiche und wiederholte Messungen der BG Verkehr belegen, dass auf dem Flughafenvorfeld keine kritischen Gefahrstoffkonzentrationen auftreten. Nur in unmittelbarer Nähe von GPU mit Dieselaggregaten und ohne Abgasfilter konnten erhöhte Konzentrationen von Dieselmotoremissionen, also der Partikelphase von Dieselabgasen, festgestellt werden. Werden bei einem Flugzeug während des oder kurz vor dem Pushback die Triebwerke angelassen, können die Abgase dieser Triebwerke kurzzeitig eingesogen werden. Auch bei ungünstigen Windverhältnissen kann dies vorkommen. Das erklärt entsprechende Gerüche gerade während dieser Phase.

1.2 Eingesetzte Öle, Pyrolyse und Gerüche

Turbinenöle

Bei den in Flugzeugen eingesetzten Turbinenölen handelt es sich um vollsynthetische Öle. Die Zusammensetzung basiert also nicht wie bei Mineralölen auf Paraffinen, Olefinen, Aromaten usw., sondern die Hauptbestandteile sind Fettsäureester (Kettenlänge ca. C₅ bis C₁₀) mehrwertiger Alkohole (Pentaerythrit und Trimethylolpropan). Wie bei jedem hochwertigen Öl sind darüber hinaus Zusatzstoffe zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften, sog. Additive, enthalten. Bekannt sind die aromatischen Amine N-Phenyl- α -naphthylamin (PAN, 1-5% im Produkt laut Sicherheitsdatenblatt von Mobil Jet Oil II, 2011: 1%) und 4,4'-Dioctyldiphenylamin (1-5%) sowie der Phosphorsäureester Trikresylphosphat (TCP, s. dazu Abschnitt 1.3, 1-5%). Sicherheitsdatenblätter sind im Internet zu finden [z.B. 32]. Es finden sich Hinweise, dass auch N-Phenyl- β -naphthylamin (PBN) enthalten gewesen sein könnte [54, 79], während die meisten Quellen PBN nicht erwähnen - denkbar ist, dass PBN früher als Verunreinigung von PAN aufgetreten ist.

Hydrauliköle

Auch die in Flugzeugen eingesetzten Hydrauliköle sind synthetische Öle, welche TCP als Additiv enthalten könnten. Sicherheitsdatenblätter von Skydrol 5, Skydrol 500B4, Skydrol PE5, Skydrol LD4 und Hyjet IVA-Plus aus den Jahren 2004 bis 2009 weisen jedoch kein TCP aus. Hauptbestandteile bei Hydraulikölen sind Phenyl- und Butylphosphate, also weitere Phosphorsäureester. Bei einer Elementanalyse fand VAN NETTEN entsprechend in Hydrauliköl sehr viel höhere Phosphorgehalte als in Turbinenöl [41], nämlich 11% gegenüber 0,3%. Diese 0,3% entsprechen übrigens rechnerisch ca. 3,5% TCP, falls der Phosphoranteil allein auf TCP zurückzuführen wäre. Die Phenyl- und Butylphosphate sind nach unserer Kenntnis in Turbinenöl nicht enthalten, für das Turbinenöl Mobil Jet Oil II konnte dies im Rahmen der Analytik im Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) belegt werden.

Verschiedentlich wurden bei Messungen Butyl- und Phenylphosphate nachgewiesen. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass Quelle für Oil-Smell-Ereignisse nicht allein Turbinenöle sind, sondern auch Hydrauliköle (vgl. Abschnitt 1.7.2 und [100]). British Aerospace weist in seinen Trouble-Shooting-Unterlagen auf "Hydraulic System Leaks" hin [20]. Wichtig ist, zu beachten, dass Butyl- und Phenylphosphate auch als Flammschutzmittel insbesondere in Kunststoffen vielfältig und nicht nur in Flugzeugen eingesetzt werden. Hier ist von einer Hintergrundbelastung der Allgemeinbevölkerung auszugehen - dies gilt nicht für TCP [110].

Thermische Zersetzung von Turbinenölen

Die Frischöle riechen schwach ölig. Durch den normalen Einsatz kommt es zu thermischen und mechanischen Belastungen des Öls. In Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen könnte es darüber hinaus bei Kontaminationen zur Zersetzung von Ölbestandteilen kommen, zur sogenannten Pyrolyse. Dabei würden Verbindungen entstehen, die zuvor im Öl nicht enthalten waren. Über diese Umgebungsbedingungen gibt es sehr verschiedene Angaben. Über die Temperaturen finden sich folgende Werte: am Triebwerk ca. 370°C und an der APU ca. 230°C [80], 550°C an der Zapfstelle [88], annähernd 500°C [37], 316-427°C [90], 204°C vor Air-Conditioning Packs in Boeing B777 [97]. Darüber hinaus ist der Druck von Bedeutung, da bei Überdruck im Vergleich zu Normaldruck die Zersetzung eingeschränkt wird. Hierzu finden sich in der Literatur keine Angaben. Einer persönlichen Mitteilung entnehmen wir Druckwerte bis zu 28 bar bei Pratt & Whitney PW4060-3-Triebwerken, die z.B. in Boeing B767 eingesetzt werden. Ferner ist die Einwirkungsdauer heißer Oberflächen auf Öle

oder Öldämpfe von Bedeutung. Messungen von typischen Zersetzungsprodukten belegen, dass es zu Pyrolyse kommt - auch wenn dies bei den vorliegenden Daten über Umgebungsbedingungen nicht naheliegt.

Um zu ermitteln, welche Zersetzungsprodukte auftreten können, wurden Laborversuche durchgeführt - soweit ersichtlich jedoch stets bei Normaldruck, so dass die Ergebnisse nicht vollkommen mit den im Flugzeug zu erwartenden Verbindungen vergleichbar sind. In [54] wurden Öle (Castrol 5000, Exxon 2380) auf 525°C erhitzt, also bis an das obere Ende des o.g. Temperaturspektrums. Das Öl wurde nahezu vollständig verdampft. Gefunden wurden neben Alkanen, Alkoholen, Ketonen, Isocyanaten, Anthrachinonen, Silanen und Aminen Diethylphthalat, Benzochinolin, Trikresylphosphate, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Es handelt sich um qualitative Angaben.

In [80] wurde eine große Anzahl von Verbindungen detektiert, nach dem zwei nicht näher benannte synthetische Öle im Labor bei 700°F, 450°F und 250°F (entsprechend ca. 370, 230 und 120°C) erhitzt worden waren. Es sind halbquantitative Angaben in ppm enthalten. Demnach wurden in erster Linie Ketone und Aldehyde von Alkanen und Alkenen wie z.B. 2-Butenal, Alkene wie 1-Hexen, Dihydromethylfurane und ähnliche Verbindungen, Essigsäuremethylester sowie Methoxypropen gefunden; in zweiter Linie einige Alkohole und einfache Aromaten wie Benzol, Toluol und Xylol (BTX).

Uns liegt eine weitere Quelle aus dem Jahr 2009 vor, die jedoch noch nicht publiziert wurde. Ein Öl wurde bei 390°C über bis zu fünf Stunden im Labor pyrolysiert und die Dämpfe in einem definierten Luftstrom abgeführt, so dass annähernd quantitative Aussagen möglich wurden:

- Aus der Gruppe der Organophosphate wurden TCP gefunden, jedoch nicht die ortho-Verbindungen (Nachweisgrenze: 3 µg/g eingesetztem Öl),
- aus der Gruppe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) nur Naphthalin und Pyren in sehr geringen Konzentrationen,
- Aldehyde und Ketone in relativ höheren Konzentrationen insbesondere die leichteren Verbindungen wie Formaldehyd, Acetaldehyd und Butanon - bis etwa Kohlenstoffzahl C₇,
- prominent auch Carbonsäuren: Ameisensäure, Essigsäure, Valeriansäure, nicht jedoch Propionsäure und Buttersäure,
- Phenol und Kresole (meta- und para-Isomere) in geringen Konzentrationen,
- Aliphatische Amine, Alkane und Aromaten wurden mit Ausnahme von Hexan nicht nachgewiesen,
- Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und sehr wenig Stickoxide wurden gefunden. Die Kohlenoxide deuten aufgrund der sehr langen Einwirkungsdauer auf vollständige Pyrolyse hin.
- Phosphorsäure wurde in geringen Konzentrationen gefunden.

Im Vordergrund bei diesen Laborversuchen stehen mengenmäßig neben den Kohlenoxiden Formaldehyd, Acetaldehyd, Butanon, Ameisensäure, Essigsäure, Valeriansäure und TCP. Nachgewiesen wurden darüber hinaus Furanverbindungen (keine quantitativen Angaben vorhanden).

MAIR ET AL [156] untersuchten 2015 die Emissionsmassenströme bei Erhitzung eines Turbinenöls auf 200 bis 300°C und fanden v.a. Alkohole, Aldehyde, Ketone und dominierend organische Säuren der Kettenlängen C₂ bis C₁₀. Gefunden wurden außerdem Furanone, Pyranone, Kresole und TCP-Isomere. Oberhalb von 290°C nimmt der Emissionsmassenstrom überproportional zu.

Gerüche

Gerüche in Flugzeugen sind auf vielfältige Ursachen zurückzuführen. Hierzu existiert eine interne Untersuchung eines Luftverkehrsunternehmens. Zu nennen sind verunreinigte Coffeemaker und Öfen, Lebensmittelgerüche (auch z.B. geröstete Nüsse), Reinigungsmittel, Enteiser, frische Druckerzeugnisse und Faserschreiber, von Passagieren mitgebrachte Artikel, Ausdünstungen von menschlichen Körpern und gelegentlich von Tieren, alkoholhaltige Getränke, vereinzelt Rauchen auf Toiletten oder im Crewrest, elektrische/elektronische Ursachen, Schäden an Geräten in der Galley (hier liegen vereinzelt Unfallmeldungen von derartigen Ereignissen mit akuten Gesundheitsschäden vor) usw. An Öfen werden recht häufig starke Gerüche und sogar Rauche festgestellt, z.B. weil Papier, Aufkleber oder andere hitzeempfindliche Materialien hineingeraten sind. Gerüche konnten auch auf starken Pollenflug oder Gewitter zurückgeführt werden. Nicht in allen Fällen konnte eine klare Ursache identifiziert werden.

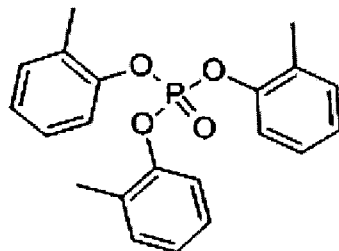
In Flugzeugen auftretende Gerüche sind also keineswegs monokausal auf Öle zurückzuführen. Die meisten Gerüche werden als eher unangenehm bewertet. Ob mit Gerüchen Gefährdungen verbunden sind, ist im Einzelfall zu prüfen. Leider ist die Nase als Detektor ein unzureichendes Hilfsmittel, weil auf der einen Seite intensiv-unangenehme Gerüche häufig vollkommen unkritisch sind (von der Belästigung abgesehen) und auf der anderen Seite Gefahrstoffe existieren, für die nur unzureichende geruchliche Warnwirkungen beschrieben werden. Kohlenmonoxid z.B. ist geruchlos.

Häufig wird im Zusammenhang mit Oil-Smell-Ereignissen ein Geruch nach "alten Socken" oder "nassem Hund" beschrieben. Dieser könnte (neben echten Sockenproblemen) auf geringe Konzentrationen von bestimmten Carbonsäuren zurückzuführen sein, die bei der Pyrolyse entstehen können. Dabei geht es vor allem um Valeriansäure, Capronsäure und Önanthensäure. Auch Aldehyde und Kresole (mit ihren sehr niedrigen Geruchsschwellen) werden bei ölbasierten Vorfällen zum Gesamtgeruchseindruck beitragen.

Im Vordergrund stehen Geruchseindrücke. Selten sind bläuliche Aerosole sichtbar. Ausgeprägte weiße Nebel, wie sie z.B. in einer ARD-Monitorsendung vom 06.10.11 gezeigt wurden, sind hingegen nicht auf Öle zurückzuführen, sondern z.B. auf kondensierten Wasserdampf.

1.3 Trikresylphosphate (TCP) und andere Phosphorsäureester

Trikresylphosphate (TCP) sind eine Gruppe von 10 Isomeren, d.h. bei gleicher Summenformel unterscheiden sich die Strukturen. Das hier zugrunde liegende Phänomen ist die Isomerie am aromatischen Ring (s. Abbildung: Tri-ortho-TCP).



Die Methylgruppe an den Ringen (in der Abbildung nur als Strich ausgeführt) in Nachbarschaft zur Sauerstoffbrücke wird als ortho-Stellung bezeichnet, jene gegenüber als para-Stellung und jene dazwischen als meta-Stellung. Neben den gleichför-

migen Tri-ortho-, Tri-meta- und Tri-para-TCP-Molekülen existieren auch Mischformen, so dass insgesamt 10 verschiedene Isomere möglich sind, davon vier ohne ortho-Anteile. Auch wenn es sich bei Isomeren um sehr ähnliche Moleküle handelt, können die Eigenschaften voneinander abweichen. Dies gilt auch für die Toxizität. Als neurotoxisch gelten die ortho-TCP, weil hier bei Metabolisierung im menschlichen Körper unter Abspaltung eines Kresylrestes eine Ringstruktur über den benachbarten Brückensauerstoff gebildet wird. Es entsteht Saligenin-cyclisch-o-tolyl-phosphat [GESTIS-Stoffdatenbank]. Dies ist die eigentlich neurotoxische Verbindung, der Vorgang wird als Giftung bezeichnet. Dies kann bei den meta- und para-TCP nicht geschehen. Die für höhere Konzentrationen von ortho-TCP typischen verzögert auftretenden Neuropathien (OPIDN, organophosphate induced delayed neuropathy) sind bei meta- und para-TCP folglich auch nicht bekannt. Allgemein wird aber davon ausgegangen, dass Di- und Mono-ortho-TCP (also "Misch-Isomere" mit ein oder zwei ortho-Kresylresten) fünf- bis zehnmal giftiger wirken als das Tri-ortho-kresylphosphat (ToCP) [17, 83, 84]. Weitere Verstoffwechselungswege führen beim ToCP zu o-Kresol, o-Kresylphosphat und Diorthokresylphosphat (Dearylierung) sowie zu o-Hydroxybenzaldehyd und o-Hydroxybenzoesäure (Oxidation) [110]. Aus Tierversuchen lässt sich ableiten, dass TCP im Körper nicht akkumuliert werden.

Gehalte in Ölen

Der Gehalt an TCP als Additiv in Turbinenölen liegt laut älteren Sicherheitsdatenblättern bei 1-5%, dabei ca. 0,3% ortho-TCP, die wiederum vor allem aus Mono- und Di-ortho-TCP bestehen, während das Tri-ortho-TCP nur in sehr geringen Konzentrationen gefunden wurde [17]. In einer Studie zur Untersuchung von Militärmaschinen in Australien wird festgestellt, dass Turbinenöle ab etwa 2001 nur noch geringe Anteile von ortho-TCP enthalten: Mono-ortho-TCP sei in einem Konzentrationsbereich von 20-40 µg/l gefunden worden, während Di- und Tri-ortho-TCP unterhalb der Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens lagen [76]. 2008 wurden im Gegensatz dazu 13-150 mg/l Mono-ortho-TCP in Turbinenölen gefunden [81], also Milligramm statt Mikrogramm - obwohl [76] ausdrücklich auf [81] Bezug nimmt. In [90] werden mit Bezug auf eine andere Quelle [Goode 2000] 0,05-0,13% ortho-TCP für das Jahr 2000 genannt - gegenüber 25-40% in den 1940er Jahren. Analytik des IFA zeigte 2011 0,36% Tri-para-TCP und 0,3% Tri-meta-TCP bei ca. 1,7% Gesamt-TCP in Frischöl. Gestützt auf diese ergänzenden Daten ist zu vermuten, dass die "Mikrogramm"-Angabe in [76] nicht korrekt ist und es sich vielmehr um mg/m³ handelt.

