

PTFE und PFAS – Erfindergeist und Umweltschäden

Enno Logemann

79111 Freiburg im Breisgau, Speckbacherweg 3

„Eine neue Art von Denken ist notwendig, wenn die Menschheit weiterleben will.“

Albert Einstein (1871 - 1955)



Als der Physiker Hermann Oberth (1894-1989) im Jahr 1922 seine Dissertation mit dem Titel „Die Rakete zu den Planetenräumen“ an der Universität Heidelberg einreichte, wurde sie abgelehnt, „da es keinen ausgewiesenen Experten zu diesem Thema gab“ [1]. 1923 veröffentlichte Oberth das Manuskript als Buch im Münchner Wissenschaftsverlag Oldenbourg [1].

Abb.1. Luftpost-Ersttagsbrief (Paraguay) „Raumfahrt – Prof. Hermann Oberth – 90. Geburtstag – 25. Juni 1984“ (Sammlung Enno Logemann; Freiburg im Breisgau).

Seine publizierten Visionen waren jedoch so phantastisch, dass die Weltöffentlichkeit gut drei Jahrzehnte dieses Buch, ähnlich wie die Schriften von Jules Verne (1828-1905), in das Reich der Science-Fiction-Literatur einordnete. Erst als im Jahr 1957 der „Sputnik“ um die Erde kreiste und wenig später im Jahr 1961 der russische Kosmonaut Juri Gagarin mit einer Rakete von der Erde abhob, begriffen viele Menschen, dass die Gedanken des Raketenpioniers Hermann Oberth durchaus Realität werden könnten. Einige von uns konnten am 21. Juli 1969 miterleben, wie Menschen den Mond betreten.

Polytetrafluorethylen (PTFE, Teflon®)

Am 6. April 1938 machte der Chemiker Roy J. Plunkett (1910-1994) eine folgenschwere Entdeckung. Sie wurde von der Firma DuPont, bei der er beschäftigt war, zum Patent angemeldet (U.S. Patent Nr. 2.230,654 vom 4.2.1941):

Auf der Suche nach einem neuen Kältemittel für Kühlschränke überprüfte Plunkett einen tiefgefrorenen, unter hohem Druck stehenden Zylinder und stellte fest, dass das darin befindliche Gas Tetrafluorethylen (TFE) inzwischen zu einem Feststoff, Polytetrafluorethylen (PTFE), polymerisiert war. Das PTFE-Material hatte ungewöhnliche Eigenschaften. Es war hitzebeständig, korrosionsbeständig und besaß eine sehr geringe Oberflächenreibung.

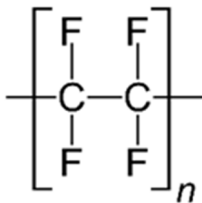
Zitat Roy J. Plunkett „Es reagierte mit nichts, rein gar nichts“. Insofern ist diese Erfindung bzw. Entdeckung „Beispiel für eine glückliche Fügung, einen Geistesblitz und einen glücklichen Zufall“ [2,3].



Für diese Erfindung wurde Roy J. Plunkett hoch geehrt. Im Jahr 1985 wurde er in die amerikanische „*National Inventors Hall of Fame*“ aufgenommen. Die USA feiern den 6. April als nationalen Gedenktag (National Teflon Day) [4]. In den Jahren 1939-1952 war Roy J. Plunkett bei der Firma Dupont auch an der Herstellung des Benzinadditivs Tetraethylblei (Antiklopfmittel) beteiligt.

Abb. 2. Roy J. Plunkett (26.06.1910 - 12.05.1994), Entdecker des Polytetrafluoräthylen-Harzes, Porträtfoto von National Inventors Hall of Fame [4].

