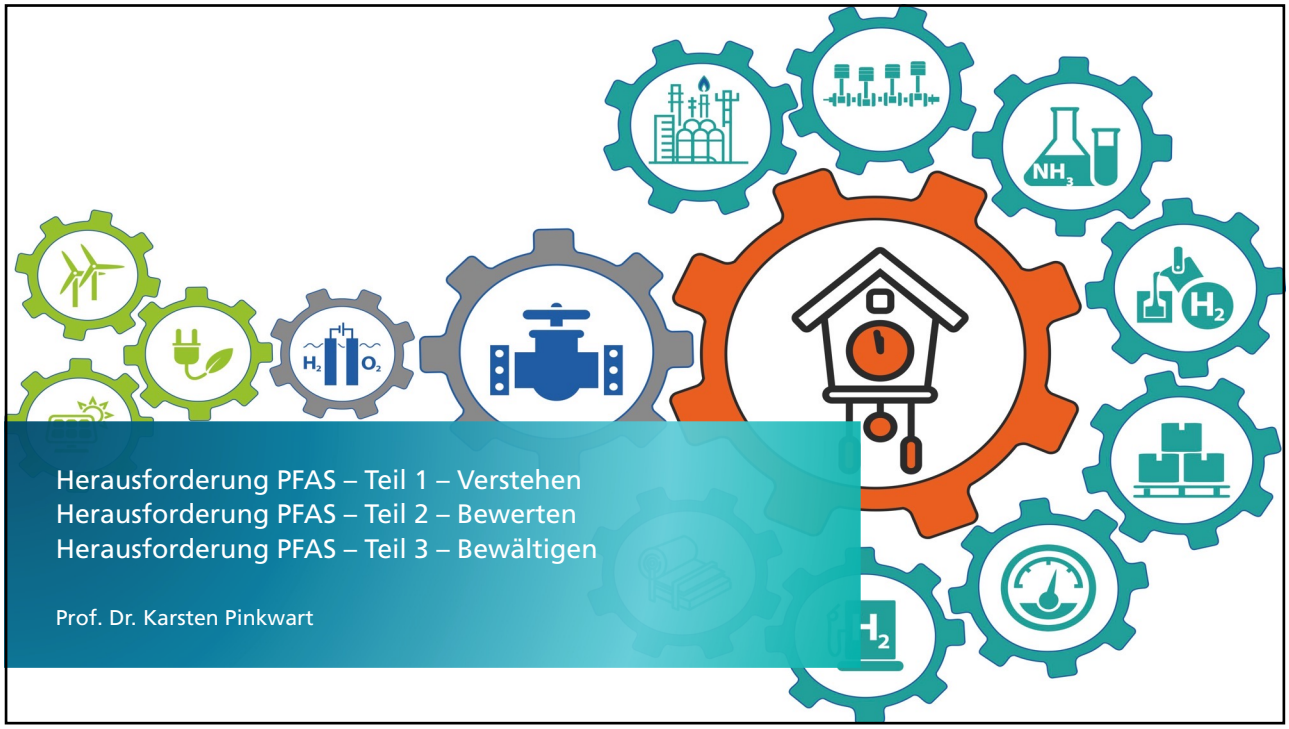
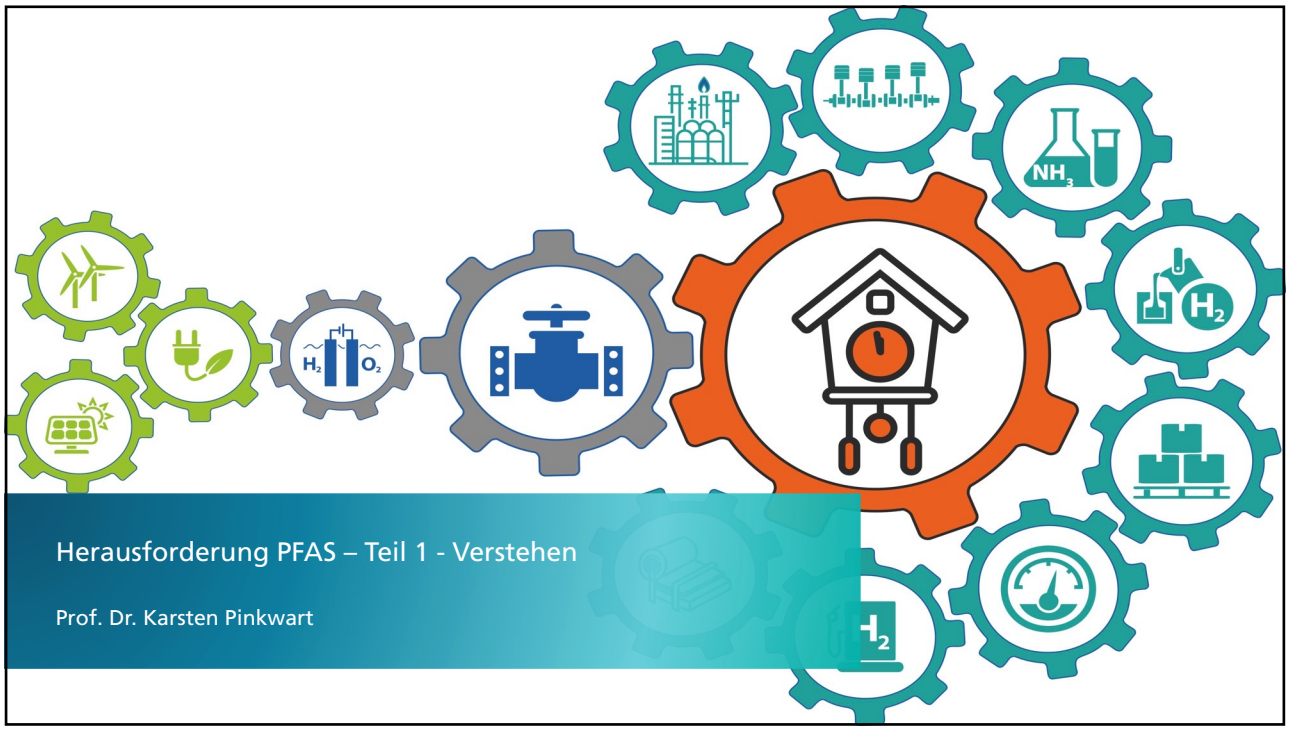

Herausforderung PFAS – verstehen, bewerten und bewältigen
Prof. Dr. Karsten Pinkwart

1


Herausforderung PFAS – Teil 1 – Verstehen
Herausforderung PFAS – Teil 2 – Bewerten
Herausforderung PFAS – Teil 3 – Bewältigen
Prof. Dr. Karsten Pinkwart

2



3

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Historische Entwicklung



Roy Plunkett entdeckt das Polytetrafluorethylen (PTFE).

1938

1947

Fa. 3M entwickelt PFOA und startet Produktion; PFOA dient etwa als Emulgator bei der Herstellung von Fluorpolymeren.

1949

PTFE-haltige Produkte werden zunächst für die Beschichtung von Rohren und die Abdichtung von Rohrverbindungen verwendet.

1954

Herstellung des ersten PTFE-beschichteten, antihaftbeschichteten Kochgeschirrs.

1956

Produkte, die Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) enthalten, werden zu einer beliebten Behandlung für Kleidung, Teppiche und Möbel.

1968

Die US-Marine entwickelt als Reaktion auf einen katastrophalen Schiffsbrand den ersten PFAS-haltigen Feuerlöschschaum, AFFF genannt.

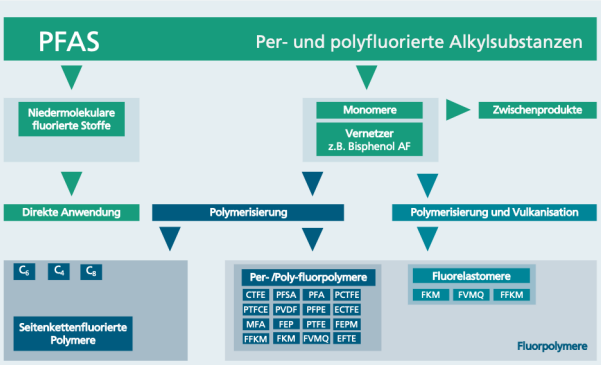
 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

4

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Was ist PFAS?

- PFAS sind heute die dominierenden Kunststoffkomponenten bzw. Bestandteile
- ca. 10.000 Materialzusammensetzung bekannt
- Kohlenstoff-Fluor-Bindungen
  - Kohlenstoffketten, vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert)
  - einzigartige physikalisch-chemische Eigenschaften
    - chemisch inert, nicht benetzend
    - nicht klebend, extrem temperatur-, feuer- und witterungsbeständig



 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

5

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Schlüsseleigenschaften



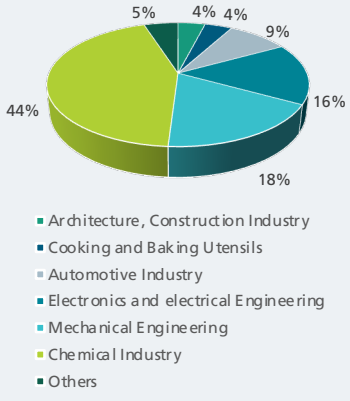
 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

6

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Unverzichtbar in vielen Schlüssel und Zukunftstechnologien

- einzigartige „C-F“ Verbindung
  - höchste Elektronegativität
  - hohe Polarität der Bindung
  - geringe Polarisierbarkeit (van der Vaals Radius 1.32 Å)
  - hohe Bindungsdissoziationsenergie der σ C-F-Bindung



[Quelle: R. Krämer, M. Schlipf, Fluoropolymers, Kunststoffe international 10/2016, 82 –86.]

