DER EINSATZ VON PTFE IN DER BEKLEIDUNGS- UND SCHUHINDUSTRIE IST UMWELT- UND GESUNDHEITSSCHÄDLICH – UND DANK VORHANDENER ALTERNATIVEN NICHT ERFORDERLICH

Eine wissenschaftliche Stellungnahme zum European Green Deal Ziel „Die Wirtschaft der EU für eine nachhaltige Zukunft umgestalten: Das Null-Verschmutzungsziel für eine giftfreie Umwelt“,

mit Fokus auf die Substanzgruppe PFAS im Rahmen der EU Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit, der EU-Initiative für nachhaltige Produkte sowie der Klimaschutzziele des Pariser Abkommens

Datum: April 2021

Herausgeber: Arbeitsgruppe Chemikalien, Sympatex Technologies GmbH

Kontakt: csr@sympatex.com

EXECUTIVE SUMMARY

Die Bedeutsamkeit einer funktionierenden Gesundheits-, Klima- und Umweltpolitik wird aktuell weltweit hervorgehoben. Der Schutz des Menschen und der Biosphäre erfährt immer stärkere politische Priorität. Im Zuge dessen werden auch gesundheitsgefährdende und umweltschädliche Produkte und Produktionsverfahren stärker in den Fokus gerückt und gesetzgeberisch neu bewertet.

In dem vorliegenden Bericht geht es um die Verwendung von Polytetrafluorethylen (PTFE)-Membranen in der Bekleidungs- und Schuhindustrie, deren gesundheits- und umweltschädliche Auswirkungen sowie um bereits seit vielen Jahren im Einsatz befindliche und bewährte Alternativen.

Der Bekleidungs- und Schuhindustrie kommt eine große Verantwortung zu, da sie ohnehin schon sehr starke Belastungen für die Umwelt hervorruft. In der Anpassung textiler Produktionsverfahren für jährlich rund 100 Milliarden produzierte Kleidungsstücke liegt ein immenser Hebel für besseren Gesundheitsschutz und Umweltverträglichkeit durch optimierte Kreislaufwirtschaft, verringerten CO_2-Ausstoß sowie Schadstoffreduktion in der Umwelt.

Herstellung, Nutzung und Abfallbeseitigung von PTFE-Membranen stehen unter dringendem Verdacht, massive Gesundheitsschäden wie Krebs, Fehlgeburten, Missbildungen bei Neugeborenen, reduzierte Impfwirkungen und geschwächte Immunsysteme zu verursachen. Dabei zeigt sich, dass auch die inzwischen für die PTFE-Herstellung verwendeten Ersatzstoffe (GenX etc.), ebenso schädliche Auswirkungen haben, das heißt in der EU als besonders besorgniserregende Stoffe eingestuft sind.

Nicht nur Flüsse und Gewässer in der Nähe von PTFE-Produktionsstätten sind oft stark verunreinigt und weisen zum Teil eklatant erhöhte Krebsraten in unmittelbarer Nähe aus. Durch die Volatilität der Stoffe wurden auch in weit entfernten Regionen bereits angereicherte Mengen an Fluorchemikalien im menschlichen Blut nachgewiesen.

Die Persistenz von PTFE ist für andere Einsatzbereiche, wie Kabelummantelungen oder medizinische Implantate, ein notwendiges Kriterium. Für textile Produkte stellt es dank adäquater Alternativen allerdings eine vermeidbare Gesundheitsgefährdung für den Nutzer und auch eine unnötige Entsorgungsproblematik dar. Denn PTFE-Membranen verhindern durch ihre ungünstige Entsorgbarkeit im textilen Bereich das umweltfreundlichere Recyceln und damit sämtliche Bestrebungen zur Kreislaufwirtschaft.

Darüber hinaus sind die CO_2-Emissionen bei der Herstellung von PTFE-Membranen mehr als 30-mal höher als verfügbare Alternativen. HFC-23-Messungen in der Atmosphäre zeigen deutlich auf, dass die weltweit steigende PTFE-Herstellung vergleichsweise stark zum Klimawandel beiträgt.

PTFE-Membranen können weder sicher noch nachhaltig gestaltet werden.

Hingegen erlauben umweltschonende, gesundheitlich unbedenkliche Polyester (PES) - Membranen bei gleicher technischer Performance ein hochwertiges Recycling und stark reduzierte Treibhausgas-emissionen. Zugleich werden diese PTFE-Alternativen die EU Chemicals Strategy for Sustainability und die bevorstehende EU Sustainable Product Initiative unterstützen. Diese zielen darauf ab, die Schließung des Kreislaufs zu beschleunigen und die Auswirkungen von Abfall und Chemikalien zu reduzieren. PTFE-Alternativen werden auch die Umweltrisiken innerhalb der Lieferkette reduzieren, die im Rahmen der zukünftigen Sorgfaltspflichtgesetze identifiziert werden müssen.

Aufgrund gesundheits- und umweltfreundlicherer sowie technisch gleichwertig verfügbarer Alternativen fordert diese Studie dringend gesetzlich verankerte Restriktionen von PTFE-Membranen für alle nicht notwendigen Einsatzgebiete in der Textil-, Bekleidungs- und Schuhindustrie.

INHALT

EXECUTIVE SUMMARY 1
1 HINTERGRUND 3
2 FLUORCHEMIE EINSATZ IN DER TEXTILINDUSTRIE 5
2.1 PTFE-Membranen 5
2.2 BEST PRACTICE: Fluorcarbon-freie Membranen 7
3 FLUORCHEMIE IM WASSER UND DER UMWELT 8
3.1 Auswirkungen der PTFE-Produktion auf Umwelt und Gesundheit 8
3.2 Auswirkungen textiler fluorhaltiger Produkte auf die Gesundheit 10
3.3 Analyseverfahren 11
3.4 VORREITER - Die Niederlande zieht Konsequenzen 12
3.5 Wasserverbrauch Membranen 12
4 RECYCLING VON FUNKTIONSTEXTILIEN 13
4.1 Nachhaltiges Design und Produktion 14
4.2 Verbrauch und Nutzung 15
4.3 Abfall und Recycling 15
4.4 Globales Agieren - Lieferkette 17
4.5 BEST PRACTICE - wear2wear Kooperation 18
5 CO_2-EMISSIONEN TEXTILER MEMBRANEN 19
5.1 PTFE-Datenerfassung und globaler Emissionsfaktor 20
5.2 BEST PRACTICE: PES-Membran, bio-massed based 23
6 FAZIT 24
7 ANHANG – Öko-Recherche Gutachten 25
8 LITERATURVERZEICHNIS 29

1 HINTERGRUND

"Wann immer möglich, vermeiden Sie Produkte die PFAS enthalten oder unter Verwendung von PFAS hergestellt wurden (auch öffentliche Beschaffung). Dazu gehören viele Produkte, die schmutzabweisend, wasserfest oder nichthaftend sind."

Auszug aus dem Madrider Statement zu PFAS, unter anderem gerichtet an Behörden, Einkäufer, Einzelhändler und einzelne Verbraucher, 2015 [1]

Auf der internationalen PFAS (per- and polyfluoroalkyl substances)-Konferenz 2020 haben zahlreiche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Vorträge zur Gesetzgebung, den zukünftigen PFAS-Beschränkungsverfahren und den unterschiedlichsten Fällen von Kontaminationen durch per- und polyfluorierte Chemikalien, deren Auswirkungen und Maßnahmen gehalten. Es ging um die weltweiten Verunreinigungen von Böden, Grund- und Trinkwasser und damit Nahrungsmittel sowie die Folgen für Menschen und Tiere. [2] Viele der seit den 1960er Jahren in die Umwelt entlassenen PFAS-Substanzen sind bereits als PBT-Stoffe [3] eingestuft und reichern sich im menschlichen Körper an, verursachen mitunter Krebs sowie Fehlbildungen bei Neugeborenen. Aktuell wird erforscht, inwieweit das Immunsystem durch PFAS beeinflusst und die Wirkung von Impfstoffen herabgesetzt wird.

Unter der Vielzahl der genannten PFAS-Chemikalien tauchen maßgeblich die inzwischen in der EU verbotenen Chemikalien PFOS und PFOA sowie deren bisher *nur* als SVHC eingestuften Ersatzstoffe wie GenX auf. Bei zahlreichen Tests wie in den USA, den Niederlanden und Italien überschritten beispielsweise die im Blut gefundenen PFOA-Werte massiv die gesetzlich festgelegten Grenzwerte. Die gesundheitlichen Schäden haben eine immense Tragweite. Nach großen Probandentest mit etwa 70000 Personen in West Virginia, USA, wurden bereits 3500 darauf zurückführende Krankheits- und oder Todesfälle vor Gericht anerkannt, weitere Verfahren laufen. [4]

Ein Bericht aus dem Jahr 2016 deckt vier der größten PFAS-Verschmutzungs-Hotspots der Welt auf, alle im Umkreis von PTFE-Herstellern. [5] PFCAs (Perfluorcarbonsäuren), darunter PFOA und deren Ersatzstoffe, dienen mitunter als Emulgatoren bei der PTFE-Herstellung. Das an sich stabile PTFE-Polymer kann weiterhin PFOA-Verunreinigungen beinhalten sowie bei der Verbrennung zu PFCAs, einschließlich PFOA zerfallen. [6, p. 37] Diese Erkenntnisse sind besonders relevant für die Textilindustrie, da sie einer der größten Anwender von PFAS ist und die vorherrschenden Entsorgungswege und Emissionen in die Umwelt über Abwasser, Verbrennung und Deponien erfolgen. [6, p. 125]

Aufgrund der Fokussierung auf Fluorcarbon-haltige Ausrüstungen von Textilien, wie auch in der neuesten großangelegten Studie der EU zu PFAS, [6] werden Fluorcarbon-haltige Membranen kaum und deren Alternativen nicht betrachtet. Daher ist sich ein Großteil der textilen öffentlichen Beschaffung sowie der Bekleidungs- und Schuhbranche noch immer nicht der umfassend verheerenden Auswirkungen bewusst, die der unnötige Einsatz von fluorbasierten Membranen mit sich bringt.

Bei der Analyse der relevantesten Umweltrisiken der Textilindustrie ermittelte die Boston Consulting Group die Themen Chemikalieneinsatz, Wasser, CO_2-Emissionen und Abfall. [7] Im Gegensatz zu alternativen, technisch gleichwertigen und seit Jahren bewährten Membranmaterialien, zum Beispiel auf Polyesterbasis, konterkarieren PTFE-Membranen jedes dieser Umweltthemen massiv:

a) Wasser: Neben den auf Jahrzehnte verunreinigten Gewässern und Böden in der Nähe von PTFE Produktionsstandorten sind die Spuren von PFOA inzwischen weltweit, sogar bis in die entlegensten Orte der Welt zu finden. [8, p. 15]

b) Chemikalien: Auch im Blut von Menschen, sogar Föten, befinden sich bereits nachweisbare Mengen und belasten den Körper. [8, p. 14]

c) Recycling: PTFE-Membranen lassen sich im Gegensatz zu technisch gleichwertigen Alternativen in den für die Textilindustrie relevanten Laminatsaufbauten bislang nicht auf ökologisch und wirtschaftlich sinnvolle Weise recyceln. Damit erfüllen sie (und alle mit ihnen dauerhaft z.B. durch Laminieren verbundenen Materialien) nicht die Bemühungen der EU [9] und deren Mitgliedsstaaten in Bezug auf Recycling, recycelte Inhalte und Wiederverwertbarkeit für die Textil- und Schuhindustrie. Ebenso wenig sind die Recyclingströme derart kontrolliert, dass das individuelle Verbrennen von Bekleidungsstücken und Schuhen unter freiem Himmel ausgeschlossen werden kann - und damit der Kontakt unschuldiger Dritter zu hochtoxischer Flusssäure. [10]

d) CO_2-Emissionen: Die CO_2-Emissionen von PTFE-Membranen sind um mehr als 30-mal höher als die von anderen in der Textilindustrie verfügbaren Alternativen. [11], [12] Die Textilbranche ist bereits heute für mehr als 8% des weltweiten Treibhausgasausstoßes verantwortlich [13], eine Reduktion zur Erreichung der Science Based Targets und damit der Ziele des Pariser Klimaabkommens ist unabdingbar.

Bereits im Jahr 2015 unterzeichneten 230 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 40 verschiedenen Ländern das Madrider Statement zu poly- und perfluorierten Substanzen. Sie riefen die internationale Gemeinschaft auf, bei der Begrenzung der Herstellung und Verwendung von PFAS und bei der Entwicklung sichererer nichtfluorierter Alternativen zusammenzuarbeiten. [1]

Die an der Ausarbeitung des Statements beteiligte renommierte Chemikerin Prof. Arlene Blum wies auf der internationalen PFAS Online Konferenz 2020 sechs Klassen gefährlicher Substanzen aus, wovon ihrer Auffassung nach PFAS die mit Abstand gravierendste ist. Mit Blick auf die Verwendung von PFAS und die Einführung „Grüner Chemie“ beschrieb sie zugleich die drei aus ihrer Sicht relevantesten Fragen:

1. Ist die Verwendung notwendig?
2. Ist es die Sache wert?
3. Gibt es eine sicherere Alternative? [14]

Der nachstehende Bericht widmet sich der Betrachtung der zuvor genannten vier relevantesten Umweltthemen der Textilbranche unter Berücksichtigung der obigen drei Fragestellungen zur Notwendigkeit, Auswirkungen und Alternativen. Er fasst die seit den 1970er Jahren bekannten sowie in den letzten Jahren weltweit gewonnenen Erkenntnisse zu Umweltverschmutzung und Gesundheitsgefahren im Zusammenhang mit der PTFE-Herstellung und Nutzung zusammen und zeigt anhand von Best Practice Beispielen, dass die Verwendung von PTFE-Membranen in der Textilindustrie längst hinfällig ist.

