

PFAS – eine Herausforderung für die Umwelttechnologie

Anett Georgi (anett.georgi@ufz.de) und Katrin Mackenzie (katrin.mackenzie@ufz.de)
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Leipzig

Zusammenfassung

Neue Methoden, um poly- und perfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) aus Wasser effektiv zu entfernen, werden händelnd gesucht. Im Department Technische Umweltchemie des UFZ arbeiten wir daher an der Entwicklung von verbesserten Abbau- und Trennverfahren für PFAS und deren synergistischer Kombination. PFAS-Spurenkontaminationen sollen möglichst selektiv abgetrennt und aufkonzentriert werden, um sie unter kontrollierten Bedingungen vollständig zu zerstören. Neue Adsorber, Katalysatoren und hybride Verfahrensansätze werden vorgestellt.

Dimension des Problems

Schlagworte wie ‚Forever chemicals‘ oder ‚Stille Pandemie‘ sind Ausdruck unseres wachsenden Bewusstseins für die Dimension des Problems, das die Gruppe der synthetisch hergestellten PFAS für menschliche Gesundheit und Umwelt verursacht. Aufgrund der hohen chemischen Stabilität von PFAS, insbesondere der perfluorierten Alkansäuren, sowie ihrer Persistenz gegenüber biologischen Abbauprozessen, haben diese Verbindung eine ubiquitäre Verbreitung in Spurenkonzentrationen über den gesamten Globus erlangt. Darüber hinaus gibt es eine hohe Zahl an punktuellen Kontaminationen beispielsweise durch die Anwendung von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen oder Emissionen aus der Industrie und Verbraucherprodukten, aber auch Klärschlammasubstrat zur Bodenverbesserung. Die aktuellen Diskussionen um extrem niedrige tolerierbare Aufnahmemengen für Menschen sowie zukünftige Grenzwerte für Trinkwasser im Rahmen der überarbeiteten EU-Trinkwasserrichtlinie (Richtlinie 98/83/EG, 0,5 µg L⁻¹ für PFAS insgesamt oder 0,1 µg L⁻¹ für 20 einzelne PFAS [1]) stellen die Umwelttechnologie vor große Herausforderungen. Es gilt, die Ausbreitung von bestehenden PFAS-Kontaminationen in der Umwelt wirksam zu stoppen und damit Wasserressourcen zu schützen sowie Spurenkonzentrationen in sensiblen Gütern wie Trinkwasser sicher und kostengünstig zu eliminieren. Diesen Anforderungen steht aufgrund der extremen Stabilität der PFAS ein begrenztes Spektrum an Behandlungsoptionen gegenüber.

Verfahren und Konzepte für Entfernung und Abbau von PFAS

Tabelle 1 enthält eine Übersicht der aktuell angewandten sowie im Forschungsmaßstab untersuchten Behandlungsverfahren für PFAS-kontaminierte Wässer und Böden. Großtechnische Anwendung finden bisher im Wesentlichen Trennverfahren wie die Adsorption an Aktivkohle und Ionenaustauschern sowie die Membranfiltration, da bekannte abiotische Abbauprozesse wie OH-radikalgetragene Prozesse (AOPs, Advanced Oxidation

Processes) ebenso wie mikrobielle Prozesse unwirksam für den Abbau perfluorierter Verbindungen sind.

Tabelle 1: Aktuell verfügbare Methoden zur Entfernung von PFAS aus Wasser und Boden

Trennverfahren - Wasser	Abbauprozesse - Wasser
Aktivkohleadsorption	Elektrooxidation
Ionenaustauscher	Nicht-thermisches Plasma
Membranfiltration (Nanofiltration, Umkehrosmose)	Photokatalyse
Schaumfraktionierung (Foam fractionation)	Persulfatoxidation
Alternative Adsorbentien (Zeolithe, Polymere, etc.)	Reduktive Prozesse (solvatisierte Elektronen)
Trennverfahren - Boden	Abbauprozesse - Boden
Bodenwäsche	Verbrennung
Rückhalt durch <i>In-situ</i> -Sorptionsbarrieren	
Stabilisierung/Solidifizierung	
Schaumfraktionierung	
Phytoremediation	