7

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Unverzichtbar in vielen Schlüssel und Zukunftstechnologien

- einzigartige inerte „C-F“ Verbindung
  - Umwelt-Halbwertszeiten von perfluorierten Molekülen
    - Perfluorcarbonsäuren (PFCA)
      - zum Beispiel für PFOA: $t_{½}$ > 92 Jahre (US EPA, 2014)
    - Perfluorsulfonsäuren (PFSA):
      - zum Beispiel PFOS: $t_{½}$ > 41 Jahre (US EPA, 2014)

Bindung	Bindungsdissoziationsenergie / kcal/g mol
C - C	59.6
C = C	102
C - H	88.2
C - N	57.8
C - F	110
Si - O	89.3

[Quelle: W. Holzmüller, K. Altenburg, Physik der Kunststoffe, Akademie Verlag, Berlin, 1961]

8

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Unverzichtbar in vielen Schlüssel und Zukunftstechnologien

- einzigartige inerte „C-F“ Verbindung
  - Umwelt-Halbwertszeiten von perfluorierten Molekülen
    - Perfluorcarbonsäuren (PFCA)
      - zum Beispiel für PFOA: $t_{½}$ > 92 Jahre (US EPA, 2014)
    - Perfluorsulfonsäuren (PFSA):
      - zum Beispiel PFOS: $t_{½}$ > 41 Jahre (US EPA, 2014)

Bindung	Bindungsdissoziationsenergie / kcal/g mol
	59.6
C - N	
C - F	110
Si - O	89.3

Persistente perfluorierte Alkylsubstanzen

[Quelle: W. Holzmüller, K. Altenburg, Physik der Kunststoffe, Akademie Verlag, Berlin, 1961]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

9

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Unverzichtbar in vielen Schlüssel und Zukunftstechnologien

- einzigartige „C-F“ Verbindung
  - höchste Elektronegativität
  - hohe Polarität der Bindung
  - geringe Polarisierbarkeit (van der Vaals Radius 1.32 Å)
  - hohe Bindungsdissoziationsenergie der σ C-F-Bindung
  - „F“ senkt die Elektronendichte am Kohlenstoff deaktiviert für oxidativen Angriff
    - inerte Verbindungen

Bindung	Bindungsdissoziationsenergie / kcal/g mol
C - C	59.6
C = C	102
C - H	88.2
C - N	57.8
C - F	110
Si - O	89.3

[Quelle: W. Holzmüller, K. Altenburg, Physik der Kunststoffe, Akademie Verlag, Berlin, 1961]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

10

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Unverzichtbar in vielen Schlüssel und Zukunftstechnologien

- einzigartige „C-F“ Verbindung
  - niedrigste Oberflächenenergie
    - Abweisung von
      - Wasser
      - Blut
      - Alkohol
      - Öl
      - ...
    - - CF_3- / - CF_2 - Gruppen ermöglichen niedrigste Oberflächenenergien
    - polarer Bestandteil begünstigt die Anhaftung von Substanzen

Polymer	Funktionelle Gruppe	geschätzte Oberflächenenergie / mJ/m²	
		total	polare Anteil
Polyethylen	- CH_2 -	33	0
Polypropylen	- $CH(CH_3)$ - CH_2 -	30	0
Poly(vinyl fluorid)	- CH_2 - CHF -	37	6
Poly(vinyliden fluorid)	- CH_2 - CF_2 -	30	7
Polytrifluorethylen	- CHF - CF_2 -	24	4
Polytetrafluorethylen	- CF_2 - CF_2 -	19	0
SAM Coatings	- CHF_2	15	n.n.
Polyhexafluorpropylen	- $CF(CF_3)$ - CF_2 -	13	0

unpolar

[Quelle: S. Kirk, M. Kushner et al., Plasma Process. Polym. 2010, 7, 107]]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT | Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences | Fraunhofer ICT

11

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Schlüsseleigenschaften

PTFE - Teflon®		PFOS Perfluoroktansulfonsäure
Medizinprodukte, Industrieanwendungen, u.v.m.	Verwendung	Löschschaum (bis 2006), Scotchgard® (bis 2003)
Kunststoff, Hochleistungswerkstoff	Stoffgruppe	Tensid, seifenähnliche Substanz
am Einsatzort	Vorkommen	verteilt sich über das Grundwasser und die Nahrungskette in den Menschen
nein	wasserlöslich	ja
nein	bioakkumulativ	ja
nein	giftig	ja
ja	biokompatibel	nein
ja	inert	nein
ja	persistent	ja

NATIONALER WASSERSTOFFRAT | Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences | Fraunhofer ICT

12

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Schlüsseleigenschaften

PTFE - Teflon®		PFOS Perfluoroktansulfonsäure
Medizinprodukte, Industrieanwendungen, u.v.m.	Verwendung	Löschschaum (bis 2006), Scotchgard® (bis 2003)
Kunststoff, Hochleistungswerkstoff	Stoffgruppe	Tensid, seifenähnliche Substanz
	Vorkommen	verteilt sich über das Grundwasser und die
	wasserlöslich	
	bioakkumulativ	
nein	giftig	ja
ja	biokompatibel	nein
ja	inert	nein
ja	persistent	ja

aus heutiger Sicht unbedenklich

aus heutiger Sicht bedenklich

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences

Fraunhofer ICT

13

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Schlüsseleigenschaften

PTFE - Teflon®		PFOS Perfluoroktansulfonsäure
Medizinprodukte, Industrieanwendungen, u.v.m.	Verwendung	Löschschaum (bis 2006), Scotchgard® (bis 2003)
Kunststoff, Hochleistungswerkstoff	Stoffgruppe	Tensid, seifenähnliche Substanz
	Vorkommen	verteilt sich über das Grundwasser und die
	wasserlöslich	
	bioakkumulativ	
nein	giftig	ja
ja		nein
ja		nein
ja		ja

aus heutiger Sicht unbedenklich

aus heutiger Sicht bedenklich

aber, dies sind nicht alle medizinischen PFAS - Produkte

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences

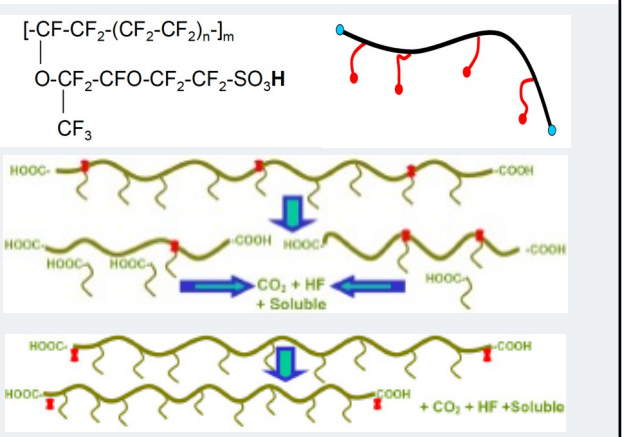
Fraunhofer ICT

14

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Perfluorierte Sulfonsäuren

Fachliteratur

- umfassende chemische Stabilität doch nicht gegeben
  - radikalischer Angriff der über Etherbindungen angebrachte Sulfonsäuregruppen
  - Angriff von Peroxiden aus der Gasphase
    1. Abscheren der Seitenkette, Bruch der Hauptkette an der Etherverknüpfung
    2. Angriff vom Ende der Hauptkette



[Quelle: W.E. Delaney, W.K. Liu, ECS Transactions, 11 (1) 1093-1104 (2007)]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Perfluorierte Sulfonsäuren

Fachliteratur

- Abbau von Nafion® in Brennstoffzellen bringt identifizierbare Bruchstücke hervor
  - Anreicherung mittels Festphasenextraktion
  - Identifikation mittels HPLC-MS-MS

m/z	mögliche chemische Zusammensetzung
97	HSO_4^-
175	$HOOC\text{-}CF_2\text{-}SO_3^-$
189	$HOOC\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}COO^-$
255	$HOOC\text{-}CF(CF_3)\text{-}O\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}COO^-$
133	$CF3\text{-}COO^-$
341	$HOOC\text{-}CF(CF_3)\text{-}O\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}SO_3^-$

[Quelle: VDMA 27.02.2023 I Abbau Per- und Polyfluorierter Verbindungen in Brennstoffzellen I Ludwig Jörissen]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Perfluorierte Sulfonsäuren

Fachliteratur

- Nafion in Brennstoffzellen bringt
  tücke hervor
  - Anreiche tion
  - Identifikation mitte

Sind diese Emission persistent? Wann entstehen sie?
Erfolgt auch ein Abbau in der PEM Elektrolyse? Kommt es dort zu Emissionen?

m/z	mögliche chemische Zusammensetzung
97	HSO_4^-
175	$HOOC\text{-}CF_2\text{-}SO_3^-$
189	$HOOC\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}COO^-$
	$HOOC\text{-}CF(CF_3)\text{-}O\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}COO^-$
133	
341	$HOOC\text{-}CF(CF_3)\text{-}O\text{-}CF_2\text{-}CF_2\text{-}$

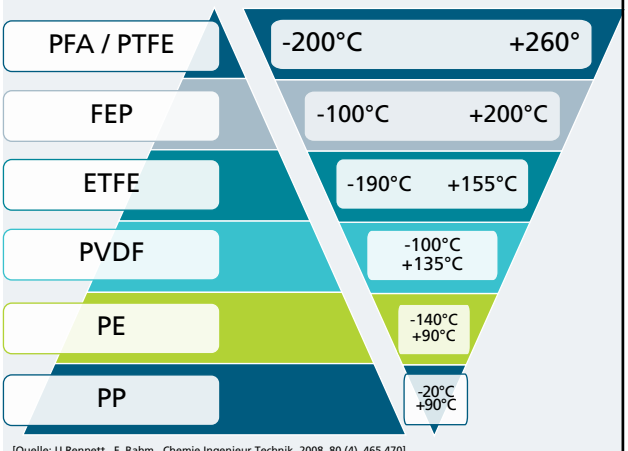
[Quelle: VDMA 27.02.2023 I Abbau Per- und Polyfluorierter Verbindungen in Brennstoffzellen I Ludwig Jörissen]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

17

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

- Was ist möglich?
  - Wo sind die heutigen Limits?
    - Gebrauchstemperatur



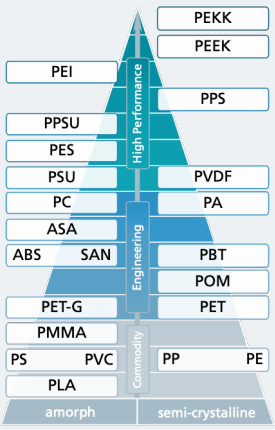
[Quelle: U.Rennett , F. Bahm , Chemie Ingenieur Technik, 2008, 80 (4), 465 470]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

18

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

- Was ist möglich?
  - Wo sind die heutigen Limits?
    - teilkristalline und amorphe Typen
    - Standard-, technische oder Hochleistungsthermoplaste
    - Anpassung durch Mischen
      - mit verstärkenden Füllstoffen
        mit anderen Polymertypen
        mit weiteren speziellen Additiven

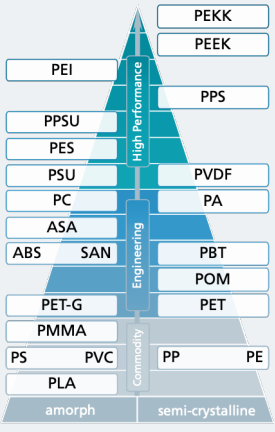


[nach Quelle: https://empowerax.dlr.de/material-overview]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

amorphe Kunststoffe
- Polymerketten sind ungeordnet („glasartig“)
- keine Kristallite, keine regelmäßige Packung der Moleküle
- Struktur ähnelt gefrorener Flüssigkeit

semi-kristalline Kunststoffe
- Bestehen aus zwei Phasen:
  - kristalline Bereiche (geordnet, dicht gepackt)
  - amorphe Bereiche (ungeordnet)



[nach Quelle: https://empowerax.dlr.de/material-overview]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

	thermische	mechanische	chemische	verarbeiten
amorphe	erweichen	steif, spröde, maßhaltend	anfällig, Spannungsrißbildung	geringer Verzug, einfache Prozessführung
semi - teilkristalline	schmelzen	zäh, verschleißfest	Kristallite wirken als Diffusionsbarriere	Verzug möglich, anisotropes Schrumpfen

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

21

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

- Was ist möglich?
  - Wo sind die heutigen Limits?
    - individuelle Anforderungsprofile
    - Chancen für neue Materialien und Grades