2 FLUORCHEMIE EINSATZ IN DER TEXTILINDUSTRIE

„Die Reduzierung des Einsatzes von PFAS ist wichtiger als die Besteigung der höchsten Berge der Welt."

Prof. Arlene Blum, Leiterin der ersten Frauenexpedition zum Annapurna (1977) und Executive Director of Green Science Policy Institute Berkley/ Kalifornien, USA [14]

Die Gruppe der PFAS umfasst etwa 4700 unterschiedliche Substanzen, [15] von denen zahlreiche unter die sogenannten PBT-Stoffe fallen und somit persistent, bioakkumulativ und toxisch sind. [8]

Ihr Einsatz in der Bekleidungs- und Schuhindustrie erfolgt in zweierlei Arten:

a) Die Oberstoffe sind in den meisten Fällen mittels einer DWR (Durable Water Repellent) Ausrüstung von außen wasserabweisend imprägniert sowie

b) das Material durch eine wasserdichte Zwischenschicht (Membran oder Beschichtung) gegen das Eindringen von Wasser zum Körper geschützt.

In den vergangenen Jahren der Umweltdebatte wurde der Fokus der Textilindustrie zum Thema PFAS (früher deutsch oft PFC - per- und polyfluorierte Chemikalien), zumeist auf die Gesetzgebung und die Auswirkungen fluorchemiehaltiger DWR-Ausrüstung gelenkt. Daher widmet sich der nachstehende Abschnitt insbesondere der Fluorcarbon-haltigen Zwischenschicht – der PTFE-Membran.

2.1 PTFE-Membranen

Während DWR-Ausrüstungen die Fasern des Oberstoffes imprägnieren, dienen Membranen als wasserdichte Barriere zwischen den textilen Lagen.

Am 11. Mai 2020 wurde von der ECHA eine Konsultation hinsichtlich eines Beschränkungsverfahrens gestartet, das ein breites Spektrum von PFAS-Verwendungen abdeckt. Dabei geht es um alle PFAS und mögliche Alternativen bei Textilien, Polster, Leder, Bekleidung und Teppichen. Hierbei sind auch PTFE-Membranen inbegriffen. [16], [17] Die Niederlande und Deutschland planen mit Unterstützung Norwegens, Dänemarks und Schwedens die Erstellung eines entsprechenden Beschränkungsdossiers. [18]

Der Beschränkungsvorschlag wird von der nationalen Behörde in den kommenden zwei Jahren ausgearbeitet. Die wissenschaftlichen Ausschüsse der ECHA geben ihre Stellungnahme nach der Einreichung des Beschränkungsdossiers ab. Das Inkrafttreten dieser Beschränkung wird für das Jahr 2025 erwartet. [18]

Hintergrund ist Folgender: Bis Ende der 1990er Jahre wurden PTFE-Membranen meist mit der Prozesschemikalie PFOA hergestellt. PFOA-Salze dienen dabei hauptsächlich als Emulgator bei der Synthese des Fluorpolymers PTFE. Aufgrund der damalig beginnenden Diskussionen über öko- und humantoxikologische Eigenschaften von PFOA ersetzte die Fluorchemieindustrie PFOA durch alternative Perfluorcarbonsäuren (PFCAs), wie beispielweise GenX oder Adona. Im Zuge von aktuellen Untersuchungen wurden jedoch die Ersatzchemikalie GenX von der ECHA als SVHC Stoff (Substance of Very High Concern) eingestuft [17] sowie die Chemikalie Adona [..] als unerwünschte Ersatzstoffe

bewertet, da sie in Bezug auf Persistenz, Mobilität und möglicherweise Toxizität Chemikalien wie GenX und anderen PFCAs höchstwahrscheinlich ähnlich sind. [19]

In Europa und den USA gehen die PFOA Umweltkonzentrationen aufgrund verschiedener Maßnahmen bereits langsam zurück. Dies ist auf eine Vereinbarung zwischen der fluorchemischen Industrie und der US-Umweltschutzbehörde (US EPA) aus dem Jahr 2006 zurückzuführen, in der sich acht Unternehmen freiwillig verpflichteten, PFOA bis 2010 um 95 % zu reduzieren (im Vergleich zu 2000) und bis 2015 vollständig zu eliminieren. Viele Unternehmen, zum Beispiel im aufstrebenden asiatischen Markt, nehmen jedoch nicht an dem Stewardship-Programm teil. Dies bedeutet, dass PFOA und seine Vorläuferstoffe durch importierte Produkte auf den EU-Markt gelangen können [20] – und ihre volatilen Kollateralschäden über den Umweg der Gewässer und Atmosphäre. Ein Greenpeace Bericht aus dem Jahr 2016 bestätigt dies und vermerkte, dass „sich die weltweite Produktion von PFOA zur Herstellung von PTFE (Teflon) nach China verlagert, wo sich nun das gleiche Verschmutzungsmuster wiederholt." [5] Im Jahr 2020 erfolgten über 75% der weltweiten PTFE Produktionen nicht in der EU, so aber beispielsweise 41,5 % in China, 15,5 % in den USA und 8,5% in Russland. [21] Und obwohl der neu gewählte amerikanische Präsident Biden das Thema PFAS Substanzen zu priorisieren erklärt hat, sind PFAS in den USA bisher nicht als schädliche Substanzen aufgeführt. [14] Das heißt, PFOA, GenX und andere PFCAs sind bisher nur in der EU als schädliche Substanzen oder unerwünschte Ersatzstoffe aufgeführt. Doch was genau macht sie so gefährlich?

Auswirkungen von PFOA

PFOA ist schwer abbaubar, akkumuliert im Organismus und ist toxisch. Aus diesem Grund ist PFOA in der POP-Verordnung (Persistente organische Schadstoffe) Anhang 1 gelistet und bis auf einige Ausnahmen auf 0,025 mg/kg in Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen beschränkt. [22] PFOA kann bei der Herstellung und Verwendung in die Umwelt gelangen. Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass PFOA in der Umwelt beim Abbau von Fluortelomeren gebildet werden kann. Es ist in allen Umweltmedien hochpersistent und wird über weite Strecken transportiert. PFOA hat ein hohes Bioakkumulationspotenzial. In Tierversuchen ist es krebserregend, toxisch und endokrinschädigend. PFOA ist giftig für Wasserorganismen und kann in Gewässern langfristige schädliche Auswirkungen haben. [23]

Auswirkungen PFOA-Ersatzstoffe

GenX, Adona und ähnliche Substanzen mit vergleichbaren technischen Eigenschaften als PFOA-Ersatzstoffe sind ebenso persistent, sehr mobil, haben das Potenzial für Langstreckentransport und die Bioverfügbarkeit für die Aufnahme von Trinkwasser. Zudem haben sie ein sehr hohes Potential für irreversible Auswirkungen. [17] Dieser Beurteilung trägt die offizielle Einstufung der Chemikalie GenX (HFPO-DA sowie ihre Salze und Acylhalogenide) als SVHC seit kurzem Rechnung. Der Ausschuss (ECHA) kam überein, dass die in dem Vorschlag als HFPO-DA bezeichneten Stoffe in Bezug auf krebserzeugende, erbgutverändernde und fortpflanzungsgefährdende Stoffe (CMR), persistente, bioakkumulierbare und toxische Stoffe (PBT) sowie sehr persistente und sehr bioakkumulierbare Stoffe (vPvB) eine gleichwertige Besorgnisstufe darstellen. [24]

Das heißt, obwohl PTFE-Membranen weder aus PFCA (z.B. PFOA, GenX, ADONA) noch aus deren Vorläufern hergestellt werden, werden jedoch Varianten verschiedener PFCA als Prozesschemikalien bei der Herstellung verwendet und das Endprodukt kann Rückstände dieser Stoffe enthalten.

Es gibt daher keinen Herstellungsprozess und keine Anwendung von PTFE-Membranen, die nicht gesundheits- und umweltschädigend ist. Es gibt jedoch alternative sichere Membranmaterialien.

2.2 BEST PRACTICE: Fluorcarbon-freie Membranen

Durch jahrelange Aufklärungsarbeit und entsprechende Gesetzgebungen haben sich Fluorcarbon-freie Ausrüstungen signifikante Marktanteile erkämpft und die Fluorcarbon-haltigen DWR aus einigen Anwendungsfeldern zunehmend verdrängt. Im Gegensatz dazu ist das Wissen zu den Herstellungsprozessen von PTFE-Membranen und deren Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit noch nicht zu den Verbrauchern durchgedrungen.

Dabei gibt es verschiedene Alternativmaterialien zu PTFE, die schon lange im Markt verfügbar sind und vergleichbare Leistungskennwerte erreichen. Mit Blick auf die überlegene Recyclingfähigkeit, das heißt notwendige Sortenreinheit und den hauptsächlich in der Textilindustrie verwendeten Fasern, erfolgt nachstehend der Vergleich mit einer hydrophilen PES Membran.[1]

Hydrophile PES-Membranen werden in der Regel über Extrusionsprozesse aus der entsprechenden Polymerschmelze hergestellt. Die zugehörigen Polyester-basierten Copolymere wiederum können über in der Kunststoffindustrie bereits seit vielen Jahrzehnten etablierte Verfahren produziert werden. Üblicherweise werden die unterschiedlichen Bausteine des Polymers in einer Schmelzepolykondensation miteinander verknüpft und das gewünschte Molekulargewicht abschließend über eine Festphasenkondensation eingestellt.

Sowohl die Herstellung der Membranen als auch der Polymere erfolgt dabei in der Regel ohne Einsatz von Lösemitteln, sodass deren mehr oder wenige aufwendige Abtrennung und Rückgewinnung für hydrophile Polyester-basierte Membransysteme zumeist nicht notwendig ist.

[1] Neben PTFE und PES-Membranen kommen weiterhin Membranen und Beschichtungen aus Polyurethan (PU) in der Textilindustrie zum Einsatz.

3 FLUORCHEMIE IM WASSER UND DER UMWELT

„Die Menschen müssen erfahren, dass dieses Zeug inzwischen überall ist. In der Umwelt, im Trinkwasser und sogar im Blut von fast allen Lebewesen auf diesem Planeten.“

Robert Bilott, Umweltrechtsanwalt, Hauptkläger gegen DuPont im Interview zum Film Vergiftete Wahrheit (Dark Waters), 2019 [25]

Ob *Teflon – Die unsichtbare Gefahr* oder *Vergiftete Wahrheit* – beide Filme eint die Aufdeckung der Umwelt- und Gesundheitsschäden, welche die PTFE-Herstellung mit sich bringt.

Bei der Produktion von PTFE werden die lokale Umwelt, einschließlich Oberflächenwasser, Trinkwasser, Grundwasser sowie Luft und Staub verunreinigt. Es gibt zahlreiche Belege zu Verschmutzungen an Orten weltweit, an denen Chemieunternehmen PTFE herstellen, einschließlich derer, die noch immer PFOA oder PFOA-Ersatzsubstanzen, wie GenX, verwenden. [5] Auf einige Beispiele soll nachstehend eingegangen und die Konzentrationen im Wasser und im Blut der umliegenden Bevölkerung aufgeführt werden. Doch nicht nur durch Trinkwasser, und damit Nahrung, gelangen diese gefährlichen Substanzen in den menschlichen Körper. Sie können auch direkt von der Haut absorbiert oder durch Stäube eingeatmet werden. [26] Bisherige Messmethoden lassen zudem vermuten, dass aktuell nur die Spitze des Eisbergs erkennbar ist [27] und die Forderung der Politik und Wissenschaft nach einer gesamten Betrachtung der Substanzgruppe PFAS mehr als berechtigt ist. [28] Im Zuge der aktuell laufenden Beschränkungsverfahren stehen damit auch Kosten für Umweltsanierungen und Schadensersatzleistungen in Millionenhöhe im Raum.

3.1 Auswirkungen der PTFE-Produktion auf Umwelt und Gesundheit

In einem Bericht von 2016 werden vier PFAS-Hotspots aufgeführt, die nachstehend zusammengefasst aufgeführt werden. In drei der Regionen werden PFAS maßgeblich zur PTFE-Herstellung verwendet.

