Technologiezentrum Wasser | DVGW

Fraunhofer ISI

EINSATZ VON ENHÄRTUNGS-ANLAGEN MITTELS KATIONEN-AUSTAUSCH IN DER TRINK-WASSERINSTALLATION

Dr. Johannes Ruppert

Dr. Hannah Gaiser

TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

Thomas Hillenbrand
Johannes Schuler
Felix Tettenborn
unter Mitarbeit von
Maulana Permana Ajie

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)

Inhalt

1 Einleitung 4

1.1 Enthärtungsanlagen mit Ionenaustausch 5

2 Langzeitstudie 8

2.1 Beprobte Haushalte (26) und deren Einschätzung zum vorliegenden Trinkwasser 8

2.2 Entnahme der Proben 13

2.3 Zusammenfassung 17

3 Folgenabschätzung von dezentralen Enthärtungs-anlagen mittels Ionenaustausch 19

3.1 Methodischer Ansatz 19

3.1.1 Ökologische Bewertung 19

3.1.2 Wirkungskategorien zur Wirkungsabschätzung 19

3.1.3 Genutzte Software 20

3.2 Zieldefinition und Systemgrenzen 21

3.3 Befragung von Haushalten zur Nutzung von Trinkwasser mit unterschiedlichen Härtegraden 23

3.4 Beschreibung des Stoffflussmodells 24

3.4.1 Wasserversorgung 27

3.4.2 Haushalte 27

3.4.3 Dezentrale Enthärtungsanlage (Ionenaustauscher) 35

3.4.4 Abwasserentsorgung 36

3.4.5 Querschnittsmodule 36

3.4.6 Datenqualität 38

3.5 Berechnungen und Szenarien 38

3.6 Ergebnisse 41

3.6.1 Ergebnisse der Ausgangsszenarien 41

3.6.2 Ergebnisse der weitergehenden Szenario-Analysen 45

3.6.3 Zusätzliche Aspekte: ökotoxikologisch relevante Emissionen 50

3.7 Zusammenfassung und Diskussion 52

4 Anhang: 55

4.1 Tabellenverzeichnis: 55

4.2 Abbildungsverzeichnis 55

4.3 Literaturverzeichnis 57

1 Einleitung

Die Trinkwasserhärte in Deutschland zeigt ein breites Spektrum an verschiedenen Härten über das ganze Bundesgebiet. Für die Trinkwasserhärte gibt es weder in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) noch in der europäischen Richtlinie (Richtlinie (EU) 2020/2184) Vorgaben. Allerdings hat der Härtegrad Einfluss auf verschiedene, für den Nutzer relevante Aspekte: Hartes Wasser führt zu Kalkablagerungen sowohl auf benässten Oberflächen z. B. in Küche und Bad als auch in Rohrleitungssystemen oder Armaturen. Hartes Wasser vermindert des Weiteren auch die Waschkraft von Tensiden. Durch hartes Wasser kann so ein zusätzlicher Reinigungsaufwand und ein erhöhter Waschmittel- und Energieverbrauch entstehen. Darüber hinaus können Kalkablagerungen die Nutzungsdauer von 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 dabei immer auch von den spezifischen Randbedingungen abhängig, wie vorliegende Untersuchungen mit unterschiedlichen Hintergründen aufzeigen (vgl. Beeftink et al., 2021; Tang et al, 2019; Godskesen et al., 2012; van der Bruggen, 2009; Hillenbrand et al, 2004; Hesse et al., 2004).

Die Wasserhärte ist ein Maß für die gelösten Erdalkalimetalle im Wasser. Die härtebildenden Ionen sind hierbei vor allem Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}). Durch Reaktion mit beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO_2) bilden diese schwer lösliche Carbonate. Die Reaktion mit Fettsäuren oder Tensiden kann wiederum zu Kalkseifen führen.

Diese Erdalkalimetalle können sich beispielsweise beim Durchtritt von Wasser durch carbonatgesteinshaltige Böden und Gesteine lösen. Hierbei werden die als $CaCO_3$ (Kalk) oder $CaMg(CO_3)_2$ (Dolomit) gebundenen Ionen mit Hilfe von Kohlensäure im Gestein gelöst. Die dabei entstehenden löslichen Hydrogencarbonate führen hier als Carbonathärte zum größten Teil der Wasserhärte.

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2\ HCO_3^-$$
$$MgCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2\ HCO_3$$

Die Konzentration der gelösten Ionen in mmol/L stellt dann wiederum den Härtegrad dar. In Deutschland ist die Einheit °dH ebenfalls gebräuchlich. Dieser entspricht der gelösten Menge an CaO.

Zur Vermeidung dieser Beeinträchtigung in der Trinkwasserinstallation können Enthärtungsanlagen eingesetzt werden, um die Wasserhärte mittels Ionenaustauch zu minder (DIN 1988-200:2012). Vor diesem Hintergrund sollen in einer umfassenden Unter-

suchung technische, ökologische und ökonomische Auswirkungen des Einsatzes dezentral in der Hausinstallation eingesetzter Enthärtungsanlagen mittels Ionenaustausch betrachtet werden.

Es wird im Folgenden zunächst der Wirkmechanismus des Ionenaustauscherharzes sowie die technischen Bestandteile und deren Mechanismen einer Enthärtungsanlage dargestellt. Im Weiteren sollen die Ergebnisse einer Feld-Studie von langzeit-eingesetzten, dezentralen Wasserenthärtung mit Ionenaustauscherharzen hinsichtlich möglichen Desinfektions-Nebenprodukten, Langzeit-Migrationsprodukten und einer mikrobiologischen Untersuchung vorgestellt werden. Im Anschluss liegt der Schwerpunkt in einer ökologischen Bewertung. Entsprechend der zur Verfügung stehenden Daten und Informationen stehen insbesondere der Energieverbrauch, der Einsatz an Chemikalien (inkl. Wasch- und Reinigungsmittel) sowie die Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten im Fokus.

1.1 Enthärtungsanlagen mit Ionenaustausch

Enthärtungsanlagen werden zur Entfernung der härtebildenden Ionen Ca^{2+} und Mg^{2+} eingesetzt. Dies erfolgt mit Hilfe eines Ionenaustauscherharzes (Hancke 1991). Ein solches Harz besteht aus einem Polymergrundgerüst, üblicherweise aus verzweigtem Polystyrol, funktionalisiert mit Natriumsulfonaten ($R\text{-}SO_3Na$) (Abbildung 1).

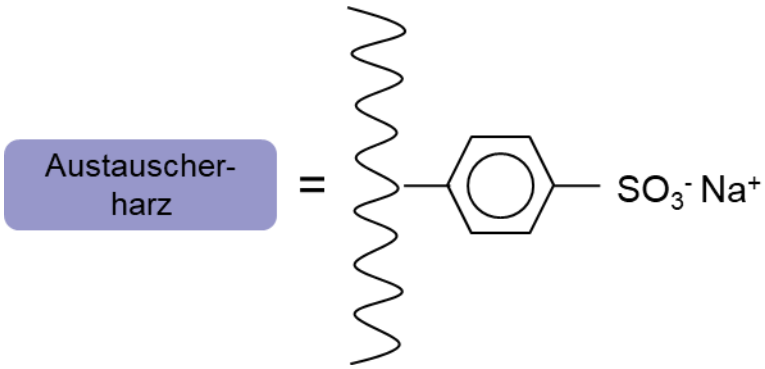


Abbildung 1 Schematischer Aufbau eines Ionenaustauscherharzes.

Die gelösten Ca^{2+}- und Mg^{2+}- Ionen werden im Harzbett dann durch einen äquimolaren Anteil Natriumionen substituiert (Abbildung 2).

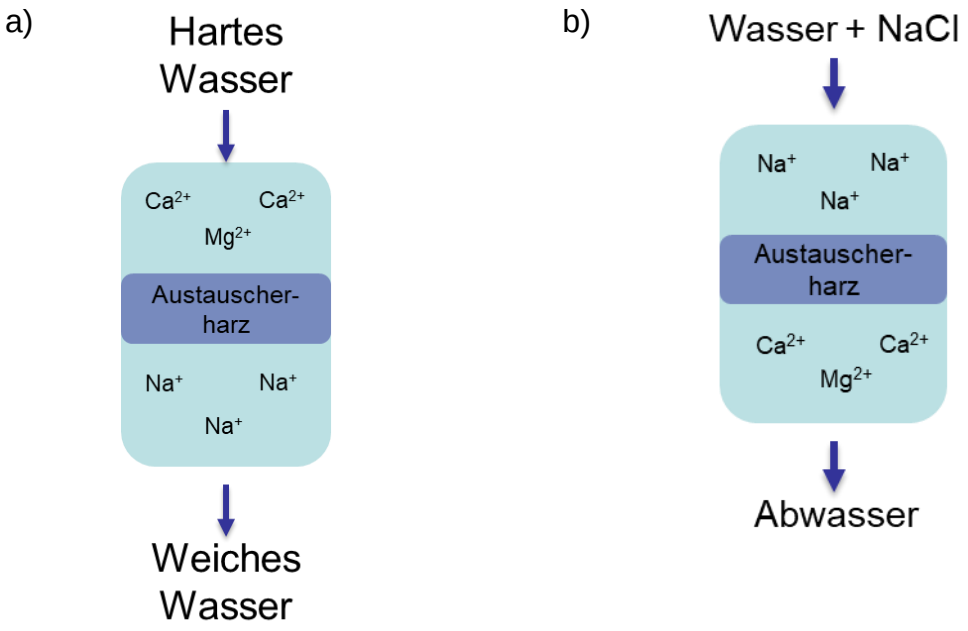


Abbildung 2: Schematischer Ablauf der a) Enthärtung sowie b) Regeneration in einer Enthärtungsanlage.

Die hierbei ablaufenden Reaktionen sind wie folgt:

$2\ R\text{-}SO_3Na + Ca^{2+} \rightarrow (R\text{-}SO_3)_2Ca + 2\ Na^+$ (1)
$2\ R\text{-}SO_3Na + Mg^{2+} \rightarrow (R\text{-}SO_3)_2Mg + 2\ Na^+$ (2)

Bei dieser Reaktion verändert sich der pH-Wert nicht. Die härtebildenden Ionen werden an das Harz gebunden und die Natriumionen bleiben in Lösung. Um die Korrosion von galvanisierten Stahlrohren in der Trinkwasserinstallation zu unterbinden wird das vollenthärtete Wasser mit dem härteren Rohwasser verschnitten. Die empfohlene finale Wasserhärte liegt dabei zwischen 5 und 8 °dH. Einen vorgeschriebenen Wert gibt es jedoch nicht.

Zur Regeneration des Ionenaustauscherharzes kann das größere und damit stärker gebundene Ca^{2+} mit Hilfe eines Überschusses an Na^+-Ionen wieder entsprechend der Rückreaktion entfernt werden. Hierbei wird NaCl als sogenanntes Regenerationssalz eingesetzt (Abbildung 2).

$(R\text{-}SO_3)_2Ca + 2\ Na^+ + 2\ Cl^- \rightarrow 2\ R\text{-}SO_3Na + Ca^{2+} + 2\ Cl^-$ (3)
$(R\text{-}SO_3)_2Mg + 2\ Na^+ + 2\ Cl^- \rightarrow 2\ R\text{-}SO_3Na + Mg^{2+} + 2\ Cl^-$ (4)

Zum Schutz vor Verkeimung kann während der Regeneration ein simultaner Desinfektionsprozess durchgeführt werden. Hierfür werden nach dem Stand der Technik Elektrolysezellen zur Herstellung von Chlor eingesetzt. Das dabei entstehende Natriumhypochlorid wirkt desinfizierend. Nach dem Regenerations- und Desinfektionsprozess wird das hierbei verwendete Wasser in das Abwasser geleitet.