	PTFE	PI	PEEK	PPS
Max. Dauergebrauchstemperatur / °C	+260	+300	+240	+230
Min. Dauergebrauchstemperatur / °C	-200	-270	-50	
Bruchdehnung / %	140-150	2-0.9		4
Zugfestigkeit / MPa	20-40	37-81	100	120
Kriechstromfestigkeit / V	>600	<175	<175	
Wasserabsorption 25°C / 50 % rh / %	<0.01	<2.80	0.04	<0.05

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

22

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

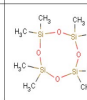
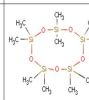
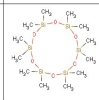
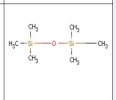
- einzigartige „C-F“ Verbindung
  - niedrigste Oberflächenenergie
    - - CF_3- / - CF_2 - Gruppen ermöglichen niedrigste Oberflächenenergien
  - einzigartige Alternativen?
    - andere Halogenverbindungen
    - Silane/Siloxane mit –CH_3 -Gruppen ermöglichen niedrige Oberflächenenergien, die nahe an die von PFAS kommen

Polymer	Funktionelle Gruppe	geschätzte Oberflächenenergie / mJ/m^2 total
Polyethylen	- CH_2 -	33
Polytrifluorethylen	- CHF - CF_2 -	24
Polytetrafluorethylen	- CF_2 - CF_2 -	19
SAM Coatings	- CHF_2	15
Polyhexafluorpropylen	- $CF(CF_3)$ - CF_2 -	13
Chlor / Brom / Jod	C_2H_5Cl / C_2H_5Br / C_2H_5I	33/ 37 / 41
Hexamethyldisiloxan	$(CH_3)_6Si_2O$	17
Polydimethylsiloxan	$[(CH_3)_2SiO]_4$	19
Tetramethylsilan	$(CH_3)_4Si$	16

[Quelle: R. Ulbricht, Z. Naturforschg.1964, 19b, 978]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Substitutionsmöglichkeiten

- Siloxane als „Heilmittel“?
  - klassische Siloxane/Silane mit einer Vielzahl von endständigen - CH_3 - Gruppen könnten eine ähnliche Leistung wie PFAS erreichen
    - wesentlich dickere Beschichtungen sind erforderlich, um Abbau zu verhindern
  - ultradünne Siloxan-Plasmabeschichtungen (glasartig) mit terminalen - CH_3 – Gruppen
    - verbesserte Haltbarkeit
    - Ersatz für PFAS in vielen Bereichen, jedoch (derzeit) nicht für die Ölabweisung

Name	Hexamethylcyclo-trisiloxane (D3)	Octamethylcyclo-tetrasiloxane (D4)	Decamethylcyclo-pentasiloxane (D5)	Dodecamethylcyclo-hexasiloxane (D6)	Hexamethyldisiloxane
Molecular formula	$C_6H_{18}O_3Si_3$	$C_8H_{24}O_4Si_4$	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	$C_6H_{18}OSi_2$
Structural formula					
Molecular weight	222.46	296.64	370.80	444.93	162.42
CAS-no	541-05-9	556-67-2	541-02-6	540-97-6	107-46-0
Synonyms (among others)	Dimethylsiloxane cyclic trimer	Cyclic dimethylsiloxane tetramer, KF994 Part of Cyclomethicone	Cyclic dimethylsiloxane pentamer, KF995 Dow corning 245 fluid. Part of Cyclomethicone	Cyclohexasiloxane	Oxybis(trimethylsilane), Bis(trimethylsilyl)ether

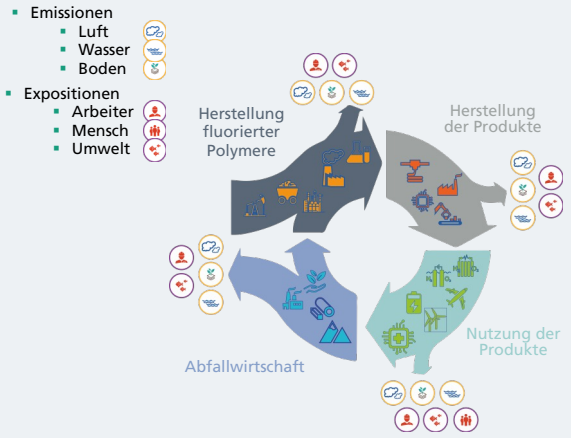
[Quelle: Dänische Umweltschutzbehörde, Siloxane (D3, D4, D5, D6, HMDS) 2014, ISBN 978-87-93026-85-832;

https://echa.europa.eu/de/registry-of-svhc-intentions]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Prozesskreislauf

Lebenszyklen PFAS

- Herstellung fluorierter Polymere
- Herstellung der spezifischen Produkte
- Nutzung der Produkte
- Ende des Lebenszyklus



[Quelle: nach DOI:10.13140/RG.2.2.31128.67846]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe
University of
Applied Sciences

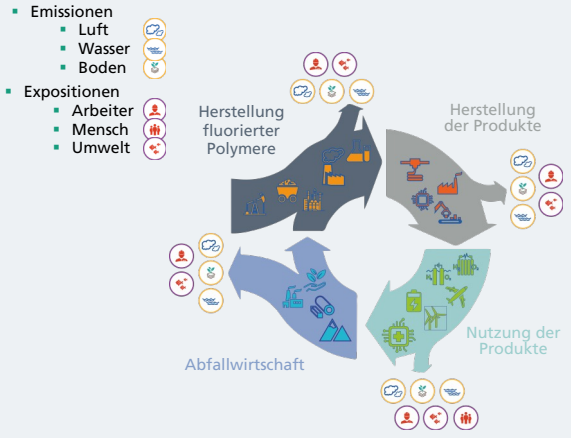
Fraunhofer ICT

25

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Prozesskreislauf

Lebenszyklen PFAS

- Optionen für das Risikomanagement
- Betrachtung der Produktion
- Verarbeitung der Materialien und Komponenten
- Nutzung der Materialien, Komponenten und Systeme
- Reparatur und Austausch der Materialien, Komponenten und Systeme
- Abfallmanagement



[Quelle: nach DOI:10.13140/RG.2.2.31128.67846]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe
University of
Applied Sciences

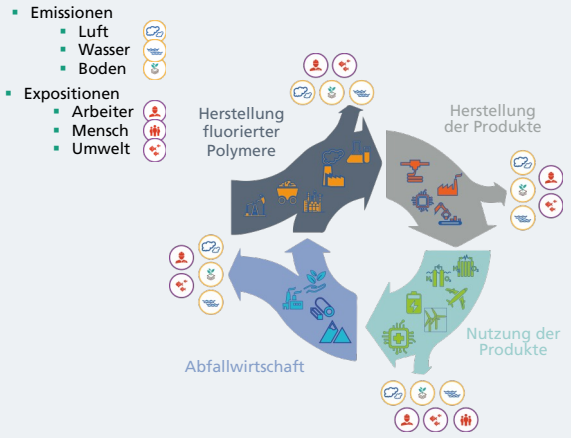
Fraunhofer ICT

26

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Prozesskreislauf

Lebenszyklen PFAS – PFAS Alternativen

- Welche analytischen zertifizierten Methoden sind für den jeweiligen Lebenszyklus bekannt und geeignet?
- Wie kann know how für die großskalige Produktion erhalten bleiben bei Rückzug der heutigen Produzenten?
- Welche europäischen oder internationalen Forschungspartnerschaften sind einzugehen?
- Wann und wie sind toxikologische Untersuchungen in F&E einzubinden?



[Quelle: nach DOI:10.13140/RG.2.2.31128.67846]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe
University of Applied Sciences

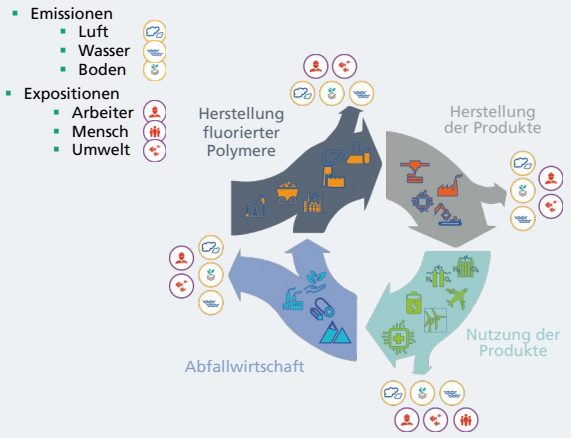
Fraunhofer ICT

27

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Welcher Weg führt aus dem Dilemma?

PFAS Alternativen

- Anforderungsprofile typischer Anwendungen - ‚must have' und ‚nice to have'
- Vergleichende Gegenüberstellung ausgewählten Eigenschaften heute eingesetzter und kommerziell verfügbarer PFAS-Materialien
- Recherche kommerziell verfügbarer Alternativmaterialien/-lösungen
- Informationen zu Verfügbarkeiten, Materialkosten und Herstellerempfehlungen
- Ableitung von Handlungsempfehlungen



[Quelle: nach DOI:10.13140/RG.2.2.31128.67846]

NATIONALER WASSERSTOFFRAT

Hochschule Karlsruhe
University of Applied Sciences

Fraunhofer ICT

28

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Was ist die Problematik an PFAS? - Historische Entwicklung

1978 – Hersteller werden auf C8 PFAS im Blut ihrer Produktionsmitarbeiter aufmerksam.

1997 – PFOS wurde in Blutproben von nicht beruflich exponierten Personen in der ganzen Welt eindeutig nachgewiesen.

2006 – Acht große Hersteller verpflichten sich im Rahmen des PFOA Stewardship-Programms der US-Umweltbehörde EPA zum schrittweisen Verzicht auf PFOA bis 2015.

2008 – Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit legt eine "tolerierbare tägliche Aufnahme" für PFAS fest.

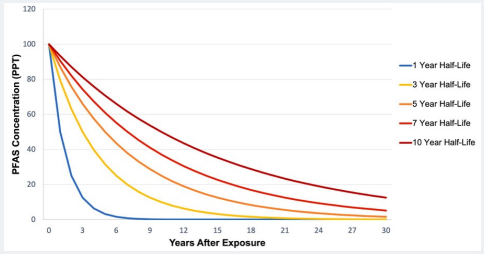
2009 – Das Stockholmer Übereinkommen stuft PFOS als persistenten organischen Schadstoff ein und nimmt es in Anlage B auf, um seine Verwendung einzuschränken.

2013 – Nach 7 Jahren Forschung stellt das C8 Science Panel einen wahrscheinlichen Zusammenhang zwischen PFOA-Exposition und Colitis ulcerosa, hohem Cholesterinspiegel, schwangerschaftsbedingtem Bluthochdruck, Schilddrüsenerkrankungen, Nieren- und Hodenkrebs fest.

