Ökologische Bewertung einer dezentralen Enthärtung mittels Ionenaustausch

Die Bewertung einer Trinkwasserenthärtung – ob zentral im Wasserwerk oder dezentral in der Hausinstallation – ist von den spezifischen Randbedingungen abhängig. In diesem Fachbeitrag werden ökologische Auswirkungen des Einsatzes dezentral in der Hausinstallation eingesetzter Enthärtungsanlagen mittels Ionenaustausch betrachtet. Besonders im Fokus stehen hierbei der Energieverbrauch, der Einsatz an Chemikalien (inkl. Wasch- und Reinigungsmittel) sowie die Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten. Unter den betrachteten Randbedingungen kann die dezentrale Enthärtung des Trinkwassers hinsichtlich der über den gesamten Prozess emittierten Treibhausgas-Emissionen mit leichten ökologischen Vorteilen verbunden sein. Ein weiterer wesentlicher Vorteil aus ökologischer Sicht ist der mögliche reduzierte Einsatz von Wasch- und Reinigungsmittel, der durch aktive Hinweise an die Nutzer unterstützt werden kann.

von: Dr.-Ing. Thomas Hillenbrand, Dr. Johannes Schuler & Dr.-Ing. Felix Tettenborn (alle: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung)

Der Härtegrad des in den Haushalten eingesetzten Trinkwassers hat Einfluss auf verschiedene, für den Nutzer relevante Aspekte: Hartes Wasser führt zu Kalkablagerungen und vermindert die Waschkraft von Tensiden, was einen zusätzlichen Reinigungsaufwand und einen erhöhten Waschmittel- und Energieverbrauch verursachen kann. Kalkablagerungen können außerdem die Nutzungsdauer von wassernutzenden Haushaltsgeräten beeinträchtigen. Die Verringerung des Härtegrads – ob zentral im Wasserwerk oder dezentral in der Hausinstallation – ist auf der anderen Seite ebenfalls mit Aufwand verbunden. Die Bewertung einer solchen Trinkwasserenthärtung ist immer auch von den spezifischen Randbedingungen abhängig [1–6].

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die ökologischen Auswirkungen des Einsatzes dezentral in der Hausinstallation eingesetzter Enthärtungsanlagen mittels Ionenaustausch betrachtet. Dabei stehen neben zusätzlichen umweltrelevanten Aspekten (wie dem Einfluss auf ökotoxikologisch relevanten Emissionen) insbesondere der Energieverbrauch, der Einsatz an Chemikalien (inkl. Wasch- und Reinigungsmittel) sowie die Nutzungsdauer von wasserführenden Haushaltsgeräten im Fokus. Der wahrgenommene Nutzen und objektive Veränderungen bei Endverbrauchern sowie die Kundenzufriedenheit wurden im Rahmen einer ergänzenden Befragung von Haushalten zur Nutzung von Trinkwasser mit unterschiedlichen Härtegraden erhoben.

Methodischer Ansatz

Die ökologische Bewertung erfolgt in Anlehnung an die Ökobilanz-Methodik mit Zieldefinition und Festlegung der Systemgrenzen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung (vgl. Vorgehensweise nach ISO-Norm DIN EN ISO 14040). Grundlage ist ein detailliertes Stoffflussmodell. Die notwendigen Daten stammen aus der Literatur, aus Expertengesprächen, eigenen Berechnungen und Abschätzungen sowie aus einer Befragung von Betreibern dezentraler Enthärtungsanlagen und einer ergänzenden repräsentativen Befragung von Haushalten zur Nutzung von Trinkwasser mit unterschiedlichen Härtegraden.

Die Ergebnisse der Sachbilanz sind Wirkungskategorien zuzuordnen. Dazu wird der ILCD (International Reference Life Cycle Data System)-Ansatz genutzt [7]. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt hier auf der Wirkungskategorie Treibhauseffekt, zusätzlich werden die Versauerung und die Eutrophierung[1] betrachtet und Gewässer-relevante Emissionen beschrieben. Zur Auswertung wird die Stoffluss- und Ökobilanz-Software UMBERTO NXT unter Einbindung der Ecoinvent-Datenbank eingesetzt. Für relevante Wirkungskategorien erfolgt eine weitergehende Szenario-Analyse.

Eine ergänzende repräsentative Befragung von Haushalten aus Regionen mit unterschiedlichen Wassergraden (207 Haushalte mit und 625 Haushalte ohne

[1] Unterschieden wird zwischen der aquatischen Eutrophierung, die sich aus Eutrophierung (Binnengewässer): Phosphornährstoffe, die ins Kompartiment Binnengewässer gelangen, und Eutrophierung (marin): Stickstoffnährstoffe, die ins Kompartiment Meer gelangen, zusammensetzt, und der terrestrischen Eutrophierung, die sich aus den luftseitigen Stickstoff-Emissionen wie NH_3 und NO_2 ergibt (vgl. [9]).

Enthärtungsanlage als Kontrollgruppe) erfolgte über eine Studie mit einem quasi-experimentellen Design, um belastbare Aussagen über den wahrgenommenen Nutzen dezentraler Enthärtungsanlagen gegenüber konventionellen Wasseranschlüssen und zu zusätzlichen umweltrelevanten Aspekten zu erhalten. Zudem wurden hierüber relevante Erkenntnisse für die Festlegung der Untersuchungsszenarien gewonnen.

Zieldefinition und Systemgrenzen

Ziel ist die Bewertung der ökologischen Auswirkungen einer dezentralen Enthärtung des im Haushalt verwendeten Trinkwassers durch Ionenaustausch sowie der Erfassung von Verbraucheraspekten. Es sollen die direkten und indirekten Umweltauswirkungen aufgezeigt und gleichzeitig Ansatzpunkte zu Verbesserung der Umweltbilanz identifiziert werden. Hintergrund der Untersuchung ist ein Projekt im Auftrag der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V. (figawa), in der u. a. Hersteller dezentraler Enthärtungsanlagen organisiert sind. Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung mit dem Projektpartner TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser durchgeführt [8]. Zielgruppe sind sowohl die Hersteller als auch die Nutzer der Anlagen sowie im Weiteren auch Wasserversorger, Beratungsinstitutionen, Umweltbehörden und sonstige interessierte Kreise.