Prüfgrundlagen für Enthärtungsanlagen stellen die europäischen und deutschen Normen DIN EN 14743:2007 und DIN 19636-100:2008 bzw. 2023 dar. Erstere legt Anforderungen an Ausführung und Sicherheit sowie die Prüfung der wesentlichen Merkmale fest. Die deutsche DIN 19636-100 spezifiziert die für Deutschland gültigen Zusatzanforderungen. Hierzu zählen insbesondere die hygienische Prüfung des Ionenaustauscherharzes und die Prüfung auf Schutz vor Verkeimung (mikrobielle Eigensicherheit). Das Ionenaustauscherharz wird nach der ResAP (2004) 3 entsprechend der Rezeptur geprüft und im folgenden AFNOR-Test T 90-601 auf Migrationsparameter untersucht. Zusätzlich werden die hygienischen Anforderungen der verwendeten Bauteilmaterialien definiert. Bei der Prüfung auf den Schutz vor Verkeimung wird eine massive Kontamination mit *Pseudomonas aeruginosa* sowie ein Betriebsausfall über 10 Tage simuliert. Beide Szenarien müssen von der Enthärtungsanlage beherrscht werden. Nach erfolgreicher Prüfung gemäß o. g. Prüfgrundlagen kann die Enthärtungsanlage bei der DVGW CERT GmbH zertifiziert werden und erhält dabei ein Produktzertifikat, das regelmäßig überwacht wird (Abbildung 3).

Abbildung 3: Produktzertifikat-Logo der DVGW CERT GmbH.

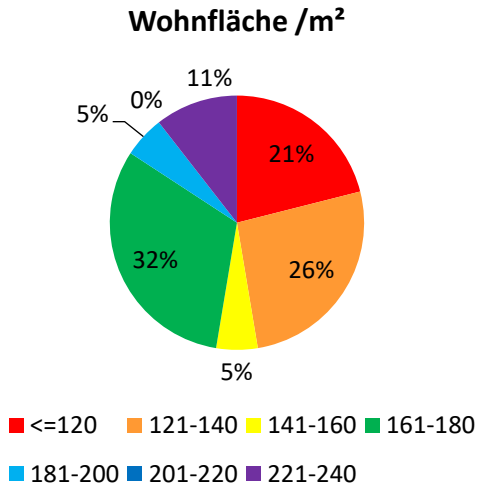
2 Langzeitstudie

Eine Betrachtung von Enthärtungsanlagen nach mehreren Jahren Betrieb (Einbau der hier betrachteten Anlagen zwischen 2010 und 2020) im privaten Haushalt wurde bisher nicht durchgeführt. Mögliche Desinfektions-Nebenprodukte, Langzeit-Migrationsprodukte oder mikrobiologische Untersuchungen sind daher noch nicht umfassend betrachtet worden. Im Auftrag der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V. (figawa) wurde eine Langzeitstudie zu eben diesen möglichen Reaktionsprodukten initiiert. Hierzu wurden 26 Haushalte in ganz Deutschland beprobt, welche zertifizierte Enthärtungsanlagen im Haus verbaut haben.

2.1 Beprobte Haushalte (26) und deren Einschätzung zum vorliegenden Trinkwasser

Die beprobten Haushalte sind mit einer Ausnahme Ein- oder Zweifamilienhäusern mit Wohnflächen zwischen 110 und 240 m² und einem Durchschnitt von etwa 159 m² (Abbildung 4). Die an der Beprobung teilnehmenden Haushalte bekamen einen Fragebogen deren Ergebnisse im Folgenden zu finden sind. Die Auswertung in Kapitel 3.3. ging über ca. 600 Haushalte, wobei diese zum Großteil nicht an der Beprobung vor Ort teilnahmen, weshalb diese hier separat aufgeführt sind.

a)



b)

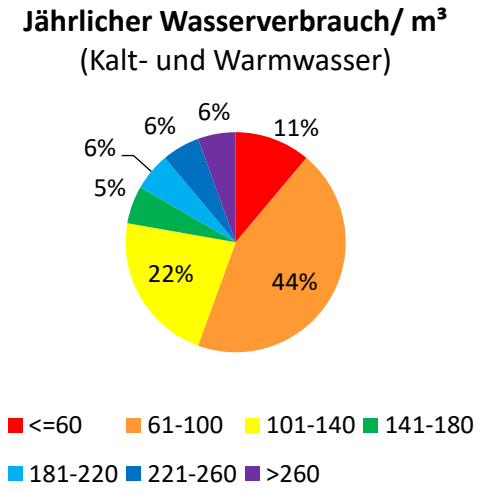


Abbildung 4: a) Wohnflächen und b) entsprechende Wasserverbrauchsmengen der untersuchten Haushalte.

Die untersuchten Haushalte haben bis zu fünf Haushaltsangehörigen. wobei in mehr als der Hälfte aller untersuchten Haushalte, mindestens eine Person ganztags im Haushalt anwesend ist (siehe Abbildung 5 b und c)

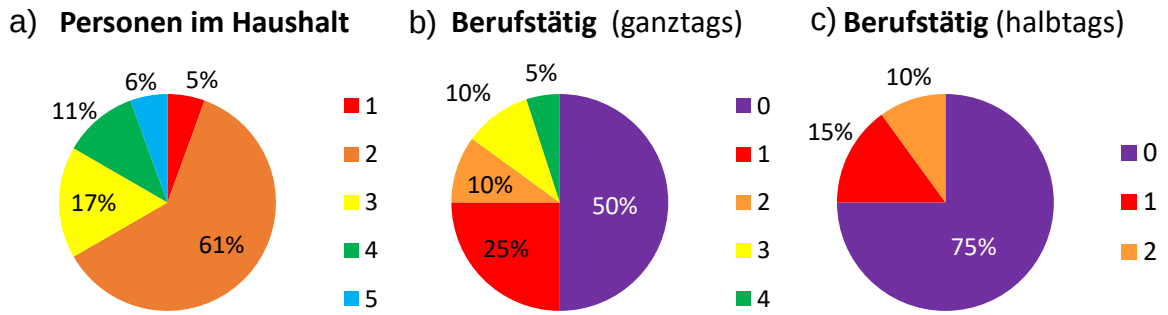


Abbildung 5: a) Anzahl der Haushaltsangehörigen sowie deren tägliche Abwesenheiten b) ganz- und c) halbtägig.

Entsprechend unterschieden sich auch die jährlichen Wasserverbrauchsmengen (Abbildung 4 b), durchschnittlich lag dieser bei etwa 127 m³.

Aufgrund der bundesweiten Verteilung der Haushalte beliefen sich die Eingangs-Härtegrade zwischen 12,6 und 40,2 °dH (Abbildung 6).

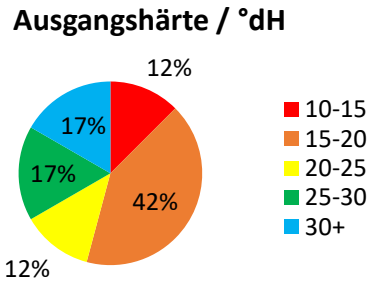


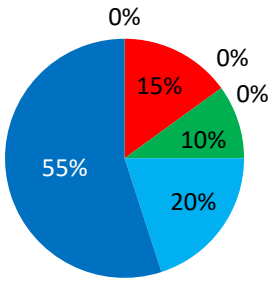
Abbildung 6: Wasserhärtenverteilung der untersuchten Haushalte.

Im Zusammenhang mit der Probenentnahme zur Analyse der Trinkwasserparameter wurden die Haushaltsangehörigen zusätzlich zum persönlichen Eindruck des Trinkwassers befragt. Hier wurde sowohl auf den Eindruck vor sowie nach Einbau einer Enthärtungsanlage eingegangen. Eine Einschätzung verlief entsprechend aufsteigenden Skalenbereichen. Die nachfolgenden Abbildung 7 bis Abbildung 9 stellen die Auswertung aller Haushalte dar.

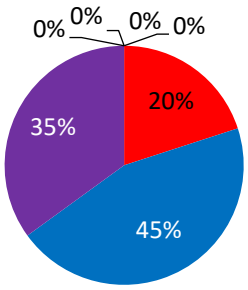
Das Trinkwasser wird generell von 75 % aller befragten Haushalte als gut eingestuft, wohingegen die hygienische Qualität von allen Haushalten überwiegend gut eingestuft wird. Der Geschmack des Wassers variiert, wird jedoch nirgends sehr schlecht beurteilt. Kalkprobleme treten bei 45 % der Haushalte auf, diese können beispielsweise als Kalkflecken an Armaturen oder Duschwänden gefunden werden (Abbildung 7).

Qualität des Trinkwassers

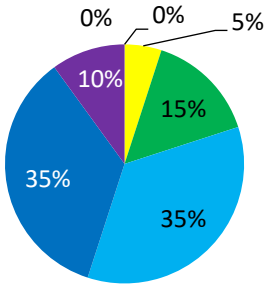
Trinkwasser (insgesamt gut)



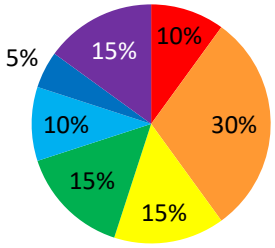
Trinkwasser (hygienisch gut)



Geschmack Trinkwasser (gut)



Häufige Kalkflecken an Armaturen



Keine Probleme mit Kalk bei Geräten

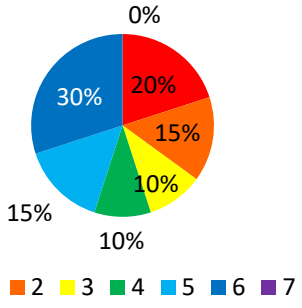


Abbildung 7: Bewertung der Trinkwasser-/Leitungswasserqualität nach Befragung aller Haushalte.

Das Trinkwasser wird von etwa einem Drittel nicht zum Trinken verwendet, jedoch in fast allen Fällen zur Herstellung von Kaffee und Tee. Transportable Wasserfilter, wie sie von diversen Herstellern bekannt sind, werden trotz Kalkablagerungen an Armaturen oder auch in Haushaltsgeräten so gut wie nie verwendet. Vermehrt treten diese Verkalkungen jedoch nur in 30 % aller beprobten Haushalte auf (Abbildung 8).

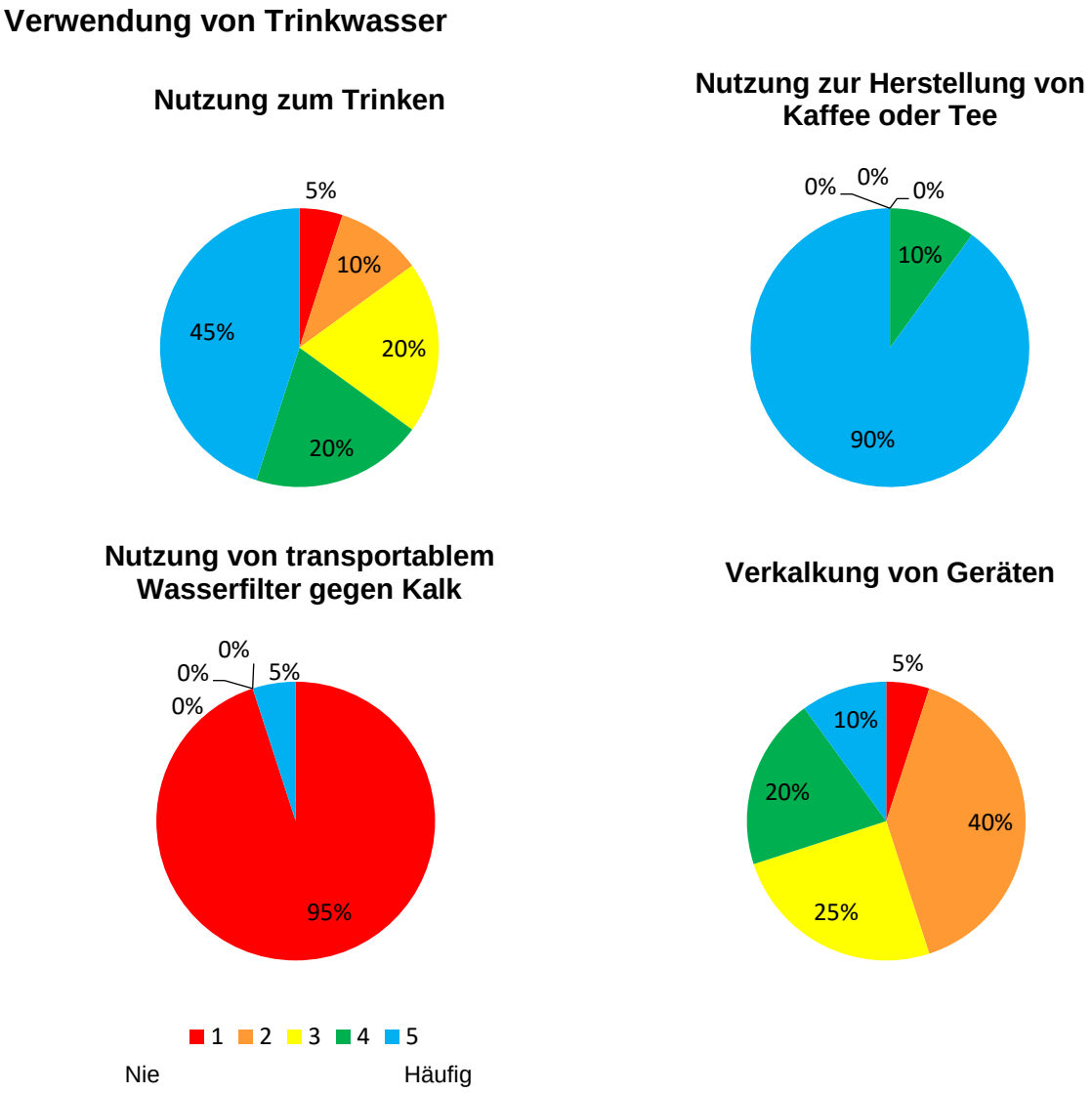


Abbildung 8 *Verwendung des Leitungswassers sowie Informationen zum Kalkverhalten nach Befragung aller Haushalte.*