Allerdings verlagern Trennverfahren die Kontamination in eine zweite Phase, die als Abfall entsorgt oder nachbehandelt werden muss. Dennoch bieten Trennverfahren für die Behandlung der PFAS ein hohes Potenzial, da sie für große Wasserströme einfach anwendbar und sehr sicher sind, während praktisch alle Abbauprozesse energieintensiv sind bzw. harsche Bedingungen und hohe Verweilzeiten erfordern. Neue Entwicklungen am UFZ zielen auf die Verbesserung existierender Abbau- und Trennverfahren für PFAS sowie insbesondere deren synergistischer Kombination. Dazu werden Spurenkontaminationen der PFAS möglichst selektiv abgetrennt und damit aufkonzentriert als Voraussetzung für einen chemischen Abbau unter kontrollierten Bedingungen.

Optimierung der Adsorption von PFAS an Aktivkohle durch Steuerung von Oberflächenchemie und durch elektrisches Potential

Die Oberflächenchemie der Aktivkohle als wichtige Stellgröße für die PFAS-Adsorption

Aktivkohle als das am häufigsten eingesetzte technische Adsorbens spielt auch für die Entfernung von PFAS aus kontaminierten Wässern im technischen Maßstab bisher die größte Rolle. Mit PFAS beladene Aktivkohle wird entweder verbrannt

oder kann in speziellen thermischen Regenerierungsanlagen (>800°C) mit Hochtemperaturverbrennung der Abgase (>1000°C) regeneriert werden. Problematisch sind kurzkettenige PFAS, die von Aktivkohle nur mäßig adsorbiert werden, was die Standzeiten von Aktivkohleadsorbern an Standorten, wo z.B. Perfluorbutansäure einen wesentlichen Beitrag zum PFAS-Spektrum leistet, verkürzt. Gleichzeitig wurde in mehreren Arbeiten gezeigt, dass sich verschiedene Aktivkohleprodukte drastisch in ihrer Adsorptionsleistung für PFAS unterscheiden können. Aus diesen Gründen sehen wir ein deutliches Verbesserungspotenzial für die Aktivkohle-Adsorption zur PFAS-Eliminierung. Dies betrifft zum einen die Optimierung der Aktivkohlen für die spezifischen Erfordernisse der PFAS aber auch die Entwicklung von Methoden zur Vor-Ort-Regenerierung von Aktivkohle. Aktivkohlen für die Wasserreinigung werden vom Hersteller im Allgemeinen beworben nach Körnung, innerer Oberfläche (BET) und Adsorptionskennzahlen, wie der Jodzahl. Um eine Aktivkohle auszuwählen, die besonders zur Adsorption von PFAS geeignet ist, reicht das aber nicht. Perfluoralkylcarbon- und -sulfonsäuren liegen als sehr starke Säuren unter umweltrelevanten Bedingungen stets als Anionen vor. Anders als für neutrale hydrophobe Kontaminanten spielen daher neben den physikalischen Eigenschaften der Aktivkohle (z.B. spezifische Oberfläche und Porengröße) deren chemische Oberflächeneigenschaften eine entscheidende Rolle. Je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess besitzen Aktivkohlen saure und basische funktionelle Gruppen auf ihrer Oberfläche. Die Sorptionsfähigkeit der Aktivkohlen zeigt eine positive (ansteigende) Korrelation mit *sinkenden* Werten für 1) Sauerstoffgehalt, 2) Gehalt an sauren Gruppen, sowie 3) der Kationenaustauschkapazität als Maßzahlen für die Polarität und Dichte an negativen Ladungen. Gleichzeitig steigen die Sorptionskoeffizienten mit *steigenden* Werten für Ladungsnulldpunkt und Anionenaustauschkapazität als Maßzahlen für eine wachsende Dichte an positiv geladenen Oberflächenzentren an, was in Abb. 1 am Beispiel der Adsorption von Perfluoroktansäure (PFOA) gezeigt wird [2].