Wegen der großen Hitzebeständigkeit finden PTFE-Materialien in der Luft- und Raumfahrt Verwendung u. a. als Schutzschilde bei Satelliten und Raketen. In den Diskussionen über den Nutzen der Weltraumforschung für unser praktisches Leben wird oft auf die mit PTFE beschichteten Bratpfannen hingewiesen. An diesem Mythos, dass PTFE ein Abfallprodukt der Raumfahrt sei, ist nichts dran, obwohl er sich hartnäckig in der Öffentlichkeit hält. Zur Sache ist zu sagen, dass die Firma DuPont erst im Jahr 1961 das mit PTFE versehene Kochgeschirr unter dem Warenzeichen Teflon® auf den US-Markt brachte. In Frankreich entwickelte der Ingenieur Marc Grégoire mit seiner Ehefrau Colette im Jahr 1954 ein Verfahren, um PTFE auf Aluminiumplatten aufzubringen. Das von ihm im Jahr 1956 gegründete Unternehmen „Tefal“ (ein Wortkonstrukt aus **T**eflon und **A**luminium) war in Europa der erste Produzent von Töpfen und Pfannen mit Antihafbeschichtung und ist inzwischen weltweit vertreten [5]. Mit PTFE beschichtetes Kochgeschirr besitzt überlegene Hafteigenschaften. Es ermöglicht zum Beispiel Speisen ohne Fett zu braten.



PTFE ist schmutz- und fleckenabweisend. Es ist beständig bei hohen Temperaturen und resistent gegenüber fast allen, auch sehr aggressiven Chemikalien (z. B. Königswasser) [2,3]. PTFE-haltige Materialien werden deshalb nicht nur in hohem Maße für Haushaltsprodukte verwendet, sondern auch im industriellen Bereich. Im 2. Weltkrieg wurde PTFE zum Beispiel wegen seiner hohen Beständigkeit gegenüber dem extrem korrosiven Uranhexafluorid im Manhattan-Projekt¹ eingesetzt [3].

Abb. 3. Polytetrafluorethylen (PTFE) ist ein unverzweigtes Polymer mit helikal angeordneten CF₂-Einheiten, Molekularmasse ca. 10⁴ bis 10⁶ g/mol [3,6].

Teflon® gilt als das glatteste Material auf der Welt. Vier Beispiele mögen dessen außergewöhnliche Eigenschaften belegen:

- Am 7. und 8. April 1976 wurde eine etwa 12.500 Tonnen schwere Rheinbrücke, die die Stadt Düsseldorf mit ihrem linksrheinischen Vorort Oberkassel verbindet, mit einer Geschwindigkeit von ca. 3,6 Metern/Stunde um 47,5 Meter stromabwärts verschoben. Diese spektakuläre Ingenieursleistung konnte nur gelingen, weil die Brücke auf Teflon®-Scheiben bewegt wurde, mit denen die untergelegten spiegelglatten Stahlplatten versehen waren [7].
- Flugzeugtoiletten sind heutzutage oft mit Teflon® antihafbeschichtet. Bei der Toiletten-spülung wird nur wenig Wasser benötigt, da die Exkremente nicht haften bleiben [8].
- In fein verteilter Form eignen sich PTFE-Sprays zur hygienischen Trockenschmierung insbesondere in Fällen, wo eine saubere Alternative zu herkömmlichen Schmiermitteln notwendig ist und die klassischen Mineralöle bzw. Silicone unerwünscht sind [9].

¹ Tarnbezeichnung für ein militärisches Atomforschungsprojekt der USA im 2. Weltkrieg.

- Teflon[®] besitzt hervorragende Eigenschaften als Isoliermaterial. An der Hafeneinfahrt von New York steht die berühmte Freiheitsstatue (Lady Liberty), geschaffen vom französischen Bildhauer Frédéric Auguste Bartholdi (1834-1904). Die Kupfer-Statue ist 46 m hoch (mit Steinsockel 93 m). Im Laufe der letzten 100 Jahre traten bei der Statue Korrosionsschäden an den Eisenarmaturen auf, die die Kupferummantelung stützten. Dieses Problem war offenbar schon bei der Konstruktion der Statue bekannt, und so musste das innere Eisenskelett nach 100 Jahren Standzeit vollständig erneuert werden. Einer erneuten galvanischen Zersetzung der Eisenkonstruktion wurde vorgebeugt, indem diese mit einem PTFE-Polymerharzband vom Kupfer der eigentlichen Statue isoliert wurde [10].

Extrem stabile Kohlenstoff-Fluor-Verbindungen sind auch in Poly- und Perfluoralkyl-Substanzen (PFAS) enthalten. Diese Stoffgruppe umfasst mehr als 10.000 Chemikalien, die seit den 1940er Jahren in großem Umfang produziert werden; sie kommen nicht natürlich vor.

