

# MachWas

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## Innovative Materialien – Grundlage nachhaltiger Wasserwirtschaft

[www.machwas-material.de](http://www.machwas-material.de)

## IMPRESSUM

### Herausgeber:



DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Ansprechpartner für die BMBF-Fördermaßnahme „Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“ (MachWas):

### Beim BMBF:

Dr. Peter Zimmer  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Referat 523 – Werkstoffinnovationen, Batterie; Hereon, KIT  
53175 Bonn  
Tel.: +49 (0)228 9957-3390  
E-Mail: peter.zimmer@bmbf.bund.de

### Beim Projektträger:

Dr. Katja Stephan  
Projektträger Jülich  
Geschäftsbereich Neue Materialien und Chemie  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich  
Tel.: +49 (0)2461 61-2264  
E-Mail: k.stephan@fz-juelich.de

### Editor:

Wissenschaftliches Begleitvorhaben der BMBF-Fördermaßnahme  
„Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“ (MachWas)

### Verantwortlich im Sinne des Presserechts:

Dr. Thomas Track  
DECHEMA e.V.  
Tel.: +49 (0)69 7564-427  
E-Mail: thomas.track@dechema.de

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03XP0087 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren der einzelnen Beiträge.

Die Broschüre ist nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.

Erschienen im September 2021

### Bildnachweise:

Titel: © Matthias Buehner - stock.adobe.com; S. 4 © lovelyday12 - stock.adobe.com; S. 6 © markus thoenen - stock.adobe.com;  
S. 9 © Alex Stemmer - stock.adobe.com; S. 24 © everythingpossible - stock.adobe.com

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1: Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft – Hintergrund und Ziele</b>	<b>4</b>
<b>Kapitel 2: Innovative Materialien im Wassernutzungskreislauf</b>	<b>6</b>
2.1 Wassersituation in Deutschland	6
2.2 Wasserkonsum in Deutschland	6
<b>Kapitel 3: Anwendungsfelder für MachWas-Materialien</b>	<b>9</b>
3.1 Allgemeine Einordnung in die Anwendungsfelder in der Wasserwirtschaft	9
3.1.1 Frischwasserbehandlung	9
3.1.2 Abwasserbehandlung	10
3.2 Spezielle Anwendungsfelder in der Wasserwirtschaft	10
3.2.1 Oberflächenwasser	10
3.2.2 Grundwasser	13
3.2.3 Kommunale Abwasserbehandlung	13
3.2.4 Industrieabwasserbehandlung	15
3.2.5 Anwendungsfeldübergreifende Lösungen	18
<b>Kapitel 4: Beitrag zur Nachhaltigkeit – Materialien helfen</b>	<b>20</b>
4.1 Beitrag zu den Sustainable Development Goals (SDGS)	20
4.2 Potentielle Nachhaltigkeitseffekte	22
4.3 Inkrementelle und disruptive Innovationen	22
<b>Kapitel 5: Ausblick</b>	<b>24</b>
5.1 Materialien für Membranverfahren	25
5.2 Adsorptionsmaterialien	26
5.3 Materialien für oxidative und reduktive Verfahren	27
5.4 Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik	27
<b>Kapitel 6: Ihr Kontakt zu den Forschungsprojekten</b>	<b>28</b>
<b>Anhang</b>	<b>30</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>31</b>

# 1 Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft – Hintergrund und Ziele



## WASSER ALS LEBENSNOTWENDIGE RESSOURCE

Wasser ist eine existentielle Ressource für Mensch und Natur. Durch den Wasserkreislauf erneuern sich zwar die Wasservorräte ständig, jedoch kann Wasser weder mithilfe anderer Ressourcen hergestellt noch durch solche ersetzt werden. Durch die ungleiche Verteilung und Verfügbarkeit ist Wasser auch ein ausschlaggebender Faktor für wirtschaftliche Entwicklungen. In vielerlei Hinsicht steht die Wasserwirtschaft vor zunehmend großen Herausforderungen. Aufgrund des Klimawandels und steigender Bevölkerungszahlen, damit einhergehender Wetterextremereignisse und gesteigerter Wirtschaftstätigkeit sowie Nahrungsmittelproduktion gewinnt ein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Wasser zunehmend an Bedeutung. Daraus resultieren zum Beispiel steigende Schadstoffbelastungen von Frischwasser, aber auch Hochwasser- und Trockenperioden. Wasservorkommen werden zukünftig noch stärker beansprucht und im Ergebnis ist das ökologische Gleichgewicht der Gewässer gefährdet. Diese Probleme müssen gelöst werden, um die lebenswichtige Ressource Wasser für Mensch, Natur und Wirtschaft zu erhalten und einen vorsorgenden Gesundheitsschutz zu gewährleisten. Durch die Entwicklung innovativer Technologien und Materialien kann ein wertvoller Beitrag geleistet werden, vorhandene Wasserressourcen ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll und nachhaltig zu nutzen.

## NACHHALTIGE WASSERWIRTSCHAFT

Die integrierte Bewirtschaftung aller künstlichen und natürlichen Wasserkreisläufe unter Beachtung des langfristigen Schutzes von Wasser als Lebensraum bzw. zentrales Element von Lebensräumen sowie als Lebensgrundlage wird als nachhaltige Wasserwirtschaft bezeichnet.

Bestimmt wird ein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Wasser durch definierte Grundprinzipien. Demnach müssen ökologische, ökonomische und soziale Belange bei der wasserwirtschaftlichen Planung und Bewirtschaftung gleichwertig berücksichtigt werden. Weitergehend ist bei entsprechenden Planungen und Entscheidungen grundsätzlich der (zeitliche) Wirkungshorizont zu berücksichtigen. Zwar sind die Kosten für die Nutzung der Ressource Wasser sowie deren Verschmutzung grundsätzlich vom Verbraucher bzw. Verursacher zu tragen, jedoch ist eine mögliche Schadstoffemission bereits am Entstehungsort zu unterbinden. Darüber hinaus ist der direkte und indirekte Ressourcen- und Energieverbrauch (bspw. zur Wasseraufbereitung) zu mindern und Vorsorge zu betreiben hinsichtlich zu erwartender Extremereignisse sowie unbekannter Risiken. Für wasserwirtschaftliche Anlagen sind irreversible Folgen und Schäden zu vermeiden. Konkrete Maßnahmen zur Umsetzung genannter Prinzipien können beispielsweise die Reduzierung des Wasserverbrauchs und die Mehrfachnutzung von Wasser sein. Auch die Entwicklung und Verwendung ad-

aptierter Abwassertechnologien, das Schließen von Stoff- und Wasserkreisläufen sowie die Elimination anthropogen eingebrachter Schadstoffe sind wichtige Aspekte (Lexikon der Geowissenschaften).

Materialspezifische Ansätze für technologische Lösungen bieten ein hohes Innovationspotential, um wirkungsvolle Impulse für eine nachhaltige Wasserwirtschaft zu generieren.

Vor diesem Hintergrund brachte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2016 die Fördermaßnahme „Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“ (MachWas) im Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ auf den Weg. Insgesamt förderte das BMBF 13 Verbundprojekte und ein begleitendes Vernetzungs- und Transfervorhaben mit 75 Projektpartnern. Der Förderzeitraum der Projekte endete dabei in 2020.

Ziel von MachWas war es, durch materialspezifische Innovationen zur Minimierung des Wasserverbrauchs und zur Maximierung der Wasserverfügbarkeit beizutragen. Ebenso sollten durch Technologien zur Wasseraufbereitung und -gewinnung wirkungsvolle Impulse zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Wasser geliefert werden. Im Folgenden werden die Technologien zur Wasseraufbereitung und -gewinnung vorgestellt, die auf der Entwicklung neuer Materialkonzepte und Technikansätze basieren und in MachWas adressiert wurden:

**Materialien für Membranverfahren**

In der Wasserreinigung und -aufbereitung sind Membranverfahren wichtig. Mikro-, Ultra- und Nanofiltration sowie Umkehrosmose haben sich als Alternativen zu konventionellen Trennverfahren in der Wasserreinigung etabliert und gelten mittlerweile als Schlüsseltechnologien, auch für die betriebliche Wasserkreislaufschließung und Wertstoffrückgewinnung.

**Adsorptionsmaterialien**

Neben der Filtration spielt die Adsorption eine bedeutende Rolle in der Wasserreinigung und -aufbereitung. Besonders die Gewässerbelastung mit organischen, endokrinen und persistenten Stoffen (z. B. Medikamente und deren Metabolite) nimmt kontinuierlich zu und bedarf besonderer Behandlungsschritte. Adsorptionsmaterialien können dabei helfen, diese Stoffe zu binden und auf diesem Wege aus dem Wasserkreislauf zu entfernen.

**Materialien für oxidative und reduktive Verfahren**

Innovative Technologien, wie oxidative und reduktive Verfahren zielen auf eine Umwandlung von kritischen Substanzen ab. Mittels chemischer Reaktionen sollen diese Substanzen in weniger kritische überführt und zum Teil vollständig zerstört oder dauerhaft immobilisiert werden. Aufgrund der in Prozess-, Ab- und Grundwasser in der Regel vorhandenen großen Anzahl verschiedener Substanzen ist die Selektivität der oxidativen und reduktiven Verfahren von hoher Bedeutung, um einen gezielten Abbau im Wasser zu ermöglichen.

**Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik**

Für das Ziel einer nachhaltigen Wasserwirtschaft werden Materialentwicklungen und Verfahren auch über die Schwerpunktthemen hinaus vorangetrieben. Daher werden auch Themen zu Einsparpotentialen in der Wasserwirtschaft, zur verbesserten Umweltverträglichkeit von Materialien, zur Entfernung von Schadstoffen sowie Optimierung von bereits in der Wasserwirtschaft eingesetzten Verfahren und Technologien betrachtet.

Als Ergebnis liefert die Fördermaßnahme neue technologische Strategien, die zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Wasser führen. Die vorliegende Broschüre gibt einen Überblick über die wesentlichen Erkenntnisse und Fortschritte im Bereich der Materialentwicklung für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Die Ergebnisse aus der Fördermaßnahme erlauben es, gezielt die Wechselwirkung „Materialschwerpunkte – Wassertechnologien“ und die Synergiepotentiale der Verknüpfung verschiedener Materialentwicklungen für Technologiekombinationen mit Blick auf Anwendungsfelder darzustellen. Diese Broschüre richtet sich daher vor allem an Materialentwickler und -anbieter, Wassertechnologieentwickler und interessierte Fachleute bzw. Nutzer. Weitere Informationen zur Fördermaßnahme MachWas erhalten Sie unter <https://machwas-material.de>.

**Tab. 1.1: Zuordnung der MachWas-Projekte zu den vier Themenfeldern**

Themenfelder	beteiligte Verbundprojekte
Materialien für Membranverfahren	CNT-Membran
	KerWas
	MABMEM
	POLINOM
	Rohrmembran
Materialien für oxidative und reduktive Verfahren	ElektroPapier
	RADAR
Adsorptionsmaterialien	ContaSorb
	Ferrosan
	ZeroTrace
Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik	AntiPARAM
	KERAMESCH
	OEMP

## 2 Innovative Materialien im Wassernutzungskreislauf



### 2.1 WASSERSITUATION IN DEUTSCHLAND

Die Bundesrepublik Deutschland ist im Grundsatz ein wasserreiches Land mit einem potentiellen Wasserdargebot von 188 Mrd. m<sup>3</sup>. Das Wasserdargebot ist eine Größe des regionalen Wasserkreislaufes und umfasst die Menge an Grund- und Oberflächenwasser, die wir theoretisch nutzen können. Die jährlich ermittelten erneuerbaren Wasserressourcen, also der Niederschlag, die Verdunstung sowie die Zuflüsse und die Abflüsse nach bzw. aus Deutschland bilden die Grundlage, um im langjährigen Mittel das potentielle Wasserdargebot zu bestimmen und so eine Aussage zu den Wasservorräten in Deutschlands treffen zu können. Trotz des insgesamt ausreichenden potentiellen Wasserdargebots gibt es auch in Deutschland regionale Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit. Diese Unterschiede basieren auf unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen.

Die Neubildung von Grundwasserreserven erfolgt durch die Versickerung von Niederschlägen oder Oberflächengewässern. Aufgrund einer Filterung des Abstroms durch unterschiedliche Bodenschichten erfolgt hier eine natürliche Reinigung des Wassers; gleichzeitig wird das Wasser mit wertvollen Mineralien angereichert. Die Gewinnung des Wassers erfolgt über Förderbrunnen, die in der Regel durch Wasserwerke betrieben werden. Für die Nutzung von Oberflächenwasser als Trinkwasser gilt genauso wie für gefördertes Grundwasser, dass eine Aufbereitung dann nötig ist, wenn Schad- bzw. Störstoffe vorhanden

sind, die eine Nutzung einschränken. Das so gewonnene Wasser wird einerseits von privaten Haushalten genutzt, als auch für industrielle Produktionsprozesse. Das genutzte und verschmutzte Wasser wird über Ableitungen zunächst der Abwasserreinigung in Kläranlagen und nach Aufreinigung dem Wasserkreislauf wieder zugeführt.

### 2.2 WASSERKONSUM IN DEUTSCHLAND

Deutschland ist ein bevölkerungsreiches, dicht besiedeltes Land, das zusätzlich stark industrialisiert ist und dementsprechend einen hohen Wasserverbrauch aufweist. Ohne das erwähnte hohe Wasserdargebot hätte sich der Wirtschafts- aber auch der Energiesektor nicht so entwickeln können, wie wir heute davon noch profitieren. Bei der Entnahme von Wasser aus der Natur handelt es sich um die direkte Entnahme von Grund-, Quell- oder Oberflächenwasser sowie Uferfiltrat, das von den Produktionsbereichen und privaten Haushalten gefördert wird. Zu dem aus der Natur entnommenen Wasser gehört auch das im Kanalsystem gesammelte Fremd- und Regenwasser.

Von den gesamten 28,615 Mrd. m<sup>3</sup>, die die Produktion und die privaten Haushalte im Jahr verbrauchen, stammen etwa 24 Mrd. m<sup>3</sup> aus Grund-, Oberflächen- und Quellwasser, während die fehlenden 4,6 Mrd. m<sup>3</sup> über Regenwasser gewonnen werden konnten. Dabei wird knapp die Hälfte des gesamten Wassereinsatzes vom Energiesektor verwendet, überwiegend

als Kühlwasser, was dann über Verdunstung oder Wiedereinleitung dem Wasserkreislauf erneut zur Verfügung gestellt wird. Die Sektoren Bergbau und verarbeitendes Gewerbe setzen etwa 6,01 Mrd. m<sup>3</sup> Wasser ein, während die privaten Haushalte 3,15 Mrd. m<sup>3</sup> verwenden.

Über den zeitlichen Verlauf betrachtet sinkt die Wasserentnahme in Deutschland aber kontinuierlich. Dazu haben insbesondere Einsparungen im Energiesektor – auch durch Stilllegung alter Kraftwerke – und im produzierenden Gewerbe beigetragen. Hier haben vor allem neue Behandlungsmethoden und die zunehmende Kreislaufführung von Prozess- und Kühlwasser dazu beigetragen, den Wassereinsatz fast zu halbieren. Fast unverändert sind die Zahlen für die öffentliche Wasserversorgung.

Das eingesetzte Wasser, was nicht durch Verdunstung oder direkte Wiedereinleitung von Kühlwasser in Gewässer überführt wird, wird in Deutschland behandelt. In öffentlichen Kläranlagen werden jährlich insgesamt etwa 10,07 Mrd. m<sup>3</sup> Abwasser behandelt – davon circa 0,1 Prozent nur mechanisch, 1,9 Prozent biologisch ohne gezielte Entfernung von Nährstoffen, und circa 98 Prozent biologisch mit gezielter Nährstoffentfernung (BMU, Abruf 03.07.2020, [www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/abwasser](http://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/abwasser)).

Auch wenn der Wassereinsatz im produzierenden Gewerbe sinkt, so sind dennoch weitere Anstrengungen nötig, um das vorhandene Wasser – sei es Grund- oder Oberflächenwasser – zu schützen und dahingehend aufzubereiten oder wiederzuverwenden, dass a) keine Kontaminanten in Gewässerkörper eingetragen werden, und b) auch das Frischwasser immer weniger für industrielle Prozesse eingesetzt wird und stattdessen eine möglichst hohe Kreislaufführung angestrebt wird.

