

Kosten und Nutzen von weitergehenden Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination

Die Gesamtemissionen eines Gewässereinzugsgebietes am Beispiel der Blies im Saarland wurden für ausgewählte Spurenstoffe frachtbasiert ermittelt. Hierauf aufbauend wurden verschiedene emissions- und immissionsbasierte Szenarien zur Integration weitergehender Reinigungsstufen auf den kommunalen Kläranlagen untersucht und in ihren Kosten sowie in dem gewässerspezifischen Nutzen bewertet.

Henning Knerr, Birgit Valerius, Ulrich Dittmer, Heidrun Steinmetz, Ralf Hasselbach, Gerd Kolisch und Yannick Taudien

Von Menschen künstlich hergestellte (anthropogene), chemische Verbindungen finden sich in allen Lebensbereichen und sind eine der Grundlagen des Lebensstandards moderner Industriegesellschaften. Nach Gebrauch gelangen die meisten dieser Substanzen in den Abwasserpfad. Viele Stoffe sind bereits ubiquitär verbreitet und werden zum Teil in sehr geringen Konzentrationen (in Spuren) in den Gewässern nachgewiesen, wo sie alleine oder im Zusammenwirken mit anderen Stoffen eine negative Wirkung auf die Ökosysteme haben können.

Priorität sollte die Vermeidung bzw. Verminderung des Eintrags der sogenannten Spurenstoffe in den Wasserkreislauf haben, die sich nach der Bewertung als umweltgefährdend oder trinkwasserrelevant erwiesen haben. Verminderungs- bzw. Vermeidungsstrategien können sowohl beim Produzenten als auch beim Anwender der Produkte ansetzen.

Da kommunale Kläranlagen für zahlreiche Spurenstoffe einen bedeutenden Eintragspfad in Oberflächengewässer darstellen [1], [2], kann die öffentliche Abwasserreinigung ergänzend dort wirken, wo quellenorientierte Maßnahmen nicht ausreichen. Durch die Ergänzung zusätzlicher Reinigungsstufen (z. B. Ozonung, Aktiv-

kohleadsorption) können bestimmte Spurenstoffe im Kläranlagenablauf reduziert werden. Derzeit gibt es jedoch keine rechtliche Vorgabe für eine Nachrüstung kommunaler Kläranlagen mit weitergehenden Reinigungsstufen auf Basis stoff- oder stoffgruppenspezifischer Anforderungswerte. Aus Vorsorgegründen ist dennoch eine Reduzierung der Einträge aus kommunalen Kläranlagen geboten.

Bislang ist die Datenlage zur Bewertung der Belastung saarländischer Gewässer mit Spurenstoffen sehr lückenhaft. Hier besteht erheblicher Untersuchungsbedarf. Für das Schmerzmittel Diclofenac wurde allerdings an mehreren Gewässermessstellen eine Überschreitung der als Umweltqualitätsnorm (UQN) diskutierten Konzentration von 0,05 µg/l festgestellt [3]. Dies verdeutlicht den Handlungsbedarf für einen verbesserten Gewässerschutz im Saarland.

Im Projekt „Stoffflusssimulation der Gesamtemissionen an Spurenstoffen im Einzugsgebiet der Blies und Übertragung der Ergebnisse auf das Saarland“ wurden Empfehlungen für eine Strategie im Umgang mit abwasserbürtigen Spurenstoffen im Saarland entwickelt. Bei dem Projekt wurde die Belastung der Gewässer mit Spurenstoffen systematisch auf Basis eines umfangreichen Messprogramms und unter Verwendung eines Massenbilanzmodells untersucht und in ihren Kosten sowie in dem gewässerspezifischen Nutzen bewertet. Zusätzlich wurden Synergieeffekte für den Parameter Phosphor abgeschätzt, die sich aus dem Betrieb der Verfahren zur Spurenstoffelimination ergeben [4], [5]. Der Beitrag liefert einen Überblick über die Ergebnisse dieser Kosten-Nutzen-Betrachtungen.

Stoffflussmodellierung im Einzugsgebiet der Blies

Als Referenzgewässer für eine Bilanzierung der Gesamtemissionen an Spurenstoffen im Saarland wurde das Einzugsgebiet (EZG) der Blies bis zur Einmündung des Schwarzbachs ausgewählt (**Bild 1**). Die Blies ist mit einer Länge von ca. 100 km der größte Nebenfluss der Saar und weist bis zur Einmündung des Schwarzbachs keine wesentlichen Einflüsse aus benachbarten Bundesländern auf. Im Betrachtungsgebiet der oberen Blies befinden sich 33 kommunale

/ Kompakt /

- Stoffflussmodellierungen sind ein geeignetes Werkzeug zur Bewertung des Nutzens von Maßnahmen zur gezielten Spurenstoffelimination.
- Immissionsbetrachtungen zu Nutzen und Kosten von weitergehenden Reinigungsstufen sind essentiell im Hinblick auf die Auswahl von effizienten Maßnahmen. Einher geht eine Verschiebung bei der Priorisierung der relevanten Kläranlagen, hin zur Betrachtung auch kleinerer Kläranlagen, was angepasster Verfahrenstechnik für die Spurenstoffelimination bedarf.
- Die Einführung von weitergehenden Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination bietet die Chance, durch Definition der örtlichen Nutzungsanforderungen an die Gewässer, Synergieeffekte gezielt zu nutzen.

