

TEXTE

86/2014

Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer

Kurzbericht

TEXTE 86/2014

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 21 225
UBA-FB 002037/KURZ

Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer

Kurzbericht

von

Thomas Hillenbrand, Felix Tettenborn, Eve Menger-Krug,
Frank Marscheider-Weidemann
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI),
Karlsruhe

Stephan Fuchs, Snezhina Toshovski, Steffen Kittlaus
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und
Gewässerentwicklung, Karlsruhe

Steffen Metzger, Imee Tjoeng
Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS), Stuttgart

Paul Wermter
Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen
(FiW) e. V., Aachen

Michael Kersting
Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik (RUFIS) e.V. ,
Bochum

Christian Abegglen
Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" VSA, Zürich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI),
Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe

in Zusammenarbeit mit :

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung,
Karlsruhe

Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS), Stuttgart

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH e. V., Aachen

Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik (RUFIS) e.V. , Bochum

Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" VSA, Zürich

Abschlussdatum:

2014

Redaktion:

Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden
Cindy Mathan

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmen-zur-verniedrigung-des-eintrages-von-0>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3712 21 225 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis.....	3
1 Hintergrund	4
2 Methodik.....	5
3 Auswahl gewässerrelevanter Mikroschadstoffe	6
4 Ausarbeitung exemplarischer Stoffflussanalysen und Emissionsmuster.....	6
5 Stoffeintragsmodellierung mit MoRE	8
6 Ableitung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung des Stoffeintrags in die Gewässer	9
7 Effizienz einer erweiterten Abwasserbehandlung in kommunalen Kläranlagen in Deutschland	13
8 Kosten einer erweiterten Abwasserbehandlung in kommunalen Kläranlagen	15
9 Umgang mit Mikroschadstoffen in der Schweiz	19
10 Untersuchung von Maßnahmenkombinationen mit hoher Wirkung und Kosteneffizienz.....	20
11 Modellierung der stoffspezifischen Maßnahmenkombinationen am Beispiel des Neckareinzugsgebietes	22
12 Empfehlungen für Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen von Seiten des Bundes	25
13 Ausblick	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 a und b: Emissionsorientierte Stoffflussdiagramme für a) Terbutryn und b) Diclofenac	7
Abbildung 2: Regressionsanalyse der Literaturangaben.....	18
Abbildung 3: Eintragsreduktionspotenzial der modellierten Maßnahmen für Diclofenac	24
Abbildung 4: Ergebnis der modellierten Maßnahmen für die Diclofenac-Gewässerqualität	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betrachtete Ansatzpunkte quellenorientierter, dezentraler oder „End-of-pipe“-Maßnahmen zur Emissionsminderung	10
Tabelle 2: Maßnahmensteckbrief Terbutryn.....	11
Tabelle 3: Maßnahmensteckbrief Arzneistoffe	12
Tabelle 4: Literaturquellen der Kostenangaben und die dargestellten Verfahren	16
Tabelle 5: Spezifische Kosten und berechnete Jahreskosten für einen flächendeckenden Ausbau der 4. Reinigungsstufe in Deutschland ab Größenklasse 3	19
Tabelle 6: Quellenorientierte Maßnahmen: Notwendigkeit und Grenzen	20
Tabelle 7: Stoffspezifische Maßnahmen zur Reduktion von Arzneistoffen	21

1 Hintergrund

In der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens im Bereich der Wasserpolitik ist in Artikel 16 „Strategien gegen die Wasserverschmutzung“ festgelegt, dass spezifische Maßnahmen zur Bekämpfung der Wasserverschmutzung durch relevante Schadstoffe oder Schadstoffgruppen umzusetzen sind. Über die Richtlinie 2008/105/EG wurden für 33 prioritäre Stoffe bzw. Stoffgruppen Umweltqualitätsnormen (UQN) als Zielgrößen zur Erreichung des guten chemischen Zustandes der Oberflächengewässer festgelegt. Bei Überschreitung dieser UQN sind Maßnahmen zur Verminderung bzw. Vermeidung von Emissionen, Einleitungen und Verlusten dieser Stoffe durch die Mitgliedstaaten zu implementieren. Über die Richtlinie 2013/39/EG zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG wurden die bisherigen UQN teilweise angepasst sowie zwölf neue Stoffe als prioritäre Stoffe in die Liste mit aufgenommen. Zusätzlich wurde vorgegeben, eine Beobachtungsliste für Stoffe (u. a. verschiedene Arzneistoffe) einzuführen, die ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die aquatische Umwelt aufweisen und für die bislang – insbesondere aufgrund von analytischen Schwierigkeiten – eine europaweite Relevanz nicht belegt werden kann, obwohl die Produktions- und Verbrauchsmengen erhebliche Einträge in Gewässer nahelegen. Über die Beobachtungsliste sollen europaweit vergleichbare Überwachungsdaten für diese Stoffe generiert werden. Die Federführung für die Stoffauswahl und die Analytik hat das gemeinsame Forschungszentrum der Kommission (JRC)¹. Bei Bestätigung einer europaweiten Belastung sollen die entsprechenden Stoffe im Rahmen der regelmäßigen Aktualisierung in die Liste der prioritären Stoffe aufgenommen werden.

Zur Verminderung und Vermeidung der Emissionen der relevanten Stoffe sind sowohl Maßnahmen an der Quelle (Stoffvermeidung / produktionsintegrierter Umweltschutz) als auch im Emissionspfad nachgelagerte Maßnahmen denkbar (z. B. an den eigentlichen Eintragsstellen in die Gewässer wie Kläranlagen oder Misch- und Regenwasser-Überläufe). Bei der Auswahl von geeigneten Maßnahmen spielen die Wirksamkeit und die damit verbundenen Kosten eine wesentliche Rolle.

Für viele Mikroschadstoffe, wie z.B. Inhaltsstoffe von Haushaltchemikalien, Einsatzstoffe in Gewerbe und Industrie (insbesondere bei kleinen und mittleren Betrieben), Arzneistoffe und Biozide stellt der Eintrag über das kommunale Abwassersystem den dominierenden Eintragspfad in die Gewässer dar. Vor diesem Hintergrund war das übergreifende Projektziel, geeignete Maßnahmen bzw. Kombinationen von Maßnahmen und deren Randbedingungen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen über das kommunale Abwassersystem in die Gewässer zu erarbeiten, die sich durch eine hohe Kosteneffizienz auszeichnen. Für insgesamt zwölf ausgewählte Stoffe und Stoffgruppen aus diesem Bereich wurden die emissionsrelevanten Stoffflüsse analysiert. Für einige der Stoffe wurde zusätzlich der Stoffeintrag in die Gewässer modelliert. Auf dieser Basis wurden relevante Emissionsminderungsmaßnahmen identifiziert und bewertet. Anschließend erfolgte die exemplarische Untersuchung des Zusammenwirkens von quellenbezogenen als auch nachgeschalteten Maßnahmen einschließlich deren Wirksamkeit und Kosteneffizienz und die Ableitung zielgerichteter Maßnahmenkombinationen. Bei den Untersuchungen konnten die Erfahrungen aus der Schweiz vor allem hinsichtlich einer 4. Reinigungsstufe mit ausgewertet werden. Entsprechend der grundsätzlichen Ausrichtung des Projektes auf das kommunale Abwassersystem sowie auf organische Mikroschadstoffe wurden mögliche Maßnahmen in anderen Verursacherbereichen wie z. B. der Landwirtschaft ausgeklammert.

¹ Die Gemeinsame Forschungsstelle (Joint Research Centre, JRC) als wissenschaftliche Dienst der Europäischen Kommission dem Kommissariat für Wissenschaft und Forschung zugeordnet und unterstützt mit seinen Arbeiten die Entscheidungsprozesse auf europäischer Ebene (<http://www.euburo.de/jrc.htm>)

2 Methodik

Zur Identifizierung der relevanten Eintragungspfade für die ausgewählten Mikroschadstoffe wurden emissionsorientierte Stoffflussanalysen eingesetzt, in deren Rahmen die Herstellungs-, Nutzungs- und Nachnutzungsphase mit den jeweiligen Input- und Output-Strömen betrachtet wurden². Die notwendigen stoffspezifischen Informationen und Daten beruhen im Wesentlichen auf Fachliteratur, verfügbaren Datenbanken und Statistiken sowie Expertengesprächen. Schwerpunkt der Analysen bildeten die spezifischen Emissionsmuster der Stoffe. Stoffflussdaten, vor allem zu Herstellungs- und Importmengen, lagen zum Teil nur lückenhaft vor. Zur Berechnung der über die verschiedenen Pfade (Punkt- und diffuse Quellen) eingetragenen Schadstoffmengen wurde für einen Teil der Stoffe zusätzlich das Modellierungswerkzeug MoRE³ (Modeling of Regionalized Emissions) und die Methode der Regionalisierten Pfadanalyse genutzt. Das MoRE-System erlaubt weiterhin über die Abbildung von Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen eine Bewertung von Handlungsoptionen und Reduktionspotenzialen. Hinsichtlich des Stoffeintrags über kommunale Kläranlagen können dazu in Abhängigkeit von vorhandenen Verfahrensstufen und Anlagengröße zielgerichtete Maßnahmen im Modell implementiert werden. Als Modellierungsraum wurde das Einzugsgebiet des Neckars gewählt.

Die betrachteten Emissionsminderungsmaßnahmen wurden zum einen von den identifizierten Eintragungspfaden abgeleitet, zum anderen wurden Arbeiten auf Flussgebietsebene und im Bereich des Meeresschutzes sowie weitere Veröffentlichungen berücksichtigt. Zur Beschreibung von Kosten und Wirkung der 4. Reinigungsstufe wurden die Erfahrungen aus den aktuellen Arbeiten in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und in der Schweiz sowie ergänzende Literaturdaten ausgewertet. Den Kostenberechnungen ist ein einheitliches Verfahren nach den Kostenvergleichsrechnungen(KVR)-Leitlinien zugrunde gelegt. Bei unterschiedlichen Währungen und Bezugsjahren wurden entsprechende Preiskorrekturen vorgenommen.

² vgl. European Commission (2012): Guidance Document No. 28 Technical Guidance on the Preparation of an Inventory of Emissions, Discharges and Losses of Priority and Priority Hazardous Substances. Technical Report - 2012 - 058 <http://bookshop.europa.eu/en/technical-guidance-on-the-preparation-of-an-inventory-of-emissions-discharges-and-losses-of-priority-and-priority-hazardous-substances-pbKHAN12028/>

und Hillenbrand, T.; Toussaint, D.; Böhm, E.; Fuchs, S.; Scherer, U.; Rudolphi, A.; Hoffmann, M. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. Texte 19/05, Umweltbundesamt, Dessau.