Funktion und funktionelle Einheit

Die zu untersuchende Funktion ist die Bereitstellung und Nutzung von Trinkwasser im Haushalt ▷

WASSERVERTEILUNG:

Gemeinsam zum optimalen Druckmanagement

Durchschnittswerte basierend auf abgeschlossenen Projekten

15 % WENIGER LECKAGEN

25 % ENERGIE-EINSPARUNG

35 % WENIGER ROHRBRÜCHE

BESEITIGEN SIE WASSERVERLUSTE UND DRUCKPROBLEME IN IHREM NETZ

Indem Sie Ihr Netz überwachen und Ihre Pumpen intelligent steuern, können Sie den Wasserdruck regulieren, Leckagen reduzieren, die Betriebssicherheit verbessern, die Leistung steigern und die Betriebskosten Ihrer Wasserverteilung senken. Bei Grundfos nennen wir das „Demand Driven Distribution".

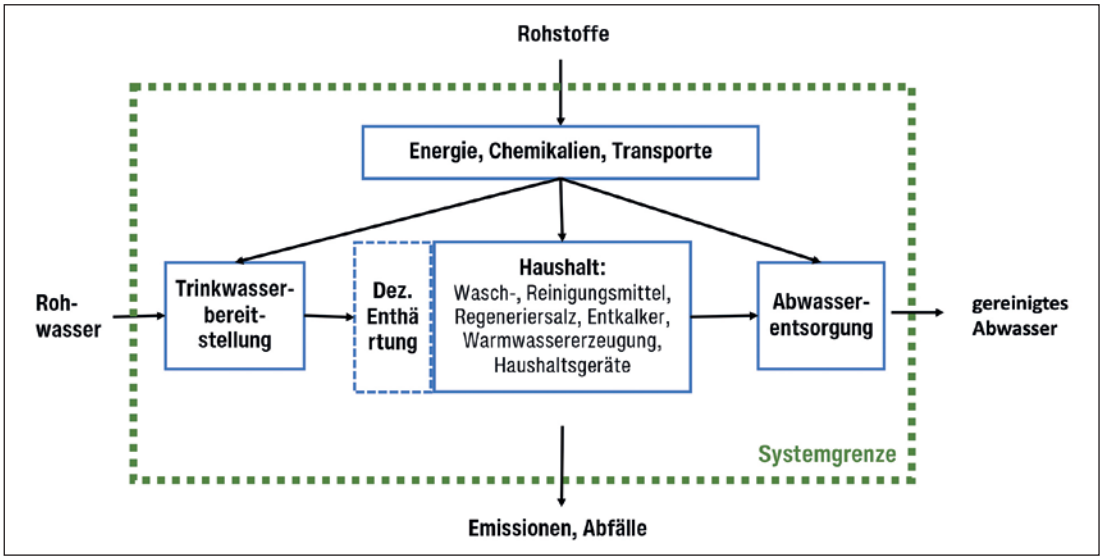
Mit Demand Driven Distribution werden Pumpen, Steuerungen und Systemüberwachung zu einer einzigartigen Druckmanagementlösung zusammengefasst, die ein stabiles Wasserversorgungssystem sichert.

Erfahren Sie, wie Grundfos iSOLUTIONS Ihr System mit Demand Driven Distribution und intelligenter Pumpentechnik optimieren kann: **grundfos.de**

Druckerhöhungsanlage mit neuer CR-Baureihe für Wasserversorgungsunternehmen mit Schaltschrank und Demand Driven Distribution.

GRUNDFOS

Possibility in every drop



Quelle: Fraunhofer ISI

Abb. 1: Schematische Darstellung der Systemgrenzen der Untersuchung

(funktionelle Einheit: Trinkwassernutzung einer Person in einem Jahr). Einbezogen werden nur die Prozesse, bei denen durch die unterschiedlichen Wasserhärten bedingte Unterschiede auftreten.

Untersuchungsszenarien

Es werden die dezentrale Enthärtung mit einem Standard-Ionenaustauschverfahren für zwei typische, harte Wässer (A: Gesamthärte 4,62 mmol/l; B: 3,16 mmol/l; vgl. [5]) sowie als Referenzfall die Nutzung des nicht-enthärteten Wassers analysiert. In Szenarien wird der Einfluss wichtiger Randbedingungen untersucht (Nutzerzahl pro Anlage, Betriebsdaten der Anlage, Berücksichtigung der Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten, Einfluss Strommix etc.).

Befragung von Haushalten zur Nutzung von Trinkwasser mit unterschiedlichen Härtegraden

Im Rahmen der repräsentativen Befragung von Haushalten wurden unterschiedliche Regionen und Härtebereiche des Trinkwassers abgedeckt – mit folgenden Ergebnissen:

- Der Härtegrad des Trinkwassers hat an verschiedenen Stellen im Haushalt signifikanten Einfluss. Zu kalkbedingten Problemen ergeben sich bereits ab Härtegraden von > 14 bis ≤ 21° dH (Härtebereich 3 nach altem WRMG) statistisch signifikante und deutlich erkennbare Unterschiede im Vergleich von Haushalten ohne Enthärtungsanlage zu Anlagenbesitzern.
- Bereits ab diesem Härtebereich berichten Konsumenten ohne Enthärtungsanlage von signifikant stärkeren Verkalkungen ihrer Geräte als Enthärtungsanlagenbesitzer.
- Je höher der Härtebereich, desto häufiger verkalken laut Angaben der Konsumenten ohne Enthärtungsanlage ihre Geräte. Dieser Effekt ist bei Enthärtungsanlagenbesitzern praktisch nicht vorhanden.
- Die Dosierungsroutinen für Wasch- und Geschirrspülmittel zeigen, dass das Vorhandensein einer Enthärtungsanlage nicht automatisch zu einer

Tab. 1: Materialmengen und genutzte Ecoinvent-Module zur Berücksichtigung der Bauphasen bei der Bilanzierung verlängerter Nutzungsdauern von Küchengeräten (Angaben in kg)

	Ecoinvent-Modul	Kaffeemaschine	Wasserkocher	Waschmaschine	Geschirr-spülmaschine
Kartonage	corrugated board box (RER)	0,39	0,39	0,5	0,5
Plastik	polyethylene, high density, granulate (GLO)	1,12	1,12	11,7	8,46
PVC	polyvinylchloride, bulk polymerised (GLO)	0,02	0,02		
Stahl	steel, chromium steel 18/8 (GLO)	0,1	0,1	47,45	34,31
Glas	flat glass, coated (RER)	0,34	0	1,3	0
Kupfer	copper (GLO)	0,02	0,02	1,95	1,41
Aluminium	aluminium, cast alloy (GLO)	0,11	0,11	2,6	1,88

Quelle: eigene Abschätzungen in Anlehnung an Beeftink et al. (2021) und Godskesen et al. (2012)

Verhaltensänderung im Sinne einer Anpassung der Dosierungsmenge führt.