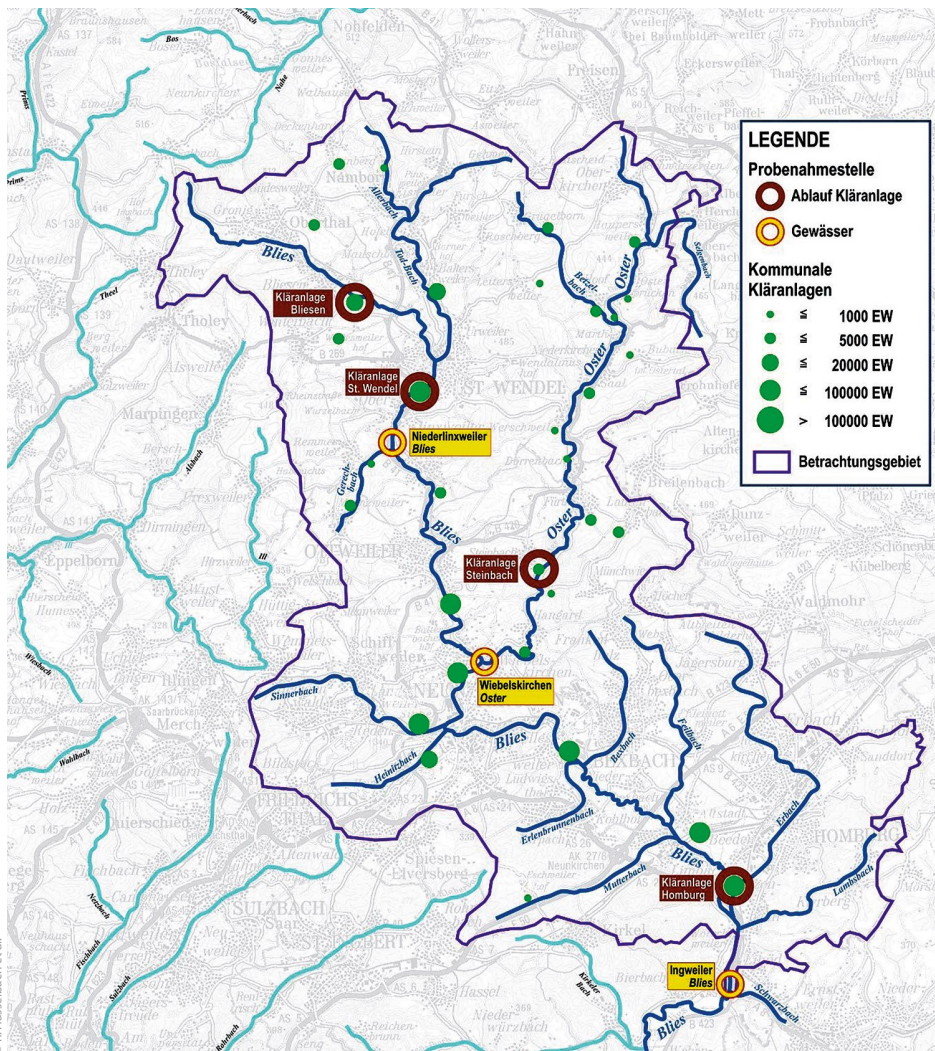


Bild 1: Betrachtungsraum „Obere Blies“ mit Hauptgewässern, Messstellen und Kläranlagen [6]

Kläranlagen der Größenklassen 1 – 4, in denen das Abwasser von rund 210.000 angeschlossenen Einwohnern behandelt wird.

Zur Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung des Spurenstoffeintrags aus der kommunalen Abwasserreinigung wurde eine Modellierung der Fließgewässer im EZG der oberen Blies durchgeführt. Die Stoffflussmodellierung erfolgte mittels des im Rahmen des Interreg-V-A-Projektes „EmiSûre - Entwicklung von Strategien zur Reduzierung des Mikroschadstoffeintrags in Gewässern im deutsch-luxemburgischen Grenzgebiet“ entwickelten gleichnamigen Massenbilanzmodells [7], [8], [9]. Der Bilanzraum wurde hierzu als georeferenziertes Gewässernetz abgebildet. An allen Verzweigungspunkten und den Einleitstellen wurde das Gewässernetz durch Knoten in Segmente unterteilt. Jedes Segment wurde mit einem Abflusswert für mittleren Abfluss (MQ) und mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) versehen. Ferner wurden alle im Bilanzraum gelegenen Kläranlagen mit den dazugehörigen Mischwasserentlastungen und angeschlossenen Krankenhäusern georeferenziert abgebildet.

Das Modell bilanziert in Gewässer eingeleitete Stofffrachten aus Punktemissionen (Kläranlagen, Mischwasserüberläufe). Die emittierten Frachten werden den definierten Gewässersegmenten zugeordnet, durch eine stromabwärts gerichtete Verknüpfung aufsum-

miert und in Konzentrationen umgerechnet. Die Immissionsbilanzierung erfolgt unter Berücksichtigung von Transformationsprozessen der Stoffe in den Gewässern. Die Stofftransformation wird unter Annahme einer Kinetik erster Ordnung berechnet, wozu eine substanzspezifische Verlustratenkonstante und die Aufenthaltszeit im betrachteten Gewässerabschnitt verwendet werden. Die Emissions- und Immissionsbilanzierung erfolgt auf Basis von Jahresdurchschnittswerten, wobei eine räumlich inhomogene Verteilung der Emissionen berücksichtigt werden kann [7], [8], [9].

Es wurde eine Stoffflussmodellierung für 15 abwasserbürtige gebietsspezifische Referenzsubstanzen durchgeführt (Szenario 0). Die Substanzen umfassen neun Arzneimittel, zwei Diagnostika, zwei Lebensmittelzusatzstoffe sowie zwei Industriechemikalien. Die Einführung weitergehender Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination und deren Einfluss auf die Gewässersituation wurden in vier Ausbauszenarien im Vergleich zu dem Ist-Zustand untersucht (**Tabelle 1**). Die Szenarien 1 und 2 stellen emissionsorientierte Betrachtungen dar. Im Szenario 3 werden Kläranlagen anhand des Abwasseranteils an der Einleitstelle bei MNQ und der Ausbaugröße ausgewählt. In Szenario 4 wird die Wirkung auf die Gewässer bei der Auswahl der Kläranlagen in die Betrachtung einbezogen. Szenario 4b beinhaltet zudem quellenorientierte Maßnah-

Tabelle 1: Betrachtete Szenarien [4]