³ <http://iswww.iwg.kit.edu/MoRE.php>:

Fuchs, Stephan; Scherer, Ulrike; Wander, Ramona; Behrendt, Horst; Venohr, Markus; Opitz, Dieter et al. (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS. Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. 1. Aufl. 1 Band. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 45/10)

3 Auswahl gewässerrelevanter Mikroschadstoffe

Um eine Grundlage für die Auswahl von repräsentativen, gewässerrelevanten Mikroschadstoffen mit Haupteintragspfad kommunales Abwassersystem für die weitere vertiefende Untersuchung zu erhalten, erfolgte eine erste Übersicht basierend auf den verschiedenen nationalen und internationalen, gewässerrelevanten Schadstofflisten⁴. Aus dieser umfassenden Zusammenstellung wurden auf Basis verschiedener Kriterien (u. a. aktuelle Produktion, Verwendung und Belastungssituation in Deutschland, Datenverfügbarkeit sowie Relevanz für den Eintrag über kommunale Kläranlagen) für Deutschland relevante Schadstoffe abgeleitet. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden folgende zwölf Stoffe mit jeweils sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen und entsprechenden Emissionsmustern sowie unterschiedlichem Regulierungsstand in die weiteren Arbeiten einbezogen: drei Biozide (Terbutryn, Triclosan, TBT), fünf Arzneistoffe (Diclofenac, Ibuprofen, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Iomeprol) und vier weitere Stoffe/Stoffgruppen (PAK, Nonylphenol, PFOS, HBCDD).

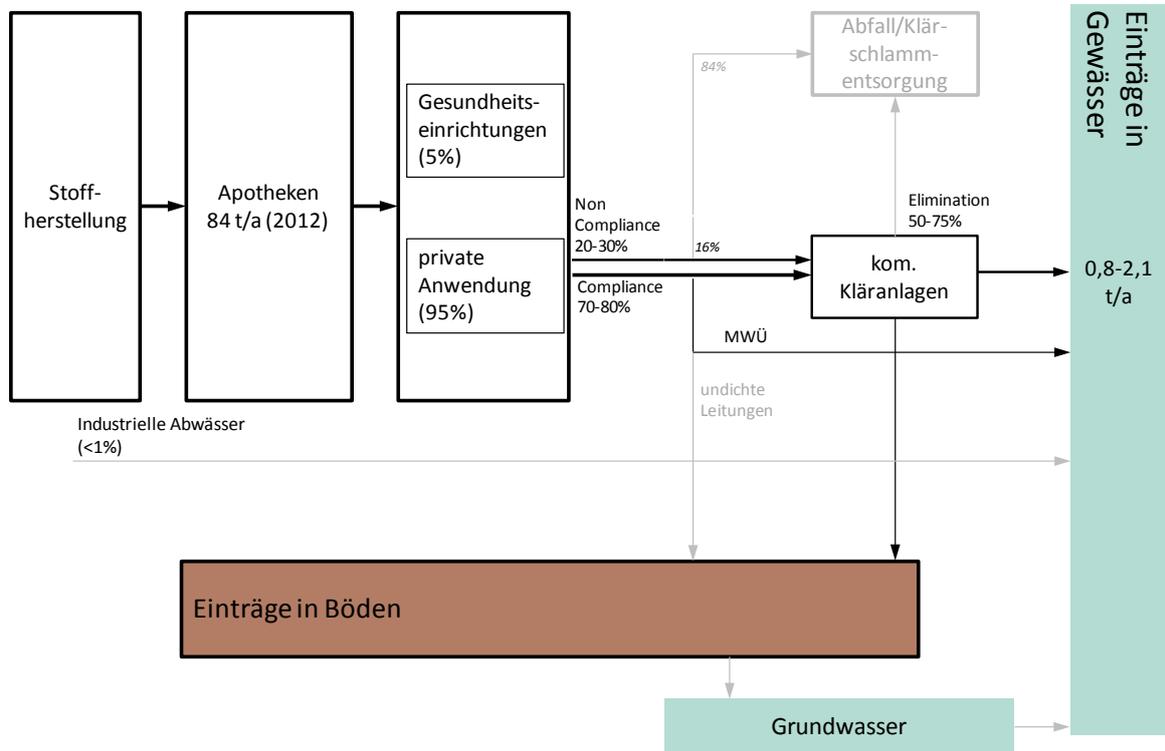
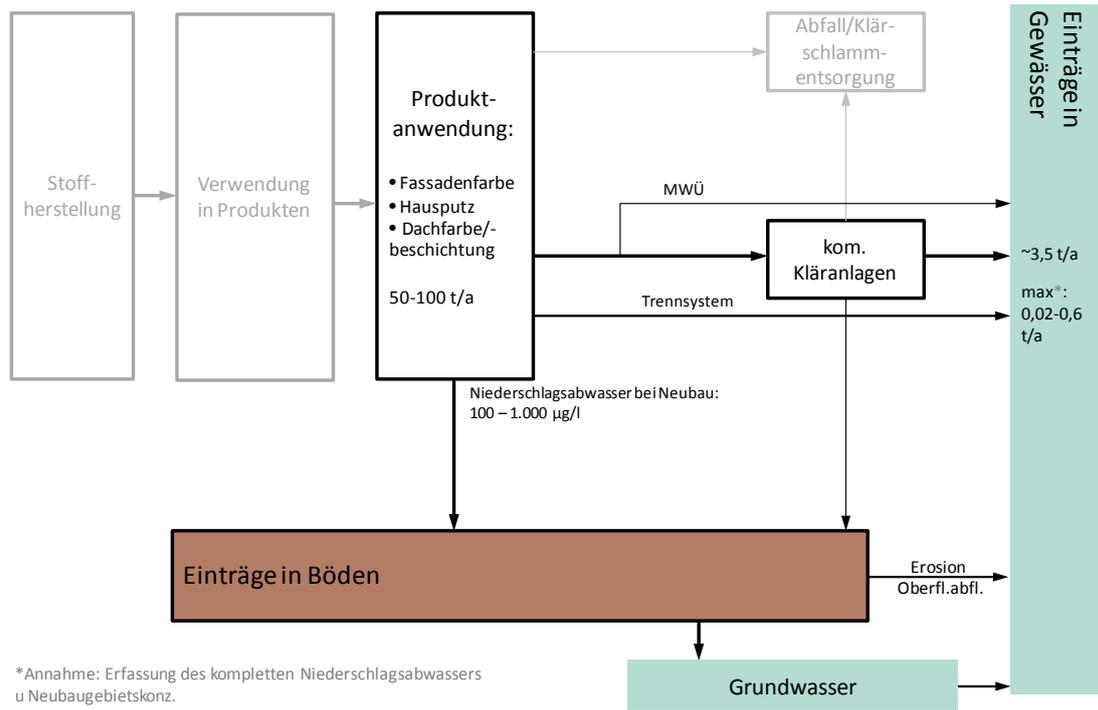
4 Ausarbeitung exemplarischer Stoffflussanalysen und Emissionsmuster

Für die ausgewählten Schadstoffe zeigen emissionsorientierte Stoffflussanalysen die hinsichtlich der resultierenden Umweltbelastungen besonders relevanten Stoffflüsse aus den Bereichen Stoffherstellung, der Verwendung des jeweiligen Stoffes in Produkten, der Stoff- bzw. Produkthanwendung sowohl im professionellen wie auch im Haushaltsbereich und der nachfolgenden Entsorgung. Die Ergebnisse sind in Stoffflussdiagrammen mit einem Schwerpunkt auf den gewässerrelevanten Emissionspfaden zusammengefasst. Beispielfhaft sind in Abbildung 1 die Ergebnisse für Terbutryn und Diclofenac dargestellt.

Vorgelagert zur Stoffeintragsmodellierung können diese Stoffflussanalysen zur Identifizierung relevanter Anwendungsbereiche und Eintragspfade genutzt werden und dienen gleichzeitig als Grundlage für die Ableitung geeigneter kosteneffizienter Maßnahmen zur Reduktion von Schadstoffeinträgen in die Gewässer.

⁴ u. a.: Liste der gefährlichen prioritären und der prioritäre Stoffe nach EU Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG), Tochterrichtlinie 2008/105/EG und Richtlinie 2013/39/EG; Stoffe der Anlage 5 (flussgebietspezifische Schadstoffe) und Anlage 7 (andere Stoffe) der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) sowie OGewV Kandidatenstoffe (aus der öffentlichen Diskussion); Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs); HELCOM BSAP und CORESET (Kernindikatoren und Schwellenwerte für die Schadstoffe der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie mit Kandidatenstoffen, 2008/56/EG, MSRL); OSPAR, Liste von Stoffen für prioritäre Maßnahmen, OSPAR (2004) und OSPAR ICG EAC (2012)

Abbildung 1 a und b: Emissionsorientierte Stoffflussdiagramme für a) Terbutryn und b) Diclofenac



5 Stoffeintragsmodellierung mit MoRE

Zur Quantifizierung und Bewertung der Relevanz der Eintragungspfade dient eine Regionalisierte Pfadanalyse mit dem Modellierungswerkzeug MoRE.

Im Neckar-Einzugsgebiet wurde beispielhaft die Eintragungssituation für die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe in Form des Summenparameters PAK₁₆ der EPA⁵, Nonylphenol, Diclofenac, Ibuprofen, Iomeprol und Sulfamethoxazol ermittelt. Dazu dient eine große Datenbasis mit allgemeinen und stoffspezifischen Eingangsdaten. Je nach Stoff bzw. Stoffgruppe werden unterschiedlich komplexe Berechnungsansätze verwendet. Die Bilanzierungsergebnisse werden für die Jahre 2008–2010 auf Einzeljahresbasis modelliert und anschließend zu einem Mittelwert für diese Periode zusammengefasst. Damit die Ergebnisse der Einzelstoffe in Bezug auf die Gewässersituation untereinander vergleichbar werden, wird zur Risikobewertung ein Risikoquotient (RQ) herangezogen. Dieser Quotient wird über die berechnete Umweltkonzentration (modellerte, entlang des Abflussbaumes aufsummierte Fracht geteilt durch den mittleren Gebietsabfluss am Auslass⁶) und ein Qualitätskriterium, d.h. ein Zielwert (wie z. B. UQN oder PNEC), bei dem keine negativen Effekte zu erwarten sind, berechnet. Als Ergebnis bedeutet ein $RQ < 1$, dass die Umweltkonzentrationen unterhalb des Zielwertes ist und damit kein Umweltrisiko vorliegt, ein $RQ > 1$ zeigt dagegen, dass ein Risiko besteht. Bei Nonylphenol wurde die Umweltqualitätsnorm verwendet, bei den Arzneistoffen Diclofenac, Ibuprofen und Sulfamethoxazol ihre PNEC(predicted no effect concentration)-Werte. Für PAK₁₆ und für das Röntgenkontrastmittel Iomeprol konnte kein geeignetes Qualitätskriterium gefunden werden.