DuPont (Chemours)/ West-Virginia:
Der weltweit bekannteste Fall von PFAS-Kontamination liegt in der Nähe der DuPont-Anlage in Ohio, West Virginia, USA und wird im Kinofilm *Vergiftete Wahrheit* thematisiert. Seit den 1950er Jahren und bis zum Ende der Produktion im Jahr 2015 gelang die zur PTFE-Herstellung verwendete Chemikalie PFOA in das Trinkwasser der Menschen. Bereits seit den 1980er Jahren wurde PFOA im öffentlichen Trinkwasser in der Nähe der Anlage nachgewiesen, wobei DuPont zu diesem Zeitpunkt bereits um die gesundheitsschädliche Wirkung wusste. Im privaten Trinkwasser wurden sehr hohe PFOA-Werte von bis zu 22,1 µg/l gefunden. Auch wenn die Produktion im Jahr 2013 um 99% reduziert wurde, ergaben Messungen im Trinkwasser der Umgebung noch immer einen Wert von 0,0631 µg/l. Als Erklärung dafür wurden die PFOA-Konzentrationen im Blut der Bevölkerung aufgeführt. [5, p. 4]

Im Zuge dessen wurde das Blut von 69.000 Einwohnern, die mindestens über ein Jahr in dem Bezirk lebten, hinsichtlich ihrer PFOA-Konzentrationen untersucht. Im Blut wurden sehr hohe PFOA-Konzentrationen gefunden - im Median 28,2 ng/ml, mit einem Mittelwert von 83,0 ng/ml - im Vergleich zu einem Medianwert von 3,9 ng/ml in der Allgemeinbevölkerung. Zwei Studien zufolge wurde die Exposition gegenüber PFOA sowohl mit Nieren- als auch mit Hodenkrebs in Verbindung gebracht. Es werden zudem Assoziationen mit Prostata- und Eierstockkrebs sowie Non-Hodgkin-Lymphomen vermutet. [5, p. 4]

Chemours/ Dordrecht:
Weitere Untersuchungen erfolgten in einer der größten PFAS-Produktionsstätten Europas, in Dordrecht, NL. Das 1960 eröffnete Werk wurde 2015 unter dem neuen Firmennamen Chemours, als Spin-off von DuPont ausgegliedert. Bis zum Jahr 2012 wurde PFOA für die Teflon-Herstellung verwendet, im Anschluss wird inzwischen als Ersatzstoff die Chemikalie GenX eingesetzt. Staatliche Untersuchungen des Trinkwassers im Jahr 2015 ergaben keine erhöhten PFOA-Konzentrationen (Anm. in Bezug auf die damals geltenden Grenzwerte). Nach der Erstellung verschiedener Emissionsszenarien wurde „im ungünstigsten Fall der Grenzwert 25 Jahre lang überschritten. Bei einer solchen Höhe der chronischen PFOA-Belastung können gesundheitliche Auswirkungen, zum Beispiel auf die Leber, nicht ausgeschlossen werden". [5, p. 5]

Im April 2015 veröffentlichte PFOA-Bluttests eines DuPont-Mitarbeiters wiesen 28,3 ng/ml PFOA im Blut auf, bei seiner ebenfalls getesteten Frau wurden sogar dreimal so hohe Werte gefunden, 83,6 ng/ml. Weitere Messungen von PFOA-Konzentrationen im Blut der Anwohner wurden nicht durchgeführt. Nachdem jedoch Anwohner Interesse an weiteren Bluttest signalisierten, erhielten ausgewählte Teilnehmer Ende August 2016 eine Einladung zu Blutuntersuchungen, die im September und Oktober 2016 stattfanden. [5, p. 5] Die deutlichsten Hinweise wurden für einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber PFOA und höheren Gesamtcholesterinkonzentrationen im Blut, höheren Konzentrationen des Leberenzyms ALT im Blut und einem niedrigeren Geburtsgewicht gefunden. Es gibt weniger eindeutige Hinweise auf einen Zusammenhang mit höheren Blutkonzentrationen anderer Leberenzyme, LDL-Cholesterin und Harnsäure. Auch für ein erhöhtes Risiko für chronische Darmentzündungen (Colitis ulcerosa), Hoden- und Nierenkrebs sowie schwangerschaftsbedingten Bluthochdruck und Präeklampsie wurden Hinweise gefunden. Darüber hinaus wurden Zusammenhänge zwischen der Exposition gegenüber PFOA und einer verminderten Impfreaktion, Veränderungen der Konzentrationen von Schilddrüsenhormonen im Blut und Schilddrüsenerkrankungen gefunden. [29] In einem weiteren Bericht von 2020 wurden Krebsraten von Anwohnern des Chemours Werkes mit dem Rest der Niederlande verglichen, wobei diese um 15,7% höher waren als im Rest des Landes. [28]

Lederindustrie/ Venetien:
Der PTFE-Hotspot in der italienischen Region Venetien wies noch höhere PFAS-Werte im Oberflächen- und Trinkwasser auf, wobei hier geschätzt etwa 350.000 bis 400.000 Menschen potenziell direkt exponiert waren. Allein im Trinkwasser wurden bis zu 1.886 ng/l PFOA gefunden. Als Quelle von 97% dieser PFAS Kontaminationen wurde 2013 eine Kläranlage identifiziert, in die hauptsächlich Gerbereien einleiten. Trotz Einstellung der PFOA-Herstellung 2011 waren die Werte 2016 noch um 140-mal höher als in der nicht-kontaminierten Umgebung. Nach Untersuchungen von 600 Personen wurden Konzentrationen von bis zu 754 ng/g (Median 74,21 ng/g) im Blutserum ausgemacht, was bis zu 20-mal höher ist als beim Rest der Bevölkerung. [5, p. 6]

Dongyuchem/ China:
Als letzter Hotspot des Berichts wurden die Gewässer um das Chemiewerk von Dongyuchem in der chinesischen Provinz Shandong untersucht. Als einer der größten PTFE-Hersteller Chinas (37.000 tpa) bedient er Kunden wie DuPont. Es wurden Gesamtkonzentrationen von bis zu 1.860.000 ng/l in dem Fluss gemessen, in den die Abwässer des Chemiewerks eingeleitet werden (eine der höchsten jemals gemeldeten Konzentrationen - wobei PFOA dominiert) und der in das Gelbe Meer zwischen China und Korea mündet. Um die inländische und internationale Nachfrage nach PFOA zu decken, wird die Produktion weiter erhöht. [5, p. 7] Blutuntersuchungen von Menschen aus der direkten Umgebung wurden nicht vorgenommen.

3.2 Auswirkungen textiler fluorhaltiger Produkte auf die Gesundheit

Neben der Aufnahme von PFOA oder deren Ersatzstoffe über das Trinkwasser erfolgen Übertragungen ebenso durch dermale Absorption sowie durch die Inhalation von Stäuben. Die Folgen für die Gesundheit sind katastrophal. In den letzten 30 Jahren wurde die bisherige Haupttodesursache Herzerkrankungen bei der Feuerwehr von Krebserkrankungen abgelöst. Krebs verursachte 70% der Todesfälle bei Berufsfeuerwehrleuten im Jahr 2016. [30] Es gibt nachgewiesene Zusammenhänge zwischen PFOA und Hodenkrebs, Mesotheliom, Non-Hodgkin-Lymphom und Prostatakrebs. Dies sind vier der acht häufigsten Krebsarten, an denen Feuerwehrleute häufiger erkranken als die Allgemeinbevölkerung. Darüber hinaus deutet die nachgewiesene Immuntoxizität von PFAS im Körper darauf hin, dass Bevölkerungsgruppen mit erhöhten PFAS-Konzentrationen in ihren Blutseren anfällig für eine breite Palette von Krankheiten und Krebserkrankungen sind. [26]

Während allen voran Feuerlöschschäume für die hohen Todes- und Krankheitsfälle verantwortlich gemacht werden, steht auch Feuerwehrbekleidung im Verdacht gesundheitsschädlich zu sein.

Die erste Untersuchung der Einsatzkleidung von Feuerwehrleuten mittels PIGE[2] ergab sehr hohe Gesamtfluorwerte in der Feuerwehrschutzbekleidung - sowohl im Obermaterial als auch in der Membran.

Die untersuchten Materialien bestanden aus mit Fluorcarbon-haltiger DWR ausgerüsteten Außenmaterialen, PTFE-Membranen als Feuchtigkeitssperre sowie fluorfreien Thermolinern um die Membran.

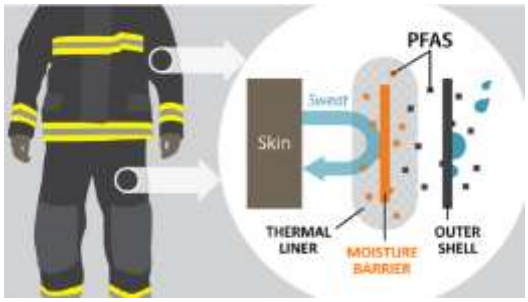

Abbildung 1: „Im Laufe der Zeit können PFAS in der Einsatzkleidung eines Feuerwehrmannes von der Feuchtigkeitsbarriere (orange) in die thermische Auskleidung migrieren, die mit der Haut in Kontakt kommt. PFAS können auch von der Außenhülle (schwarz) in die Umwelt abgegeben werden." [33]

PFAS-Migration zu den auf der Haut getragenen Lagen
Im ersten Schritt wurde festgestellt, dass erhebliche Mengen an Fluorchemikalien aus der Feuerwehrbekleidung während der Nutzungsdauer ausgeschieden werden. Die Thermoliner in dieser Studie wurden gemäß den Herstellern nicht mit PFAS behandelt, dennoch wurden signifikante Fluor-Mengen in allen eingenähten Thermolinern der Feuerwehrbekleidung gefunden. Der durchschnittliche Gesamtfluorgehalt, der in elf neuen Materialmustern gefunden wurde, bevor sie zu Thermolinern verarbeitet wurden, lag unter der Nachweisegrenze. Diese konsistente Beobachtung von Fluor in den unbehandelten Schichten ist der erste Beweis dafür, dass PFAS aus den hochfluorierten Schichten zu migrieren scheinen und sich in der unbehandelten Schicht - der auf der Haut getragenen Kleidung - ansammeln. [26]

Auch PFOA-Ersatzstoffe migrieren aus der PTFE-Membran
Durch weitere Analyseverfahren konnten zusätzliche Hinweise darauf gefunden werden, dass die PFAS-Konzentrationen im Thermoliner auch aus der PTFE-Membran stammen. Die Mehrheit der PFAS, die bei der Extraktion aus Textilien identifiziert wurden, gehören zu den kurz- und langkettigen Fluoralkylsäuren, einschließlich PFOA. Zudem wurde eine PTFE-Membran untersucht, die mittels eines PFOA-Ersatzstoffes hergestellt wurde. Diese war die einzige untersuchte Probe, die kein nachweisbares PFOA aufwies, vermutlich aufgrund der Umstellung von langkettigen PFAS-Lösungshilfsmitteln bei der Herstellung von PTFE 2012. Stattdessen wurde in diesem Material ein sehr

[2] PIGE – particle-induced gamma emission

hoher Gehalt an PFBS gefunden (>90 ppm), was auf ein neu verwendetes Lösungsmittelhilfsmittel hinweisen könnte." [26, p. C] Auch PFBS wurde derweil von der ECHA als SVHC Stoff eingestuft. [31]

Es lässt sich daher ableiten, dass auch die PFOA-Ersatzstoffe aus der Membran migrieren und sich über dermale Absorption auf den Körper auswirken können.

PFAS-Aufnahme durch Stäube

Es kann aber auch direktere Wege geben, auf denen PFAS in den Körper gelangen, zum Beispiel durch Inhalation von PFAS-haltigen Partikeln und Fasern, die von der Schutzkleidung resuspendiert wurden. Staubmessungen aus einem Textillager deuten ebenfalls auf einen direkten Verlust von PFAS aus den Fluorpolymeren in den Textilien hin. [26] Auch in der Greenpeace Hotspot-Studie wird berichtet, dass PFAS in Staubproben aus Innenräumen und im Freien in der Umgebung einer PTFE-Anlage nachgewiesen wurden, wobei das Konzentrationsmuster sowohl in Innenraum- als auch in Außenstaubproben mit der Entfernung von der Anlage abnimmt. In Innenraum-Staubproben war beispielsweise die Summe der PFAS in einem Gebiet, das 2 km von der Anlage entfernt war, bis zu 180 Mal höher als an Probeentnahmestellen, die 20 km entfernt lagen. [5, p. 7]

Die Studie zur Feuerwehrbekleidung empfiehlt indes, dass mehrere wichtige Schutzmaßnahmen für Feuerwehrpersonal sofort in Betracht gezogen werden sollten, bspw. das Tragen von PFAS-freier Kleidung unter der Einsatzkleidung und regelmäßiges Waschen. Dies würde dazu beitragen, die Exposition der Haut zu minimieren, auch Händewaschen nach dem Berühren der Einsatzkleidung wäre eine Vorsichtsmaßnahme. [26]

Da von der Migration von PFOA oder PFOA-Ersatzstoffen aus der PTFE-Membran ausgegangen werden muss, wäre eine porenlose, PTFE-freie alternative PES-Membran eine ebenso einfache wie auch gesundheits- und umweltfreundliche Sofortmaßnahme für Feuerwehrbekleidung.