29

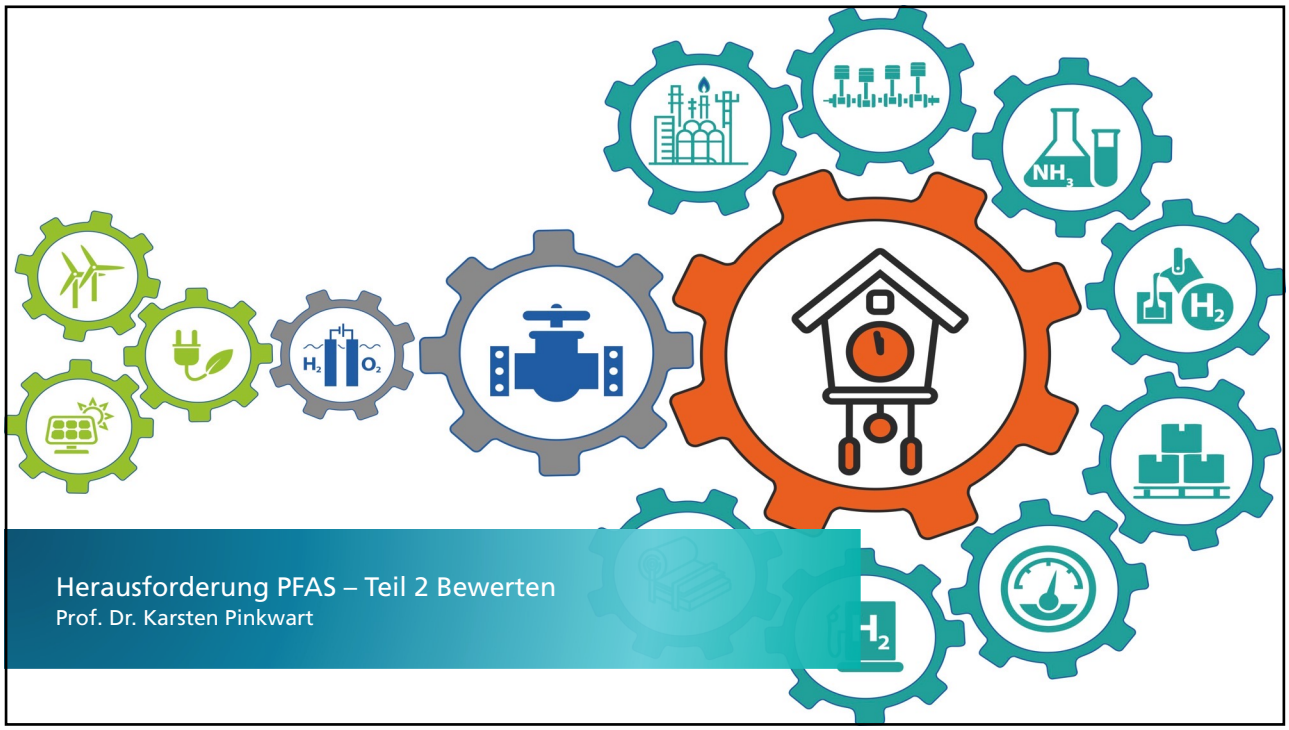
Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Humanexposition und Wirkung

- Wirkung
  - 2008 - tolerable Tagesdosis (TDI)
    - PFOA
      - 1.500 ng/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Tag
        10,5 µg/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Woche
    - PFOS
      - 150 ng/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Tag
        1,5 µg/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Woche
  - 2018 - tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI)
    - PFOA
      - 6 ng/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Woche
    - PFOS
      - 12 ng/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Woche
  - 2020- tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI)
    - Summe aus PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS
      - 4,4 ng/kg pro Kilogramm Körpergewicht und Woche



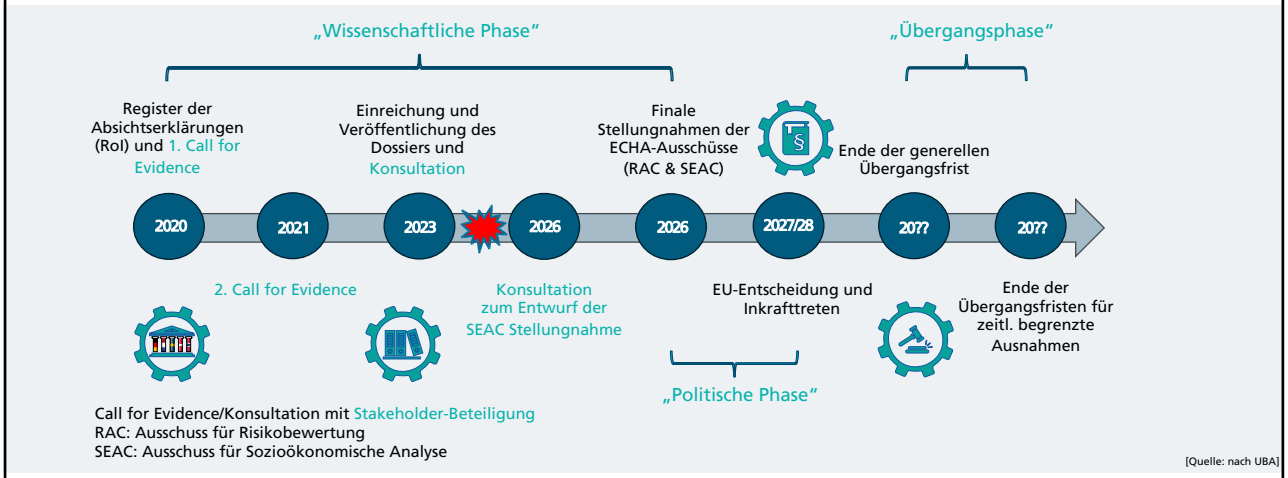
[Quelle: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115164]

30



31

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
REACH - Beschränkungsprozess

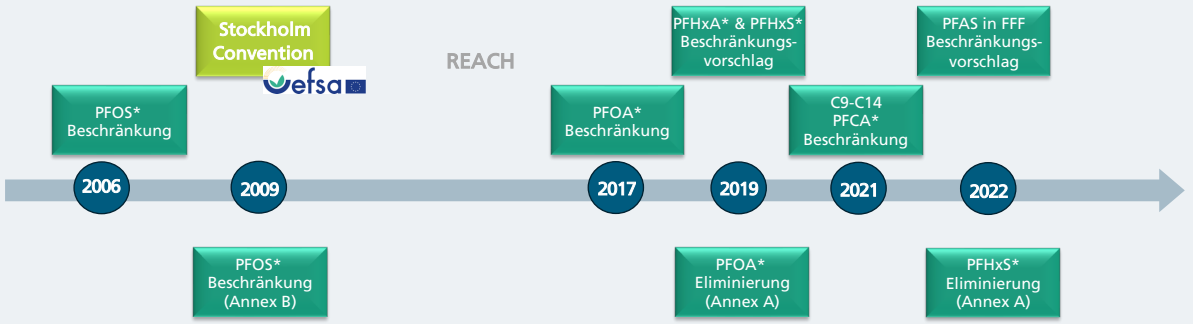


NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

32

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)

Co-Evolution von Beschränkungen und stofflichen Substitutionen



PFOS (Perfluoroctansulfonsäure)
PFOA (Perfluoroctansäure)
PFHxA (Undecafluorhexansäure)
PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure)
*inkl. Salze und Vorläuferverbindungen (i.e. PFAS-Untergruppen basierend auf deren Struktur)

[Quelle: nach UBA]

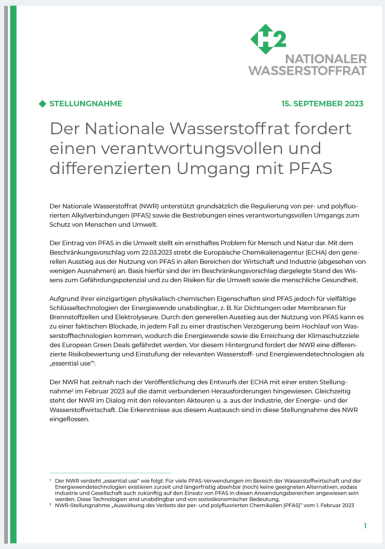
NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

33

ECHA – Restriction Report

2te Stellungnahme 2023-09-15 Nationaler Wasserstoffrat

- Auseinandersetzung mit dem Thema nach der Veröffentlichung „ Restriction Report“
- klare Empfehlung
  - PFAS-MATERIALIEN SIND ESSENZIELL FÜR DAS ENTSTEHEN UND DEN HOCHLAUF EINER WASSERSTOFFWIRTSCHAFT
  - EINE DIFFERENZIERTE RISIKOBETRACHTUNG UND BEWERTUNG SOLLTEN IN EINEN STRUKTURIERTEN AUSNAHMEPROZESS EINFLIESSEN
  - EIN KREISLAUFSYSTEM IM SINNE DES EUROPEAN GREEN DEALS SORGT FÜR EINEN VERANTWORTUNGSVOLLEN UMGANG MIT PFAS
  - WEITERE F&E-AKTIVITÄTEN SIND NOTWENDIG
  - EINE VERURSACHERGERECHTE HAFTUNG FÜR UMWELTSCHÄDEN MUSS ETABLIERT WERDEN



NATIONALER WASSERSTOFFRAT

STELLUNGNAHME 15. SEPTEMBER 2023

Der Nationale Wasserstoffrat fordert einen verantwortungsvollen und differenzierten Umgang mit PFAS

Der Nationale Wasserstoffrat (NWR) unterstützt grundsätzlich die Regulierung von per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) sowie die Bestrebungen eines verantwortungsvollen Umgangs zum Schutz von Menschen und Umwelt.

Der Eintrag von PFAS in die Umwelt stellt ein ernsthaftes Problem für Mensch und Natur dar. Mit dem Beschränkungsvorschlag vom 22.03.2023 strebt die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) den generellen Ausstieg aus der Nutzung von PFAS in allen Bereichen der Wirtschaft und Industrie (abgesehen von wenigen Ausnahmen) an. Basis hierfür sind der im Beschränkungsvorschlag dargelegte Stand des Wissens zum Gefährdungspotenzial und zu den Risiken für die Umwelt sowie die menschliche Gesundheit.

Aufgrund ihrer einzigartigen physikalisch-chemischen Eigenschaften sind PFAS jedoch für vielfältige Schlüsseltechnologien der Energiewende unabdingbar, z. B. für Dichtungen oder Membranen für Brennstoffzellen und Elektrolyseure. Durch den generellen Ausstieg aus der Nutzung von PFAS kann es zu einer faktischen Blockade, in jedem Fall zu einer drastischen Verzögerung beim Hochlauf von Wasserstofftechnologien kommen, wodurch die Energiewende sowie die Erreichung der Klimaschutzziele des European Green Deals gefährdet werden. Vor diesem Hintergrund fordert der NWR eine differenzierte Risikobewertung und Einstufung der relevanten Wasserstoff- und Energiewendetechnologien als „essential use“.

Der NWR hat zeitnah nach der Veröffentlichung des Entwurfs der ECHA mit einer ersten Stellungnahme[1] im Februar 2023 auf die damit verbundenen Herausforderungen hingewiesen. Gleichzeitig steht der NWR im Dialog mit den relevanten Akteuren u. a. aus der Industrie, der Energie- und der Wasserstoffwirtschaft. Die Erkenntnisse aus diesem Austausch sind in diese Stellungnahme des NWR eingeflossen.