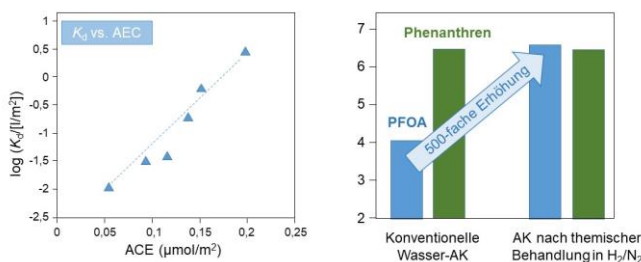


Abb. 1: a) Korrelation zwischen oberflächennormiertem Sorptionskoeffizient von PFOA ($c_{e,w} = 20 \mu\text{g/L}$) und Anionenaustauschkapazität (AEC) für verschiedene Aktivkohlen (Aktivkohlevliese, pH 7, 10 mM Na und b) Sorptionskoeffizienten (massenormiert) für Phenanthren und PFOA vor und nach Defunktionalisierung einer Aktivkohle durch thermische Behandlung in N_2/N_2

Eine thermische Behandlung von Aktivkohle in reduzierender Atmosphäre entfernt saure und schafft basische Oberflächenzentren und erhöht damit die Sorptionsfähigkeit für die an-

ionischen PFAS drastisch, während die Sorption von Phenanthren, hier als ‚klassische‘ neutrale Verbindung vergleichsweise dargestellt, nicht beeinflusst wird [3]. Einer optimalen Auswahl der Aktivkohle zur Erhöhung der Standzeit von Aktivkohleadsorbern kommt für die anionischen PFAS eine viel stärkere Bedeutung zu, als dies bei den klassischen Grundwasser-schadstoffen wie LCKW, BTEX oder PAK der Fall war. Standardisierte Parameter zur Charakterisierung der chemischen Oberflächeneigenschaften von Aktivkohleprodukten sollten entwickelt und von den Herstellern übernommen werden, um Anwendern die Auswahl zu erleichtern.

In-situ-Sorptionsbarrieren mit kolloidaler Aktivkohle

Aktivkohleadsorber sind Stand der Technik in sogenannten Pump&Treat-Anlagen zur Behandlung von gefördertem Grundwasser. Gleichzeitig kann Aktivkohle in kolloidaler Form, d.h. in einer Partikelgröße von ca. $1 \mu\text{m}$, zum Aufbau von *In-situ*-Sorptionsbarrieren genutzt werden [4, 5]. Dabei werden die Partikel in Form stabiler Suspensionen in den Untergrund injiziert, wo sie sich auf dem Aquifersediment ablagern und die Schadstoffe aus dem durchströmenden Grundwasser heraus-filtern. Im BMBF-geförderten Projekt ContaSorb (BMBF) wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Intrapore GmbH eine für PFAS optimierte, injizierbare Spezialaktivkohle entwickelt und im Pilotversuch an einem NATO-Flughafen in NRW im Bereich eines Feuerlöschübungsbeckens getestet [6]. Die Injektion der Partikel führte zu einer sofortigen und über mehr als 15 Monate anhaltende Absenkung der PFAS-Konzentrationen (Summe von 27 Einzelverbindungen) von $0,12 \mu\text{g/L}$ in den Bereich von $0 - 0,02 \mu\text{g/L}$. Bei einer eingebrachten Aktivkohlemenge von $3,7 \text{ kg/m}^2$ Anstromfläche sowie einer Abstandsgeschwindigkeit von $0,16 \text{ m/d}$ lässt sich eine theoretische Standzeit der Barriere von mehreren Jahrzehnten (rund 50 Jahren) abschätzen. Solche *In-situ*-Sorptionsbarrieren können die sich weit ausdehnenden PFAS-Fahnen sehr schnell und für lange Zeiträume stoppen. Derzeit gibt es bereits mehrere großtechnische Anwendungen sowie Forschungsprojekte zu *In-situ*-Sorptionsbarrieren mit kolloidaler Aktivkohle sowohl in Europa als auch in Nordamerika (dort insbesondere an Militärstandorten). Forschungsbedarf besteht hinsichtlich des Langzeitverbleibs der *In-situ*-Barrieren, um Möglichkeiten der endgültigen Eliminierung der immobilisierten PFAS aus dem Aquifer entweder durch Abbau bzw. Rückholung der PFAS-beladenen Aktivkohlepartikel zu finden.