3.3 Analyseverfahren

Weitere Forschungsergebnisse deuten zudem darauf hin, dass selbst moderne Analyseverfahren trotz hoher Sensitivität keine vollständige Erfassung von PFAS ermöglichen. Das in der Spurenanalytik häufig genutzte Detektionsverfahren LC-MS/MS hat in einer Studie beispielsweise nur etwa 1% der über eine andere Methode (PIGE) ermittelten Gesamtfluormengen erfasst. Diese stimmt mit früheren Messungen bei Textilien überein. „Es sind buchstäblich 100-mal mehr PFAS im Material vorhanden, beispielweise Vorläufersubstanzen, polymergebundenes Fluor das in der Ausrüstung verbleibt, nicht identifizierte ähnliche Substanzen und Oxidationszwischenprodukte, die weder identifiziert noch in der routinemäßigen LC-MS/ MS-Analyse erfasst werden.“ heißt es im Nachtrag der Studie zu Feuerwehrtextilien. [32]

In einer weiteren Studie wurden ähnliche Feststellungen gemacht. Bei einem Vergleich von PFCA-Konzentrationen (bspw. PFOA) im Abwasser vor und nach der Oxidation wurde ein Anstieg festgestellt. Dies lässt sich zurückführen auf Vorläufersubstanzen, die sich erst durch die Einwirkung von Sonnenlicht, fortgeschrittenen Oxidationsprozessen oder Mikroben auf städtische Abwässer zu PFCAs umwandeln und damit gemessen werden können. [27]

Auswirkungen auch auf Militär-, Polizei- und Alltagsbekleidung
Aufgrund der oben aufgeführten Studien zur Migration von PFAS in Feuerwehrtextilien und den Herausforderungen der Analyseverfahren lässt sich annehmen, dass dies auch in anderen Anwendungsbereichen wie Militär und Polizei, aber auch in Alltagsbekleidung eintreten könnte. Dies befürchten Wissenschaftler und stellen fest „Die gesundheitlichen Folgen eines solchen Materialverlustes gehen wahrscheinlich weit über Feuerwehruniformen hinaus.“ [33] “Die Feuerwehrleute riskieren da draußen ihr Leben für uns", sagt der Wissenschaftler Pealsee in einem Interview. "Das Mindeste, was wir tun können, ist, ihnen die sicherste Ausrüstung zu geben, die möglich ist.” [33]

3.4 VORREITER - Die Niederlande zieht Konsequenzen

Mit Blick auf die PFOA-Thematik sowie deren inzwischen ebenso als SVHC eingestufte Ersatzstoffe wird aktuell die gesamte PFAS-Substanzgruppe von der EU auf ihre Notwendigkeit geprüft. [17]

Die Niederlande haben bereits einer Erklärung im Parlament zugestimmt, die PFAS aus der öffentlichen Beschaffung ausschließt, siehe Kapitel 4. Aufgrund der untersuchten Gesundheitsauswirkungen des Chemours Werkes in Dordrecht sind die Niederländer sensibilisiert. Inzwischen fordern sogar Minister Schadensersatzanspruch in Millionenhöhe aufgrund von PFOA und GenX Kontaminationen gegen Chemours und DuPont. Damit tun sie es den Gemeinden Dordrecht, Sliedrecht, Papendrecht und Molenlanden gleich, die bereits angekündigt haben vor Gericht zu gehen, um das Unternehmen haftbar zu machen. Es ist zwar unwahrscheinlich, dass sich die niederländische Regierung an demselben Gerichtsverfahren beteiligt, aber laut der Abgeordneten Suzanne Kröger werden sich die Argumente jedoch überschneiden. „Wir können uns gegenseitig stärken.“, sagt sie und ergänzt, dass dies dringend notwendig sei: "Im Film *Vergiftete Wahrheit* haben wir gesehen, wie DuPont alle Register zieht.“ Ihrer Meinung nach ist das jetzt auch in Dordrecht sehr stark der Fall, denn Chemours ließ bereits verlauten, die strengeren Umweltauflagen nicht erfüllen zu wollen. Das Unternehmen bittet das Gericht hingegen in einem Eilverfahren, einen Schlussstrich unter diese Anforderungen zu ziehen. Der Schadensersatzanspruch würde mitunter die Kosten enthalten, um herauszufinden, wo die gefährlichen Stoffe PFOA und GenX alle gelandet sind. Dies ist notwendig, weil das Unternehmen selbst keine ausreichenden Aufzeichnungen darüber geführt hat. [34]

Mit der Abspaltung von DuPont übernahm Chemours 2015 die Umwelthaftung des Chemiekonzerns. Nachdem die maximal geschätzten Kosten für die Entschädigungen 945 Millionen Dollar überstiegen, hat Chemours die inzwischen fusionierten DowDuPont 2019 verklagt, da keine ‚unbegrenzte‘ Haftung vereinbart war. Anfang 2021 haben sich beide Firmen vorsorglich auf eine Kostenaufteilung der Klagen von 4 Milliarden Dollar geeinigt, womit sich das eigentliche Ausmaß der Schäden erahnen lässt. [35]

3.5 Wasserverbrauch Membranen

Basierend auf aktuellen Berechnungen anerkannter Datenbanken ist – unabhängig von der chemischen Wasserverschmutzung – auch der Wasserverbrauch zur PTFE-Membranherstellung etwa dreimal so hoch wie von PES-Membranen. Wird für die Herstellung von 1kg PES-Membran 26,4 Liter Wasser benötigt so sind es bei 1kg PTFE-Membran mit PU-Strich 86,9 Liter Wasser. [36]

Mit Blick auf die Umweltthemen Wasser und auch Gesundheit ist die Verwendung von PTFE-Membranen aufgrund vorhandener Alternativen nicht notwendig und erst recht nicht empfehlenswert. Daher sollten PTFE-Membranen in diesen Anwendungsbereichen nicht mehr zum Einsatz kommen dürfen.

4 RECYCLING VON FUNKTIONSTEXTILIEN

> ***„Das Abgeordnetenhaus nimmt nach Anhörung der Beratungen zur*** *Kenntnis, dass die Regierung bei der nachhaltigen Beschaffung eine Vorbildfunktion einnimmt; stellt fest, dass die Regierung für das Verteidigungsministerium und die Rettungsdienste Schuhe und Kleidung beschafft, in denen GenX und PFOA in der Membran enthalten sind; stellt fest, dass Alternativen ohne besonders bedenkliche Stoffe möglich sind; stellt fest, dass die Beschaffungspolitik und die technischen Spezifikationen für Kleidung und Schuhe für den Verteidigungs- und Rettungsdienst derzeit die Recyclingfähigkeit der Ausrüstung nicht berücksichtigen; fordert die Regierung auf, zu untersuchen, ob die Recyclingfähigkeit von Kleidung und Schuhen in die Beschaffungsregeln aufgenommen werden kann, und fährt mit der* ***Tagesordnung fort.“***
>
> *Erklärung der Abgeordneten Suzanne Kröger von GroenLinks, Sicherheit bei der Versorgung mit Rohstoffen, Abgeordnetenhaus der Generalstaaten, Niederlande, Antrag vom 30. Juni 2020.* [37]

Der oben aufgeführte Antrag der Abgeordneten Suzanne Kröger zur Aufnahme der Wiederverwertbarkeit von Kleidung und Schuhen in die Ausschreibungsregeln der Öffentlichen Beschaffung wurde mit 92 von 150 Stimmen von der Zweiten Kammer angenommen, dem Gesetzgebungsorgan der Niederlande.

Recyclingfähigkeit wird jedoch nicht nur in den Niederlanden fokussiert, auch in Deutschland wurde das Kreislaufwirtschaftsgesetz novelliert. Hintergrund ist der Circular Economy Action Plan (CEAP) der Europäischen Kommission. Dieser Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ist einer der wichtigsten Bausteine des EU Green Deals, der neuen europäischen Agenda für nachhaltiges Wachstum. [38]

Laut CEAP sind Textilien die viertgrößte Kategorie für den Verbrauch von Primärrohstoffen, wobei geschätzt wird, dass weniger als 1 % aller Textilien weltweit zu neuen Textilien recycelt werden. Angesichts der Komplexität der textilen Wertschöpfungskette wird die Kommission eine umfassende EU-Strategie für Textilien vorschlagen, die sich auf Beiträge der Industrie und anderer Interessen-gruppen stützt (siehe Kapitel 4.1 und 4.4) und beispielsweise den EU-Markt für nachhaltige und kreislauffähige Textilien, einschließlich des Marktes für die Wiederverwendung von Textilien, ankurbeln soll. Dies geht einher mit der strategischen Konzentration auf Sektoren, die die meisten Ressourcen verbrauchen und in denen das Potenzial für Kreislaufwirtschaft hoch ist, wie im Fall von Textilien. [9, p. 13].

Um den Kreislauf zu schließen, hat die Europäische Kommission Maßnahmen für folgende Bereiche definiert [39]:

- Design und Produktion
- Verbrauch und Nutzung
- Abfall und Recycling
- Globales Agieren

4.1 Nachhaltiges Design und Produktion

Basis aller Maßnahmen ist die Entwicklung von Textilerzeugnissen mittels nachhaltigem Design, um sicherzustellen, dass Produkte für die Kreislaufwirtschaft geeignet sind, die Verwendung von Sekundärrohstoffen gewährleistet und gefährliche Chemikalien vermieden werden. [9, p. 13]

Der EU Policy Hub, Interessenvertreter der Textilindustrie und Sprachrohr zur EU, hat sich als Ziel gesetzt, die Kreislaufwirtschaft in der Bekleidungs- und Schuhindustrie zu beschleunigen. Als wichtigste Punkte zum nachhaltigen Design definierte der EU Policy Hub:

- Design für Langlebigkeit
- Design zur Recyclingfähigkeit
- Design zur Reparaturfähigkeit
- Design für eine nachhaltigere Produktion

Dabei lautet die hier im Fokus stehende Definition zu „Design zur Recyclingfähigkeit“:

„Design für Kreislauffähigkeit bedeutet, Produkte zu schaffen, die dekonstruiert werden können, und Materialien zu verwenden, die am Ende ihrer Lebensdauer recycelt werden können oder industriell kompostierbar sind - ohne Risiko, das von ihrem chemischen Einsatz ausgeht, und mit einem geringen CO_{2eq}-Fußabdruck. Dies kann durch weitere Forschung und die Entwicklung neuer Materialien erreicht werden, wenn die derzeitigen nicht die gewünschte Funktionalität und Kreislauffähigkeit bieten. Bessere Kreislauffähigkeit unterstützt u.a. „ein geschlossener Kreislauf, bei dem Materialien weiterhin recycelt und am Ende ihrer Lebensdauer mit minimalen Ressourcen und Abfallverursachung wiederverwendet werden“. [40]

Vergleich Kreislauffähigkeit PES-Membran und PTFE-Membran

Die in Textilien verwendeten Membranen liegen in funktioneller Bekleidung als Verbundmaterialien vor, sogenannte Laminate. Die nachstehende Abbildung vergleicht die Recyclingfähigkeit eines Laminats mit einer PES-Membran und einer PTFE-Membran. Aufgrund der in funktionellen Textilien häufig verwendeten PES-Fasern kann die PES-Membran in einen 100% sortenreinen Verbund eingearbeitet werden. Dies ermöglicht ein einfaches und hochwertiges Recycling. Im Falle der PTFE-Membran ist dies nicht möglich.

Design to Recycling Potential von Membranen in Laminataufbauten	
Recyclingfähiges 100% PES Laminat – das PES, auch der Membran, kann dabei virgin, recycelt oder bio-basiert sein:	Fluorcarbon-basiertes Laminat – da PTFE nicht als Faser verwendet wird, kann im Verbund mit PTFE-Membranen niemals eine Sortenreinheit erfolgen:
1. 100% PES Oberstoff 2. 100% PES Membran 3. 100% PES Futterstoff	1. Oberstoff (PES, PA, CO o.ä.) 2. + 3. Membran PTFE+PU[3] 4. Futterstoff (PES, PA, CO o.ä.)

Abbildung 2: Vergleich der Sortenreinheit von PES- und PTFE-Laminaten

[3] Aufgrund der Mikroporösität von PTFE-Membranen wird eine PU-Beschichtung benötigt, um die entsprechende Wassersäule, und damit Wasserdichtigkeit, herzustellen.

Neben den CEAP Anforderungen an ein nachhaltiges Design werden auch die Forderungen an eine nachhaltige Produktion beschrieben. Die Produktion von PTFE-Membranen wird detailliert in den Kapiteln 2.1 und 3.1 ermittelt und steht konträr zu allen Aspekten der Nachhaltigkeit: Umwelt, Soziales und Wirtschaftlichkeit.

4.2 Verbrauch und Nutzung

Eine weitere Vorgabe des CEAP ist es, die Unternehmen und privaten Verbraucher zu befähigen, nachhaltige Kaufentscheidungen treffen zu können und einen einfachen Zugang zu Wiederverwendungs- und Reparaturdiensten zu erhalten. [9] Instrumente wie der Product Environmental Footprint (PEF) werden eine Möglichkeit sein, Verbraucher zu informieren und Anreize für nachhaltigen Konsum zu schaffen. [39] Aktuell werden die PEFCR (PEF Category Rules) gemeinsam mit einer Vielzahl an Textil- und Bekleidungsunternehmen erarbeitet. Neben dem Thema Langlebigkeit steht auch die Recyclingfähigkeit im Fokus des PEF.

PTFE-Membranen und Fluorcarbon-haltige Laminate sind schwer recyclingfähig, siehe Abschnitt 4.1. PES-Membranen und –Laminate hingegen ermöglichen kreislauffähige Materialien und Produktionsprozesse.

4.3 Abfall und Recycling

Die EU-Mitgliedstaaten müssen die Voraussetzungen für eine getrennte Sammlung von Textilabfällen bis 2025 sicherstellen. Der CEAP fordert daher die Bereitstellung von Leitlinien, um ein hohes Niveau bei der getrennten Sammlung zu erreichen. Damit einher gehen die Förderung der Sortierung, der Wiederverwendung und das Recycling von Textilien. [9, p. 13]

Grundsätzlich basiert der Ansatz der Europäischen Union in der Abfallwirtschaft auf der Abfallhierarchie (siehe Abbildung 3). Diese Abfallhierarchie legt die Gestaltung der Abfallpolitik und die Prioritätenfolge fest: Vermeidung, (Vorbereitung zur) Wiederverwendung, Recycling, Verwertung und - als am wenigsten bevorzugte Option - die Beseitigung durch Deponierung oder Verbrennung ohne Energierückgewinnung. [41]

Abbildung 3: Abfallhierarchie der EU [41]

Im Einklang mit der Abfallhierarchie legt das 7. Umweltaktions-programm Ziele für die Abfallpolitik in der EU fest:

Tabelle 1: Vergleich der Umsetzungspotenziale der Ziele der EU-Abfallpolitik bei Verwendung von PES- und PTFE-Membranen

Vorrangige Ziele der EU Abfallpolitik [42]	Umsetzungspotenzial PES-Membran	Umsetzungspotenzial PTFE-Membran
1. Reduzierung des Abfallaufkommens	✓	x
2. Maximierung von Recycling und Wiederverwendung	✓	x
3. Begrenzung der Verbrennung auf nicht wiederverwertbare Materialien	✓	x
4. Begrenzung der Deponierung von nicht recycelbaren und nicht wiederverwertbaren Abfällen	✓	x
5. Sicherstellung der vollständigen Umsetzung der abfallpolitischen Ziele in allen Mitgliedsstaaten	✓	x

Deutlich wird in der Tabelle aufgeführt, dass aufgrund der mangelnden Sortenreinheit PTFE-Membranen nicht zur Erfüllung der Ziele der europäischen Abfallpolitik beitragen können.