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
Sz. 0	Ist-Zustand	Vorhandene Belastungssituation
Sz.1	Ausbau aller Kläranlagen > 50.000 E	Nach Ausbaugröße (2 Kläranlagen, 142.000 E)
Sz. 2	Ausbau aller Kläranlagen > 10.000 E	Nach Ausbaugröße (7 Kläranlagen, 240.500 E)
Sz. 3	Ausbau der Kläranlagen an Belastungsschwerpunkten	Nach Abwasseranteil > 50 % bei MNQ und Ausbaugröße > 2.500 E (5 Kläranlagen, 212.000 E)
Sz. 4a	Ausbau der Kläranlagen, die den größten Nutzen für das Gewässer haben	Nach Unterschreitung des Qualitätskriteriums bei MQ im Gewässer (10 Kläranlagen, 247.500 E)
Sz. 4b	Ausbau der Kläranlagen nach Gewässernutzen und Berücksichtigung von Maßnahmen an der Quelle und Toleranz geringer Überschreitungen des Qualitätskriteriums	Nach Unterschreitung des Qualitätskriteriums bei MQ im Gewässer (6 Kläranlagen, 221.00 E)

Quelle: T. G. Schmitt et al.

men bei der Herstellung und Verwendung von Substanzen mit einer pauschal angenommenen Emissionsminderung. [4]

Exemplarisch sind in **Bild 2** die Ergebnisse der Stoffflussmodellierung für den Ist-Zustand (Szenario 0) und die Szenarien 2, 3 und 4b für das Schmerzmittel Diclofenac bei mittlerem Abfluss (MQ) anhand des sogenannten Belastungsfaktors BF dargestellt. Der BF ist hierbei der Verhältniswert aus der simulierten Gewässerkonzentration PEC (Predicted Environmental Concentration) und einem substanzspezifisch festgelegten Qualitätskriterium QK. Grundlage für die im Projekt verwendeten Qualitätskriterien sind Konzentrationswerte, die zum Teil in der EU-Richtlinie 2013/39/EU [10] und der Oberflächengewässerverordnung [11] als Umweltqualitätsnorm (UQN) in Form eines Jahresdurchschnittswertes (JD-UQN) festgelegt sind. Die Mehrzahl der untersuchten Substanzen ist derzeit jedoch nicht gesetzlich geregelt. Aus diesem Grund wurden Ersatzwerte, z. B. die ökotoxikologisch abgeleitete „Null-Effekt-Konzentration“ PNEC (Predicted No Effect Concentration) oder die zulässige jährliche Durchschnittskonzentration AA-EQS (Annual Average Environmental Quality Standards) des Schweizerischen Zentrums für angewandte Ökotoxikologie (Ökotoxzentrum) [12], herangezogen.

Nutzen der Einführung weitergehender Reinigungsstufen

Nutzen für die Spurenstoffbelastung

Gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (2000/60/EG) [13] wird der Gewässerzustand für alle Wasserkörper bewertet, die aus mindestens zehn Quadratkilometer großen Einzugsgebieten bestehen. Es wird eine flächendeckende Bewertung des Einzugsgebietes angestrebt. Der erzielte Nutzen für das Gewässer ist allerdings nicht eindeutig definiert. Im Projekt wurde der Nutzen daher indirekt über die Reduktion der Spurenstofffracht am Gebietsauslass

(frachtbezogen) und über die prozentuale Veränderung der Gewässerkonzentration an den für die WRRL-Bewertung relevanten Messstellen bzw. über den zusätzlichen Anteil des Gewässersystems, der einen BF < 1 erreicht, (qualitätsbezogen) bewertet. Die Ergebnisse der Szenarienbetrachtung sind für die Bezugsgröße MQ in den **Tabellen 2** und **3** zusammengefasst.

Bezogen auf die Frachtveränderung am Gebietsauslass ergibt sich bzgl. der Summe der hier betrachteten Spurenstoffe eine Reduktion um insgesamt rund 820 g/d (Sz. 1) bzw. 1.200 g/d (Sz. 2/4b). Das tatsächliche Reduktionspotenzial liegt dagegen deutlich darüber, da nur eine Auswahl der im Gewässer vorzufindenden Substanzen betrachtet wurde. Mit Blick auf die Frachtreduktion ergibt sich für den emissionsorientierten Ansatz des Szenario 2 ein nahezu identisches Ergebnis wie bei dem immissionsorientierten Ansatz des Szenario 4b.

Im Hinblick auf die Gewässersituation können zwischen 13 km (Sz. 3) und bis zu 77 km (Sz. 4a) der abgebildeten Fließstrecke (86 km) durch die gezielte Spurenstoffelimination zusätzlich auf einen BF < 1 verbessert werden. Der überwiegende Anteil der auf das Fließgewässer bezogenen Verbesserung entfällt auf das Schmerzmittel Diclofenac, was auf die hohe Belastung im Ist-Zustand (**Bild 2**) und die gute Eliminierbarkeit in weitergehenden Reinigungsstufen dieser Substanz zurückzuführen ist (83 % Aktivkohleadsorption, 95 % Ozonung). Neben Diclofenac ergaben sich im Ist-Zustand nur für Acesulfam (Süßstoff) und PFOS (Perfluoriertes Tensid) eine Bewertung mit BF > 1. Mit nur etwa 50 % Elimination ist Acesulfam weder gut oxidierbar noch adsorbierbar. PFOS weist eine sehr niedrige JD-UQN in Höhe von $6,5 \cdot 10^{-4} \mu\text{g/l}$ auf, weswegen durch die Einführung weitergehender Reinigungsstufen nur wenige Gewässerabschnitte unter das QK gebracht werden können.

Die prozentuale Veränderung der Gewässerkonzentration an den für die WRRL-Bewertung relevanten Messstellen im Bilanzraum ergibt ebenfalls bereits in Szenario 2 ein positives Ergebnis, das sich aber auf die Blies beschränkt. Für Diclofenac wird eine Verbesserung von 65 % für die Messstelle (MS) Ingweiler/ Blies (Gebietsauslass) berechnet. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Oster ist eine Auswahl der Kläranlagen in den Szenarien 1 – 3 nicht ausreichend.