Veränderungen durch die Anschaffung der Enthärtungsanlage

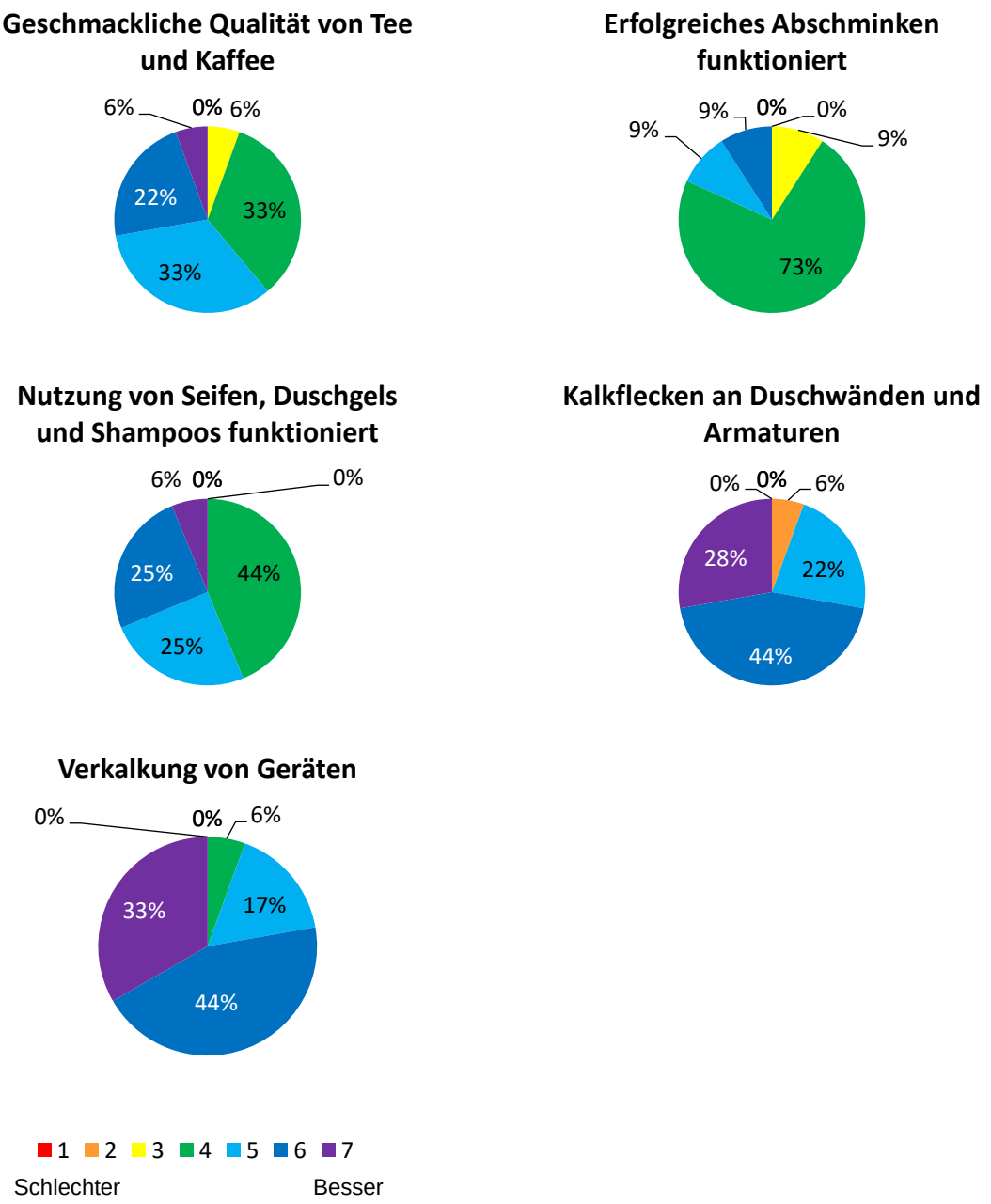


Abbildung 9: Veränderung der Trinkwasserqualität durch Anschaffung der Enthärtungsanlagen nach Befragung aller Haushalte.

Über die Befragung der beprobten Haushalte hinaus, wurde bundesweit eine umfangreichere Evaluation der Ergebnisse von Haushalten mit, aber auch ohne Enthärtungsanlage, durchgeführt (Kapitel 3.3). Die Ergebnisse decken sich weitestgehend mit den Ergebnissen der hier gezeigten.

2.2 Entnahme der Proben

Insgesamt wurden Enthärtungsanlagen von vier verschiedenen Herstellern berücksichtigt. Alle Anlagen waren nach den oben genannten Normen geprüft und mit einer Chlorelektrolysezelle ausgestattet. Die Proben wurden vor und nach den Enthärtungsanlagen entnommen, um den direkten Einfluss des Ionenaustauscherharzes zu untersuchen. Eine Entnahme des weichen Wassers war allerdings nicht immer in unmittelbarer Nähe zur Anlage durchzuführen, da Entnahmehähne nicht vorhanden waren. Die Entnahme fand dann beispielsweise in der Küche oder in Badezimmern statt. Exemplarische Entnahmestellen zeigt Abbildung 10.

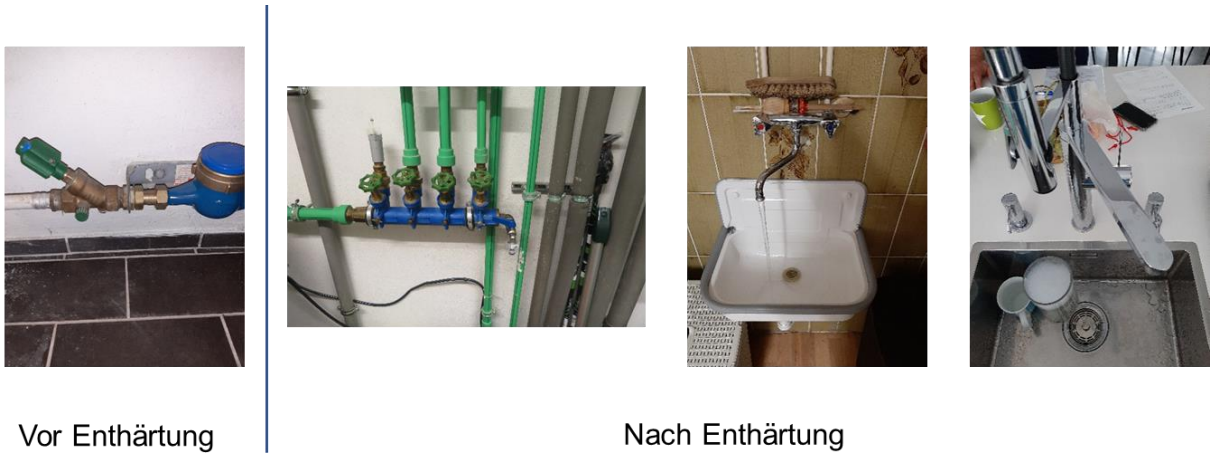


Abbildung 10: Exemplarische Entnahmestellen vor und nach der Enthärtungsanlage.

Zunächst wurden die entnommenen Proben auf die generellen Wasserparameter untersucht, um Aussagen zur Funktionalität des Ionenaustauscherharzes nach Langzeit-Einsatz zu erhalten. Hierzu wurden die Veränderungen des Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Gehaltes, des Na^{+}- und Cl^{-}-Gehaltes in Bezug auf den Ionenaustausch- und Regenerationsprozess sowie Nitrat (NO_3^{-}), Sulfat (SO_4^{2-}) und Phosphat (PO_4^{3-}) und auch der gesamte organische Kohlenstoff (TOC) gemäß Trinkwasserverordnung untersucht. Die folgenden Abbildungen stellen jeweils die Mittelwerte über alle Haushalte dar. Innerhalb der unterschiedlichen Haushalte lagen entsprechend der Versorgungsgebiete Schwankungen vor Alle Einzelwerte sind in einem separaten Anhang zu finden.

In Abbildung 11 ist die im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erhaltene mittlere Wasserhärte vor und nach Enthärtung mittels einer Enthärtungsanlage dargestellt.

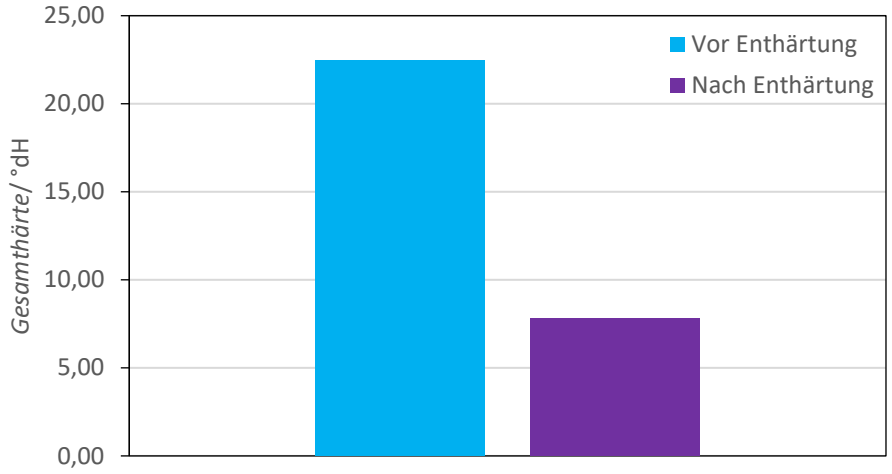


Abbildung 11: Mittelwert der Trinkwasserhärte vor und nach der Enthärtungsanlage.

Die Ergebnisse belegen, dass alle Enthärtungsanlagen entsprechend den Herstellervorgaben richtig in Betrieb waren und die Gesamthärte nach der Verschneidung im gewünschten Bereich zwischen 5 und 8°dH lag. Dies lässt sich auch anhand der gemessenen Konzentrationen der Ca^{2+}-, Mg^{2+} und Na^{+}-Ionen belegen (Abbildung 12). Während die Konzentrationen der Erdalkaliionen jeweils etwa auf ein Drittel herabgesetzt werden, nimmt die Natriumkonzentration deutlich zu. In allen Fällen war der Indikatorparameter Natrium nach Trinkwasserverordnung von max. 200 mg/L eingehalten.