Vor dem Hintergrund zunehmender Trockenheit, insbesondere im Frühjahr und Sommer, verbunden mit sinkenden Pegelständen in Flüssen und Seen, muss verstärkt darüber nachgedacht werden, wie die Ressource Wasser ganzheitlich und nachhaltig aufbereitet werden kann.

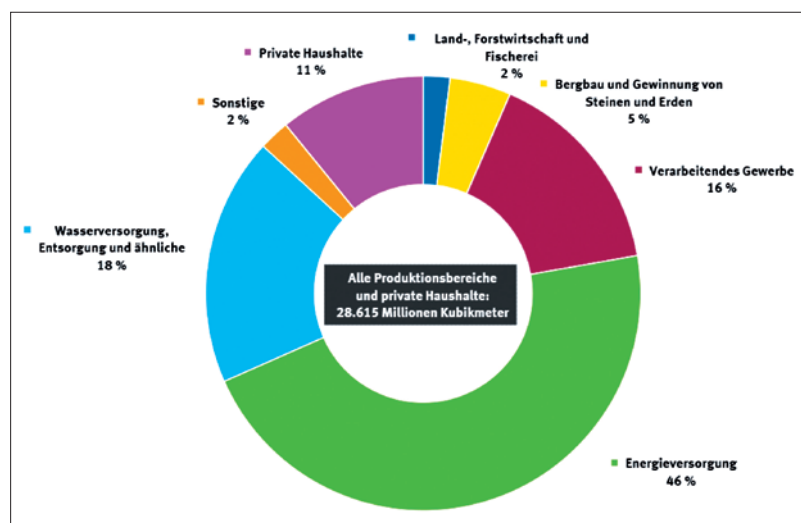


Abb. 2.1: Wassereinsatz der Produktionsbereiche und der privaten Haushalte 2016 (stat. Bundesamt 2018, veröffentlicht durch die DBU, [www.umweltbundesamt.de/bild/wassereinsatz-der-produktionsbereiche-der-privaten](http://www.umweltbundesamt.de/bild/wassereinsatz-der-produktionsbereiche-der-privaten))

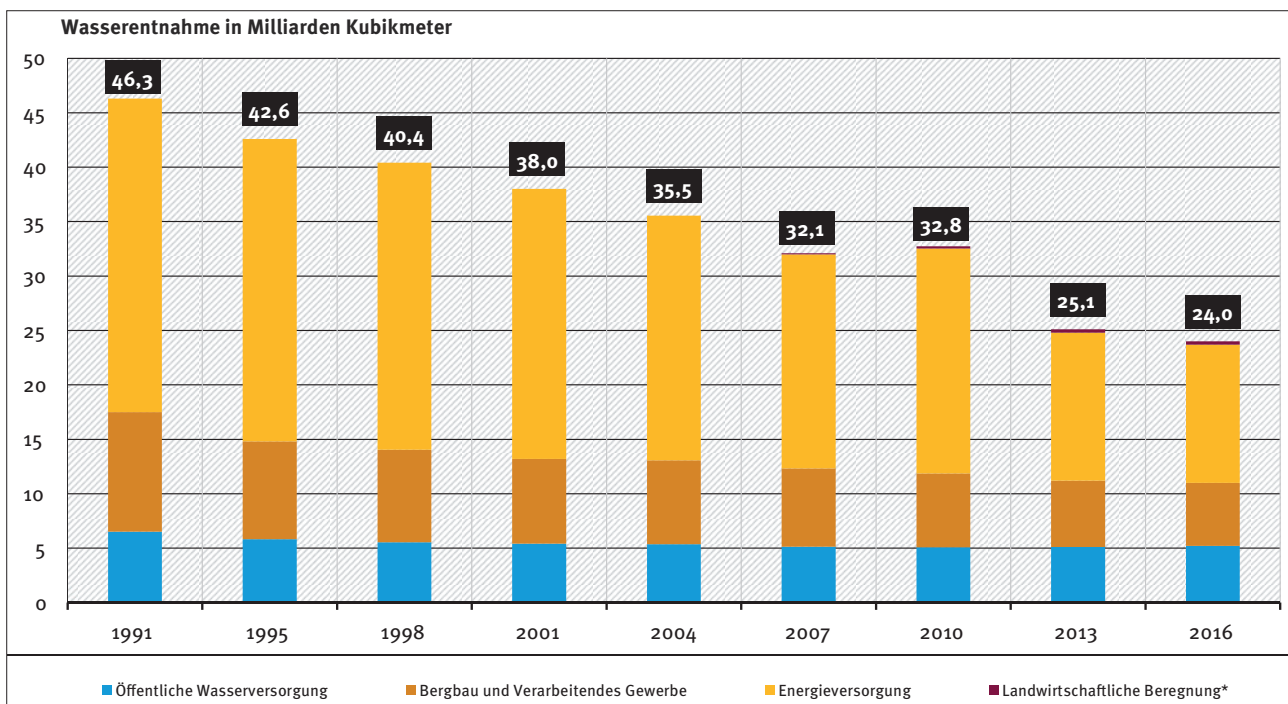
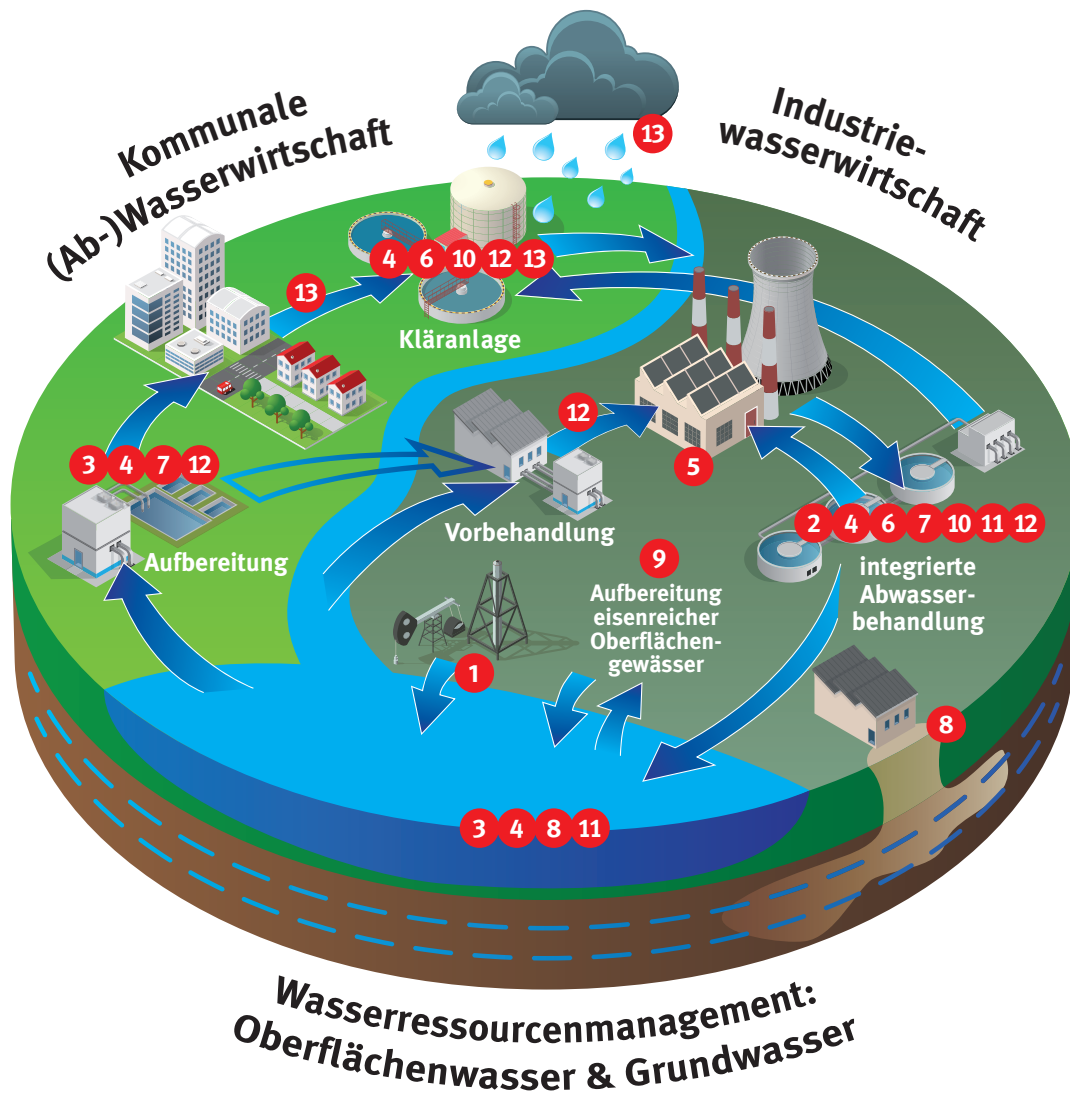


Abb. 2.2: Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, Bergbau und verarbeitendes Gewerbe der Energieversorgung und der Landwirtschaft (Quelle: UBA: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#die-wassernutzer>)

Einen wichtigen Beitrag hierzu leisten auch neue Materialien, die im Zusammenspiel mit bekannten Verfahren der Wasseraufbereitung neue Möglichkeiten in der Behandlung der eingesetzten Wasserströme ermöglichen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch, an welcher Stelle im Wassernutzungskreislauf die MachWas Projekte bzw. die von ihnen entwickelten Materialien ansetzen:



**Materialien für Membranverfahren**

- 1 CNT-Membran
- 2 KerWas
- 3 MABMEM
- 4 POLINOM
- 5 Rohrmembran

**Materialien für oxidative und reduktive Verfahren**

- 6 ElektroPapier
- 7 RADAR

**Adsorptionsmaterialien**

- 8 ContaSorb
- 9 Ferrosan
- 10 ZeroTrace

**Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik**

- 11 AntiPARAM
- 12 KERAMESCH
- 13 OEMP

Abb. 2.3: Innovative Materialien im Wassernutzungskreislauf mit Zuordnung der MachWas Projekte



## 3 Anwendungsfelder für MachWas-Materialien



Die Projekte der Fördermaßnahme „Materialien für eine nachhaltige Wasserwirtschaft – MachWas“ sollten durch Innovationen zur Minimierung des Wasserverbrauchs und zur Maximierung der Wasserverfügbarkeit beitragen. Ebenso sollten durch Technologien zur Wasseraufbereitung und -gewinnung wirkungsvolle Impulse zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Ressource Wasser geliefert werden. Die entwickelten Maßnahmen waren in den folgenden vier Themenschwerpunkten tätig:

- Materialien für Membranverfahren
- Adsorptionsmaterialien
- Materialien für oxidative und reduktive Verfahren
- Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik

Die entwickelten Materialien und Maßnahmen bieten vielfältige Einsatzmöglichkeiten über verschiedene Anwendungsfelder im anthropogenen Wasserkreislauf hinweg (s. Abb. 2.3). Dies ist vor dem Hintergrund globaler Problemstellungen wie:

- Verunreinigte Frischwasserressourcen und Meere
- Spurenstoffbelastungen
- Multiresistente Keime und Mikroorganismen
- Mikroplastik

von besonderer Bedeutung. Lösungsansätze hierfür sind Teil von Entwicklungen in der anwendungsorientierten Forschung

und werden zum Teil in der Praxis bereits aufgegriffen, z.B. vierte Reinigungsstufe in der kommunalen Abwasserbehandlung. Materialien für die Realisierung der verschiedensten Ansätze bereitzustellen ist eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft. Die MachWas-Materialien leisten mit ihren vielfältigen potentiellen Anwendungsfeldern hierfür einen wichtigen Beitrag.

### 3.1 ALLGEMEINE EINORDNUNG IN DIE ANWENDUNGSFELDER IN DER WASSERWIRTSCHAFT

Wasseraufbereitungsanlagen werden sowohl für Frischwasser als auch für Abwasser eingesetzt. Dabei werden dem aufzubereitenden Wasser, je nach Anforderung, Inhaltsstoffe entnommen und/oder zugesetzt. Zur Aufbereitung können chemische, physikalische und mechanische Verfahren eingesetzt werden. Die Anlagen bestehen meist aus mehreren Verfahrensschritten, wie mechanischer Vorreinigung, gefolgt von Schritten wie Belüftung, Entsäuerung, Entcarbonisierung, Fällung, Flockung und Filteranlagen.

#### 3.1.1 Frischwasserbehandlung

Oberflächen- und Grundwasser als wichtigste Frischwasserressourcen sind vielfältigen Schadstoffbelastungen ausgesetzt. Trotz der in Deutschland hohen Anschlussrate an Kläranlagen

werden Schadstoffe eingetragen, beispielsweise über die Landwirtschaft, (urbane) Oberflächenabflüsse oder aus der kommunalen und industriellen Abwasserbehandlung selbst.

Diese Stoffe können sich in Grund- und Oberflächenwasser anreichern und müssen vor einer erneuten Nutzung als Brauch- oder Trinkwasser entfernt werden. Neben herkömmlichen anorganischen und organischen Stoffen, kommen verstärkt spezielle organische Schadstoffe hinzu wie Medikamentenrückstände und Mikroplastik, die in Kläranlagen bislang nicht zufriedenstellend entfernt werden und für deren gezielte Entfernung es neuer Ansätze und Technologien bedarf. Eine Übersicht über die im Rahmen der Fördermaßnahme MachWas entwickelten Ansätze für das Anwendungsfeld Frischwasserbehandlung ist nachfolgend dargestellt:

### 3.1.2 Abwasserbehandlung

In Deutschland gibt es insgesamt 9.105 kommunale Kläranlagen, die im Jahr 2016 nach Erhebungen des Statistischen Bundesamtes rund 9,6 Mrd. m<sup>3</sup> Abwasser behandelt und an-

schließend in Oberflächengewässer eingeleitet haben. Diese Abwassermenge setzte sich aus rund 5 Mrd. m<sup>3</sup> Schmutzwasser und rund 5 Mrd. m<sup>3</sup> Fremd- und Niederschlagswasser zusammen. Auf industrieller Ebene verfügen in Deutschland etwa 3.000 Unternehmen des produzierenden Gewerbes über eine eigene Abwasserreinigung und leiten das behandelte Abwasser im Anschluss direkt in ein Gewässer ein (Direkteinleiter). Ungefähr dreimal so viele Betriebe leiten ihr Abwasser, teils mit Vorbehandlung, in das öffentliche Kanalnetz ein (Indirekteinleiter). (UBA, 03.07.2020).

Die Einleitung von industriellem Abwasser in kommunale Kläranlagen ist mit Kosten verbunden, die sich in Höhe der Schmutzfracht zusammensetzt. Weiterhin reinigen Industriebetriebe ihr Abwasser auf, um Wertstoffe wieder in den Produktionsprozess einbringen zu können, oder aber auch um das Wasser selbst wieder zurück in den Nutzungszyklus zu führen. Je nach Art des Abwassers ergeben sich also gänzlich andere Herangehensweisen, auch vor allem mit Blick darauf, ob organische oder anorganische Inhaltsstoffe entfernt werden sollen (s. Tab. 3.2).

Tab. 3.1: Übersicht der MachWas Projekte, die einen Beitrag zur Behandlung von Frischwasser leisten

Frischwasser	
Oberflächenwasser	Grundwasser
MABMEM	ContaSorb
Ferrosan	
AntiPARAM	
KERAMESCH	
POLINOM	

Tab. 3.2: Übersicht der Projekte, die einen Beitrag zur Behandlung von kommunalem, bzw. industriellem Abwasser leisten

	Kommunales Abwasser	Industrielles Abwasser
<b>Anorganische (Schad-)Stoffe</b>	MABMEM POLINOM ElektroPapier ZeroTrace AntiPARAM KERAMESCH	CNT-Membran KerWas Rohrmembran ElektroPapier ContaSorb Ferrosan ZeroTrace
<b>Organische (Schad-)Stoffe</b>	POLINOM ElektroPapier RADAR ZeroTrace KERAMESCH OEMP	ElektroPapier RADAR ZeroTrace

## 3.2 SPEZIELLE ANWENDUNGSFELDER IN DER WASSERWIRTSCHAFT

### 3.2.1 Oberflächenwasser

Regenabflüsse aus Siedlungsgebieten stellen eine wesentliche Ursache für Gewässerbelastungen dar. Bei Regen wird eine Vielzahl von Schadstoffen von befestigten Flächen abgespült. Bei getrennter Ableitung des Regenwassers werden diese direkt in die Gewässer eingeleitet. In Mischwassersystemen wird das Regenwasser zusammen mit dem Schmutzwasser in einem Kanal abgeleitet. Dabei werden die Abflüsse weniger ergiebiger Regenfälle in Regenüberlaufbecken zurückgehalten und anschließend zur Kläranlage abgeleitet. Die Kapazität der Kläranlage und das Speichervermögen der Kanalnetze sind allerdings begrenzt, so dass Überläufe bei stärkeren Regenfällen unvermeidbar sind. Zusätzlich zum verschmutzten Regenwasser kann dabei auch Schmutzwasser weitgehend unbehandelt in die betroffenen Gewässer gelangen. Vor allem bei kleineren Gewässern mit empfindlichen Ökosystemen und bei Gewässern mit besonderer Nutzung (z. B. Badegewässern) ist die stoßartige Belastung durch Regen- und Mischwassereinleitungen problematisch. So können nach Niederschlägen Oberflächengewässer so hoch mikrobiologisch belastet sein, dass für einen Badebetrieb im Gewässer die hygienisch unbedenkliche Badegewässerqualität nicht eingehalten werden kann. Hinzu kommt Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich genutzten Flächen, z.B. außerhalb der Vegetationsperiode oder bei bestimmten Kulturen wie Mais. Weitere Einträge in Oberflächengewässer resultieren aus dem Bergbau und Bergbaufolgelandschaften ebenfalls über Oberflächenabfluss oder hydraulische Anbindung zum Grundwasser.