Das am 29. Oktober 2020 novellierte deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz hat in §45 *Pflichten der öffentlichen Hand, Absatz 2* sogar vermerkt, dass Produkten der Vorzug zu geben ist, die:

- „in rohstoffschonenden, energiesparenden, wassersparenden, schadstoffarmen oder abfallarmen Produktionsverfahren hergestellt worden sind,
- durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling von Abfällen, insbesondere unter Einsatz von Rezyklaten, oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt worden sind,
- sich durch Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit, Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit auszeichnen oder
- im Vergleich zu anderen Erzeugnissen zu weniger oder schadstoffärmeren Abfällen führen oder sich besser zur umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung eignen.“ [43]

Ähnlich formuliert es die Europäische Kommission im Dokument „Green Public Procurement“ und weißt im Sinne einer nachhaltigen und bewussten öffentlichen Beschaffung darauf hin, dass die Behörden beim Kauf von Waren, Dienstleistungen und Arbeiten Kriterien mit Blick auf geringere Umweltauswirkungen einbeziehen. Die Kriterien für Textilien konzentrieren sich auf die wichtigsten Umweltauswirkungen entlang des Lebenszyklus der Produkte, mitunter der Faserbeschaffung, chemische Beschränkungen nach Vorgaben der POP-Verordnung (bspw. PFOA), Haltbarkeit und Lebensdauerverlängerung, Energieeinsparung während der Nutzung und dem Design für Wiederverwendung und Recycling. [44]

Doch nicht nur die schwierige Recyclingfähigkeit von PTFE-Membranen steht den Gesetzgebunden im Weg, problematisch sind PTFE-Membranen auch als Abfälle, insbesondere bei der Verbrennung.

Verbrennungstests gängiger Membranarten

Das Frankfurter Institut Warringtonfire hat bei einer Prüfung der Rauchgasdichte und Rauchgastoxizität nach EN ISO 5659-2 (NBS-Box) die Konzentration der gängigsten toxischen Verbrennungsgase bei Funktionstextilien, das heißt allen drei handelsüblichen Membranarten PTFE, Polyurethan (PU) sowie Polyester ermittelt. Nicht überraschend ergab sich, dass mit CO_2 (Kohlendioxid), CO (Kohlenmonoxid) und NOx (Stickoxide) typische Gase freigesetzt werden, die auch bei der Verbrennung von anderen organischen Materialien wie z. B. Holz, Kohle oder Diesel freigesetzt werden. [10]

Des Weiteren wurden bei allen Materialien kleinere Mengen Blausäure freigesetzt, die deutlich unter humantoxischen Werten lagen, allerdings in etwa dem entsprachen, was man in einer kleinen Raucherkneipe nach dem Besuch von 15-25 Gästen und dem Genuss von jeweils 10 Zigaretten erwarten kann. Dabei waren die Werte bei Polyester um etwa 1/3 niedriger als bei den beiden anderen Materialien.

Ausschließlich bei PTFE-Membranmaterial wurden zusätzlich hohe Werte an hochtoxischer Flusssäure, der wässrigen Lösung von Fluorwasserstoff (HF), mit 63 ppm und Salzsäure (HCl) mit 36 ppm gemessen. [10]

Der Hauptaufnahmeweg für HF verläuft über die Atemwege und über die Haut. Der EU-Arbeitsplatzgrenzwert beträgt laut EU-Richtlinie 2000/39/EG als 8h-Mittelwert maximal 1,8 ppm und 3

ppm als Kurzzeitgrenzwert; der IDLH-Wert (unmittelbare Gefahr für Leib und Leben / Immediately dangerous to life or health) ist auf 30 ppm festgesetzt. Grundsätzlich wird angenommen, dass für den Menschen 50 ppm HF bei einer 30- bis 60-minütigen Exposition tödlich sein können. [10]

Aufgrund der im Labormaßstab ermittelten Werte muss davon ausgegangen werden, dass bei der unkontrollierten Verbrennung einer handelsüblichen Funktionsjacke, in welcher eine PTFE-Membran verarbeitet wurde, allein schon die dabei entstehende Menge an Flusssäure (HF) für unmittelbar dem Rauch ausgesetzte Menschen bei 30 bis 60-minütiger Exposition zum Tode führen kann. Die ebenfalls bei der Verbrennung von PTFE freigesetzte Salzsäure (HCl) führt zusätzlich beim Einatmen in der Lunge zu schweren Verätzungen; es können Reizungen und Verätzungen der Schleimhäute und der Atemwege auftreten. Besonders problematisch sind diese Ergebnisse, da rund 50% der weltweit gesammelten Textilien über Altkleidersammlungen in einkommensschwächere Drittländer für eine weitere Nutzung verkauft werden – ein global wachsendes Milliardengeschäft. [45, p. 88] In diesen Ländern ist der häufigste Entsorgungsweg für Abfälle die (oft unkontrollierte) Deponie oder das offene Feuer. 40 % des globalen Mülls verbrennen einer Studie zufolge unkontrolliert im offenen Feuer. [46] Es muss davon ausgegangen werden, dass rein statistisch etwa 15-20% der Bekleidung im offenen Feuer in unmittelbarer Nähe von Besiedlungen endet.

Auf Grund dieser Tatsachen ist die Kombination aus schwieriger Recyclingfähigkeit und fehlender Kreislaufwirtschaft von PTFE-Membranen und –Laminaten umso fataler und zusätzlich aufgrund vorhandener Alternativen inakzeptabel.

4.4 Globales Agieren - Lieferkette

Der CEAP fordert als weiteren Schritt ebenso die Einführung von Regelungsmaßnahmen wie einer erweiterten Herstellerverantwortung (extended producer responsibility EPR). [9, p. 13]

Die EPR ist ein Ansatz, der sicherstellt, dass sich die Hersteller finanziell an den Kosten der Abfallbewirtschaftung beteiligen. Das heißt die EPR verpflichtet die Hersteller, die operative oder finanzielle Verantwortung für die End-of-Life-Phase ihrer Produkte zu übernehmen, wodurch Anreize für eine bessere Gestaltung zur Reduzierung dieser Kosten geschaffen werden. Monetäre Beiträge fallen dann beispielsweise für die getrennte Sammlung und Behandlung von Abfällen an, wobei die Kosten einzelner Produkte oder Produktgruppen unter Berücksichtigung der Haltbarkeit, Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit sowie des Vorhandenseins gefährlicher Stoffe angesetzt werden. [47]

Die Euratex weißt in ihrem Positionspapier zugleich darauf hin, dass die EPR von Textilien eine Kreislaufwirtschaft durch Kooperation und geteilte Verantwortung ermöglichen sollte. Die Kreislaufwirtschaft erfordert Partnerschaften, in denen die bestehenden Barrieren zur Schließung des Kreislaufs gemeinsam gelöst werden, anstatt Verantwortlichkeiten zu schieben. Um dies zu erreichen, sollte die EPR Kooperationen unterstützen, die darauf abzielen: z. B. den Informations- und Datenfluss zu ermöglichen, ein gegenseitiges Verständnis von Kreislaufdesign zu etablieren, Materialpooling zu unterstützen, widersprüchliche Regeln zu beseitigen, Nachfrage und Angebot von recycelten Materialien zu verknüpfen. [48]

Bekleidungsfirmen, die PTFE-Laminate verwenden, werden die Kreislaufwirtschafts-Anforderungen an die Herstellerverantwortung nicht einhalten können.

4.5 BEST PRACTICE - wear2wear Kooperation

Unter Einhaltung aller vier Aspekte des CEAP - 1. des Nachhaltiges Design und Produktion, 2. ein nachhaltiger Gebrauch und Nutzung, 3. unter den Gesichtspunkten der Recyclingfähigkeit und Abfallreduzierung sowie 4. unter Einbeziehung der Herstellerverantwortung und Kooperationsförderung, wurde die europäische Kooperation wear2wear® aufgesetzt.

Hinter wear2wear™ stehen namhafte europäische Unternehmen, die sich die Aufgabe gestellt haben, neue Textilien ausschließlich aus recyclingfähigen und sortenreinen Materialien herzustellen. Auf modernsten Produktionsanlagen werden aus Textilfasern gebrauchter Bekleidungsstücken neue Funktionstextilien produziert. Diese erfüllen je nach Einsatzgebiet hohe Anforderungen wie etwa Wasserdichtigkeit, Atmungsaktivität, Schutz und Komfort. Damit sich der Rohstoffkreislauf wieder schließt, können diese Textilien am Ende ihres Lebenszyklus erneut vollständig recycelt werden.

Im Januar 2020 konnte die weltweit erste upgecycelte Funktionsjacke „rEvolution Hybrid“ aus 30% recycelten Alttextilien und 70% recycelten PET-Flaschen vorgestellt werden - eine 3-lagige High-Performance Jacke. Diese bietet zertifizierten Regenschutz nach EN 343, ist umwelt- und hautfreundlich und nach den strengen Umweltstandards STANDARD 100 by OEKO-TEX® und bluesign® geprüft.

Der Herstellungsprozess der rEvolution Hybrid funktioniert wie folgt: Weitgehend sortenreine Alttextilien aus Polyester (PES) werden mechanisch aufgelöst, durch mechanische oder chemische Recyclingverfahren zu Granulaten aufbereitet und zu neuen PES-Filamentgarnen ausgesponnen. Diese Garne werden zu textilen Polyester-Flächengebilden verarbeitet und mit einer 100% recycelbaren PES-Membran zu einem sortenreinen, recycelbaren, hochfunktionellen und 100% wasserdichten Funktionstextil laminiert. Der prozentuale Anteil von recycelten Alttextilien in den rEvolution Hybrid Produkten beläuft sich bereits jetzt auf 30%, die restlichen 70% werden durch PET-Flaschenpolymergarne ergänzt und können zukünftig durch äquivalente Upcyclingprozesse auf eine ausspinnbare Konzentration verdünnt werden und somit nach und nach aus den recycelten Textilien verschwinden. Ziel ist es, mittelfristig den Anteil an recycelten Alttextilien auf 100% zu erhöhen.

Das Design2Recycle-Konzept basiert auf einer möglichst sortenreinen Materialauswahl in Kombination mit sortenreinen, recyclebaren Zutaten sowie umweltverträglichen Ausrüstungs- und Färbemitteln. Durch den Einsatz spezieller Nähgarne, lassen sich nicht recyclebare Zutaten kosten- und materialschonend entfernen, um ein optimiertes Recyclingresultat zu gewährleisten.

Durch adäquates Markieren lassen sich die wear2wear™-Produkte verfolgbar und transparent für den Verbraucher sowie für Prozesspartner machen. Diese sollen durch den Ausbau bestehender Sammelsysteme mit zukunftsweisender Sortiertechnologie optimiert werden. Auch das Einsammeln getragener Bekleidung im Leasinggeschäft bzw. Arbeitsschutzbereich kann über einen wear2wear® Partner garantiert werden.

Nach der Sammlung durch vorhandene Bekleidungssammler, Sortierung und Trennung gelangen diese zum w2w-Upcyclingnetzwerk, welche die Wiederverwertung erneut durch ein kombiniertes Upcyclingverfahren ermöglicht. Nach der Rohstoffwiederaufbereitung entsteht somit erneut PES-Filamentgarn, das zu neuen upgecycelten Polyesterflächengebilden verarbeitet wird. Der wear2wear™-Kreislauf ist geschlossen – ein neuwertiges, nachhaltiges Funktionstextil entsteht. [49]

5 CO_2-EMISSIONEN TEXTILER MEMBRANEN

„Act before you have to."

Patricia Espinosa Cantellano, Leiterin des Sekretariats der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC), Ausspruch KeyNote beim Global Member Meeting FICCA, Oktober 2020.

Die Textilindustrie ist die zweitschmutzigste Industrie der Welt – sie ist bereits heute für über 8% des gesamten ausgestoßenen CO_2 weltweit verantwortlich, ungefähr so viel wie die gesamte EU. Davon fallen 83% CO_2 auf die Bekleidung- und 17% auf die Schuhindustrie. Bei unveränderter Handhabe wird dieser Wert bis 2030 um über 60% ansteigen. [13]

Die Vereinten Nationen sind auf diese Missstände bereits aufmerksam geworden. Am 10. Dezember 2018 wurde daher die Fashion Industry Charter for Climate Action (FICCA) für die Bekleidungsindustrie bei der Weltklimakonferenz COP24 in Polen offiziell vorgestellt. Sie umfasst eine Liste von Zielen, auf die sich Vertreter großer Bekleidungsmarken unter der Leitung der UNFCCC verständigt haben, um die von dieser Industrie verursachten Klimaeinflüsse einzudämmen. Dazu gehört auch die Reduktion der CO_2-Ausstöße um mindestens 30% bis zum Jahr 2030. Inzwischen wird eine Verschärfung der Reduktion auf 45% bis 2030 angestrebt, um das Klimaziel von 1,5°C zu erreichen. [50]

Während einige Firmen im Zuge der FICCA beginnen, Emissionen zu erfassen und zu reduzieren, gibt es auch Vorreiter, die ihre Emissionen bereits seit einigen Jahren bilanzieren, angelehnt an die Science Based Targets (SBT) reduzieren und oder sogar kompensieren.