- Entkalker für Waschmaschinen: Je höher der Härtebereich, desto häufiger nutzen Konsumenten ohne Enthärtungsanlage Entkalkungszusätze; der Effekt ist sehr ausgeprägt. Bei Enthärtungsanlagenbesitzern gibt es keinen wasserhärtebedingten Anstieg. Insgesamt nutzen Anlagenbesitzer im Vergleich relativ selten Entkalker.
- Spülmaschinensalz: Je höher der Härtebereich, desto häufiger nutzen Konsumenten ohne Enthärtungsanlage extra Salz für ihre Spülmaschine, wobei die Unterschiede nicht sehr ausgeprägt sind. Enthärtungsanlagenbesitzer nutzen in ähnlich starkem Ausmaß Spülmaschinensalz. Eine Anpassung der Dosierung findet wenn dann über die Einstellung an der Spülmaschine statt.
- Je höher der Härtebereich, desto häufiger nutzen Haushalte ohne Enthärtungsanlage Anti-Kalk-Reinigungsmittel. Bei Enthärtungsanlagenbesitzern gibt es keinen signifikanten wasserhärtebedingten Anstieg.

Die Nutzer von Enthärtungsanlagen wurden außerdem befragt, was sich im Vergleich zum Zeitpunkt vor der Nutzung der Anlage verändert hat und wie sie ihr Verbrauchsverhalten verändert haben. Anlagenbesitzer berichten über alle Härtebereiche hinweg von leichten Verbesserungen (Verbrauch von Wasch- und Spülmittel, Verkalkung von Geräten, Auftreten von Kalkflecken, Nutzung von Kosmetikprodukten, geschmackliche Qualität von Tee und Kaffee, Nutzung von Shampoos und Duschgels) bzw. von starken Verbesserungen in Form einer verringerten Verkalkung von Geräten und geringerem Auftreten von Kalkflecken. Der Verbrauch an Wasch- und Spülmittel reduzierte sich nach Angabe der Haushalte leicht.

Beschreibung des Stoffflussmodells

Zur Zusammenführung der notwendigen Daten für die unterschiedlichen Szenarien wurde ein detailliertes Stoffflussmodell mit den in **Abbildung 1** dargestellten Systemgrenzen genutzt. Aufgrund fehlender Informationen zum Einfluss einer dezentralen Enthärtung bzw. aufgrund geringer Relevanz wurden die Errichtung und Instandhaltung des Wasserverteilungssystems, der Abwasserleitung sowie der Kläranlage, der Verschleiß von Hausinstallationen sowie mögliche Gesundheitsauswirkungen nicht berücksichtigt.

Wasserversorgung

Ergänzend zum UMBERTO/Ecoinvent-Modul wurde mit einem spezifischen Energieverbrauch zur Wasseraufbereitung und -verteilung von 0,5 kWh pro m³ (vgl. [10]) und einem Wasserverlust bei der Wasserverteilung von 5,3 Prozent (vgl. [11]) gerechnet.

Haushalte

Ausgehend von einem jährlichen Trinkwasserverbrauch von 47 m³ pro Person ([12]: 127 l/(E*d)) und entsprechend den Befragungsergebnissen wurden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Waschmittelverbrauch: 7,3 kg Waschmittel (Zusammensetzung nach[13]) pro Kopf, 48 l Wasser und 0,78 kWh Strom pro Waschgang [14]; Waschmitteldosierung in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad der Wäsche und dem Härtebereich nach [14]; Verpackungsmenge nach [5].
- Reinigungsmittel: im Härtebereich über 14 °dH pro Person und Monat eine Reinigung mehr als in Härtebereich unter 14 °dH.
- Entkalker: Einsatz von Zitronensäure, Menge proportional zur Karbonathärte des Trinkwassers [5].
- Regeneriersalz in Geschirrspülmaschinen: Natriumchlorid (fünffache stöchiometrische Menge, Enthärtung auf 4° dH (Wasserbedarf 22 l pro Spülgang, Nutzung 0,2 mal pro Person und Tag, vgl. [15]).
- Energieverbrauch zur Warmwasserbereitung (täglicher Warmwasserbedarf ca. 35 l, Temperaturniveau: ca. 45 °C, Erwärmung um durchschnittlich 35 °C [5]): Unterscheidung zwischen zentraler Warmwasserbereitung mit Gas als Energieträger (Energieverluste durch eine Beeinträchtigung des Wärmeübergangs und höhere Abgastemperaturen bzw. Abgasverluste; Verluste von 10 Prozent bei einer Karbonathärte von 3 mmol/l) und Durchlauferhitzer auf Strombasis (Energieverluste durch schlechteren Wärmeübergang, längere Aufwärmzeiten bei Durchlauferhitzern und einen dadurch verursachten Mehrverbrauch an Warmwasser von 1,3 l pro Tag ab einer Karbonathärte von 3 mmol/l (vgl. [5, 16]). Für Kaffeemaschinen oder Wasserkocher wird aufgrund regelmäßiger Entkalkungen kein zusätzlicher Energiebedarf berechnet.
- Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten und Enthärter: Die Nutzung von hartem Wasser kann die Nutzungsdauer verschiedener Haushaltsgeräte beeinträchtigen. Beeftink et al. [1] und Godskesen et al. [3] schätzen auf Basis einer dänischen Studie Nutzungsdauerveränderungen von 8 bei hartem Wasser (Referenzszenario) auf 10 bzw. 12 Jahre bei mittlerem (Szenario Wasser B) bzw. weichem Wasser (Enthärtungsszenario) bei Kaffeemaschine und Wasserkocher bzw. von 10 auf 12,5 bzw. 15 Jahre bei Geschirrspül- und Waschmaschine. Die Ergebnisse werden auf die Untersuchungsbedingungen übertragen. Zur Berücksichtigung der verlängerten Nutzungsdauern sind die für die Geräte notwendigen Materialien mit entsprechend längeren Zeiträumen zu verrechnen (**Tab. 1**).