Steuerung der PFAS-Adsorption durch elektrisches Potenzial: Elektrosorption

Die starke Abhängigkeit der PFAS-Adsorption von der Oberflächenladung macht sich das Verfahrenskonzept der Elektrosorption zunutze [7, 8]. Durch die Potentialbeaufschlagung wird leitfähige Aktivkohle quasi zu einem schaltbaren Adsorber. Mit kommerziellen Aktivkohlevliesen stehen sehr gut leitfähige, mikroporöse Aktivkohlematerialien zur Verfügung, die für die Elektrosorption eingesetzt werden können. Die Sorptionskoeffizienten für PFOA am Aktivkohlevlies variieren zwischen $6,5 \times 10^5 \text{ L/kg}$ und $1,5 \times 10^4 \text{ L/kg}$, je nachdem ob ein anodisches

bzw. kathodisches Potential ($\leq \pm 1$ V vs. Ag/AgCl) angelegt wird. Damit kann die Adsorption der PFAS durch Anlegen eines anodischen Potentials verbessert und durch Umpolung der Elektrodenpotentiale die Desorption in einen Konzentratstrom initiiert werden. Anhand der Unterschiede in den Sorptionsisothermen kann der Aufkonzentrierungsfaktor, d.h. das Volumenverhältnis von behandeltem Wasser zu Desorptionskonzentrat für eine Festbett-Elektrosorptionseinheit mit Potentialwechsel abgeschätzt werden. Dabei ergeben sich Konzentrierungsfaktoren ≥ 40 für PFOA und 100 für Perfluorbutansäure. Dies verdeutlicht das große Potenzial der Elektrosorption für die Vor-Ort-Regenerierung von Adsorbentien und als Aufkonzentrierungsschritt für die Kombination mit nachfolgenden PFAS-Abbauprozessen.

Gleichzeitig kann die Elektrosorption sehr gut auf die bereits erprobte Elektrooxidation der PFAS mit bordotierten Diamantelektroden und anderen innovativen Elektrodenmaterialien zugeschnitten werden [9]. Beide Prozesse können sich dabei sinnvoll ergänzen, die Elektrosorption verringert das zu behandelnde Wasservolumen, so dass die Elektrooxidation unter den gegebenen Bedingungen (Raum-Zeit-Ausbeute und Elektrodenkosten) in kompakten Anlagen möglich wird. Die Elektrooxidation kann eine vollständige Mineralisierung der PFAS erzielen, wobei die Wassermatrix der Elektrosorption an die Erfordernisse der Elektrooxidation angepasst werden kann (z.B. Wasser mit geringer Chloridkonzentration zur Vermeidung unerwünschter Oxidationsnebenprodukte wie Chlorate). Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen Aufkonzentrierungsverfahren wie der Umkehrosmose, die PFAS in einer komplexen wässrigen Matrix anreichert oder Ionenaustauschern, deren Regenerierung im Fall von PFAS Alkohol/Lauge-Mischungen erfordert.

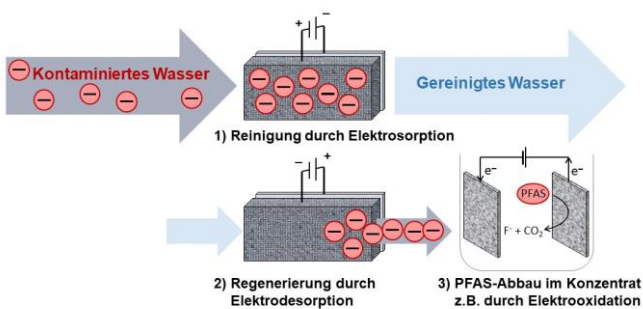


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Elektrosorptionsprozesses zur Wasserreinigung mit Adsorberregenerierung durch Potentialumkehr und Behandlung des Konzentrats durch Elektrooxidation

In der Verknüpfung von zwei technologischen Konzepten, die keine Chemikalien verbrauchen sondern lediglich elektrische Energie aus regenerativen Quellen und recycelbare Materialien benötigen, sehen wir großes Potential für neue Wasserreinungsverfahren im Einklang mit den Nachhaltigkeitszielen Deutschlands und der EU. Derzeit arbeiten wir im Verbundprojekt FABEKO (KMU innovativ, Koordination: Sensatec

GmbH) am Einsatz der elektrostimulierten Adsorption für die Reinigung von biopolymerhaltigen Waschwässern aus der On-site-Bodenwäsche zur PFAS-Entfernung aus kontaminierten Böden.