[1] Der NWR versteht „essential use“ wie folgt: Für viele PFAS-Verwendungen im Bereich der Wasserstoffwirtschaft und der Energiewendetechnologien existieren zurzeit und längerfristig absehbar (noch) keine geeigneten Alternativen, sodass Industrie und Gesellschaft auch zukünftig auf den Einsatz von PFAS in diesen Anwendungsbereichen angewiesen sein werden. Diese Technologien sind unabdingbar und von sozioökonomischer Bedeutung.
[1] NWR-Stellungnahme „Auswirkung des Verbots der per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS)“ vom 1. Februar 2023

1

NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

34

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Optionen der Regulierung der Verwendung im Vergleich zum Basisszenario

- RO1 (bekannt aus 2023)
  - vollständiges Verbot
  - Reduktion der Emissionen um 96%
- RO2 (bekannt aus 2023)
  - Beschränkung mit nutzungsbezogenen Ausnahmeregelungen
  - Reduktion der Emissionen um 83%
  - zeitlich begrenzte Ausnahmen
    - Übergangszeitraum: 18 Monate
    - 5 Jahre (abhängig von der Verfügbarkeit von Alternativen)
    - 12 Jahre (abhängig von der Verfügbarkeit von Alternativen)
    - unbefristet (muss individuell begründet werden)
  - Kosten sind im Allgemeinen niedriger als unter RO1



 © Fraunhofer ICT

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Optionen der Regulierung der Verwendung im Vergleich zum Basisszenario

- RO3 (neue Option)
  - kontrollierte Nutzung von PFAS in bestimmten Bereichen

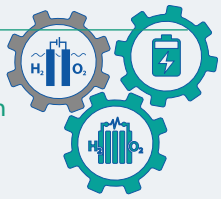
Sektoren	Emissionen ohne Beschränkung 2025–2055 / t	Emissionsreduktion 2025–2055 / %	Kosten	Verhältnismäßigkeit
Verwendung fluorierter Gase	1.804.914	RO1: 95 % (hoch) RO2: 83 % (moderat) RO3: keine Angaben	RO1: sehr hoch RO2: niedrig RO3: keine Angaben	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: wahrscheinlich verhältnismäßig RO3: keine Angaben
Verkehr	738.478	RO1: 94 % (hoch) RO2: 61 % (sehr niedrig) RO3: 64 % (sehr niedrig)	RO1: sehr hoch RO2: mäßig RO3: hoch	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: nicht wirksam genug RO3: nicht wirksam genug
Energie	470.246	RO1: 99 % (hoch) RO2: 90 % (hoch) RO3: nicht quantifiziert (niedrig)	RO1: sehr hoch RO2: mäßig RO3: nicht geschätzt, möglicherweise niedriger als RO1 und RO2	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: wahrscheinlich verhältnismäßig RO3: wahrscheinlich verhältnismäßig (dies hängt jedoch von den Behandlungsmethoden in der Abfallphase ab)
Technische Textilien	62.464	RO1: 97 % (hoch) RO2: 84 % (Mäßig) RO3: 76 % (niedrig)	RO1: sehr hoch RO3: niedrig bis mäßig RO2: mäßig	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: wahrscheinlich verhältnismäßig RO3: wahrscheinlich verhältnismäßig
Abdichtungsanwendungen	29.086	RO1: 96 % (hoch) RO2: 66 % (sehr niedrig) RO3: 10 % (sehr niedrig)	RO1: sehr hoch RO2: mäßig RO3: niedrig	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: nicht wirksam genug RO3: nicht wirksam genug
Maschinenanwendungen	1.265	RO1: 96 % (hoch) RO2: 66 % (sehr niedrig) RO3: 42 % (sehr niedrig)	RO1: sehr hoch RO2: mäßig RO3: niedrig	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: nicht wirksam genug RO3: nicht wirksam genug
Elektronik und Halbleiter	94	RO1: 98 % (hoch) RO2: 79 % (niedrig) RO3: 72 % (niedrig)	RO1: sehr hoch RO2: mäßig RO3: mäßig	RO1: wahrscheinlich nicht verhältnismäßig RO2: wahrscheinlich verhältnismäßig RO3: wahrscheinlich verhältnismäßig

 © Fraunhofer ICT

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Energiespeicher und Energiewandler - Ausnahmeregelungen

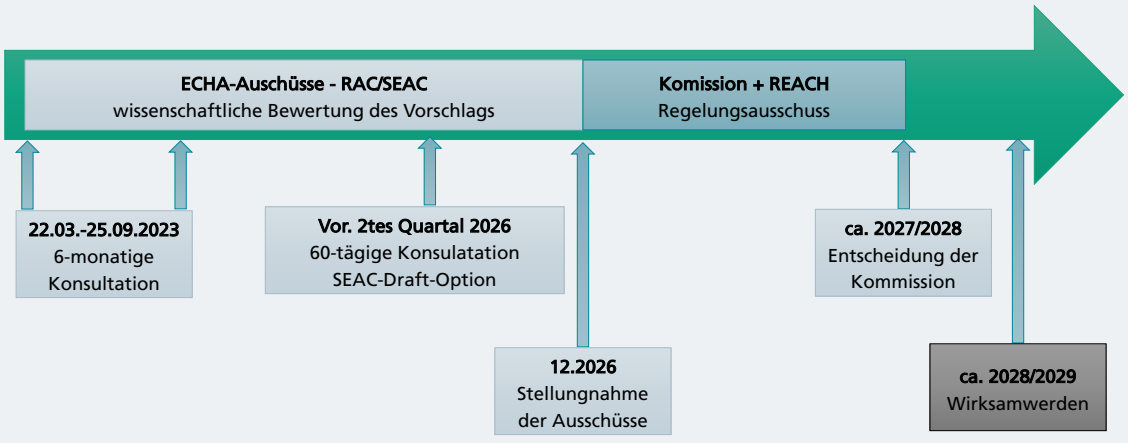
Batterien	Brennstoffzellen exkludiert aus dem Bereich Transport	Elektrolyseure
Bindemittel und Elektrolyte 18 Monate Übergangsfrist 12 Jahre Ausnahme	MEA 18 Monate Übergangsfrist 12 Jahre Ausnahme	MEA 18 Monate Übergangsfrist 12 Jahre Ausnahme
Beschichtungen für Separatoren 18 Monate Übergangsfrist 5 Jahre Ausnahme	Diese Ausnahmeregelung gilt nicht für Rohrleitungen, Dichtungen, oder Bipolarplatten außerhalb dieser Baugruppe.	

- Halbleiter: 18 Monate Übergangsfrist, 12 Jahre Ausnahme
- Windkraft: keine Ausnahmeregelung, da für Beschichtungen bereits gute Alternativen bekannt sind

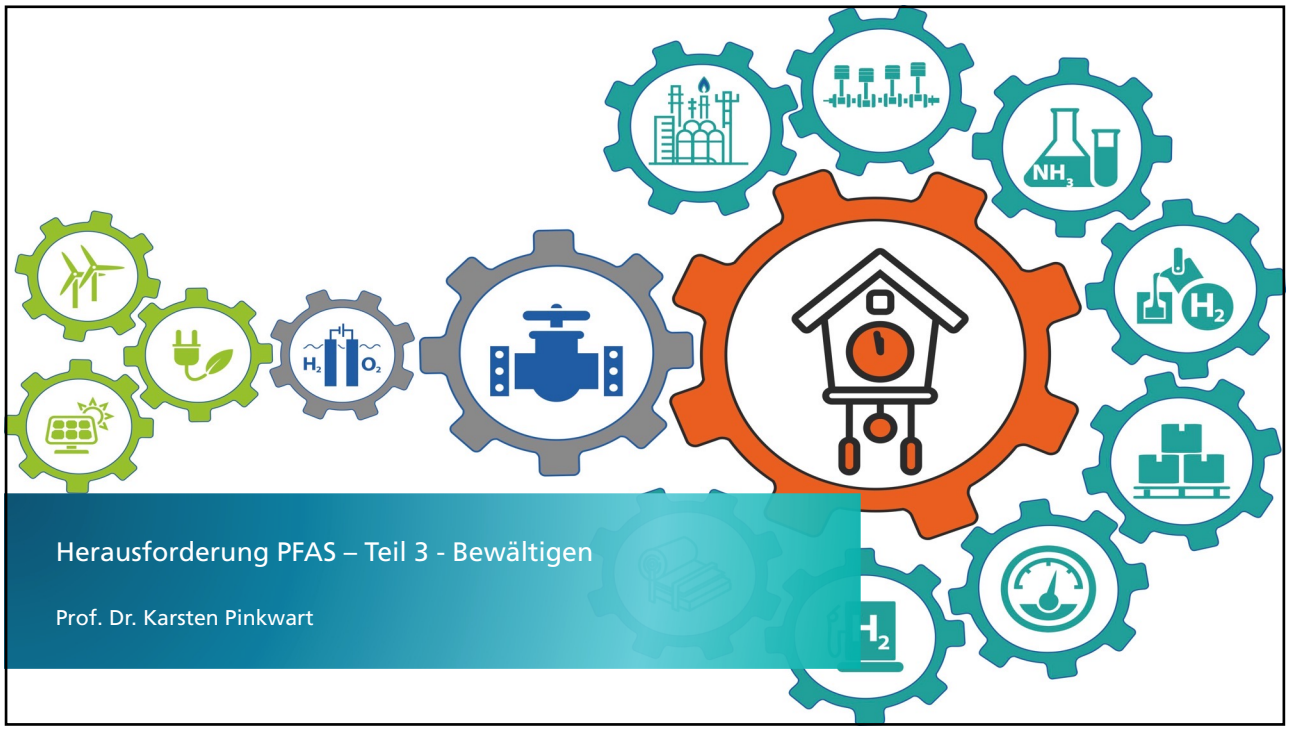


37

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
REACH - Beschränkungsprozess



38



39

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Welche Sektoren beziehungsweise Kategorien sind im Fokus

1. PFAS-Herstellung (PFAS manufacturing).
2. Consumer mixtures (z.B. Reiniger, Wachse, Polituren).
3. Kosmetika mit PFAS.
4. Textilien, Bekleidung, Leder, Teppiche (TULAC).
5. Lebensmittelkontaktmaterialien und Verpackungen.
6. Metallbeschichtung/Verchromung und Metallwarenherstellung.
7. Anwendungen fluorierter Gase (Kälte-/Klimatechnik etc.).
8. Transport (Straße, Luft, Schiene, Marine).
9. Elektronik und Halbleiter.
10. Energie (u.a. Stromübertragung, erneuerbare Energien, Batterien).
11. Elektrische Betriebsmittel (z.B. Isoliergase, Schaltanlagen).
12. Schmierstoffe (industriell, professionell, Verbraucher).
13. Erdöl- und Bergbauanwendungen.
14. Bauprodukte (z.B. Beschichtungen, Dichtstoffe).
15. Druckanwendungen (printing applications).
16. Dichtungsanwendungen (sealing applications).
17. Maschinen-/Maschinenbau-Anwendungen
18. weitere medizinische Anwendungen (z.B. Primärverpackungen, Hilfsstoffe).
19. Militärische Anwendungen.
20. Explosivstoffe.
21. Technische Textilien.
22. breitere industrielle Anwendungen (z.B. Lösungsmittel, Katalysatoren).