PTFE- und PFAS-beschichtete Textilien haben eine niedrige Oberflächenenergie. Sie sind seit ihrer Markteinführung um ca. 1976 als öl- und wasserabweisende, pflegeleichte Regenjacken, Outdoor- und Arbeitsschutzkleidung sehr beliebt. Die mikroporöse hydrophobe Membran (Nässesperrmembran aus expandiertem Polytetrafluorethylen, ePTFE; Gore-Tex[®]) ist wind- und wasserdicht sowie atmungsaktiv [11]. Das Material wird auch für Implantate, z. B. Gelenke, Herzklappen und Herzschrittmacher verwendet. Der Nachteil solcher Produkte ist, dass sie nach derzeitigem Kenntnisstand praktisch nicht biologisch abgebaut werden; zudem entstehen bei der Verbrennung giftige Verbindungen wie Fluorwasserstoff.² Bekleidungshersteller bieten inzwischen Textilien mit PFAS-freien Membranen aus expandiertem Polyethylen (ePE), Polyurethan oder Polyester an; seit etwa 2022 auch Gore-Tex[®]. Ein kompletter Verzicht auf Fluorkohlenwasserstoffe in Textilien wird zurzeit aber noch als kritisch betrachtet [17,18].

² Fluor gilt als das reaktivste aller Elemente. Es ist auf der Erde mit 525 ppm (mg/kg) der Erdkruste relativ häufig und fast ausschließlich in Form von Fluoriden vertreten [12]. Der Name leitet sich von dem lat. Verb fluere - fließen ab. Für die Reindarstellung des hochreaktiven elementaren Fluors erhielt der französische Chemiker Henri Moissan im Jahr 1906 den Chemie-Nobelpreis [13].

Große Mengen an Fluoriden werden als Flussmittel in der Metallurgie zur Herabsetzung des Schmelzpunktes von Erzen gebraucht, z. B. Kryolith (Na_3AlF_6 Schmelzpunkt 1012°C) bei der elektrochemischen Aluminiumproduktion (Schmelzflusselektrolyse). Im Gegensatz zu den wasserunlöslichen Fluoriden wie Fluorapatit (CaF_2) gelten die wasserlöslichen Fluoride (u. a. die Alkalifluoride) als relativ toxisch. Nach [14] wird die minimale letale Dosis von Natriumfluorid für den Erwachsenen auf ca. 5 bis 10 Gramm geschätzt.

Natriumfluorid und Natriumhexafluorosilicat (Na_2SiF_6) werden als Insektizide, Rodentizide und als Läusepulver verwendet [14]. Sie haben hervorragende enzymhemmende Eigenschaften und können deshalb auch als Antikoagulantien (in vitro) oder als Konservierungsmittel in biologischen Proben genutzt werden [14].

Fluoride (Natriumfluorid, Aminfluorid, Zinn(II)fluorid) sind oft Bestandteil von Zahnpasta (ca. 1.400 ppm). Sie dienen der Kariesprophylaxe und lindern Zahnfleischentzündungen. In manchen Gegenden wird deshalb das Trinkwasser mit geringen Mengen an Fluoriden (ca. 1 ppm) versetzt [14]. Diese Supplementierungen werden in der Öffentlichkeit jedoch häufig kontrovers diskutiert [15,16]. Ein Warnhinweis auf den Zahnpastatuben „Für Kinder unter 7 Jahren nicht geeignet“ soll signalisieren, dass Kleinkinder Zahnpasta leicht verschlucken und zudem bei noch nicht abgeschlossenem Zahnwachstum auf wasserlösliche Fluoride besonders empfindlich reagieren (Fluorose). Hier sind fluoridfreie oder fluoridreduzierte Zahncremes zu bevorzugen.

Fluor ist nach [12] kein essenzieller Nährstoff. Arzneimittel mit dem Wirkstoff „lösliche Fluoride in festen Zubereitungen“ (z. B. Natriumfluorid 25 Baer[®]) werden als rezeptpflichtige Medikamente bei der Behandlung von Osteoporose-Erkrankungen des Erwachsenen verordnet. Viele Arzneiwirkstoffe wie z. B. Isofluran, Flurazepam, Flunitrazepam, Fluphenazin, Fluoxetin, Flunazirin, Atorvastatin, Fluconazol, Flucytosin, Ciprofloxazin, Flurbiprofen, Diflunisal, Flupirtin enthalten in ihrer Molekülstruktur Fluor [14].