Kombination von Adsorption und katalytischer Oxidation der PFAS

Sollen die PFAS direkt auf einem Adsorbentmaterial im adsorbierten Zustand abgebaut werden, dann müssen die dafür notwendigen reaktiven Spezies möglichst direkt an der Adsorbentoberfläche katalytisch erzeugt oder zumindest nicht von dieser parasitär verbraucht werden. PFAS benötigen hochreaktive Radikale wie Sulfatradikale zur Oxidation bzw. solvatisierte Elektronen zur Reduktion. Diese werden aufgrund ihrer unselektiven Reaktivität von einer Vielzahl an organischen und redoxaktiven anorganischen Stoffen verbraucht und sind daher extrem kurzlebig.

Zeolithe als mineralische Adsorber und (Photo) Katalysatoren zur PFAS-Oxidation

Synthetische industrielle Zeolithe sind hochporöse Aluminosilikate, die eine spezifische Oberfläche von bis zu $700 \text{ m}^2/\text{g}$ aufweisen können und anders als Aktivkohle gegenüber starken Oxidationsmitteln inert sind. In kolloidaler Form, das heißt als Partikel mit einem Durchmesser in der Größenordnung von ca. $1 \mu\text{m}$, sind sie partiell transparent. Damit ergeben sich verschiedene Möglichkeiten zur Kombination von PFAS-Adsorption und nasschemischer Oxidation mit und ohne UV-Bestrahlung. In jüngeren Arbeiten haben wir daher Untersuchungen zur Verwendung von Zeolithen als Vor-Ort-regenerierbaren Adsorbentien für PFAS durchgeführt. Zeolithe vom BEA-Gittertyp zeigen eine hohe Affinität für die PFAS-Adsorption insbesondere von länger-kettigen PFAS wie PFOA. Thermisch aktiviertes Persulfat ist in der Lage, die im Zeolith adsorbierten Perfluoralkansäuren abzubauen. Dabei werden Sulfatradikale durch den Zerfall des Persulfats bei erhöhten Temperaturen gebildet und es konnte gezeigt werden, dass die Reaktion von Sulfatradikalen mit adsorbiertem PFOA im Zeolith schneller verläuft als in rein wässrigem Medium [10]. Der Zeolithadsorber hat eine katalytische Wirkung. Er wird nicht verbraucht, sondern steht für weitere Adsorptions-/Regenerierungszyklen zur Verfügung. Dieses Verfahrenskonzept kann in Festbettadsorbentien mit pelletierten Zeolithen umgesetzt werden, wobei die Adsorptionsphase ähnlich wie bei bekannten Aktivkohle-adsorbentien verläuft. Die Regenerierung kann jedoch direkt im Bett durch Spülen mit erwärmter Persulfatlösung erfolgen. Ein Austausch und Abtransport des Adsorbentien wie für Aktivkohle üblich, ist nicht notwendig. Die Trennung in Adsorptions- und Regenerierungsphase verknüpft wiederum beide Prozesse synergistisch (Abb. 3b). Die Wasserbehandlung erfolgt mit hohem Durchsatz mithilfe des schnellen und sicheren Adsorptionsverfahrens, der langsame Abbau der persistenten PFAS erfolgt nach Aufkonzentrierung in einem gut kontrollierbaren separaten Schritt, der bis zur vollständigen Mineralisierung geführt werden kann (Abb.3a).