In Hydrauliköl werden in den aktuellen Datenblättern keine TCP ausgewiesen (s.o.). Auch in einem leider undatierten Datenblatt der Agency for Toxic Substances & Disease Registry (US Department of Health and Human Services) finden sich für Skydrol 500B4 und LD4 bei der Zusammensetzung keine Angaben über TCP, während TCP für "ältere" Produkte pauschal als ein mögliches Standardadditiv bezeichnet wird.

Grenz- und Wirkschwellen

Für das Tri-ortho-TCP existiert ein OSHA-Grenzwert in Höhe von 0,1 mg/m³ entsprechend 100 µg/m³ (OSHA = Occupational Safety and Health Administration, USA)¹. In Deutschland wurde eine MAK (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) in gleicher Höhe bei Erlass der neuen Gefahrstoffgesetzgebung zurückgezogen und noch nicht er-

¹ Dieser Grenzwert wurde 2001 von der ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) überprüft und unverändert belassen.

setzt. Für die übrigen TCP werden keine Grenzwerte genannt. Diese Angaben beziehen sich allein auf die inhalative Aufnahme, die folgenden Daten experimentell primär auf orale Inkorporation, prinzipiell aber auf alle Aufnahmepfade.

In [103] wird undifferenziert für Phosphorsäuretriester ein LOAEL (lowest observed adverse effect level) zwischen 5 und 600 mg Substanz pro kg Körpergewicht und Tag angegeben. Abgeleitet aus Tierversuchen werden in [83] für den Menschen sichere Expositionsraten in Höhe von 2,5 mg/kg bei einmaliger Exposition und 0,13 mg/kg/d bei wiederholten Belastungen für ToCP abgeschätzt. Eine Wirkschwelle für OPIDN (verzögert auftretende neurotoxische Wirkung) in Höhe von 20-60 mg ToCP/kg/d über 10 Wochen wird in [82] beschrieben. Auf diese Quelle wird in [90] Bezug genommen und für einen 70 kg schweren Menschen eine Wirkschwelle von 280 mg TCP pro Tag abgeleitet (für OPIDN, also bezogen auf ToCP). In anderen Quellen wird festgestellt, dass ein klarer NOEL (no observed effect level) nicht abgeleitet werden kann.

Durch diese Angaben wird deutlich, dass Phosphorsäureestern (synonym: Organophosphate) sehr verschiedene Eigenschaften zuzuordnen sind - bereits bei Isomeren mit den definitionsgemäß winzigen Strukturunterschieden sind wesentliche verschiedene Eigenschaften festzustellen. Dies gilt sowohl für die physikalischen Daten wie z.B. Siede- und Schmelzpunkte sowie Dampfdrücke als auch für toxikologische Daten [vgl. 103]. Eine undifferenzierte Herangehensweise, also Betrachtungen über Wirkungen von Organophosphaten als Gruppe allgemein, wie in [7] oder [21] zu finden, ist wissenschaftlich nicht weiterführend. Dies wird besonders deutlich, wenn TCP mit dem Kampfgas Sarin verglichen wird, wie dies in den Medien und auch in einigen Fachveröffentlichungen [7] gelegentlich geschehen ist. Sarin ist das Giftgas Methylfluorophosphonsäureisopropylester und hat schon von der chemischen Struktur her mit TCP nichts gemein. Demgegenüber ist TCP eine extrem schwerflüchtige Flüssigkeit. Ein Vergleich ist weder physikalisch/chemisch noch toxikologisch sinnvoll.

Unter den TCP-Isomeren gilt zumindest das Tri-ortho-TCP als hautresorptiv. Die ortho-Verbindungen sind als giftig eingestuft, die übrigen als gesundheitsschädlich.

1.4 Dosisabhängigkeit und Spezifität

Jeder Gefahrstoff wirkt dosisabhängig und spezifisch (vgl. z.B. Marquardt/Schäfer: Lehrbuch der Toxikologie) [vgl. 109].

Eine *Dosis* ist die über die Aufnahmepfade Inhalation, Hautresorption und Ingestion über eine bestimmte Zeit inkorporierte Menge von Schadstoffen, die folglich von der Ausgangskonzentration dieser Gefahrstoffe in Luft oder einem anderen Medium abhängt. Wird von der Wirkungsweise krebserzeugender Gefahrstoffe abgesehen, die hier nicht zur Diskussion stehen, gilt, dass die Schwere eines Körperschadens mit der Dosis steigt (bei krebserzeugenden Substanzen steigt das Risiko des Eintritts einer Krebserkrankung mit der Dosis). In der Regel ist eine Wirkungsschwelle gegeben, unterhalb derer keine schädlichen Wirkungen (adverse effects) festgestellt werden können. Die Dosis-Wirkungsbeziehungen sind Grundlage für die Ableitung von Grenzwerten. Dafür ist auch von Bedeutung, ob sich Schadstoffe im Körper ansammeln (Persistenz) oder ob es zu kumulativen Dosiswirkungen kommt.

Gefahrstoffe wirken darüber hinaus *spezifisch* auf bestimmte Organsysteme. TCP gelten z.B. nicht als reizend oder gar ätzend, so dass aufgetretene Reizungen von Haut, Augen oder Atemwegen sicher nicht auf TCP zurückgeführt werden können.

Ein großes Spektrum unterschiedlichster Symptome ist kaum auf einzelne Gefahrstoffe zurückzuführen.

Diese Erkenntnisse sind von grundlegender Bedeutung. Mit moderner Analytik ist es möglich, z.B. bei der Zersetzung von Ölen im Labormaßstab Hunderte von entstehenden Verbindungen zu identifizieren, die von wenigen Ausnahmen abgesehen in geringsten Konzentrationen auftreten. Die große Anzahl darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass alle diese Verbindungen von untergeordneter Bedeutung sind, so lange sie nicht in relevanten Konzentrationen auftreten.

Ebenso ist es wenig sinnvoll, Analysenmethoden mit großem Aufwand zu verfeinern, um noch äußerst geringe Schadstoffkonzentrationen zu erfassen, wenn die erreichbare Bestimmungsgrenze Konzentrationen widerspiegelt, die Gesundheitsschäden bereits ausschließen.

Bei niedrigen einmaligen Dosen deutlich unterhalb einer klar erkennbaren oder wenigstens wahrscheinlichen Wirkungsschwelle können folglich keine durch den Schadstoff verursachten Körperschädigungen abgeleitet werden. Für low-level-long-term exposure [23] ist generell eine belegbare kumulative Wirkung Voraussetzung, um Ursache-Wirkungszusammenhänge begründen zu können.

1.5 Grundsätzliche andere Belastungsmomente im Flugzeug

Bei fliegendem Personal auftretende Gesundheitsbeschwerden können nicht isoliert nur im Zusammenhang mit den medienwirksam präsentierten Oil-smell-Ereignissen interpretiert werden [vgl. z.B. 109]. Die verschiedenen Einflüsse und Belastungen im Flugzeug sind vielmehr zu berücksichtigen. Es geht u.a. um Druckverhältnisse, ungünstige Arbeitszeiten, Jet Lag, Lärm, Turbulenzen, Dehydration (zu geringe Trinkmengen und extrem niedrige Luftfeuchtigkeit), individuelle Faktoren und insbesondere Stress, die exemplarisch in [102] in Zusammenhang mit Müdigkeit, Kopfschmerzen und Übelkeit gebracht werden. Nach unserer Beobachtung hat es in den letzten Jahren auch in der Luftfahrt eine Arbeitsverdichtung gegeben, die gesundheitlich von Bedeutung sein kann. Die Liste aus [102] ist zu ergänzen durch mögliche unangenehme Gerüche (s.o.) und Ozon. Wie Messungen belegen, kann Ozon in Flugzeugen ohne Ozonkonverter in Konzentrationen auftreten, die den ehemaligen Grenzwert in Höhe von 0,2 mg/m³ erreichen oder geringfügig übersteigen.

Als Ursache von den hier im Raum stehenden Akutsymptomen kommt auch Hyperventilation in Frage [50], die durch die Druckverhältnisse im Flugzeug noch gefördert wird (s. Abschnitt 1.6).

Diese Aspekte sind alles andere als nebensächlich. Sie können gerade mit zunehmendem Lebensalter [112] zu erheblichen Problemen und auch zu Krankheiten führen, wie z.B. auf der Fachtagung für Betriebsärzte und Arbeitsmediziner an Verkehrsflughäfen 2011 berichtet wurde.

1.6 Gesundheitsbeschwerden und "Aerotoxisches Syndrom"

Allgemein werden eine Vielzahl von Gesundheitserscheinungen und Symptomen mit Geruchseignissen in Flugzeugen in Zusammenhang gebracht. Zu unterscheiden sind prinzipiell auf der einen Seite akute Symptome wie Kopfschmerzen, Reizungen und Berichte von "incapacity", also einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Unfähigkeit, Handlungen zielgerichtet auszuführen oder Funkgespräche zu verfolgen. Auf der anderen Seite geht es um chronische Beschwerden bis hin zur Fluguntauglichkeit. An dieser Stelle ist zu betonen, dass es sich generell weder um "eingebildete Krankheiten" noch um massiv übertriebene Beschwerden handelt. Vielmehr wird

durch drohende Fluguntauglichkeit und damit drohendem Verlust eines oft gern ausgeübten Berufes großer Druck aufgebaut.

Auffällig ist, dass bei vielen Beschreibungen gemeinsam betroffene Personen unterschiedlich reagieren, z.B. dass der Copilot nach Ölgerüchen "incapacity"-Eindrücke erleben muss, während der neben ihm sitzende Pilot bei sich keine Symptome registriert [z.B. 27]. Hierfür gibt es keine befriedigende abschließende Erklärung. Denkbar sind individuell verschiedene Empfindlichkeiten, die in diesem Ausmaß allerdings schon überraschend wären. Derart stark differierende Expositionen im Cockpit sind nach unserer Einschätzung kaum anzunehmen, aber auch nicht mit letzter Sicherheit auszuschließen. Die Beschwerden könnten auch aus innerer Ursache entstanden und die Ölgerüche nur zufällig zeitgleich festgestellt worden sein. Dies bleibt letztlich spekulativ.

Reizungen

Reizungen, insbesondere von Augen und Atemwegen, sind erklärbar durch evtl. auftretendes Ozon, vereinzelt reizend oder allergisierend wirkende Gerüche aus diffusen Quellen (s.o.) und auch durch die bei Pyrolyse aus Ölen prominent entstehenden Aldehyde und Carbonsäuren niedriger C-Zahlen.

"Incapacity"-Erlebnisse

Beunruhigend sind die Schilderungen über akute "incapacity"-Ereignisse (s.o.). TCP können diese aufgrund ihres Wirkungscharakters und der fehlenden massiven Exposition nicht verursachen. VOC und andere Pyrolyseprodukte treten nicht in Konzentrationen auf, die derartig schwerwiegende Beschwerden erklären könnten. Würde Kohlenmonoxid in höheren Konzentrationen deutlich oberhalb des Grenzwertes auftreten, dann könnten nach unserer Kenntnis tatsächlich vergleichbare Beschwerden verursacht werden. In der Regel berichten die betroffenen Piloten jedoch von schneller Besserung nach Nutzung der Sauerstoffmaske. Dies spricht gegen eine CO-Intoxikation, weil unter Sauerstoff nur sehr langsam Besserung zu erzielen ist (CO bindet rund 200fach fester an den roten Blutfarbstoff Hämoglobin als Sauerstoff) - vgl. Abschnitt 1.9. Kohlenmonoxid kommt folglich als Ursache wenn überhaupt nur im Ausnahmefall in Frage. Einer persönlichen Mitteilung zufolge können die beschriebenen Symptome typischerweise als Folge einer Unterversorgung mit Sauerstoff auftreten [vgl. 111]. Ursache kann eine Mangelversorgung aufgrund zu geringer Frischluftvolumenströme sein (momentan auftretende Fehler in diesen Anlagen oder konstruktive Mängel) oder eine mehr oder weniger ausgeprägte Dekompression [100]. Die Sättigung des Hämoglobin mit Sauerstoff ist abhängig vom Partialdruck des alveolären Sauerstoffes und dieser wiederum von der Höhe bzw. Flughöhe mit Kompensation (z.B. bei einem Airbus A320 in 33.000 ft Höhe entsprechend ca. 10.000 m wird bei korrekt arbeitenden Aggregaten ein Kabinendruck einer Höhe von etwas mehr als 6.000 ft entsprechend ca. 1.900 m eingestellt). In der Folge steigt die Atemfrequenz (und die Pulsrate) mit zunehmender Höhe, unter Umständen bis hin zur Hyperventilation [vgl. 112]. Es wird zwar eine erhebliche Teilkompensation im Flugzeug erreicht - es ist aber von Bedeutung, dass sich die Druckparameter beim Start innerhalb weniger Minuten verändern (während z.B. ein Bergsteiger über sehr viel längere Zeit für eine Anpassung verfügt). Inhalation von Sauerstoff führt zu schneller Besserung. Es ist eine Hypothese, dass die im Zusammenhang mit Oil-Smell-Ereignissen festgestellten "incapacity"-Symptome auf einer Unterversorgung mit Sauerstoff beruhen. Die Daten sind jedoch konsistent und es sind keine anderen

Einflussgrößen bekannt, welche diese Zusammenhänge ebenso gut oder besser begründen könnten.

Chronische Beschwerden

Allgemein ist zu chronischen Gesundheitsbeschwerden im Zusammenhang mit Oil-Smell-Ereignissen festzustellen, dass weder in der vorliegenden Literatur noch im Rahmen der hier zu prüfenden Berufskrankheiten- oder Unfallverfahren eine OPIDN eindeutig diagnostiziert wurde. Soweit dies von hier aus beurteilt werden kann, deuten auch die Symptome nicht auf eine OPIDN hin. Wir zitieren ergänzend aus der GESTIS-Stoffdatenbank über die chronische Toxizität von Tri-ortho-kresylphosphat: *"Beschäftigte in der Produktion von Triarylphosphaten (20% ToCP enthaltend) wiesen bei Luftkonzentrationen von 0,27 bis >3 mg/m³ eine reduzierte ChE-Aktivität im Plasma, jedoch keine klinischen Symptome einer Gesundheitsschädigung auf [Anmerkung: ChE steht für Cholinesterasen]. In älteren Publikationen wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei ähnlichen Konzentrationen durchaus nervale Störungen (Polyneuritiden, Lähmungserscheinungen in den Beinen) aufgetreten sind, wobei allerdings eine zusätzliche Hautresorption nicht ausgeschlossen werden konnte. [ACGIH: Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices]"*

Unsere bisherigen Auswertungen zeigen keine gruppenbezogenen Auffälligkeiten, kein bestimmtes Muster bei chronischen Beschwerdebildern - insbesondere keine stoffspezifischen Symptome. Sehr häufig liegen trotz vielfältiger medizinischer Untersuchungen keine Diagnosen vor.