Dezentrale Enthärtungsanlage (Ionenaustauscher)

Zur Bewertung einer durchschnittlichen Anlage werden folgende Rahmenbedingungen zugrunde gelegt: Nutzung durch drei Personen, Enthärtung auf 5° dH, Stromverbrauch von 43,8 kWh/Jahr (das entspricht einer Leistung von 5 Watt im Dauerbetrieb), Spülwasserverbrauch von 4 Prozent bezogen auf die enthärtete Trinkwassermenge (Herstellerangaben bzw. [5]) sowie einen Regenerationsmittel-Verbrauch von 1 kg NaCl pro 4 mol $CaCO_3$ (vgl. Anforderung der DIN EN 14743) ohne Zudosierung sonstiger Chemikalien. Für Szenario-Rechnungen wird mit sechs Personen (z. B. Einsatz einer Anlage in einem Doppelhaus), einem verringerten Stromverbrauch von 27,3 kWh pro ▹

Jahr (nach Herstellerangaben mit aktuell auf dem Markt verfügbaren, verbesserten Anlagen möglich), verzichtbarem Spülwasserbedarf und einem verringerten Regenerationsmittel-Verbrauch (1 kg NaCl pro 6 mol $CaCO_3$) gerechnet. Für die einmal pro Jahr empfohlene Wartung wurde auf Basis einer Erhebung bei den Herstellern mit einer durchschnittlichen Wegestrecke von 40 km mit einem Pkw gerechnet (Szenario-Rechnungen: 27 km als Best Case und 58 km als Worst Case sowie Einsatz eines Elektrofahrzeugs). Zusätzlich wird der Einfluss der Bauphase des Gerätes berücksichtigt (**Tab. 2**).

Tab. 2: Materialien Bauphase Enthärter

Materialien	Ecoinvent-Module	Menge (kg)
Kunststoff (PA)	market for Nylon 6 [GLO]	5,2
Kunststoff (PP)	market for polypropylene, granulate [GLO]	5,2
Messing	market for brass [CH]	3,4
Elektronik	market for electronics for control units [GLO]	0,4
Harz	market for cationic anion resin [RER]	4,0
Kartonage	market for corrugated board box [RER]	3,8

Quelle: eigene Erhebung bei Herstellern

Abwasserentsorgung

Die Abwasserentsorgung wird über ein Ecoinvent-Modul modelliert, wobei ein spezifischer Strombedarf – angepasst an aktuelle deutsche Verhältnisse (0,35 kWh pro m³ Rohwasser, [17]) – angenommen wird. Für die Strombereitstellung wird ein entsprechendes Querschnittsmodul genutzt, das den aktuellen Strommix nach [18] abbildet. Als Szenario wird außerdem ein regenerativer Strommix, basierend auf Informationen des „National Renewable Energy Potential 2050“ nach [19], genutzt.

Datenqualität

Aufgrund bislang fehlender umfassender Messkampagnen zu den Effekten der Anwendung dezentraler Enthärtungsanlagen wurden die Daten aus unterschiedlichen Quellen (Literatur, Erhebungen bei den Herstellern, Nutzerbefragung, eigene Abschätzungen) abgeleitet. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen wurde der Einfluss wesentlicher Input-Faktoren genauer untersucht. Zur Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Prozesse wurden Standard-Module der Ecoinvent-Datenbank genutzt.

Berechnungen und Szenarien

Die wichtigsten Input-Parameter sind in **Tabelle 3** aufgelistet, einschließlich der für die Sensitivitätsanalysen (**Tab. 4**) ausgewählten Parameter. Als Ausgangsszenarien dienen dabei die Szenarien

Tab. 3: Überblick über wichtige Input-Parameter der Berechnungen

Parameter	Referenzszenario (Ref.sz)	Enthärtungsszenario	ggf. Sensitivitätsanalysen (Bandbreiten etc.)	Anmerkungen
Härtegrad des Trinkwassers	Wasser A (HB 4)	5 °dH	Wasser B (HB 3)	
Personen pro Anlage	3	3	6	6 Personen für Beispiel Anwendungsfall Doppelhaus
Warmwasserbereitung	zentrale Warmwasserbereitung mit Gas	wie Ref.sz	dezentrale Durchlauferhitzer mit Strom	in Deutschland gängigste Verfahren
Strommix	aktuell	aktuell	regenerativ (für Enthärter)	B
Enthärtungsanlage	-			
a) Spülwasserbedarf		a) 4 %	a) -	betrifft nur Enthärtungsszenarien
b) Strombedarf		b) 43,8 kWh/a	b) 27,3 kWh/a	
c) Salzbedarf		c) 4 mol $CaCO_3$/kg NaCl	c) 6 mol $CaCO_3$/kg NaCl	
d) Wartung - Distanz		d) 40 km	d) 27 km sowie 58 km	
e) Wartung - Autotyp		e) Verbrennungsmotor	e) E-Auto	
Materialaufwand in der Bauphase	für Kaffeemaschine, Wasserkocher, Wasch- und Geschirrspülmaschine	wie Ref.sz, zusätzlich für Enthärtungsanlage	ohne Bauphase Haushaltsgeräte	

Quelle: eigene Darstellung

Tab. 4: Input-Parameter der untersuchten Szenarien

Parameter	Ref	Wasser B	DH	ohne Bau	ent-härtet	enthärtet +Wasser B	enthärtet +DH	enthärtet + 6	enthärtet + UBA (F)	enthärtet + ohne Bau	enthärtet + best
Enthärtung	keine	keine	keine	keine	E	E	E	E	E	E	E
Wassertyp	A	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A
Personen im Haus	3	3	3	3	3	3	3	6	3	3	6
Warmwasser-Anlage	ZW	ZW	DH	ZW	ZW	ZW	DH	ZW	ZW	ZW	ZW
Energiequelle Warmwasser	Gas	Gas	Strom	Gas	Gas	Gas	Strom	Gas	Gas	Gas	Gas
Background Strom-Mix	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE
Foreground Strom-Mix	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	UBA	ISE	UBA
Wartung Auto-Typ	ohne	ohne	ohne	ohne	fossil	fossil	fossil	fossil	fossil	fossil	elektro
Wartung Szenarien	ohne	ohne	ohne	ohne	MW	MW	MW	MW	MW	MW	best
Bauphase	A + B	A + B	A + B	ohne	A + B	A + B	A + B	A + B	A + B	ohne	ohne
Ionenaustauscher Regeneriersalz (mol $CaCO_3$/kg NaCl)	ohne	ohne	ohne	ohne	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	6 mol
jährlicher Strombedarf	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	43,8 kWh	27,3 kWh