Basis für die Erfassung von Emissionen sind Emissionsdatenbanken. Die Emissionswerte der Datenbanken unterscheiden sich teilweise stark, abhängig von den Systemgrenzen, der Art (Primärdaten, generische Daten) und Weise der Datenerhebung (bspw. GHG Protocol) und der Aktualität der Daten. Die Textilunternehmen und –plattformen arbeiten mit verschiedensten Agenturen und Tools zur Ermittlung der Emissionen. Die Grundlage dafür bilden in der Textilindustrie häufig die Datenbanken Ecoinvent und GaBi.

In Bezug auf PTFE klaffen die Emissionsfaktoren von Ecoinvent und GaBi eklatant auseinander. Während Ecoinvent 127 kg CO2/kg PTFE (2016) errechnet, sind es bei GaBi 11,6 kg CO2/ kg PTFE (2018). PES-basierte Membranen verursachen vergleichsweise geringe 3,5 kg CO2/kg Material.

Besonderes Interesse weckte daher die Umstellung des PTFE-Wertes von Ecoinvent zu GaBi innerhalb der SAC Materialdatenbank Higg MSI (Material Sustainability Index) im Jahr 2020, in dessen Kerngruppe ein namhafter PTFE-Hersteller sitzt. Zur Klärung der starken Differenz beider Werte wurden beide Datenbanken von Dritten kontaktiert, wobei GaBi keine Auskunft erteilen konnte. Einzig wurde verlautet, die Angaben stammen von den Fluorherstellern selbst und unterliegen der Geheimhaltung. [51]

Dieser Schritt ist vor dem Hintergrund der Ziele der FICCA und deren inzwischen über 100 unterzeichnenden Bekleidungsfirmen bemerkenswert, da emissionsarmen Materialien der Vorzug zu geben ist. [52, pp. 3, Punkt 6] Die Vergleichbarkeit und Transparenz von Emissionsfaktoren

verschiedener textiler Materialien erhält damit eine zentrale Bedeutung. Mitunter, da Materialien durchschnittlich 85% der im Bekleidungsstück verursachten Emissionen ausmachen.[4]

5.1 PTFE-Datenerfassung und globaler Emissionsfaktor

Im Rahmen der gesetzlichen wie auch eigenen Verpflichtungen von Unternehmen zur CO_2-Reduktion spielt die Nachvollziehbarkeit und Glaubwürdigkeit von Datenbankwerten eine zunehmende Rolle.

Wie einleitend beschrieben, weichen die PTFE-Emissionsfaktoren der im Textilbereich verwendeten Datenbanken Econinvent und GaBi (Sphera) stark voneinander ab. Aufgrund dessen wurde ein Gutachten zur Einschätzung der Ecoinvent- und GaBi-Werte erstellt (siehe Anhang, Kapitel 7).

Aus diesem Gutachten der Umweltberatung Öko-Recherche[5] geht hervor, dass die länderspezifischen Emissionen der PTFE-Produktionsanlagen und deren Vorstufen sehr unterschiedlich sind.

In der nachfolgenden Tabelle wird deutlich aufgeführt, dass die Emissionsfaktoren von 1,26 kg CO_{2eq}/ kg PTFE in Japan mit bis zu 294,1 kgCO2/kg PTFE in China beziffert werden. Der von GaBi (Sphera) ausgegebene Wert von 11,6 kgCO2/kg PTFE bezieht sich auf den europäischen Wert, wobei sich zusätzlich die Verarbeitung vom Rohmaterial zur ePTFE-Membran niederschlägt.

Tabelle 2: Übersicht länderspezifischer PTFE-Emissionsfaktoren [11]

HFC-23 emitted / PTFE produced (kg CO2eq /kg) mit Faktor 1,73		
	Durchschnitt 2012-2017	Emissionsfaktor 2017
Europa (ohne Russland)	6.3	7.73
USA	81.31	93.97
Europa (o. Russland) + USA	47.77	55.86
Japan	0.8477	1.26
Industrieländer ohne Russland	37.02	42.95
Vergleich China 2013-2015	394.44	294.1

Diese Erklärung liefert auch die SAC für den Higg MSI PTFE-Wert und schreibt: „Sphera hat in jüngerer Zeit mit den wichtigsten europäischen PTFE-Herstellern zusammengearbeitet (Referenzdaten von 2018), daher haben wir insgesamt mehr Vertrauen in diese Daten. Da der Datensatz jedoch unter Verwendung von Produktionsdaten aus Europa erstellt wurde, könnte es Unterschiede in der weltweiten Produktion geben, die in diesem Datensatz nicht berücksichtigt werden. Wie bei allen Higg MSI-Prozessdaten werden wir weiterhin Rückmeldungen und Datenquellen überprüfen, um sicherzustellen, dass die besten verfügbaren und am besten geeigneten Informationen in der Higg MSI wiedergegeben werden.“ [53]

Für ein solches Vertrauen in die Sphera-Daten und damit den MSI-Wert fehlt allerdings jegliche Grundlage, denn wissenschaftliche Studien widerlegen die Möglichkeit eines solch geringen globalen PTFE-Wertes augenscheinlich.

[4] Bei Transport via Schiff, LKW; sobald Produkte geflogen werden, erhöht sich der Logistik-Anteil

[5] Öko-Recherche - unabhängiges und international tätiges Büro für Umweltforschung und –beratung; Spezialisten für fluorierte und fluorchlorierte Substanzen in verschiedenen Anwendungen, ihre Substitution und Emissionsminderung und die Erstellung von Stoffstromanalysen und Szenarien zu diesen Themen

Zur Erklärung: Die hohen Emissionswerte von PTFE hängen fast ausschließlich von der Nebenproduktemission HFC-23 (R23) ab, die bei der Herstellung von Chlordifluormethan HCFC (R22) entsteht, welches ein Vorprodukt bei PTFE-Herstellung ist. Das Nebenprodukt R23 hat einen vergleichsweise sehr hohen Emissionswert von 14800 kg CO2/ kg Material. [11]

HFC-23 Emissionen steigen signifikant an

Wie aus einem Artikel des „Nature“ Journals hervorgeht, steigen die weltweiten HFC-23-Emissionen, abgeleitet aus atmosphärischen Konzentrationsmessungen, momentan signifikant an. Erklärt wird dies mit den HCFC-22-bedingten Emissionen. [54]

Wie die nachstehende Abbildung deutlich zeigt, verringern sich die Werte für die entwickelten Länder; in den Entwicklungsländern steigen die Werte für HFC-23-Emissionen jedoch massiv an, in gleichem Maße wie die HCFC-22 Produktion.

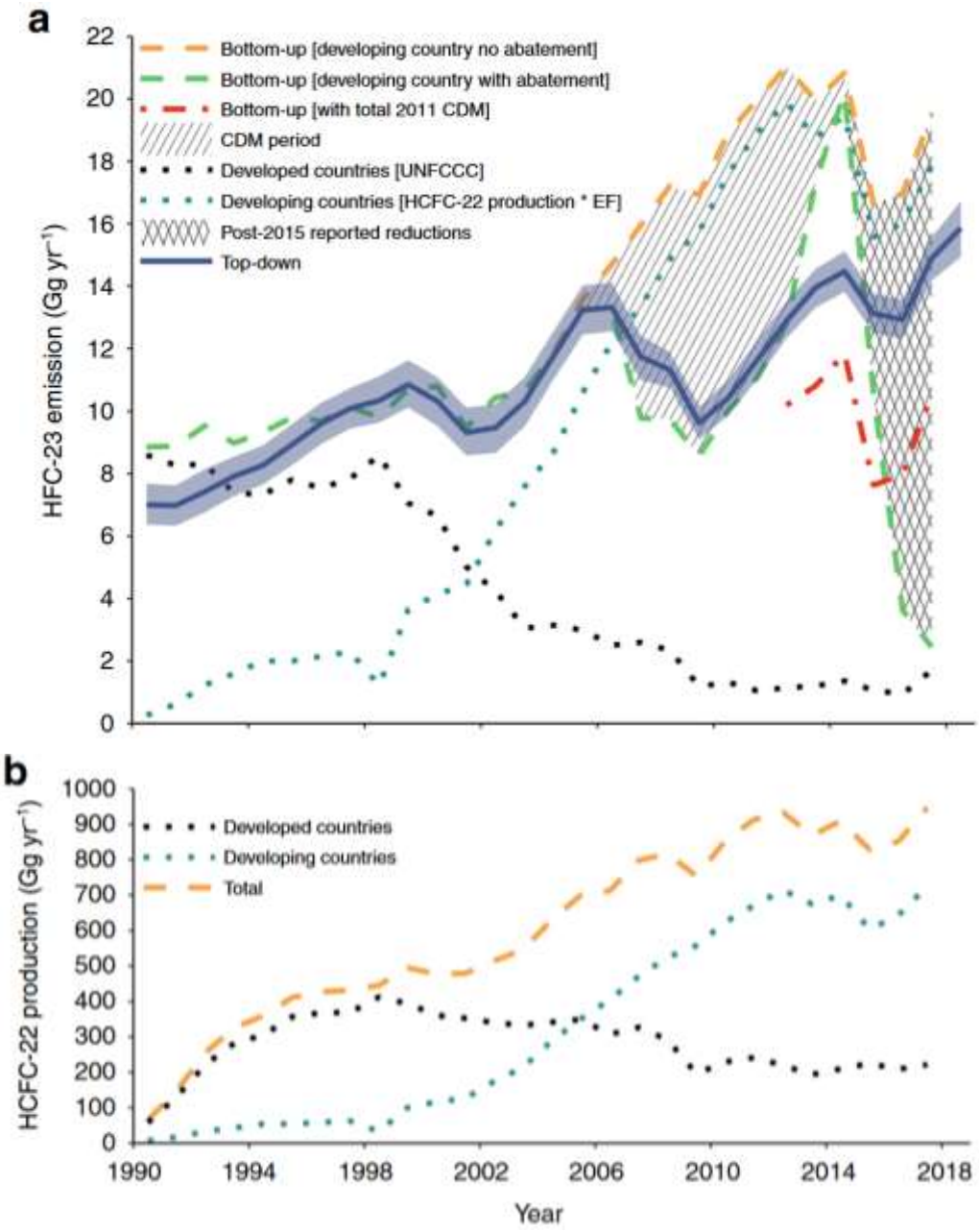

Abbildung 4: Globale HFC-23 Emissionen und HCFC-22- Produktion [54]

Eine Erklärung dafür ist die Produktionsverlagerung in die Entwicklungsländer. Denn auch wenn dort durch die Firmen aus den Industrieländern Hochtemperaturverbrennungsanlagen für HCF-23 an HCFC-22-Anlagen angebaut wurden (wofür jene Firmen enorme CO2-Zertifikate ausgestellt bekamen, also viel Geld verdienten), so ist aufgrund der in der Atmosphäre gemessenen Konzentrationen davon auszugehen, dass der zusätzlich hohe Energieaufwand dieser Verbrennungsanlagen dazu geführt hat, dass diese eventuell nicht in Betrieb genommen wurden. [55] Dies ist in der Abbildung unter CDM period zu sehen (Climate Developing Measurements – Klimaschutzmaßnahmen).

PTFE-Produktionskapazitäten in China, Indien und Russland über 50%

Dies geht einher mit den länderspezifischen PTFE-Produktionsmengen. Im Jahr 2020 fand über 41% der weltweiten PTFE-Produktion in China statt, über 8% in Russland, 4% in Indien und 15% in den USA. [21] Unter der Annahme, dass die Produktionsstätten der PTFE-Vorprodukte und des daraus entstehenden PTFEs an einem Ort hergestellt werden, wurden die von Ökorecherche ermittelten länderspezifischen EF mit den länderspezifischen Produktionsmengen zu einem globalen Durchschnittswert errechnet.[6] Aus der nachstehenden Tabelle geht somit der globale PTFE-Wert von 176,6 kg CO2/ kg PTFE hervor und gleicht damit der Größenordnung des Ecoinvent Emissionsfaktors.

Tabelle 3: Globaler durchschnittlicher PTFE-Wert basierend auf den PTFE-Kapazitäten, dem prozentualen Anteil und den länderspezifischen Emissionsfaktoren

Berechnung: PTFE Standorte und Kapazitäten laut Polyglobe weltweit			
	Kapazität (jato)	% Anteil	% Anteil*EF 2017/100
China	61.9	41.57	122.26
Europa	35	23.51	1.82
USA	23	15.45	14.52
Japan	9.8	6.58	0.08
Russland[7]	12.7	8.53	25.08
Indien[8]	6.5	4.37	12.84
PTFE-Wert global			176.60

Wie aus dem Gutachten des Umweltbüros Öko-Recherche hervorgeht, ist eine präzisere Datenlage in allen Ländern, bis auf Europa und Japan, wünschenswert. Vor dem Hintergrund der massiv steigenden R23-Emissionen und der Produktionsverlagerung in die Entwicklungsländer, ist es jedoch vermessen, PTFE-Membranen mit europäischen Emissionswerten zu berechnen (siehe GaBi/Sphera sowie MSI/ SAC) und mit anderen Membranmaterialien zu vergleichen.