Nutzen für die Phosphor-Elimination

Bei nahezu allen Verfahren ist eine nachgeschaltete Filtration Bestandteil des Spurenstoffeliminationsverfahrens [14]. Die Gründe für die Filtration sind unterschiedlich. Die nachgeschaltete Filterstufe ist verfahrenstechnisch erforderlich,

- um den Rückhalt der Pulverkohle zu gewährleisten,
- um die Möglichkeit der Filtration über Kornkohle (Festbett) zu geben und
- um als Nachbehandlung nach einer Ozonbehandlung Transformationsprodukte im Filter abzubauen. [4]

Aus der Zielsetzung einer gezielten Spurenstoffelimination ergeben sich damit Synergieeffekte, im Sinne automatischer Nebeneffekte zu anderen Abwasserparametern. Bedingt durch den zusätzlichen Partikelrückhalt der Filtration kann bspw. eine P_{ges} -Verringerung von 0,1 – 0,5 $\text{mg } P_{\text{ges}}/\text{mg AFS}$ [15] erreicht werden. In Kombination mit einer parallelen chemischen Phosphor-Elimination sind P_{ges} -Ablaufwerte im Jahresmittel von $\leq 0,1 \text{ mg/l } P_{\text{ges}}$ erreichbar [16].

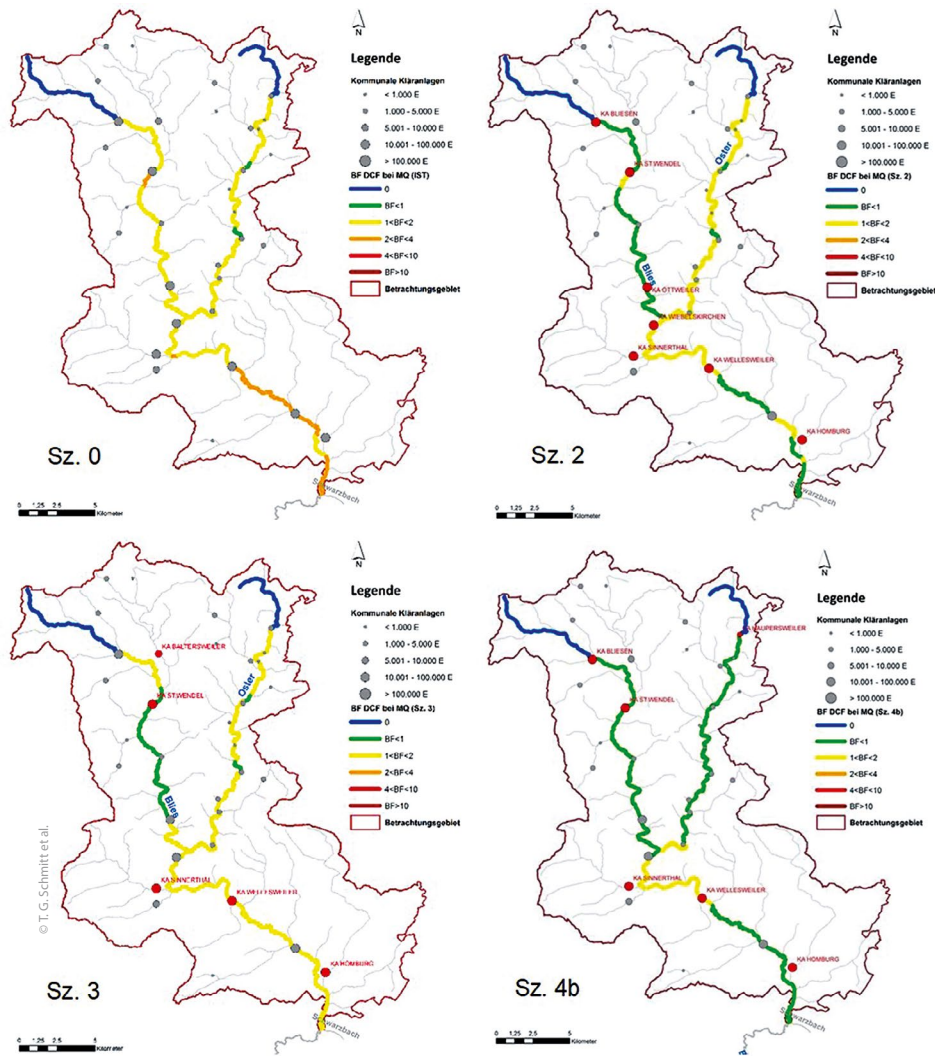


Bild 2: Ergebniskarten zum Belastungsfaktor BF für Diclofenac bei MQ für den Ist-Zustand und für drei Kläranlagenausbauszenarien; die im Modell mit weitergehenden Reinigungsstufen ausgestatteten Kläranlagen sind rot markiert [4]

Tabelle 2: Frachtbezogener Nutzen durch die Integration von weitergehenden Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination; Differenz zum Ist-Zustand an der Messstelle Ingweiler/Blies bei MQ [4]

Substanz		Szenario				
		1	2	3	4a	4b
		[g/d]				
Lebensmittel-zusatzstoff	Acesulfam	-48	-84	-67	-90	-109
	Sucralose	-52	-80	-73	-81	-114
Arzneimittel	Bezafibrat	-3	-4	-3	-4	-4
	Carbamazepin	-20	-31	-29	-31	-31
	Diclofenac	-37	-50	-45	-51	-52
	Metoprolol	-31	-47	-41	-49	-48
	Sotalol	-4	-5	-5	-6	-6
	Clarithromycin	-10	-14	-13	-15	-15
	Sulfamethoxazol	-11	-12	-11	-12	-12
	N4-Sulfamethoxazol	-4	-7	-6	-7	-7
	Primidon	-5	-9	-8	-9	-10
	Amidotrizoensäure	-91	-119	-108	-120	-57
	lomeprol	-257	-270	-266	-272	-310
Sonstige	PFOS	0	-1	-1	-1	-1
	1H-Benzotriazol	-250	-291	-280	-296	-319
Summe		-823	-1.204	-956	-1.044	-1.195

Quelle: T. G. Schmitt et al.