Durch den vermehrten Eintrag von anthropogenen Spurenstoffen, sowie in der Vergangenheit verstärkt von Schwermetallen und weiteren Schadstoffen ist eine Aufbereitung dann nötig, wenn Flusswasser direkt genutzt wird. Der Verfahrensweg sieht dabei eine Feststoffabtrennung mit Flockung und Sedimentation, eine Schnellfiltration, eine Ozonung vor oder

nach dem Schnellfilter, eine AK-Filtration (adsorptiv und/oder biologisch als BAK) und eine chemische Desinfektion mit Chlor oder Chlordioxid vor. Die Spurenstoffelimination findet dabei vor allem über die Transformationsreaktionen in der Ozonung und die Adsorption (auch biologischen Abbau) in den Aktivkohlefiltern statt. Für die Abtrennung bzw. Inaktivierung der Pathogene sind die Feststofftrennverfahren und die Desinfektion vorhanden.

Sehr viel häufiger ist hingegen die indirekte Fließgewässernutzung über die Uferfiltration oder die künstliche Grundwasser-

anreicherung mit und ohne Vorreinigungs- oder Nachreinigungsverfahren. Die Filtration entfernt zuverlässig Bakterien und Viren, aber auch Biopolymere und Partikel bei moderaten Drücken während des Prozesses. Häufig eingesetzt werden dabei u.a. Ultrafiltrationsmembranen, die allerdings im Laufe ihrer Lebenszeit mit Fouling und geringer Produktivität konfrontiert werden. Das Projekt **MABMEM** hat sich damit auseinandergesetzt und neue Materialien für Ultrafiltrationsmodule entwickelt, die auch grundsätzlich in der Abwasseraufbereitung eingesetzt werden können.

MABMEM	
Entwicklung neuer Materialien und Materialkombinationen für Mulitbore®-Ultrafiltrationskapillarmembranen (Hochleistungsmembranen) zur Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung. Durch Integration von oberflächenaktiven Additiven in die Trennschicht sollen Membraneigenschaften wie Permeabilität, Trenngrenze und das Foulingverhalten verbessert werden.	
Mögliche Anwendungsfelder	Aufreinigung von Oberflächenwasser und Kläranlagenabwasser
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Pilze, Pollen, Bakterien, Viren, Huminstoffe, gelöste Makromoleküle
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Der Betrieb von Membranen erfordert regelmäßige Reinigungszyklen, um einen Leistungsabfall zu verhindern. Reinigungszyklen aber mindern die Produktivität.
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Neue Membranmaterialien aus neuen Kunststoffen bzw. mit optimierten Filtrationsoberflächen müssen weniger oft gereinigt werden, ohne dass ihre Produktivität Einbußen erleidet.

POLINOM	
Entwicklung poröser Mixed-Matrix-Membranadsorber für die Abtrennung von Mikroschadstoffen und Schwermetallen aus Wasser: Herstellung polymerer Hohlfasermembranen mittels Phaseninversionsprozess (NIPS) und vollständige Nutzung Ihrer räumlichen Struktur durch Integration funktioneller Adsorberpartikel bereits im Herstellungsprozess.	
Mögliche Anwendungsfelder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trinkwasseraufbereitung „point of use“</li> <li>• Abwasserreinigung (Wasserwirtschaft)</li> </ul>
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Verschiedene Mikroschadstoffe (z. B. von Antibiotika, Schmerzmittel, Kontrastmittel, Beta-Blocker) und Schwermetalle (z. B. Pb, Cu, Ni) hauptsächlich aus Medizin, Landwirtschaft sowie Industrie und Haushalt.
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Mikroschadstoffe liegen häufig in sehr geringen Konzentrationen (ng/L bis µg/L) vor und werden in Kläranlagen mit herkömmlichen Methoden nicht vollständig entfernt (dadurch weitere Zunahme im Grundwasser und Eintrag in die Umwelt).
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	<p>Einfache Integration in bestehende Prozesse, aufgrund des kompakten Aufbaus/der großen Trennfläche in einem Modul/ der hohen Packungsdichte. Für den Trennvorgang ist nur ein geringer Energieinput notwendig.</p> <p>Zudem werden mit den Mixed-Matrix-Membranadsorbern verschiedene Prozessschritte miteinander verknüpft (Filtration und Adsorption), wodurch neben der adsorptiven Abtrennung von Schadstoffen auch weitere Verunreinigungen über den Filtrationsschritt entfernt werden können.</p> <p>Je nach Einsatzgebiet gibt es verschiedene Schwerpunkte/Fragestellungen, auf welche durch die Verwendung verschiedener funktioneller Gruppen auf den Partikelneingegangen werden kann.</p> <p>Die Mixed-Matrix-Membranadsorber sind nachhaltig, da sie (teilweise) regeneriert und somit mehrfach verwendet werden können.</p>

Durch die in den letzten Jahren verstärkt vorkommende Präsenz von Mikroschadstoffen in Fließgewässern ist es sinnvoll, auch hierfür Aufbereitungsmethoden zu etablieren. Das Vorhaben **POLINOM** hat sich mit dieser Fragestellung beschäftigt und einen Lösungsansatz entwickelt, wobei die Erkenntnisse nicht ausschließlich auf die Frischwasserbehandlung abzielen, sondern auch in der Abwasserbehandlung ihren Einsatz finden können, sei es industriell oder kommunal.

Wird Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung verwendet, so stellen Einträge aus dem Bergbau eine weitere Herausforderung dar. Im Tagebau löst aufsteigendes Grundwasser aus Umlagerungsbereichen und natürlichen Bodenschichten metallische Bestandteile aus, im Braunkohletagebau beispiels-

weise Eisensalze und -hydroxide, die dann in Oberflächenwasser gelangen. Für eine Trinkwassergewinnung, aber auch aus gewässerökologischer Sicht ist dann eine Aufbereitung sinnvoll. Hierzu hat das Vorhaben **Ferrosan** Erkenntnisse gewonnen, wie Biopolymere zur Metallabscheidung verwendet werden können.

Ein weiteres hohes Potential bei der Behandlung von Abwässern aus dem Bergbau, bzw. von belasteten Oberflächengewässern stellt die Entfernung der Salzfracht dar. Insbesondere beim Kalibergbau sind Salzfrachten aus Laugen von Salzhalden von > 50g/l keine Seltenheit. Im Rahmen von **KerWas** wurden keramische Membranen entwickelt und getestet, wie diese mit ihrer Reinigungsleistung auf unterschiedlich stark konzentrierte Frachten reagieren.

ContaSorb			
Entwicklung und Erprobung neuartiger „Multi-Purpose-Kompositmaterialien“ (Kohlenstoff-Eisen- Komposit-Materialien) für die Sorption und Zerstörung von halogenierten Grundwasserschadstoffen. Die Kompositmaterialien, die bei der In-situ-Grundwasserreinigung in den Aquifer eingespült werden, vereinen Adsorptionseigenschaften und Reaktivität. Halogenierte Grundwasserschadstoffe werden am Komposit gezielt adsorptiv angereichert und im sorbierten Zustand durch eingebaute Reagenzien bzw. Katalysatoren oxidativ oder reduktiv zerstört.			
Mögliche Anwendungsfelder	In-situ-Grundwasserreinigung		
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	FeS-Katalysator zur Aktivierung von Peroxodisulfat und damit Erzeugung von Sulfatradikalen zur Schadstoffoxidation	Korrosionsinhibiertes Carbo-Iron; eisenreiche Fe/C-Komposite	Einspülbare Spezialaktivkohle zur PFT-Entfernung; Trap-Ox-Zeolithe zur heterogenen Fenton-Reaktion
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Die Partikel müssen gut suspendiert in den Aquifer eingebracht werden. In CONTASORB wurde dazu ein Suspensionsstabilisator genutzt.		
	Es muss errechnet werden, wann die Adsorptionskraft der Barriere erschöpft ist, so dass Persulfat rechtzeitig injiziert werden kann. Durch die Persulfatgabe werden die adsorbierten Schadstoffe oxidiert und der Adsorber regeneriert. Das Grundwasser enthält nach der Behandlung etwas mehr Sulfat.	Sauerstoffhaltiges Wasser kann das Material partiell korrodieren, weshalb die Injektion in desoxygeniertem Wasser erfolgt.	Die Ionenstärke wird zur optimalen Injektion angepasst. Über Modellierungen wird abgeschätzt, wann die Adsorptionskraft der Barriere erschöpft sein kann. Bei Durchbruch der Schadstoffe wird dann an den Zeolithen H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> injiziert. Durch die H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Gabe werden die adsorbierten Schadstoffe oxidiert und der Adsorber regeneriert.
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Mit dem Katalysator wurde erstmals versucht, eine In-situ-Lösung für PFT-haltige Grundwasserleiter zu bieten und ist damit ein völlig neuer Ansatz. Die Anreicherung an der Katalysatoroberfläche (Sorptionbarriere) wird mit der Transformation zu kürzerkettigen PFTs verknüpft.	Korrosionsinhibiertes Carbo-Iron ist langlebig und nutzt die Reduktionsäquivalente fast ausschließlich für die Zielreaktion. Dies ist die Innovation im Vergleich zu bestehenden Fe(0)-Kompositen. Die Kombination mit dem starken Adsorber Aktivkohle macht das Material zu einem reaktiven Sammler, der extrem effizient auch bei niedrigen Schadstoffkonzentrationen arbeitet.	Je nach Adsorptionsverhalten der Schadstoffe an den beiden Adsorbermaterialien sind Standzeiten von Wochen (z.B. für VC, PFTs...) bis hin zu Jahrzehnten (z.B. für PAKs, PCBs...) möglich, bei Sedimentbelastungen zwischen 0,1 und 1 Ma-%. Trap-Ox-Barrieren lassen sich in-situ regenerieren.

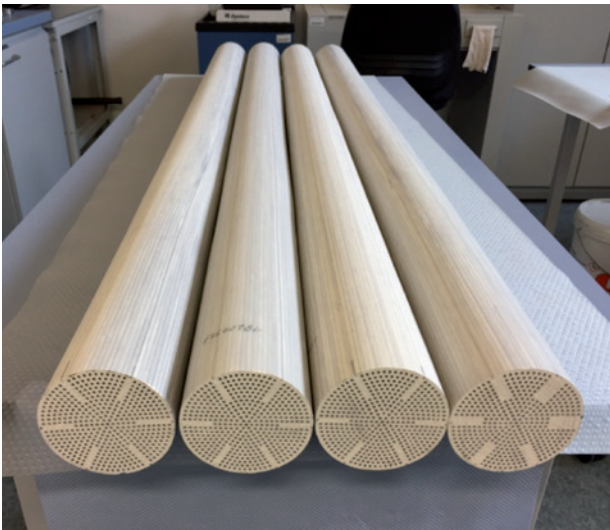


Abb. 3.1: KerWas – Keramikmembrane (© Rauschert Kloster Veilsdorf GmbH)

### 3.2.2 Grundwasser

Für das Grundwasser entstehen Belastungen zum einen durch die hydraulische Verbindung zu Oberflächengewässern und zum anderen durch die Versickerung von Oberflächenwasser über Böden und nicht versiegelte Flächen. In beiden Szenarien handelt es sich überwiegend um chemische Verunreinigungen, da Mikroorganismen zumindest im Lockergestein durch die mechanische Filterfunktion des Untergrundes einen gewissen Rückhalt erfahren. Quellen für Belastungen sind beispielsweise Einträge von Pestiziden und deren Metaboliten, Tierarzneimit-

telrückstände und Düngemitteln in der Landwirtschaft. Hinzu können Schwermetalle aus Gärresten der Biogasproduktion kommen. Im kommunalen Bereich entstehen Einträge durch punktuelle Undichtigkeiten in der Kanalisation, stellenweise auch durch frühere Ersatzbaustoffe in der Infrastruktur und Altablagerungen. Einträge von Gewerbe- und Industrieflächen resultieren überwiegend von Verunreinigungen an Altstandorten. Das Stoffspektrum reicht von Schwermetallen, über Salze bis hin zu organischen Stoffen wie Aliphaten, Aromaten, Chlorkohlenwasserstoffe und Per- und polyfluorierte Chemikalien.

Letztere sind eine aktuelle Herausforderung, welcher sich das Projekt **ContaSorb** mit der Entwicklung neuartiger Kompositmaterialien zur In-situ-Reinigung halogenorganisch kontaminierter Grundwässer angenommen hat.

### 3.2.3 Kommunale Abwasserbehandlung

Je nach Abwasserherkunft (kommunal oder industriell) sind die Abwasserinhaltsstoffe biologisch abbaubare organische Verbindungen, flüchtige organische Verbindungen, Xenobiotika, Metallionen, Schwebstoffe, Nährstoffe wie Phosphor, Stickstoff, mikrobielle Krankheitserreger und Parasiten. Der organischen Bestandteile eines typischen kommunalen Abwassers sind überwiegend Kohlenhydrate (11 - 18 %), Proteine (8 - 10 %), freie Aminosäuren (0,5 - 1,5 %), Fettsäuren (23 - 25 %), gelöste organische Säuren (7 - 11 %) und andere organische Verbindungen (25 - 28 %). Heute verfügen konventionelle kommunale Kläranlagen über eine dreistufige Abwasserbehandlungstechnik. Die aus dem Abwasser während dessen Behandlung entfernten unerwünschten Stoffe werden entweder eliminiert oder

ZeroTrace		
Entwicklung neuer Adsorptionsmaterialien (Aktivkohlen mit hoher Leitfähigkeit aus nachwachsenden Rohstoffen) für die Entfernung von Spurenstoffen in kommunalen und industriellen Kläranlagen. Die Aktivkohlen werden vor Ort elektrothermisch regeneriert und wiederverwendet.		
Mögliche Anwendungsfelder	Wasser- und Abwasserwirtschaft: Siedlungswasserwirtschaft (Kläranlagen)	Produzierendes Gewerbe (Behandlung von Prozess- und Abwässern)
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Kommunales Abwasser mit den üblichen organischen und anorganischen Frachten ohne spezifische Problemstoffe	Stark abhängig vom Produktionsprozess und schwankend während der Produktion, z. B. hoher pH-Wert, hohe Leitfähigkeit, organische Spurenstoffe
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Kläranlagenabläufe tragen Mikroschadstoffe in die nachfolgenden Gewässer ein. Zur ihrer Entfernung werden oxidierende oder adsorbierende Verfahren eingesetzt. Bei oxidativen Prozessen entstehen evtl. toxische Transformationsprodukte; bei adsorbierenden Verfahren werden meist Aktivkohlen aus fossilen Rohstoffen (Steinkohle) eingesetzt, entweder als Pulver oder Granulat. Die beladenen Pulveraktivkohlen werden entsorgt; die granulierten müssen thermisch dezentral wieder reaktiviert werden.	
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Die ZeroTrace-Kompositaktivkohle (CAC-ZT) kann folgende Lösungen liefern: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernung von Spurenstoffen</li> <li>• regenerative statt fossile Rohstoffe (Holzkohle aus heimischer Produktion, Kokosnussskohle)</li> <li>• Einsatz wiederverwendbarer granulierter AK</li> <li>• Reduktion des Transportaufwands durch on site-Regeneration</li> <li>• höhere Effizienz durch gut steuerbare elektrothermische Regeneration</li> <li>• Nutzung von Überschussstrom</li> </ul>	

über Abtrennverfahren in den Klärschlamm überführt. Konventionelle Anlagen sind jedoch nicht dafür ausgelegt, organische Mikroverunreinigungen wie Arzneimittelwirkstoffe ausreichend zu eliminieren. Das behandelte Abwasser kommunaler Kläranlagen ist daher für viele Mikroverunreinigungen Haupteintragspfad in die Oberflächengewässer. Um den Eintrag eines breiten Spektrums organischer Mikroverunreinigungen zu reduzieren, werden heute Kläranlagen mit einer weitergehenden Abwasserbehandlung (vierte Reinigungsstufe) ausgerüstet.