* Ref = Referenzszenario, enthärtet = Enthärtungsszenarien
Wasser B: Wasser mittlerer Härte
E: enthärtet
ZW: zentrale Warmwasserbereitung (Gas)
DH: Durchlauferhitzer (elektrisch)
MW: Mittelwert für Fahrtstrecke pro Wartung (43 km)
best: bester Wert für Fahrtstrecke pro Wartung (27 km)
ohne Bau: ohne Berücksichtigung der Bauphase
Bauphase A: Wasserkocher, Kaffeemaschine, Enthärtungsanlage (bei Enthärtungsszenarien)
Bauphase B: Waschmaschine, Geschirrspülmaschine

Quelle: eigene Darstellung

„Ref“ (Referenzszenario – Verwendung von nicht-enthärtetem Wasser) und „enthärtet“ (Standard-Enthärtungsszenario).

Ergebnisse

Ergebnisse der Ausgangsszenarien

Die Ergebnisse für die Wirkungskategorie GWP (Global warming potential, deutsch: Treibhausgaspotenzial) zeigen insgesamt einen leichten Vorteil für das Enthärtungsszenario (Verringerung der entstehenden CO_2-Äquivalente um 8 Prozent) gegenüber dem Referenzszenario (Abb. 1). Die durch den Enthärter verursachten zusätzlichen Emissionen werden kompensiert durch die höhere Effizienz bei der Warmwasserbereitung und die Einsparungen bei Waschmitteln und Entkalker. Aufgrund der höheren Nutzungsdauer der Küchengeräte verstärkt sich über die Berücksichtigung der eingesetzten Materialien in der Bau- ▷

20 JAHRE HYGIENEKONZEPTE
INNOWATECH

Transport- und Notfall-Chlorung von Trinkwasser im Wasserwerk ohne Gefahrstoffe

INNOWATECH GmbH
D-72186 Empfingen
☎ (07485) 97 87 47 0
www.innowatech.de

phase in geringem Umfang der Vorteil des Enthärtungsszenarios.

Bei der Wirkungskategorie Eutrophierung werden die Umwelteinträge ganz überwiegend durch die betrachteten Vorketten verursacht. Die Wirkungspotenziale sind für beide Szenarien in Summe vergleichbar. Hinsichtlich der aquatischen Eutrophierung dominiert erwartungsgemäß der Bereich der Abwasserbehandlung. Bei der Eutrophierung (Binnengewässer) gibt es einen leichten Vorteil des Referenzszenarios, da hier die Nachteile durch den erhöhten Verbrauch an Waschmittel und die verringerte Effizienz bei der Warmwassererzeugung weniger stark zu Buche schlagen (**Abb. 2**). Hinsichtlich der Kategorie „Versauerung" gibt es in Summe keinen nennenswerten Unterschied der beiden Ausgangsszenarien (**Abb. 3**).

Ergebnisse der weitergehenden Szenario-Analysen

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Wirkungskategorie Global Warming Potential (GWP) bzw. Treibhausgaspotenzial und der geringen Unterschiede bei den anderen betrachteten Wirkungskategorien werden für die Auswertung der weitergehenden Szenario-Analysen im Wesentlichen die Ergebnisse dieser Kategorie über die verschiedenen Parameter weiter differenziert (**Abb. 4**).

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Szenarienbetrachtungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Fall von Wasser B mit geringerer Gesamthärte (Härtebereich 3) reduziert sich die Vorteilhaftigkeit des Enthärtungsszenarios um etwa die Hälfte.
- Wird im Referenzfall mit einem dezentralen Durchlauferhitzer zur Warmwassererzeugung gerechnet, verringern sich die GWP-Emissionen. Für diesen Fall liegen die Gesamt-GWP-Werte von Referenz- und Enthärtungsszenario in etwa gleichauf.
- Wird der Materialienaufwand aus der Bauphase nicht berücksichtigt („ohne Bau") oder werden nur Wasserkocher und Kaffeemaschine berücksichtigt, verringern sich die Unterschiede und das Enthärtungsszenario weist nur noch einen leichten Vorteil aus.
- Das Szenario mit sechs Nutzern pro Enthärtungsanlage verringert die spezifischen GWP-Emissionen gegenüber dem ursprünglichen Enthärtungsszenario um etwa 13 Prozent. Wird für den Enthärter regenerativ erzeugter Strom eingesetzt („UBA (F)"), so verringern sich die spezifischen GWP-Emissionen um 7 Prozent gegenüber dem Ausgangsszenario.
- Im Best-Case-Enthärtungsszenario ergibt sich – insbesondere durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, den reduzierten Strombedarf des Enthärters und durch die Nutzung eines Elektroautos bei der Wartung – eine deutliche Verringerung der direkt durch den Ionenaustauscher/Enthärter verursachten GWP-Emissionen (roter Teilbereich) um 57 Prozent (bzw. für den gesamten betrachteten Stofffluss um 14 Prozent).

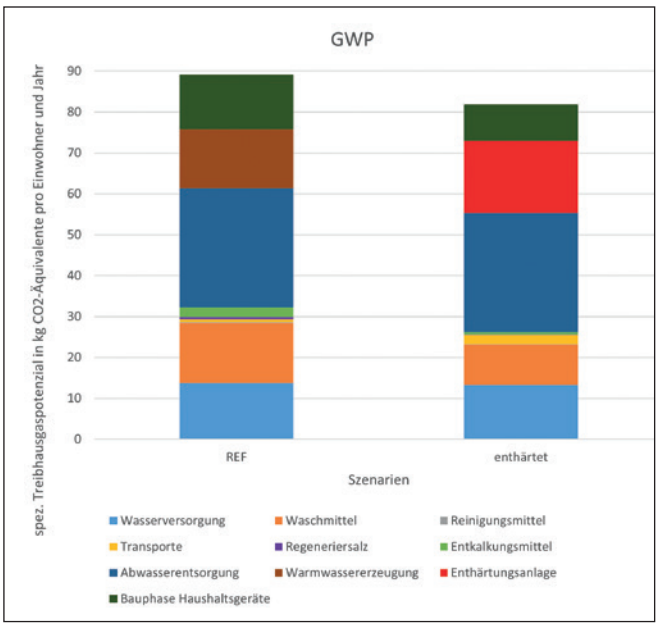


Abb. 2: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential - GWP)