Zu beachten ist generell, dass ein offensichtlich multifaktorielles Geschehen sich nicht nur in den Ursachen zeigt, sondern auch in den Wirkungen.

"Aerotoxisches Syndrom"

Auf der Internetseite aerotoxic.org werden folgende Symptome aufgelistet, die fallweise ganz verschieden zusammengesetzt auftreten können: starke Müdigkeit, Sehstörungen, Schüttel- und Zitterzustände, Schwindel, Krampfanfälle, Kopfschmerzen, Tinnitus, Verwirrung, Gedächtnisstörungen, Übelkeit, Erbrechen, Durchfall, Husten, Reizungen, Atemnot, Druck auf der Brust sowie Herzklopfen. Diese Auflistung muss nicht abschließend sein, in der Literatur finden sich weitere umfängliche Symptomlisten. Die Symptomatik wird in [18, 23 und 49] als "Aerotoxisches Syndrom" zusammengefasst, eine Multisystemerkrankung, die gelegentlich mit dem "Golfkriegssyndrom" und Multipler Chemikalien-Sensibilität (MCS) verglichen wird [49]. Das "Aerotoxische Syndrom" sei wesentlich auf Organophosphate zurückzuführen [49].

Dazu ist festzuhalten, dass es sich um kein anerkanntes Erkrankungsbild handelt, das "Aerotoxische Syndrom" kann keine Diagnose ersetzen. Es existiert auch keine diesbezügliche Therapie, so dass sich die Frage stellt, was mit der Einführung dieses Begriffes erreicht werden soll. Die Symptome sind nicht charakteristisch für Intoxikationen mit TCP und anderen Organophosphaten, die im Flugzeug auftreten könnten (s.o.). Sie sind auch nicht konsistent, so dass ein medizinisches Syndrom nicht begründet werden kann [51]. Es handelt sich vielmehr um in der Allgemeinbevölkerung häufige und weitverbreitete Symptome mit mannigfaltigen Ursachen. Unter diesen Umständen besteht die Gefahr, dass Mitglieder des fliegenden Personals oder auch Passagiere bei Auftreten von Gesundheitsbeschwerden auf eine vermeintliche Ursache fixiert werden und weitergehende wichtige Diagnostik und ggf. auch eine zielgerichtete Therapie unterbleiben.

Nocebo-Effekt

Unter diesen Umständen kann die Kenntnis des Nocebo-Effektes von Bedeutung sein: Es handelt sich um ein Phänomen, bei dem analog zum bekannteren Placebo-Effekt eine Reaktion auf eine Einflussgröße ohne spezifische Wirkung beschrieben wird, im engeren Sinne auf ein Arzneimittel [Marquardt/Schäfer: Lehrbuch der Toxikologie]. Dabei benennt der Placebo-Effekt eine echte, messbare positive Wirkung im Sinne einer Linderung von Gesundheitsbeschwerden und der Nocebo-Effekt eine negative Reaktion im Sinne tatsächlicher krank machender Auswirkungen. Es liegt bei beiden Effekten keine klassische Ursachen-Wirkungsbeziehung oder Dosisabhängigkeit und beim Nocebo-Effekt auch keine Intoxikation vor. Das auslösende Agens ist gewissermaßen leer wie ein Medikament ohne Wirkstoff. Negative Wahrnehmungen und Fehlbewertungen können Nocebo-Effekte auslösen oder reale Schlüsselreize verstärken.

Solche Fehl- oder Überbewertungen werden begründet durch Bedrohungsgefühle, unbeabsichtigte Exposition, widersprüchliche Informationen, Abhängigkeit von Sachkundigen, Mangel an eigener Kontrollmöglichkeit und Verstärkung durch Medien [Akademie für Technikfolgenabschätzung Stuttgart].

1.7 Handlungsansätze mit Schwerpunkt TCP

1.7.1 Messungen, Luft- und Materialproben

Im Auftrag der BG Verkehr wurde vom Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) eine Methode entwickelt, um TCP und andere Phosphorsäureester in Luft oder Materialproben valide messen zu können. Diese Methode, bestehend aus Probenahme und Analytik, steht seit einiger Zeit einsatzreif zur Verfügung, konnte aber bislang nur bei wenigen Anlässen eingesetzt werden. Generell besteht das Problem, dass Messungen in Flugzeugen während des Fluges nur sehr eingeschränkte Aussagen zulassen, wenn es zu keinen Oil-Smell-Ereignissen kommt. Diese sind aber selten und nicht vorhersehbar und Flugzeuge mit bekannten, zu Oil-Smell führenden Fehlern für Messungen erneut starten zu lassen, ist nicht vertretbar (auch wenn dies - ganz unabhängig von Messungen - in der Praxis verschiedentlich geschehen ist [27]). In Zusammenarbeit mit einem Luftverkehrsunternehmen wurde daher ein Verfahren entwickelt, um am Boden im Rahmen von Simulationen Messungen zu ermöglichen. Dazu wird Öl über eine Pumpe im Sinne einer gewollten Kontamination in jene Triebwerkskammer eingespeist und vernebelt, aus der die Zapfluft entnommen wird. Die Zapfluft wird über einen Schlauch entnommen und in einem Behälter entspannt. In diesem Behälter wurden im Rahmen von Vorversuchen Ende Oktober 2011 Messungen von TCP und VOC durchgeführt. TCP war dabei wider Erwarten nicht nachweisbar und das Niveau der VOC sehr niedrig. Möglicherweise liegt ein Fehler vor, etwa unbeabsichtigte Kondensationen, so dass das Verfahren noch weiterentwickelt werden müsste.

Vorausgegangene Messungen in einer Triebwerkswerkstatt dienten primär der Validierung des Messverfahrens: Ein Triebwerk wurde bewusst mit Hydrauliköl kontaminiert. Bei den Messungen konnten Spuren der Hauptbestandteile dieser Öle (Butylphosphate) nachgewiesen werden.

Ferner wurde die Messmethode mehrfach auf einem Flughafenvorfeld eingesetzt: Bei bestimmten Triebwerken kann es nach Abstellen der Turbinen zu einer kurzzeitigen Nachverbrennung von Kerosin und auch von Öl kommen. Dies ist durch Rauchentwicklung außen sichtbar. Außerhalb der Abgasfahne treten keine gefährdenden Konzentrationen auf, ein Aufenthalt im Abgasstrahl verbietet sich von selbst. Diese

Messungen lieferten keine Erkenntnisse für die vorliegenden und das fliegende Personal betreffenden Unfall- und Berufskrankheitenverfahren.

1.7.2 Messungen von Metaboliten in Urinproben

Im Auftrag der BG Verkehr wurde im Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV (IPA) eine bereits vorhandene Methode [110] weiterentwickelt, um TCP und andere Phosphorsäureester über deren Metabolite in Urinproben quantitativ bestimmen zu können. Gleichzeitig wurden über Betriebsärzte und Arbeitsmediziner von Luftverkehrsgesellschaften und Verkehrsflughäfen Urinproben von Versicherten gesammelt und umgehend an das IPA weitergeleitet. Es handelt sich um Personen, die ein Oil-Smell-Ereignis während des Fluges registriert hatten. Eine Probenabgabe war nur in einem bestimmten Zeitfenster sinnvoll und die Zeiten (Oil-Smell-Ereignis und Probenahmezeitpunkt) wurden festgehalten. Ergänzend wurden von den Versicherten Fragebögen über die Vorkommnisse und akute Gesundheitsbeschwerden ausgefüllt sowie eine Blutprobe entnommen, die von den Medizinern vor Ort hinsichtlich Differentialblutbild, Leberenzymen, Methämoglobin und Carboxyhämoglobin untersucht wurden. Bei einer Reihe von betroffenen Flugzeugen wurden Feststellungen technischer Fehler mit den übrigen Daten zusammengeführt. Die Probenabgabephase wurde Anfang 2012 beendet, eine abschließende Auswertung ist erfolgt. Die Bestimmungsgrenze liegt bei 0,5 µg/l (Metabolit im Urin) für TCP. Es wurden insgesamt mehr als 300 Proben genommen. Di-ortho-kresylphosphat als Metabolit des Tri-ortho-kresylphosphates wurde in keiner Probe nachgewiesen, die Metabolite von meta- und para-TCP wurden in einer einzigen Probe knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze gefunden.

Aus den Urinproben wurden darüber hinaus im Hinblick auf Metabolite anderer Phosphorsäureester Analysen durchgeführt (s. 1.9.1).

Bei den genannten Blutproben zeigten sich keine strukturellen Auffälligkeiten, nur einige individuelle Abweichungen - (zu COHb s.1.9.2). Berichte über Geruchseindrücke passten bei einigen Crews sehr gut zusammen, bei anderen Flügen wurden Auffälligkeiten nur von einzelnen Crewmitgliedern beschrieben.

In [105] wurde eine Untersuchung von Blutproben in der Universität Nebraska vorgeschlagen. Das Verfahren ist nicht bis zur Anwendungsreife entwickelt worden. Außerdem ist es bezüglich TCP unspezifisch, da es weder TCP direkt noch dessen Metabolite erfasst, sondern indirekt eine Größe misst, die auch durch andere Phosphorsäureester (z.B. aus Hydraulikölen) beeinflusst werden kann. Die Resultate sind als halbquantitativ einzustufen.

1.7.3 Allgemeine Prävention

Es ist das Verdienst von Verbänden und Organisationen wie der GCAQE (Global Cabin Air Quality Executive), auf die Problematik aufmerksam gemacht zu haben und Maßnahmen zu fordern, damit die Anzahl von Oil-Smell-Ereignissen zurückgedrängt wird [34]. Im Sinne des Präventionsgedankens ist festzustellen, dass Öldämpfe oder ölbasierte Pyrolyseprodukte in der Atemluft im Flugzeug grundsätzlich nicht auftreten sollen. Entsprechend ist zu fordern, dass Anzahl und Schwere von Oil-Smell-Ereignissen durch technische und organisatorische Maßnahmen zu minimieren sind. Nach unserer Kenntnis werden derartige Maßnahmen von den Luftverkehrsunternehmen in Zusammenarbeit mit den Flugzeug- und Triebwerkherstellern umgesetzt. Ein Beispiel: Es wurde bei bestimmten Triebwerken festgestellt, dass irreführende Anzeigen von Ölpegeln zur Überfüllung führen konnten. Die Anzeigen wur-

den verändert, so dass bei sorgfältiger Vorgehensweise ein Überfüllen ausgeschlossen sein sollte.

Es ist zu betonen, dass dies keine abschließende Aussage darstellt, sondern weiterhin im Hinblick auf gefährdende Kontaminationen ermittelt wird und auch im Hinblick auf die Frage, ob geeignete Präventionsmaßnahmen umzusetzen sind.

Zur Prävention gehört auch ein sorgfältiger Umgang mit Hydrauliköl sowohl im Hinblick auf mögliche Kontaminationen der Zapfluft als auch hinsichtlich Verunreinigungen, die von der APU angesogen werden könnten.

Beim direkten Umgang mit Turbinen- oder Hydraulikölen z.B. bei Wartungsarbeiten sind geeignete Schutzhandschuhe zu tragen und darüber hinaus Atemschutz, falls Dämpfe oder Aerosole von Ölen auftreten könnten.

1.7.4 Literaturlauswertung

Ungeachtet der o.g. grundsätzlichen Probleme, Luftmessungen durchzuführen, gibt es mittlerweile eine Reihe von Veröffentlichungen, die - soweit beurteilbar - qualifizierte Messergebnisse enthalten und die geeignet sind, einer Beantwortung der Frage nach möglichen gesundheitsschädlichen TCP-Konzentrationen im Flugzeug näher zu kommen. Wir gehen im Folgenden auf diese Studien ein:

A. C VAN NETTEN [88] konnte 1998 bei Messungen in BAe 146 kein TCP in der Luft nachweisen. 2008 veröffentlichte er Ergebnisse einer Messung mit dem von ihm konstruierten Probenahmesystem, dem sog. VN-Sampler, und fand in BAe 146 0,03 - 0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP [46].

B. H MUIR führte für die Cranfield-University 2008 eine Vorstudie mit Messungen in BAe 146 und B757 durch [2], um Messverfahren zu validieren. Dabei wurde zufällig ein Oil-Smell-Ereignis von ca. zwei Minuten Dauer messtechnisch miterfasst. Als Gesamt-TCP-Konzentration wurde dabei mit einem Probenräger mit 18 Minuten Probenahmezeit 0,04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gefunden (rechnerisch entsprechend maximal 0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ über zwei Minuten). Der Maximalwert in einer Hintergrundprobe ohne wahrnehmbaren Oil-Smell lag bei 0,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und folglich in einer vergleichbaren Größenordnung.

In der 2011 veröffentlichten Hauptstudie [69] werden Ergebnisse von 100 Messflügen vorgestellt. Gemessen wurden TCP, Tributylphosphat und einige VOC in Airbus A319/320/321, Boeing B757 und British Aerospace BAe 146. In mehr als 95% der Proben waren TCP nicht nachweisbar. Bei einzelnen Proben wurden aber TCP gefunden: in B757 Cargo max. 7,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ToCP und max. 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP, in B757 Passagierausführung war nur ein Flug mit einer Probe während des Steigfluges positiv, allerdings mit dem höchsten in der Studie ermittelten Wert: 22,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ToCP und 37,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP, in A320/321 wurde kein TCP gefunden, in BAe 146 max. 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ToCP und max. 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP und in A319 max. 0,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ToCP und max. 3,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP. Messtechniker und Crewmitglieder berichteten von vereinzelt auffälligen Gerüchen, ohne dass die Schwelle für ein formales "reporting" überschritten wurde. Es besteht keine Korrelation zwischen Gerüchen und Messergebnissen, auch zu dem genannten Maximalwert bei der B757 Passagierausführung wurde kein Geruchsereignis notiert.

C. SOLBU ET AL. führten Messungen auf 47 Flügen durch [65, 68]. In 4 von 95 Proben konnte TCP nachgewiesen werden, jedoch keine ortho-Verbindungen. Der Maximalwert lag bei 0,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP in Luft. Während Oil-Smell-Ereignissen wurde nicht gemessen. Allerdings konnte bei einer Maschine mit "turbine oil leak" am Boden eine halbstündige Messung bei laufenden Triebwerken durchgeführt werden. Dabei trat Geruch von verbranntem Öl auf und es wurden TCP-

Konzentrationen in der Kabine von im Mittel $5,1 \pm 1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. In 22 von 56 Wischproben wurde TCP nachgewiesen, die höchste Flächenkonzentration betrug $8,3 \text{ ng}/\text{dm}^2/\text{d}$ (Nanogramm pro Quadratdezimeter und Tag). In der Studie wird nicht offen gelegt, in welchen Flugzeugtypen gemessen wurde.