**Spurenstoffe**

Shampoos, Duftstoffe, Medikamente, Hormone, Sonnenschutzmittel, Waschmittel, aber auch Biozide und Flammschutzmittel aus damit ausgerüsteten Textilien stellen mittlerweile eine große Herausforderung für Kläranlagen dar. All diese, in der Natur nicht natürlicherweise vorkommenden, sondern von Menschen entwickelten und in der Umwelt in kleinen Mengen wiedergefundenen Stoffe werden als „Anthropogene Spurenstoffe“ bezeichnet. Sie werden heutzutage im Wasser in geringsten Konzentrationen nachgewiesen. Manche werden in der Natur nicht abgebaut und reichern sich in der Nahrungskette an. Ihre Wirkungen auf Gesundheit und Umwelt zu beurteilen, ist eine wichtige Aufgabe für die Zukunft.

Durch den Einsatz verschiedener Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen können Spurenstoffe und Krankheitserreger aus Rohwasser und Abwasser eliminiert werden [DWA, 2015]. Die Verfahren der Ozonung und der Adsorption an Aktivkohle finden zurzeit eine breite großtechnische Anwendung in der

Trinkwasseraufbereitung und werden zunehmend in der weitergehenden Abwasserreinigung eingesetzt. In der Abwasserbehandlung hat sich dafür der Terminus 4. Reinigungsstufe etabliert, da sie nach der konventionellen dreistufigen Abwasserreinigung zum Einsatz kommen.

Im Rahmen der MachWas-Fördermaßnahme wurde ein Schwerpunkt auf die Entfernung von Spurenstoffen gelegt. Ein Beispiel hierfür ist neben dem Projekt **POLINOM** (s. Kap. 3.2.1) das Projekt **ZeroTrace**, dessen Adsorptionsmaterialien zur Entfernung von Spurenstoffen sowohl in kommunalem, als auch in hochkomplexen industriellen Abwässern Anwendung finden können.

**Pathogene Mikroorganismen**

Krankheitserreger (pathogene Mikroorganismen) und klinisch-relevante Antibiotikaresistenzen sind mittlerweile im gesamten urbanen Wasserkreislauf nachweisbar. So konnten beispielsweise bei Untersuchungen von konventionellen Kläranlagen mit unterschiedlicher Ausbaugröße festgestellt werden, dass hohe Häufigkeiten an fakultativ-pathogenen Bakterien in den Zuläufen und vor allem in Klinikabwässern nachweisbar sind. Durch Klimawandel und demografische Entwicklung kann eine Zunahme des daraus entstehenden Risikopotential erwartet werden, wenn keine ausreichende Elimination in Kläranlagen stattfindet. Eine Folge kann die Zunahme von Antibiotika-Resistenzen sein. Die Thematik wird zwar in den Verbundprojekten der Fördermaßnahme MachWas nicht direkt adressiert, jedoch können beispielsweise Entwicklungen aus dem Themenfeld Materialien für Membranverfahren hierzu einen Beitrag leisten.



Abb. 3.2: Übersicht über die Mikroplastikeinträge in die Umwelt, 2018 (Quelle: Fraunhofer UMSICHT 2018)

OEMP			
Entwicklung innovativer Materialien und Verfahren zum Rückhalt von Mikroplastik aus Kläranlagenablauf, Mischwasserüberlauf und Straßenabfluss.			
Mögliche Anwendungsfelder	Kläranlagenabläufe	Mischwasserüberläufe	Straßenabläufe (Gullys)
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Abfiltrierbare Stoffe (AFS)-Mikroplastik	AFS-Mikroplastik	AFS, AFS63-Mikroplastik
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	keine vollständige Feststoff-elimination	keine (vollständige) Feststoff-elimination	keine (vollständige) Feststoff-elimination
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	weitestgehender Rückhalt von AFS und Mikroplastik auch für besonders kleine Partikel. Trenngrenze bis zu 6µm möglich	weitestgehender Rückhalt von AFS und Mikroplastik auch für besonders kleine Partikel. Trenngrenze bis zu 6µm möglich	weitestgehender Rückhalt von AFS, AFS63 und Mikroplastik bei regelmäßigen Wartungsintervallen für Mikroplastikpartikel unterschiedlicher Größe, Form und Dichte

### Mikroplastik

In Deutschland werden insgesamt jährlich 330.000 Tonnen bzw. 4.000 Gramm Mikroplastik pro Kopf freigesetzt. Mit über 30 Prozent steht der Reifenabrieb weit vor anderen Quellen an erster Stelle der Eintragsmengen (s. Abb. 3.2: Fraunhofer UMSICHT, Konsortialstudie Juni 2018).

Wie der Weg der Partikel aus den unterschiedlichen Quellen nach der Freisetzung verläuft, lässt sich noch nicht für alle Quellen sagen. Über die Luft werden Partikel über Stadt, Land und Gewässer verteilt, bei Regen werden Partikel in Bäche und Flüsse geschwemmt, von wo sie auch ins Meer gelangen. Über Straßenabläufe (z.B. Gullys) wird Mikroplastik in das Kanalnetz gespült. Einige Einträge gelangen direkt in das Abwasser, wie Mikroplastik aus Kosmetikprodukten oder Textilfasern, die sich beim Waschen lösen. Bei der Abwasserreinigung wird ein großer Teil des Mikroplastiks im Klärschlamm gebunden, aber nicht alles, sodass hier trotz Abwasserreinigung Einträge in die Umwelt stattfinden.

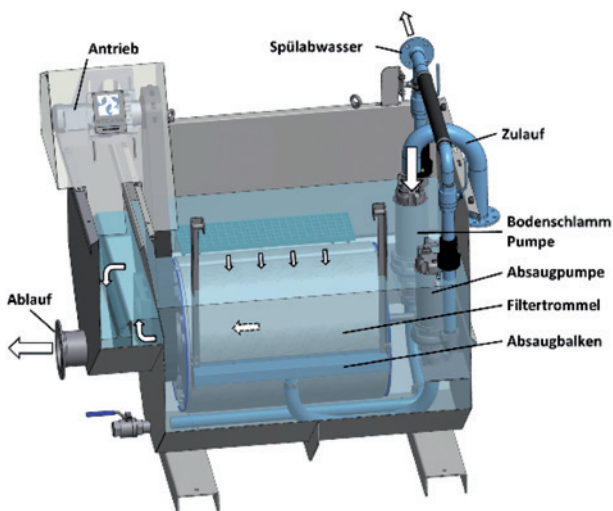


Abb. 3.3: OEMP – Trommelfilter mit Polstoff der Firma Mecana Umwelttechnik GmbH (© Mecana Umwelttechnik GmbH)

Mikroplastik (beispielsweise aus Kosmetikprodukten und der Straßenentwässerung sowie synthetische Textilfasern, die sich in der Waschmaschine lösen) gelangen über das Abwasser in die Kläranlagen. Bisherige Studien zeigen dort Rückhaltequoten bis maximal 97 Prozent – somit passieren mindestens drei Prozent des Mikroplastiks die Kläranlage und gelangen so in die Umwelt. Darüber hinaus kann das im Klärschlamm gebundene Mikroplastik auf landwirtschaftlichen Flächen landen, wenn der Klärschlamm als Dünger eingesetzt wird, so dass als Folge weitere Einträge in Grund- und Oberflächenwasser möglich sind.

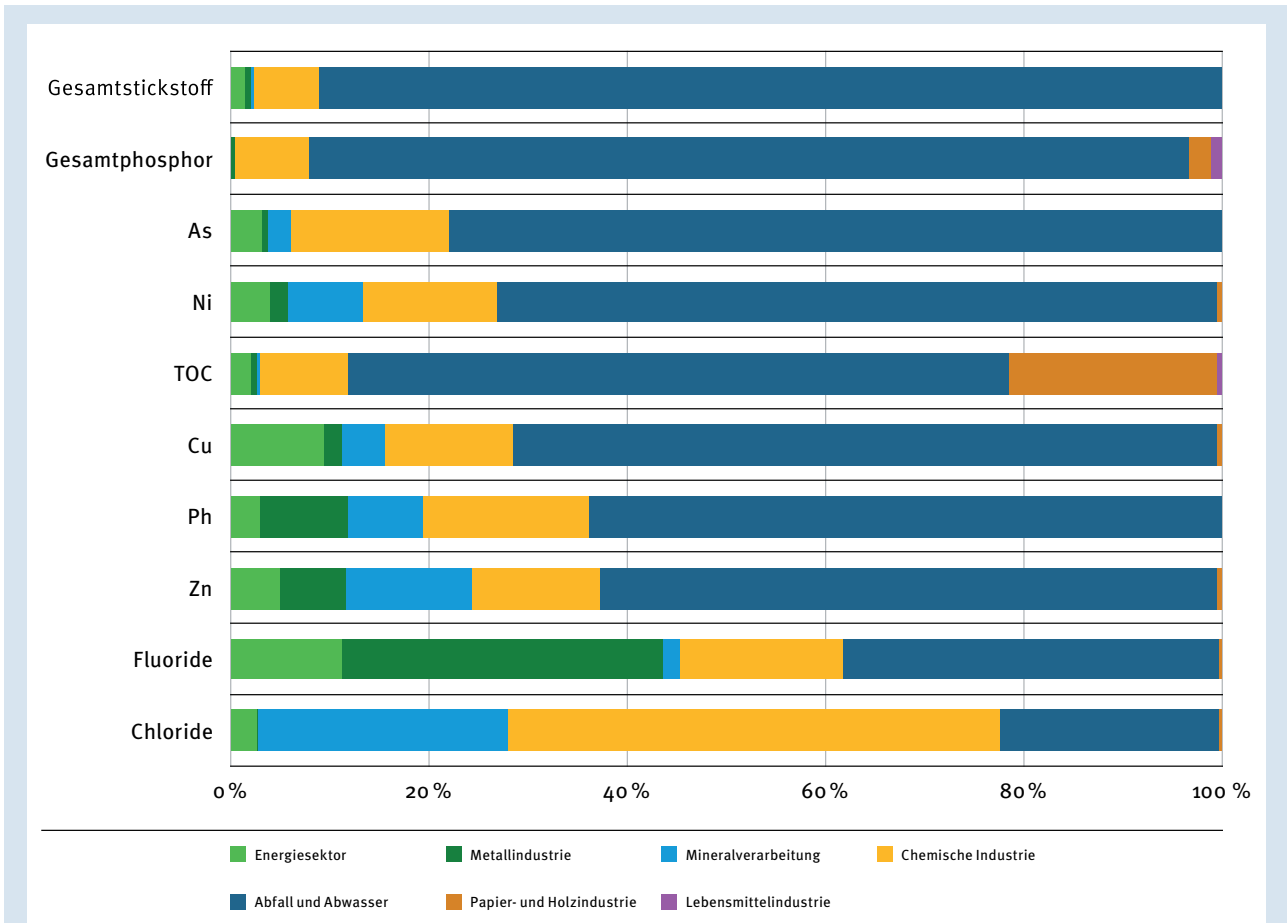
Um Mikroplastik aus Straßenüberläufen, oder aus Kläranlagenabläufen rückzuhalten, sind weitere Maßnahmen erforderlich. Einen Ansatz hat das Projekt **OEMP** entwickelt.

### 3.2.4 Industrieabwasserbehandlung

Je nach Industriezweig bestehen große Unterschiede in der Zusammensetzung der Abwässer und der freigesetzten Stoffe (s. Abb. 3.4).

Entsprechend unterschiedlich und individuell sind die Anforderungen an die Abwasserreinigung. In Industrie und Gewerbe werden die Abwasserbehandlungstechniken aufgrund der Anforderungen nach dem Stand der Technik, vorgegeben durch die europäische Industrieemissionsrichtlinie (IED), und zur Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) ständig verbessert. Industrielles Abwasser kann von seiner Zusammensetzung, der Morphologie der Belastung sowie dem Belastungsgrad pro Schadstoff und Belastungsgrad der Abwassermatrix prozessual sehr unterschiedlich sein. Je nach Produktionssektor und Art des industriellen Betriebs liegen unterschiedliche Abwasserinhaltsstoffe in variablen Konzentrationen und vor allem in unterschiedlichen toxikologischen Risiko- und Bewertungsbereichen vor.

Es werden daher vor allem in Bereichen der Glas-, Papier-, Metall- und der Zellstoffindustrie aber auch bei der chemischen



Auf der Konferenz von Rio 1992 haben sich Deutschland und andere Staaten dazu verpflichtet, ein Schadstoffregister aufzubauen, das für Bürgerinnen und Bürger über das Internet frei zugänglich ist. In diesem Register sollen Emissionen und Abfälle von großen Industriebetrieben zu finden sein, die von den betroffenen Betrieben zu diesem Zweck berichtet werden müssen. Deutschland hat das PRTR -Protokoll im Mai 2003 gezeichnet und im August 2007 ratifiziert.

Das Umweltbundesamt ist verpflichtet, ein der Öffentlichkeit frei und kostenlos zugängliches, internetgestütztes Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister einzurichten und zu unterhalten und die berichteten Daten einzustellen. Das Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister ist im Internet unter „Thru.de“ erreichbar.

Abb. 3.4: Auszug aus dem Schadstofffreisetzungsregister, TOP 10 Schadstoffe, die im Jahr 2015 in Wasser emittiert werden (www.thru.de, Abruf Juli 2020)

Industrie oder der Getränkeindustrie verstärkt Verfahren eingesetzt, die durch Kreislaufführung, Stoffsubstitution und Stoffrückgewinnung die umweltbelastenden Emissionen bereits im Produktionsprozess minimieren. Dies wird hauptsächlich bei Abwässern angestrebt, die gefährliche (giftige, langlebige oder krebserregende) Stoffe enthalten, die mit einer normalen biologischen Reinigung nicht ausreichend abgebaut werden.

In der industriellen Abwasserbehandlung geht es häufig um Wiederverwendung des Wassers und weiterhin um eine mögliche Rückgewinnung von Inhaltsstoffen zur besseren Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. Um die Anreicherung von schwer abbaubaren Verbindungen in internen Wasserkreisläufen zu verhindern müssen diese abgebaut werden. Einen Ansatz dazu definiert das Projekt **RADAR**, in dessen Rahmen mit Hilfe einer elektrochemischen Zelle die Prozesswässer mit einer Kombination aus verschiedenen elektrochemisch generierten Oxidationsmitteln behandelt werden sollen, um eine Wieder-



Abb. 3.5: RADAR – Gasdiffusionselektrode (© Covestro Deutschland AG)



verwendung des Prozesswassers zu ermöglichen. Mit Blick auf die potentiellen Anwendungsfelder wird auch für die Entwicklungen aus **RADAR** deutlich, dass ihre Einsatzmöglichkeiten über die industrielle Anwendung hinaus gehen.