Quelle: eigene Darstellung

Zusätzliche Aspekte: ökotoxikologisch relevante Emissionen

Wasch- und Reinigungsmittel enthalten Stoffe, die teilweise nicht leicht oder nicht vollständig biologisch abbaubar sind, Gewässerorganismen schädigen oder sich in der Umwelt anreichern können. Vonseiten des IKW [20] werden wichtige Inhaltsstoffe von Waschmitteln erhoben und dabei Einsatzmengen organischer Stoffe und Stoffgruppen, die pauschal als persistent (d. h. schwer abbaubar) bezeichnet werden (PBO: Poorly Biodegradable Organics), separat ausgewiesen. Die Menge der PBO, die in abwassergängigen Produktgruppen eingesetzt wurde, lag im Jahr 2017 bei 30.900 t und damit bei 5,9 Prozent der Gesamteinsatzmenge der wichtigsten Inhaltsstoffe.

Aus Gewässerschutzgründen wichtige Einzelstoffe sind beispielsweise die Benzotriazole, die in deutschen Oberflächengewässern regelmäßig im µg/l-Bereich nachgewiesen werden [21] und die u. a. im Bereich der Geschirrspülmittel eingesetzt werden (Einsatzmenge in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelprodukten in 2019: 76 t [20]). Ein anderes Beispiel ist der Entkalker Sulfamidsäure bzw. Amidosulfonsäure, der als hochpolarer und somit sehr mobiler und persistenter Spurenstoff zum Teil in zweistelligen Mikrogrammkonzentrationen in Fließgewässern gefunden wird [22].

Eine detaillierte Modellierung und Bewertung dieser stofflichen Einträge in die Umwelt ist sehr aufwendig und war im Rahmen der Studie nicht möglich. Die zwei aufgeführten Beispiele zeigen jedoch die grundsätzliche Bedeutung von Maßnahmen zur Reduktion des Wasch- und Reinigungsmittelverbrauchs und der damit verbundenen Umwelt-

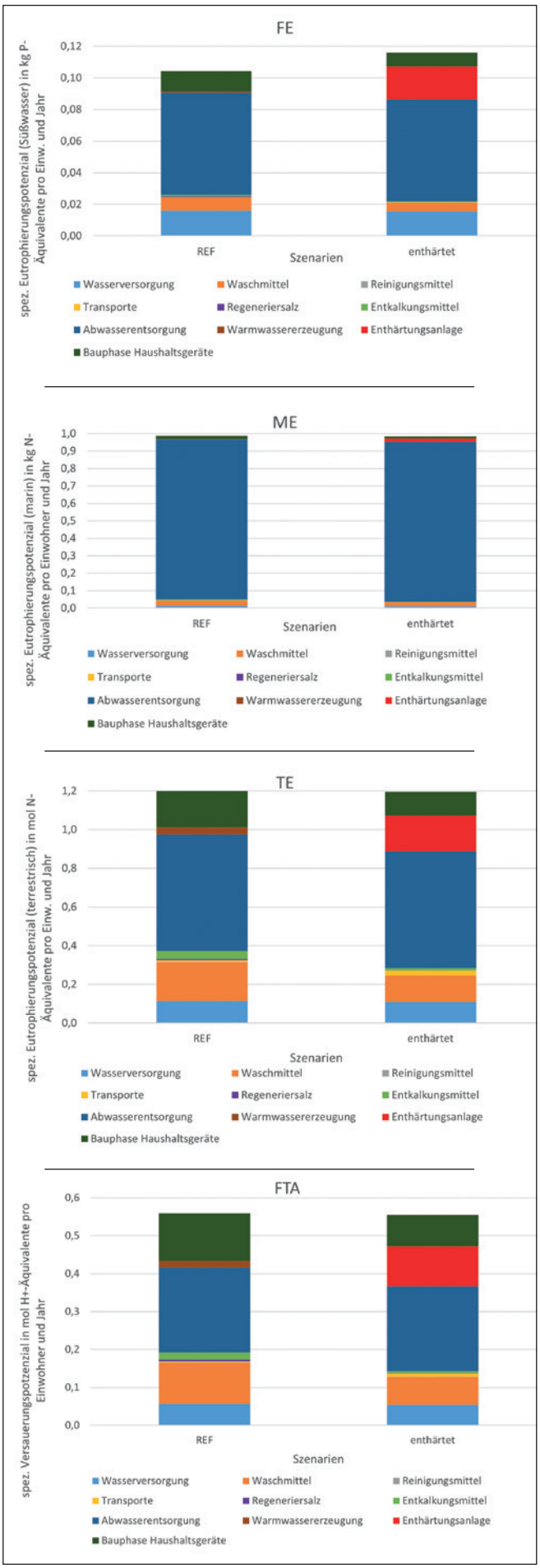


Abb. 3: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial - unterteilt in (von oben nach unten) aquatische (Süßwasser (FE) und marin (ME)) und terrestrische (TE) Eutrophierung- und Versauerungspotenzial (FTA)