[6] Hinweis: Annahme dieser Erhebung ist, dass die PTFE-Produktionsstätten und die Produktionsstätten der Vorstufen gleichgesetzt werden, was zum aktuellen Zeitpunkt nicht sicher ist und auch nicht von GaBi/Sphera oder über verfügbare Datenbanken herausgefunden werden konnte. Bekannt ist, dass bei großen R22-Anlagen in den USA und Europa sowohl PTFE-Vorprodukte als auch PTFE hergestellt werden. Rein aus verfahrenstechnischen Gründen ist dies sinnvoll und somit auch für andere Länder wie China etc. denkbar.

[7] EF Europa + USA (basierend auf Einschätzung Öko-Recherche, Dr. Winfried Schwarz)

[8] EF China (basierend auf Einschätzung Öko-Recherche, Dr. Winfried Schwarz)

Aufgrund der ähnlichen Werte von Ecoinvent und Ökorecherche lässt sich die Annahme treffen, dass PTFE-Membranen durchschnittlich 30x-höhere CO_2-Emissionen zu technisch gleichwertigen Funktionsmaterialien aufweisen. Auf eine einzige Funktionsjacke gerechnet, verursacht dies durch die Wahl einer PTFE-Membran doppelt so viel CO_2 als bei alternativen Membranmaterialien wie PES.

5.2 BEST PRACTICE: PES-Membran, bio-massed based

PES-Membranen haben einen über alle Datenbanken hinweg geringen Emissionsfaktor von 3,5 kg CO_2/ kg Material. Zudem ist die Verwendung von bio-basierten Kunststoffen aus Abfallströmen bereits auf dem Markt erhältlich. Biomasse-basierte Kunststoffe haben sogar den Vorteil, aus Abfällen neue Kunststoffe zu generieren und damit gleichzeitig CO_2-Emissionen bei der PES-Membranen-Produktion einzusparen.

6 FAZIT

Dieser Bericht belegt anhand zahlreicher Studien und Quellen, dass die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von PTFE-Membranen gesundheits- und umweltschädliche Auswirkungen haben.

Untersuchungsergebnisse der letzten Jahre weisen massiv erhöhte Krebsraten und andere gesundheitsschädliche Auswirkungen in der Nähe von PTFE-Produktionsstandorten weltweit auf, wobei nicht berücksichtigt ist, dass die weltweite Verbreitung dieser „Ewigchemie" auch die Referenzwerte steigen lässt. Die westliche Fluorchemieindustrie hat das Problem um PFOA nach Asien verlagert. Gleichzeitig zeigt sich, dass auch die in der EU im Einsatz befindlichen PFOA-Ersatzstoffe wie GenX und Adona besonders besorgniserregende Stoffe sind. Es gibt damit aktuell keinen Herstellungsprozess von PTFE-Membranen, der nicht gesundheits- und umweltschädigend ist. Aus weiteren Studien lässt sich zudem ableiten, dass PFOA aber auch PFOA-Ersatzstoffe aus der PTFE-Membran migrieren und sich über dermale Absorption auf den Körper auswirken können, ebenso wie PFAS-haltige Stäube. Forschungsergebnisse deuten ferner darauf hin, dass selbst moderne Analyseverfahren trotz hoher Sensitivität keine vollständige Erfassung von PFAS ermöglichen. So geht aus einer Studie hervor, dass nur 1% der Gesamtfluormengen erfasst werden konnten. In der Spurenanalytik schwer zu erfassen sind etwa Vorläufersubstanzen und Oxidationszwischenprodukte. Diese können sich weiterhin durch äußere Einflüsse wie die Einwirkung von Sonnenlicht, fortgeschrittene Oxidationsprozesse oder Mikroben in gesundheitsgefährdende Stoffe wie PFOA umwandeln.

Neben den gesundheitsgefährdenden und umweltschädlichen Aspekten kommt hinzu, dass PTFE-Membranen und Fluorcarbon-haltige Laminate schwer recyclingfähig sind. Im Bericht konnte aufgeführt werden, dass aufgrund der mangelnden Sortenreinheit PTFE-Membranen nicht zur Erfüllung der Ziele der europäischen Abfallpolitik beitragen können. Eine weitere Studie zeigt auf, dass im Gegensatz zu anderen Textilmembranen ausschließlich bei der Verbrennung von PTFE-Membranmaterial hohe Werte an hochtoxischer Flusssäure und Salzsäure gemessen wurden. Es ist davon auszugehen, dass Bekleidungsfirmen, die PTFE-Laminate verwenden, die Kreislaufwirtschafts-Anforderungen an die Herstellerverantwortung nicht einhalten können.

Auch die Treibhausgasemissionen der Produktion von PTFE-Membranen sind relativ hoch. PTFE-Membranen weisen 30x-höhere CO_2-Emissionen zu technisch gleichwertigen Funktionsmaterialien auf. Der Einsatz von PTFE-Membranen widerspricht damit den Bestrebungen des Montreal-Protokolls 2016, das eine weltweite Reduktion von 85% Fluorkohlenwasserstoffen-Emissionen zum Ziel hat.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit fordern seit mehr als fünf Jahren, dass PFAS-Substanzen wo immer möglich ersetzt werden sollen. Der Bericht und auch die seit Jahrzehnten in der Praxis befindlichen technisch gleichwertigen, umweltfreundlichen und gesundheitsunbedenklichen Alternativmaterialien wie PES-Membranen zeigen deutlich auf, dass die Verwendung von PTFE-Membranen in der Schuh- und Bekleidungsindustrie nicht notwendig ist. Die Niederlande hat bereits einen entsprechenden Antrag zur Verwendung von Alternativen für Bekleidung und Schuhe für die Öffentliche Beschaffung, in denen kein GenX und PFOA in der Membran enthalten sind, angenommen.

Nicht nur im Zuge der EU Chemicals Strategy for Sustainability, auch als Vorreiter für die angedachten amerikanischen PFAS-Gesetzgebungen sollten die EU-Nationalstaaten und die Kommission ein Zeichen setzen und PTFE-Membranen aus der Textil- und Bekleidungsindustrie als nicht essentiell einstufen und die Verwendung verbieten. Das Katz-und-Maus-Spiel zwischen Gesetzgebern - eine spezifische PFAS-Substanz zu verbieten und der Fluorchemieindustrie – das Verbot mit einem schädlichen Ersatzstoff zu umgehen - könnte somit zumindest für diese Anwendungsbereiche beendet werden.

7 ANHANG – Öko-Recherche Gutachten

Öko-Recherche, Frankfurt

Recherche - Zu den klimarelevanten HFC-23-Emissionen in den Industrieländern in Bezug auf die Produktion von HCFC-22 bzw. in Bezug auf PTFE

Anforderungen an die Recherche

Angenommen wird, dass die für die fragliche Anwendung relevante PTFE-Herstellung in Industrieländern erfolgt und das Vorprodukt HCFC-22 auch aus Industrieländern (ohne Russland) stammt. Deshalb haben wir den Emissionsfaktor „HFC-23 $_{emitted}$ / HCFC-22 $_{produced}$" für die industriell entwickelte Weltregion zu ermitteln. Das bedeutet spezifische Ziffern für 1) Europa (ohne Russland), 2) USA, 3) Europa + USA, 4) Japan, 5) Europa + USA + Japan.

Annahme, für den Wettbewerb der PTFE-Anwender spielen die USA eine wichtige Rolle.

Datenbeschaffung

Anders als für den bereits übermittelten technisch optimalen Emissionsfaktor (eine einzelne Anlage in der EU mit entsprechenden Betreiberangaben) haben wir jetzt die Werte nicht anlagenbezogen berechnet. Das war für vorliegenden Zweck nicht nur unmöglich, sondern auch nicht nötig. Denn die Regierungen der Industrieländer sind im Rahmen internationaler Abkommen verpflichtet, die HFC-23-Emissionen zu ermitteln und zu berichten. Da sie zwar melden müssen, die Unternehmen ihrerseits aber keiner Auskunftspflicht unterliegen, sondern mehr oder weniger freiwillig mitteilen, kann man die Datenqualität sicher kritisieren, zumal es unterschiedliche technische Verfahren zur Abgasbehandlung mit unterschiedlichen Wirkungsgraden gibt (z.B. onsite oder offsite destruction). Andererseits sind die Daten, auf die sich unsere Recherchen stützen, alle quasi „regierungsamtlich", was bedeutet, dass sie erstens sicher nicht zu hoch[1] und zweitens in der Diskussion belastbar sind.

Datenquellen für HFC-23 und HCFC-22

Für den Emissionsfaktor „HFC-23 emitted / HCFC-22 produced" sind Angaben über HFC-23 und Angaben über HCFC-22 erforderlich.

HFC-23

Die Industrieländer müssen im Rahmen der UNFCCC (United Nations Climate Change Convention) jährlich nationale greenhouse gas (GHG) inventories an das Climate Change secretariat übermitteln, darunter auch die, weil klimarelevanten, Emissionen von HFC-23. Diese National Inventory Submissions bestehen für jedes Land aus dem National Inventory Report (NIR) und dem Common Reporting Format (CRF). Die letzten Berichte stammen alle von April/Mai 2019 und enthalten die Daten bis 2017. Die Berichte für 2018 werden gegenwärtig erstellt und im Frühjahr 2020 an das Klimasekretariat übermittelt. Für 2018 und 2019 liegen noch keine Daten vor. Wesentliche Veränderungen sind aber dann nicht zu erwarten.

[1] Allerdings haben wir eine bestimmte Anlage aus der Berechnung ganz herausgenommen (also auch mit der HCFC-22-Produktionsmenge), weil der Betreiber (Öko-Recherche ist, wie Sie bereits wissen, in die Emissionsberichterstattung der EU und Deutschlands direkt involviert) seit Jahren „Null Emissionen" meldet und sich beharrlich weigert, einigermaßen glaubwürdige Messungen oder Schätzungen vorzulegen.

Wir haben für alle fraglichen Industrieländer die National Inventory Submissions für 2010 bis 2017 ausgewertet, und zwar für France, Germany. European Union, Netherlands, Italy, Japan, Spain, United Kingdom, United States. Das sind die Industrieländer, in denen es nach 2010 noch HCFC-22-Anlagen gab/gibt. Gegenwärtig gibt es in Europa ohne Russland nur noch vier Hersteller und in den USA nur noch zwei. Für Japan haben wir keine Informationen gesammelt. Die Zahl der Unternehmen (zwei davon produzieren sowohl in den USA als auch in der EU) hat sich seit 2009 drastisch verringert, als sich abzeichnete, dass R-22 nicht mehr lange als Kältemittel vermarktet werden kann, sondern nur noch als „feedstock", also die Weiterverarbeitung zu PTFE, erlaubt sein würde. (*Übrigens haben einige Unternehmen, die in den Industrieländern Anlagen geschlossen haben, solche in China wieder errichtet*).

HCFC-22

Alle Länder melden in CRF (table 2 (II), B.9) ihre „HFC-23 by-product emissions" aus der „Fluorochemical production, tw. außerdem in den dazugehörigen NIR. Letztere enthalten mitunter auch Angaben über die Produktion von HCFC-22, so in Japan. Die USA meldeten die HCFC-22-Produktion nur bis 2012, weil es seit 2103 nur noch zwei Unternehmen gibt und die Mindestzahl für die Meldung drei sein muss. Die fraglichen sechs EU-Länder (seit 2016 nur noch vier) veröffentlichen ihre HCFC-22-Produktion nicht. HCFC-22 fällt als ozonschichtschädigende Substanz unter die Zuständigkeit nicht des Klimaprotokolls, sondern des Montreal Protokolls. Die entsprechenden Unternehmensdaten müssen zwar an die Europäische Kommission berichtet werden, bleiben aber unveröffentlicht.

Zugänglich ist uns aber eine Aufstellung, die im Rahmen des Multilateralen Fonds unter dem Montreal Protocol auf dem 27th Meeting in Bangkok Juli 2017 vorgelegt wurde[2] - mit den HCFC-22-Produktionszahlen für die Industrieländer (=non-Article 5 parties) insgesamt und nach einzelnen Entwicklungsländern (=article 5 parties) mit HCFC-22-Produktion, nämlich China, Indien, Argentinien, Mexiko, Venezuela und die beiden Koreas. Die Industrieländer haben in 2014 und 2015 demnach jeweils 225.000 t, die Entwicklungsländer 700.000 t hergestellt, wobei auf China allein 600.000 t entfielen. Die HFC-23-Emissionen werden in dieser Vorlage nur für die Entwicklungsländer abgeschätzt, wobei für China für 2015 festgestellt wird, dass nur 45% des generierten HCFC-23 „destroyed" wurden.

Was die Industrieländergruppen betrifft, so können wir ihr HCFC-22 relativ gut bestimmen. Die (lt. NIR) produzierten Mengen für Japan sind, wie gesagt, zugänglich. Die Produktion der EU-Länder ist uns vertraulich bekannt und wurde von uns auf ihre Größenordnung gerundet. Durch Subtraktion der japanischen und EU-Mengen von der in Bangkok vorgelegten Schätzung für die Industrieländer (non-article 5 parties) insgesamt, konnten wir auf die fehlenden US-Mengen schließen, die seit 2013 nicht mehr mitgeteilt werden, aber unsere Eigenschätzung bestätigten.

GWP 14.800

Zur Berechnungsmethode über das verwendete GWP: Alle national submissions verwenden das HFC-23-GWP von 14.800, das aus dem 4. IPCC Sachstandbericht (assessment report,

[2] UNEP United Nations EnvironmentProgramme): EXECUTIVE COMMITTEE OF THE MULTILATERAL FUND FOR THE IMPLEMENTATION OF THE MONTREAL PROTOCOL, Seventy-ninth Meeting, Bangkok, 3-7 July 2017: KEY ASPECTS RELATED TO HFC-23 BY-PRODUCT CONTROL TECHNOLOGIES (DECISION 78/5)

AR) von 2007 stammt (früher GWP von 11.700 aus AR2). GWP-Werte wechseln mit der Zeit aus Gründen, die wir hier nicht diskutieren. Es gibt seit 2014 (AR5) den neuen Wert 12.400. Wir bleiben hier aber bei dem allgemeinen UNFCCC Berichtswert von 14.800.