- D. DENOLA ET AL. führten Messungen in Militärflugzeugen durch, die zuvor durch Oil-Smell aufgefallen waren [76]. Es wurden 78 Proben aus 46 Flugzeugen untersucht. Während der Studie konnten 9 Oil-Smell-Ereignisse eindeutig identifiziert werden. Bei 48 Proben war Gesamt-TCP nicht nachweisbar, wobei die ortho-Verbindungen in keiner Probe gefunden wurden. Die positiven Proben spiegelten im Allgemeinen sehr geringe Gesamt-TCP-Konzentrationen von kleiner oder sehr viel kleiner als $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wider, nur zwei Werte in Höhe von $21,7$ und $51,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in "fighter trainer aircraft" waren auffällig.
- E. In einer Veröffentlichung von HANHELA ET AL. [94, in 33 zitiert] werden Messergebnisse aus Militärflugzeugen vorgestellt. In bereits durch Gerüche aufgefallenen Trainingsmaschinen vom Typ British Aerospace Hawk wurden beim Betrieb der APU (am Boden) bei zwei Probenahmen 22 und $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamt-TCP gefunden. In ebenfalls auffälligen General Dynamics F-111 Kampfflugzeugen und Hercules C-130 Transportmaschinen wurden hingegen sowohl am Boden als auch während des Fluges keine Überschreitungen der jeweiligen Bestimmungsgrenze (zeitabhängig, hier zwischen $0,2$ und $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) festgestellt.
- F. An der Universität Erlangen-Nürnberg wurden 2008/2009 von GÖEN ET AL. [56] Urinproben von sechs Piloten im Zusammenhang mit Oil-Smell-Ereignissen untersucht. Metaboliten von meta- und para-TCP konnten in einer Urinprobe in Spuren nachgewiesen werden. Die Autoren schreiben, dass diese Konzentrationen nicht ausreichen, um Gesundheitsbeschwerden zu erklären.
- G. In diesem Zusammenhang sei ergänzend auf die umfangreichen Untersuchungen erstens durch das Committee on Toxicity (COT) aus dem Jahr 2007 verwiesen, welches im Auftrag des britischen Department of Transport vorgegangen ist [1] - und zweitens durch die Civil Aviation Authority CAA 2004 [3]. Dort wurden keine eindeutig toxischen Einflüsse gefunden.

1.8 Expositionsdaten, Beurteilung TCP

Zunächst ist festzuhalten, dass Oil-Smell-Ereignisse - soweit diese im konkreten Einzelfall von Geruchserlebnissen anderer Ursache abgegrenzt werden können - nur jeweils kurze Zeit andauern (in der Regel wenige Minuten) und bezogen auf die Anzahl der Flüge nicht häufig auftreten. Letzteres ist eine relative Angabe: Auch wenn derartige Ereignisse im Promille-Bereich bezogen auf die Anzahl der Flüge vorkommen, sind in Anbetracht der großen Anzahl von Flügen nahezu täglich Vorfälle zu erwarten. Einzelne Crewmitglieder werden dennoch nur selten Oil-Smell-Ereignisse erleben, da ihr Tätigkeitsfeld zwangsläufig auf wenige Flüge limitiert ist. Davon abgegrenzt werden müssen Flugzeuge, in denen Oil-Smell-Ereignisse aus verschiedenen Gründen häufiger auftreten und bei denen die Möglichkeit einer relevanten Hintergrundbelastung (also auch ohne konkreten Vorfall) besteht. Dies betrifft insbesondere BAe 146 und B757.

In Abschnitt 1.7 wurden sämtliche hier bekannten Messergebnisse zusammengestellt. Daten zu Wirkschwellen und Grenzwerten sind Abschnitt 1.3 zu entnehmen. Auch wenn Grenzwerte für den Arbeitsschutz im engeren Sinne nur für den bewussten Umgang mit Gefahrstoffen gelten, ist damit doch ein Vergleichsmaßstab gegeben, der eine Beurteilung ermöglicht.

In der Cranfield-Studie (s. 1.7.4: B) werden Messergebnisse auch für ortho-TCP aufgeführt, während diese in sämtlichen anderen Studien nicht nachgewiesen werden

konnten. Unter Berücksichtigung der Konzentrationen von ortho-TCP-Isomeren im Frischöl und der Pyrolyseversuche im Labor ist nicht erklärbar, weshalb hier ortho-TCP gefunden werden konnten. Möglicherweise lieferten Butylphenylphosphate aus Hydraulikölen ähnliche Massenfragmente wie ortho-TCP.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass der OSHA-Grenzwert in Höhe von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Tri-ortho-kresylphosphat durch die Messergebnisse nicht überschritten wird - die allermeisten Zahlenwerte liegen sogar um Größenordnungen darunter. Dabei ist zu beachten, dass mit Ausnahme der Cranfield-Studie Messwerte für Gesamt-TCP angegeben worden sind und selbst diese unterhalb des Grenzwertes liegen, der allein für das eine Isomere gilt. Die Cranfield-Studie enthält sowohl Ergebnisse für Gesamt-TCP als auch für ortho-TCP. Auch diese Werte - wie auch immer diese zu interpretieren sind (s.o.) - liegen unterhalb von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Die besonders auffälligen Flugzeuge vom Typ BAe 146 und B757 sind bei den Messungen berücksichtigt worden. Die Frage nach einer Hintergrundbelastung ist aufgrund der Messergebnisse so zu beantworten, dass eine solche entweder nicht nachgewiesen werden konnte oder eine nur sehr geringfügige Belastung ermittelt wurde. Dabei ist auch zu bedenken, dass TCP sehr schwerflüchtige Verbindungen darstellen, bei denen unter Umgebungsbedingungen in Kabine und Cockpit, aber auch an kalten Oberflächen in der Luftzuführung, sofort mit Kondensation zu rechnen ist. Dies bestätigen Wischproben. Dampf- oder tröpfchenförmige sowie staubgetragene TCP werden an den HEPA-Filtern für die rezirkulierte Luft abgeschieden.

Die in Abschnitt 1.3 genannten Wirkschwellen werden nicht ansatzweise erreicht.

Die Auswertung der Urinproben zeigt nur eine Einzelprobe, bei der die Bestimmungsgrenze geringfügig überschritten wurde - und dies auch nur bei meta- und para-TCP. Diese Einzelprobe belegt erstens, dass die betroffene Person TCP inkorporiert hat und zweitens, dass das ohnehin validierte Messverfahren tatsächlich funktioniert. Fazit ist, dass bei Personen, die konkrete Oil-Smell-Incidents beschrieben haben, keine gefährdenden Konzentrationen von TCP nachgewiesen werden konnten. Dies stimmt mit den Beurteilungen von GÖEN ET AL. [56] überein.

Hier vorliegende und in der Literatur aufgeführte Angaben über akute und chronische Gesundheitsbeschwerden sind nicht konsistent und auch nicht charakteristisch für TCP-Intoxikationen. Hierbei ist insbesondere auf die fehlende OPIDN hinzuweisen.

Andere ausführliche Arbeiten mit umfänglichen Materialsammlungen, wie die Arbeiten von MICHAELIS [61, 62] enthalten eine Vielzahl von kritischen Bewertungen vorhandener Studien und umfangreiche Empfehlungen. Messergebnisse oder andere eindeutige Belege für Gefährdungen sind jedoch nicht enthalten.

Zu Wischproben sind noch drei Aspekte anzumerken:

1. Aus Resultaten von Wischproben kann prinzipiell keine Gefährdung des Personals abgeleitet werden, d.h. die Daten sind nicht geeignet, eine Beurteilung von Gefährdungen zu ermöglichen.
2. Auch durch Wartungspersonal kann über Kleidung und Handschuhe Öl in geringen Mengen auf Oberflächen gelangen.
3. Einige Phosphorsäureester sind als Flammschutzmittel in z.B. Kunststoffen oder Textilien enthalten und können bei einer Probenahme mit lösungsmittelhaltigen Wischtüchern herausgelöst werden.

Fazit zu 1.1 bis 1.8

Bislang musste bei mangelhafter Datenlage davon ausgegangen werden, dass eine Gefährdung durch TCP nicht hinreichend begründet werden konnte. Der Fakt von z.T. schwerwiegenden Gesundheitsbeschwerden und die Tatsache der gelegentlichen und merklichen Immission von zweifelsfrei TCP-haltigen Ölen (bzw. deren Zerstellungsprodukten) schien einen Zusammenhang nahezu legen. Dass es in der Folge zur Verunsicherung von Angehörigen des fliegenden Personals gekommen ist, ist nicht überraschend.

Aufgrund der hier dargelegten Expositionsdaten und Rahmenbedingungen (s. ergänzend auch 1.10) ist nun die Aussage möglich, dass der vermutete Zusammenhang bezüglich TCP nicht wahrscheinlich gemacht werden kann. Damit fehlt eine Erklärung für die Gesundheitsbeschwerden. Ein Teil der Beschwerden wird vermutlich auf innere Ursachen zurückzuführen sein, ein weiterer Teil auf die unter 1.5 genannten Belastungsfaktoren im Flugzeug und möglicherweise eine Unterversorgung mit Sauerstoff (1.6). Nocebo-Effekte können eine Rolle spielen, zumal einseitige Informationen in einigen Medien derartige Reaktionen befördern. Dennoch bleibt die Frage nach weiteren potentiell toxischen Einflüssen. Der Kenntnisstand dazu soll in Abschnitt 1.9 referiert werden.

1.9 Andere chemische Einflüsse als TCP: andere Phosphorsäureester, Kohlenoxide, VOC/SVOC

1.9.1 Hydrauliköle, Flammschutzmittel, Umesterung zu TMPP

Neben TCP können weitere Phosphorsäureester auftreten [15, 110]. Dabei geht es primär um Phenyl- und Butylphosphate (auch "Misch-Isomere") als Hauptbestandteile von Hydraulikölen und am Rande um Flammschutzmittel in verschiedenen Materialien, die in Kabine und Cockpit verbaut sind. Im Gegensatz zu TCP gibt es eine Hintergrundbelastung der Allgemeinbevölkerung durch derartige Organophosphate, so dass zunächst herausgearbeitet werden muss, ob eine deutlich höhere Belastung bei Angehörigen des fliegenden Personals gegeben sein könnte. Als Anhaltspunkte sind vorläufige Referenzwerte in [110] enthalten. Für Diphenylphosphat (DPP, Metabolit von Triphenylphosphat) lag der Maximalwert bei Proben einer kleinen Stichprobe der "Allgemeinbevölkerung" (25 Personen) bei 5,48 µg/l, das 95-Perzentil bei 1,71 µg/l, für Dibutylphosphat (DBP) lag nur ein Einzelwert in Höhe von 0,26 µg/l oberhalb der Bestimmungsgrenze. Eine vorläufige Auswertung der Urinproben von Flugzeugbesatzungen ergab für DPP Werte zwischen <0,25 µg/l und max. 7,3 µg/l und für DBP Werte zwischen <0,25 µg/l und 4,7 µg/l. Statistische Auswertungen dazu sind bei dieser Datenbasis nicht sinnvoll. Die Werte für Phenylphosphate liegen in einer vergleichbaren Größenordnung wie jene der Normalbevölkerungs-Stichprobe, die Werte für Butylphosphate liegen tendenziell um eine Größenordnung höher. Die Aussagekraft dieses Vergleiches ist aber aufgrund der geringen Zahl von Teilnehmern begrenzt. Eine hohe Belastung wird dadurch jedenfalls nicht angezeigt.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass in [68] Messergebnisse von Ladepersonal genannt werden und auch Luftkonzentrationen, die nach Auftropfen von Hydrauliköl auf heiße Bremsen entstehen können.

Für Triphenylphosphat lag der aktuell nicht mehr gültige Luftgrenzwert bei 3 mg/m³ (bezüglich der einatembaren Fraktion, übereinstimmend mit dem Grenzwert der ACGIH), für Tributylphosphat gilt seit Juli 2013 ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 11 mg/m³.

Die Exposition ist im Flugzeug als gering einzustufen. Die Toxizität der Stoffe ist im Vergleich zu TCP deutlich geringer (vgl. GESTIS-Stoffdatenbank). Werkstattpersonal könnte gegenüber Öldämpfen an heißen Triebwerken und über Hautkontakte erheblich höher exponiert sein, so dass die Anwendung von Haut- und Atemschutz zu empfehlen ist.

In den Urinproben wurden außerdem Metabolite von chlorierten Phosphorsäureestern gefunden, die nach unserer Kenntnis nicht in den Ölen enthalten sind, wohl aber verbreitet als Flammenschutzmittel eingesetzt werden. Es handelt sich um Bis-(2-chlor-propyl)-phosphat und Bis-(2-chlorethyl)-phosphat - BCPP und BCEP, als Metabolite von Trichlorpropylphosphat bzw. Trichlorethylphosphat. Bei Personen aus der Allgemeinbevölkerung wurden für BCPP max. 0,85 µg/l und für das 95-Perzentil 0,36 µg/l gefunden, für BCEP max. 26,5 µg/l bzw. 1,1 µg/l. Uns liegt eine weitere Studie vor, bei der Urinproben von Müttern und Säuglingen untersucht wurden [139]: Gerade für BCPP lag hier das 95. Perzentil bei 2,4 µg/l und der Maximalwert bei 4,43 µg/l (für die Erwachsenen). Beim fliegenden Personal lagen die Werte für BCPP zwischen <0,25 µg/l und 6,9 µg/l und für BCEP zwischen <0,25 µg/l und 20,3 µg/l. Die Werte für BCEP sind unauffällig, bei BCPP liegen wenige Einzelwerte um eine Größenordnung oberhalb der Werte von Teilnehmern der allgemeinen Stichprobe, aber durchaus im Rahmen der Untersuchung von Müttern. Eine Gefährdung lässt sich folglich nicht ableiten. Derzeit kann nicht belegt werden, dass genau diese Flammenschutzmittel auch im Flugzeug eingesetzt wurden (das ist auch nicht die zentrale Fragestellung, sondern ein Nebenaspekt).

Schließlich ist vorstellbar, dass es während der Pyrolyse zu einer Umesterung kommt, so dass aus dem dreiwertigen Alkohol Trimethylolpropan (aus den Fettsäureestern) und Phosphorsäure (z.B. aus TCP) der neue Ester Trimethylolpropanphosphat (TMPP) entsteht [45, 48]. Bei TMPP handelt es sich um eine neurotoxische Verbindung. Dabei ist generell zu berücksichtigen, dass die Phosphatmenge im Turbinenöl durch die Anwendung in einem Additiv begrenzt ist, TCP recht temperaturstabil ist und nachweisbar zumindest zum Teil unzerstört bei Oil-Smell-Incidents die Kabine oder das Cockpit erreicht und die Umesterung keine einfache chemische Reaktion darstellt, die ohne Weiteres abläuft. [90] zufolge kann TMPP nur in einer "fire situation" entstehen. Es liegen keine Messergebnisse vor, die eine Entstehung von TMPP belegen könnten, obwohl danach gesucht wurde [54]. Außerdem basieren nur wenige Turbinenöle auf Trimethylolpropan-Estern, überwiegend wird Pentaerythrit eingesetzt.

1.9.2 Kohlenoxide: Kohlendioxid CO₂ und Kohlenmonoxid CO

Bei vollständiger Pyrolyse würden die Kohlenoxide entstehen. Bei Laborversuchen wurde gezeigt, dass es zur Bildung von CO₂ bzw. CO kommen kann, wobei dort die Temperaturen z.T. sehr hoch, die Einwirkzeiten sehr lang und die Drücke nicht erhöht waren. Unter diesen Bedingungen wird die weitgehende Pyrolyse massiv begünstigt.

Der Grenzwert von Kohlendioxid (CO₂) liegt bei 5000 ml/m³, wobei die normale Luftkonzentration bereits ca. 0,03 Vol-% beträgt. CO₂ als Bestandteil der Ausatemluft reichert sich überall dort an, wo viele Personen in kleinen Räumen ohne hinreichende Lüftung zusammenkommen (z.B. in Schulen). Auch in Flugzeugen ist ein deutlicher Anstieg der CO₂-Konzentration während des Einsteigens der Passagiere messbar, während nur die APU mit geringerem Durchsatz Frischluft einspeist. Gefährdende CO₂-Konzentrationen werden dabei nicht erreicht. Eine weitere Quelle für CO₂ ist Trockeneis, also festes CO₂, das in Blöcken eingesetzt wird, um Getränke bzw. Le-

bensmittel zu kühlen. [90] zufolge kann es unter ungünstigen Bedingungen zu örtlich begrenzt erhöhten Konzentrationen kommen, so dass es im Zusammenwirken mit geringer Luftfeuchtigkeit zu akuten Beschwerden, wie brennenden Augen sowie Muskel- und Kopfschmerzen kommen kann.