Ersetzt man in einem Wirkstoff eine Kohlenstoff-Wasserstoffbindung durch eine Kohlenstoff-Fluorbindung, erhöht sich die Fettlöslichkeit, d. h. der Wirkstoff durchdringt leichter Zellmembranen und die Blut-Hirnschranke.

Niedermolekulare Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)

FCKW (syn. Freone) sind farblos, geruchlos und unbrennbar. Sie besitzen eine große Verdampfungsenthalpie und entziehen daher beim Verdampfen der Umgebung große Wärmemengen. Deshalb finden sie als Kühlmittel in Kühlschränken, als Treibmittel in Sprühdosen, als Feuerlöschmittel und bei der Herstellung von Schaumstoffen eine vielfache Verwendung. In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts galten diese inerten Chemikalien als alternative Kältemittel für das bis dahin verwendete korrosive flüssige Ammoniak.

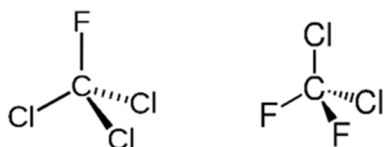


Abb. 4. Trichlorfluormethan (Freon-11), Dichlordifluormethan (Freon-12) [19,20].

Wir wissen heute, dass diese Substanzen gravierende Nachteile besitzen. Als persistierende Chemikalien verteilen sie sich in der Umwelt mit dem Wasserkreislauf und in der Nahrungskette mit oft noch unbekanntem Folgen. UV-Strahlen, Feuchtigkeit und Wärme können polyfluorierte Verbindungen nach heutigem Kenntnisstand nicht zersetzen.

Freone bedrohen die lebensnotwendige Ozonschicht in der Erdatmosphäre. Der mexikanische Physikochemiker Mario José Molina (1943-2020), Postdoc in der Arbeitsgruppe des US-amerikanischen Chemikers Frank Sherwood Rowland (1927-2012), konnte beweisen, dass Chlorfluormethane (Freone) in der Stratosphäre erhebliche Mengen an Chloratomen freisetzen, die die Ozonschicht zerstören [21-23]. Für diese bahnbrechenden Publikation erhielten Molina und Rowland 1995 gemeinsam mit dem niederländischen Meteorologen und Atmosphärenchemiker Paul Jozef Crutzen (1935-2021) den Chemie-Nobelpreis. Im Jahr 1988 wurde vom europäischen Gesetzgeber die Anwendung dieser FCKW gemäß dem Montreal-Protokoll (EU-Verordnung Nr. 3322/88) stark eingeschränkt und teilweise ganz verboten [24]. Dem Montreal-Protokoll – zunächst von 24 Ländern unterzeichnet – waren bis zum Jahr 2009 insgesamt 197 Staaten beigetreten. Es ist das erste Umweltschutzabkommen, das in allen UN-Staaten gilt.

Polyfluorierte Tenside (PFT)

Perfluorierte Tenside (PFT) sind als giftig und als sog. „Ewigkeits-Chemikalien“ bekannt. Die Verwendung dieser Substanzen in Industrieprozessen und Verbraucherprodukten u. a. in der Textilindustrie und Galvanik, in Feuerlöschern, Kühlschränken und in Imprägniersprays und die damit verbundene Freisetzung über Abluft und Abwässer hat in einigen Gegenden bereits zu Umweltbelastungen geführt. So wurden z. B. in den Bereichen Baden-Baden, Rastatt und Mannheim in Bodenproben und im Grundwasser hohe PFAS-Gehalte gemessen, offenbar verursacht durch mit Papierschlamm verunreinigte Kompostierungsanlagen [25]. Es wurde davor gewarnt, Obst und Gemüse aus diesen belasteten Gegenden zu verzehren.