Die Ergebnisse im Einzelnen

Bezugsgröße kg HCFC-22

Tabelle 1: HFC-23 emitted / HCFC-22 produced (kg CO_2eq /kg)		
	Durchschnitt 2012-2017	Emissionsfaktor 2017
Europa (ohne Russland)	3,64	4,47
USA	47,00	54,32
Europa (o. Russland) + USA	27,61	32,29
Japan	0,49	0,73
Industrieländer ohne Russland	21,40	24,83
Zum Vergleich China 2013-2015	228	170

Auffällig ist die Differenz zwischen EU und USA. Die Daten sind aber robust. Der hohe US-Wert liegt u.a. an einem der beiden Hersteller, der selber kein onsite-waste-gas treatment betreibt, sondern die aufgefangenen HFC-23 offsite zerstören lässt, somit Umfüllungs- und Transportaufwand hat.

Weiterhin interessant ist für alle Industriegruppen der Vergleich des Durchschnittswerts 2012-2017 mit dem 2017er Wert. Es zeigt sich, dass man es seit 2012 keineswegs mit einer Verringerung der Emissionsfaktoren zu tun hat, sondern im Gegenteil mit einem Anstieg. Nichtsdestoweniger sind mit Bezug auf die Jahre vor 2009 die Emissionen stark gesunken.

Für die Industrieländer generell rechnen die erwähnten KEY ASPECTS RELATED TO HFC-23 BY-PRODUCT CONTROL TECHNOLOGIES übrigens nicht mehr mit 3% Bildungsrate von HFC-23 an der HCFC-22-Produktion, sondern dank verbesserter Prozessführung nur noch mit 2%. Diese Frage war im Zusammenhang mit der „Vorstudie" aufgetaucht.

Optimale Wirkungsgrade der Abgasbehandlung werden aus Japan mit 99,8% gemeldet.

Bezugsgröße PTFE

Die Emissionsfaktoren bezogen auf 1 kg PTFE sind höher als die Emissionsfaktoren „HFC-23 emitted / HCFC-22 produced (kg CO_2eq /kg)". Wenn man den doppelten Wert (= 2) annimmt, verdoppeln sich die Werte der Tabelle 1.

Tabelle 2: HFC-23 emitted / PTFE produced (kg CO_2eq /kg)		
	Durchschnitt 2012-2017	Emissionsfaktor 2017
Europa (ohne Russland)	7,28	8,94
USA	94,00	108,64
Europa (o. Russland) + USA	55,22	64,58
Japan	0,98	1,46
Industrieländer ohne Russland	42,80	49,66
Zum Vergleich China 2013-2015	456	340

Eine chemisch exakte Berechnung der Relation HCFC-22 / PTFE (kg /kg) fällt ev. anders als 2 / 1 aus, wahrscheinlich mit einem etwas niedrigen Wert als 2.

4

Rein theoretisch ist der Wert nicht 2, sondern 1,73. Denn für ein 1-PTFE Molekül (ein Glied der PTFE-Kette, -CF2-) braucht es ein HCFC-22-Molekül. Berücksichtigt man die molare Masse von HCFC-22 (86,47 g/mol) und 1-PTFE (50,01 g/mol, 1/2*TFE), folgt, dass pro kg 1-PTFE 1,73 kg HCFC-22 nötig sind (1 kg 1-PTFE * 86,47 / 50,01).

In diesem Falle wären die Werte der Tabelle 1 statt mit 2 nur mit 1,73 zu multiplizieren.

Autor: Winfried Schwarz (Öko-Recherche)

Frankfurt am Main, 30.1.2020

8 LITERATURVERZEICHNIS

[1] A. Blum, S. A. Balan, M. Scheringer, X. Trier, G. Goldenman, I. T. Cousins, M. Diamond, T. Fletcher, C. Higgins, A. E. Lindeman, G. Peaslee, P. d. Voogt, Z. Wang und R. Weber, „The Madrid Statement on Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs)," Madrid, 2015.

[2] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, „International virtual PFAS Conference," Berlin, 2020.

[3] ECHA European Chemicals Agency, „Perfluoralkylchemikalien (PFAS)," [Online]. Available: https://echa.europa.eu/de/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas. [Zugriff am 18 12 2020].

[4] The Right Livelihood Foundation, „Robert Bilott," 2017. [Online]. Available: https://www.rightlivelihoodaward.org/laureates/robert-bilott/. [Zugriff am 18 12 2020].

[5] G. Ungherese, „PFC Pollution Hotspots: how these chemicals are entering our bodies," Greenpeace, Rome, Italy, 2016.

[6] European Commission; DG Environment, „The use of PFAS and fluorine-free alternatives in textiles, upholstery, carpetes, leather and apparel," Ramboll, Wood, Brüssel, 2020.

[7] J. Kerr und J. Landry, „Pulse of the fashion industry," Global Fashion Agenda and Boston Consulting Group, Inc., Boston, USA; Kopenhagen, Dänemark, 2017.

[8] A. Biegel-Engler, C. Staude, L. Vierke und C. Schulte, „Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC): Einsatz mit Konsequenzen," Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2013.

[9] „Circular Economy Action Plan - For a cleaner and more competitve Europe," Europäische Union, Brüssel.

[10] Frankfurter Institut Warringtonfire, „Verbrennungstest Membranen," 2019.

[11] W. Schwarz, „Recherche - Zu den klimarelevanten HFC-23-Emissionen in den Industrieländern in Bezug auf die Produktion von HCFC-22 bzw. in Bezug auf PTFE," Ökorecherche, Frankfurt, 2020.

[12] Ecoinvent Datenbank über ClimatePartner, *PTFE CO2-Emissionen,* 2019.

[13] P. Chrobot, M. Faist, L. Gustavus, A. Martin, A. Stamm, R. Zah und M. Zollinger, „Measuring Fashion - Insights from the Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study," Quantis, 2018.

[14] A. Blum, *KEY Note: Reducing harm from PFAS for a healthier environment,* Online: International Online-Conference PFAS - Dealing with contaminants of emerging concern, 2020.

[15] Umweltbundesamt, „Senkung der Vorsorge-Maßnahmenwerte für PFOA/PFOS im Trinkwasser," 12 02 2020. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/senkung-der-vorsorge-massnahmenwerte-fuer-pfoapfos. [Zugriff am 15 03 2021].

[16] V. Schröder, *Zukunft der Perfluochemie,* IVGT Umwelttag, Frankfurt: TEGEWA, 2020.

[17] C. d. Avila, *EU - PFAS Action Plan,* International Online-Conference: PFAS - Dealing with contaminants of emerging concern: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2020, pp. 38-49.

[18] T. Alrajoula, „REACH: Update zu aktuellen PFAS-Beschränkungsverfahren," BSI-Geschäftsstelle, Bonn, 2020.

[19] ECHA, „Proposal for identification of a substance of very high concern on the basis of the criteria set out in REACH article 57," Niederlande, 2019.

[20] United States Environmental Protection Agency, „EPA's Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Action Plan," 2019.

[21] „Anlagen: PTFE (Polytetrafluorethylen), Welt," Polyglobe, 2020.

[22] European Parliament, „REGULATION (EU) 2019/1021 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 June 2019 on persistent organic pollutants," 20 06 2010. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:02019R1021-20210222&from=EN#M1-1. [Zugriff am 15 03 2021].

[23] Umweltprobenbank des Bundes, „Perfluoroctansäure," [Online]. Available: https://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/14124. [Zugriff am 18 12 2020].

[24] REACH-CLP-Biozid Helpdesk, „Ausschuss der Mitgliedstaaten einigt sich, GenX-bezogene Chemikalien als SVHCs zu identifizieren," 10 07 2019. [Online]. Available: https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/SharedDocs/Meldungen/DE/REACH/2019-07-10-GenX%20als%20SVHC.html. [Zugriff am 18 12 2020].

[25] R. Bilott, Interviewee, *Making of "Vergiftete Wahrheit" (Dark Waters).* [Interview]. 2019.

[26] G. F. Peaslee, J. T. Wilkinson, S. R. McGuinness, M. Tighe, N. Caterisano, S. Lee, A. Gonzales, M. Roddy, S. Mills und K. Mitchell, „Another Pathway for Firefighter Exposure to Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Firefighter Textiles," Environmental Science & Technology Letters, 2020.

[27] E. F. Houtz und D. L. Sedlak, „Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff," Nr. 46, p. 9342, 2012.

[28] P. D. J. d. Boer und B. Eickhout, Interviewees, *PFAS Interview.* [Interview]. 05 10 2020.

[29] K. J. Rjis und R. P. Bogers, „PFOA exposure and health," National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands, 2017.

[30] „Firefighter Cancer Support Network FAQs," [Online]. Available: https://firefightercancersupport.org/resources/faq/. [Zugriff am 18 12 2020].

[31] REACH@Baden-Württemberg, Netzwerk, „Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) und ihre Salze," 02 03 2020. [Online]. Available: https://www.reach.baden-wuerttemberg.de/-/perfluorbutansulfonsaure-pfbs-und-ihre-salze. [Zugriff am 19 12 2020].

[32] G. F. Peaslee, J. T. Wilkinson, S. R. McGuinness, M. Tighe, N. Caterisano, S. Lee, A. Gonzales, M. Roddy, S. Mills und K. Mitchell, „Another Pathway for Firefighter Exposure to Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Firefighter Textile - Supplement," Environmental SCience Technology Letter, 2020.

[33] R. McElvery, „Protective gear could expose firefighters to PFAS - Fluorinated compounds in water-resistant textiles break down over time, contacting the skin and shedding into the environment," 01 07 2020. [Online]. Available: https://cen.acs.org/environment/persistent-pollutants/Protective-gear-expose-firefighters-PFAS/98/i26?ct=t(RSS_EMAIL_CAMPAIGN. [Zugriff am 19 12 2020].

[34] P. Koster, „Minister: mogelijk schadeclaim Rijk tegen Chemours en DuPont om pfoa en GenX," *Algemeen Dagblad,* 19 02 2020.

[35] J. Feeley, T. Kary und T. Robinson, „DuPont, Chemours in $4 Billion 'Forever Chemicals' Cost Pact," 22 01 2021. [Online]. Available: https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-01-22/dupont-and-chemours-in-4-billion-forever-chemicals-cost-pact. [Zugriff am 15 03 2021].

[36] Sustainable Apparel Coalition, „Material Sustainability Index," 14 12 2020. [Online]. Available: https://portal.higg.org/. [Zugriff am 05 03 2021].

[37] S. Kröger, „Grondstoffenvoorzieningszekerheid - Motie van het lid Kröger," Tweede Kamer der Staten-Generaal, 2020.

[38] European Commission, „EU Circular Economy Action Plan," 14 12 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/. [Zugriff am 21 12 2020].

[39] FleishmannHillard Brussels, „Environment & Circular Economy," [Online]. Available: https://fleishmanhillard.eu/expertise/environment-circular-economy/. [Zugriff am 21 12 2020].

[40] B. Bauer, „Positionspaper "Better design for greater circularity"," EU Policy Hub, Amsterdam, 2020.

[41] European Comission, „Waste prevention and management," [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm. [Zugriff am 17 04 2021].

[42] European Commission, „Waste," [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm. [Zugriff am 21 12 2020].

[43] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, „§ 45 KrWG - Einzelnorm," [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/__45.html. [Zugriff am 28 12 2020].

[44] N. Dodd und M. G. Caldas, „Revision of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Textile Products and Services," JRC Science Hub, Luxemburg, 2017.

[45] U. N. E. Programme, „UN 2015 Global Waste Management Outlook," Osaka, Japan, 2015.

[46] C. Wiedinmyer, R. Yokelson und B. Gullet, „Global emissions of trace gases, particulate matter and hazardous air pollutants from open domestic waste burning," Environmental Science & Technology, 2014.

[47] Europäische Kommission, „Sustainable Products in a Circular Economy -Towards an EU Product Policy Framework contributing to the Circular Economy," Brüssel, 2019.

[48] Euratex, „Extended Producer Responsibility (EPR) in Textile Products - EURATEX position paper," EURATEX, Sustainable Businesses, 2020.

[49] Sympatex Technologies GmbH, „wear2wear - Gemeinsam schließen wir den Textilkreislauf," [Online]. Available: https://www.wear2wear.org/de/. [Zugriff am 01 04 2021].

[50] UNFCCC , „REPORT_Annual Meeting_FICCA_October," 2020.

[51] Sphera; Sympatex, *E-Mail Korrespondenz: Nachtrag Gespräch R22,* 2019.

[52] UNFCCC, „Fashion Industry Charter for Climate Action," 2018.

[53] Sustainable Apparel Coalition, „Higg MSI FAQ," 2020. [Online]. Available: https://howtohigg.org/higg-msi/faq/. [Zugriff am 4. 1. 2021].

[54] K. M. Stanley, D. Say, J. Mühle, C. M. Harth, D. Y. P. B. Krummel, S. J. O'Doherty, P. K. Salameh, P. G. Simmonds, R. F. Weiss, R. Prinn, P. J. Fraser und M. Rigby, „Increase in global emissions of HFC-23 despite near-total expected reductions," Nature Research Journal, 2020.

[55] Öko-Recherche, Winfried Schwarz, *E-Mail Korrespondenz Sympatex,* 2020.