Die Art der industriellen Abwasserbehandlung unterscheidet sich hier maßgeblich, je nachdem welche Inhaltsstoffe behandelt

und/oder zurückgewonnen werden sollen. Organische Belastungen können oxidiert werden über Verfahren wie Nassoxydation, Ozon oder AOP oder an Oberflächen adsorbiert, oder aber auch extrahiert bzw. über biologische Verfahren abgebaut werden. Salzfrachten hingegen werden oftmals über Membranverfahren oder thermische Kristallisationsprozesse entfernt. Vor allem bei Membranverfahren ist eines der entscheidenden Kriterien

RADAR			
Entfernung schwer abbaubare Verbindungen aus Abwässern, durch eine Kombination von Reaktionen mit OH-Radikalen und Wasserstoffperoxid durch radikalische Reinigungsmethoden. Hierfür wird eine elektrochemische Zelle mit einer bordotierten Diamantelektrode (BDD) als Anode und einer Gasdiffusionselektrode (GDE) als Kathode verwendet. Darüber hinaus wird ein Reaktor auf Basis von Graphit-Polymer Kathoden (GP) zur elektrochemischen Entkalkung von Wässern eingesetzt.			
Mögliche Anwendungsfelder	BDD/GDE: Abbau von Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagenabläufen oder anderen Wasserströmen	BDD/GDE: Abbau von konzentrierter organischer Verschmutzung in Zugtoilettenabwässern und Nutzung des aufbereiteten Abwassers im zirkulären oder teilzirkulären Betrieb für die Spülung der Toiletten. GP: Wasserenthärtung als Vorreinigung oder Frischwasserentkalkung.	BDD/GDE: Abbau von persistenter Organik in industriellen Prozesswässern der chemischen und pharmazeutischen Industrie sowie der Abbau von persistenten Stoffen in Krankenhausabwässern.
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	BDD/GDE: Refraktärer CSB und AOX (u.a. Medikamentenrückstände, Pflanzenschutzmittel, polyfluorierte Kohlenwasserstoffe), die in sehr geringer Konzentration in großen Volumenströmen anfallen.	Abwasser mit Humanfäkalien charakterisiert durch vielfältige organische Komponenten, hohen Feststoffanteilen und Leitwerten. GP: Kalkhaltiges Frischwasser oder Brauchwasser.	Besonders attraktiv ist das Verfahren für Teilvolumenströme als Vorbehandlung von persistenten, refraktären und gelösten organischen Stoffen
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Die derzeit installierten Verfahren zur Behandlung von Spurenstoffen wie Ozonung sind nicht in der Lage die Vielzahl an Schadstoffen vollständig abzubauen. Somit werden trotz Installation einer 4. Klärstufe Schadstoffe im Wasserkreislauf beibehalten bzw. akkumuliert.	Abwässer müssen derzeit gesammelt und innerhalb bestimmter Intervalle zentral entsorgt werden. Die Intervalle limitieren den Streckenbetrieb von Zügen und die Speicherung sorgt für unnötiges Gewicht, das bewegt werden muss. Dies trifft auch auf die Frischwassertankintervalle zu.	Im Rahmen des Projektes soll geprüft werden, ob das BDD Verfahren eine wirtschaftliche Alternative zur $O_3$ -Behandlung darstellt und-, ob das Verfahren mit gleichzeitiger Erzeugung von $H_2O_2$ effizienter durchgeführt werden kann.
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Die Diamantelektrode oxidiert allumfassend ohne Funktionalitätspräferenz und hat somit ein universelles Einsatzpotential zur Elimination der persistenten Spurenstoffe. Eine GDE erzeugt zusätzlich Wasserstoffperoxid und erhöht in Kombination mit BDD die Ausbeute und Effizienz des Oxidationsverfahrens.	Die Materialien aus dem Projekt (insbesondere die BDD-GDE) Reaktoren können einen Hauptbeitrag für eine Zugseitige Behandlungslage sein. Die GP Kathode vermeidet durch ihre Oberflächeneigenschaften eine Verkrustung durch Kalkbildner.	Elektrolysezelle für einen Abwasserbehandlungsprozess durch die Erzeugung von starken Oxidationsmitteln an bordotierter Diamantelektrode (OH-Radikale, Ozon) und Gasdiffusionselektrode (Wasserstoffperoxid) mit langzeitstabilen Elektrodenmaterialien, die mit anderen Behandlungstechnologien kombiniert werden können.

ElektroPapier			
Entwicklung papierbasierter Elektroden für die nachhaltige Abwasserreinigung mittels elektrochemisch aktiver Mikroorganismen, um die organische Verunreinigungen im Abwasser direkt in Energie oder wertvolle Energieträger umzuwandeln. Das Projekt fokussiert auf die Neu- und Weiterentwicklung der notwendigen Materialien um das Konzept insgesamt wirtschaftlich zu machen.			
Mögliche Anwendungsfelder	Kommunale Abwasserbehandlung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ersatz der an-/aeroben Biologie durch eine MEZ zur Eliminierung von CSB und N.</li> <li>• Ressourcenrückgewinnung (z.B. von N &amp; P) bei gleichzeitiger CSB-Eliminierung in einer mikrobiellen Elektrolysezelle (MEZ).</li> </ul>	Insellösungen für die industrielle Abwasserbehandlung von kleinen Molkereien	Reinigung von Abwässern aus der Lebensmittelindustrie (z.B. Brauereiabwasser, Abwässern aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben) bei einer möglichen gleichzeitigen Rückgewinnung von Abwasserinhaltsstoffen (Nährstoffe, z.B. N).
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Große Wassermengen mit vergleichsweise geringen Konzentrationen an CSB, N & P.	Süßmolke: feststofffreies Abwasser mit biologisch abbaubaren organischen Schmutzstoffen, hohe Stickstoff- und Phosphorbelastung, niedriger pH (4-6)	In der Regel Abwässer mit hohen Frachten an biologisch abbaubaren organischen Schmutzstoffen, hohe Stickstoffbelastung, niedriger pH (4-6), evtl. hohe Salzfrachten
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Es fallen große Mengen niedrig bis mittel belastetes Abwasser an, das aber in kurzen Aufenthaltszeiten gereinigt werden muss.	geringer Abwasseranfall mit einer sehr hohen organischen Belastung und damit anspruchsvollen und energieintensiver Abwasserreinigung.	
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Durch die in diesem Projekt entwickelten Materialien kann ein MET (mikrobielle elektrochemische Technologien) System kostengünstig (hoch-) skaliert werden und kann so zu einer nachhaltigen Abwasserreinigung beitragen. Die entwickelte Bioelektrode kann großflächig und kostengünstig hergestellt werden und wird zusammen mit den entwickelten Rohrmembranen und Rohrreaktoren d.h. in einem modularen MET eingebunden.		
Sowohl für große, wenig belastete, als auch für geringe, stark belastete Abwasserströme kann die benötigte variable Reinigungskapazität flexibel durch die Anzahl der Module und Größe der eingebetteten Papierelektrode realisiert werden. Das Reaktorvolumen kann individuell angepasst werden, so dass auch elektrische Energie gewonnen werden kann.			

die Durchsatzleistung der Membran. Durch Fouling oder auch durch Verblockung, verursacht durch hohe partikuläre Frachten,



Abb. 3.5: ElektroPapier – Mikrobielle Brennstoffzellen und Elektrolysezellen im Labormaßstab (© TU Braunschweig)

kommt es oftmals zu reduzierten Laufzeiten. Das Projekt **Rohr-membran** hat dafür neue Beschichtungsmethoden entwickelt, die ein Verblocken der Membranen verhindern sollen.

Da industrielle Abwässer je nach Produktionsprozess gänzlich unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen, sind auch die Behandlungsoptionen fallabhängig und häufig entstehen so auf Basis von Grundprozessen individuelle Lösungskonzepte zur Abwasserbehandlung.

Die Projekte **CNT-Membran** (Abwasser der Erdöl- und Erdgasindustrie) und **ElektroPapier** (Molkereien) haben daher auch individuelle Lösungen für ihre jeweiligen Anwendungsfelder entwickelt. Elektropapier verfolgt dabei einen Ansatz, der die direkte Umwandlung organische Verunreinigungen im Abwasser in Energie oder Energieträger ermöglicht.

### 3.2.5 Anwendungsfeldübergreifende Lösungen

Wie viele der Projektbeispiele in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, bieten Materialentwicklungen für die Was-

AntiPARAM	
<p>Entwicklung neuartiger und hocheffektive Antifoulingbeschichtungen von Sensoren und anderen Oberflächen für den Einsatz in Fluss-, Meer- oder auch Abwässern. Hierbei kommen Kombinationsschichtsysteme zum Einsatz, die ihrerseits aus speziellen Tetraetherlipiden (zur Immobilisierung) und hydrophilen Polymeren (zum Antifouling) bestehen. Dieser Ansatz ermöglicht es, dass mit Schichtdicken im niedrigen Nanometer-Bereich das Antifouling wirksam unterdrückt und das jeweilige Einsatzgebiet des Objektes (Sensorfunktion bzw. UV-Durchlässigkeit) dennoch nicht beeinträchtigt wird.</p>	
Mögliche Anwendungsfelder	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wassersensorik</li> <li>• Antifouling</li> <li>• Passive Desinfektion</li> <li>• Gewässerumweltmonitoring</li> </ul> <p style="margin-left: 20px;">&gt;&gt; Fluss-, See-, Trink-, Brauch- und Abwasser</p>
Grobe Charakterisierung des (Ab-)Wassers im Anwendungsfeld	Die Entwicklung zielt darauf ab, keine Schadstoffe freizusetzen. Es soll demnach eine passiv wirkende Beschichtung entwickelt werden, die Reinigungseinsätze und somit die Freisetzung von Schadstoffen drastisch reduziert.
Problemstellungen bei der Aufbereitung bzw. an der Anfallstelle	Im Bereich der Trinkwasserentkeimung, der Wasser- bzw. Brauchwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, aber auch im Gewässermonitoring spielen Messsysteme jeglicher Art eine entscheidende Rolle. Beim Verbleib in wässrigen Medien werden Sensorsysteme binnen kurzer Zeit mit einer Bewuchsschicht aus verschiedensten Organismen (Biofilm) bedeckt, was die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Sensors beeinträchtigt. Ziel ist die Reduzierung von Biofouling und Scaling (Verschmutzung und Verkrustung mit biologischem Material) beim Gewässermonitoring in der Trink- bzw. Brauchwasseraufbereitung.
Lösungen, die Materialien aus dem Projekt liefern können	Die derzeitige Praxis im Umgang mit dem Problem des Foulings/Scalings besteht in dem häufigen Austausch der Sensorkomponenten sowie der Etablierung von wartungs- und kostenaufwändigen mechanischen Reinigungszyklen bzw. dem Einsatz ökologisch bedenklicher, wassergefährdender Chemikalien. Daher besteht das Ziel des Projekts darin, ein hocheffektives aber nichttoxisches Antifoulingkonzept für das Gewässermonitoring auf der Basis von spezifisch funktionalisierten, wasserbarrierebildenden Schichten zu entwickeln (antiadhäsive Schichten) und somit den Kundenanforderungen nach nicht wartungsintensiver und doch langzeitstabiler Messtechnik Rechnung zu tragen. Im Rahmen des Projektes werden optimierte, extrem belastbare und äußerst dünne Beschichtungssysteme auf Basis von Tetraetherlipiden entwickelt. Sensorische und optische Eigenschaften werden somit nicht beeinflusst.

sertechnik oftmals Einsatzmöglichkeiten in mehreren Anwendungsfeldern. Dies gilt besonders für Lösungsansätze die sich



Abb. 3.6: AntiPARAM – Biofouling in offenem Gewässer, Sensorträger mit Sensorik für Leitfähigkeit, Druck, Strömung und Temperatur nach 6-monatigem Einsatz in der Nordsee vor Sylt (© 4H-JENA engineering GmbH)

mit Mess- und Sensorsystemen befassen. Sie kommen in allen Bereichen der Wasserwirtschaft, sei es Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung, (Ab-)Wasserinfrastruktur und der Gewässerüberwachung zum Einsatz. Eine Problemstellung betrifft dabei fast alle in wässrigen Medien verbaute Sensoren. Sie werden je nach Beschaffenheit des umspülenden Mediums unterschiedlich schnell von verschiedensten Mikroorganismen besiedelt (Fouling), was zu einer Reduzierung der Funktionsfähigkeit der Sensoren führt. Bislang werden die davon betroffenen Sensoren ausgetauscht, bzw. aufwendig zyklisch gereinigt. In der Wassertechnik sind beispielsweise UV-gestützte Behandlungsanlagen und Membranverfahren von Fouling betroffen. Vor allem für die Mess- und Sensortechnik können die Ergebnisse des Projektes **AntiPARAM**, in dem Antifoulingbeschichtungen entwickelt wurden, Lösungsansätze bieten.

## 4 Beitrag zur Nachhaltigkeit – Materialien helfen

Autoren: Dr. Frank Marscheider-Weidemann; Dr. Thomas Hillenbrand;

Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe



Abb. 4.1: Beiträge der MachWas-Verbundprojekte zu den SDG (Quelle UN, angepasst)

### 4.1 BEITRAG FÜR DIE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS)

Bei einer Befragung der Verbundprojekte der Fördermaßnahme MachWas sahen diese den Beitrag bei im Wesentlichen sieben SDGs, siehe Abb. 4.1. Diese Beiträge werden im Folgenden entsprechend der Nummerierung der SDGs näher beschrieben.

Von vier Verbundprojekten wurde **SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen)** genannt, weil Ihre Materialien bzw. Entwicklungen zur Abtrennung von gefährlichen Stoffen, Mikro Schadstoffen und/oder Schwermetallen geeignet sind. Durch die Reinhaltung von (Grund-)wasser (und dem daraus gewonnenen Trinkwasser) können die Zahl der Todesfälle und Erkrankungen aufgrund gefährlicher Chemikalien verringert werden (Unterziel SDG 3.9).

Alle 13 MachWas-Verbundprojekten leisten Beiträge zur Erreichung des **SDG 6 (Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten)**. 11 der Projekte sehen durch ihre Materialentwicklung vor allem einen Beitrag zum Unterziel 6.3 („Bis 2030 die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe, Halbierung des Anteils unbehandelten Abwassers und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und gefahrlosen Wiederverwendung weltweit verbes-

sern.“). Durch die Entwicklungen werden Schadstoffe (besser) abgetrennt und dadurch auch eine Wiederaufbereitung und gefahrlose Wiederverwendung von Wasser ermöglicht.

Vier Verbundprojekte sehen einen Beitrag durch ihre Materialentwicklung zur Bereitstellung von preiswertem Trinkwasser (SDG 6.1: „Bis 2030 den allgemeinen und gerechten Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser für alle erreichen.“).

Zum Ziel, die Wassernutzung zu steigern, tragen 3 Projekte durch Abtrennung von Schadstoffen und Gewinnung von Wertstoffen bei (SDG 6.4: „Bis 2030 die Effizienz der Wassernutzung in allen Sektoren wesentlich steigern und eine nachhaltige Entnahme und Bereitstellung von Süßwasser gewährleisten, um der Wasserknappheit zu begegnen und die Zahl der unter Wasserknappheit leidenden Menschen erheblich zu verringern.“).

Durch die Reduktion von Schadstoffen in Abwässern, Straßenabläufen oder direkt im Gewässer unterstützen drei Verbünde auch das Unterziel 6.6 („Bis 2020 wasserverbundene Ökosysteme schützen und wiederherstellen, darunter Berge, Wälder, Feuchtgebiete, Flüsse, Grundwasserleiter und Seen.“).

Membranmaterialien dienen auch zur Unterstützung von Entwicklungsländern zur Umsetzung von Programmen zur Entsalzung, Abwasserbehandlung, Wiederaufbereitungs- und

Wiederverwendungstechnologien (SDG 6a: „Bis 2030 die internationale Zusammenarbeit und die Unterstützung der Entwicklungsländer beim Kapazitätsaufbau für Aktivitäten und Programme im Bereich der Wasser- und Sanitärversorgung ausbauen“).

**SDG 7 (Bezahlbare und Saubere Energie)** wird von zwei Projekten genannt, welche dazu beitragen Abwässer unter Gewinnung von Energie effizient zu reinigen oder klimaneutral wiedereinzusetzen (Unterziel SDG 7.2: „Bis 2030 den Anteil erneuerbarer Energie am globalen Energiemix deutlich erhöhen.“ bzw. SDG 7.3: „Bis 2030 die weltweite Steigerungsrate der Energieeffizienz verdoppeln.“).

Zu **SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur)** trägt ein Verbundprojekt bei, da das entwickelte Verfahren flexibel und modular betreibbar ist und als fortschrittliches (Ab-)Wasseraufbereitungsverfahren indirekt die „Entwicklung einer nachhaltigen und widerstandsfähigen Infrastruktur in den Entwicklungsländern“ unterstützt (Unterziel SDG 9a).

**SDG 12 (Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen)** wird einmal genannt, da in diesem Projekt Materialien und Verfahren zur Reduzierung des Eintrags von Abfiltrierbaren Stoffen (AFS, inkl. Mikroplastik) in Oberflächengewässer entwickelt wurden. Dadurch können an den AFS angehaftete Mineralölkohlenwasserstoffe (MKWs) und Schwermetalle zurückgehalten werden (Unterziel SDG 12.4: „Bis 2020 einen umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen erreichen und ihre Freisetzung in Luft, Wasser und Boden erheblich verringern, um ihre nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß zu beschränken.“).