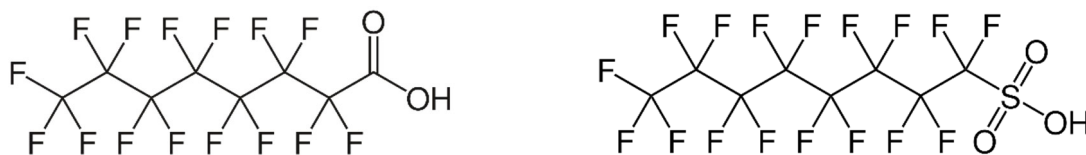


Abb. 5. Perfluorooctansäure (links) als Beispiel für Perfluorcarbonsäuren mit $C_nF_{(2n+1)}COOH$ und $n = 3$ bis 13, Perfluorooctansulfonsäure (rechts) als Beispiel für Perfluorsulfonsäuren mit $C_nF_{(2n+1)}SO_3H$ und $n = 3$ bis 13.

Nach einem Bericht der ARD-Tagesschau wurden PFAS in Deutschland an mehr als 1.500 Orten nachgewiesen [26,30]. Die Kosten für die flächendeckende Entseuchung dieser Gebiete dürften astronomische Höhen erreichen. Wenn man die Meinung vertritt, dass die PFAS letztendlich ins Meer gespült werden, wo sie über einen längeren Zeitraum (Jahrzehnte) verdünnt werden, so sollte man bedenken, dass sich die Verschmutzung des Meerwassers schließlich als Bumerang erweisen kann. Inzwischen wurden bereits an der Nordseeküste im Meerschäum, d. h. in den von der Schaumalge *Phaeocystis globosa* gebildeten Schaumteppichen, erhöhte PFAS-Konzentrationen gemessen [27].

Aus Gründen des Umweltschutzes sind die Behörden der Europäischen Union bestrebt, die ganze Stoffklasse der Fluorkohlenwasserstoff-haltigen Industriechemikalien zu verbieten. Am 7. Februar 2023 hatte die Europäische Chemieagentur ECHA ein Statement veröffentlicht, nach dem in Zukunft 10.000 Per- und Polyfluoralkyl-Substanzen (PFAS) in ihrer Herstellung und ihrer Anwendung stark eingeschränkt werden sollen [28]. Diese Publikation hat in wissenschaftlichen Fachkreisen heftige Diskussionen ausgelöst. Zitat aus Lit. [29]: „*Es ist zutreffend, dass die PFAS sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen ... Es ist zwar richtig, dass noch viele Wissenslücken zu schließen sind. Man wird aber nicht warten können, bis alle der mehr als 10.000 PFAS in sämtlichen Anwendungen untersucht und bewertet sind. Das würde Jahrhunderte dauern*“. In einem Leitartikel im Fraunhofer-Magazin schreibt B. Göckener: „*Man wird diese Tausenden von Substanzen analytisch nie ganz fassen. Wir gehen davon aus, dass die Belastung sehr viel höher ist, als wir messen können*“ [30].

Da PFAS in unserem täglichen Leben allgegenwärtig sind und schädliche Auswirkungen auf unsere Gesundheit haben können, ist man bestrebt, auch Ultraspurenkonzentrationen von PFAS analytisch zu erfassen. Der Nachweis kann im Regelfall mit Chromatographie/ Massenspektrometrie geführt werden [14]. In jüngster Zeit haben Alberto Concellón und Timothy M. Swager vom Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge, USA) einen kostengünstigen Test vorgestellt, mit dem die selektive Detektion von PFAS in Wasserproben mittels Fluoreszenzmessungen möglich ist. Die Nachweisgrenze liegt im µg/L-Bereich [31].

Im Gegensatz zur Analytik steht die Technologie der Entfernung von PFAS-Chemikalien aus der Umwelt noch am Anfang. Eine Methode der Abtrennung von PFAS-Verbindungen aus Wasserproben beruht auf der Adsorption mit Aktivkohle. Das Verfahren benötigt aber wegen der geringen Adsorberkapazität große Filteranlagen; es ist deshalb nicht universell einsetzbar [30]. Andere Autoren schlagen einen Prozess vor, bei dem PFAS aus kontaminiertem Wasser mit Hilfe von Ferrocen- und Cobaltocen-haltigen³ Polymeren elektrochemisch abgeschieden werden [33].