 © Fraunhofer ICT

40

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Risikobewertung

Risikodimensionen

1. Regulatorisches Risiko
   EU-PFAS-Restriktion, sektorale Derogationen
2. Technisches Risiko
   Substituierbarkeit / Performanceverlust
3. Lieferkettenrisiko
   Feedstocks, Gas-Kopplungen, Standortkonzentration, Marktverfügbarkeit
4. Kostenrisiko
   Umstellung, Materialpreise, CAPEX, Prozesse
5. EHS-/Reputationsrisiko
   Emissionen, „forever chemicals", NGO-Druck

Skala

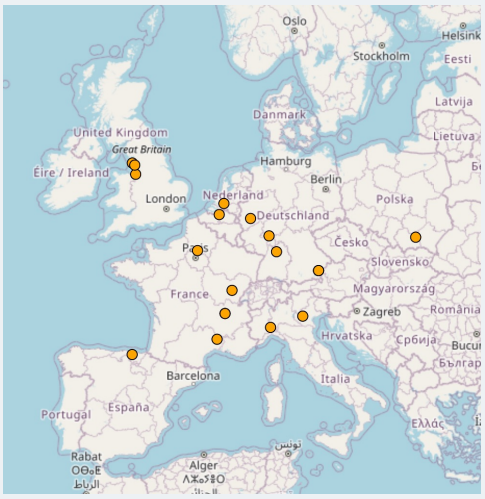
hoch, mittel, niedrig



Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Lieferkettenrisiko

Feedstock nach Kompaniezuordnung -> 20 Unternehmen

Name	Stadt	Land
3M	Zwijndrecht	Belgium
Archroma	Gendorf	Germany
Arkema	Zaramillo, Pierre-Bénite	Spain, France
Asahi Glass Company (AGC)	Thornton-Cleveleys	United Kingdom
Chemours	Villers Saint-Paul, Dordrecht	France, Netherlands
Daikin	Pierre-Bénite, Frankfurt am Main	France, Germany
Dyneon	Gendorf	Germany
F2 Chemicals	Preston	United Kingdom
Grupa Azoty	Tarnów	Poland
Koura	Runcorn	United Kingdom
Lanxess	Leverkusen	Germany
Miteni	Trissino	Italy
Solvay	Salindres, Tavaux, Spinetta-Marengo, Bad Wimpfen	France, Italy, Germany
W. L. Gore	Gendorf	Germany

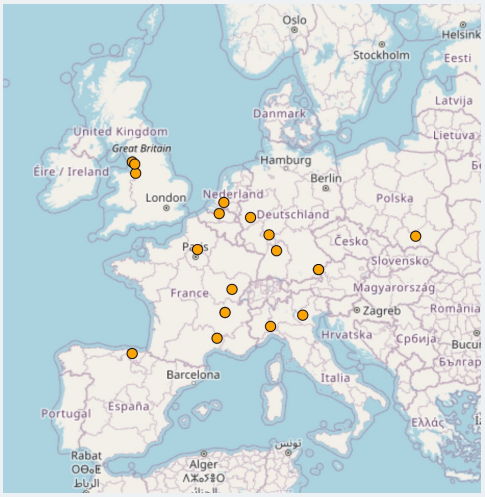


[Quelle: https://pdh.cnrs.fr/en/map/]

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Lieferkettenrisiko

Feedstock nach Länderzuordnun g -> 7 Länder

Name	Stadt	Land
3M	Zwijndrecht	Belgium
Arkema	Pierre-Bénite	France
Chemours	Villers Saint-Paul	
Daikin	Pierre-Bénite,	
Solvay	Salindres, Tavaux	
Archroma	Gendorf	Germany
Daikin	Frankfurt am Main	
Lanxess	Leverkusen	
Solvay	Bad Wimpfen	
W. L. Gore	Gendorf	
Chemours	Dordrecht	Netherlands
Solvay	Spinetta-Marengo	Italy
Miteni	Trissino	
Grupa Azoty	Tarnów	Poland
Asahi Glass Company (AGC)	Thornton-Cleveleys	United Kingdom
F2 Chemicals	Preston	
Koura	Runcorn	



[Quelle: https://pdh.cnrs.fr/en/map/]

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

43

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Was passiert außerhalb Deutschlands?

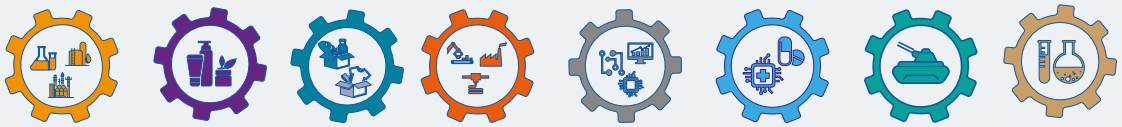
Land/Region	Art der Maßnahme (Beispiele)	Hauptsektoren (EU-Sektoren/NACE-Annäherung)
Dänemark	Verbot von PFAS in Papier/Karton-Lebensmittelverpackungen; weitere Verbote in Konsumgütern geplant.	Lebensmittelverpackungen (C17/C22), Einzelhandel mit Lebensmitteln (G47)
Frankreich	Verbot von PFAS in Skiwachs, Kosmetika, Verbraucher-Textilien/Schuhen (ab 2026), Ausweitung auf (fast) alle Textilien ab 2030.	Textil/Bekleidung/Leder (C13–C15), Kosmetika/Chemie (C20), Einzelhandel (G47)
EU-Ebene (REACH)	Sektorale Beschränkungen für Feuerlöschschäume, PFHxA-haltige Produkte, C9–C14-PFCAs; breiter PFAS-Restriktionsvorschlag in Vorbereitung.	Feuerlöschschäume (E37–E39, H49–H52), Textilien/Heimtextilien (C13–C15), Verpackungen (C17/C22), Kosmetika/Consumer-Chemie (C20)
Japan	Verbot/Restriktion zahlreicher PFAS, Anpassung der Lebensmittelkontakt-Regeln inklusive Verpackungen bis Mitte der 2020er Jahre.	Chemische Industrie (C20), Lebensmittelverpackungen (C17/C22), Elektronik (C26)
Australien/Kanada	Schrittweise, teils klassenbasierte Beschränkungen, Fokus auf PFAS-freie Verpackungen und Feuerlöschschäume.	Lebensmittelverpackungen (C17/C22), Feuerlöschschäume/Industrie (E37–E39, H49–H52)
USA (Bundesstaaten)	Teilverbote etwa in Lebensmittelverpackungen, Teppichen, Polstermöbeln, Feuerlöschschäumen; starke Trinkwasser-Grenzwerte.	Verpackungen (C17/C22), Textilien/Teppiche (C13–C15), Bau/Innenausstattung (C31), Feuerlöschschäume (E37–E39, H49–H52)

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

44

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Welche Sektoren beziehungsweise Kategorien sind im Fokus



Kategorie	Herstellung	konsumentennahe Nutzung	Textilien Verpackung	Metalle Prozesse	Energie Technik	Medizin Spezial-anwendungen	Verteidigung Sicherheit	Neue Zusatzsektoren
Beispiel	PFAS	Verbraucher-mischungen, Kosmetika, Skiwachs	TULAC, Lebensmittel-kontakt-materialien, Verpackungen	Metallplattierung, Metallwaren, Schmierstoffe, Erdöl und Bergbau	Energie, Elektronik, Halbleiter, elektrische Betriebsmittel, Bauprodukte	Medizin-produkte, weitere medizinische Anwendungen	militärische Anwendungen, Explosivstoffe.	Druck, Dichtungen, Maschinenbau, technische Textilien, industrielle Lösungsmittel, Katalysatoren

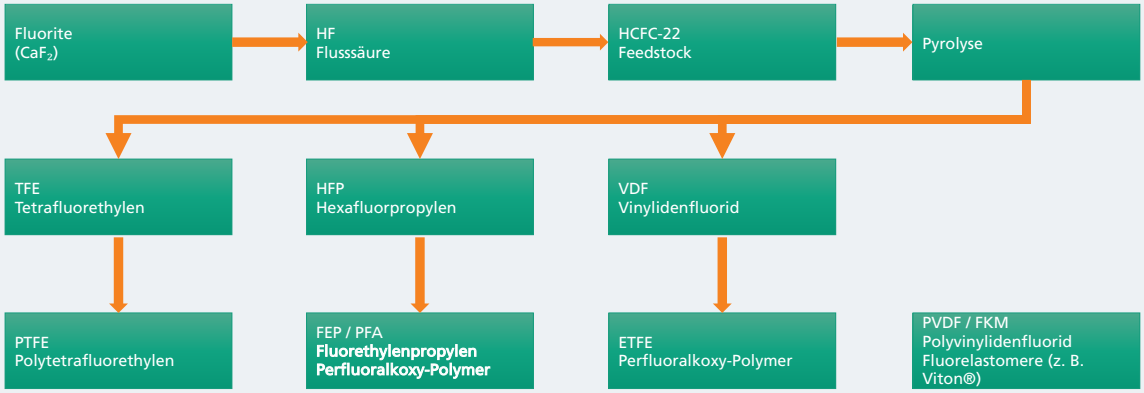
45

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind)

Risikoart	Bewertung	Begründung
Regulatorisch		PVDF, FKM, Fluorpolymere gelten in Teilen als „essential“; Ausnahmen wahrscheinlich, aber Auflagen hoch
Technisch		Substitution schwer: PVDF in Batterien, Fluorpolymere in PEM-Elektrolyse → aktuell kaum gleichwertige Alternativen
Lieferkette		Abhängigkeit von VDF /TFE / HFP, Engpässe, China-Dominanz, HFC-23/C_4F_8 - Emissionen → Kopplungsrisiko
Kosten		höhere Kosten durch Reduktion, Compliance, qualifizierte Ersatzstoffe.
EHS/Reputation		Fokus der Politik auf „Green Transition“, jedoch kritische PFAS im System → mittleres Risiko.