Kohlenmonoxid (CO) ist ein geruchloses Gas, der Grenzwert beträgt 30 ml/m^3 . CO bindet an den roten Blutfarbstoff Hämoglobin und blockiert den Zugang für Sauerstoff. Gebildet wird Carboxyhämoglobin (COHb). Bei COHb-Werten von 10-20% werden leichte Kopfschmerzen, Müdigkeit, Unwohlsein und Herzklopfen beschrieben, bei COHb-Werten von 20-30% Schwindel, stärkere Kopfschmerzen, Bewusstseinsstrübungen sowie Mattigkeit. Für Nichtraucher beträgt der Normalbereich 0,4-0,8%, für Raucher 2-6% (Werte von 10-15% können bei starken Rauchern auftreten). Ein CO-Hb-Spiegel von 10% wird als Gleichgewichtssättigungswert erst bei etwa 60 ml/m^3 erreicht, also bei sehr hohen Konzentrationen. Die mittlere Halbwertszeit von COHb beträgt ca. 250 Minuten (DFG: Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten). Es erscheint unwahrscheinlich, dass aufgrund von Pyrolyse von Ölen über längere Zeit hohe CO-Konzentrationen im Flugzeug auftreten könnten. Dagegen sprechen die geringen freigesetzten Ölmengen, kurze Einwirkzeiten an heißen Oberflächen und erhöhte Drücke an der Zapfluftentnahmestelle. Hauptquelle für CO in der Luftfahrt sind am Boden Abgase von Fahrzeugen und Bodengeräten. Flugzeug- bzw. Triebwerkhersteller erklärten auf Nachfrage übereinstimmend, dass eine Kontamination der Zapfluft durch Triebwerksabgase praktisch nicht vorstellbar sei. CO ist bei Messaktionen im Laufe der Jahre sehr häufig miterfasst worden. Im Allgemeinen konnten dabei keine erhöhten Konzentrationen festgestellt werden: In erster Linie durch Abgase am Boden wurden im Flugzeug Konzentrationen von unter 10 ml/m^3 verursacht, wobei die meisten Messwerte deutlich unterhalb von 1 ml/m^3 lagen [50, 69, 88, 95, 96, 97, 98, 99, 106]. In der Literatur finden sich Einzelwerte oberhalb des Grenzwertes, wobei die Messungen nicht von Fachpersonal, sondern von Piloten ausgeführt wurden. Es spricht grundsätzlich nichts dagegen, dass Angehörige des fliegenden Personals Messungen durchführen, zumal sie besonders einfach an den Messort gelangen können. Dennoch muss gefragt werden, ob die Messgeräte regelgerecht kalibriert waren, was ohne Weiteres nicht beantwortet werden kann. In [42] werden für BAe 146 Messwerte zwischen 9 und 72 ml/m^3 genannt, in [15] ein Maximalwert von 60 ml/m^3 . Einige Messergebnisse aus Blutproben im Rahmen der IPA-Untersuchungen (s. Abschnitt 1.7.2) waren auffällig mit COHb-Werten von mehr als 5% bis zu max. 8,7% zum Zeitpunkt der Blutentnahme. Betroffen waren sowohl Raucher als auch Nichtraucher (der Spitzenwert von 8,7% war ein Raucherwert). Derartige Ergebnisse wurden bei anderen Messungen im Rahmen desselben Projektes nicht gefunden. Es handelt sich wahrscheinlich um einige in der Tat auffällige und auf CO rückführbare Ereignisse. Die Schwelle für mehr als geringfügige Symptome ist damit allerdings nicht überschritten.

Für CO-verursachte Gesundheitsbeschwerden sprechen einige "passende" Symptome (die aber auch anders erklärbar sind) und vereinzelte Messergebnisse deutlich oberhalb des Grenzwertes sowie die genannten Hinweise aus den Blutproben. Gegen CO als Ursache sprechen die fehlende bzw. nicht erkennbare Quelle für hochgradige CO-Immissionen, die große Zahl von Messergebnissen mit unkritischen Werten und der Umstand, dass häufig und für eine CO-Problematik untypischerweise Beschwerden sehr schnell zurückgingen, sobald eine Sauerstoffmaske eingesetzt wurde. Insgesamt ist vorstellbar, dass es vereinzelt zu akuten Gesundheitsbeschwerden gekommen ist, die auf CO zurückgeführt werden müssen. Belegen lässt sich dies retrospektiv nicht.

1.9.3 Aromatische Amine

Die Öle enthalten als Additiv im unteren Prozentbereich die aromatischen Amine N-Phenyl- α -naphthylamin (PAN) und 4,4'-Dioctyldiphenylamin. Es existieren Hinweise, dass Turbinenöle wie Castrol 5000 und Exxon 2380 im Jahr 2000 auch noch das Isomere N-Phenyl- β -naphthylamin (PBN) enthalten haben [54]. Für modernere Öle scheint dies nicht zuzutreffen.

PAN und PBN gelten als hautsensibilisierend, Reizwirkungen sind allenfalls schwach ausgeprägt. Es existieren nur wenige Daten, die aber für eine geringe akute systemische Wirksamkeit sprechen. Als chronischer Effekt einer PAN-Exposition werden Hautekzeme als wahrscheinliche Folge einer Sensibilisierung beschrieben. Für PBN liegen Angaben aus Tierversuchen bei sehr hohen Expositionen vor. Demnach werden Leber, Nieren, ZNS und Blutbildung als Zielorgane genannt, mehrfach wurde Gewichtsverlust registriert. Zu 4,4'-Dioctyldiphenylamin liegen nur wenige Daten vor, die auf eher geringe toxische Effekte hindeuten. Die Reizwirkung ist gering (GESTIS-Stoffdatenbank).

Es finden sich keine Hinweise, dass diese Stoffgruppe einen Beitrag zum Erkrankungsgeschehen im Rahmen von Oil-Smell-Ereignissen liefert.

1.9.4 VOC und Carbonyl- bzw. Carboxyverbindungen

Da es bei Oil-Smell-Ereignissen offensichtlich zu Pyrolyse kommen kann, ist es naheliegend, im Flugzeug leichtflüchtige organische Komponenten (VOC) zu messen, ergänzt durch Aldehyde, Ketone und Carbonsäuren. Letztere werden durch das VOC-Messverfahren mittels Thermodesorption und GC/MS-Analytik in der Regel nicht oder nur teilweise erfasst. Umfassendes Screening oder ausgewählte Verbindungen sind vielfältig gemessen worden, in [69] z.B. Toluol, Xylol, Limonen, Perchloräthylen und Undecan. In [88] wird besonders auf Hexan und Octan hingewiesen. Die Summe der VOC wird als TVOC bezeichnet. Die Messergebnisse liegen im Bereich üblicher Innenraumwerte - nur Aceton (als Körperausdünstung) und Ethanol (aus Getränken) erreichen relativ höhere, aber bei Weitem keine kritischen Werte [91, 96, 98]. In z.B. [65] lagen die TVOC-Resultate zwischen 0,2 und 2,7 mg/m³, in [69] zumeist unterhalb von 2 ppm (wobei 2-Propanol störte, welches für andere Messungen durch das Messpersonal eingesetzt wurde). Weder bei TVOC-Werten noch bei Einzelsubstanzen wurden potentiell gesundheitsschädliche Konzentrationen gefunden. In diesem Zusammenhang muss aber auf kurzkettige organische Säuren und Aldehyde hingewiesen werden, für die in der vorliegenden Literatur nur wenige Messwerte enthalten sind und für die bereits bei geringen Konzentrationen Reizwirkungen zu erwarten sind. Geruchlich auffällige Substanzen, wie die C₅-C₇-Säuren, können schon in geringen Konzentrationen als belästigend empfunden werden, ohne dass damit eine Gefährdung i.S. einer Giftwirkung verbunden ist.

Fazit zu 1.9

Mit Ausnahme von vereinzelt möglichen Expositionen gegenüber Kohlenmonoxid (und Kohlendioxid aus Trockeneis) finden sich keine Anhaltspunkte für relevante toxische Einflüsse.

1.10 Ergänzende Informationen

I.) Auf den Innenraumtagen des Vereins Wasser-Boden-Luft WaBoLu e.V. im Umweltbundesamt Berlin vom 14.-16.05.2012 wurden von der Medizinischen Hochschule Hannover Messergebnisse aus Boeing B757 einer deutschen Fluggesellschaft vorgestellt. Mit einer extrem sensiblen Analytik wurden TCP-Isomere im Nanogramm

pro Kubikmeter-Bereich gefunden. Auffällige Geruchseindrücke während der Messflüge wurden nicht registriert. Ansonsten wurde ein Messkonzept mit worst-case-Ansätzen verfolgt, d.h. eine Folge von Starts und Landungen war Grundlage der Messung. Damit ist belegt, dass die Hintergrundbelastung in diesen Flugzeugen, die als besonders belastet genannt wurden, äußerst gering ist. Interessanterweise konnte in einer Frischölprobe kein Tri-ortho-kresylphosphat nachgewiesen werden.

II.) Auf derselben Tagung wurde von einem Vertreter des BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) eine medizinische Ableitung vorgestellt, derzufolge eine Dosis von mehreren Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht notwendig ist, um die für ortho-TCP typischen Lähmungserscheinungen hervorzurufen. Derartig hohe Dosiswerte werden in Flugzeugen bei weitem nicht erreicht.

III.) Zwischen März und August 2012 wurden durch das IFA fünf Messungen in fünf verschiedenen AVRO RJ 85 einer deutschen Luftfahrtgesellschaft durchgeführt (vergl. 1.7.1). Die Messungen fanden auf Überführungsflügen ohne Passagiere (nur der Messcrew) statt. Die Flugzeuge standen vor einem umfangreichen regulären Check, befanden sich also in einem für die Messung "günstigen" Zustand. Gemessen wurde jeweils im Cockpit, in der vorderen Bordküche und in Sitzplatzreihe 9 bzw. 10 der Kabine. Gemessen wurden TCP, Tributyl- und Triphenylphosphate (in Form von Luft- und Wischproben), VOC und Klimadaten (Verlauf von Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck). Die Bestimmungsgrenze für Luftproben lag für die Phosphorsäureester bei $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für Wischproben bei $2 \mu\text{g}/10 \text{ cm}^2$ Fläche. Mit Ausnahme von Tri-n-butyl-phosphat (<2 bis $36,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und einem Einzelwert von Tri-iso-butylphosphat ($2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lagen sämtliche Ergebnisse unterhalb der Bestimmungsgrenzen.

Hinsichtlich der VOC liegen die Summenwerte (TVOC) zwischen 47 und $982 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An Einzelstoffen fielen vor allem Siloxane, Ethylacetat (11 bis $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, zwei Einzelwerte von 510 und $852 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Propylenglykol (<5 bis $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$) auf. Ethylacetat könnte aus noch nicht vollständig abgebundenen Dichtungsmaterialien stammen. Orientierungswerte für Innenräume, z.B. nach AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute), sind damit deutlich überschritten, der Arbeitsplatzgrenzwert in Höhe von $1500 \text{ mg}/\text{m}^3$ (also $1.500.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$!) für Ethylacetat bei weitem nicht. Gesundheitsgefährdende Konzentrationen wurden nicht erreicht, eine Belästigung ist möglich - der Geruch erinnert an Pattex.

Der Luftdruck fiel beispielhaft von 970 auf 870 hPa , die relative Luftfeuchte von 28 auf ca. 4% . Die Temperatur lag bei 24 bis 26°C . Dies sind auch die Rahmenbedingungen, die zu den o.g. Messwerten gehören.

IV.) Analog zu I.) wurden bei verschiedenen Anlässen von der Medizinischen Hochschule Hannover umfangreiche Messergebnisse aus Airbus A380 und A321 einer deutschen Fluggesellschaft vorgestellt. Wir geben hier den abstract zum Vortrag auf der Jahrestagung 2016 der DGAUM (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.) wieder:

Untersuchungen zur Kabinenluftqualität in Verkehrsflugzeugen – Ein Update

Rosenberger W, Wrbitzky R, Beckmann B

Institut für Arbeitsmedizin, Medizinische Hochschule Hannover

Einleitung:

Im Zusammenhang mit der Luftqualität in Verkehrsflugzeugen werden seit geraumer Zeit Erkrankungen von fliegendem Personal und Passagieren durch den Eintrag gefährlicher Stoffe in die Kabine angenommen. Eine vermutete Quelle ist der Eintrag von Turbinenöl und seinen

Inhaltsstoffen sowie möglichen Dekompositionsprodukten im Falle thermischer Überbeanspruchung des Öls.

Methoden:

Im Rahmen von drei Feldstudien von 2011 bis 2015 wurden auf verschiedenen Flugzeugmustern mit unterschiedlichen Motoren Organophosphate nach Anreicherung der Partikel und Dampfphase und darauffolgender Analyse mittels Gaschromatographie und Massenspektrometrie, in zwei Studien ergänzend auch flüchtige organische Verbindungen (VOC) mittels Thermodesorption und anschließender Gaschromatographie und Massenspektrometrie (TD-GC-MS) sowie Aldehyde mit Hochdruckflüssigchromatographie-UV/VIS-Spektroskopie bestimmt. Die Probenahmen wurden während verschiedener Flugphasen (Phase A: Bewegung am Boden, Phase B: Startphase, Phase C: Gesamtflug, Phase D: Sinkflug und Landung inkl. Bewegung am Boden) durchgeführt. Auf insgesamt 134 Messflügen wurden 414 Proben auf Organophosphate, 299 Proben auf VOC und 348 Aldehyde-Proben analysiert.

Ergebnisse:

Die ermittelten Konzentrationen an Organophosphaten sind, verglichen mit zur Verfügung stehenden Arbeitsplatzgrenzwerten oder Innenraumhygienerichtwerten, als gering bis sehr gering anzusehen. VOC-Konzentrationen liegen im Mittel unter $0,3 \text{ mg/m}^3$, als Maximalwerte wurden $3,8 \text{ mg/m}^3$ (A380) bzw. $2,5 \text{ mg/m}^3$ (A321), aufsummiert als TVOC-Wert, ermittelt, wobei diese Parameter in den Phasen A, B und C bestimmt wurden. Der wesentliche Beitrag der VOC-Emissionen konnte der Substanz 1-Propanol (Median: $60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, Max.: $2,3 \text{ mg/m}^3$; Desinfektionstücher im Cockpit) zugeordnet werden. Auch Propylenglykol (Enteisungsmittel) wurde während der Winterperiode auf einigen Flügen gefunden (Median: $51 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, Max.: $1,8 \text{ mg/m}^3$). Die Aldehyde-Konzentrationen waren in allen Messsituationen auf einem innenraumhygienisch unbedenklichen Niveau.

Fazit:

Im Rahmen dieser Studien wurden insgesamt geringe Belastungen der Raumluft ermittelt. Das Spektrum der untersuchten Stoffe enthielt auch Komponenten, die Hinweise auf Pyrolysevorgänge von Ölen geben könnten. Auch diesbezüglich traten keine Auffälligkeiten auf.