Die Modellierung des Ist-Zustands ergibt einen Gesamteintrag ins Gewässer von 584 kg/a für PAK₁₆, von 249 kg/a für Nonylphenol, von 756 kg/a für Diclofenac, von 1.132 kg/a für Ibuprofen, von 7.826 kg/a für Iomeprol und 489 kg/a für Sulfamethoxazol. Der Vergleich der modellierten mit den tatsächlich gemessenen Gewässerfrachten für die PAK₁₆ zeigt, dass die modellierten Frachten in einem plausiblen Wertebereich liegen. Bei Nonylphenol ist die Datenlage schwierig, da die gemessenen Konzentrationen im Gewässer meistens unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen und somit keine Frachtberechnung möglich ist. Für die Quantifizierung der Arzneistoffeinträge wurde ein einwohnerbezogener Ansatz angewendet, der über die Verbrauchsmenge bestimmt wird und sich auch in anderen Untersuchungen bewährt hat. Die betrachteten Arzneistoffe sind grundsätzlich gut modellierbar, sodass trotz fehlendem Vergleich mit gemessenen Gewässerfrachten zu erwarten ist, dass die modellierten Gewässerkonzentrationen im Bereich der tatsächlichen Umweltkonzentrationen liegen. Bei der Abschätzung der Auswirkungen auf die Gewässerqualität lässt sich bezüglich PAK₁₆ und Iomeprol aufgrund der fehlenden Qualitätskriterien keine Aussage treffen. Bei Nonylphenol werden ausschließlich Risikoquotienten kleiner eins berechnet; demzufolge sind keine negativen Effekte zu erwarten. Während für Ibuprofen die berechneten Konzentrationen weit unterhalb des Qualitätskriteriums liegen, zeigt sich für Diclofenac und Sulfamethoxazol ein gemischtes Bild, indem an vielen Gebietsauslässen ein Risikoquotient größer eins berechnet wird.

Als besonders relevant hat sich das biologisch schlecht abbaubare Analgetikum Diclofenac erwiesen. Dieser Stoff eignet sich besonders gut als Indikator für den Abwasserpfad, da Einträge über kommunale Kläranlagen knapp 98 % des Gesamteintrags ausmachen (2 % Kanalisationssysteme). Der modellierte mittlere Gesamteintrag in die Oberflächengewässer des Neckar-Einzugsgebiets beträgt für den Zeitraum 2008–2010 756 kg/a. Um eine Aussage machen zu können, ob die eingetragenen Frachten Umweltqualitätsziele gefährden, werden an wichtigen Gebietsauslässen die entlang des Abflussbaums aufsummierten Einträge in Konzentrationen mit Hilfe des mittlere Abfluss (MQ) als hydrologische Kenngröße umgerechnet. Eine auf Messwerten

⁵ Berücksichtigt werden die 16 „EPA-PAK“ (PAK₁₆), d.h. die 16 Einzelsubstanzen, die von der amerikanische Bundesumweltbehörde ([US EPA](#)) aus den mehrere hundert zählenden PAK-Einzelverbindungen aufgrund ihrer besonderen Relevanz ausgewählt wurden.

⁶ Dies ist eine Näherung für die Jahresdurchschnittskonzentration, die bei der Überwachung der Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm benötigt wird.

beruhende Abschätzung der Gewässerfrachten durch die LUBW Karlsruhe⁷ kommt zu einem vergleichbaren Ergebnis, sodass sowohl die Einträge als auch die rückgerechneten Gewässerkonzentrationen als plausibel angenommen werden können. Zur Risikoabschätzung über den Risikoquotienten wird die modellierte Gewässerkonzentration über den als Qualitätskriterium verwendeten PNEC-Wert von Diclofenac (0,1 µg/l) normiert. Die Situation im Ist-Zustand ergibt an 45 von insgesamt 76 betrachteten Gebietsauslässen eine bis zu 8-fache Überschreitung des Umweltqualitätskriteriums. Wie in Abbildung 4 visualisiert, erfolgt die Zielwertverfehlung hauptsächlich entlang des Hauptstroms und in der Nähe von Ballungsräumen wie Stuttgart, Backnang, Reutlingen, Pforzheim und Heidelberg. Für die Oberläufe der Neckar-Nebenflüssen ergeben sich häufig $RQ < 1$. Demzufolge zeigt der Ist-Zustand hinsichtlich der Gewässerbelastungen mit Diclofenac einen deutlichen Handlungsbedarf.

6 Ableitung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung des Stoffeintrags in die Gewässer

Auf Basis der Ergebnisse der Stoffeintragsmodellierung und der erarbeiteten Emissionsmuster wurden für die ausgewählten Schadstoffe Maßnahmen zur Verminderung des Stoffeintrags in die Gewässer abgeleitet und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Kosten bewertet.

Auch wenn grundsätzlich die Verringerung der Emissionen an der Quelle als erster Schritt besonders sinnvoll und effektiv erscheint – da die Maßnahme beim Verursacher ansetzt und Schadstoffe in diesem Fall erst gar nicht in die Umwelt gelangen können, sodass auch langfristig keine indirekten Belastungen zu befürchten sind – ist stoffspezifisch im Einzelfall zu hinterfragen, inwieweit durch solche Maßnahmen die Emissionen hinreichend reduziert werden können. Möglicherweise stehen keine ausreichend effizienten Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung oder der Eintrag des Stoffs in die Umwelt kann aufgrund bisheriger, mit langfristigen Emissionen verbundener Anwendungen kaum begrenzt werden (z. B. bei der Anwendung verschiedener Biozide in Bauprodukten). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Stoffregelungen bis hin zu Herstellungs- und Einsatzverboten in die Regelungskompetenz der EU fallen und nationale Lösungen daher nur sehr eingeschränkt möglich sind. Gegebenenfalls bestehen auch bereits hohe Belastungen in anderen Umweltmedien (wie z. B. Sedimenten), die für weiter anhaltende Einträge in den Wasserpfad verantwortlich sind. Ein weiterer Bewertungsaspekt bei der Gegenüberstellung von Emissionsminderungsmaßnahmen ist die Berücksichtigung von Zusatzeffekten, wie z. B. die Reduzierung von weiteren Nähr- oder Schadstoffemissionen bei einer weitergehenden Abwasserreinigung in kommunalen Kläranlagen. Um Aussagen über den zukünftigen Handlungsbedarf machen zu können, ist außerdem die Unterscheidung zwischen bereits eingeleiteten bzw. in der Umsetzung stehenden sowie neuen, zusätzlichen Maßnahmen relevant.

Für die Auswahl der näher betrachteten Maßnahmen liegen zusammengefasst folgende Überlegungen zugrunde:

- ▶ Die Maßnahmen sollen eine ausreichende Wirksamkeit hinsichtlich des damit erreichbaren Emissionsminderungspotenzials ausweisen.
- ▶ Bereits eingeleitete Maßnahmen und damit verbundene absehbare Veränderungen der Emissionssituation sind soweit möglich zu berücksichtigen.

⁷ Spurenstoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg - Ergebnisse der Beprobung von Fließgewässern und Kläranlagen 2012/2013. Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg Stuttgart; LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/243039/>

- ▶ Maßnahmen zur Umsetzung des Verursacherprinzips entsprechen den grundsätzlichen Prinzipien der Umweltpolitik und besitzen damit eine herausgehobene Bedeutung.
- ▶ Gleichzeitig ist die Erfordernis einer hohen Kosten-Effizienz (bzw. Kosten-Wirksamkeit) zu berücksichtigen.
- ▶ Es sind sowohl quellenorientierte als auch nachgeschaltete Maßnahmen zu berücksichtigen.
- ▶ Entsprechend der Schwerpunktsetzung des Gesamtprojekts auf Einträge durch das kommunale Abwassersystem wird der Bereich Landwirtschaft bei der Analyse ausgeklammert.

Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Ansatzpunkte von Maßnahmen für die betrachteten Mikroschadstoffe bzw. Schadstoffgruppen. Informationsmaßnahmen sind i. d. R. quellenorientiert und setzen vorwiegend bei den Verursachern der Umweltbelastungen an. Sie sind deshalb als Untergruppe diesem Bereich zugeordnet.

Die erarbeiteten Maßnahmen wurden für die weitergehenden Projektarbeiten, insbesondere für die Identifizierung kosteneffizienter Maßnahmenkombinationen, hinsichtlich folgender Kriterien bewertet:

- ▶ Status bzw. Stand der Umsetzung,
- ▶ Wirkung,
- ▶ Kosten,
- ▶ technische Einsatzfähigkeit,
- ▶ sekundäre Umwelteffekte.

Tabelle 1: Betrachtete Ansatzpunkte quellenorientierter, dezentraler oder „End-of-pipe“-Maßnahmen zur Emissionsminderung

Handlungsebene	Ansatzpunkte
Maßnahmen an der Quelle	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Änderung im Anwendungsbereich ▶ Produktveränderungen ▶ Stoffsubstitution / Ersatzstoffe ▶ geregelte Entsorgung als vorbeugende Maßnahme, um Einträge in die Gewässer im Vorfeld zu vermeiden
- Informationsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Informationskampagne für die Bevölkerung ▶ Weiterbildung / Information des anwendenden Fachpersonals
Dezentrale Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Indirekteinleiter (Gewerbe, Gesundheitseinrichtungen) ▶ dezentrale Behandlung von Niederschlagswasser (Gebäude-, Quartiersebene)
Nachgeschaltete/„End-of-pipe“ Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ kommunale Kläranlage (4. Reinigungsstufe) ▶ Kanalnetz: <ul style="list-style-type: none"> - Behandlung Niederschlagswasser - Behandlung Mischwasser

Stoffspezifisch werden die Ergebnisse in Maßnahmensteckbriefe zusammengefasst (vgl. beispielhaft Tabelle 2 und Tabelle 3). Auf Basis der Einzelkriterien erfolgt eine Ableitung des aktuellen Handlungsbedarfs.

Konkrete Beispiele quellenbezogener Maßnahmen für die ausgewählten Stoffe sind z. B. die Stoffsubstitution, oder Verkapselung bei der Verwendung von Terbutryn im Baubereich, Einfuhrbeschränkungen für Textilien, die mit Nonylphenolethoxylaten (NPEO) behandelt wurden.