Tabelle 3: Qualitätsbezogener Nutzen durch die Integration von weitergehenden Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination; Differenz zum Ist-Zustand bei MQ [4]

Substanz	QK [ng/l]	Prozentuale Veränderung der Gewässerkonzentration im Vergleich zu Szenario 0 an den Messstellen										Zusätzliche Fließkilometer mit BF < 1 bei MQ					
		MS Ingweiler/ Blies					MS Wiebelskirchen/ Oster					EZG Blies+Oster					
		Szenario					Szenario					Szenario					
		1	2	3	4a	4b	1	2	3	4a	4b	1	2	3	4a	4b	
[%]					[%]					[km]							
Lebensmittel-zusatzstoff	Acesulfam	100	-18	-31	-25	-33	-38	0	0	0	-22	-27	-	-	-	2	7
	Sucralose	/	-18	-28	-25	-28	-40	0	0	0	-15	-25	-	-	-	-	-
Arzneimittel	Bezafibrat	2.300	-32	-45	-37	-47	-49	0	0	0	-28	-29	0	0	0	0	0
	Carbamazepin	500	-49	-75	-70	-76	-76	0	0	0	-38	-32	0	0	0	0	0
	Diclofenac	50	-49	-65	-60	-68	-68	0	0	0	-36	-30	0	30	12	68	56
	Metoprolol	43.000	-38	-58	-50	-60	-60	0	0	0	-34	-31	0	0	0	0	0
	Sotalol	12.000	-39	-59	-53	-65	-62	0	0	0	-42	-33	0	0	0	0	0
	Clarithromycin	100	-52	-74	-68	-75	-75	0	0	0	-35	-31	0	0	0	0	0
	Sulfamethoxazol	600	-66	-74	-71	-75	-77	0	0	0	-34	-30	0	0	0	0	0
	N4-Sulfamethoxazol	/	-33	-58	-51	-59	-60	0	0	0	-33	-30	-	-	-	-	-
	Primidon	320	-26	-46	-42	-50	-52	0	0	0	-29	-29	0	0	0	0	0
	Amidotrizoensäure	1.000	-25	-33	-30	-34	-44	0	0	0	-16	-25	0	0	0	0	0
	lomeprol	1.000	-52	-55	-54	-55	-63	0	0	0	-25	-28	0	0	0	0	0
Sonstige	PFOS	0,65	-21	-70	-464	-70	-71	0	0	0	-36	-31	0	6	1	7	7
	1H-Benzotriazol	19.400	-52	-60	-58	-61	-66	0	0	0	-30	-29	0	0	0	0	0
Summe		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	36	13	77	70	

Quelle: T. G. Schmitt et al.

Die über die 33 Kläranlagen im Ist-Zustand eingeleitete Phosphorfracht liegt bei etwa 30 t/a P_{ges} (Bild 3). In den Maßnahmen-szenarien kann die emittierte Gesamtfracht, je nach Anzahl der ausgebauten Kläranlagen um 32 bis 57 % verringert werden. Die P_{ges} -Emission läge somit nur noch bei 12,6 bis 20,1 t/a P_{ges} , womit eine entsprechende Entlastung der Gewässer einhergeht.

Kosten der Einführung weitergehender Reinigungsstufen

Die Kosten für den Bau und den Betrieb der weitergehenden Reinigungsstufen wurden auf Basis von Literaturangaben geschätzt. Für die Kostenschätzung wurden die Behandlungskosten in [€/m³] mit den einwohnerspezifischen Kostenfunktionen des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe Nordrhein-Westfalen [17] ermittelt und über die Bemessungswassermenge in [m³/a] der weitergehenden Reinigungsstufe die Jahreskosten in [€/a] bestimmt. Die Festlegung der Bemessungswassermenge erfolgte gemäß den Handlungsempfehlungen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg [18], [19], da die weitergehende Reinigungsstufe aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur auf eine entsprechende Teilstrombehandlung ausgelegt wird. Aus den Jahreskosten wurden entsprechend den LAWA-Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen [20] die Investitionskosten berechnet. In Anlehnung an Türk et al. [21] wurde eine Aufteilung von 40 % für Bautechnik, 40 % für Maschinenteknik und 20 % für EMSR angesetzt. Der Anteil der Kapitalkos-

ten an den Jahreskosten wurde dabei einmal mit 40 % und einmal mit 60 % angenommen, da dieser stark vom Verfahren und von den Vorort-Bedingungen abhängt. Um eine Kostenanpassung an zurückliegende Preissteigerungen sowie an eine zukünftige Planung und Realisierung in einem Zeithorizont von 3 bis 5 Jahren zu berücksichtigen, wurde in der Kostenfunktion eine Preissteigerung in Höhe von 30 % angesetzt. Damit ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Bandbreiten der Kosten für die einzelnen Szenarien.

Der Ausbau der zwei Kläranlagen im Szenario 1 verursacht erwartungsgemäß die niedrigsten Investitionskosten. Der Ausbau der zehn Anlagen im Szenario 4a verursacht (ebenso erwartungsgemäß) die höchsten Investitionskosten, hat aber auch den größten Nutzen für das Gewässer. Die Unterschiede zwischen Szenario 3 und 4b sind bei Betrachtung der spezifischen Kosten mit 13,9 bzw. 14,0 € pro Einwohner und Jahr sehr gering. Die höchsten spezifischen Kosten weist das Szenario 4a mit fast 20 € pro Einwohner und Jahr auf. Gemäß Tabelle 3 steht den hohen spezifischen Kosten von Szenario 4a aber auch eine Verbesserung der Gewässerqualität von rd. 80 km mit einem BF < 1 gegenüber. Beim Szenario 3 resultieren dagegen lediglich 13 zusätzliche Fließkilometer mit einem BF < 1.