2. Stellungnahme Arbeitsplatzexposition

Herr [REDACTED], M.-Az. 05 229 476 5, tätig.

Auf einem Flug von London nach Leipzig in der Nacht vom 02.09. auf den 03.09.2015 mit der D-AZMO (ein Airbus A300 in der Cargoausführung, Erstflug 2006, Flugdauer ca. 1,5 h) sind bereits im Steigflug Ölgerüche (lt. D-Arztbericht wie „gebrauchte Socken“) wahrnehmbar gewesen. Diese traten kurz darauf mit Erreichen der Reiseflughöhe und Verminderung des Schubs erneut auf und im Verlauf des Fluges noch mehrfach. Wir verweisen auf die ausführliche Schilderung des Versicherten. Mit einer Verzögerung von ca. 45 Minuten traten Gesundheitsbeschwerden auf: Übelkeit und Kopfschmerzen, kurz darauf auch Schwindel und später Aufmerksamkeitsdefizite. Einer Fliegerärztin nannte [REDACTED] später Schwindel, verlangsamte Motorik und einen „fremden“ Geschmack im Mund. Der Copilot hat die Gerüche ebenfalls bemerkt und auch Gesundheitsbeschwerden entwickelt.

Gegenüber unserer Aufsichtsperson berichtete [REDACTED] von nachts eingeschlafenen Händen, Schmerzen wie beim CTS, Wortfindungsstörungen, einem benebelten Gefühl und Kurzatmigkeit.

Die D-AZMO wurde im April 2015 bei EAT in Dienst gestellt und produzierte dort nahezu von Anfang an sowohl zeitlich als auch bezüglich der Quelle unklare und uneindeutige Probleme mit (Öl-)Gerüchen. Bei Untersuchungen wurden verschiedentlich Ölspuren im Bereich des Kompressors gefunden. Reagiert wurde zunächst mit Reinigungs- und Spülschritten. Mit dem Flug Anfang September verschärfte sich die Situation und am 17. Oktober wurde die engine #2 ausgetauscht und kurz darauf die engine #1 überholt. Weiterhin traten Ölgerüche auf und auch bei der Boroskopie war Öl zu sehen. Nach mehreren Versuchen und Arbeitsschritten wurde engine #1 im November 2015 ausgetauscht. Unabhängig davon, ob darüber hinaus das Hilfstriebwerk (APU) schadhaft war, ist davon auszugehen, dass beim Flug von Anfang September durch beide Haupttriebwerke Turbinenöl über die Zapfluft in das Air-Conditioning-System gelangt ist und selbst ein sauberer Luftstrom aus der APU durch die Packs schwallweise zu den beschriebenen Gerüchen geführt hätte. Die Ursache für die Gerüche ist mit großer Wahrscheinlichkeit diese beschriebene Ölkontamination. Dazu passt, dass nach Aussagen des Copiloten die Schalter im Cockpit tastbar mit einem Ölfilm überzogen waren. Auch der Geruch nach gebrauchten Socken ist durch pyrolysierte Ölbestandteile „passend“ erklärbar: Carbonsäuren, insbesondere der Kettenlängen C₅ bis C₇ und evtl. Kresole sind geeignet, entsprechende Gerüche zu verursachen.

Die Exposition umfasste ca. 1,5 Stunden bei unterschiedlicher Intensität abzüglich der Anwendungszeit der Sauerstoffmasken.

Bei vorhergehenden Flügen waren bereits, wie dargestellt, ähnliche aber weniger intensive Gerüche aufgetreten – so auch bei einem Flug von Brüssel nach London am Morgen des 02.09.2015, bei dem [REDACTED] als Pilot fungierte. Er beschreibt einen

Geruch von wenigen Minuten Dauer. Ein abendlicher Flug am 02.09.2015 von London-Luton nach London-Heathrow verlief ohne wahrnehmbare Gerüche.

Für die Reinigungen wurden Aceton bzw. ein Bremsenreiniger (Weicon 112030) eingesetzt. Letzterer enthält neben Treibgas laut Sicherheitsdatenblatt zu 50-75% ein entaromatisiertes Kohlenwasserstoffgemisch (Naphtha, CAS 64742-49-0) plus 3-10% Ethanol. Die genannte CAS-Nr. führt zu der Information, dass es sich um ein Siedegrenzenbenzin 80/110 handelt mit <5% n-Hexan (also <3,75% im Produkt). Die Aromaten Benzol, Toluol, Xylol u.ä. sind nicht enthalten.

Aktive Desinsektionsmaßnahmen werden bei Flügen von England nach Deutschland nicht vorgenommen.

Eine Enteisung ist Anfang September ebenfalls auszuschließen.

Noch in der Nacht zum 03.09.2015 wurde ein unauffälliger CO-Hb-Wert in Höhe von 0,8% ermittelt (Carboxyhämoglobin). Eine Belastung durch Kohlenmonoxid ist daher auszuschließen.

Ein Labor in Bremen ermittelte aus Urinproben vom 07.09.2015 Gehalte von Phthal säureester-Metaboliten, von Glykolether-Metaboliten und von Pyrethorid-Metaboliten. Die Phthalate sind v.a. Weichmacher, sie spielen im Flugzeug keine herausgehobene Rolle. Pyrethoride sind die Wirkstoffe von Desinsektionen. Sämtliche Werte sind unauffällig.

In der Akte finden sich diverse medizinische Berichte bezüglich der Atemwege. In einem engen zeitlichen Zusammenhang mit dem Ereignis beschreibt Herr Kramer keine derartigen Schwierigkeiten, etwa eine Dyspnoe. Am 09.10.2015 wurde in der Lungenpraxis Erlangen bei dem adipösen Ex-Raucher (bis Februar 2015, davor 30-40 packyears) eine leichtgradige Restriktion festgestellt. Eine obstruktive Atemwegserkrankung lag nicht vor. Die Blutgasanalyse war unauffällig. Es wurde dort ergänzend ein Thorax-CT veranlasst, das am 13.10.2015 im Institut für bildgebende Diagnostik und Therapie angefertigt wurde. Gefunden wurden einige Rundherde (die z.T. einer Abklärung bedürfen – das hat jedoch nichts mit dem fume-event zu tun und sollte folglich zu Lasten der Krankenkasse erfolgen); eine interstitielle Lungenerkrankung war nicht erkennbar. Eine Nachuntersuchung im selben Institut am 13.01.2016 ergab Hinweise auf einen abzuklärenden Leberbefund, sonst keine Veränderung. Eine Spiroergometrie am 27.01.2016 zeigte eine gute Leistungsfähigkeit bei „evtl. leichter Flußlimitierung in den Intrabreathkurven“. Am 10.06.2016 werden im Krankenhaus Martha Maria, München, eine Belastungsdyspnoe und Husten mit Auswurf genannt (nebst weiteren Symptomen). In der Radiologie wird dort eine vermehrte interstitielle Zeichnung beschrieben, in der Bronchoskopie zeigt sich eine interstitielle Fibrosierung. In der Ergospirometrie wird nun eine gering verminderte Belastbarkeit bei deutlich verminderter maximaler Sauerstoffaufnahme (s. auch Pneumologie Elisenhof, Bericht vom 23.06.2016) beschrieben. Aus unserer Sicht ist auffällig, dass

diese Befunde vom Juni 2016 zuvor nicht beschrieben wurden. Wir schlagen eine Abklärung durch einen Facharzt vor, soweit nicht bereits erfolgt.

Die neurootologische Befundung von Herrn Prof. Dr. Kersebaum beschreibt ein pathologisches Geschehen auf sämtlichen Ebenen des vestibulären Systems sowie der Sehbahn. Die schiefe Diagnosenfülle und deren Konsequenz, nämlich die Verordnung von nachweislich wirkungslosen Homöopathika (Vertigoheel) sowie Substanzen mit unzureichend belegter Wirksamkeit (Vincarutine), legen eine Überprüfung nahe. Die in der Anamnese belegfrei genannten Diagnosen J68.8 (Sonstige Krankheiten der Atmungsorgane durch chemische Substanzen, Gase, Rauch und Dämpfe) und T52.9 (toxische Wirkung von organischen Lösungsmitteln) können nicht als gesichert bezeichnet werden.

Ein MRT des Neurokraniums („Gehirnschädel“) vom 25.04.2016 zeigte im Wesentlichen einen altersentsprechenden Normalbefund.

[REDACTED] stellte sich im Januar 2016 bei Frau Dr. Heutelbeck, Universitätsmedizin Göttingen (UMG), vor. Dort wurden ein Humanbiomonitoring (HBM) initiiert und neurokognitive Tests durchgeführt. Notiert wurden „multiple Beschwerden wie Kribbelparästhesien, Übelkeit, Schweißausbrüche, Reizungen der Schleimhäute, allgemeine Schwäche, Erschöpfung und Müdigkeit, Kopfschmerzen, Durstgefühl, Koordinations- und Konzentrationsprobleme, Benommenheit, Wortfindungsstörungen, Gedächtnisprobleme, Schlafstörungen, Appetitlosigkeit und Muskelschmerzen, die sich im Zusammenhang mit dem Flug entwickelt hätten.“ Die im Vergleich zu früheren Arztberichten stattgefundene Symptomvermehrung bedarf einer Objektivierung, einer nachvollziehbaren Diagnostik einschließlich Differentialdiagnostik und einer wissenschaftlich begründeten Einordnung.

Frau Dr. Heutelbeck geht auch auf die Lungen-Rundherde ein und meint, dass diese bereits in der wissenschaftlichen Literatur zu fume-events beschrieben wurden. Sie bezieht sich auf eine Veröffentlichung, die im hier angehängten Lit.-verzeichnis die Nr. 14 trägt. Dort wurde bei einer Person von 14 untersuchten Crewmitgliedern ein ähnlicher Befund festgestellt, ohne dass ein Ursachenzusammenhang auch nur hypothetisch naheliegt. Wir bleiben dabei, dass eine Abklärung dieser Befunde von Herrn Kramer zu Lasten der Krankenkasse sinnvoll ist, da hier bei 30-40 packyears ein maligner Befund ausgeschlossen werden sollte.

Eine HBM-Probe wurde im Labor des Zentralinstitutes für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM) in Hamburg analysiert. Deren Bericht zufolge wurde eine Urinprobe am 03.09.2015 gewonnen. In dieser Probe wurden gefunden (in µg/l): 11,3 MEK (Butanon), 304,3 Isopropanol, 49,9 2-Methylpentan und 0,8 Toluol. Unterhalb der Nachweisgrenze lagen n-Heptan, n-Hexan, n-Octan, n-Decan und 2-Heptanon. Referenz- oder Grenzwerte existieren nicht. Für n-Hexan besteht ein Standardverfahren mit Grenzwert über die Untersuchung des Metaboliten 2,5-Hexandion im Urin und für Toluol über die Untersuchung des Metaboliten o-Kresol. Obwohl eine Urinprobe vorlag, wurden diese Parameter hier nicht erfasst. Separat wurde die Probe

auf 2,5-Hexandion untersucht, ein Bericht sollte noch folgen. Wir schlagen vor, hierzu nachzufragen (und bei der Gelegenheit auch nach dem noch ausstehenden Bericht der neurophysiologischen Untersuchung zu fragen). Ohne Grenz- oder Vergleichswerte aus anderen Berufen fällt eine Beurteilung schwer, ob damit überhaupt ein kritischer Befund gegeben ist. Die Probe wurde nicht methodenkonform aufbewahrt, so dass Frau Dr. Heutelbeck zufolge eine Bewertung „allenfalls semiquantitativ“ erfolgen kann. Es stellt sich die Frage, ob die Probe überhaupt noch verwertbar war und also welche Aussagen die genannten Zahlenwerte (mit der Scheinpräzision von Nachkommastellen!) zulassen. Eine entsprechende Diskussion findet sich in dem Bericht nicht - die Einstufung als innere Belastung wird nicht begründet.

Frau Dr. Heutelbeck schreibt, dass die gefundenen Substanzen (VOC, leichtflüchtige organische Komponenten), die zu den Lösemitteln zählen, in Kerosin, Turbinenöl und Hydraulikflüssigkeiten vorkommen würden. Die angegebene Quelle „Ritchie et al., 2003“, liegt uns vor und bestätigt diese Aussage nicht! Aus technischer Sicht ist nicht nachvollziehbar, dass leichtflüchtige Substanzen überhaupt in Turbinenölen und Hydraulikflüssigkeiten vorkommen sollten. Kerosin dringt nicht über die Zapfluft in Kabine und Cockpit von Flugzeugen ein, auch ein Kerosingeruch *während des Fluges* wurde uns bislang in keinem Einzelfall beschrieben (der typische Flughafengeruch geht hingegen im Wesentlichen auf Kerosin zurück, allerdings bei sehr geringen Konzentrationen, wie Messungen zeigen). MEK und Isopropanol sind in Kerosin überhaupt nicht enthalten, 2-Methylpentan höchstens in Spuren. Bei Herrn Kramer handelt es sich um ein ölbasiertes Ereignis, so dass Kerosin ohnehin keine Rolle spielt. VOC-Messungen in Flugzeugen zeigen derartige Verbindungen im Mikrogramm pro Kubikmeter-Maßstab, wie auch in Büroräumen, Wohnungen oder Fahrzeugen. Sollte sich der Biomonitoring-Befund also als korrekt bestätigen, **so ist ein Expositionsäquivalent dafür im Flugzeug nicht erkennbar und auch nicht plausibel.**

Die genannten VOC werden bezüglich ihres spezifischen Wirkungscharakters nicht bewertet. Der Zusammenhang zwischen einer hier postulierten Einwirkung und den Atemwegsbeschwerden sowie neurokognitiven Defiziten wird nicht benannt. So kommt Isopropanol – der Verbindung mit dem höchsten Konzentrationswert – nur ein geringes Schädigungspotential zu (im Tierversuch traten erst bei extrem hohen Expositionen neurotoxische Wirkungen auf, Gestis-Stoffdatenbank).

Frau Dr. Heutelbeck hat ferner eine testpsychologische Diagnostik durchgeführt und es findet sich in der Akte ein neuropsychologischer Bericht von Herrn Dipl.-Psych. Krahl. Wir haben diese Unterlagen Frau Dr. Dipl.-Psych. Eva Winkler, Geschäftsbereich Prävention, mit der Bitte um Prüfung vorgelegt. Folgende Aussagen sind von ihr getroffen worden:

Anmerkungen zu Testpsychologischer Diagnostik von Frau Dr. Heutelbeck zu [REDACTED] im Bericht vom 25. Februar 2016

Im vorliegenden Bericht wird der Befund einer testpsychologischen Diagnostik durch 7 verschiedene neuropsychologische Instrumente grob skizziert. Der Untersuchungsanlass "kognitive Einschränkungen zu objektivieren" bleibt unkonkret und ein Zusammenhang zu den Symptomen von Herr Kramer wird nicht hergestellt. Es fehlen Erläuterungen zur Auswahl der

Testverfahren. Um die Ergebnisse der Messungen sinnvoll einordnen zu können und um die Zumutbarkeit einer Untersuchung einzuschätzen, fehlt die Beschreibung des Untersuchungsplans (Testleiter, Zeit und Ort der Untersuchung, Reihenfolge der dargebotenen Tests). Es fehlen außerdem Angaben zu der jeweiligen Testversion und der Vorgabebedingung sowie eine exakte Spezifizierung der verwendeten Normen.