Großflächige Bodensanierungen sind mit solchen Verfahren kaum möglich. Hier wird das Verfahren der sog. Phytoextraktion vorgeschlagen. Dabei kultiviert man schnell wachsende Pflanzen auf den verseuchten Böden in der Erwartung, dass die Pflanzen die Giftstoffe in ihrer Biomasse anreichern. Nach dem Abernten der kultivierten Flächen können die Pflanzen dann z. B. in geeigneten Müllverbrennungsanlagen entsorgt werden. Bei entsprechenden Versuchen in Gewächshäusern zeigte Hanf (sic!) den höchsten Anreicherungsgrad [34,35].⁴ Die sog. Phytoremediation zur Sanierung PFAS-belasteter Böden könnte demnach kostengünstig, flexibel, energieeffizient und effektiv sein. Das Verfahren muss sich allerdings noch in großen Feldversuchen bewähren; dabei wären, im Fall von Hanf, die jeweils geltenden betäubungsmittelrechtlichen Gesetze zu beachten (Faserhanf mit niedrigem THC-Gehalt, Ernte vor der Blüte...).

³ Metallorganische Verbindungen, in denen ein zentrales Metallatom (Eisen in Ferrocen, Kobalt in Cobaltocen), zwischen zwei Cyclopentadienyl-Liganden angeordnet ist [32].

⁴ Getestet wurden Senf, Sonnenblumen, Hanf, eingesetzt wurden 12 verschiedene PFAS.

Wir leben in einer von starken Gegensätzen geprägten Welt; viele Menschen leben unterhalb der Armutsgrenze und leiden an Hunger. Wir müssen erkennen, dass Massenproduktion und „Wegwerfen“ von Billigware längst zu einer Gefahr für Mensch und Natur geworden sind. In Zentralafrika (Ghana) und in der Atacama-Wüste (Chile) sind große Mülllagerstätten entstanden, voller Second-Hand-Kleidung als Folge der „Fast-Fashion“-Mentalität. Diese Textilien mit einem oft hohen Anteil an „Synthetics“ stammen auch aus Europa und aus Nordamerika.

Nach einem Entwurf der EU- Kommission zur Revision der „Sustainable Products Initiative (SPI)“ sollen nun insbesondere Textilien, die im EU-Binnenmarkt verkauft werden, strengere Anforderungen an nachhaltige Produktion, Haltbarkeit und Recycling erfüllen. Unverkaufte Kleidung darf danach nicht mehr auf den Müll wandern [36].

Der menschliche Erfindergeist ist mehr denn je gefordert, nicht nur, um Altlasten aus der Verwendung von PTFE, PFAS und PFT umweltfreundlich beseitigen zu können.

Literatur

- [1] https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Oberth
- [2] Die Geschichte der Teflon® Fluorpolymere, <https://www.teflon.de/news-events/history>
- [3] de.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen, en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene
- [4] www.invent.org/inductees/roy-j-plunkett
- [5] de.wikipedia.org/wiki/Tefal
- [6] Lappan U, Geißler U, Häußler L, Pompe G, Scheler U. The Estimation of the Molecular Weight of Polytetrafluorethylene Based on The Heat of Crystallisation on Suwa's Equation. *Macromolecular Materials and Engineering* 2004;289(5):420-425.
- [7] Oberkasseler Brücke – Wikipedia, de.wikipedia.org/wiki/Oberkasseler_Br%C3%BCcke; Verschiebung der Oberkasseler Brücke, www.youtube.com/watch?v=Wt85SxU48wo
- [8] Flugzeugtoiletten sind mit Teflon beschichtet, fantasticfacts.net/de/16748/
- [9] PTFE-Spray, www.ballistol-wiki.de/index.php?title=PTFE-Spray
- [10] Conservation-restoration of the Statue of Liberty, https://en.wikipedia.org/wiki/Conservation-restoration_of_the_Statue_of_Liberty
- [11] de.wikipedia.org/wiki/Gore-Tex
- [12] de.wikipedia.org/wiki/Fluor; de.wikipedia.org/wiki/Fluoride; de.wikipedia.org/wiki/Fluoridierung
- [13] www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1906/moissan/facts/
- [14] Baselt RC. *Disposition of Toxic Drugs and Chemicals in Man*, 7th ed., Biomedical Publications, Foster City California USA, 2004.
- [15] Rehberg C. Zahnpasta – Warum wir auf Fluorid verzichten können. Zentrum der Gesundheit vom 03.01.2024, www.zentrum-der-gesundheit.de/bibliothek/ratgeber/mundhygiene/zahnpasta-fluorid/
- [16] Berres I. Macht Fluorid in Zahnpasta krank? Spiegel Gesundheit vom 10.02.2014, www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/wie-gefaehrlich-ist-das-fluorid-in-der-zahnpasta-a-946074.html
- [17] XiaoZhi Lim. PFAS-Verbot: Eine Welt ohne Teflon? Spektrum.de, Hintergrund, vom 13.08.2023, <https://www.spektrum.de/news/pfas-eine-welt-ohne-teflon/2167461>
- [18] Osterath B. Wasserdicht auch ohne Fluor. *Nachrichten aus der Chemie* Februar 2023, S. 20-26, <https://gdch.app/article/wasserdicht-auch-ohne-fluor-4134660>
- [19] de.wikipedia.org/wiki/Trichlorfluormethan
- [20] de.wikipedia.org/wiki/Dichlordifluormethan
- [21] Molina MJ, Rowland FS. Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-catalysed Destruction of Ozone. *Nature* 1974;249(Nr. 5460):810-812 (1974).
- [22] https://de.wikipedia.org/wiki/Mario_J._Molina
Anmerkung: M.J. Molina erlernte auf einem Internat in St. Gallen die deutsche Sprache, spielte Geige und interessierte sich für das Fach Musik. Nach dem Chemiestudium in seiner Heimatstadt Mexico-City studierte er mit einem DAAD-Stipendium Chemie an der Universität Freiburg/Brsg. (Diplom 1967) und anschließend an der University of California in Berkeley.