Kosten-Nutzen-Betrachtung

Dem mit Hilfe der Modellierung abgeleiteten Nutzen für die Spurenstoffbelastung der Gewässer stehen die berechneten Kosten der

Tabelle 4: Zusammenstellung der Kosten der Szenarien [4]

			Szenario				
			1	2	3	4a	4b
Investitionskosten	Min	[Mio. €]	7,5	18,4	16,4	23,2	16,5
	Max	[Mio. €]	11,3	27,6	24,6	34,7	24,8
Jahreskosten		[Mio. €/a]	1,3	3,2	2,9	4,0	2,9
Spezifische Kosten		[€/E _{Ausbau} /a]	4,3	10,6	9,4	13,3	9,5
		[€/E _{Einwohner} /a]	6,4	15,6	13,9	19,6	14,0

Quelle: T. G. Schmitt et al.

weitergehenden Reinigungsstufe gegenüber. Als maßgebender Kennwert für den Kosten-Nutzen-Vergleich werden die je Szenario geschätzten Jahreskosten herangezogen. Aus dem Quotienten der Jahreskosten und den zusätzlichen Fließkilometern mit $BF < 1$, der prozentualen Verbesserung der Gewässerkonzentration an den Messstellen bzw. der am Gebietsauslass reduzierten Jahresfracht wird die Effizienz der in den untersuchten Szenarien beschriebenen Maßnahmen für alle Parameter bewertet (**Bild 4**).

Bei einer frachtbezogenen Bewertung weist Szenario 1 die höchste Kosteneffizienz auf. Die Szenarien 2 – 4 unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander.

Die Kosteneffizienz in Bezug auf eine prozentuale Verbesserung an den Gewässermessstellen steigt von Szenario 1 bis Szenario 4 kontinuierlich an. Der Unterschied von Szenario 1 zu Szenario 4b beträgt etwa 40 %. Die höhere Effizienz der Szenarien 3 und 4 ist dabei auf die selektive Auswahl der Kläranlagen anhand der Gewässerbelastung zurückzuführen.

Bezogen auf die zusätzlichen Fließkilometer mit $BF < 1$ kann eine hohe Kosteneffizienz entweder durch den Ausbau einer großen Anzahl an Kläranlagen (Sz. 2) oder durch immissionsorientiert ausgewählte Anlagen (Sz. 4a, b) erreicht werden. Das Szenario 3, bei dem die Anlagen nach Belastungsschwerpunkten über einen Abwasseranteil bei MNQ ausgewählt wurden, ergeben eine verhältnismäßig niedrige Kosteneffizienz. Hier ist zu prüfen, ob eine

Anpassung des Grenzwertes für den Abwasseranteil bzw. die Bezugsgröße des Gewässerabflusses eine Auswahl mit höherem Gewässernutzen ermöglicht.

Die auf die emittierten P_{ges} -Frachten bezogene Bewertung der Synergieeffekte ergeben das gleiche Bild, wie bei der frachtbezogenen Bewertung der Spurenstoffbelastung (ohne Abbildung). Das Szenario 1 weist eine etwa doppelt so hohe Effizienz im Vergleich zu den Szenarien 2 – 4 auf.

Zusammenfassung und Ausblick

In dem Projekt „Stoffflusssimulation der Gesamtemissionen an Spurenstoffen im Einzugsgebiet der Blies und Übertragung der Ergebnisse auf das Saarland“ wurden die Kosten und Nutzen, die aus einer Einführung weitergehender Reinigungsstufen zur Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen resultieren, aufgezeigt. Hierzu wurden der fracht- und qualitätsbezogene Nutzen verschiedener Kläranlagenausbauszenarien für 15 abwasserbürtige Spurenstoffe auf die jeweiligen Jahreskosten bezogen. Die Betrachtung der Kosteneffizienz wurde auf der Grundlage simulierter Gewässerkonzentrationen bei MQ durchgeführt. Zusätzlich wurden Synergieeffekte, die aus dem Betrieb der Verfahren der Spurenstoffelimination auf den Parameter Phosphor resultieren, abgeschätzt.