Tabelle 2: Maßnahmensteckbrief Terbutryn

Maßnahmen:	an der Quelle: a) Stoff- substitution b) Ver- kapselung c) bauliche Maßnahmen	Informations- maßnahmen	Dezentrale Maßnah- men: gezielte dezentrale Regenwasser- behandlung	End of pipe: a) verbesserte zentrale Regenwasser-behandlung b) verbesserte kommunale Abwasserbehandlung
Status	z.T. ✓	z.T. ✓	! (z.T. F&E-Bedarf)	! (z.T. F&E-Bedarf)
Wirkung	+	+	+	+
Kosten (bzw. Kosten- Wirksamkeit)	gering	gering	gering	Einzelstoffspezifisch hoch
Technische Ein- satzfähigkeit	✓	✓	✓ (F&E-Bedarf)	F&E-Bedarf ✓
sekundäre Um- welteffekte	a) Bewertung der Ersatzstoffe notwendig		+ (andere Schadstoffe)	+ (andere Schadstoffe) + (andere Schadstoffe) - (Energiebedarf)
→Handlungs- bedarf:	F&E-Bedarf, Unterstützung in- formativischer Maßnahmen		F&E-Bedarf, rechtl. Anpassungsbedarf	F&E-Bedarf; rechtl. Anpas- sungsbedarf

✓ = Maßnahmen in der Umsetzung; ! = Maßnahmen verfügbar; + = positiver Effekt der Maßnahme;
- = negativer Effekt der Maßnahme; F&E-Bedarf = Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Tabelle 3: Maßnahmensteckbrief Arzneistoffe

Maßnahmen:	an der Quelle: a) Reduktion der Mengen b) umweltfreundlichere Arzneistoffe	Informationsmaßnahmen a) zu umweltfreundlicheren Medikamenten / Alternativen b) sichere Entsorgung	Dezentrale Maßnahmen: Abwasserbehandlung in Krankenhäusern/ klinischen Zentren	End of pipe: verbesserte kommunale Abwasserbehandlung
Status	! √	! z.T. √	! (F&E-Bedarf)	!
Wirkung	langfristig	(noch) keine Erfahrungswerte	je nach Arzneistoff: gering bis hoch	je nach Arzneistoff: gering bis hoch
Kosten (bzw. Kosten-Wirksamkeit)	gering	gering	gering / mittel mit Trenntoiletten: 24-42; mobile Sammelbehälter 11-22; dezentrale KA: 190-310 €/Patient	Einzelstoffspez. hoch (z. B. Diclofenac: 0,09-0,19 Mio €/kg)
Technische Einsatzfähigkeit:	√	√	F&E-Bedarf	√
sekundäre Umwelteffekte	a) mögliche Effekte der Ersatzstoffe		- (Energiebedarf)	+ (andere Schadstoffe) - (Energiebedarf)
→ Handlungsbedarf:	Entwicklung eines Systems zur Umweltklassifizierung; Info-Maßnahmen für unterschiedliche Zielgruppen		F&E-Bedarf; rechtlicher Anpassungsbedarf	rechtlicher Anpassungsbedarf

√ = Maßnahmen in der Umsetzung; ! = Maßnahmen verfügbar; + = positiver Effekt der Maßnahme; - = negativer Effekt der Maßnahme; F&E-Bedarf = Forschungs- und Entwicklungsbedarf

7 Effizienz einer erweiterten Abwasserbehandlung in kommunalen Kläranlagen in Deutschland

Mikroschadstoffe können mit den heutigen Verfahrenstechniken kommunaler Kläranlagen nur unzureichend aus dem Abwasser entfernt werden. Für deren Elimination bedarf es daher der Reinigung des Abwassers in gesonderten Verfahrenstechniken, welche auch mit dem Begriff der „4. Reinigungsstufe“ bezeichnet werden.

Aus der Vielzahl der im deutschsprachigen Raum durchgeführten Pilotprojekte sowie den bislang auf kommunalen Kläranlagen realisierten erweiterten Reinigungsverfahren erweisen sich die Anwendung von Ozon als auch der Einsatz von Aktivkohle als praxistaugliche Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffelimination. Mit beiden Verfahrenstechniken kann ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen in vergleichsweise hohem Umfang aus dem Abwasser entfernt werden. Sie weisen zudem eine gute Integrierbarkeit in den bestehenden Reinigungsprozess einer Kläranlage auf. Bei beiden Verfahrenstechniken ist nach dem als „Spurenstoffstufe“ bezeichneten Verfahrensschritt eine weitere Stufe zur Nachbehandlung des Abwassers nachzuschalten: Um im Falle der Anwendung von Pulveraktivkohle feinste Pulveraktivkohlepartikel, die mit Spurenstoffen beladen sind, weitestgehend zurückzuhalten bzw. um beim Betrieb einer Ozonung die entstehenden Abbau-/Umbauprodukte zurückzuhalten.

Aus zahlreichen Untersuchungen geht hervor, dass die Eliminationsrate der einzelnen Substanzen im Wesentlichen von der Dosiermenge des eingesetzten Hilfsstoffs (= Aktivkohle oder Ozon), der Stoffeigenschaft sowie der gelösten Restorganik des Abwassers abhängig ist. Mit steigender Hilfsstoffdosiermenge lässt sich eine höhere Eliminationsrate erzielen. Die Stoffeigenschaft entscheidet dabei, ob eine Substanz durch die dosierte Hilfsstoffmenge ausreichend eliminiert wird. Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass die Effizienz der Elimination von Spurenstoffen mittels Aktivkohle oder Ozon von der absoluten Konzentration der gelösten organischen Restverschmutzung abhängig ist, welche in direkter Konkurrenz zur Entfernung der Mikroschadstoffe steht. Es gilt: Bei einer höheren organischen Hintergrundbelastung des Abwassers bedarf es zur Entnahme von Spurenstoffen einer spezifisch höheren Hilfsstoffdosiermenge. Insgesamt verdeutlichen die bisherigen Untersuchungsergebnisse zahlreicher Studien, dass sowohl mit dem Einsatz von Ozon als auch der Anwendung von Aktivkohle ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen in hohem Maße eliminiert werden kann. Ein Großteil der Arzneistoffe erweist sich beispielsweise als vergleichsweise gut bis sehr gut eliminierbar. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass es Substanzen gibt, die nicht oder nur in vergleichsweise geringem Umfang mit den Verfahrenstechniken zur Mikroschadstoffentfernung aus dem Abwasser eliminiert werden können. Hierzu zählen beispielsweise der Komplexbildner EDTA oder auch die Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure und Iomeprol.

Neben der Entfernung von Spurenstoffen ist festzustellen, dass durch den Betrieb der zur Mikroschadstoffentfernung als geeignet erachteten Verfahrenstechniken sekundäre Reinigungseffekte erzielt werden. Der Einsatz von Aktivkohle hat beispielsweise eine Verringerung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Kläranlagenablauf zur Folge. Bei der Anwendung von Pulveraktivkohle ist durch die verfahrensbedingte Zugabe von Fällmittel eine Absenkung der Phosphorgehalte (P_{ges} -Werte) im Kläranlagenablauf zu verzeichnen. Erste Erfahrung aus dem Praxisbetrieb der Verfahrenstechniken zeigen, dass bei beiden Parametern im Kläranlagenablauf dauerhaft Werte im Bereich bzw. unterhalb des im Abwasserabgabengesetz (Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer - AbwAG, 2010) aufgeführten Schwellenwertes (Konzentration oder Jahresmenge) erzielt werden. Die Anwendung von Ozon hat durch eine deutliche Reduktion der Keime eine Verbesserung der hygienischen Situation im Kläranlagenablauf zur Folge. Weitere zusätzliche positive Reinigungseffekte ergeben sich durch die Notwendigkeit zur Nachbehandlung des Abwassers nach der eigentlichen Spurenstoffelimination. Durch die Ausbildung dieser Stufe in Form eines Filters ist ein verbesserter Rückhalt von Feinstpartikeln zu erzielen, was wiederum eine weitere Kohlenstoff- und Phosphor-Elimination sowie einen Rückhalt von partikulär gebundenen Spurenstoffen zur Folge hat. Darüberhinaus zeigt sich, dass mit der Anwendung von Aktivkohle oder Ozon eine Entfärbung sowie eine Geruchsminderung des Abwassers einhergeht.

Die Entscheidung, welches Verfahren für die Erweiterung einer bestehenden Kläranlage geeignet ist, ist von den örtlichen Randbedingungen abhängig. Hierbei spielen die ortspezifische Abwasserzusammensetzung, die Verfügbarkeit von Baufläche und vorhandenen Bauwerken sowie ökonomische Aspekte (Kosten der Verfahren unter den jeweiligen Randbedingungen, mögliche Verrechnungsmöglichkeiten) eine entscheidende Rolle. Nicht zuletzt sind ökologische und soziale Aspekte bei der Auswahl eines Verfahrens zur Mikroschadstoffentfernung mit in Betracht zu ziehen. Neben den positiven Erfahrungen ist zu bedenken, dass die genannten technischen Maßnahmen zur Mikroschadstoffelimination auch unerwünschte Umwelteffekte verursachen. Sowohl die Herstellung von Ozon als auch von Aktivkohle ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Zur Herstellung von Aktivkohle bedarf es außerdem kohlenstoffhaltiger Rohstoffe. Die meisten verwendeten Rohstoffe, wie beispielsweise Stein- oder Braunkohle, stammen aus nicht erneuerbaren Ressourcen aus dem Ausland. Eine Verlagerung der Umweltverschmutzung in die Herkunftsländer der Rohstoffe ist bei einer Produktion der Aktivkohle im Ausland nicht auszuschließen. Es ist daher stets zu hinterfragen, ob die gewählten technischen Maßnahmen zur Mikroschadstoffelimination den Nachhaltigkeitsprinzipien entsprechen. Es gilt das effizienteste und ressourcenschonendste Verfahren zu wählen.

8 Kosten einer erweiterten Abwasserbehandlung in kommunalen Kläranlagen

Die Kostenabschätzung für einen flächendeckenden Ausbau der 4. Reinigungsstufe basiert auf der Multiplikation der behandelten Jahresabwassermenge einer jeden Kläranlage mit einem spezifischen Kostenfaktor.

$$\text{Jährliche Gesamtkosten} = \sum (\text{Jahresabwassermenge} \times \text{spez. Kosten})$$

Als Datenbasis für die Auswertung von Kläranlagenkenndaten wird die Datenbank der Kommunalabwasserrichtlinie des Umweltbundesamtes herangezogen. Die Ermittlung spezifischer Kostenfaktoren je Größenklasse einer Kläranlage basiert auf der Auswertung von Kostenangaben in den Fachliteraturen. Die aus der Literatur entnommenen Angaben zu den Kostenbestandteilen unterschiedlicher Anlagen werden zunächst auf ein einheitliches Bewertungsschema angepasst, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Vereinheitlichung setzt folgende Prämissen:

- ▶ Verwendung von Nettobeträgen,
- ▶ Anpassung von Preisentwicklungen zwischen unterschiedlichen Betrachtungsjahren,
- ▶ Währungskonversion mithilfe von Kaufkraftparitäten,
- ▶ einheitlicher Kalkulationszinssatz und
- ▶ einheitlicher Preis für homogene Güter wie dem Einsatz von Strom.