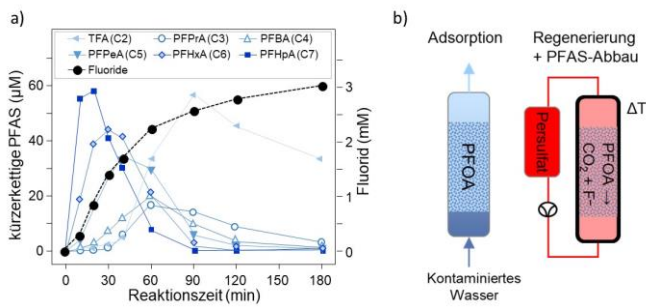


Abb. 3: a) Abbau von PFOA nach Adsorption im Zeolith durch thermisch aktiviertes Persulfat mit Fluoridfreisetzung und Bildung und Abreaktion von kurzkettingen Perfluorcarbonsäuren als Intermediate ($C_{\text{Zeolith}} = 50 \text{ g/L}$ und $C_{0,\text{PFOA}} = 240 \text{ µM}$, $C_{0,\text{Persulfat}} = 100 \text{ mM}$, $\text{pH}_0 = 3.0$, and $T = 70 \text{ °C}$) und b) Schematische Darstellung eines Adsorptionsprozesses mit Vor-Ort-Regenerierung des Zeolith-Adsorbers durch thermisch aktiviertes Persulfat

Durch die Verwendung kolloidaler Zeolithpartikel können ein-spülbare Suspensionen zur Platzierung von *In-situ*-Sorptionen erzeugt werden. Auch hier wäre ein Abbau der adsorbierten PFAS nach Erschöpfung der Sorptionswirkung der Barriere durch thermisch aktiviertes Persulfat möglich. Zeolithe sind je nach ihrem Al-Gehalt im Verhältnis zum Si-Gehalt im Gitter mehr oder weniger starke Kationenaustauscher. Dies macht man sich zunutze, um redoxaktive Metallkationen wie z.B. $\text{Fe}^{2+/3+}$ hochdispers in Form isolierter Kationen auf den Zeolithoberflächen im Porensystem zu binden. Eisenbeladene Zeolithe sind als heterogene Fenton-artige Katalysatoren für den Abbau von organischen Schadstoffen mit H_2O_2 bekannt. Die dabei gebildeten OH-Radikale können perfluorierte Verbindungen allerdings nicht angreifen. Die Transparenz der hochporösen Zeolithe ermöglicht allerdings einen anderen Weg des oxidativen Abbaus der PFAS, der lediglich O_2 als Oxidationsmittel benötigt. Fe^{3+} -Ionen bilden mit den PFAS-Anionen einen Komplex, der durch Bestrahlung mit UV-Licht einem Ligand-zu-Metall-Elektronentransfer unterliegt, so dass das PFAS-Anion zu einem Carboxylradikal oxidiert wird. Damit wird eine Kette von weiteren Reaktionen ausgelöst, die für alle oxidativen PFAS-Abbauprozesse ähnlich postuliert wird und zu einer schrittweisen Kettenverkürzung führt. Die um jeweils eine CF_2 -Einheit verkürzte Carbonsäure unterliegt dem gleichen Abbauschritt. Für die Rückoxidation des dabei gebildeten Fe^{2+} zu Fe^{3+} wird Luftsauerstoff benötigt. Dieser photokatalytische Abbau der adsorbierten PFAS-Anionen wird durch die Kombination von hydrophober Sorption der Perfluoralkylkette in den Zeolithporen und Komplexbildung mit den Fe-Zentren stark begünstigt. Einfache Eisenoxidoberflächen sind nicht aktiv, gelöste Eisenionen sind nur im sauren Bereich und mit geringer Aktivität wirksam.

Im Vergleich zu den sulfatradikalgetragenen Oxidationsprozessen bietet dieser photokatalytische Abbau den Vorteil, dass auch Perfluorsulfonsäuren abbaubar sind, wobei energieintensivere UV-B-Strahlung (254 nm) notwendig ist [11]. Perfluorcarbonsäuren werden sogar durch UV-A-Strahlung abgebaut, die zu einem größeren Anteil auch im Sonnenlicht enthalten ist

[12]. Im Vergleich zu den bekannten TiO_2 -Photokatalysatoren, die PFAS mit geringer Aktivität durch direkte Oxidation an den gebildeten Löchern (h^+) oxidieren können, bieten die Fe-Zeolith-Photokatalysatoren den Vorteil einer um Größenordnungen stärkeren adsorptiven Anreicherung. Damit ist es wiederum möglich, die Wasserreinigung in zwei Teilschritte, I) adsorptive Abtrennung aus dem großen Volumenstrom des zu behandelnden Wassers und II) Abbau in aufkonzentrierter Form unter Regenerierung des Adsorbers, zu bewerkstelligen. Zukünftige Forschungsarbeiten sind auf die Immobilisierung der Fe-Zeolith-Partikel auf geeignete Membranen gerichtet, um kontinuierliche Wasserbehandlungsverfahren ohne die für Suspensionsprozesse notwendige Partikelabtrennung zu entwickeln.