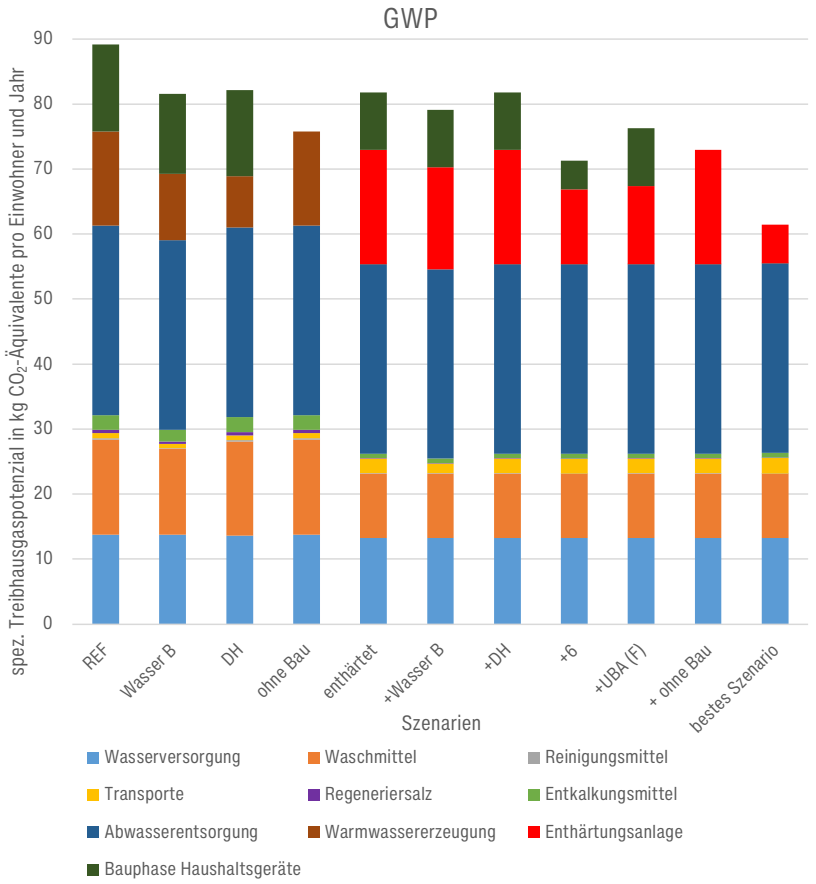
Quelle: eigene Darstellung

entlastungen. Voraussetzung für eine potenzielle Reduktion der Waschmittelmenge um bis zu 30 Prozent beim Einsatz von dezentralen Enthärtungsanlagen ist, dass die Anleitungen zur verringerten Dosierung der Mittel bei weicherem Wasser von den Nutzern auch umgesetzt werden.

Zusammenfassung und Diskussion

Unter den betrachteten Randbedingungen kann die dezentrale Enthärtung des Trinkwassers hinsichtlich der über den gesamten Prozess (einschließlich Vorketten) emittierten Treibhausgas-Emissionen mit leichten ökologischen Vorteilen verbunden sein. Wichtige Einflussparameter sind dabei der Ausgangshärtegrad des Trinkwassers, die spezifische Nutzerzahl pro Anlage, die Berücksichtigung des Einflusses auf die Nutzungsdauern von Haushaltsgeräten und der Betriebs- und Wartungsaufwand der Enthärtungsanlage. In allen betrachteten Szenarien ergaben sich für die dezentrale Enthärtung des Trinkwassers positive Auswirkungen bei den emittierten Treibhausgas-Emissionen, auch wenn im Verhältnis zu den durchschnittlichen Treibhausgas-Gesamtemissionen pro Person in Europa die dadurch erreichbaren Verbesserungen (d. h. die Unterschiede zwischen den Szenarien) vergleichsweise gering sind.

Aus ökologischer Sicht ist ein anderer wesentlicher möglicher Vorteil der Nutzung von enthärtetem Trinkwasser der reduzierte Einsatz von Wasch- und Reinigungsmittel. Eine Reduktion des Einsatzes dieser Mittel bedeutet dabei nicht nur die Reduktion der damit (indirekt) verbundenen Treibhausgas-Emissionen, sondern auch eine Reduktion der Emissionen ökotoxikologisch relevanter Stoffe in die Gewässer. Entsprechende Auswirkungen werden bislang aufgrund methodischer Probleme nicht oder nur bedingt in den Wirkungskategorien adäquat erfasst. Trotz erreichter Verbesserungen sind in Wasch- und Reinigungsmitteln weiterhin Stoffe enthalten, die durch eine übliche kommunale Abwasserbehandlung nur teilweise abgebaut werden können und somit zu einer Belastung der Gewässer mit Mikroverunreinigungen führen. Welche Relevanz die in Wasch- und Reinigungsmitteln enthaltenen Stoffe weiterhin haben, zeigen die Ergebnisse des nationalen Dialogprozesses zur Spurenstoffstrategie des Bundes: Zwei der vier gestarteten Runden Tische beschäftigen sich mit Chemikalien, die ▷



REF: Referenzszenario	+6: Nutzung durch 6 Personen
DH: mit Durchlauferhitzer	+ UBA (F): Ökostrom für Enthärter
Bau A: nur Wasserkocher + Kaffeemaschine	Best Case: 27,3 kWh als jährlicher Strombedarf, Wartung mit einem Elektroauto, Entfernung Wartung 8,4 km, geringer Salzbedarf, ohne Bauphase
ohne Bau: ohne Bauphase	
enthärtet: Ausgangsszenario mit Enthärtung	

Quelle: eigene Darstellung

Abb. 4: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential - GWP)

u. a. in Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzt werden (Benzotriazol: teilweise in Spülmaschinenreinigern enthalten; Sulfamidsäure: teilweise in Entkalkern enthalten). Ziel der Runden Tische ist die Erarbeitung von Emissionsminderungsmaßnahmen, die von allen beteiligten Stakeholdern mitgetragen werden [23].

Die mögliche Reduktion der eingesetzten Wasch- und Reinigungsmittelmengen um bis zu 30 Prozent würde ein beträchtliches Umweltentlastungs- bzw. Gewässerschutzpotenzial für Gebiete mit hartem Trinkwasser bedeuten, sofern die Verbraucher dieses Reduktionspotenzial bei der Dosierung von Wasch- und Reinigungsmittel auch tatsächlich nutzen. Die Befragungsergebnisse zeigen, dass dies in geringem Maße geschieht, aber noch nicht das gesamte Potenzial realisiert wird.

Für die Anlagenhersteller zeigen die Untersuchungen die Bedeutung des Betriebs- und Wartungsaufwands hinsichtlich der ökologischen Bewertung. Optimierungen sind beispielsweise durch den Anschluss einer möglichst hohen Nutzerzahl pro Anlage, eine Optimierung des Salz- und Energiebedarfs sowie des Wartungsaufwands möglich. Weitere Einflussmöglichkeiten ergeben sich durch die aktive Ermunterung und regelmäßige Erinnerung der Kunden, den Wasch- und Spülmittelverbrauch insbesondere bei Wasch- und Spülmaschine aktiv zu reduzieren und hierdurch die Umwelt zu schonen. ■

Literatur

[1] Beeftink, M., Hofs, B., Kramer, O., Odegard, I., van der Wal, A. (2021): Carbon footprint of drinking water softening as determined by life cycle assessment, in: Journal of Cleaner Production, 278, 123925.