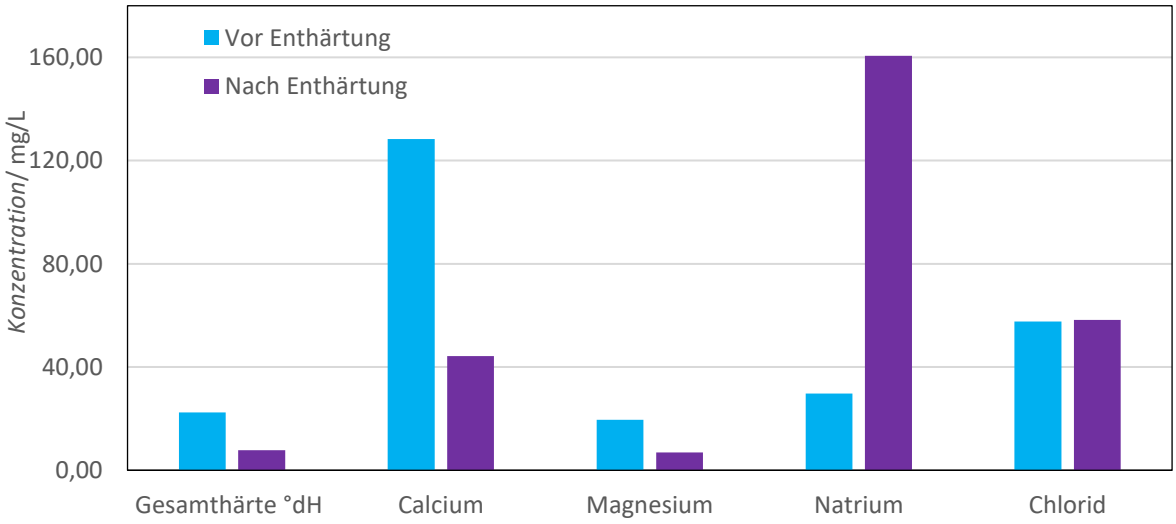


Abbildung 12: Mittlere Veränderung der Konzentrationen an Ca2+, Mg2+ und Na+-Ionen vor und nach der Enthärtungsanlage

Eine Veränderung der Parameter NO_3^- , SO_4^{2-} und PO_4^{3-} durch den Enthärtungsprozess findet nicht statt. Alle gemessenen Werte im Trinkwasser liegen außerdem weit

unter den gegebenen Grenzwerten der Trinkwasserverordnung. Ein Einfluss des Ionenaustauschers oder des Desinfektionsprozesses kann somit ausgeschlossen werden (Abbildung 13).

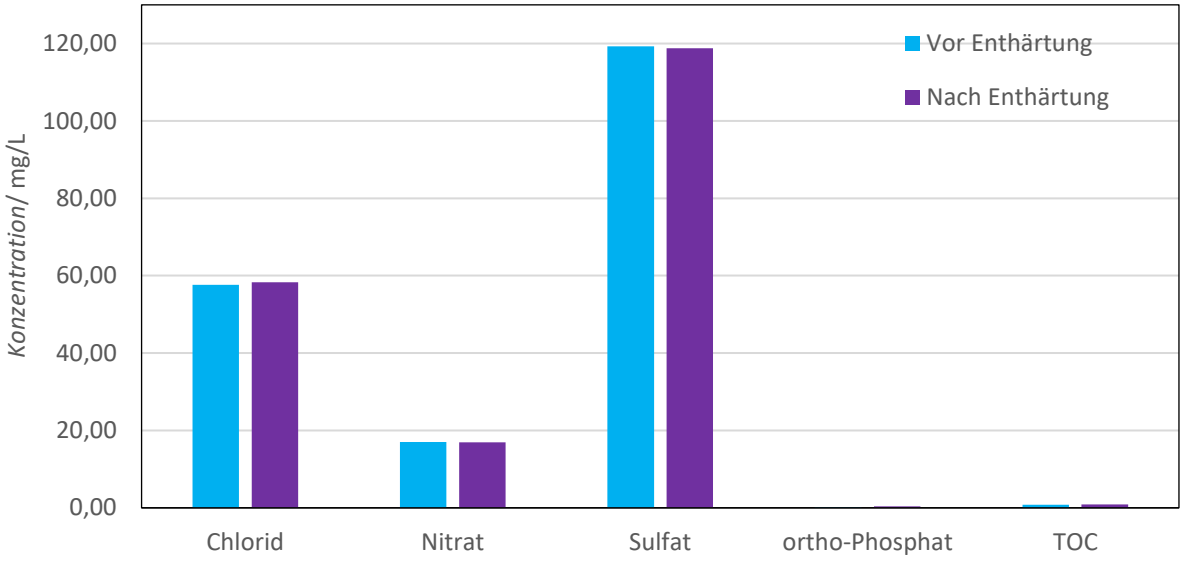


Abbildung 13: Mittlere Veränderungen der Chlorid-, Nitrat-, Sulfat-, ortho-Phosphat und TOC-Konzentrationen.

Neben den bereits genannten Parametern wurden die Proben hinter der Enthärtungsanlage außerdem besonders im Hinblick auf Desinfektionsnebenprodukte untersucht. Das Natirumhypochlorid, welches als Desinfektionsmittel im Desinfektionsprozess aus dem verwendeten Regenerationssalz mittels Elektrolyse hergestellt wird, kann als starkes Oxidationsmittel mit gelösten Stoffen oder dem Ionenaustauscherharz selbst wiederum reagieren. Hierbei ist es möglich, dass sich beispielsweise Chlorverbindungen wie Chlorat, Chlorit, Perchlorat oder Trihalogenmethane (THM) oder auch adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX) bilden. Diese sind ebenfalls teilweise über die Trinkwasserverordnung geregelt. Explizite Beschränkungen sind jedoch nicht für alle Verbindungen gegeben Die Grenzwerte sowie gemessenen Werte nach der Enthärtung sind in Abbildung 14 dargestellt.

Die Desinfektionsprodukte wurden ausschließlich bei der Beprobung nach der Enthärtungsanlage analysiert. Trotz einer potenziellen Eingangsfracht durch das örtliche Trinkwasser wurden alle oberen Werte der Parameter/Grenzwerte hinter der Enthärtungsanlage eingehalten.

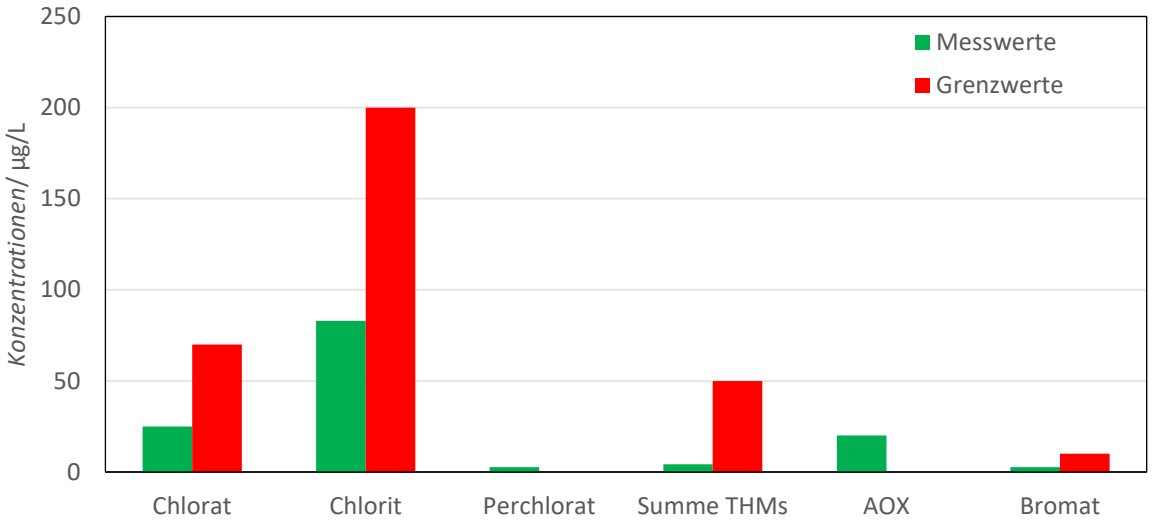


Abbildung 14: Mittlere Messwerte nach Enthärtung der Chlorat-, Chlorit-, Perchlorat-, Summe der THM-, AOX- sowie Brotmat-Konzentrationen und gegebenenfalls vorhandene Grenzwerte.

Generell können alle Verbindungsklassen nach der Enthärtung im Trinkwasser nachgewiesen werden, allerdings nur in einzelnen Fällen. Beispielsweise wurde Chlorat nur in sieben von 26 Proben oder Chlorit in nur fünf Proben nachgewiesen. Am häufigsten konnten THMs (in 20 von 26 Proben) nachgewiesen werden. Allerdings liegen alle Messwerte (gemittelt und im einzelnen) weit unter den Grenzwerten nach der Trinkwasserverordnung oder der europäischen Richtlinie. Neben Chlorat, Chlorit, Perchlorat, THMs und AOX konnten außerdem in zwei Proben noch geringe Konzentrationen an Bromat nachgewiesen werden. Dies wird auf Verunreinigungen von Bromiden im Regenerationssalz zurückgeführt. Hier können beispielhaft 29 mg/kg Brom enthalten sein, welches schließlich durch das NaOCl zum Bromat oxidiert wird. Auch dieser Wert liegt unterhalb des Grenzwertes und stellt somit kein gesundheitliches Risiko dar. Zudem werden die Desinfektionsnebenprodukte im Normalbetrieb im Zuge der Regeneration ausgespült.

Abschließend wurde auf aromatische Verbindungen wie Benzol oder polyzyklische Aromaten (PAKs) untersucht, welche aus dem Polystyrolgrundgerüst des Ionenaustauscherharzes migrieren könnten. Diese sind ebenfalls über die Trinkwasserverordnung begrenzt. In allen 26 beprobten Haushalten konnte jedoch keine Konzentration oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen werden, sodass hier kein gesundheitliches Risiko zu besorgen ist.

Neben den chemischen Parametern wurde darüber hinaus das Trinkwasser sowohl vor als auch nach der Enthärtung auf keimbildende Einheiten untersucht. Vorab festzuhalten ist, dass Trinkwasser nie steril ist und immer geringe Mengen an KBEs mitführen kann. Abflammbare Probehähne für eine ordnungsgemäße mikrobiologische Probenahme waren in den Hausinstallationen nicht vorhanden. Ein

gewisser Trend des leichten Anstiegs der KBE-Werts bei 22 °C und 36 °C ist in einigen Haushalten zu erkennen. Dies konnte allerdings bereits auch in anderen Studien an Ionenaustauscherharzen beobachtet werden (Parsons 2000). In 17 Proben der untersuchten 26 Haushalte war jedoch kaum einen Anstieg festzustellen, sodass ein deutlicher Einfluss des Ionenaustauschers ausgeschlossen werden kann. Bis auf einen Ausreißer liegen alle Werte unterhalb des Grenzwertes der TrinkwV. In diesem Fall war allerdings der Wasserverbrauch im Verhältnis zur Wohnfläche besonders gering, sodass hier eine Veränderung durch die Stagnationenszeiten innerhalb der Trinkwasserinstallation nicht ausgeschlossen werden konnte und diese möglicherweise zu den hohen Werten führen (Abbildung 15).