Die "detaillierten Befundberichte" in der Anlage enthalten als Ergebnis pro Testverfahren nur eine Spannweite der Prozentrangangaben insgesamt. Die Befundberichte können also nicht als detailliert bezeichnet werden. Diese Spannweite ist nicht aussagekräftig. Untertestergebnisse werden nicht systematisch berichtet und es wird kein kognitives Leistungsprofil erstellt. Es ist unklar, in welchen spezifischen Aufgaben/Leistungsbereichen Herr Kramer "punktuell" unter oder über dem Erwartungsbereich abschneidet. Es werden keine Alternativerklärungen für punktuelle „Einschränkungen“ recherchiert.

Anmerkungen zu Neuropsychologischem Bericht von Herr Dipl.-Psych. Krahl [REDACTED] vom 23. September 2016

Da aus Sicht von Herr Dr. Freytag „die vorliegenden psychologischen Testergebnisse nicht den üblichen Standards unserer Testdiagnostik entsprechen, wurde der Patient Herrn Dipl.-Psych. Krahl zur Diagnostik vorgestellt“ (Dr. Freytag, neuropsychologisch-psychiatrischem Gutachten vom 16. September 2016). Der genaue Untersuchungsauftrag an Herr Krahl bleibt allerdings unklar.

Um die kognitive Leistungsfähigkeit zu beurteilen wurden 8 Testverfahren aus dem Wiener Testsystem durchgeführt. Zusätzlich legt Herr Krahl dem Patienten eine Beschwerdevalidierung und einen Persönlichkeitsfragebogen (MMPI-2) vor. Die Auswahl der Testverfahren und Instrumente wird nicht begründet. Es fehlen Angaben zu den Testversionen und die exakte Spezifizierung der verwendeten Normen.

Das dokumentierte Leistungsprofil von [REDACTED] ist geprägt von überwiegend durchschnittlichen Leistungen. Lediglich die erhöhte Fehlerneigung bei der Vigilanzleistung fällt als deutlich unterdurchschnittliche kognitive Leistung auf. In der Beurteilung von Herr Krahl wird deutlich, dass von diesem Testergebnis keine weiteren Schlüsse gezogen werden können. Die Ergebnisse von der Beschwerdevalidierung werden vom Untersucher aufgrund der Kenntnisse des Probanden relativiert. Die Ergebnisse des MMPI-2 werden nicht weiter diskutiert.

Zusammenfassung

Es besteht kein vernünftiger Zweifel, dass es zu dem genannten Geruchsereignis am 02./03.09.2015 gekommen ist. Dieses dauerte brutto ca. 1,5 Stunden. Eine eindeutige Ursache dafür konnte durch Öleinträge über beide Haupttriebwerke gefunden werden. Eine akute körperliche Reaktion auf die Einwirkung der Geruchsstoffe ist plausibel (schon allein durch eine Belästigungswirkung). Sehr viel schwieriger stellt sich die Frage dar, welche Substanzen aus dem Turbinenöl bzw. durch Pyrolyse desselben in einem Wirkungs-Zusammenhang mit den Gesundheitsbeschwerden des Versicherten stehen könnten. Die Organophosphate wie TCP treten bei ölbasiereten fume-events nur in nicht messbaren oder geringen Konzentrationen in der Atemluft auf. Die kritischen ortho-Isomere des TCP wurden nach unserer Kenntnis im Jahr 2015 in Turbinenölen nicht mehr oder nur in geringen Spuren eingesetzt. Ein TCP-spezifischer Gesundheitsschaden, wie z.B. eine OPIDN, wurde auch nicht diagnostiziert. Wie ausgeführt treten VOC in Flugzeugen nicht in schädigenden Konzentrationen auf. Die in der Urinprobe gefundenen VOC passen nicht mit dem Bremsenreiniger zusammen, von dem Reste in der Klimaanlage immerhin denkbar sind. Eine Ex-

position gegenüber Kohlenmonoxid kann aufgrund des niedrigen CO-Hb-Wertes ausgeschlossen werden. Für eine Intoxikation durch andere Substanzen gibt es keine Belege - noch nicht einmal Fingerzeige, um welche Verbindungen es sich noch handeln könnte. Eine in irgendeiner Form spezifische Giftwirkung, die auf bestimmte Stoffe zurückschließen ließe, wurde bislang nicht beschrieben. Eher leichtflüchtige und z.T. geruchsintensive Substanzen, die durch Pyrolyse oder Hydrolyse aus den Ölen entstehen können, wie Aldehyde und Carbonsäuren, konnten bislang ebenfalls nur in niedrigen nicht-gefährdenden Konzentrationen gemessen werden. Aktuell muss festgehalten werden: Für Gesundheitsbeschwerden, die über eine *akute* körperliche Reaktion hinausgehen, findet sich keine Exposition im Flugzeug, die einen Zusammenhang begründen könnte. Wir möchten hinzufügen, dass es sich bei dem hier zu beurteilenden fume-event deskriptiv um einen ungewöhnlich starken Eintrag von Turbinenölen handelte. Um dem Versicherten gerecht zu werden und auch um weitere Informationen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bei fume-events zu erlangen, schlagen wir vor, 1.) die in diesem Teil 2 der Stellungnahme bereits genannten medizinischen Abklärungen sowie die Einholung fehlender Unterlagen zu veranlassen und 2.) anschließend eine umfassende arbeitsmedizinisch-toxikologische Stellungnahme einzuholen, die sich auch mit der Fragestellung auseinandersetzen sollte, ob sich aus den Symptomen und Diagnosen Hinweise auf spezifische Wirkungszusammenhänge ergeben, die wiederum Rückschlüsse auf Expositionen zulassen könnten. Hier könnte z.B. das IPA eingeschaltet werden (Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV, Direktor Prof. Dr. Thomas Brüning, Bürkle-de-la-Camp Platz 1, 44789 Bochum).

Mit freundlichen Grüßen

i.A.


Dipl.-Ing. Ulrich Metzdorf

i.A.


Dr. med. Christoph Caumanns

Literatur

1. COT/UK - Committee on Toxicity of Chemicals in Food Consumer Products and the Environment: Statement on the Review of the Cabin Air Environment, Illhealth in Aircraft Crews and the possible Relationship to Smoke/Fume Events in Aircraft - 9/07
2. Helen Muir et al., Cranfield University, Cabin Air Sampling Study, Functionality Test - 1/08
3. CAA Paper 2004/04: Cabin Air Quality
4. Association of Flight Attendants (Washington) - AFL-CIO, Aircraft Air Quality: What's wrong with it and what needs to be done - 6/2003
5. und weitere Papiere dieser Organisation
6. Report by the Senate Rural and Regional Affairs and Transportation References Committee: Air Safety and Cabin Air Quality in the BAe 146 Aircraft, Australia 10/2000
7. Goran A. Jamal et al., Low level exposures to organophosphorus esters may cause neurotoxicity, Elsevier Toxicology 2002
8. Capt. Katia Defrancq, IFALPA, Cabin air Quality and Toxic Fumes, 49th International Congress of Aviation & Space Medicine ICASM, Genf 2001
9. Judith Murawski on behalf of AFL-CIO, Comments on Aircraft Air Quality - 1/2001
10. Mark R. Montgomery, University of Minnesota, Human Intoxication Following Inhalation Exposure to Synthetic Jet Lubricating Oil, 1977
11. Sarah Mackenzie Ross (Sub-Department of Clinical Health Psychology, University College London), Cognitive function following reported exposure to contaminated air on commercial aircraft: An audit of 27 airline pilots seen for clinical purposes, Report for COT, 2006
12. S Michaelis, A survey of health symptoms in BALPA B757 pilots, J Occup Health Safety 2003
13. Sarah Mackenzie Ross et al., Ill health following exposure to contaminated air: psychosomatic disorder or neurological injury?, J Occup Health Safety 2006
14. J Burdon & A Glanville, Lung injury following hydrocarbon inhalation in BAe 146 aircrew, J Occup Health Safety 2005
15. C van Netten, Aircraft air quality incidents: symptoms, exposures and possible solutions, J Occup Health Safety 2005
16. Harper, A survey of health effects in aircrew exposed to airborne contaminants, J Occup Health Safety 2005
17. Harrison et al. (University of Cal., Harvard School of Public Health, University of Mass., AFL-CIO), Management of exposure to aircraft bleed air contaminants among airline workers (Draft) 9/20/07

18. M Hale & Judith Al-Seffar, Preliminary Report on Aerotoxic Syndrome and the Need for Diagnostic Neurophysiological Tests, Journal of the Ass. of Neurophysiological Scientists 2008
19. FAA, Guidance for Smoke/Fumes in the Cockpit/Cabin, 2006
20. BAe Systems Service Information Leaflet 21-146-RJ-536-1: Cabin Air Quality Troubleshooting Advice and Relevant Modifications
21. Abou-Donia, Organophosphorus ester-induced chronic neurotoxicity, J Occup Health Safety 2005
22. Extracts from "actual" UK Air Accident Investigation Branch reports (Anm.: keine Datumsangabe)
23. Winder, BALPA, Contaminated Air Protection, International Conference 04/2005
24. Winder (School of Safety Science, University of New South Wales, Australia), Air monitoring studies for aircraft cabin contamination, Current Topics in Toxicology 2006
25. Winder, Hazardous chemicals on jet aircraft: case study - jet engine oils and aerotoxic syndrome, Current Topics in Toxicology 2006
26. Winder/Balouet, The Toxicity of Commercial Jet Oils, Environmental Research 2001
27. Eidg. Dep. f. Umwelt, Verkehr, Energie u. Kommunikation (Schweiz), Untersuchungsbericht des Büros für Flugunfalluntersuchungen Nr. u1884 über schweren Vorfall des Flugzeuges AVRO 146-RJ 100, HB-IXN... 2005 im Anflug auf Zürich-Kloten
28. N Vackas, University of Wollongong (New South Wales, Australia), Interests and the shaping of an occupational health and safety controversy: the BAe 146 case, 2007
29. Furlong et al., University of Washington, Biomarkers for Exposure and of Sensitivity to Organophosphorus Compounds, from: Contaminated Air Protection Conference, Sydney 2005
30. BBC News, Internet, Aircraft cabin fumes investigated, 28.05.2008
31. Mehrere Papiere der GCAQE: Global Cabin Air Quality Executive (UK)
32. Sicherheitsdatenblatt ExxonMobil Mobil Jet Oil II, 04.07.2008
33. Harrison et al. (University of Cal., Harvard School of Public Health, University of Mass., AFL-CIO), Exposure to aircraft bleed air contaminants among airline workers, August 2008 [fertigestellte Version von Nr. 17]
34. R Best & S Michaelis, Aircraft Air Quality Malfunction Incidents: Design, Servicing, and Policy Measures to Decrease Frequency and Severity of Toxic Events, Hdb Env Chem Vol. 4 2005
35. B Singh (Institute of Aviation Medicine, Royal Australian Air Force), In-Flight Smoke and Fumes, aviation safety spotlight 0304

36. Auszüge aus dem Buch: The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew, Committee on Air Quality in Passenger Cabins of Commercial aircraft, Board on Environmental Studies and Toxicology, National Research Council, 2002
37. AJ Bobb, US-Naval Health Research Center Detachment (Toxicology), Known Harmful Effects of Constituents of Jet Oil Cabin Smoke, 02/2003
38. M Hooper, Aerotoxic Syndrome, notes to support Parliamentary Presentation June 18th 2007
39. L Coxon, Neuropsychological assessment of a group of BAe 146 aircraft crew members exposed to jet engine oil emissions, J Occup Health Safety - Aust NZ 2002
40. E H Hunt et al., Commercial Airliner Environmental Control System, The Boeing Company 1995
41. C van Netten, Multi-elemental analysis of jet engine lubricating oils and hydraulic fluids and their implication in aircraft air quality incidents, Elsevier, The Science of the Total Environment 229 1999
42. Michaelis/Winder/Hooper/Harper, Critique of the UK Committee on Toxicity Report on Exposure to Oil Contaminated Air on Commercial Aircraft and Pilot III Health, May 2008
43. J Murawski/D Supplee, An Attempt to Characterize the Frequency, Health Impact, and Operational Costs of Oil in the Cabin and Flight Deck Supply Air on U.S. Commercial Aircraft, Journal of ASTM International Vol. 5, 2008
44. K Solbu et al., Determination of airborne trialkyl and triaryl organophosphate originating from hydraulic fluids by GC/MS. Development of methodology for combined aerosol and vapour sampling, Elsevier Journal of Chromatography A 2007
45. von der AOPIS-Homepage, Aviation Organophosphate Information Site, Mobil Jet Oil II, Overview of Available Scientific Background Information, 09. Sept. 1999
46. C van Netten, Design of a small personal air monitor and its application in aircraft, Elsevier Science of the Total Environment 2008
47. G De Nola et al., Determination of ortho-cresyl phosphate isomers of tricresyl-phosphate used in aircraft turbine oils by GC/MS, Elsevier Journal of Chromatography A 1200 (2008)
48. J Murawski/T Loraine (GCAQE), Stellungnahme zur A-NPA Nr. 2009-10 der EASA, 6.01.2010
49. M Hooper, Aerotoxic Syndrome - the Evidence, www.aopis.org/ScientificReports.html, 5/2009
50. COT [s. 1], Update Discussion Paper on the Review of the Cabin Air Environment, III-Health in Aircraft Crews and the Possible Relationship to Smoke/Fume Events in Aircraft, Draft Paper Tox/2007/10, 3/2007
51. M Bagshaw, The "Aerotoxic Syndrome", Vortrag 9/2008

52. C Winder, P Fonteyn, J-C Balouet, Aerotoxic Syndrome: a descriptive epidemiological survey of aircrew exposed to in-cabin airborne contaminants, J Occup Health Safety - Aust NZ 2002
53. G Thomas, Clearing the Air, Jan/Feb 2010 Australian Aviation, identisch mit: Debate, January 2010 ATW
54. C van Netten, V. Leung, Comparison of the Constituents of Two Jet Engine Lubricating Oils and Their Volatile Pyrolytic Degradation Products, Applied Occupational and Environmental Hygiene Vol. 15(3): 277-283, 2000
55. M Lacagnina, Down and Out - There ist no checklist for pilot incapacitation, a rare but serious threat. Aerosafetyworld 1/2009
56. T Göen et al, Untersuchung der Triarylphosphat-Exposition von Flugpersonal nach "Fume Events", Abstract P95 in ASU 6/2010 (50. DGAUM-Tagung)
- 56a. zugehöriges Poster
57. ANSI/ASHRAE Standard 161-2007, Air Quality within Commercial Aircraft
58. A K Chaturvedi, FAA (DOT/FAA/AM-09/8), Office of Aerospace Medicine, Aerospace Toxicology: An Overview, 04/2009
59. www.csn-deutschland.de, Chemical Sensitivity Network, Forschung für Biomarker toxisch bedingter Gesundheitsschäden kurz vor dem Durchbruch, 05/2009
60. D Learmont, Toxic Shocker, Flight International 05/2008 und weitere Artikel in dieser Zeitschrift 04/2009
61. S Michaelis, Aviation Contaminated Air Reference Manual 2007
62. S Michaelis, Health and Flight Safety Implications from Exposure to Contaminated Air in Aircraft, PhD University of New South Wales, 09/2010
63. B Schindler (IPA), Zwischenbericht Biomonitoring bei Piloten und Kabinenpersonal nach möglichen fume events, 15.04.2011 (nicht veröffentlicht)
64. Winder/Balouet, Aircrew Exposure to Chemicals in Aircraft: Symptoms of irritation and Toxicity, Journal of Occ. Health and Safety, Australia 2001
65. K Solbu et al., Organophosphates in aircraft cabin and cockpit air - method development and measueres of contaminants, Journal of Environmental Monitoring 2011
66. K Solbu et al., Exposure to airborne organophosphates originating from hydraulic and turbine oils among aviation technicians and loaders, Journal of Environmental Monitoring 2010
67. K Solbu et al., Compact semi-automatic incident sampler for personal monitoring of volatile organic compounds in occupational air, Journal of Environmental Monitoring 2010
68. K Solbu, Airborne Organophosphates in the Aviation Industry, PhD, University Oslo 2011