Der Verwendung von Kaufkraftparitäten bei der Umrechnung zwischen unterschiedlichen Währungen liegt das Ziel zugrunde, dass die Kosten einer vergleichbaren Anlage in Deutschland bestimmt werden sollen. Hierbei ist es erforderlich, die strukturell unterschiedlichen Preisniveaus zwischen verschiedenen Gütern in zwei Ländern zu berücksichtigen und bei der Umrechnung auszuschließen. Die Verwendung von Kaufkraftparitäten führt insgesamt zu einer plausibleren Kostenschätzung als der Wechselkurs (gegebenenfalls unter Verwendung nicht näher begründeter Zu- oder Abschläge). Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde auf die von OECD, EUROSTAT und der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO)⁸ direkt ausgewiesenen Kaufkraftparitäten zurückgegriffen bzw. im Bedarfsfall die Kaufkraftparität aus vorhandenen Werten interpoliert.

Zur Vereinheitlichung der in Euro erhobenen bzw. umgerechneten Kostenbestandteile wird eine Anpassung auf die Preise des Bezugsjahres 2012 vorgenommen. Die Preisanpassung erfolgt mittels Preisindizes, die für jedes Jahr vorliegen.⁹ Hierbei wird statt eines einheitlichen Verbraucherpreisindex die Preisentwicklung bei den unterschiedlichen eingesetzten Bestandteilen der Anlagen zur 4. Reinigungsstufe – wie beispielweise Betriebsgebäude, Maschinen, unterschiedliche Betriebsstoffe, Löhne, Energie – jeweils differenziert erfasst und kalkuliert. Die Umrechnung erfolgt nach:

$$\text{Kosten}_{\text{Bezugsjahr}} = \text{Kosten}_{\text{Erhebungsjahr}} \cdot \frac{\text{Preisindex}_{\text{Bezugsjahr}}}{\text{Preisindex}_{\text{Erhebungsjahr}}}$$

Umfangreiche Preisindexreihen werden regelmäßig vom Statistischen Bundesamt und der ILO veröffentlicht.

⁸ Vgl. OECD (lfd.): Purchasing Power Parities (PPP) Statistics, URL: <http://stats.oecd.org/Index.aspx>; ILO (lfd.): Labour Cost, URL: http://laborsta.ilo.org/data_topic_E.html. Vgl. auch für weitere methodische Grundlagen: Eurostat; OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2012): Eurostat-OECD methodological manual on purchasing power parities. 2012 edition (Eurostat Methodologies and Working papers), Paris.

⁹ Vgl. OECD (lfd.): Purchasing Power Parities (PPP) Statistics, URL: <http://stats.oecd.org/Index.aspx>; ILO (lfd.): Wages. <http://laborsta.ilo.org/>. Aufgerufen am 01.07.2014.

Insgesamt wurden 17 Veröffentlichungen mit detaillierten Kostenangaben ausgewertet. In den Veröffentlichungen sind Kostenangaben zu 30 Kläranlagen dargestellt. Davon sind 16 deutsche Kläranlagen (3 in Baden-Württemberg und 13 in Nordrhein-Westfalen), 7 Schweizer Kläranlagen und 7 Modellkläranlagen. Es werden nur Kostenangaben für die Ozonung sowie für Adsorptionsverfahren mittels Pulveraktivkohle (PAC) und granulierter Aktivkohle (GAC) in die Kostenauswertung mit einbezogen. Die dargestellten Kostenangaben basieren auf folgenden Verfahrens- und Anwendungsformen:

- ▶ Ozonung (28 Kostenangaben),
- ▶ granulierter Aktivkohlefilter angeordnet nach der Nachklärung (7 Kostenangaben),
- ▶ granulierter Aktivkohlefilter angeordnet nach einem Filter (10 Kostenangaben),
- ▶ simultane Pulveraktivkohleanwendung (8 Kostenangaben),
- ▶ Direktdosierung von Pulveraktivkohle vor einen Filter (6 Kostenangaben),
- ▶ Anwendung von Pulveraktivkohle in einer separaten Stufe (23 Kostenangaben).

Eine Übersicht über die verwendeten Veröffentlichungen sowie die für die Kostenangaben zugrundegelegten Verfahrenstechniken ist in Tabelle 4 dargestellt.

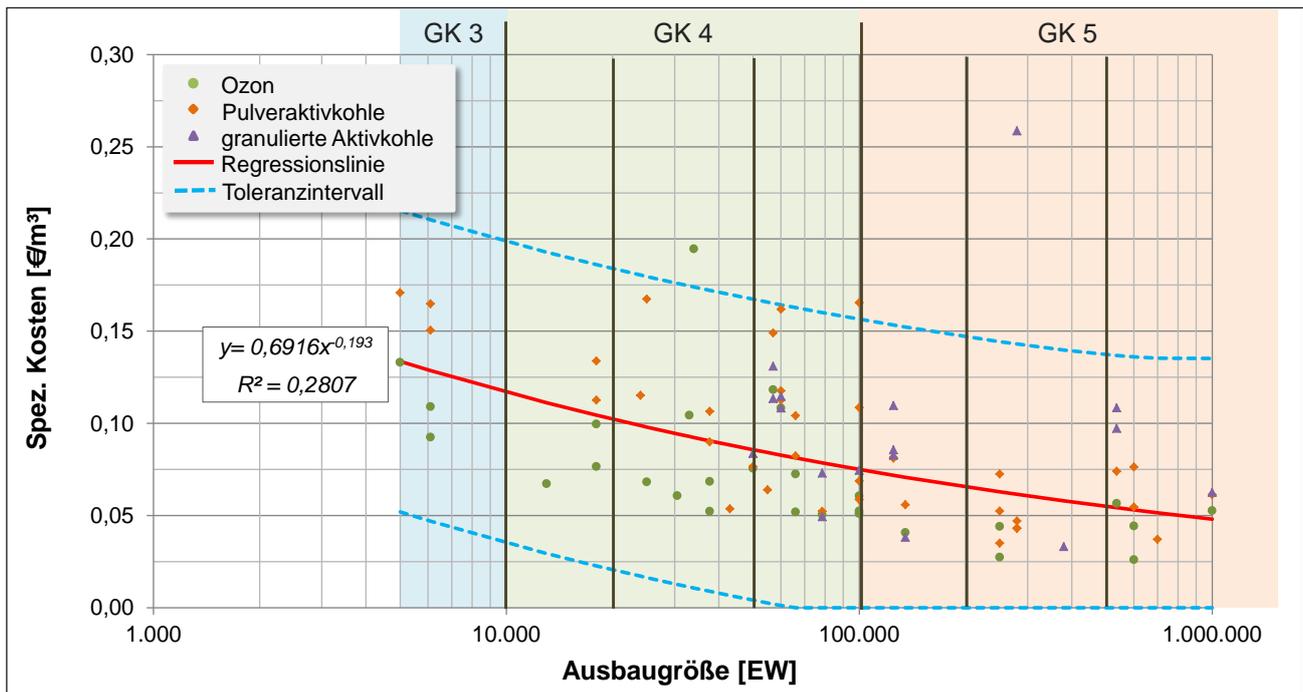
Zur Ermittlung von spezifischen Kosten pro Kubikmeter zu behandelndem Abwasser werden die angepassten Kostenangaben mit der in der jeweiligen Literaturquelle genannten Jahresabwassermenge dividiert. Auf Basis dieser Kostenangaben werden mittels Regressionsanalyse Kostenfaktoren für unterschiedliche Kläranlagengrößenklassen geschätzt, die im weiteren Verlauf der Untersuchung als Grundlage für die Kostenschätzung des zukünftigen Ausbaus weiterer Kläranlagen in Deutschland dienen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 4: Literaturquellen der Kostenangaben und die dargestellten Verfahren

Quelle	betrachteter Kläranlagenstandort	Status	Verfahren / Anwendungsform
Ivashechkin (2006)	3 Modellkläranlagen	Studie	Ozon PAC (simultan)
Fahlenkamp et al. (2008)	3 Modellkläranlagen	Studie	PAC (simultan) GAC (nach Filter)
Tacke et al. (2008)	1 Modellkläranlage	Studie	Ozon PAC (simultan) PAC (separate Stufe) PAC (Dosierung vor Filter)
Hunziker Betatech AG (2008)	Untersee Aadorf Furt Au Luzern Werdhölzli	Studie	Ozon PAC (separate Stufe)
Abegglen et al. (2009)	Regensdorf	Versuchsbetrieb	Ozon
Alt (2011)	Lage	Studie	PAC (separate Stufe) PAC (Dosierung vor Filter) GAC (nach Filter) GAC
Bornemann et al. (2012)	Dülmen Wuppertal-Buchenhofen	Studie Versuchsbetrieb	PAC (Dosierung vor Filter)

Blank; Alt (2012)	Harsewinkel	Studie	Ozon PAC (separate Stufe) GAC (nach Filter) GAC
Mauer; Alt (2012)	Bad Oeynhausen	Studie	Ozon PAC (separate Stufe) GAC (nach Filter) GAC
Kuhlmann; Alt (2012)	Detmold	Studie	Ozon PAC (separate Stufe) GAC (nach Filter)
Herbst; Hilbig (2012) Herbst; Maus (2013)	Neuss Ost	Studie	PAC (Dosierung vor Filter) GAC
Rölle; Weißert (2013)	Kressbronn Stockacher Aach Böblingen-Sindelfingen	Betrieb	PAC (separate Stufe)
Mertsch; Herbst; Alt (2013)	Duisburg-Vierlenden Obere Lutter Bad Sassendorf	Versuchsbetrieb	Ozon GAC Ozon
Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW	Espelkamp	Studie	Ozon
Dahlem Beratende Ingenieure GmbH & Co. (2013)	Paderborn-Sande	Studie	Ozon PAC (separater Stufe) GAC GAC (nach Filter)
Knollmann; Hübner (2013)	Rietberg	Studie	Ozon PAC (simultan) PAC (separate Stufe) PAC (Dosierung vor Filter) GAC (nach Filter) GAC

Abbildung 2: Regressionsanalyse der Literaturangaben



Da die Kostenschätzung für zukünftige Ausbaumaßnahmen aus vorhandenen Kostenangaben abgeleitet wird, ist die hierbei auftretende statistische Unsicherheit zu beachten. Die im Rahmen der Untersuchungen abgeleitete Regressionsfunktion ist in der Lage, ca. 28,1 % der Unterschiede der verwendeten Einzelanlagen zu erklären ($R^2 = 0,2807$). Für die Prognose zukünftiger Kosten einer neu zu errichtenden 4. Reinigungsstufe ist unter Beachtung der Anlagengröße mit einer deutlichen Unsicherheit zu rechnen, welche sich im sogenannten Toleranzintervall abbildet. Die Bandbreite des Toleranzintervalls (und die damit ausgedrückte statistische Unsicherheit bei der Prognose zukünftiger Werte) ist abhängig von der Anzahl n der ausgewerteten Beobachtungen, der Kovarianz zwischen der abhängigen und unabhängigen Größe der Regressionsfunktion bzw. der Abweichung der zu schätzenden Anlagengröße von der mittleren Größe der ausgewerteten Anlagen. Gemäß den Berechnungen zum Toleranzintervall liegen 95 % der spezifischen Kosten einer zukünftig zu errichtenden 4. Reinigungsstufe im Bereich des ermittelten Toleranzintervalls.