Beiträge zum Ziel **SDG 14 (Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen)** liefern vier Verbundprojekte. Dies gelingt sowohl durch Membranen zur Verringerung der Meeresverschmutzung durch Erdöl und auch durch die Verbesserung von Prozesskreisläufen (Unterziel 14.1: „Bis 2025 alle Arten der Meeresverschmutzung, insbesondere durch vom Lande ausgehende Tätigkeiten und namentlich Meeresmüll und Nährstoffbelastung, verhüten und erheblich verringern.“). Auch die Rückhaltung von Partikeln wie Mikroplastik trägt zu diesem Ziel bei (SDG 14.2: „Bis 2020 die Meeres- und Küstenökosysteme nachhaltig bewirtschaften und schützen, um unter anderem durch Stärkung ihrer Resilienz erhebliche nachteilige Auswirkungen zu vermeiden, und Maßnahmen zu ihrer Wiederherstellung ergreifen, damit die Meere wieder gesund und produktiv werden.“). Durch die Entwicklung von Beschichtungen, die Sensoren bewuchsfrei halten können, wird ein direkter Beitrag zur marinen Forschung geleistet (SDG 14a: „Die wissenschaftlichen Kenntnisse vertiefen, die Forschungskapazitäten ausbauen und Meerestechnologien weitergeben.“).

Zur Erreichung des **SDG 15 (Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Wälder nachhaltig bewirtschaften, Wüstenbildung bekämpfen, Bodendegradation beenden und umkehren und dem Verlust der biologischen Vielfalt ein Ende setzen)** sieht ein Projekt einen Beitrag durch die Förderung von Prozesskreisläufen, die zu einer Erhöhung der Wasserqualität von Oberflächengewässern führt.

Insgesamt wird deutlich, dass die Beiträge der Verbundprojekte zu den Nachhaltigkeitszielen der UN sehr unterschiedlich sind, aber gerade dadurch auch in einer großen Breite erfolgen und eine große Zahl an SDGs adressiert wird (Abb. 4.2).

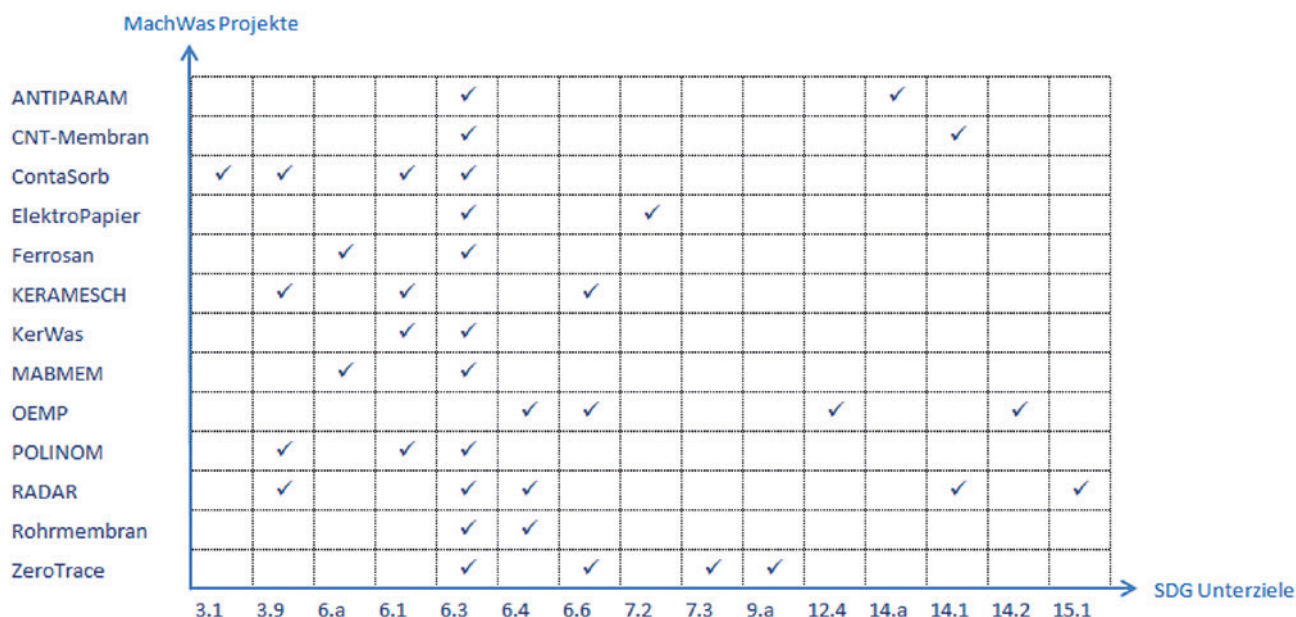


Abb. 4.2: Beiträge der MachWas Projekte zu den (Teil-)Zielen der UN SDG

## 4.2 POTENTIELLE NACHHALTIGKEITSEFFEKTE

Ergänzend zu den SDGs ergeben sich eine Reihe von aktuellen Zielen für die Wasserwirtschaft aus dem nationalen Wasserdialo (BMU/UBA 2020), aus dem Forschungsprogramm Wasser: N (BMBF 2021) und den Empfehlungen aus 20 Jahren WRRL (UBA, 2021). Hinzu kommen Ziele aufgrund von Vertragsverletzungsverfahren, was für die Wasserwirtschaft derzeit die EU-Nitratrichtlinie betrifft.

Im nationalen Wasserdialo wurden für fünf Cluster insgesamt 31 strategische Ziele erarbeitet. Die Cluster mit der Anzahl der Ziele sind: (1) Vernetzte Infrastruktur – 5 Ziele, (2) Risikofaktor Stoffeinträge – 3 Ziele, (3) Landwirtschaft und Verbraucherschutz – 6 Ziele, (4) Gewässerentwicklung und Naturschutz – 5 Ziele und (5) Wasser und Gesellschaft – 9 Ziele. Eine relevante strategische Ziel aus dem Wasserdialo für die MachWas-Verbünde ist SZ-VI.6 für Ferrosan und ContaSorb. Das Strategische Ziel SZ-RS.2 zur Vermeidung von Stoffeinträgen wird von den Verbänden adressiert, die Membranmaterialien entwickeln (**CNT-Membran, KerWas, MABMEM, POLINOM, Rohrmembran**) sowie auch von **ElektroPapier, RADAR, ZeroTrace, KERAMESCH** und **OEMP**.

Im Forschungsprogramm Wasser: N werden sechs Programmziele vorgestellt: (1) Sauberes Wasser, (2) Intakte Ökosysteme und nachhaltige Gewässerentwicklung, (3) Lebenswerte Städte und Regionen, (4) Ressourceneffiziente Wasserkreisläufe, (5) Schutz vor Wasserextremereignissen und (6) Neue Wasserkultur. Die oben genannten Forschungsvorhaben tragen auch zu den thematisch gleichen Themenschwerpunkten 1 und 2 des Forschungsprogrammes Wasser:N bei.

Im Bericht zu 20 Jahren WRRL werden neun Empfehlung entwickelt: (1) Hohes Ambitionsniveau der Wasserrahmenrichtlinie erhalten, (2) Den EU-gemeinschaftlichen Umsetzungsprozess weiterentwickeln, (3) Digitale Berichtspflichten vereinfachen und verbessern, (4) Politikbereiche und Rechtsinstrumente den Gewässerschutzzielen anpassen, (5) Chemikalienrecht und Gewässerschutzregelungen wirksam nutzen, (6) Stoffeinträge frühzeitig erkennen und minimieren, (7) Den Gewässern mehr Raum geben, (8) Gewässerschutz in der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) verankern und (9) Nationale Gewässerschutzinitiative initiieren. Die Materialien der MachWas-Verbünde tragen zum Punkt (6) bei.

Das Verbundvorhaben AntiParam hat keine direkten Effekte auf bestimmte Ziele, unterstützt aber als „Querschnittstechnologie“ die Erreichung der Ziele aller Verbünde. Der Nachhaltigkeitseffekt solch indirekter Effekte ist schwer zu beurteilen, weshalb dem Verbund in der Abbildung 4.3 ein Wert von 2 zugeordnet wurde. Verbünde mit direkten, spezifischen Effekten auf die genannten Ziele erhielten höhere Werte.

Tab. 4.1: Relevante Ziele zu deren Erreichung die MachWas-Vorhaben beitragen

Nationalen Wasserdialo (BMU/UBA 2020) <sup>1</sup>	
Ziel SZ-VI.6: naturnaher Zustand	Der naturnahe Zustand und die Funktionsfähigkeit des Wasserhaushaltes sind wiederhergestellt und stehen in Balance mit anderen Belangen des Allgemeinwohls.
Ziel SZ-RS.2: Stoffeinträge	Der Eintrag von relevanten und unerwünschten Stoffen, Stoffgruppen, Keimen und Partikeln in den Wasserkreislauf ist gemäß dem Vorsorgeprinzip minimiert bzw. vermieden. Damit verbunden ist eine entsprechende Reduzierung des Eintrags in die Meere.
Forschungsprogramm Wasser: N (BMBF 2021) <sup>2</sup>	
Wasser N: Programmziel 1	Versorgung mit sauberem Wasser sicherstellen
Wasser N: Programmziel 2	Ökosystem und Gewässer nachhaltig entwickeln.
Empfehlungen aus 20 Jahren WRRL (UBA, 2021) <sup>3</sup>	
Empfehlung 6	Stoffeinträge frühzeitig erkennen und minimieren.

## 4.3 INKREMENTELLE UND DISRUPTIVE INNOVATION

Die geförderten MachWas Verbundprojekte stellen eine Mischung von Vorhaben dar, deren Ergebnisse teilweise auf Lösungen für einzelne, spezielle Fragestellungen, teilweise aber auch auf die Transformation ganzer Systeme abzielen. Diese Tatsache gibt auch Abb. 4.3 wieder: In Dunkelblau sind die Projekte eingezeichnet, die potenziell als disruptive Innovation eine Transformation in der Wasserwirtschaft auslösen können.

Die Verbundprojekte liegen beim Technologischen Reifegrad (TRL, technology readiness level) zwischen 4 (Technologie-demonstration) und 7 (Pilotanlage/Aufskalierung), wobei die Mehrzahl einen Reifegrad > 6 haben. Bei Projekten, die spezielle Probleme beforschen, ist der Markt oft relativ klein. Von 5 Projekten, die ein großes Marktpotential haben, werden auch große Nachhaltigkeitseffekte erwartet.

Wie ein Blick auf die Abbildung 4.4 zeigt, sind die Stoffflüsse der kommunalen Siedlungswasserwirtschaft mit hohen Energieströmen verknüpft. Neben der Trinkwasseraufbereitung, dem Transport (jeweils ca. 4,6 PJel) und vor allem der Bereitung von warmen Wasser (340 PJ Primärenergie) spielt die Ab-

1 [https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/2020-01-13-Uebersicht\\_Ziele.pdf](https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/2020-01-13-Uebersicht_Ziele.pdf)

2 <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/umwelt-und-klima/ressourcen/Wasser/wasser-n.html>

3 <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/20-jahre-wasserrahmenrichtlinie-empfehlungen>

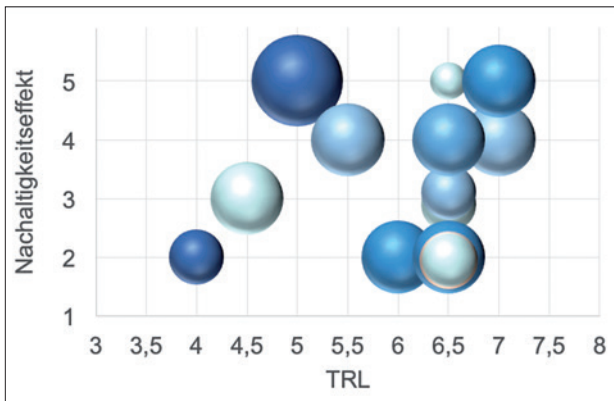


Abb. 4.3: Potentielle Nachhaltigkeitseffekte in Abhängigkeit des TRL-Levels in Verbindung mit Marktpotential und Innovationsgrad für die geförderten Verbundprojekte

(Erläuterungen zur Darstellung: Effekte skaliert von 1 (geringe) bis 5 (sehr große Effekte); je größer der Durchmesser der Bubbles, desto größer das langfristige Marktpotential; der Farbverlauf gibt die Innovation an, von dunkelblau für disruptive bis hellblau für eher inkrementelle Innovationen)

wasserreinigung eine große Rolle (15 PJel). Rechnet man mit 175kWh/(EW\*a) als theoretisches Energiepotenzial des organischen Materials im Abwasser, bekommt man am Ende des gesamten Reinigungsprozesses nur ca. 10% (18kWh/(EW\*a)) als elektrische Energie mittels Faulung und anschließender Kraft-Wärme-Kopplung wieder<sup>4</sup>. Die gewonnene Energie wird dabei zurzeit komplett für den Reinigungsprozess selbst verwendet.

Das MachWas-Verbundprojekt **ElektroPapier** könnte hier einen echten „GameChanger“ darstellen. Durch die Entwicklung eines mikrobiellen elektrochemischen Systems aus papierbasierten, leitfähigen Elektroden und kohlenwasserstoffbasierten Kationenaustauscher-Membranen könnte es zukünftig möglich sein, die organischen Bestandteile des Abwassers zur Energiegewinnung zu nutzen. Dadurch wäre eine „energie neutrale“ Aufbereitung des Abwassers möglich. Da die Technologie auch platz- und ressourcenschonend bzw. ressourcengewinnend sein kann, ergeben sich auch neue Anreize zur dezentralen Aufbereitung von Abwasser für industrielle Anwendungszwecke.

Die Ergebnisse des Verbundprojektes liefern die Grundlage für eine zukünftige großtechnische Implementierung der untersuchten bzw. entwickelten Technologie zum Einsatz von MET zur Kopplung der Abwasserbehandlung mit direkter Energiegewinnung in einer MBZ oder indirekt in einer MEZ über z.B. das erzeugte Wasserstoffgas. Ziel ist die Schonung von Energie und Ressourcen und damit eine ökologische und ökonomische Verbesserung der Abwasserbehandlung in Industrie und Kommunen. Auch eine Integration der Abwasserbehandlung durch MEZ-Systeme in das Netzwerk der Wasserstoffwirtschaft zur zusätzlichen Einspeisung von Wasserstoff z.B. zum Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen und stationären Brennstoffzellensystemen wäre vorstellbar.

Eine vorsorgende F&E wurde im MachWas Verbundprojekt **OEMP** betrieben. In diesem Projekt wurden optimierte Straßenablauffilter sowie Materialien und Verfahren für eine (weitergehende) Abwasserreinigung entwickelt, um den Eintrag von AFS (inkl. Mikroplastik) und ggf. CSB und Nährstoffen (bei Fällung und Flockung) in die aquatische Umwelt zu reduzieren. Durch die Materialentwicklung in dem MachWas Verbundprojekt stehen charakterisierte Materialien zur Rückhaltung von Mikroplastik bereit, wenn eine entsprechende Gesetzgebung zur Minderung vom Mikroplastik-Einträgen vorliegt.

In seinem Potential für die Nachhaltigkeit nur sehr schwer abschätzbar ist dagegen der Verbund **AntiParam**. Das Projekt nutzt Tetraetherlipide als biomimetische Schichtsysteme, die schließlich bei Sensoren im Meer und bei der UV-Desinfektion unter realen Bedingungen getestet werden. Da diese Schichten nur monomolekular aufgetragen werden müssen, ist die Einsatzmenge sehr gering. Die beiden im Projekt angestrebten Einsatzfelder auf Quarzglas helfen vor allem, Wartungsintervalle für Sensoren zu vergrößern und damit den Wartungsaufwand insgesamt deutlich zu reduzieren (mit verschiedenen, eher indirekten Nachhaltigkeitseffekten wie Verringerung von Verbrauchs- und Wartungsmaterialien, Verringerung des Transportaufwands, etc.). Potentiell möglich ist aber auch die Nutzung auf anderen Oberflächen bspw. bei Kleidung, Gebäude, Autos u.v.m.