69. Cranfield University, Institute of Environment and Health, Aircraft Cabin Air Sampling Study, März 2011-08-30
70. und 71. Department for Transport, Ministerial Statement, Cranfield university cabin air research und cabin air quality FAQs, 05/2011
72. W Rosenberger MHH, Bericht über orientierende Untersuchungen auf den Gehalt an organophosphatbasierten Flammenschutzmitteln in Wischproben aus dem Zapfluftsystem eines Verkehrsflugzeuges, für XXX März 2011
73. W Rosenberger MHH, Untersuchung von Triaryl- und Trialkylphosphaten in filterdeponiertem Kabinenluftstaub eines Verkehrsflugzeuges, DGAUM-Poster P27, ASU 03/2011
74. WHO, International Programme on Chemical Safety IPCS-INCHEM, Environmental Health Criteria 110: Tricresylphosphate, 1990
75. Environmental Health Criteria 192: Flame Retardants, 1997
76. G Denola et al. (Department of Defence Australia), Determination of Tricresyl Phosphate Air Contamination in Aircraft, Ann. Occup. Hyg. Vol. 55 No. 7 2011-09-06
77. US-National Transportation Safety Board, Special Investigation Report 84-01 An Evaluation of the Garrett TPE 331 Engine's Potential for Turbine Oil By-Product Contamination of an Aircraft Cabin Environmental System, 1984
78. R Crane et al. (Civil Aeromedical Institute, FAA, Oklahoma), Inhalation Toxicology: III. Evaluation of thermal Degradation Products from Aircraft and Automobile Engine Oils, Aircraft Hydraulic Fluid and Mineral Oil, 04/1983
79. nicht belegt
80. A Dickey/D Wilson, Contamination of Cabin Air by Synthetic Oil and Breakdown Products, SAE Paper Series, Conference 07/1989
81. G De Nola/J Kibby/W Mazurek, Determination of ortho-cresyl phosphate isomers of tricresyl phosphate used in aircraft turbine engine oils by GC/MS, Elsevier Journal of Chromatography 2008
82. CR Mackerer et al. (Mobil Business Resources Corp.), Comparison of Neurotoxic Effects and Potential Risks from Oral Administration or Ingestion of TCP and Jet Engine Oil Containing TCP, Journal of Toxicology and Environmental Health, 1999
83. PH Craig/ML Barth, Evaluation of the Hazards of Industrial Exposure to TCP: A Review and Interpretation of the Literature, Journal of Toxicology and Environmental Health, 1999
84. D. Henschler, Die Trikresylphosphatvergiftung 1958
85. Casida et al., Biological Activity of a ToCP-Metabolite, Nature 1961
86. Bondy et al., A Study on the Acute Toxicity of the Tri-Aryl Phosphates used as Plasticizers, Brit. J. industr. Med. 1960
87. JF Treon et al. (University of Cincinnati), The Toxicity of the Products formed by the thermal Decomposition of certain organic Substances, 1955

88. C van Netten, Air Quality and Health Effects associated with the Operation of BAe 146-200 Aircraft, Appl. Occup. Environ. Hyg. 13(10) 1998
89. Department of Defense, Performance Specification: Lubricating Oil, Aircraft Turbine Engine, Synthetic Base, NATO Code O-156, 1994
90. SAE Aerospace Information Report Air 5784, A Review of Literature on the Relationship between Gas Turbine Engine Lubricants and Aircraft Cabin Air Quality, 03/2002
91. NL Nagda/HE Rector, A Critical Review of Reported Air Concentrations of Organic Compounds in Aircraft Cabins, Indoor Air 2003
92. M Dechow, Airbus Cabin Air Quality, Only the Best!, Fast Number 20(?)
93. M Dechow et al. (Airbus, Fraunhofer), Concentrations of Selected Contaminants in Cabin Air of Airbus Aircrafts, Elsevier Chemosphere 1997
94. Hanhela/Kibby/DeNola/Mazurek (for Department of Defence, Australia), Organophosphate and Amine Contamination of Cockpit Air in the Hawk, F-111 and Hercules C-130 Aircraft, 2005(?)
95. D Ross et al. (BRE Environment, Building Research Establishment, UK), Extending Cabin Air measurements to include older aircraft types utilised in high volume short haul operation, Client Report No. 212034 for UK cross-Departmental Aviation Health Working Group AHWG, 10/2003
96. CW Spicer et al. (Batelle Science and Technology International, Ohio) for ASHRAE, Relate Air Quality and other Factors to Comfort and Health Symptoms reported by Passengers and Crew on Commercial Transport Aircraft, Part I 2004
97. WM Pierce et al., Air Quality on Commercial Aircraft, ASHRAE Journal 09/99
98. J Spengler et al. (Harvard), Aircraft Cabin Environmental Survey, Executive Summary 05/1994
99. Shun-Cheng Lee et al. (HongKong University), Investigation of Cabin Air Quality in Commercial Aircrafts, Proceedings of Healthy Buildings 2000
100. National Research Council, Committee on Air Quality in Passenger Cabins of Commercial Aircraft, The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew, National Academy Press Washington 2002
101. TS Damyahn et al., Comparison of the Environments of Transportation Vehicles: Results of two Surveys in Air Quality and Comfort on Airliner Cabins ASTM STP 1393 (NL Nagda), 2000
102. EH Hunt/DR Space, The Airplane Cabin Environment, The Boeing Company, vgl. 40
103. B Sjögren et al. (University of Gopthenburg, Arbetsmiljö Verket), The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals, 143. Phosphate triesters with flame retardant properties, Nr 2010; 44(6)

104. R Harrison, J Murawski et al., Exposure to Aircraft Bleed Air Contaminants among Airline Workers, A Guide for Health Care Providers, 04/2009
Attachment: Toxicity of TCP Engine Oil Additives
105. M Liyasova, C Furlong et al., Exposure to tri-o-cresyl phosphate detected in jet airplane passengers, Elsevier Toxicology and Applied Pharmacology 2011
106. NL Nagda et al. ENERGEN Consulting for ASHRAE, Determine Aircraft Supply Air Contaminants in the Engine Bleed Air Supply System on Commercial Aircraft, Report Number AS20151, 2001
107. S Mackenzie Ross, Cognitive function following exposure to contaminated air on commercial aircraft: a case series of 27 pilots seen for clinical purposes, Journal of Nutritional & Environmental Medicine 2008 [s. 11]
108. R Fox (Honeywell Aerospace), A US Perspective on Cabin Air Quality Standard Development, ICE International Aviation Conference 03/2009
109. D Fitzgerald, Cabin Air Quality, Flight Safety Australia 09-10/2007
110. B Schindler, Erarbeitung und Anwendung einer analytischen Methode zur Bestimmung von Flammschutzmitteln auf der Basis von Phosphorsäuretriestern in menschlichen Körperflüssigkeiten, Doktorarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg
111. D Gradwell (Wittingham Prof of Aviation Medicine, Royal Air Force), Hypoxia, Lecture, Ideal Cabin Environment Project, ICE Conference 03/2009
112. JM Muhm (Cabin Environment Team, Boeing), Effect of Moderate Altitude on Oxygenation, symptoms, Performance and Sleep, Lecture, Ideal Cabin Environment Project ICE Conference 03/2009
113. B Schindler et al., Exposure of aircraft maintenance technicians to organophosphates from hydraulic fluids and turbine oils: A pilot study, Int. J. Hyg. Environ. Health 2013
114. J Schelling, S Krane, L Macias-Moriarity, M Schwartz, Gesundheitsverhalten, medizinische Informationsquellen und Krankheitsbewertung von Flugbegleitern - Eine Pilotstudie, ASU 2013; 48: 606-611
115. W Rosenberger, Emissionen organischer Flammschutzmittel aus Kompaktleuchtstofflampen - Ein Fallbeispiel, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 9/2013
116. A Gerber, M Bundschuh, Sarin - Eigenschaften und Wirkungen des Kampfstoffs, Zbl Arbeitsmed 63 (2013) 350-351
117. MB Abou-Donia et al., Autoantibodies to nervous system-specific proteins are elevated in sera of flight crew members: biomarkers for nervous system injury, J Toxicol Environ Health A 2013;76(6):363-80
118. M Lotti, A Moretto (University of Padua), Organophosphate-induced delayed polyneuropathy, Toxicol. Rev. 2005;24(1):37-49 (nur abstract)
119. WN Aldrodge, MK Johnson, Side Effects of Organophosphorus Compounds: Delayed Neurotoxicity, Bulletin WHO 1971, 44, 259-263

120. C Mach, H Drexler, T Göen, Neue Untersuchungsergebnisse zur Belastung der Allgemeinbevölkerung mit Organophosphat-Flammschutzmitteln, 52. DGAUM-Jahrestagung, Abstract ASU 47, 3, 2012
121. W Rosenberger, R Wrbitzky, Untersuchungen zur inhalativen Berylliumexposition von Flugpersonal, 52. DGAUM-Jahrestagung, Abstract ASU 47, 3, 2012
122. ATSDR Agency for Toxic Substance & Disease Registry, Environmental Health and Medicine Education, Cholinesterase Inhibitors: Including Insecticides and Chemical Warfare Nerve Agents, Part 6: OPIDN. 2012
www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=11&po=29
123. E Morifusa et al., Hydroxylation and Cyclization Reactions involved in the Metabolism of ToCP, Biochemical Pharmacology 1962 Vol. 11, nur abstract
124. M Bagshaw, Comfort & Well-Being in Commercial Aircraft, Vortrag ICE 2009
125. H Muir, Investigating 'contaminated air' incidents, Vortrag ICE 2009
126. GCAQE: Update on University of Washington research into Blood Tests to demonstrate Exposure to Aviation Engine Oil Fumes, Oct. 2011
127. VC-Info 7-8/11: Kontaminierte Kabinenluft, auf der GCAQE-Konferenz wurden neue Forschungsergebnisse vorgestellt
128. PE Baker et al., Identifying safer anti-wear triaryl phosphate additives for jet engine lubricants, Chemico-Biological Interactions 2012
129. B Schindler et al., Occupational exposure of air crews to tricresyl phosphate isomers and organophosphate flame retardants after fume events, Arch Toxicol (2013) 87
130. RF Griffiths, DMC Powell, The Occupational Health and Safety of Flight Attendants, Aviat Space Environ Med 2012; 83:514-21
131. M Bagshaw, Health Effects of Contaminants in Aircraft Cabin Air, Summary Report v2.4 (May 2013)
132. W Rosenberger et al., Untersuchungen zum Vorkommen von Mono- und Di-ortho-Trikresylphosphaten in der Innenraumlufte von Flugzeugen, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 4/2013
133. B Schindler et al., Quantification of two urinary metabolites of organophosphorus flame retardants by solid-phase extraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry, Anal Bioanal Chem (2009) 395:1167-1171
134. B Schindler et al., Determination of human urinary organophosphate flame retardant metabolites by solid-phase extraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry, J Chromatogr. B 877 (2009) 375-381
135. A Bezold, Cabin air quality: The key to a comfortable flight, Airbus FAST 50 8/2012
136. J Lamb et al., Cabin Air - surface residue study Report, Research Report TM/11/06, March 2012, IOM (Institute of Occupational Medicine, independent charity UK)
137. B Singh (RAAF - Australia), In-flight Smoke and Fumes, aviation safety spotlight 0304

Von der ASMA-Tagung Chicago 2013 (Abstracts)

- 138-1. E Combs, Study of Carbon Monoxide Levels in F-22 Pilots pre and post Flight
- 138-2. J Stepanek et al., Cognitive and Cerebral Performance Alterations due to Hypoxia versus Hypocapnia: A Review of the Literature
- 138-3. T Weiss et al., Are Aircrews exposed to Organophosphates like Tricresyl Phosphate during Fume Events?

139. C Mach, T Göen, H Fromme, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Untersuchung der Belastung von Erwachsenen und Kindern mit Organophosphat-Fflammschutzmitteln, 2012

140. Spengler JD et al., Airliner Cabin Environment Research (ACER), In-Flight/Onboard Monitoring: ACER's Component for ASHRAE 1262, Part 2, April 2012

141. nicht belegt

142. Schindler BK et al., Exposure of aircraft maintenance technicians to organophosphates from hydraulic fluids and turbinen oils: a pilot study, *Int. J. Hyg. Environ. Health* (2013)

143. Schwarzer M, Ohlendorf D, Groneberg DA, Aerotoxisches Syndrom, *Zentralblatt Arbeitsmed.* 2 2014

144. Abou-Donia M et al., Autoantibodies to Nervous System-Specific Proteins are elevated in Sera of Flight-Crew-Members: Biomarkers for Nervous System Injury abstract aus: <http://tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15287394.2013.765369>

145. Furlong CE, Exposure to triaryl phosphates: metabolism and biomarkers of exposure, Quelle: Hinweis auf *J Biol Phys Chem*, keine Datumsangabe

146. Murawski JTL (AFA-CWA), Case Study: Analysis of Reported Contaminated Air Events at One Major US Airline in 2009-10, American Institute of Aeronautics and Astronautics 2011, 41st International Conf. on Environ. Systems 07/2011 Portland

147. BFU, Studie über gemeldete Ereignisse in Verbindung mit der Qualität der Kabinenluft in Verkehrsflugzeugen, Mai 2014

148. Schopfer LM et al., Detection of cresyl phosphate-modified butyrylcholin-esterase in human plasma for chemical exposure associated with aerotoxic syndrome abstract, *Analytical Biochemistry* Vol. 461, 09/2014

149. Tacal O, Schopfer LM, Healthy F-16 pilots show no evidence of exposure to tri-orth-cresyl phosphate through the on-board oxygen generating system abstract ohne nähere Quellenangabe, nur 2014 Elsevier

150. de Boer J et al., Tricresyl phosphate and the aerotoxic syndrome of flight crew members - Current gaps in knowledge, *Chemosphere* 2014

151. Hecker S et al., Cabin air Quality Incidents Project Report, Final Report 07/2014, keine Quellenangabe

152. de Ree H et al., Health risk assessment of exposure to TriCresyl Phosphates in aircraft: A commentary, *Neurotoxicology* 09/2014, abstract

153. Hausherr V. et al., Impairment of Glutamate Signaling in Mouse Central Nervous System Neurons In Vitro by Tri-Ortho-Cresyl Phosphate at Noncytotoxic Concentrations, Toxicological Sciences 2014-12-17
154. Houtzager MMG et al., Airliner cabin air quality: emissions of organophosphates originating from aircraft engine oil. Experimental lab simulation and measurements on flight. abstract: 13th Int. Conf. on indoor Air quality and Climate 07/2014, HongKong
155. Rosenberger W. et al., Untersuchungen zur Emission organischer Verbindungen in der Kabinenluft nach dem Enteisen von Verkehrsflugzeugen, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 74 (2014) Nr. 11./12.
156. Mair S. et al., Emissionsverhalten eines Flugzeugmotorenöls bei thermischer Belastung, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 75 (2015) Nr. 7/8