- [23] Mario J. Molina. Nobel Lecture - Polar Ozone Depletion vom 8. Dez. 1995, www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1995/molina/lecture
- [24] Montreal Protokoll, EU-Verordnung Nr. 3322/88 (16. 09. 1987). Montreal Protokoll über Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen. ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol
- [25] Regierungspräsidium Karlsruhe. Überblick: PFAS-Problematik in Mittelbaden und Mannheim, rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/abt5/ref541/stabsstelle-pfc/pfc-problematik-mittelbaden-mannheim/
- [26] ARD Tagesschau vom 23.02.2023. Wo PFAS überall Deutschland verschmutzen, <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr-wdr/pfas-chemikalien-deutschland-101.html>
- [27] Androulakakis A, Alygizakis N, Bizani I, Thomaidis NS. Current Progress in the Environmental Analysis of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS). *Environmental Science Advances* 2022;1:705-724.
- [28] Europäische Chemikalienagentur ECHA: Perfluoroalkylchemikalien (PFAS), <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>
- [29] Korrespondenz (mehrere Zuschriften) in: *Nachrichten aus der Chemie*, 2023;71:78-81.
- [30] Endres S. PFAS - erkennen, ersetzen, entfernen. *Fraunhofer-Magazin* 2023;23(4):23,38-47, <https://www.fraunhofer.de/s/ePaper/Magazin/2023/04/index.html#0>
- [31] Concellón A, Swager TM. Detection of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) by Interrupted Energy Transfer. *Angewandte Chemie* vom 5.10.2023, onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ange.202309928
- [32] <https://de.wikipedia.org/wiki/Ferrocen> und <https://de.wikipedia.org/wiki/Cobaltocen>
- [33] Medina PB, Contreras VA, Hartmann F, Schmitt D, Klimek A, Elbert J, Gallei M, Su X. Investigating the Electrochemically Driven Capture and Release of Long-Chain PFAS by Redox Metallopolymer Sorbents. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023;15(18):22112-22122.
- [34] Tack FMG, Meers E. Assisted Phytoextraction Helping Plants to Help Us. *Elements* 2010;6(6):383-388.
- [35] Tien-Chi, Wu. Thesis: Phytoremediation Potential for Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) Using Various Plant Species. Swedish Univ. of Agricultural Sciences, SLU, Dept. of Aquatic Science and Assessment, Soil, Water and Environment, Uppsala, Sweden, 2021, stud.epsilon.slu.se/17146/Wu_t_210816.pdf
- [36] FAZ aktuell vom 5.12.2023; Vernichtungsverbot der EU, www.faz.net/aktuell/wirtschaft/oekodesign-vernichtungsverbot-fuer-unverkaufte-textilien-19362685.html

Anmerkung: Alle Internetverbindungen wurden zuletzt am 14.02.2024 eingesehen.