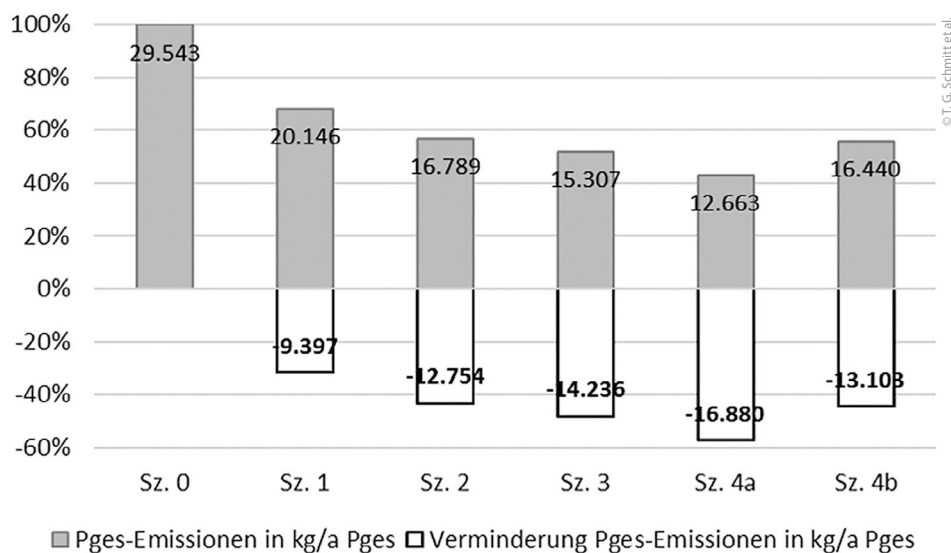
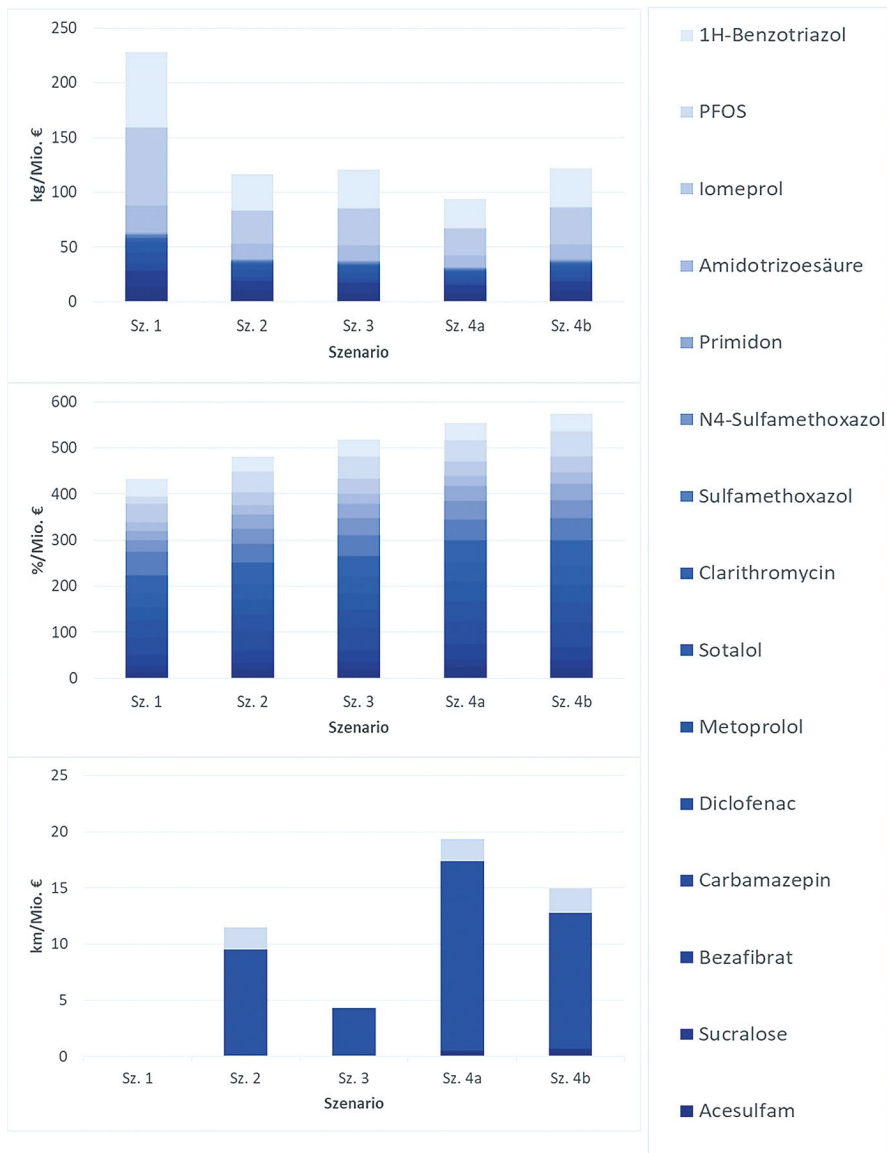


Bild 3: Erreichbare Reduzierung der P_{ges} -Einträge durch die Maßnahmen, verändert nach [4]



© T. G. Schmitt et al.

Bild 4: Kosteneffizienz der Szenarien je kg reduzierter Fracht am Gebietsauslass (oben), %-Veränderung der Gewässerkonzentration kumuliert über die drei Messstellen (Mitte) und zusätzlichen Fließkilometern mit BF < 1 (unten) [4]

Für den Betrachtungsraum liegen die geschätzten Jahreskosten mit Bezugsjahr 2020 bei rund 1,3 – 4,0 Mio. €/a bzw. rd. 7,5 – 35 Mio. € Investitionskosten. Die spezifischen Kosten der Elimination können eine Größenordnung von bis zu 20 € pro Einwohner und Jahr erreichen.

Hinsichtlich der Frachtreduktion zeigt der Ausbau großer und damit belastungsintensiver Standorte die größte Kosteneffizienz auf. Eine allein emissionsorientierte Auswahl von Kläranlagen zur Nachrüstung mit einer weitergehenden Reinigungsstufe ist im vorliegenden Fall allerdings nicht zielführend, da bezogen auf die simulierten Gewässerstrecken im Bilanzraum nur ein relativ geringer Nutzen erzielt wird. Bei Betrachtung der Reduktion der Spurenstoffkonzentrationen in der Blies und der Oster und in Bezug auf eine prozentuale Verbesserung der Gewässerkonzentration kumuliert über drei WRRL- Messstellen, zeigen die immissionsbasierten Szenarien die größte Kosteneffizienz.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Immissionsbetrachtungen zu Nutzen und Kosten zur Nachrüstung kommunaler Kläranlagen mit weitergehenden Reinigungsstufen essentiell im Hinblick auf die Priorisierung von auszubauenden Kläranlagen sind. Auch wird der Handlungsbedarf nachgeschalteter technischer Maßnahmen in Form von weitergehenden Reinigungsstufen als kurz- bis mittelfristige Optionen zur Verbesserung der Gewässerqualität deutlich. Allerdings gelingt das nicht für alle Spurenstoffe in ausreichendem Maß, was den Handlungsbedarf im Bereich quellenorientierter Vorsorgemaßnahmen nachdrücklich unterstreicht.

Mit Immissionsbetrachtungen einher geht eine Verschiebung bei der Priorisierung der relevanten Kläranlagen, hin zur Betrachtung auch kleinerer Kläranlagen. Die Verfahrenstechnik für die Spurenstoffelimination ist gemäß dem Stand der Technik eher auf die Anwendung auf großen Kläranlagen ausgelegt. Im Bereich von

kleinen und mittleren Kläranlagen gibt es noch Forschungsbedarf. Vor diesem Hintergrund wurde das im Januar 2021 gestartete Interreg-V-A-Projekt „CoMinGreat – Competence platform for Micropollutants in the Greater region“ ins Leben gerufen, welches u. a. das Ziel verfolgt, Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen zur Spurenstoffelimination für kleinere und mittelgroße Anlagen zu erforschen [22].