[2] Tang, C., Merks, C. W. A. M., Albrechtsen, H.-J. (2019): Water softeners add comfort and consume water – comparison of selected centralised and decentralised softening technologies, in: Water Science and Technology: Water Supply, 19(7), 2088–2097.

[3] Godskesen, B., Hauschild, M., Rygaard, M., Zambrano, K., Albrechtsen, H.-J. (2012): Life cycle assessment of central softening of very hard drinking water, in: Journal of Environmental Management, 105, 83–89.

[4] van der Bruggen, B., Goossens, H., Everard, P. A., Stemgée, K., Rogge, W. (2009): Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water, in: Journal of Environmental Management. 91, 541–549.

[5] Hillenbrand, T., Böhm, E., Kotz, C., Schikorra, V., Schleich, J., Hesse, S., Baldauf, G. (2004): Zentrale Enthärtung von Trinkwasser – Eine ökologische und ökonomische Bewertung.

[6] Hesse, S., Baldauf, G., Hillenbrand, T. (2004): Ökologische und ökonomische Aspekte einer zentralen Enthärtung von Trinkwasser, in: DVGW energie | wasser-praxis, 55, 5, S. 46–49.

[7] Europäische Kommission (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for life cycle assessment: detailed guidance. Online unter https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[8] N. N. (2023): Study on domestic water softeners in Germany: Impact of ion exchange resins on drinking water quality. Zur Veröffentlichung eingereicht.

[9] Europäische Kommission (2012): Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods – Database and supporting information. Online unter nter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LCIA-characterization-factors-of-the-ILCD.pdf, abgerufen am 29. August 2023.

[10] Hillenbrand, T.: Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Universität Karlsruhe (TH), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, Schriftenreihe SWW, Band 134.

[11] Statistisches Bundesamt (2020): Wasserverluste in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2017. Online unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155684/umfrage/wasserverluste-in-der-oeffentlichen-wasserversorgung-seit-1991/, abgerufen am 18. August 2020.

[12] BDEW (2019): Entwicklung des personenbezogenen Wassergebrauches – in Litern pro Einwohner und Tag. Online unter www.bdew.de/media/documents/PI_20190417_Entwicklung_personenbezogener_Wassergebrauch_ab_1990.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[13] IKW (2020): Zahlen zum Waschen in Deutschland 2014. Online unter www.ikw.org/fileadmin/ikw/Haushaltpflege/Informationsserie/WM/dateien/html/3_5_1.html, abgerufen am 31. Oktober 2020.

[14] Forum Waschen (2019): Richtiges Dosieren von Geschirrspül- und Waschmitteln. Online unter www.forum-waschen.de/files/content/Materialien/Faltblaetter,%20Broschueren/2019_Faltblatt_Richtiges_Dosieren.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[15] VDI 2067-12 (2000): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung.

[16] DEHOGA: Warmes Wasser – Energiesparblatt 7. Online unter https://energiekampagne-gastgewerbe.de/system/files/2021-01/esb_07_warmwasser.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[17] Niederste-Hollenberg, J., Winkler, J., Fritz, M., Zheng, L., Hillenbrand, T., Kolisch, G., Schirmer, G., Borger, J., Doderer, H., Dörrfuß, I. (2021): Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale in der Abwasserwirtschaft – aktueller Stand und Perspektiven. Online unter www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-12_texte_50-2021_klimaschutz_abwasserwirtschaft_0.pdf, abgerufen am 29. August 2023.

[18] Fraunhofer ISE (2020): Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2019. Online unter https://energy-charts.info/ bzw. https://www.energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung_2019_3.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[19] UBA (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Online unter www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf, abgerufen am 18. August 2020.

[20] IKW (2021): Bericht Nachhaltigkeit in der Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelbranche in Deutschland – Ausgabe 2021. Online unter www.ikw.org/fileadmin/ikw/downloads/Haushaltspflege/2021_IKW_Nachhaltigkeitsbericht.pdf, abgerufen am 9. August 2021.

[21] Expertengremium (2020): Checkliste Benzotriazol – Kriterien zur Bewertung der Relevanz eines Spurenstoffes für die Umwelt. Stoffname: 1H-Benzotriazol CAS-Nr: 95-14-7. Online unter www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe-wAssets/docs/Checkliste-Relevanzbewertung-1H-Benzotriazol.pdf, abgerufen am 24. März 2023.

[22] Expertengremium (2021): Checkliste Sulfaminsäure – Kriterien zur Bewertung der Relevanz eines Spurenstoffes für die Umwelt. Stoffname: Sulfaminsäure (CAS-Nr: 5329-14-6) [Amidosulfonsäure (ASA), Sulfamidsäure]. Online unter www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe-wAssets/docs/Checkliste_Sulfaminsaeure_20201214-final.pdf, abgerufen am 24. März 2023.

[23] Stakeholder-Dialog „Spurenstoffstrategie des Bundes“: Presseinformation „Runder Tisch Benzotriazol gestartet“. Online unter www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe/aktuelles/meldungen/RT_Benz_1.php, abgerufen am 29. August 2023.

Die Autoren

Dr.-Ing. Thomas Hillenbrand leitet seit 2008 das Geschäftsfeld „Wasserwirtschaft“ im Competence Center „Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme“ am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Dr. Johannes Schuler war von 2018 bis 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Competence Center „Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme“ am Fraunhofer ISI.

Dr.-Ing. Felix Tettenborn ist seit 2009 als Wissenschaftler und Projektleiter am Fraunhofer ISI tätig.

Kontakt:
Dr.-Ing. Thomas Hillenbrand
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Tel.: 0721 6809-119
E-Mail: thomas.hillenbrand@isi.fraunhofer.de
Internet: www.isi.fraunhofer.de

swan
ANALYTICAL INSTRUMENTS

CHEMATEST 42
verlässlich – benutzerfreundlich – robust

- Vorkalibriert ab Werk – ideal für die Messung tiefer Trübungswerte ab 0.01 NTU
- Die vorgegebene Küvettenpostionierung ermöglicht eine robuste, genaue und reproduzierbare Analyse
- Das herausnehmbare Küvetten Modul unterstützt eine fehlerfreie, einfache Messroutine

Swan Analytische Instrumente AG · CH-8340 Hinwil
www.swaninstruments.ch
swan@swan.ch
SWISS MADE