Kolloidales Eisensulfid als Katalysator für die PFAS-Oxidation mit Persulfat

Eisen in Form von kolloidalem kristallinem FeS stellt ein weiteres interessantes Katalysatormaterial dar, das in der Lage ist, Persulfat ohne zusätzliche Einwirkung von Wärme oder Licht zu Sulfatradikalen zu aktivieren. Umfangreiche Untersuchungen zum Mechanismus der Radikalbildung und zur Radikalselektivität deuten darauf hin, dass die Aktivierung von Persulfat an der FeS-Oberfläche katalytisch durch oberflächenunterstützte homolytische Bindungsspaltung erfolgt [13]. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass PFOA durch FeS-aktiviertes Persulfat selbst in komplexerer Wassermatrix abgebaut werden kann. Der eigentliche Reaktionsort an oder in der Nähe der Oberfläche ist somit von den Quenchreaktionen, die üblicherweise in Lösung stattfinden würden, entkoppelt [14], was in Abbildung 4 skizziert wird.

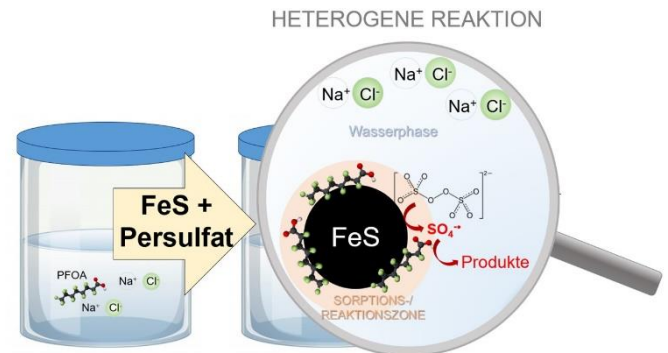


Abb. 4: Entzug des Schadstoffs aus dem Wasser (mit Radikalquenchern) durch Adsorption ermöglicht den ansonsten ‚unmöglichen‘ Abbau von PFOA am Ort der Radikal-erzeugung (Aktivierung von Persulfat an der FeS-Oberfläche)

Zusammenfassung und Ausblick

Effiziente Behandlungsverfahren für PFAS-kontaminiertes Wasser und Böden erfordern eine intelligente Kombination aus Abtrenn- und Abbauprozessen, um der hohen Persistenz der Stoffklasse gerecht zu werden. Für Trennverfahren auf Basis der Adsorption können Effizienzsteigerungen einerseits durch eine Verbesserung der Adsorptionsleistung und damit Standzeit der Adsorber erreicht werden. Speziell auf PFAS-Anionen zugeschnittene Adsorbentmaterialien, wie z.B. Aktivkohlen, müssen eine Kombination von hydrophoben Wechselwir-

kungen und elektrostatischer Anziehung gewährleisten. Andererseits besteht Potential in der Entwicklung von Vor-Ort-regenerierbaren Adsorbentien, um kurze Regenerierungsintervalle bei früh durchbrechenden Kontaminanten (z.B. kurzkettige PFAS) effizienter zu gestalten und großtonnagige Abfallströme sowie Transporte zu vermeiden. Hier kann die Elektrosorption als schaltbare Aktivkohleadsorption für die PFAS-Anionen z.B. in Kombination mit Elektrooxidationsverfahren neue Impulse setzen. Mineralische Adsorbentien, die gleichzeitig eine Katalysatorfunktion aufweisen, wie Zeolithpartikel und FeS, ermöglichen eine nasschemische Oxidation der PFAS direkt im adsorbierten Zustand und sind daher ebenso eine interessante Option für Vor-Ort-regenerierbare Adsorbentien. Erheblicher Forschungsbedarf besteht hinsichtlich geeigneter *In-situ*-Verfahren zur Boden und Grundwasserreinigung für PFAS. Die Kombination von Adsorption und Abbau ist hier ebenso ein bevorzugter Weg, um die Ausbreitung der mobilen PFAS (z.B. auch bei langanhaltender Nachlieferung von PFAS-Anionen aus Vorläuferverbindungen) über längere Zeiträume zu stoppen und durch selektive Anreicherung der PFAS günstige Bedingungen für den Abbau zu schaffen.