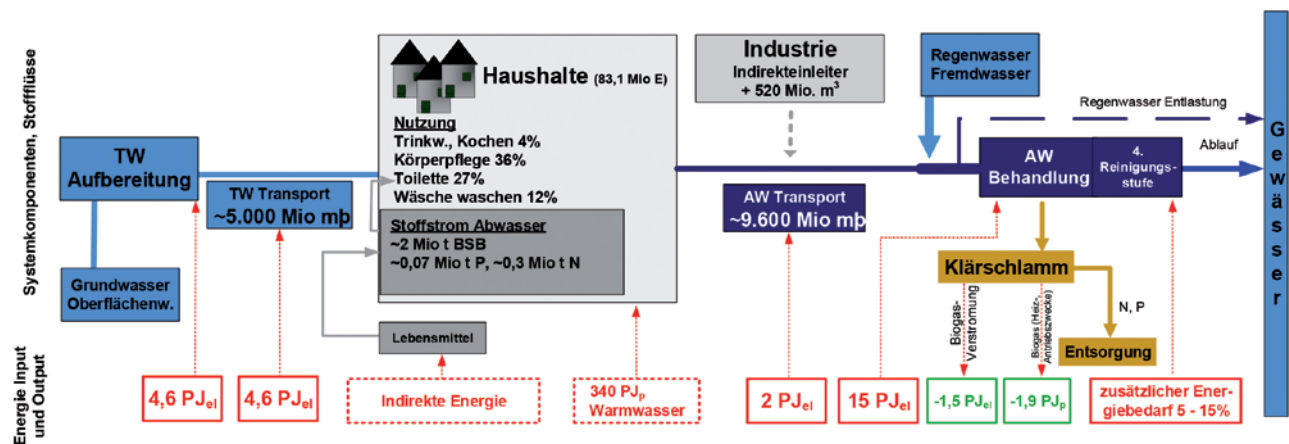


Abb. 4.4: Stoff- und Energieflüsse der kommunalen Siedlungswasserwirtschaft

4 [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session\\_B5/LF\\_Loderer.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_B5/LF_Loderer.pdf)

## 5 Ausblick



Wie die Vielfalt der Anwendungsfelder für die in MachWas entwickelten Materialien (s. Kap. 3) und ihr Beitrag zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (s. Kap. 4) zeigen, können die Ergebnisse der Fördermaßnahme einen substantiellen Beitrag zur Etablierung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft leisten. Dabei ist es, mit Blick auf eine weitere Umsetzung der Ergebnisse bis hin zur Markteinführung einzelner Produkte notwendig, die hierfür erforderlichen nächsten Schritte aufzuzeigen. Für die Themenschwerpunkte der Fördermaßnahme MachWas sind mit den Materialentwicklungen der Projekte verschiedene Herausforderungen, Hemmnisse und Forschungsbedarfe für die Realisierung von nachhaltigen Wassertechnologien deutlich geworden. Sie gilt es in weiterführenden Maßnahmen und Aktivitäten zu verfolgen.

Die Perspektiven und nächsten Schritte, die notwendig sind, um die Entwicklungen in den vier MachWas-Themenfeldern in Technologien und Verfahren für eine nachhaltige Wasserbehandlung zu überführen, lassen sich auf Grundlage der Einschätzungen der Projekte zu Herausforderungen, Hemmnissen und künftigem Forschungsbedarf in fünf Aktionsfelder einordnen: Material(weiter)entwicklung; Herstellungsverfahren, Scale-up, Technologie-/Verfahrensentwicklung, Demonstration.

- **Material(weiter)entwicklung:** Hierzu zählen beispielsweise die Steigerung der bestehenden Funktionalität von Materialien, aber auch die Realisierung neuer Funktionalitäten und Materialeigenschaften.
- **Herstellungsverfahren:** Sie beziehen sich auf die Entwicklung und Optimierung von Herstellungsprozessen für Materialien, mit Fokus auf den erforderlichen Materialeigenschaften, zunächst unabhängig vom Herstellungsmaßstab.
- **Scale-up:** Das Scale-up adressiert die Skalierung der erfolgreichen Verfahren zur Materialherstellung bis hin zu einem Maßstab, der die Bereitstellung von Materialien für einen kommerziellen Einsatz ermöglicht.
- **Technologie-/Verfahrensentwicklung:** Dieses Aktionsfeld adressiert beispielsweise die Einbindung von Materialien in Technologien und Verfahren zur (Ab-)wasserbehandlung oder auch Potentiale, die sich durch sie für neue Verfahrenskombinationen ergeben können.
- **Demonstration:** Die Demonstration der Leistungsfähigkeit neuer Materialien selbst oder als Teil einer Technologie oder eines Verfahrens ist ein wichtiger Schritt in Richtung ihrer Marktreife. Ein praxisnaher Demonstrationsmaßstab ist dabei besonders von Bedeutung.



Aus der Zuordnung der Herausforderungen, Hemmnisse und künftigen Forschungsbedarfe der Projekte zu diesen fünf Aktionsfeldern ergibt sich deren Gewichtung in den Abbildungen 5.1 bis Abbildung 5.5.

Über alle vier Themenschwerpunkte der Fördermaßnahme hinweg zeigt sich, dass die Materialentwicklungen in den Projekten erfolgreich vorangetrieben wurden. Als künftige Aktionsfelder für die Weiterentwicklung und Verwertung der MachWas-Materialien wird vor allem die Technologie- und Verfahrensentwicklung zur Wasserbehandlung (z.B. Prozessführung/-steuerung, Modul-/Anlagendesign, Anlagenumrüstung, ...) gesehen (s. Abb. 5.1).

Mit Blick auf künftige Anwendungsfelder erfordern einige Materialien eine Weiterentwicklung von Materialeigenschaften (z.B. Stabilität, Kapazität, Selektivität, ...). Optimierungsmöglichkeiten von Materialeigenschaften werden vor allem in Verbindung mit der Implementierung in Technologien und Verfahren zur Wasserbehandlung gesehen (z.B. erweiterte Einsatzbedingungen, Funktionalität, ...). Fragestellungen zur Materialherstellung (z.B. Verfahrensführung, Qualitätskontrolle, Automatisierung, ...) treten dort auf, wo die Ergebnisse aus der Materialentwicklung den nächsten Schritt hin zur Einbindung in Technologien und Verfahren ermöglichen.

Dort, wo Materialien in ihrer Herstellung und Funktionsweise erfolgreich erprobt wurden, gilt es, in einem weiteren Schritt Fragestellungen zum Scale-Up zu adressieren (z.B. Herstellungsmaßstab, -kapazitäten, ...). Der Erhalt der in den vorangegangenen Entwicklungsschritten gewonnenen Materialeigenschaften und Leistungscharakteristik steht dabei im Vordergrund.

Demonstrationsbedarf wird vor allem in Verbindung mit Herstellungsverfahren, Scale-Up und Technologie-/Verfahrensentwicklung zur Wasserbehandlung gesehen. Der Bedarf in diesem Aktionsfeld lässt sich aus einer Vielzahl der Verbundprojekte ableiten, auch wenn die Demonstration als Aktionsfeld nicht immer ausdrücklich genannt ist.

Aufgrund der Vielfalt und Individualität der entwickelten MachWas-Materialien sowie der damit verbundenen Herausforderungen und Bedarfe werden in den folgen-

den Abschnitten zunächst die übergeordneten Aktionsfelder aufgezeigt, bevor spezifische Aspekte für einzelne Materialien skizziert werden.

### 5.1 MATERIALIEN FÜR MEMBRANVERFAHREN

Bei den Materialien für Membranverfahren liegt der Schwerpunkt für künftige Aktivitäten auf den Herstellungsverfahren für Membranen (s. Abb. 5.2) und deren Integration in Membranmodule. Optimierungsmöglichkeiten werden beispielsweise für den Einsatz von Roh- und Hilfsstoffeinsatz sowie den Herstellungsprozesse als solches gesehen. Hinzu kommt der Einsatz additiver und automatisierter Fertigungsverfahren, sowie die Qualitätskontrolle. Das Scale-Up der Membranherstellung erfordert Entwicklungsaktivitäten zur Steigerung der herstellbaren Membranflächen und der Skalierung der Membranproduktion.

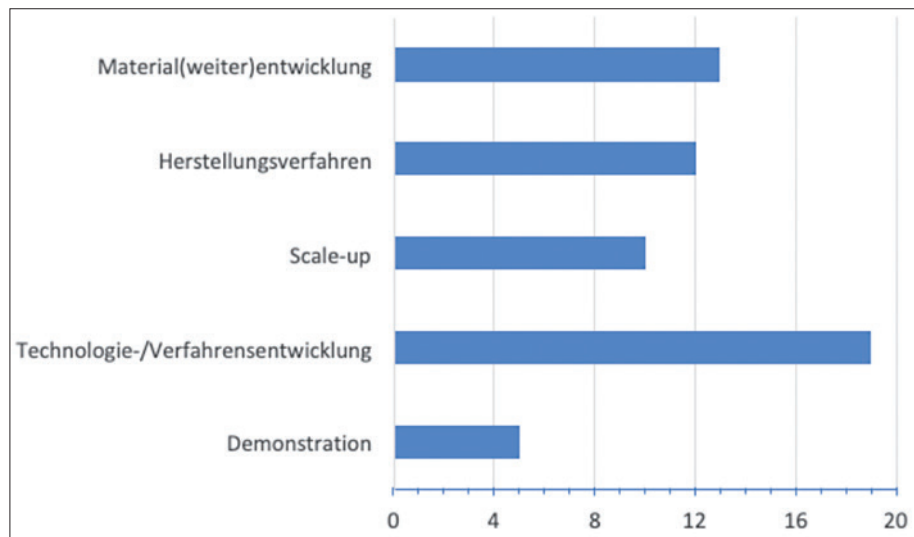


Abb. 5.1: Nennung materialübergreifender Aktionsfelder für die Weiterentwicklung und Verwertung der MachWas-Materialien

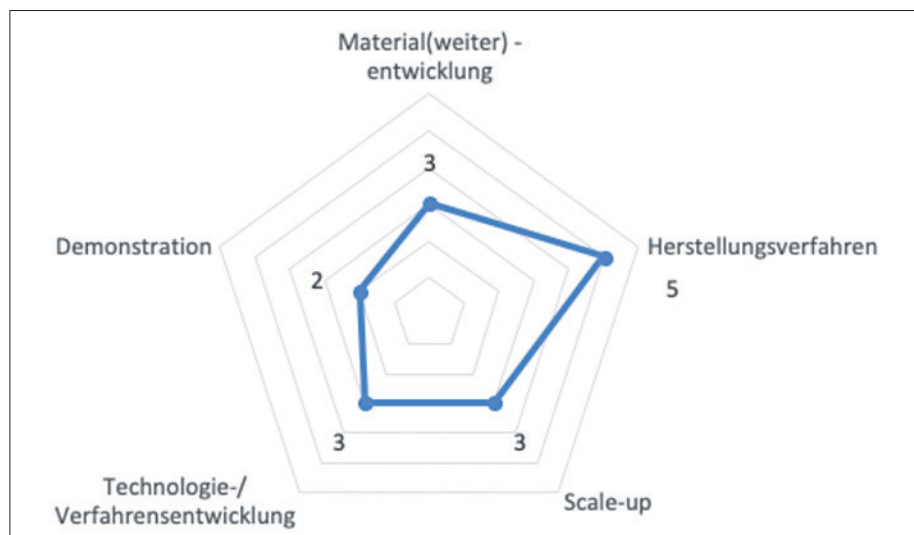


Abb. 5.2: Nennung von Aktionsfeldern für Materialien für Membranverfahren

In Verbindung mit der Technologie- und Verfahrensentwicklung liegt der Fokus auf (I) der Überführung von Membranmaterialien in Membranmodule unter Berücksichtigung anwendungsbezogener Anforderungen (z.B. Modulgröße), (II) der Integration in geeignete Verfahren (z.B. Membranreaktoren) und (III) der Entwicklung von Verfahrenskombinationen, z.B. Membranverfahren in Verbindung mit weiteren Trennverfahren (z. B. Adsorption, Extraktion) oder oxidativen Verfahren (z.B. AOP).

Bei der Weiterentwicklung der Eigenschaften von Membranmaterialien werden als Schwerpunkte beispielsweise die Optimierung von Trennleistung, Regenerierbarkeit, Materialstabilität sowie eine weitergehende Funktionalisierung (z.B. Programmierbarkeit, bioinspirierte Funktionen, ...) gesehen.

Als weitere, nicht primär technische Herausforderungen für die Weiterentwicklung und Verwertung von Membranmaterialien werden aus den Verbundprojekten beispielsweise Zulassungshürden für neue Materialien, die Reduktion des Personalauf-

wandes bei der Membranherstellung sowie die Kostenreduktion für das Endprodukt genannt.

## 5.2 ADSORPTIONSMATERIALIEN

Bei den Adsorptionsmaterialien liegen die Schwerpunkte für künftige Aktivitäten auf der Einbindung in die Verfahrensentwicklung, dem Scale-Up sowie der (Weiter-)Entwicklung von Adsorptionsmaterialien (s. Abb. 5.3).

Bei der Verfahrensentwicklung zeigen sich vielfältige Perspektiven. Zum einen sind dies Fragestellungen zur Verfahrensführung/-optimierung, wie (I) das Zusammenspiel von Adsorption und destruktiven Prozessen (z.B. Oxidation), (II) der Optimierung von Hilfsstoffen (z.B. Selektivität) bei komplexen kombinierten Prozessen oder (III) dem Zusammenspiel von Adsorptions- und Regenerierungsphasen. Zum anderen gilt es anwendungsrelevante Aspekte zu adressieren. Hierzu zählen beispielsweise das Handling der Adsorptionsmaterialien, ihre Langzeitstabilität (Erhaltung der Beladungskapazität), Verfahrenskosten und die Erweiterung erfolgreicher Ansätze auf neue Anwendungsfelder.

In enger Verbindung mit der Verfahrensentwicklung stehen Herausforderungen im Scale-Up, wie die Sicherstellung der großmaßstäblichen Funktionsfähigkeit des Verfahrens, das Handling sensibler Materialien (z.B. Stabilität bei Einbau) oder die Optimierung der großmaßstäblichen Materialherstellung (Energie, Kosten, Rohstoffbasis, ...).

Für die Adsorptionsmaterialien selbst bestehen Entwicklungsperspektiven beispielsweise in ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit (z.B. Funktionalisierung/Selektivität, Beladungskapazität, Regenerierbarkeit, ...) oder bei der Materialstabilität (z.B. wechselnde Milieubedingungen in der Verfahrensführung).

Die Identifizierung potentiell geeigneter Alternativrohstoffe (z.B. für Aktivkohlen, Biopolymere) verbindet Herausforderungen in der Materialentwicklung mit der Entwicklung geeigneter Herstellungsprozesse. Über alle Arten von Adsorptionsmaterialien hinweg ist die Kosteneffizienz der Herstellungsprozesse ein wichtiges Ziel für künftige Arbeiten.