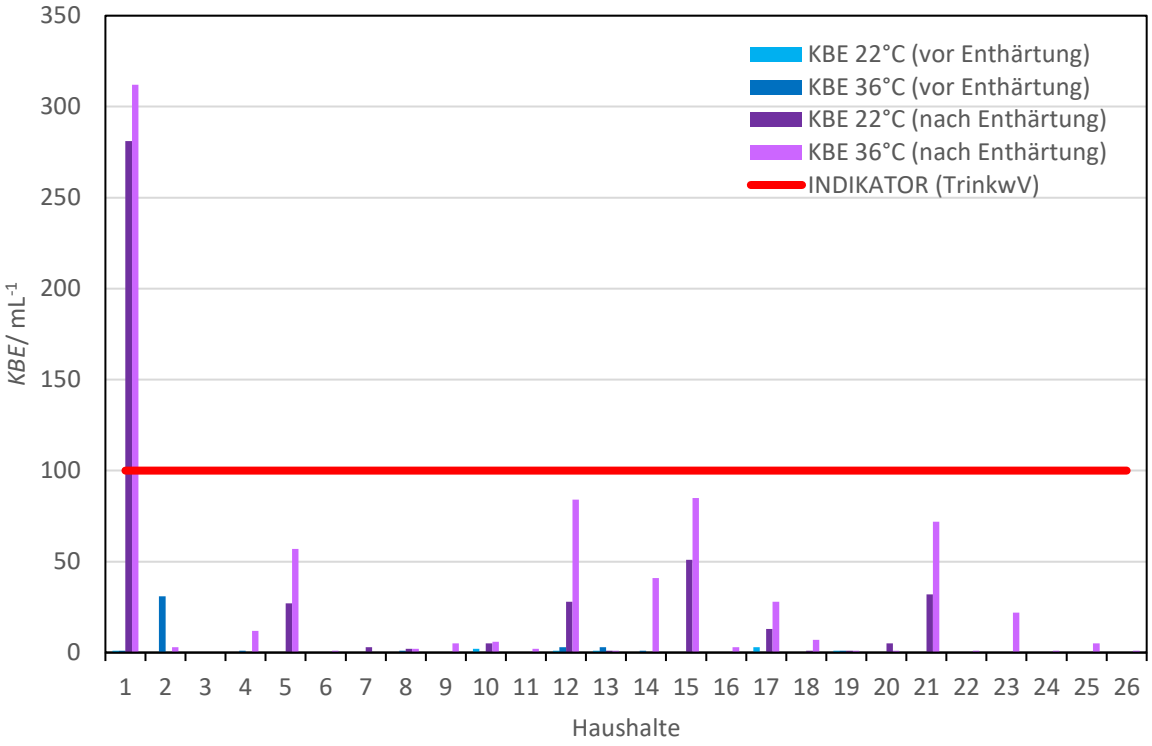


Abbildung 15: Koloniebildende Einheiten bei 22 °C und 36 °C der untersuchten Haushalte sowohl vor als auch nach Enthärtung

2.3 Zusammenfassung

Die deutsche Trinkwasserqualität vor und nach einer langzeit-eingesetzten, dezentralen Wasserenthärtung mit Ionenaustauscherharzen wurde sowohl hinsichtlich chemischer Parameter als auch mikrobiologischer Parameter vor und nach der Wasserenthärtung untersucht. Hierbei wurden 26 Haushalte aus unterschiedlichen Versorgungsgebieten beprobt, in denen nach DIN EN 14743 und DIN 19636-100 zertifizierten Anlagen, ausgestattet mit Chlorelektrolysezellen als Desinfektionseinheit, betrieben werden.

Die Funktionsfähigkeit der Wasserenthärtung konnte bestätigt werden, da die Konzentrationen für Calcium und Magnesium entsprechend abnehmen, während Natrium freigesetzt wird. Der geringe Nachweis von Chlorat, Chlorit, Perchlorat, THMs, AOX oder Bromat ist auf den Desinfektionsprozess zurückzuführen. Das in situ gebildete Chlor reagiert mit dem Ionenaustauscherharz oder bereits im Wasser gelösten Stoffen zu diesen Nebenprodukten. Die gemessenen Konzentrationen lagen alle unterhalb der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung und der europäischen Richtlinie oder sogar unterhalb der Bestimmungsgrenzen. Eine Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität durch diese Stoffe ist bei einem bestimmungsgemäßen Betrieb nicht gegeben.

Die mikrobiologischen Untersuchungen zeigen in ausgewählten Fällen eine bereits in der Literatur beschriebene Zunahme der koloniebildenden Einheiten nach der Wasserenthärtung. Die jeweiligen Messwerte liegen jedoch unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung. Der sichere Einsatz dieser geprüften und zertifizierten Enthärtungsanlagen auch über lange Einsatzzeiten in Haushalten konnte daher gezeigt werden.

3 Folgenabschätzung von dezentralen Enthärtungsanlagen mittels Ionenaustausch

3.1 Methodischer Ansatz

3.1.1 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung erfolgt in Anlehnung an die Ökobilanz-Methodik mit den Arbeitsschritten Zieldefinition und Festlegung der Systemgrenzen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung (vgl. Vorgehensweise nach ISO Norm DIN EN ISO 14040:2021 bzw. Abbildung 16) Prozesse in den Haushalten, die Abwasserentsorgung sowie die notwendigen vor- und nachgelagerten Prozesse beinhaltet.

Die für die Stoffflussbetrachtung und die Sachbilanz notwendigen Daten stammen aus der Literatur, aus Expertengesprächen sowie eigenen Berechnungen und Abschätzungen. Zusätzlich konnten Ergebnisse einer Befragung von Betreibern dezentraler Enthärtungsanlagen genutzt werden, die in 2020 durchgeführt wurde.

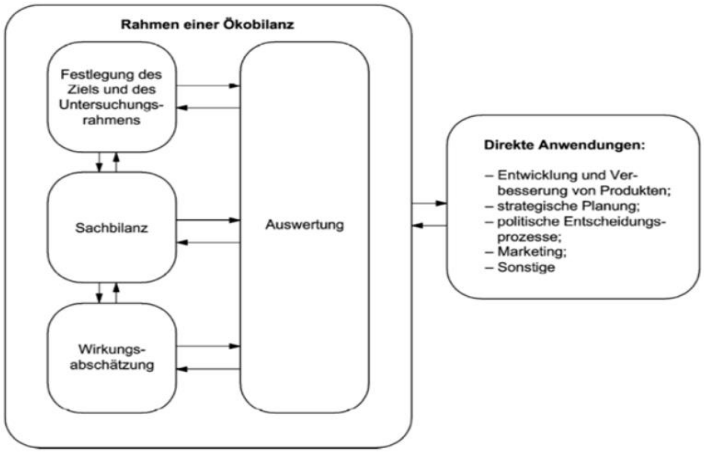


Abbildung 16: Bausteine einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040.

3.1.2 Wirkungskategorien zur Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Sachbilanz sind Wirkungskategorien zuzuordnen. Dazu werden die sich aus der Sachbilanz ergebenden Einzelemissionen bzw. Einzelbeiträge zu der betrachteten Wirkungskategorie quantifiziert und aufsummiert. Die Quantifizierung erfolgt für jeden Parameter durch Multiplikation der spezifischen Input- oder Outputgröße mit einem Charakterisierungsfaktor, über den der unterschiedliche potenzielle Wirkungsbeitrag der einzelnen Stoffe an einer bestimmten Wirkungskategorie berücksichtigt wird. Eine Wirkungsaggregation ist allerdings nicht bei allen Wirkungskategorien möglich, da teilweise entsprechende Methoden fehlen.

Zur Wirkungsabschätzung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, in Europa am häufigsten eingesetzt werden die CML-, die schadenorientierte ReCiPe- und die ILCD-Methode. Der ILCD (International Reference Life Cycle Data System)-Ansatz wurde im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts erarbeitet (vgl. Informationen auf der "European Platform on Life Cycle Assessment" https://eplca.jrc.ec.europa.eu/index.html#menu1 bzw. Europäische Kommission, 2010), basiert auf den ISO-Standards 14040/44 und berücksichtigt aktuelle Erkenntnisse bspw. hinsichtlich der auszuwählenden Wirkungskategorien.

Im Rahmen dieser Studie wird auf folgende Wirkungskategorien eingegangen:

- Treibhauseffekt,
- Versauerung und
- Eutrophierung.

Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf dem Treibhauseffekt.

Zur Bewertung des spezifischen Beitrags der einzelnen Wirkungsindikatoren können die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zusätzlich auf die Gesamtbelastung in einer bestimmten Region bzw. die daraus zu berechnende einwohnerspezifische Gesamtbelastung bezogen werden. Die darüber "normierten" Ergebnisse für die einzelnen Kategorien können dann miteinander verglichen werden. Die Normierungsfaktoren für das ILCD-Verfahren mit der Bezugsebene der EU werden unter https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerILCD.xhtml zur Verfügung gestellt (vgl. auch European Commission, 2011; Fazio et al., 2018).

3.1.3 Genutzte Software

Als Stoffffluss- und Ökobilanz-Software wurde UMBERTO NXT eingesetzt. Die ILCD-Methodik ist darin als Standard-Ansatz hinterlegt.

Zur Einbindung von Ökobilanzdaten nutzt UMBERTO die Ecoinvent-Datenbank als international anerkannte Datenquelle, die bspw. in Ökobilanzen, Umweltproduktdeklarationen, in CO_2-Bilanzen, in der integrierten Produktpolitik oder in der Umweltzertifizierung benutzt wird. Der Ecoinvent-Datenbestand beinhaltet Sachbilanzdaten zu unterschiedlichsten Prozessen wie z. B. Energie, Materialien, Entsorgungsprozesse oder Transporte. Die in UMBERTO integrierte Ecoinvent-Datenbank beinhaltet unaggregierte Daten, sodass der Nutzer der Ökobilanz-Software die Prozesskette eines Produkts in deren untergeordnete Einheiten aufschlüsseln kann.

3.2 Zieldefinition und Systemgrenzen

Das Ziel dieser Studie ist es, die ökologischen Auswirkungen einer dezentralen Enthärtung des im Haushalt verwendeten Trinkwassers zu bewerten. Die Untersuchung beschränkt sich dabei auf den Einsatz von Ionenaustauschverfahren zur dezentralen Enthärtung. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, die direkten und indirekten Umweltauswirkungen entsprechender dezentraler Enthärtungsanlagen aufzuzeigen und gleichzeitig Ansatzpunkte zu Verbesserung der Umweltbilanz zu identifizieren.

Hintergrund der Bewertung 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, Karlsruhe, durchgeführt. Die Zielgruppe umfasst sowohl die Hersteller als auch die Nutzer der Anlagen sowie im Weiteren auch die Wasserversorger, Beratungsinstitutionen, Umweltbehörden und sonstige interessierte Kreise.

Die Vorgehensweise zur ökologischen Bewertung orientiert sich an der ISO Norm DIN EN ISO 14040.

3.2.1 Funktion und funktionelle Einheit

Die zu untersuchende Funktion ist die Bereitstellung und Nutzung von Trinkwasser im Haushalt. Es wird vom Trinkwasserbegriff der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2020) ausgegangen, wonach Trinkwasser alles Wasser ist, das:

" zum Trinken, zum Kochen, zur Zubereitung von Speisen und Getränken oder insbesondere zu den folgenden anderen häuslichen Zwecken bestimmt ist:
aa) Körperpflege und -reinigung,
bb) Reinigung von Gegenständen, die bestimmungsgemäß mit Lebensmitteln in Berührung kommen,
cc) Reinigung von Gegenständen, die bestimmungsgemäß nicht nur vorübergehend mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen;" (TrinkwV, 2020)

bestimmt ist.

Entsprechend ist in dieser Studie die Verwendung von Trinkwasser zu folgenden Zwecken einbezogen:

- Trinken, Kochen und Zubereitung von Speisen und Getränken,
- Baden, Duschen, Körperpflege,
- Geschirrspülen,
- Wäschewaschen,
- Toilettenspülung sowie

- Gartenbewässerung, Putzen, Autopflege.

Als funktionelle Einheit wird die Trinkwassernutzung einer Person in einem Jahr betrachtet.

Einbezogen in die Bewertung werden nur die Prozesse, bei denen durch die dezentrale Enthärtung bzw. durch die unterschiedlichen Wasserhärten bedingte Unterschiede auftreten.

3.2.2 Untersuchungsszenarien

Es werden die dezentrale Enthärtung mit einem Standard-Ionenaustauschverfahren für zwei typische, harte Wässer sowie als Referenzfall die Nutzung des nicht-enthärteten Wassers analysiert. In Anlehnung an Hillenbrand et al. (2004) werden als typische Wässer beispielhaft ein Wasser mit einer Gesamthärte von 3,16 mmol/l (Wasser B: nach der Bezeichnung des alten WRM-Gesetzes von 1988 Härtebereich 3) und ein Wasser mit einer Gesamthärte von 4,62 mmol/l (Wasser A: nach der Bezeichnung des alten WRM-Gesetzes Härtebereich 4) miteinander verglichen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Parameter der zwei ausgewählten Wässer

Parameter	**Einheit**	**Wasser A**	**Wasser B**
Gesamthärte (Summe Erdalkalien)	mmol/l	4,62	3,16
	°dH	25,9	17,7
Karbonathärte	mmol/l	3,23	2,57
	°dKH	18,1	14,4
Calcium	mmol/l	3,52	2,82
Magnesium	mmol/l	1,1	0,34

Quelle: vgl. Hillenbrand et al., 2004

In unterschiedlichen Szenarien wird der Einfluss wichtiger Randbedingungen untersucht (bspw. Nutzerzahl pro Anlage, Betriebsdaten der Anlage, Berücksichtigung der Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten, Einfluss Strommix, etc.).