Unter Beachtung dieser statistischen Unsicherheiten werden die spezifischen Kosten der betrachteten Größenklassen der Kläranlagen anhand der Regressionswerte der jeweiligen Klassenmitte geschätzt. Sie reichen von 0,124 €/m³ für die Größenklasse 3 bis 0,051 €/m³ für Kläranlagen größer 1 Millionen Einwohnerwerte (Größenklasse 5). Hierbei handelt es sich um Netto-Angaben.

Unter Einbezug der spezifischen Kosten für die Nachbehandlung, welche auf Erfahrungswerten von Anlagenbetreibern und verschiedener Experten im Abwasserbereich basieren, ergibt die Kostenabschätzung, dass für einen Ausbau aller 3.013 deutschen Kläranlagen der Größenklassen 3 bis 5 zur gezielten Mikroschadstoffentfernung jährliche Gesamtkosten von rund 1,3 Milliarden Euro (netto) zu erwarten sind (vgl. Tabelle 5). Dieser Betrag beinhaltet sowohl die für die Investitionskosten berechneten Jahreskosten als auch die für den Betrieb der zusätzlichen Verfahrenstechniken notwendigen Kosten. Sonstige Vergünstigungen durch Fördermittel oder Möglichkeiten zur Verrechnung der Abwasserabgabe sind bei der Berechnung nicht in Ansatz gebracht worden. Etwa die Hälfte der Gesamtkosten resultiert aus der Notwendigkeit einer Nachbehandlung des Abwassers. Bei einer Kostenbetrachtung zur 4. Reinigungsstufe gilt es daher die Kosten für die Nachbehandlung immer mit zu berücksichtigen.

In Bezug auf die einzelnen Größenklassen zeigt sich, dass die meisten Kosten auf die Erweiterung der Kläranlagen der GK 4 und 5 entfallen. Rund 50 Prozent der geschätzten jährlichen Gesamtkosten sind für einen Ausbau der Kläranlagen der GK 4 notwendig, weitere knapp 40 Prozent entfallen auf die Nachrüstung der

Kläranlagen der GK 5. Für eine Erweiterung der Kläranlagen der GK 3 bedarf es rund 10 Prozent der geschätzten jährlichen Gesamtkosten.

Tabelle 5: Spezifische Kosten und berechnete Jahreskosten für einen flächendeckenden Ausbau der 4. Reinigungsstufe in Deutschland ab Größenklasse 3

GK	Kläranlagenanzahl	Jahresabwassermenge (Mio. m ³ /a)	Spezifische Kosten (€/m ³)		Jahreskosten (Mio. €/a)			
			Spurenstoffstufe	Nachbeh.stufe	Spurenstoffstufe	Nachbeh.stufe	Summe	
3	-	896	542	0,124	0,10	67	54	121
4	A	784	876	0,108		95	70	165
	B	810	1.816	0,092	0,08	167	145	312
	C	294	1.339	0,079		106	107	213
5	A	117	918	0,069		64	46	110
	B	83	1.412	0,059	0,05	83	71	154
	C	18	739	0,051		37	37	74
	D	11	1.305			66	65	131
Gesamtkosten (netto)						685	595	1.280

9 Umgang mit Mikroschadstoffen in der Schweiz

Ergänzend zu den auf Deutschland bezogenen Auswertungen und Berechnungen können die in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich der Einführung einer weitergehenden Abwasserreinigung in kommunalen Kläranlagen genutzt werden. Der Eintrag von organischen Spurenstoffen in die Gewässer über den Eintragspfad „gereinigtes kommunales Abwasser“ wurde dort als problematisch erkannt. Aufgrund von Untersuchungen zur Belastungslage und der Evaluation von Maßnahmen wurde am 21. März 2014 vom eidgenössischen Parlament einer Änderung des Gewässerschutzgesetzes zugestimmt. Diese Gesetzesänderung sieht vor, dass ausgewählte kommunale Kläranlagen Maßnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen ergreifen müssen. Betroffen sind die größten Kläranlagen der Schweiz (mit > 80.000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern), Kläranlagen im Einzugsgebiet von Seen (mit > 24.000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern), sowie Kläranlagen an Gewässern mit einem Abwasseranteil über 10 % (mit > 8.000 angeschlossenen Einwohnerinnen und Einwohnern). Da nicht alle Kläranlagen betroffen sind, aber die gesamte Bevölkerung zur Belastung beiträgt, wurde im Gesetz eine verursachergerechte Finanzierung verankert. Es wird eine Abwasserabgabe eingeführt, mit der die Erstellung von Anlagen zur Elimination von Spurenstoffen unterstützt wird. Die Belastungslage von Einträgen über diffuse Quellen sowie mögliche Maßnahmen zur Reduktion werden aktuell untersucht.

10 Untersuchung von Maßnahmenkombinationen mit hoher Wirkung und Kosteneffizienz

Für eine Vielzahl von Mikroschadstoffen, die zu einem hohen Anteil aus dem häuslichen Bereich eingetragen werden (u. a. Arzneimittel-Rückstände, Textil-Chemikalien, Pflegeprodukte), können deutliche Verbesserungen über weitergehenden Maßnahmen auf kommunalen Kläranlagen erreicht werden. Solche Maßnahmen bieten sich insbesondere bei großen Anlagen sowie an relevanten Gewässern (ungünstiges Verhältnis Abwassermenge/Gewässerabfluss, Trinkwasserrelevanz) an. Um eine ausreichende Wirkung und Kosteneffizienz zu erreichen, sind jedoch zusätzlich stoffspezifische Maßnahmen an der Quelle, informatorische Maßnahmen oder auch dezentrale Maßnahmen zur Erfassung und Behandlung von besonders belasteten Abwasserteilströmen (z. B. Krankenhaus-Abwässer) vor allem im Einzugsgebiet von hoch belasteten Gewässern („Hotspots“) zu berücksichtigen. Diese stellen auch einen Beitrag zur Umsetzung des Verursacherprinzips dar.

Nur durch eine effiziente Kombination der unterschiedlichen Ansätze können die verschiedenen Zielsetzungen (ausreichende Emissionsminderung unter Berücksichtigung unterschiedlicher lokaler Belastungen, hohe Effizienz, Umsetzung des Verursacherprinzips, Akzeptanzförderung, etc.) erreicht werden. In Tabelle 6 sind die Notwendigkeit aber auch Grenzen quellenorientierter Maßnahmen zusammengefasst. Diese Grenzen verdeutlichen den zusätzlichen Bedarf an nachgeschalteten sogenannten End-of-pipe-Maßnahmen. Über eine weitergehende Abwasserreinigung in großen kommunalen Kläranlagen kann mit einer hohen Kosteneffizienz die emittierte Fracht für eine Vielzahl von Mikroschadstoffen deutlich verringert werden. Besondere Relevanz erhält diese Maßnahme auch bei besonders belasteten (ungünstiges Verhältnis der Abwassermenge zum Gewässerabfluss) oder schützenswerten Gewässern (z. B. bei Trinkwasser-Relevanz). Ein wichtiger Bewertungsaspekt bei der Zusammenstellung effizienter Maßnahmenkombinationen ist darüber hinaus das bei End-of-pipe-Maßnahmen häufig vorhandene Potenzial, positive Zusatzeffekte durch die zusätzliche Elimination anderer Stoffe (weitere Mikroschadstoffe, Feinstpartikeln, Phosphor, Keime) auszuüben. Dies trifft sowohl bei einer 4. Reinigungsstufe in kommunalen Kläranlagen als auch bei der weitergehenden Reinigung von Niederschlags- oder Mischwasser zu.

Tabelle 6: Quellenorientierte Maßnahmen: Notwendigkeit und Grenzen

Notwendigkeit quellenorientierter Maßnahmen:

- ▶ Umsetzung des Verursacher- und Vorsorgeprinzips
- ▶ flächendeckende, Umweltmedien-übergreifende Minderung der Umweltbelastungen
- ▶ Reduktion der Emissionen aus Eintragungspfaden, die nicht oder nicht ausreichend über nachgeschaltete Maßnahmen erfasst werden können (z. B. Eintragungspfad atmosphärische Deposition)
- ▶ (zusätzliche) Reduktion der Einträge über kommunale Kläranlagen (bspw. bei schlecht abbaubaren Schadstoffen)

Grenzen quellenorientierter Maßnahmen:

- ▶ Emissionen aus bereits vorhandenen Anwendungen („Lager“ bzw. „Depots“)
- ▶ schwer oder nur unvollständig zu begrenzende Anwendungen bzw. Emissionspfade (z. B. Importprodukte, Nischenprodukte, luftbürtige Ferntransporte)
- ▶ sehr hochwertige, nicht oder kaum zu beschränkende Verwendungen

Um Empfehlungen für Maßnahmenkombinationen, die zur Verminderung und Vermeidung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer führen, treffen zu können, werden die zwölf ausgewählten Stoffe des Vorhabens in vier Gruppen mit jeweils ähnlichen Rahmenbedingungen zusammengefasst:

- ▶ Stoffe mit Anwendungen/Emissionen im Außenbereich (Terbutryn, z. T. PAK),
- ▶ Stoffe mit Haupteintragspfad über das Haushaltsabwasser (Triclosan, Nonylphenol),
- ▶ Arzneistoffe (Anwendung im Haushaltsbereich und in Gesundheitseinrichtungen) und
- ▶ Industriechemikalien (PFOS, HBCDD).