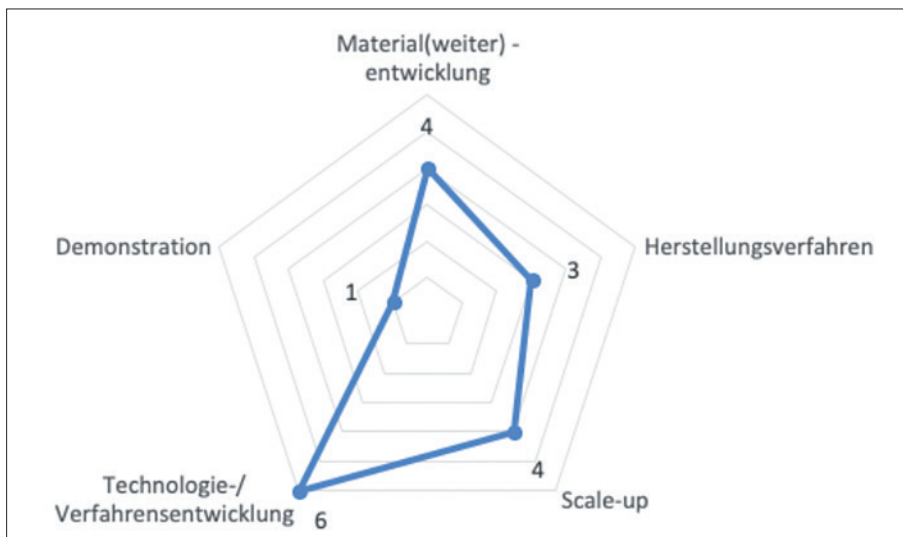


Abb. 5.3: Nennung von Aktionsfeldern für Adsorptionsmaterialien

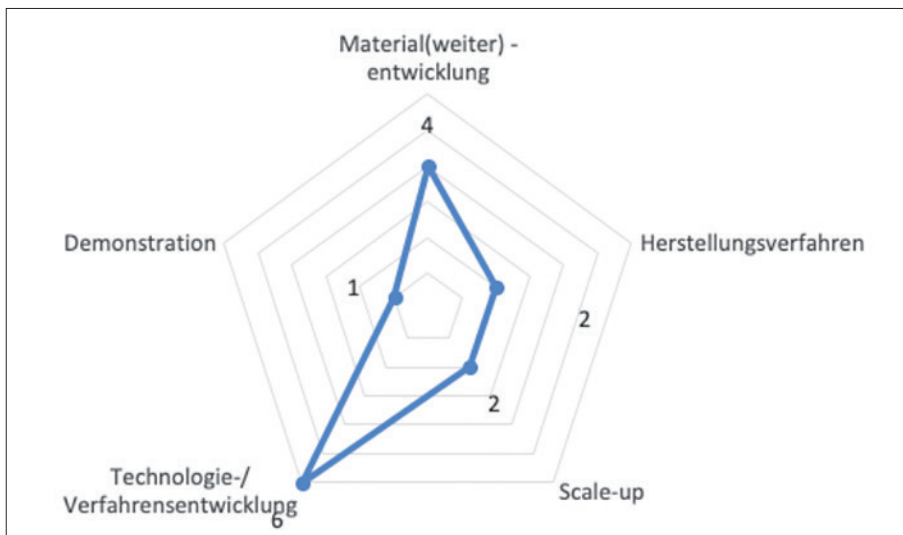


Abb. 5.4: Nennung von Aktionsfeldern für Materialien für oxidative und reduktive Verfahren

### 5.3 MATERIALIEN FÜR OXIDATIVE UND REDUKTIVE VERFAHREN

Bei den Materialien für oxidative und reduktive Verfahren liegt der Schwerpunkt für künftige Aktivitäten auf der Verfahrensentwicklung/-einbindung (s. Abb. 5.4). Sie reichen von der Verfahrensoptimierung (z.B. Erhöhung Raum-/Zeitudsätze), der Nutzung/Wirkung von Nebeneffekten (z.B.  $H_2O_2$  Bildung), über eine Optimierung der Verfahrensführung (z.B. Hydrodynamik, Reaktordesign, Stromdichten) bis hin zur automatisierten Prozesssteuerung/-überwachung. Mit Blick auf die Anwendung kommen beispielsweise Empfehlungen zur Verfahrensauslegung, die Integration in bestehende Anlagen (z.B. Belebungsbecken) und die Entwicklung von Verfahrenskombinationen entsprechend der Anforderungen potentieller Einsatzfelder/Märkte hinzu.

Bei den Materialien für oxidative und reduktive Verfahren zeigen sich Entwicklungsperspektiven für verschiedene mechanische Materialeigenschaften (z.B. Materialstabilität, Integration stromleitender Komponenten). Mit Blick auf die Anwendung stehen Leistungsparameter wie die Langzeitstabilität des Elektrodenmaterials oder die Kapazität des Strometrags im Fokus. Auch die Materialoptimierung für eine Erweiterung der behandelbaren Stoffklassen (z.B. polyfluorierte Kohlenwasserstoffe) ist von Bedeutung.

Bei den Herstellungsverfahren werden vor allem für Elektrodenmaterialien weitere Entwicklungsbedarfe für den Übergang in einen großtechnischen Maßstab (z.B. Produktionsgeschwindigkeit) gesehen.

Für das Scale-up kommen neben den Schnittstellen zu den Herstellungsverfahren für die elektrochemischen Verfahren Herausforderungen wie die Gewährleistung ausreichender Stromdichten in größeren Reaktoren hinzu.

### 5.4 MATERIALIEN FÜR WEITERE ANWENDUNGEN IN DER WASSERTECHNIK

In der Gruppe Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik sind unterschiedlichste Materialansätze zusammengefasst, so dass sich hier keine eindeutigen Schwerpunkte für künftige Aktionsfelder festlegen lassen. Eine leichte Priorisierung liegt auf den Aktionsfeldern Technologie-/Verfahrensentwicklung, Material(weiter)entwicklung und Herstellungsverfahren (s. Abb. 5.5).

Erfordernisse in der Technologie-/Verfahrensentwicklung reichen von der Optimierung im etablierten Anwendungsfeld (z.B. Filterstandzeit, Reststoffentsorgung) bis hin zur Erweiterung der Anwendungsfelder (z.B. Antifoulingbeschichtungen). In einigen Bereichen werden Herausforderungen bei Herstellungsverfahren (z.B. Prozesskomplexität, Optimierung mit Blick auf Materialeigenschaften) und in Verbindung mit dem Scale-Up (z.B. Oberflächenbeschichtung) gesehen. Dort wo komplexere Materialien in Verbindung mit Funktionalisierung im Fokus stehen (z.B. Compositmaterialien) gilt es auch die Materialentwicklung (z.B. Katalysatoroptimierung) weiter fortzuführen.

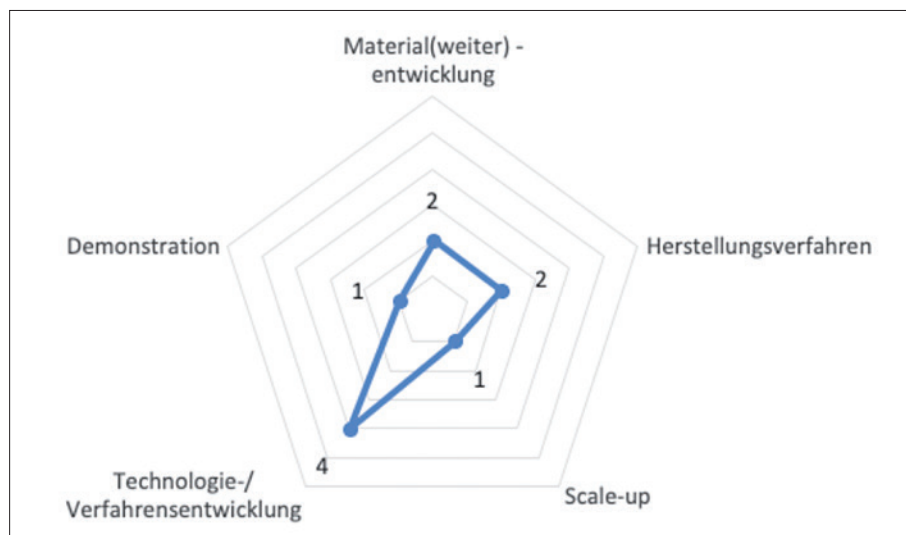


Abb. 5.5: Nennung von Aktionsfeldern für Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik

## 6 Ihr Kontakt zu den Forschungsprojekten

Akronym	Langtitel	FKZ	Laufzeit	Ansprechpartner
<b>Materialien für Membranverfahren</b>				
CNT-Membran	Nanoporöse Membranen hohen spezifischen Flusses aus orientierten CNTs für die energieeffiziente Aufbereitung von Ab- und Prozesswässern der Erdöl- und Erdgasindustrie	03XP0104	01.03.2017 - 31.08.2020	Dr. Matan Beery akvola Technologies GmbH 10623 Berlin
KerWas	Dünnwandige, keramische Membranen angepasster Benetzbarkeit und hoher volumenspezifischer Membranfläche für die Nanofiltration und Membrandestillation zur nachhaltigen Aufbereitung von salzhaltigen Wässern	03XP0096	01.02.2017 - 31.07.2020	Dr.-Ing. Christiane Günther Rauschert Kloster Veilsdorf GmbH 98669 Veilsdorf
MABMEM	Entwicklung einer Material-Auswahlbox zur Herstellung von Hochleistungsmembranen für die Wasseraufbereitung	03XP0043	01.05.2016 - 31.07.2019	Prof. Dr. Martin Weber BASF SE 67056 Ludwigshafen
POLINOM	Polyvalente Trennungen durch flexible Integration aktiver Oberflächen in Membranen	03XP0106	01.03.2017 - 31.08.2020	Dr. Thomas Schiestel Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) 70569 Stuttgart
Rohrmembran	Neue Beschichtungsmethoden zur Herstellung maßgeschneiderter, säurebeständiger Umkehrosmose-Rohrmembranmodule für die Aufbereitung partikelhaltiger Prozesswässer	03XP0100 A-F	01.03.2017 - 31.08.2020	Dr.-Ing. Ralf Wolters VDEh-Betriebsforschungs- institut GmbH 40237 Düsseldorf
<b>Materialien für oxidative &amp; reduktive Verfahren</b>				
ElektroPapier	Entwicklung papierbasierter Elektroden für die mikrobielle, elektrochemische Abwasserreinigung	03XP0041	01.05.2016 - 31.12.2019	Dr. Eva Bitter EnviroChemie GmbH 64380 Rossdorf
RADAR	Radikalische Abwasserreinigung	03XP0107	01.04.2017 - 31.03.2020	Andreas Bulan Covestro Deutschland AG 51365 Leverkusen

Akronym	Langtitel	FKZ	Laufzeit	Ansprechpartner
<b>Adsorptionsmaterialien</b>				
ContaSorb	Entwicklung von Kohlenstoff-Eisen-Komposit-Materialien für die Sorption und Zerstörung von halogenierten Grundwasserschadstoffen	03XP0090	01.02.2017 - 31.08.2020	Dr. Katrin Mackenzie Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) 04318 Leipzig
Ferrosan	Entwicklung hochvernetzter Biopolymere auf Basis von Glucan-Chitin-Komplexen zur Schwermetallabscheidung insbesondere der Eisenadsorption	03XP0048	01.04.2016 - 30.09.2019	Prof. Dr. Andreas Heppe BioLog Heppe GmbH 06188 Landsberg
ZeroTrace	Neue Adsorptionsmaterialien und Regenerationsverfahren zur Elimination von Spurenstoffen in kommunalen und industriellen Kläranlagen	03XP0098	01.02.2017 - 31.07.2020	Catrin Bornemann Wupperverband 42289 Wuppertal
<b>Materialien für weitere Anwendungen in der Wassertechnik</b>				
ANTIPARAM	Antifoulingkonzepte für Mehrparameter-Analysemess- und Wasserentkeimungssysteme	03XP0044	01.05.2016 - 31.07.2019	Michael Boer -4H- Jena engineering GmbH 07745 Jena
KERAMESCH	Entwicklung und Erprobung von Keramik-Metall-Schwabekörpern aus Kompositwerkstoffen zur effizienten reduzierenden Schadstoffelimination aus Abwässern in fluidised-bed-Reaktoren bei hohen Durchsätzen	03XP0105	01.04.2017 - 31.09.2020	Hans-Jürgen Friedrich Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) 01109 Dresden
OEMP	Optimierte Materialien und Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik aus dem Wasserkreislauf	03XP0045	01.04.2016 - 30.09.2018	Dipl.-Ing. Markus Knefel GKD - Gebr. Kufferath AG 52353 Düren
<b>Vernetzungs- und Transferprojekt</b>				
MachWasPlus	Vernetzungs- und Transferprojekt MachWasPlus	03XP0087	01.12.2016 - 30.09.2021	Dr. Thomas Track DECHEMA e.V. 60486 Frankfurt am Main

# Anhang

Zu diesen Sustainable Development Goals leisteten die MachWas-Entwicklungen einen Beitrag	
<b>Ziel 3</b>	<b>Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern</b>
Unterziel 3.1	Bis 2030 die weltweite Müttersterblichkeit auf unter 70 je 100.000 Lebendgeburten senken
Unterziel 3.9	Bis 2030 die Zahl der Todesfälle und Erkrankungen aufgrund gefährlicher Chemikalien und der Verschmutzung und Verunreinigung von Luft, Wasser und Boden erheblich verringern
<b>Ziel 6</b>	<b>Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten</b>
Unterziel 6.a	Bis 2030 die internationale Zusammenarbeit und die Unterstützung der Entwicklungsländer beim Kapazitätsaufbau für Aktivitäten und Programme im Bereich der Wasser- und Sanitärversorgung ausbauen, einschließlich der Wassersammlung und -speicherung, Entsalzung, effizienten Wassernutzung, Abwasserbehandlung, Wiederaufbereitungs- und Wiederverwendungstechnologien
Unterziel 6.1	Bis 2030 den allgemeinen und gerechten Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser für alle erreichen
Unterziel 6.3	Bis 2030 die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe, Halbierung des Anteils unbehandelten Abwassers und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und gefahrlosen Wiederverwendung weltweit verbessern
Unterziel 6.4	Bis 2030 die Effizienz der Wassernutzung in allen Sektoren wesentlich steigern und eine nachhaltige Entnahme und Bereitstellung von Süßwasser gewährleisten, um der Wasserknappheit zu begegnen und die Zahl der unter Wasserknappheit leidenden Menschen erheblich zu verringern
Unterziel 6.6	Bis 2020 wasserverbundene Ökosysteme schützen und wiederherstellen, darunter Berge, Wälder, Feuchtgebiete, Flüsse, Grundwasserleiter und Seen
<b>Ziel 7</b>	<b>Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern</b>
Unterziel 7.2	Bis 2030 den Anteil erneuerbarer Energie am globalen Energiemix deutlich erhöhen
Unterziel 7.3	Bis 2030 die weltweite Steigerungsrate der Energieeffizienz verdoppeln
<b>Ziel 9</b>	<b>Eine widerstandsfähige Infrastruktur aufbauen, inklusive und nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen</b>
Unterziel 9.a	Die Entwicklung einer nachhaltigen und widerstandsfähigen Infrastruktur in den Entwicklungsländern durch eine verstärkte finanzielle, technologische und technische Unterstützung der afrikanischen Länder, der am wenigsten entwickelten Länder, der Binnenentwicklungsländer und der kleinen Inselentwicklungsländer erleichtern
<b>Ziel 12</b>	<b>Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen</b>
Unterziel 12.4	Bis 2020 einen umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen erreichen und ihre Freisetzung in Luft, Wasser und Boden erheblich verringern, um ihre nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß zu beschränken

<b>Ziel 14</b>	<b>Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen</b>
Unterziel 14.a	Die wissenschaftlichen Kenntnisse vertiefen, die Forschungskapazitäten ausbauen und Meerestechnologien weitergeben, unter Berücksichtigung der Kriterien und Leitlinien der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission für die Weitergabe von Meerestechnologie, um die Gesundheit der Ozeane zu verbessern und den Beitrag der biologischen Vielfalt der Meere zur Entwicklung der Entwicklungsländer, insbesondere der kleinen Inselentwicklungsländer und der am wenigsten entwickelten Länder, zu verstärken
Unterziel 14.1	Bis 2025 alle Arten der Meeresverschmutzung, insbesondere durch vom Lande ausgehende Tätigkeiten und namentlich Meeresmüll und Nährstoffbelastung, verhüten und erheblich verringern
Unterziel 14.2	Bis 2020 die Meeres- und Küstenökosysteme nachhaltig bewirtschaften und schützen, um unter anderem durch Stärkung ihrer Resilienz erhebliche nachteilige Auswirkungen zu vermeiden, und Maßnahmen zu ihrer Wiederherstellung ergreifen, damit die Meere wieder gesund und produktiv werden
<b>Ziel 15</b>	<b>Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Wälder nachhaltig bewirtschaften, Wüstenbildung bekämpfen, Bodendegradation beenden und umkehren und dem Verlust der biologischen Vielfalt ein Ende setzen</b>
Unterziel 15.1	Bis 2020 im Einklang mit den Verpflichtungen aus internationalen Übereinkünften die Erhaltung, Wiederherstellung und nachhaltige Nutzung der Land- und Binnensüßwasser, Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen, insbesondere der Wälder, der Feuchtgebiete, der Berge und der Trockengebiete, gewährleisten

## Abkürzungsverzeichnis

AFS	abfiltrierbare Stoffe
AFS63	abfiltrierbare Stoffe kleiner 63 µm
AK	Aktivkohle
AOP	Advanced Oxidation Processes
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
BDD	bordotierte Diamantelektrode
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
GDE	Gasdiffusionselektrode
GP	Graphit-Polymer Kathode
MBZ	mikrobielle Brennstoffzelle
MET	mikrobielle elektrochemische Technologie
MEZ	mikrobiellen Elektrolysezelle
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PFT	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen
TRL	Technology Readiness Level
VC	Vinylchlorid