3.3 Befragung von Haushalten zur Nutzung von Trinkwasser mit unterschiedlichen Härtegraden

Im Rahmen einer repräsentativen Befragung von Haushalten mit und ohne dezentrale Enthärtungsanlagen wurden u. a. die Nutzungsgewohnheiten der Haushalte hinsichtlich des Einsatzes von Wasch- und Reinigungsmitteln erhoben. Dazu wurden 207 Haushalte mit Enthärtungsanlage (Herstellerkunden, zu gleichen Anteilen kontaktiert über vier Hersteller von Enthärtungsanlagen) sowie 625 Haushalte ohne Enthärtungsanlage (Kontrollgruppe) eingebunden. Die Haushalte decken unterschiedliche Regionen in Deutschland und Härtebereiche des Trinkwassers ab.

Für die ökologische Bewertung sind wichtige Ergebnisse zusammengefasst:

- 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. Anlagenbesitzer berichten von einer gleichbleibend niedrigen Verkalkung.
- 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 Verhaltensänderung i. S. 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 hier 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 auf den abgefragten Gebieten (Verbrauch Wasch- und Spülmittel, Verkalkung von Geräten, Auftreten von Kalkflecken, Nutzung von Kosmetikprodukten, geschmackliche Qualität von Tee und Kaffee, Nutzung von Shampoos und Duschgels). Besonders starke Verbesserungen stellten sich danach bei der Verkalkung von Geräten und dem Auftreten von Kalkflecken ein. Der Verbrauch an Wasch- und Spülmittel reduzierte sich nach Angabe der Haushalte leicht.

Außerdem gaben 80 % der befragten Haushalte mit Enthärtungsanlage an, ihre Anlage jährlich zu warten, 9 % alle 2 Jahre und 9 % nach Bedarf. Der Schwerpunkt der Studie lag somit auf Enthärtungsanlagen, welche bestimmungsgemäß betrieben wurden und damit den Vorgaben der Herstellern entsprechend gewartet wurden.

3.4 Beschreibung des Stoffflussmodells

Zur Zusammenführung der notwendigen Daten für die unterschiedlichen Szenarien wurde ein detailliertes Stoffflussmodell erstellt. Dazu wurde das Programm UMBERTO verwendet. Dieses Programm dient der Stoffflussmodellierung und Ökobilanzierung, das auf der Theorie der Stoffstrom- oder Petri-Netze basiert.

Prozesse werden im Petri-Netz durch eine Kombination von Stellen, Transitionen und Verknüpfungen beschrieben. Eine Stelle entspricht dabei einer zeitlichen Transformation (bzw. einem Lager), eine Transition einer stofflichen Transformation (bzw. einem Umwandlungsprozess) und eine Verknüpfung einem Stoff- oder Energiestrom. Stellen und Transitionen müssen sich im Petri-Netz immer abwechseln.

UMBERTO stellt zusätzlich mit der Ecoinvent-Datenbank Standardmodule bereit, mit denen auch die Vorketten von Materialien erfasst werden. In der Datenbank sind zahlreiche Prozesse enthalten, von denen einige auch für diese Untersuchung eingesetzt wurden (z. B. Stromerzeugung, Transport, s. u.).

Das hier verwendete Modell teilt sich in verschiedene Module auf, die die folgenden Bereiche abdecken (vgl. Abbildung 17):

- Wasserversorgung (Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung),
- Haushalte,
- Abwasserentsorgung.

Folgende Faktoren werden im Modell berücksichtigt:

- Bedarf an Energie und Chemikalien zur Wasserver- und Abwasserentsorgung,
- der Verbrauch von Wasch-, Reinigungsmitteln und Entkalkern sowie der Verbrauch von Energie zur Warmwasserbereitstellung im Haushalt,

- die Herstellung der Wasserenthärtungsanlage bzw. die unterschiedlichen Nutzungsdauern der Haushaltsgeräte, deren Nutzungsdauer wesentlich durch den Härtegrad des Trinkwassers beeinflusst werden können, mit den dazu notwendigen Materialien (siehe im Detail die Beschreibung der Szenarien).

Folgende Aspekte werden aufgrund fehlender Informationen zum Einfluss einer dezentralen Enthärtung bzw. aufgrund geringer Relevanz nicht berücksichtigt;

- Errichtung und Instandhaltung des Wasserverteilungssystems, der Abwasserleitung sowie der Kläranlage,
- Gesundheitsauswirkungen,
- Verschleiß von Hausinstallationen (Armaturen, Leitungsnetz im Haus).

Die Systemgrenzen sind in Abbildung 18 dargestellt.

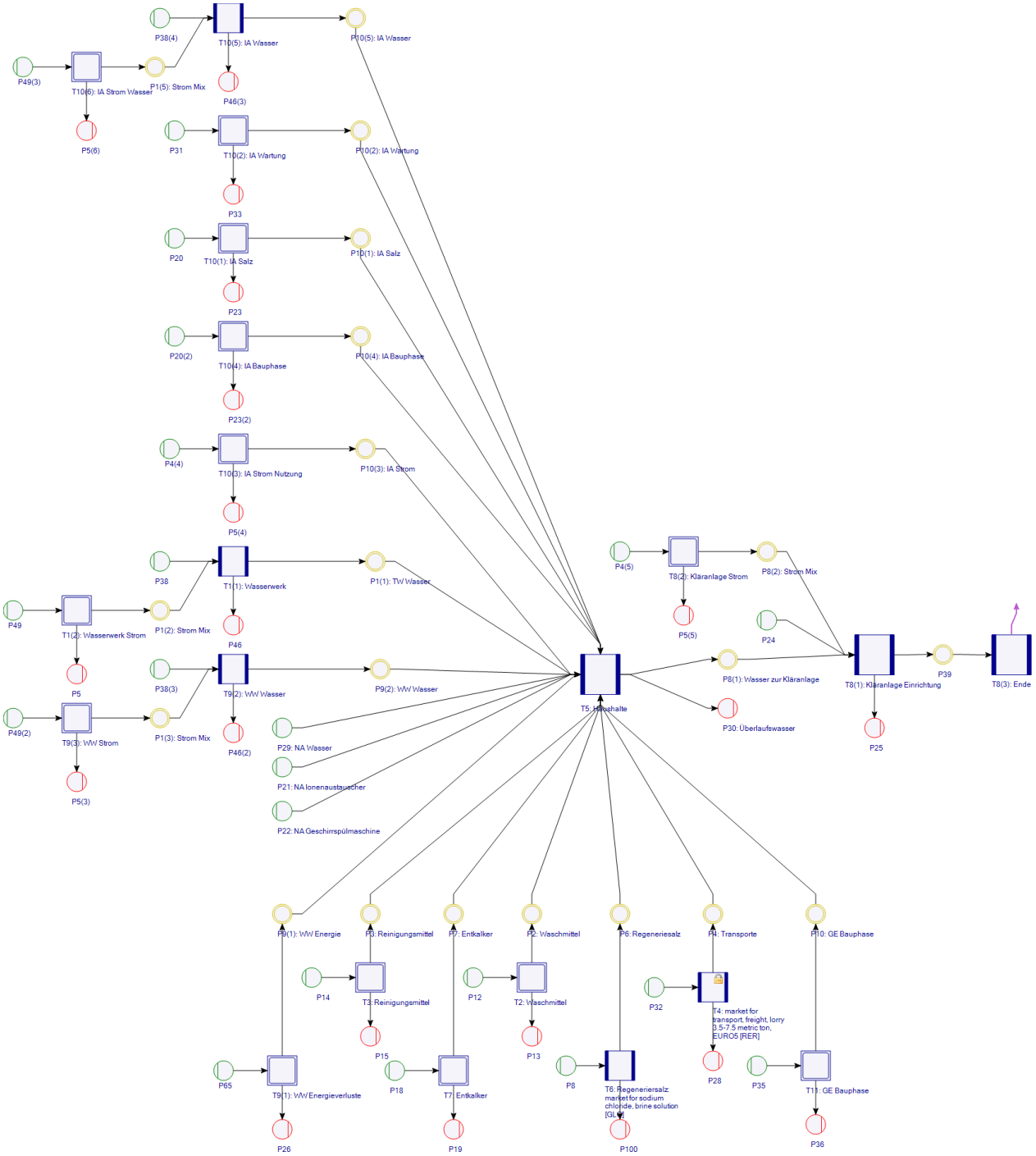


Abbildung 17: Modellierung von Trinkwasserbereitstellung, Nutzung in den Haushalten und Abwasserentsorgung.

Quelle: Eigene Darstellung

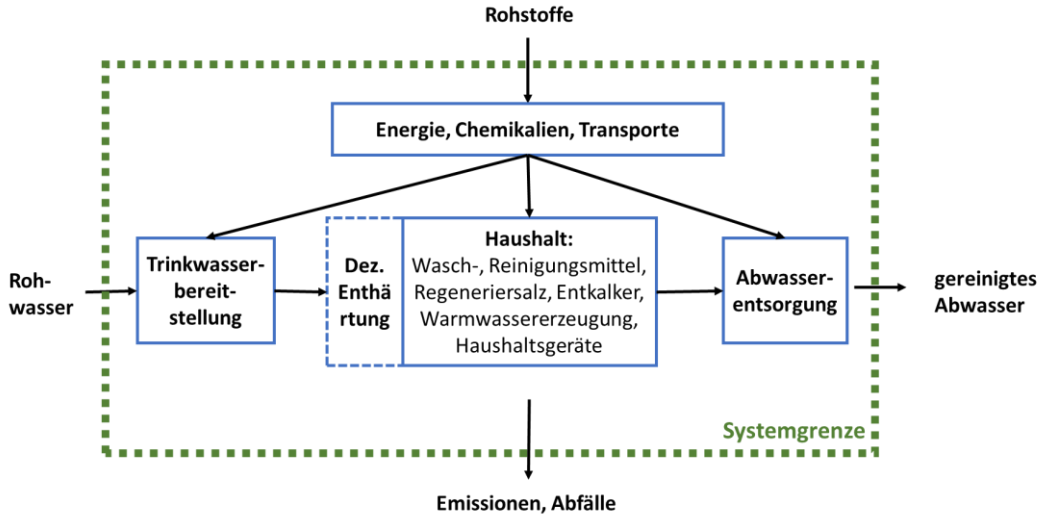


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Systemgrenzen der Untersuchung.

Quelle: Eigene Darstellung

3.4.1 Wasserversorgung

Im Wasserwerk wird das Rohwasser zu Trinkwasser unter Einsatz von Betriebsmitteln (Chemikalien, Energie) aufbereitet. Als Durchschnitt für den spezifischen Energieverbrauch zur Wasseraufbereitung und -verteilung wird der Wert von 0,5 kWh pro m³ verwendet (vgl. Hillenbrand, 2009). Für die weiteren Parameter wird ein entsprechendes UMBERTO-Modul verwendet ("tap water production, conventional treatment, Europe without Switzerland, 2012 – 2020"). Die Angaben basieren auf einer in 2012 geplanten Produktionsanlage in Europa, die Umweltbelastungen wurden von Ecoinvent auf 2020 hochgerechnet.

In der Wasserverteilung wird der bundesdurchschnittliche Wasserverlust von 5,3 % (Stat. Bundesamt, 2020) berücksichtigt.

3.4.2 Haushalte

Die oben beschriebenen Ergebnisse der Befragung zeigen, dass der Härtegrad des Trinkwassers an verschiedenen Stellen im Haushalt eine Rolle spielt. In der Modellierung werden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Wasch- und Reinigungsmittelverbrauch,
- Seifenverbrauch,
- Regeneriersalzverbrauch,
- Energieaufwand für die Trinkwassererwärmung.

Es wird von einem jährlichen Trinkwasserverbrauch von 47 m³ pro Person (BDEW, 2019a: 127 l/(E*a) ausgegangen.

- **Waschmittelverbrauch**

Hinsichtlich des Waschverhaltens wird anhand verfügbarer Daten ein Durchschnittshaushalt in Deutschland modelliert. Die dazu notwendigen, spezifischen Werte sind: 7,3 kg Waschmittel pro Kopf, 48 L Wasser pro Waschgang, und 0,78 kWh Strom pro Waschgang (IKW, 2020).