Referenzen

- [1] Richtlinie, E. U. "98/83/EG des Rates über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch." Amtsblatt der EG L 330 (1998).
- [2] N. Saeidi, F.D. Kopinke, A. Georgi, Understanding the effect of carbon surface chemistry on adsorption of perfluorinated alkyl substances. *Chem. Eng. J.* 381 (2020) 122689.
- [3] N. Saeidi, F.D. Kopinke, A. Georgi, What is specific in adsorption of perfluoroalkyl acids on carbon materials? *Chemosphere* 273 (2021) 128520.
- [4] A. Georgi, A. Schierz, K. Mackenzie, F.-D. Kopinke, Colloidal activated carbon for *in-situ* groundwater remediation - Transport characteristics and adsorption of organic compounds in water-saturated sediment columns. *J. Cont. Hydrol.* 179 (2015) 76-88.
- [5] G. R. Carey, R. McGregor, A. L.-T. Pham, B. Sleep, S. G. Hakimabadi, S. Gilak, Evaluating the longevity of a PFAS in situ colloidal activated carbon remedy. *Remediation* 2 (2019) 17-31.
- [6] A. Georgi, J. Bosch, J. Bruns, K. Mackenzie, N. Saeidi, F.-D. Kopinke, Kolloidale Aktivkohle für die *In-situ*-Sanierung von PFAS-kontaminierten Grundwasserleitern. *Altlasten Spektrum* 29 (2020) 232 – 237
- [7] N. Saeidi, F.-D. Kopinke, A. Georgi, Controlling adsorption of perfluoroalkyl acids on activated carbon felt by means of electrical potentials. *Chem. Eng. J.* 416 (2021) 129070.
- [8] J. Zhou, N. Saeidi, L. Y. Wick, Y. Xie, F.-D. Kopinke, A. Georgi, Efficient removal of trifluoroacetic acid from water using surface-modified activated carbon and electro-assisted desorption. *J. Hazard. Mater.* 436 (2022) 129051.
- [9] C. E. Schaefer, C. Andaya, A. Burant, C. W. Condee, A. Urriaga, T. J. Strathmann, C. P. Higgins, Electrochemical treatment of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate: Insights into mechanisms and application to groundwater treatment. *Chem. Eng. J.* 317 (2017) 424-432.
- [10] L. Qian, F.-D. Kopinke, T. Scherzer, J. Griebel, A. Georgi, Enhanced degradation of perfluorooctanoic acid by heat-activated persulfate in the presence of zeolites. *Chem. Eng. J.* 429 (2021) 132500.
- [11] L. Qian, A. Georgi, R. Gonzalez-Olmos, F.D. Kopinke, Degradation of perfluorooctanoic acid adsorbed on Fe-zeolites with molecular oxygen as oxidant under UV-A irradiation. *Appl. Catal B: Environ.* 278 (2020) 119283.
- [12] L. Qian, F.D. Kopinke, A. Georgi, Photodegradation of perfluorooctanesulfonic acid on Fe-zeolites in water. *Environ. Sci. Technol.* 55 (2021) 614-622.
- [13] S. Sühholz, F. D. Kopinke, K. Mackenzie, Reagent or catalyst?—FeS as activator for persulfate in water. *Chem. Eng. J.* 387 (2020) 123804.
- [14] S. Sühholz, A. Gawel, F. D. Kopinke, K. Mackenzie, Evidence of heterogeneous degradation of PFOA by activated persulfate—FeS as adsorber and activator. *Chem. Eng. J.* 423 (2021) 130102.

Korrespondenzadresse

Dr. Katrin Mackenzie
 Department Technische Umweltchemie
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig – UFZ
 Permoserstrasse 15
 04318 Leipzig
 Tel. 0341 235 1760
 E-Mail: katrin.mackenzie@ufz.de