46

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette



 © Fraunhofer ICT

47

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Regulatorischer Status
- PFAS-Beschränkung nach REACH – Option RO2
- Betrachtung im Energiesektor

Elektrolyse-Technologien im Dossier
- PEM-Elektrolyse (PEM-EL)
- Alkalische Elektrolyse (AEL)
- AEM-Elektrolyse
- Chloralkali- & HCl-Elektrolyse
- PEM-EL zur Ozonproduktion

PFAS-Anwendungen in Elektrolyseuren
- MEA / CCM / GDL / MPL
- Membranen und Elektroden
- Sauerstoff-depolarisierte Kathoden (ODC)
- PFAS außerhalb der MEA separat reguliert



 © Fraunhofer ICT

48

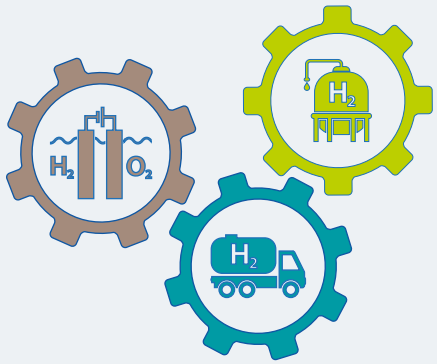
Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- Keine technisch/wirtschaftlich tragfähigen Alternativen bei EiF
- Ersatzmaterialien würden Leistung und Lebensdauer stark reduzieren

Umweltauswirkungen
- Zusätzliche Emissionen unter RO2 gering
- +970 t PFAS (inkl. EoL) über 12 Jahre ggü. RO1
- Sehr hohe Gesamtemissionsminderung 2025–2055

Emissionen & Exposition
- Sehr geringe Emissionen bei Herstellung & Nutzung
- Geschlossene Systeme, niedrige Betriebstemperaturen
- Hauptemissionen im Abfallmanagement

Strategische Bedeutung
- Zentrale Technologie für EU-Wasserstoffstrategie
- PFAS aktuell unverzichtbar für Effizienz & Lebensdauer
- Restriktionen ohne Ausnahme gefährden REPowerEU-Ziele



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

49

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

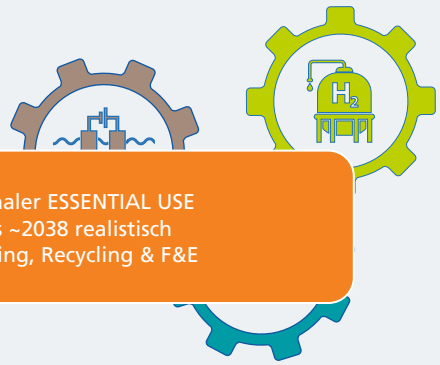
Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- Keine technisch/wirtschaftlich tragfähigen Alternativen bei EiF
- Ersatzmaterialien würden Leistung und Lebensdauer stark reduzieren

Umweltauswirkungen
- Zusätzliche Emissionen unter RO2 gering
- +970 t PFAS (inkl. EoL) über
- Sehr hohe Gesamtemission

Emissionen & Exposition
- Sehr geringe Emissionen be
- Geschlossene Systeme, nied
- Hauptemissionen im Abfallmanagement

Strategische Bedeutung
- Zentrale Technologie für EU-Wasserstoffstrategie
- PFAS aktuell unverzichtbar für Effizienz & Lebensdauer
- Restriktionen ohne Ausnahme gefährden REPowerEU-Ziele

FAZIT
Elektrolyseure gelten als funktionaler ESSENTIAL USE
PFAS-Ausnahme bis mindestens ~2038 realistisch
Fokus: Emissionskontrolle, Reporting, Recycling & F&E



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

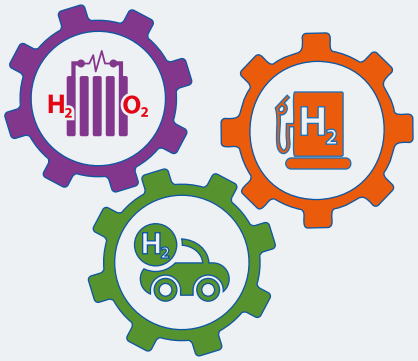
50

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Regulatorischer Status
- PFAS-Beschränkung nach REACH – Option RO2
- Brennstoffzellen explizit nicht Teil des Transportsektors
- Betrachtung im Energiesektor

Ausnahmeregelung für Brennstoffzellen
- Nutzung von Fluorpolymeren & PFPE erlaubt
- Gültig NUR für MEA und vergleichbare Membranbaugruppen
- Keine Ausnahme für Dichtungen, Rohrleitungen, Bipolarplatten außerhalb der MEA

Dauer der Ausnahmeregelung
- 12 Jahre + 18 Monate Übergangsfrist nach EIF
- Ziel: Entwicklung & Qualifizierung von Alternativen
- Gleichstellung mit Elektrolyseuren (PEM, AWE, AEM etc.)



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

51

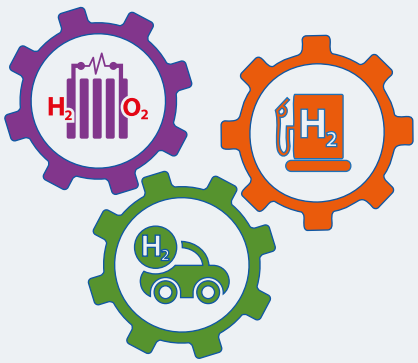
Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- Aktuell keine technisch geeigneten Alternativen für PFAS-Membranen
- Alternativen würden Lebensdauer massiv reduzieren

Umweltauswirkungen
- Zusätzliche Emissionen unter RO2 gering
- +970 t PFAS (inkl. EoL) über 12 Jahre ggü. RO1
- Emissionsminderung 2025–2055: >460.000 t

Emissionen & Exposition
- Hauptemissionen bei Produktion & End-of-Life
- Nutzung: kaum Emissionen (geschlossene Systeme)
- Recycling: PFAS derzeit kaum rückgewinnbar

PFAS-Anwendungen in Brennstoffzellen
- MEA / CCM / GDL / MPL
- Elektroden, Membranen (PEM)
- PFAS außerhalb der MEA separat reguliert



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

52

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- Aktuell keine technisch geeigneten Alternativen für PFAS-Membranen
- Alternativen würden Lebensdauer massiv reduzieren

Umweltauswirkungen
- Zusätzliche Emissionen unter RO2 gering
- +970 t PFAS (inkl. EoL) über
- Emissionsminderung 2025–

Emissionen & Exposition
- Hauptemissionen bei Produ
- Nutzung: kaum Emissionen
- Recycling: PFAS derzeit kaum rückgewinnbar

PFAS-Anwendungen in Brennstoffzellen
- MEA / CCM / GDL / MPL
- Elektroden, Membranen (PEM)
- PFAS außerhalb der MEA separat reguliert

FAZIT
Brennstoffzellen gelten als ESSENTIAL USE
PFAS-Ausnahme bis mindestens 2038 realistisch
Fokus auf Emissionskontrolle, Reporting & Recycling



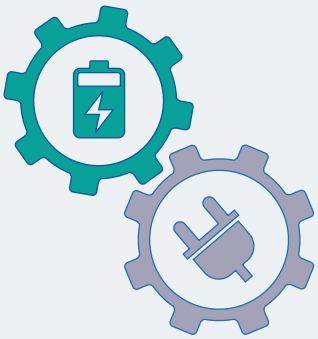
53

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Regulatorischer Status
- PFAS-Beschränkung nach REACH – Option RO2
- Batterien explizit nicht Teil des Transportsektors
- Betrachtung im Energiesektor

PFAS-Anwendungen in Batterien
- Elektrodenbinder (Kathode & Anode)
- Elektrolyte & Elektrolytadditive
- Separatorbeschichtungen
- Polymerelektrolyte & Membranen

Ausnahmeregelungen – Überblick
- Bindemittel & Elektrolyte: 12 Jahre + 18 Monate Übergangsfrist
- Separatorbeschichtungen: 5 Jahre + 18 Monate Übergangsfrist
- Begründung: fehlende technisch/wirtschaftliche Alternativen



54

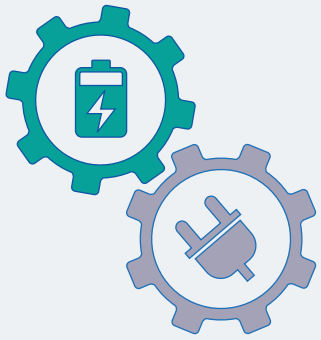
Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- PFAS-freie Batterien aktuell technisch nicht realisierbar
- Separatorbeschichtungen: Alternativen evtl. in ≤6,5 Jahren

Umweltauswirkungen
- Bindemittel & Elektrolyte: Emissionsminderung 2025–2055 > 430.000 t
- Separatorbeschichtungen: Emissionsminderung > 450.000 t
- Zusätzliche Emissionen unter RO2 begrenzt

Emissionen & Exposition
- Hauptemissionen bei Produktion & End-of-Life
- Nutzung: kaum Emissionen (geschlossene Systeme)
- Recycling: PFAS derzeit kaum rückgewinnbar

Strategische Bedeutung
- Batterien größter PFAS-Verbraucher im Energiesektor (~80 %)
- Schlüsseltechnologie für Green Deal & E-Mobilität
- EU-Risiko bei zu schneller Restriktion



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

55

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS
Energie (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen, PV, Wind) - Lieferkette

Substitutionspotenzial
- Sehr geringes Substitutionspotenzial (starke Evidenz)
- PFAS-freie Batterien aktuell technisch nicht realisierbar
- Separatorbeschichtungen: Alternativen evtl. in ≤6,5 Jahren

Umweltauswirkungen
- Bindemittel & Elektrolyte: Emissionsminderung 2025–2055 > 430.000 t
- Separatorbeschichtungen: r
- Zusätzliche Emissionen unt

Emissionen & Exposition
- Hauptemissionen bei Prod
- Nutzung: kaum Emissionen
- Recycling: PFAS derzeit kaum rückgewinnbar

Strategische Bedeutung
- Batterien größter PFAS-Verbraucher im Energiesektor (~80 %)
- Schlüsseltechnologie für Green Deal & E-Mobilität
- EU-Risiko bei zu schneller Restriktion

FAZIT
Batterien gelten als funktional essential
Langfristige Ausnahmen regulatorisch begründet
Fokus auf F&E, Emissionskontrolle und Recycling



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

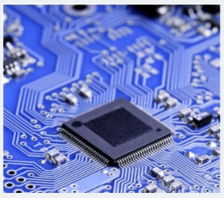
56

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Elektronik und Halbleiter









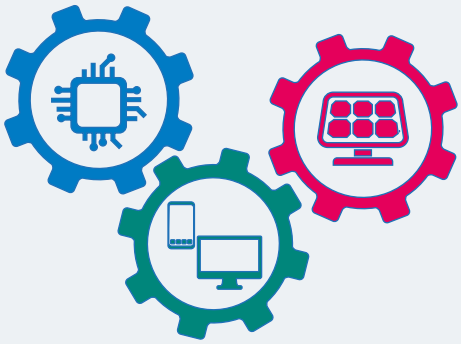
Prozesschemikalien	Anlagenpark	Fab – Infrastruktur	Produkte
Etching – Gase Lithographie – Lacke Reinigungschemikalien	Fluorpolymere im Equipment Wärmeaustauschflüssigkeit	Polymere in Dichtungen Polymere in O-Ringen Polymere in Zuleitungen Kühl- und Heizeinrichtungen	Kleber, Kabel, PCB's Schutzschichten Beschichtungen

 © Fraunhofer ICT

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Elektronik und Halbleiter

PFAS-Tenside (PFOA / PFOS und Homologe)

- Anti-Fingerprint-Ausrüstung
  - Handys
  - Displays
- ETC - Ausrüstung
  - Solarindustrie
  - Scheiben und Displays
  - Mikroelektronik



 © Fraunhofer ICT

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Elektronik und Halbleiter

PFAS-Tenside (PFOA / PFOS und Homologe)

- Anti-Fingerprint-Ausrüstung
  - Handys
  - Displays
- ETC - Ausrüstun
  - Solarindustrie
  - Scheiben und Displays
  - Mikroelektronik

PFAS-Tenside reichern sich im Körper (Leber, Blut) an und schädigen Gesundheit



Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Für welche Verwendungen werden PFAS eingesetzt, aber nicht zwingend benötigt?