Abbildung 19 zeigt eine typische Dosierungsempfehlung für Waschmittel in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad der Wäsche und dem Härtebereich nach Forum Waschen (2019). Die Härtebereiche beziehen sich dabei auf folgende Grenzen: weich: kleiner 8,4 °dH, mittel: 8,4 bis 14 °dH und hart: größer 14 °dH. In Szenariobetrachtungen wird der Einfluss des Verschmutzungsgrads der Wäsche näher untersucht.

Die für die Waschmittel benötigte Verpackungsmenge werden entsprechend Hillenbrand et al. (2004) berücksichtigt, als Ecoinvent-Modul wird "market for corrugated board box [RER]" eingesetzt.

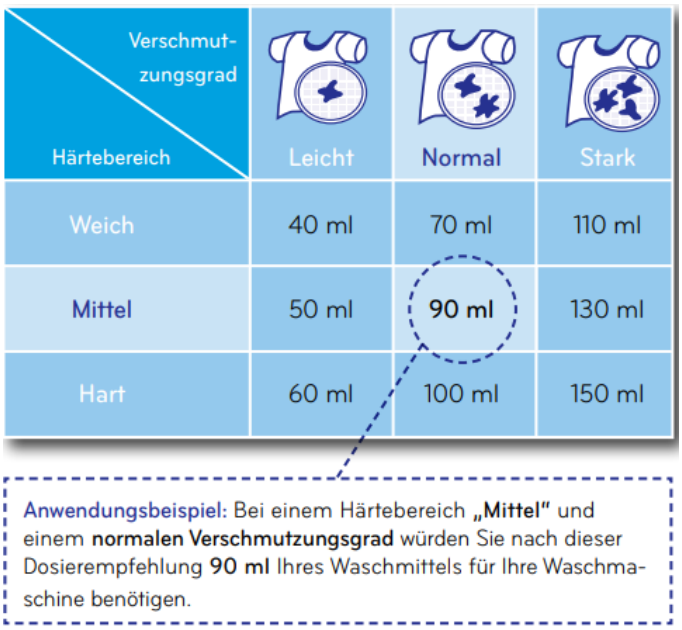


Abbildung 19: Typische Dosierungsempfehlungen für Waschmittel in Abhängigkeit von Härtebereich und Verschmutzungsgrad der Wäsche (Forum Waschen, 2019).

Für die ökologische Bewertung ist es notwendig, die Zusammensetzung der Waschmittel zu berücksichtigen. In IKW (2017b) ist eine typische Rezeptur eines Vollwaschmittels aufgelistet (s. Tabelle 2). Die im Rahmen der Stoffflussmodellierung genutzten Ecoinvent-Module zeigt Tabelle 3.

Tabelle 2: Typische Beispielrezeptur eines Voll- und Colorwaschmittels nach Henkel AG & Co. KGaA, zitiert in IKW (2020) (Gehaltsangaben in %)

Inhaltsstoffe	**Vollwaschmittel, Pulver**	**Colorwaschmittel, Pulver**
Lineares Alkylbenzolsulfonat (LAS)	13	12
Fettalkoholethoxylat (FAEO)	3	4
Zeolith A	1	1
Soda	20	29
Polycarboxylate	3	3
Natriumcitrat	-	9
Natriumsilicat	2	2
Natriumpercarbonat	13	-
Tetraacetylethylendiamin (TAED)	4	-
Bleichkatalysator	+	-
Enzyme Proteasen	+	+
Lipasen	+	+
Amylasen	+	+
Cellulasen	+	+
Mannanase	+	+
Phosponate	1	1
Siliconöl/Parrafinöl (Schaum-inhibitoren)	0,1	0,1
Carboxymethylcellulose	3	2
Optischer Aufheller	0,2	-

Verfärbungsinhibitoren (PVP und PVP-Derivate)	-	0,5
Soil Release Polymere	0,5	0,5
Duftstoffe	< 0,5	< 0,5
Farbstoff	-	-
Natriumsulfat (produktionsbedingt)	25	30
Wasser	Rest	Rest

+ = in geringen Mengen enthalten (<1 %)

- = nicht enthalten

Tabelle 3: Waschmittel-Komponenten und die zur Modellierung genutzten Ecoinvent-Module

Waschmittel- Komponenten	**Ecoinvent-Module**
Carboxymethylcellulose	market for carboxymethyl cellulose, powder [GLO]
Natriumsulfat	market for sodium sulfate, anhydrite [RER]
SRP	market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical [GLO]
LAS	market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical [GLO]
Fettalkoholethoxylat	market for fatty alcohol [GLO]
Zeolith A	market for zeolite, powder [GLO]
Soda	market for soda ash, dense [GLO]
Polycarboxylate	market for polycarboxylates, 40 % active substance [RER]
Natriumsilicat	market for sodium silicate, solid [RER]
Natriumpercarbonat	market for sodium percarbonate, powder [RER]

Tetraacetylethylendiamin	market for EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid [GLO]
Phosphonate	market for organophosphorus-compound, unspecified [GLO]
Verpackung	market for corrugated board box [RER]

Reinigungsmittel

Aufbauend auf den Ergebnissen der Befragung und entsprechend Hillenbrand et al. (2004) wird davon ausgegangen, dass im Härtebereich drei oder vier wegen stärkerer Kalkablagerungen pro Person und Monat eine Reinigung mehr durchgeführt wird als in Härtebereich eins oder zwei. Im Modell wird dabei von 30 g Reinigungsmittel pro Reinigung ausgegangen (durchschnittliches Anti-Kalk-Reinigungsmittel mit 94,77 % Wasser, 4 % Zitronensäure, 1 % LAS und 0,23 % Verdickungsmittel; Wasserverbrauch von 5 Litern pro Reinigung). Die Komponenten des Reinigungsmittels und ihre jeweiligen Ecoinvent-Module sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Verwendete Ecoinvent-Module zur Bilanzierung des Reinigungsmittelverbrauchs

Reinigungsmittel-Komponenten	**Ecoinvent-Module**
Zitronensäure	market for citric acid [GLO]
LAS	market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical [GLO]
Verdickungsmittel	market for maize starch [GLO]
Verpackung	market for corrugated board box [RER]

- **Entkalker**

Entkalker werden insbesondere im Warmwasserbereich bei Duschköpfen, Perlatoren sowie bei Kaffeemaschinen, Wasser- und Eierkochern eingesetzt. Wie bei Hillenbrand et al. (2004) beschrieben, kann die benötigte Menge Entkalker proportional zur Karbonathärte des Trinkwassers nach folgender Formel berechnet werden:

*Entkalkermenge (g) pro Jahr und Person = KH * 120*

d. h. bei einer Karbonathärte von 1 mmol/l ergibt sich ein Verbrauch von 120 g pro Jahr und Person bei etwa 15 g Verbrauch pro Entkalkung. Als Entkalkungsmittel wird im Modell die sehr häufig eingesetzte Zitronensäure gewählt. Andere Entkalker wie z. B. Essigsäure oder die z.T. eingesetzte, aus Gewässerschutzsicht relevante Amidosulfonsäure werden nicht berücksichtigt. Es wird ein Wasserverbrauch von 1 Liter pro Entkalkungsvorgang, d. h. pro 15 g Entkalker, berechnet.

- **Regeneriersalz**

Die für Geschirrspülmaschine eingesetzte Regeneriersalzmenge bezieht sich auf Hillenbrand et al. (2004). In Geschirrspülmaschinen wird das Wasser (ca. 22 l pro Spülgang) über den integrierten Ionenaustauscher auf ca. 4 dH enthärtet. Dafür benötigt die Spülmaschine die fünffache stöchiometrische Menge an Natriumchlorid. Eine Spülmaschine wird pro Person und Tag 0,2-mal genutzt (vgl. VDI 2067-12, 2000).

Als Regeneriersalz wird Natriumchlorid über das Ecoinvent-Modul "market for sodium chloride, powder" berücksichtigt.

- **Energieverbrauch zur Warmwasserbereitung**

Kalkablagerungen können bei der Erzeugung von Warmwasser bspw. über Durchlauferhitzer oder Wasserkocher einen erhöhten Energieverbrauch verursachen. Nach BDEW (2019b) wird in Deutschland in 58,3 % aller Wohnungen das Wasser durch eine zentrale Anlage erwärmt. In den übrigen Wohnungen werden dafür Durchlauferhitzer genutzt, in der Mehrzahl der Fälle auf Strombasis. Bei den zentralen Anlagen wird überwiegend Gas als Energieträger verwendet (Stat. Bundesamt, 2012).

Nach DEHOGA (o.A.) wird die Effizienz von Heizelementen zur Warmwasserbereitung durch einen Millimeter Kalkablagerung um 10 % verringert. Entsprechend Hillenbrand et al. (2004) wird davon ausgegangen, dass bei der Wassererwärmung ab einer Karbonathärte von 1 mmol/l Verluste auftreten. Zur Modellierung werden entsprechend zwei Systeme unterschieden:

a) zentrale Warmwasserbereitung mit Gas als Energieträger

Energieverluste bei befeuerten Warmwasserbereitungsanlagen werden durch eine Beeinträchtigung des Wärmeübergangs und höheren Abgastemperaturen bzw. Abgasverlusten verursacht.

Berechnungsansatz: Es wird angenommen, dass bei befeuerten Warmwasserbereitungsanlagen bei einer Karbonathärte von 3 mmol/l Energieverluste von ca. 10 % auftreten und es wird von einem linearen Zusammenhang zwischen Karbonathärte und

Energieverlust ausgegangen. Der tägliche Warmwasserbedarf liegt bei ca. 35 Litern mit einem Temperaturniveau von ca. 45 °C, d. h. die Wassertemperatur ist ausgehend von einer durchschnittlichen Kaltwassertemperatur von 10 °C um etwa 35 °C zu erhöhen (vgl. Hillenbrand et al, 2004).

Der Verbrennungsprozess (Gas) wird über das entsprechende UMBERTO-Modul (market for heat, entral or small-scale, natural gas; Europe without Switzerland) berücksichtigt.

b) Durchlauferhitzer auf Strombasis

Energieverluste werden durch den schlechteren Wärmeübergang und damit verbundenen längeren Aufwärmzeiten bei Durchlauferhitzern und einen dadurch verursachten Mehrverbrauch an Warmwasser verursacht.

Berechnungsansatz: Zugrunde gelegt wird eine zusätzliche Warmwassermenge von 1,3 l pro Tag ab einer Karbonathärte von 3 mmol/l.

Der Strombedarf wird über das entsprechende Querschnittsmodul berücksichtigt.

Für Kaffeemaschinen oder Wasserkocher wird kein zusätzlicher Energiebedarf berechnet, da von regelmäßigen Entkalkungen dieser Geräte ausgegangen wird (mit einem entsprechenden, oben beschriebenen Zusatzbedarf an Entkalker).

- **Haushaltsgeräte**

Die Nutzung von hartem Wasser kann die Nutzungsdauer verschiedener Haushaltsgeräte wie Kaffeemaschinen, Wasserkocher, Geschirrspül- und Waschmaschinen beeinträchtigen. Beeftink et al. (2021) und Godskesen et al. (2012) schätzen auf Basis einer dänischen Studie für Kaffeemaschine und Wasserkocher eine Verlängerung der Nutzungsdauer von 8 bei hartem Wasser auf 10 bzw. 12 Jahre bei mittlerem bzw. weichem Wasser. Für Geschirrspülmaschine und Waschmaschine wird eine Verlängerung jeweils von 10 auf 12,5 bzw. 15 Jahre angegeben.

Aufbauend auf den dort beschriebenen Zusammenhängen wird für die Berechnungen im Rahmen unterschiedlicher Szenarien ebenfalls eine Verlängerung der Nutzungsdauern durch eine Reduktion der Wasserhärte berücksichtigt. Dabei wird unterschieden zwischen der Nutzungsdauer von Kaffeemaschine und Wasserkocher auf 13 Jahre bei enthärtetem Wasser gegenüber 9 bzw. 10 Jahre bei nicht enthärtetem Wasser (Wasser B bzw. Wasser A). Für Waschmaschine und Geschirrspülmaschine ergibt sich aus dem Ansatz von Beeftink et al. (2021) und Godskesen et al. (2012) eine Verlängerung von 11 bzw. 12 Jahren auf 16 Jahre.