Die Auswahl von sinnvollen stoffspezifischen Maßnahmenkombinationen basiert auf den vorangegangenen Bewertungen der stoffspezifischen Einzelmaßnahmen. Die Ansatzpunkte der relevanten Emissionsminderungsmaßnahmen und auch die betroffenen Rechtsbereiche (Wasserrecht, Chemikalienrecht, informatorische Maßnahmen) betreffen unterschiedliche Handlungsfelder. Beispielhaft sind die Maßnahmen-Optionen für den Bereich der Arzneistoffe in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Stoffspezifische Maßnahmen zur Reduktion von Arzneistoffen

Maßnahmen- verfügbarkeit	Potenzial / Einschränkungen	Effekt
Stoffsubstitution / Einsatz umweltfreundlicherer Arzneistoffe	<ul style="list-style-type: none"> • flächendeckende Wirkung; aber <ul style="list-style-type: none"> • sehr langfristig; • aufwendig; • F&E-Bedarf 	hoch, aber sub- stanzspezifisch
Veränderung im Anwendungsbereich (angepasste Verschreibung, alterna- tive, nicht-medikamentöse Therapien)	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Kosten(?); • erprobt; aber <ul style="list-style-type: none"> • nur teilweise anwendbar 	gering-mittel
Informationsmaßnahmen (Fachpersonal + Bevölkerung)	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Kosten; aber <ul style="list-style-type: none"> • Effekt evtl. nur begrenzt und temporär • F&E-Bedarf 	gering-mittel
Dezentrale Abwasserbehandlung medizinische Einrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung von Hot-Spots; aber <ul style="list-style-type: none"> • ungeklärte Kostenumlage 	hoch
4. Reinigungsstufe	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkung für komplettes EZG; aber <ul style="list-style-type: none"> • Rückhalt von Arzneistoffen sub- stanzspezifisch nur teilweise möglich 	gering -hoch

11 Modellierung der stoffspezifischen Maßnahmenkombinationen am Beispiel des Neckareinzugsgebietes

Nachdem bei einigen der modellierten Stoffe ein Handlungsbedarf identifiziert wurde, wurden auf Basis der verfügbaren Informationen Maßnahmen zur Reduktion des Stoffeintrags modelliert. Je nach Stoff bzw. Stoffgruppe und in Abhängigkeit von der Relevanz der Eintragspfade wurden quellenbezogene und nachgeschaltete Maßnahmen in MoRE implementiert und ihre Auswirkung auf Frachtreduktion bzw. Reduktion der Gewässerkonzentration miteinander verglichen. Anhand der folgenden definierten Maßnahmen wird der Zusammenhang der Auswirkungen deutlich gemacht.

Für die PAK₁₆ werden die folgenden Maßnahmen definiert:

- a) Durch strengere Anforderungen für Hausfeuerungsanlagen nach 1. BImSchV (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2010)): Reduktion der atmosphärischen Einträge um 20 %. Diese Maßnahme wirkt sich auf die Eintragspfade „Atmosphärische Deposition“ und „Oberflächenabfluss“ aus.
- b) Erhöhung der klärtechnischen Wirksamkeit im Mischsystem: Regenüberlaufbecken (RÜB) und Retentionsbodenfilter (RBF).
- c) Maßnahmenkombination: Reduktion der atmosphärischen Einträge um 20 % und Erhöhung der klärtechnischen Wirksamkeit im Mischsystem.

Für Nonylphenol werden die folgenden Maßnahmen definiert:

- a) Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4. Reinigungsstufe;
- b) Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit 4. Reinigungsstufe;
- c) Durch Produktlabeling & Informationskampagne: 20 % Reduktion des Eintrags über den Abwasserpfad;
- d) Maßnahmenkombination: Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit 4. Reinigungsstufe und 20 % Reduktion des Eintrags über den Abwasserpfad.

Für die Arzneistoffe werden die folgenden Maßnahmen definiert:

- a) Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4. Reinigungsstufe;
- b) Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit 4. Reinigungsstufe;
- c) Reduzierung des Verbrauchs an Arzneistoffen um 20 %;
- d) Maßnahmenkombination: Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4. Reinigungsstufe und 20% ige Verbrauchsreduzierung von Arzneistoffen.

Das Ergebnis der abgebildeten Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen für die PAK₁₆ zeigt, dass durch die Maßnahme „20 % Reduktion des atmosphärischen Eintrags“ bis zu 13 % der Gesamteinträge in die Gewässer gegenüber dem derzeitigen Ist-Zustand reduziert werden. Die Ertüchtigung von Regenüberlaufbecken (RÜB) führt zu einer 8 %-igen Reduktion bezüglich der Gesamteinträge. Wenn nach dem RÜB eine Filteranlage wie z. B. ein Retentionsbodenfilter (RBF) angeschlossen wird, werden bis zu 19 % der Ausgangsfracht reduziert. Das größte Reduktionspotenzial ergibt sich aus der Maßnahmenkombination Erhöhung der klärtechnischen Wirksamkeit (RÜB & RBF) und gleichzeitige Reduktion des atmosphärischen Eintrags. Dadurch werden bis zu 28 % der Gesamteintragsfracht in die Gewässer gegenüber dem Ist-Zustand reduziert. Insgesamt konnte ein mittleres Eintragsreduktionspotenzial mit den aufgeführten Maßnahmen ermittelt werden.

Für Nonylphenol zeigt die Modellierung bei der Ausrüstung von Kläranlagen > 50.000 EW mit einer vierten Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle ein sehr niedriges Reduktionspotenzial, das auch nach Ausrüstung

aller Kläranlagen > 10.000 EW im Gebiet nur zu einer Frachtreduzierung von 7 % führt. Bei der Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit einer Ozonung ergeben sich deutlich höhere Reduktionspotenziale von bis zu 30 %. Für die quellenbezogene Maßnahme „Produktlabeling & Informationsmaßnahmen“ wird von einer 20%igen Reduktion der Fracht im Vergleich mit dem Ist-Zustand ausgegangen. Bei der Kombination der zwei effektivsten Maßnahmen: „Ausrüstung aller Kläranlagen größer 10.000 EW mit Ozonung“ und „Produktlabeling & Informationsmaßnahmen“ werden 44 % Frachtreduktion erreicht. Insgesamt konnte ein mittleres bis hohes Eintragsreduktionspotenzial mit den aufgeführten Maßnahmen ermittelt werden.

Aus den Ergebnissen der modellierten Maßnahmen für Diclofenac-Konzentrationen in Gewässern leitet sich ab, dass verglichen mit dem Ist-Zustand weder die Maßnahme „20 % weniger Verbrauch“ noch die „Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4.Reinigungsstufe“ zu einer flächendeckenden Einhaltung des Qualitätskriteriums (PNEC-Wert) führt, obwohl durch die Ausrüstung eine mehr als 50%ige Frachtreduktion erreicht wird. Auch die Maßnahmenkombination mit Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW und 20 % weniger Verbrauch und der damit verbundenen 60 % Frachtreduktion gegenüber dem Ist-Zustand erweist sich als unzureichend für eine flächendeckende Unterschreitung des Diclofenac-PNEC-Werts. Erst bei der Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit vierter Reinigungsstufe werden weitgehend Diclofenac-Konzentrationen unter dem PNEC-Wert erreicht. Jedoch sind weiterhin Gebietsauslässe mit einer Überschreitung des Qualitätskriteriums zu identifizieren, obwohl die Diclofenac-Fracht nahezu um 77 % gesenkt wird (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

Bei Ibuprofen werden mit der Maßnahme „Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4. Reinigungsstufe“ 29 % der Einträge gegenüber des Ist-Zustands reduziert. Über die Maßnahmenkombination zur „Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4.Reinigungsstufe“ und „20%ige Verbrauchsreduzierung“ sind es 43 %. Ein sehr ähnliches Ergebnis mit 44 % Frachtreduktion resultiert bei der Maßnahme „Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit 4.Reinigungsstufe“. Da für Ibuprofen bereits im Ist-Zustand eine unkritische Gewässersituation ermittelt wurde, zeigen die Maßnahmen nur das Frachtreduktionspotenzial auf.

Bei Iomeprol führen die entsprechenden Maßnahmen zu einer Frachtreduktion von 26 % (Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW), 41 % (Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4.Reinigungsstufe und 20%ige Verbrauchsreduzierung) und 39 % (Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW). Eine Bewertung der Gewässersituation war aufgrund des fehlenden Qualitätskriteriums nicht möglich.

Aus den Ergebnissen der modellierten Maßnahmen für die Sulfamethoxazol-bezogene Gewässerqualität wird ersichtlich, dass verglichen mit dem Ist-Zustand die Maßnahme „20 % weniger Verbrauch“ nicht zu einer deutlichen Verbesserung der Gewässersituation beiträgt. Bei den Maßnahmen zur Ausrüstung der Kläranlagen ergibt sich eine unterschiedliche Frachtreduktion in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren. Die Ausrüstung mit Ozonung liefert höhere Reduktionspotenziale als die Ausrüstung mit Pulveraktivkohle. Somit wird über die „Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4.Reinigungsstufe mit Ozonung“ der Eintrags gegenüber dem Ist-Zustand um 54 % reduziert und damit eine deutliche Verbesserung der Gewässerqualität erreicht. Die Maßnahmenkombination „Ausrüstung aller Kläranlagen > 50.000 EW mit 4.Reinigungsstufe mit Ozonung“ und „20%ige Verbrauchsreduzierung“ erreicht eine 63 % Frachtreduktion. Dann wird nur noch an einzelnen Gebietsauslässen ein Risikoquotient zwischen 1 und 2 ermittelt. Die „Ausrüstung aller Kläranlagen > 10.000 EW mit 4.Reinigungsstufe mit Ozonung“ erweist sich als ausreichend, um flächendeckend positive Effekte und einen Risikoquotienten kleiner 1 zu erreichen. Diese Maßnahme ergibt eine 82%ige Reduktion der Einträge.

Die Ergebnisdarstellung der modellierten Maßnahmen insbesondere der vierten Reinigungsstufe hat das Ziel zu illustrieren, wie unterschiedlich die stoffspezifischen Wirkungen der verschiedenen Maßnahmen in einem beispielhaft ausgewählten Flussgebiet aussehen können. Für einige der modellierten Stoffe können die verwendeten Zielwerte teilweise erst durch Maßnahmenkombinationen erreicht werden, für andere stellen die modellierten Maßnahmenkombinationen keine ausreichend effiziente Eingriffsmöglichkeit dar.