Schmiermittel für Fahrräder

- PFAS erhöhen die Schmierleistung
- PFAS sind technisch nicht erforderlich
- Ersatzweise Keramik Schmierung

Imprägnierung von Teppichen

- PFAS erhöhen wasser- und ölabweisende Eigenschaften
- PFAS erhöhen Fleckenbeständigkeit und Schmutzabweisung
- noch wenig Veröffentlichungen Alternativen



Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)

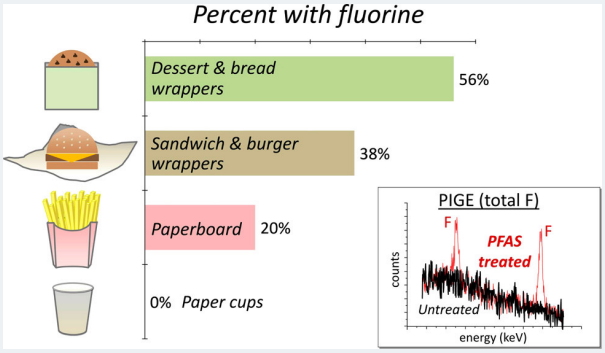
Für welche Verwendungen werden PFAS eingesetzt, aber nicht zwingend benötigt?

Imprägnierung von Kleidung

- Alternativen sind vorhanden

Lebensmittelverpackungen

- to-go Becher
- Alternativen sind vorhanden



https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00435

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)

Für welche Verwendungen werden PFAS eingesetzt, aber nicht zwingend benötigt?

Kosmetikartikel

- PFAS in Zahnseide
  - fünf Zahnseiden ohne die kritischen Stoffe
- FDA-USA 03/2023 570 kosmetischen Produktformulierungen mit mindestens eine Art von PFAS
- FDA-USA 2025-12-29 Bericht zur Sicherheitsbewertung der Verwendung von PFAS in kosmetischen Mitteln
- EPA-NZ Verwendung von PFAS in kosmetischen Produkten ist ab 2026-21-31 verboten

Küchenutensilien

- Antihaftbeschichtung (Pfannen, Ofen- oder Grillmatten mit PTFE-Beschichtung)
- Alternativen sind vorhanden, PLASLON® – Antihaftbeschichtung

	untersuchte Produkte	prozentualer Anteil der Produkte mit hohem Fluorgehalt
Lippenpflege (Lippenstifte, Glosse, Lidschatten, Liner, Schimmer, Balsam)	60	55%
Flüssiger Lippenstift	42	62%
Grundierungen (flüssig, cremig)	43	63%
Concealers	11	36%
weitere Gesichtspflegeprodukte (Puder, Rouge, Bronzer, Highlighter, Grundierungen, Sprays)	30	40%
Mascara	32	47%
wasserfestes Mascara	11	82%
weitere Augenpflegeprodukte (Lidschatten, Liner, Cremes, Grundierungen, Stifte)	43	58%

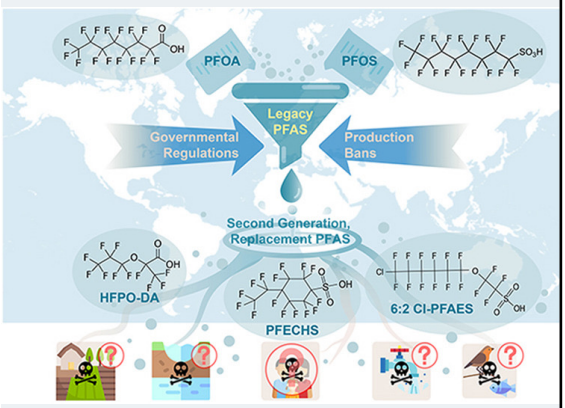
Quelle: https://greensciencepolicy.org/our-work/pfas/

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Gibt es unbedenkliche PFAS?

Unbedenklichkeit

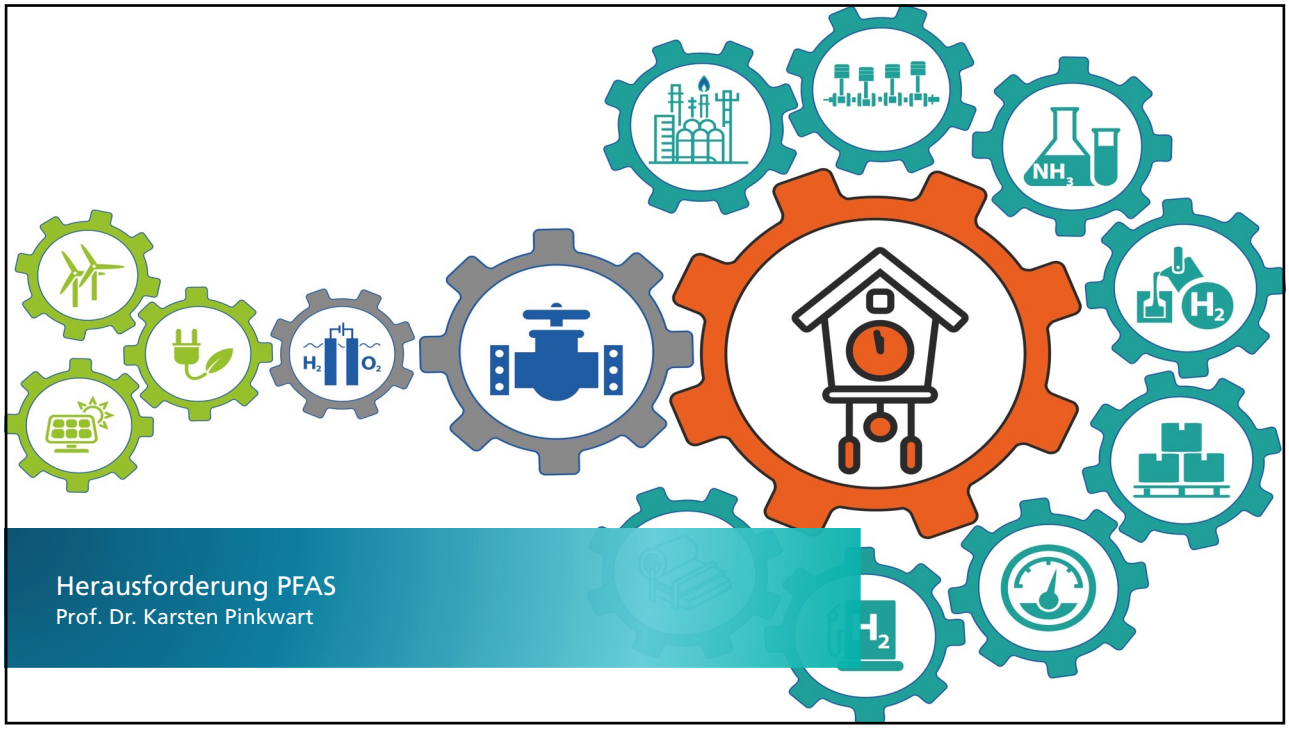
- Hierzu gibt es noch keine Aussage in der Literatur, da die Stoffklasse zu groß ist und bisher noch nicht alle der ca. 10.000 Stoffe untersucht worden sind.
- Es gibt keinen Bericht aus der Literatur, der ein Beispiel für unbedenkliche PFAS zeigt. Langkettige PFAS können in kurzkettige PFAS zerfallen, welche dann wiederum sehr persistent sind.
- Langkettige PFAS: Diese sind typischerweise problematischer, da sie sich im Körper anreichern und schwer abbaubar sind (z.B. PFOA, PFOS).
- Kurzkettige PFAS: Diese haben kürzere Kohlenstoffketten und gelten als weniger bioakkumulativ und potenziell weniger toxisch (z.B. PFBS). Sie sind jedoch auch sehr persistent und können trotzdem Umwelt- und Gesundheitsprobleme verursachen.

⇒ Es ist anzumerken, dass für viele der Tausenden von PFAS, die derzeit verwendet werden, keine angemessenen toxikologischen Daten vorliegen.



NATIONALER WASSERSTOFFRAT
Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences
Fraunhofer ICT

63



Herausforderung PFAS
Prof. Dr. Karsten Pinkwart

64

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Wann ist PFAS-Substitution technisch und ökologisch sinnvoll?

Entscheidung	Funktion & Sicherheit	Verfügbarkeit & Qualifikation	Emission & Exposition	Lebensdauer, Ressourcen & Entsorgung
SUBSTITUTION PRIORISIEREN	Anforderungen werden sicher erfüllt	Alternativen sind qualifiziert verfügbar	relevante Freisetzung wird vermieden	Lebensdauer und Ressourcenbilanz verbessern sich
MANAGEMENT PRIORISIEREN	kritische Funktion oder Sicherheit wäre gefährdet	Alternativen sind noch nicht ausreichend qualifiziert	Exposition ist technisch kontrollierbar	Ersatz erhöht Verbrauch oder Entsorgungsaufwand

Entscheidend ist die Gesamtwirkung über Funktion, Exposition und Lebenszyklus — nicht der Stoffaustausch allein.

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

65

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Von der Substitution zum verantwortungsvollen PFAS-Management

1 SUBSTITUTION	2 EMISSIONS-VERMEIDUNG	3 EXPOSITIONS-KONTROLLE	4 MONITORING	5 RÜCKGEWINNUNG / ENTSORGUNG
geeignete PFAS-freie Lösung einsetzen	Freisetzung an der Quelle verhindern	technische und organisatorische Barrieren sichern	Arbeitsplätze, Medien und Kreisläufe überwachen	Stoffströme schließen oder sicher beseitigen

Betriebliches Gefahrstoffmanagement: zuerst vermeiden — verbleibende Anwendungen kontrolliert und nachvollziehbar führen.

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

66

Per- und Polyfluor Alkylsubstanzen (PFAS)
Fünf Schlussfolgerungen für Unternehmen und Regulierungsbehörden

1. **PFAS-Beschränkungen sind zum Schutz von Umwelt und Gesundheit grundsätzlich notwendig.**
2. Stoffe, Anwendungen und Emissionspfade müssen differenziert bewertet werden.
3. Die technische Verfügbarkeit von Alternativen ist anhand überprüfbarer Kriterien zu bewerten.
4. Wo Substitution noch nicht möglich ist, sind Emissionen zu minimieren und kontrollierte Stoffkreisläufe aufzubauen.
5. Forschung, standardisierte Analytik und transparente regulatorische Rahmenbedingungen müssen gemeinsam vorangetrieben werden.

 © Fraunhofer ICT

NATIONALER WASSERSTOFFRAT Hochschule Karlsruhe University of Applied Sciences Fraunhofer ICT

67

Fraunhofer ICT

PFAS dort ersetzen, wo es technisch möglich und ökologisch sinnvoll ist.

Dort, wo leistungsfähige Alternativen fehlen, müssen Emissionen konsequent minimiert, Risiken transparent bewertet und Substitutionslösungen gezielt entwickelt werden.

Eine verantwortungsvolle Regulierung braucht wissenschaftliche Evidenz statt pauschaler Annahmen.

68

Kontakt

Prof. Dr. Karsten Pinkwart

Professor for Electrochemical Storage and Converters
Faculty for Electro- and Information Technology
Head of the "Institute for Scientific Engineering Fundamentals - INIG"
Karlsruhe University of Applied Science

Deputy Director Applied Electrochemistry
Fraunhofer Institut for Chemical Technology

Mitglied im Nationalen Wasserstoffrat der Bundesregierung
Mitglied im Beirat Wasserstoffroadmap Baden-Württemberg

Mobil: +49 (160) 96475925
E-Mail: karsten.pinkwart@ict.fraunhofer.de



69

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

70