Die vereinfachte Betrachtung der Synergieeffekte auf den Parameter Phosphor verdeutlicht, dass die Reduzierung der Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlagen durch weitergehende Verfahren, nicht als alleiniger Maßstab für die Bewertung des Nutzens herangezogen werden sollte. Vielmehr ist durch den Betrieb dieser Verfahren in vielfältiger Hinsicht eine geringere Gewässerbelastung gegeben. Die derzeitige Diskussion über die Einführung von weitergehenden Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination bietet daher die Chance, durch Definition der örtlichen Nutzungsanforderungen an die Gewässer, die vorhandenen Synergieeffekte, im Sinne des Vorsorgeprinzips, gezielt zu nutzen.

Literatur

- [1] Bode, H.; Grünebaum, T.; Klopp, R. (2010): Anthropogene Spurenstoffe aus Kläranlagen. Teil 2: Maßnahmen bei der Abwasserbehandlung - Möglichkeiten, Notwendigkeiten und Voraussetzungen. In: Korrespondenz Abwasser 2010 (57) Nr. 3, 240 – 244
- [2] UBA (2016): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer – Phase 2. UBA Texte 60/2016. Dessau-Roßlau
- [3] LUA (2015): Messdaten des Landesamtes für Umwelt- und Arbeitsschutz des Saarlands (unveröffentlicht). 2015
- [4] Schmitt, T. G.; Knerr, H.; Valerius, B.; Kolisch, G.; Taudien, Y. (2019): Stoffflussmodellierung der Gesamtemissionen an Spurenstoffen im Einzugsgebiet der Blies und Übertragung der Ergebnisse auf das Saarland. Studie im Auftrag des Entsorgungverband Saar (EVS). Oktober 2019
- [5] Valerius, B.; Knerr, H.; Steinmetz, H.; Schmitt, T. G.; Taudien, Y.; Kolisch, G.; Hasselbach, R.; Vollerthun, T. (2020): Zielgerechte Erhebung von Messdaten zur Spurenstoffbilanzierung größerer Gewässersysteme. In: KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2020 (67). Nr. 11. 868 – 875.
- [6] Hasselbach, R.; Vollerthun, T.; Knerr, H.; Valerius, B.; Taudien, Y. (2020): Stoffflussmodellierung im Einzugsgebiet der Blies - Kosten und Nutzen von 4. Reinigungsstufen, Betreuer- und Obleutetage des DWA Landesverbandes Hessen/ Rheinland-Pfalz/ Saarland 2020. 04.02.2020. Wiesbaden-Naurod.
- [7] Knerr, H.; Srednoselec, I.; Schmitt, T.G.; Hansen, J.; Venditti, S. (2018): EmiSûre - Entwicklung von Strategien zur Reduzierung des Mikroschadstoffeintrags in Gewässer im deutsch-luxemburgischen Grenzgebiet. Wasser und Abfall (20). Nr. 12. 22 – 28.
- [8] Knerr, H.; Gretzschel, O.; Valerius, B.; Srednoselec, I.; Zhou, J.; Schmitt, T. G.; Steinmetz, H.; Dittmer, U.; Taudien, Y.; Kolisch, G. (2020): Modellgestützte Bilanzierung von Mikroschadstoffen in Gewässern. In: gwf-Wasser | Abwasser, 3/2020, 55 – 65
- [9] Venditti, S.; Kiesch, A.; Brunhoferova, H.; Schlien, M.; Knerr, H.; Dittmer, U.; Hansen, J. (2022): Assessing the impact of micropollutant mitigation measures using vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater catchments in the greater region: a reference case for rural areas. Water Science & Technology 86(1). DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.191>
- [10] EU (2013): Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, L. 226
- [11] OGeWV (2016): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung-OGeWV) vom 20. Juni 2016, BGBl. I S. 1373.
- [12] Ökotoxzentrum (2018): Qualitätskriterienvorschläge Ökotoxzentrum. [Online] 2018. <https://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/qualitaetskriterienvorschlaege-oekotoxzentrum/>
- [13] EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABl. L 327
- [14] Metzger, S.; Keyzers, C.; Duschek, K. (2019): Synergieeffekte der Spurenstoffelimination im Kontext der weitergehenden Abwasserreinigung. DWA Landesverbandstagung Baden-Württemberg am 15./16.10.2019. Pforzheim.
- [15] DWA (2019): Arbeitsblatt DWA-A 203, Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung. Februar 2019.
- [16] Acosta, L.; Launay, M.; Zettl, U. (2021): Untersuchungen zur Kombination von weitestgehender P-Elimination und Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen, Abschlussbericht, März 2021
- [17] Kom-M.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Hrsg.: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Köln, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Stand 01.09.2016.
- [18] KOMS (2018): „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination“, Hrsg.: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart Stand 03/2018
- [19] KOMS (2020): „Leitfaden, Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen“, Bearbeiter: Fenrich, E.; Metzger, S.; Morck, T.; Launay, M.; Hrsg.: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart Stand 09/2020
- [20] LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Hrsg.: DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 8. überarbeitete Auflage.
- [21] Türk, J., Dazio, M., Dinkel, F., Ebben, T., Hassani, V., Herbst, H., Hochstrat, R., Matheja, A., Montag, D., Remmler, F., Schaefer, S., Schramm, E., Vogt, M., Werbeck, N., Wermter, P., Wintgens, T. (2013): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)“, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV).
- [22] Vollertun, T.; Hansen, J.; Knerr, H. (2022): Wissenstransfer und Kommunikation grenzüberschreitend gestalten, in: WASSER UND ABFALL 10/2022, 32 – 37.

Autoren

Dr.-Ing. Henning Knerr

Dipl.-Biol. Birgit Valerius

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dittmer

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Technische Universität Kaiserslautern
tecta - Zentrum für innovative Abwassertechnologien
an der TU Kaiserslautern e. V.
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft,
Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung
Paul-Ehrlich Straße 14
D-67663 Kaiserslautern
henning.knerr@bauing.uni-kl.de

Dr.-Ing. Ralf Hasselbach

Entsorgungsverband Saar (EVS)

Untertürkheimer Straße 21

66117 Saarbrücken

Dr.-Ing. Gerd Kolisch

Dipl.-Ing. Yannick Taudien

Wuppertalgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH

Untere Lichtenplatzer Straße 100

42289 Wuppertal