Die Modellierung der stoffspezifischen Maßnahmen erlaubt eine wirkungsbezogene Bewertung von verschiedenen Handlungsoptionen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Maßnahmenmix aus sowohl quellenorientierten Maßnahmen als auch End-of-pipe-Maßnahmen erforderlich ist, um die Ziele des guten chemischen Gewässerzustands nach Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen. Insgesamt verdeutlichen die Modellierungsergebnisse die Notwendigkeit der Umsetzung emissionsmindernder Maßnahmenkombinationen.

Abbildung 3: Eintragsreduktionspotenzial der modellierten Maßnahmen für Diclofenac

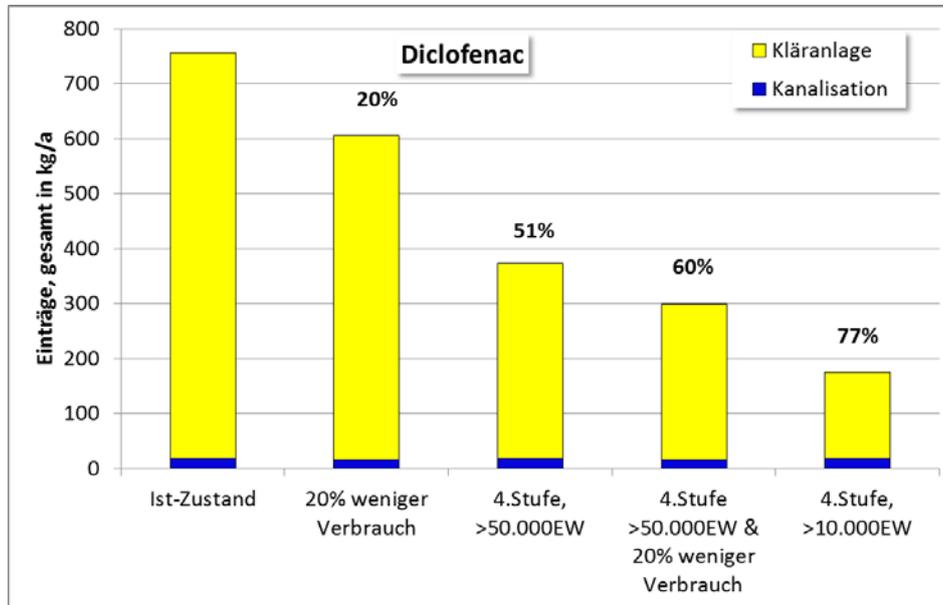
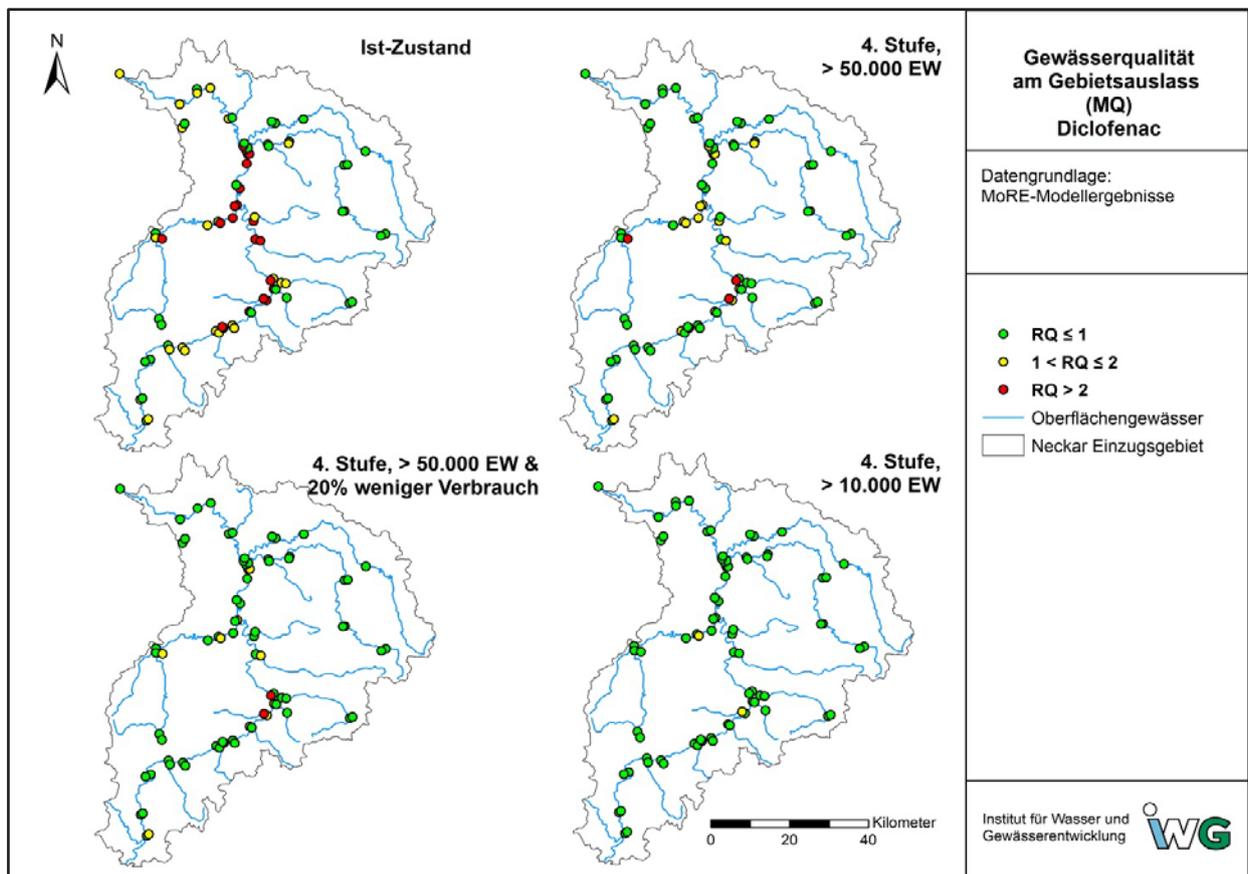


Abbildung 4: Ergebnis der modellierten Maßnahmen für die Diclofenac-Gewässerqualität



12 Empfehlungen für Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen von Seiten des Bundes

Die Thematik der Mikroschadstoffe wird u.a. aufgrund der fortschreitenden Aktualisierung und Erweiterung der Liste der prioritären Stoffe auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen, um die Kriterien des guten chemischen und ökologischen Gewässerzustands nach Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen. Der damit verbundene Handlungsbedarf macht eine langfristig orientierte und einheitliche strategische Ausgestaltung möglicher Maßnahmen erforderlich, die alle Maßnahmenbereiche umfasst.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass für alle betrachteten Mikroschadstoffe sowohl quellenbezogene als auch nachgeschaltete Maßnahmen zur Emissionsminderung zur Verfügung stehen und dass nur durch eine effiziente Kombination der unterschiedlichen Ansätze die verschiedenen Zielsetzungen (ausreichende Emissionsminderung unter Berücksichtigung unterschiedlicher lokaler Belastungen, hohe Effizienz, Umsetzung des Verursacherprinzips, Akzeptanzförderung, etc.) erreicht werden können.

Die unterschiedlichen Regelungskompetenzen für die identifizierten Maßnahmen, die Notwendigkeit paralleler Maßnahmen in sehr unterschiedlichen Bereichen und die langfristigen Planungshorizonte für das Flussgebietsmanagement sind damit entscheidende Randbedingungen für die Konzeption von Maßnahmen auf Bundesebene. Es erscheint deshalb sinnvoll, die unterschiedlichen Maßnahmen im Rahmen einer „**Strategie Mikroschadstoffe**“ des Bundes zu bündeln. Alle relevanten Akteure sind dabei ausgewogen in die Strategie einzubinden. Übergeordnete Zielsetzung muss die Einhaltung der über Wasserrahmenrichtlinie und Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und Wasserhaushaltsgesetz bestehenden Qualitätsziele im Bereich des Gewässerschutzes sein.

Die „Strategie Mikroschadstoffe“ ist auf den 3 Säulen „quellenorientierte Maßnahmen“ (einschließlich informatorischer Maßnahmen), „dezentrale Maßnahmen“ und „End of Pipe-Maßnahmen“ aufzubauen. Als quellenorientierte Maßnahmen sind bspw. Importbeschränkungen für Schadstoff-belastete Textilien, Beschränkungen der PAK-Emissionen oder Informationsmaßnahmen hinsichtlich der Verwendung und des Einsatzes von Arzneistoffen und Bioziden zu nennen. Dezentral können Emissionen von Mikroschadstoffen bei Indirekteinleitern (z. B. medizinischen Einrichtungen, Metallbe- und -verarbeitung) reduziert werden, während nachgeschaltete Maßnahmen vor allem bei den Einträgen durch kommunale Kläranlagen und durch die Einleitung von Niederschlags- bzw. Mischwasser ansetzen müssen. Übergreifend können über Forschungsprogramme zusätzliche Maßnahmen der Emissionsminderung in den verschiedenen Bereichen entwickelt bzw. bestehende verbessert und optimiert werden. Außerdem ist ein kontinuierliches Monitoring der Umsetzung der Strategie zu empfehlen, um die erreichten Verbesserungen zu dokumentieren, Anpassungsbedarf zu identifizieren sowie sich ggf. ändernde Zielsetzungen (zusätzliche prioritäre Stoffe, neue Qualitätsnormen) zu integrieren. Im Bereich des Stoffrechtes sind dabei die Anforderungen, die nur auf europäischer Ebene umgesetzt werden können, klar und frühzeitig auf europäischer Ebene zu kommunizieren.

Die aus den umzusetzenden Maßnahmen resultierenden Herausforderungen einer Strategie Mikroschadstoffe bezüglich der Akteursstruktur sprechen außerdem dafür, eine solche Strategie durch einen Agenda-Prozess unter Federführung des Bundes zu begleiten.

13 Ausblick

Weitergehende Arbeiten sind vor allem zur Konkretisierung der einzelnen Maßnahmen und der Ableitung konkreter Handlungsschritte notwendig. Insbesondere im Bereich der quellenorientierten Maßnahmen sind umsetzungsrelevante Hintergründe einschließlich möglicher Treiber und Hemmnisse zu analysieren. Außerdem sind Verbesserungen bei der Stofffluss- und Stoffeintragsmodellierung sinnvoll, um den Untersuchungsraum, die Stoffliste sowie die Liste der abgebildeten Emissionsminderungsmaßnahmen zu erweitern mit dem Ziel, dieses Instrumentarium auch für ein begleitendes Monitoring von Maßnahmen einsetzen zu können.