Zur Berücksichtigung der verlängerten Nutzungsdauern sind die für die Geräte notwendigen Materialien mit entsprechend längeren Zeiträumen zu verrechnen. In Tabelle 6 sind die verwendeten Nutzungsdauern, Materialmengen und die eingesetzten Ecoinvent-Module aufgelistet.

Tabelle 5: Nutzungsdauer der Küchengeräte und des Enthärters bei nicht enthärtetem bzw. enthärtetem Trinkwasser (in Jahre)

	Enthärter	**Kaffee-maschine**	**Wasser-kocher**	**Wasch-maschine**	**Geschirrspül-maschine**
	Jahre	**Jahre**	**Jahre**	**Jahre**	**Jahre**
nicht enthärtet Wasser A	-	9	9	11	11
nicht enthärtet Wasser B	-	10	10	12	12
enthärtet	15	13	13	16	16

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

Tabelle 6: Materialmengen und genutzte Ecoinvent-Module zur Berücksichtigung der Bauphasen bei der Bilanzierung verlängerter Nutzungsdauern von Küchengeräten (Angaben in kg)

	Ecoinvent-Modul[1]	**Kaffee-maschine**	**Wasser-kocher**	**Wasch-maschine**	**Geschirr-spül-maschine**
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		

[1] Ecoinvent-Version v.3.5., jeweils "market for" Datensätze.

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)

3.4.3 Dezentrale Enthärtungsanlage (Ionenaustauscher)

Ziel der Modellierung ist die Bewertung einer durchschnittlichen Enthärtungsanlage. Die verwendeten Eingangsparameter werden deshalb repräsentativ für die Anlagen der einbezogenen Hersteller und in Abstimmung mit den beteiligten Unternehmen festgelegt.

Der Ionenaustauscher wird folgendermaßen modelliert: Das Gerät wird von 3 Personen gemeinsam genutzt, enthärtet das Wasser auf 5°dH, hat einen Stromverbrauch von 43,8 kWh/Jahr (das entspricht einer Leistung von 5 Watt im Dauerbetrieb), einen Spülwasserverbrauch von 4 % bezogen auf die enthärtete Trinkwassermenge (Herstellerangaben; vgl. auch Angaben bei Hillenbrand et al., 2004) sowie einen Regenerationsmittel-Verbrauch von 1 kg NaCl pro 4 mol $CaCO_3$ (vgl. Anforderung der DIN EN 14743:2005+A1:2007). Eine Zudosierung sonstiger Chemikalien ist nach Herstellerangaben nicht notwendig.

Für Szenario-Rechnungen wird mit 6 Personen (bspw. Einsatz einer Anlage in einem Doppelhaus) und einem verringerten Stromverbrauch von 27,3 kWh pro Jahr gerechnet, einem Wert, der nach Herstellerangaben mit aktuell auf dem Markt verfügbaren, verbesserten Anlagen erreicht werden kann. Außerdem wird in Szenariobetrachtungen mit einem verringerten Regenerationsmittel-Verbrauch (1 kg NaCL pro 6 mol $CaCO_3$) gerechnet.

Für einen störungsfreien Betrieb der Geräte wird von Herstellerseite eine Wartung pro Jahr empfohlen. Um den damit verbundenen Aufwand in die Betrachtungen einzubeziehen, wurde auf Basis einer Erhebung bei den Herstellern pro Wartung mit einer An- und Abfahrt von im Durchschnitt 40 km mit einem PKW gerechnet. Für Szenario-Rechnungen wurden zusätzlich Werte von 27 km als Best Case und 58 km als Worst Case sowie der Einsatz eines Elektrofahrzeugs untersucht. Zur Modellierung der damit verbundenen Effekte werden die Ecoinvent-Module "market for transport, passenger car, EURO 5 [RER]" und "market for transport, passenger car, electric [GLO]" genutzt.

Zusätzlich wird der Einfluss der Bauphase des Gerätes berücksichtigt. Entsprechend Herstellerangaben wurden dazu die in Tabelle 7 aufgeführten Komponenten über die mit aufgeführten Ecoinvent-Module berücksichtigt:

Tabelle 7: 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

3.4.4 Abwasserentsorgung

Die Abwasserbehandlung wird über ein entsprechendes Modul aus der Ecoinvent-Datenbank modelliert ("treatment of wastewater, average, capacity 1.1E10l/year; Switzerland; wastewater, from residence"), in dem durchschnittliche Verhältnisse ausgehend von einer Anlage mit 71.100 angeschlossenen Einwohnerwerten (EW) beschrieben sind. Zur Anpassung an die aktuellen deutschen Verhältnisse wird für den spezifischen Strombedarf bei der Abwasserbehandlung ein Wert von 0,35 kWh pro m³ Rohwasser (vgl. Niederste-Hollenberg et al, 2021) verwendet.

3.4.5 Querschnittsmodule

Strom wird als Input für verschiedene Teilprozesse benötigt. Das entsprechende Querschnittsmodul bildet den aktuellen Strommix nach Fraunhofer ISE (2020) ab und setzt sich aus den in Tabelle 8 aufgeführten Modulen zusammen.

Als Szenario wird außerdem ein regenerativer Strommix, basierend auf Informationen des "National Renewable Energy Potential, 2050" nach UBA (2013) genutzt. Die entsprechende Zusammensetzung der Module ist ebenfalls in der Tabelle mit angegeben.

Tabelle 8: Überblick über die Zusammensetzung der verwendeten Stromerzeugungsmodule

Energie-quelle	Ecoinvent-Module	Prozent Anteil (%) (aktuell)	Prozent Anteil (%) (regenera-tiv)
Steinkohle	electricity production, hard coal [DE]	9 %	0 %
Braunkohle	electricity production, lignite [DE]	20 %	0 %
Gas	electricity production, natural gas, conventional power plant [DE]	10 %	0 %
Heizöl	electricity production, oil [DE]	0 %	0 %
Kernenergie	electricity production, nuclear, boiling water reactor [DE]	14 %	0 %
Lauf und Speicher-wasser	electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region [DE]	4 %	2 %
Onshore Windkraft	electricity production, wind, >3MW turbine, onshore [DE]	20 %	66 %
Offshore Windkraft	electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore [DE]	5 %	12 %
PV	electricity production, solar tower power plant, 20 MW [ES]	9 %	16 %
Biomasse	heat and power cogeneration, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 [DE]	9 %	2 %
Sonstige Brennstoffe	electricity production, deep ge-othermal [DE]	1 %	3 %

Quelle: Auswertung nach ISE (2020) und UBA (2013)

3.4.6 Datenqualität

Die Daten zu den einzelnen Prozessstufen stammen aus unterschiedlichen Quellen (Literatur, Erhebungen bei den Herstellern, eigene Abschätzungen), die jeweils dokumentiert sind. Bislang liegen keine umfassenden Messungen zu den Effekten der Anwendung dezentraler Enthärtungsanlagen in Haushalten vor, so dass sich die Daten bspw. zum verringerten Verbrauch von Wasch- und Reinigungsmittel oder zur verbesserten Effizienz bei der Energieübertragung auf grundsätzliche Überlegungen (z. B. Dosierempfehlungen der Hersteller) stützen, die allerdings in der Tendenz durch die durchgeführte Befragung jeweils bestätigt wurden. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen wurde der Einfluss der wesentlichen Input-Faktoren genauer untersucht.

Für die darauf aufbauende ökologische Bewertung mit der Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Prozesse wurden im Wesentlichen die über die Software UMBERTO zur Verfügung stehenden Standard-Module der Ecoinvent-Datenbank genutzt, die bei entsprechenden Aufgabenstellungen in der Regel verwendet werden.

3.5 Berechnungen und Szenarien

Die wichtigsten Input-Parameter zur ökologischen Bewertung sind in Tabelle 9 aufgelistet. Für besonders wichtige Parameter oder zur Abbildung des Einflusses möglicher künftiger Entwicklungen sind zum Teil Sensitivitätsanalysen sinnvoll. Die dazu ausgewählten Parameter und Daten sind ebenfalls in der Tabelle mit aufgeführt.

Tabelle 9: Überblick über wichtige Input-Parameter der Berechnungen

Parameter	Referenz-szenario	Enthärtungs-szenario	ggf. Sensitivi-tätsanalysen (Bandbreiten, etc.)	An-merkun-gen
Härtegrad des Trink-wassers	Wasser A (HB 4)	5 °dH	Wasser B (HB 3)	
Personen pro Anlage	3	3	6	6 Personen für Bsp. Anwen-dungsfall Dop-pelhaus
Warmwasserberei-tung	zentrale Warmwas-ser-bereitung mit Gas	wie Ref.sz.	dezentrale Durch-lauferhitzer mit Strom	in Deutsch-land gän-gi-gste Ver-fah-ren

Strommix	aktuell	aktuell	regenerativ (für Enthärter)	
Enthärtungsanlage a) Spülwasserbedarf b) Strombedarf c) Salzbedarf d) Wartung - Distanz e) Wartung - Autotyp	-	a) 4 % b) 43,8 kWh/a c) 4 mol $CaCO_3$/kg NaCl d) 40 km e) konventionell	a) - b) 27,3 kWh/a c) 6 mol $CaCO_3$/kg NaCl d) 27 km/58 km e) E-Auto	betrifft nur Enthär-tungsszenarien
Materialaufwand in der Bauphase	für Kaffee-maschine, Wasserkocher, Wasch- und Geschirrspülmaschine	wie Ref.sz, zusätzlich für Enthärtungsanlage	ohne Bauphase Haushaltsgeräte	

Quelle: Eigene Darstellung

Daraus ergeben sich die in Tabelle 10 gezeigten Szenarien. Als Ausgangsszenarien dienen dabei die Szenarien "Ref" (Referenzszenario - Verwendung des nicht enthärteten Wassers) und "enthärtet" (Standard-Enthärtungsszenario).

Tabelle 10: Input-Parameter der untersuchten Szenarien - (Ref = Referenzszenario, enthärtet = Enthärtungs-szenario)

Parameter	Ref	Was-ser B	DH	ohne Bau	ent-härtet	+Was -ser B	+DH	+ 6	+ UBA (F)	+ ohne Bau	best Sz.
Enthärtung	keine	keine	keine	keine	E	E	E	E	E	E	E
Wasser Typ	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
Warmwas-ser An-lage	ZW	ZW	DH	ZW	ZW	ZW	DH	ZW	ZW	ZW	ZW
Energie-quelle Warmwas-ser	Gas	Gas	Strom	Gas	Gas	Gas	Strom	Gas	Gas	Gas	Gas
Back-ground Strom Mix	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE	ISE
Fore-ground 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
Ionenaus-tauscher Regene-riersalz (mol $CaCO_3$/kg NaCl)	ohne	ohne	ohne	ohne	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	4 mol	6 mol
jährliche Strombe-darf	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

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)

Bauphase A: Wasserkocher, Kaffeemaschine, Enthärtungsanlage (bei Enthärtungsszenarien)

Bauphase B: Waschmaschine, Geschirrspülmaschine

Quelle: Eigene Darstellung

3.6 Ergebnisse

3.6.1 Ergebnisse der Ausgangsszenarien

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse der Ausgangsszenarien (Wasser A, normal verschmutzte Wäsche, aktueller Strommix, zentrale Warmwasserbereitung, 3 Personen pro Anlage, Berücksichtigung des Materialienaufwands in der Bauphase für Enthärter und Haushaltsgeräte, etc. sowohl für den Referenz-Fall, wie für den Enthärtungsfall dargestellt.

Die Ergebnisse für die Wirkungskategorie GWP (Treibhausgaspotenzial) zeigen insgesamt einen leichten Vorteil für das Enthärtungsszenario - für die einbezogenen Prozesse ergibt sich eine Verringerung der entstehenden CO_2-Äquivalente um 8 % gegenüber dem Referenzszenario (s. Abbildung 20). 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 Bauphase in geringem Umfang der Vorteil des Enthärtungsszenarios.

Bei der Wirkungskategorie Eutrophierung wird unterschieden 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. Europäische Kommission, 2012, S. 12/13). Die hier relevanten Umwelteinträge werden 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 verringerte Effizienz bei der Warmwassererzeugung weniger stark zu Buche schlagen.

Hinsichtlich der Kategorie "Versauerung" gibt es in Summe keinen nennenswerten Unterschied der beiden Ausgangsszenarien.

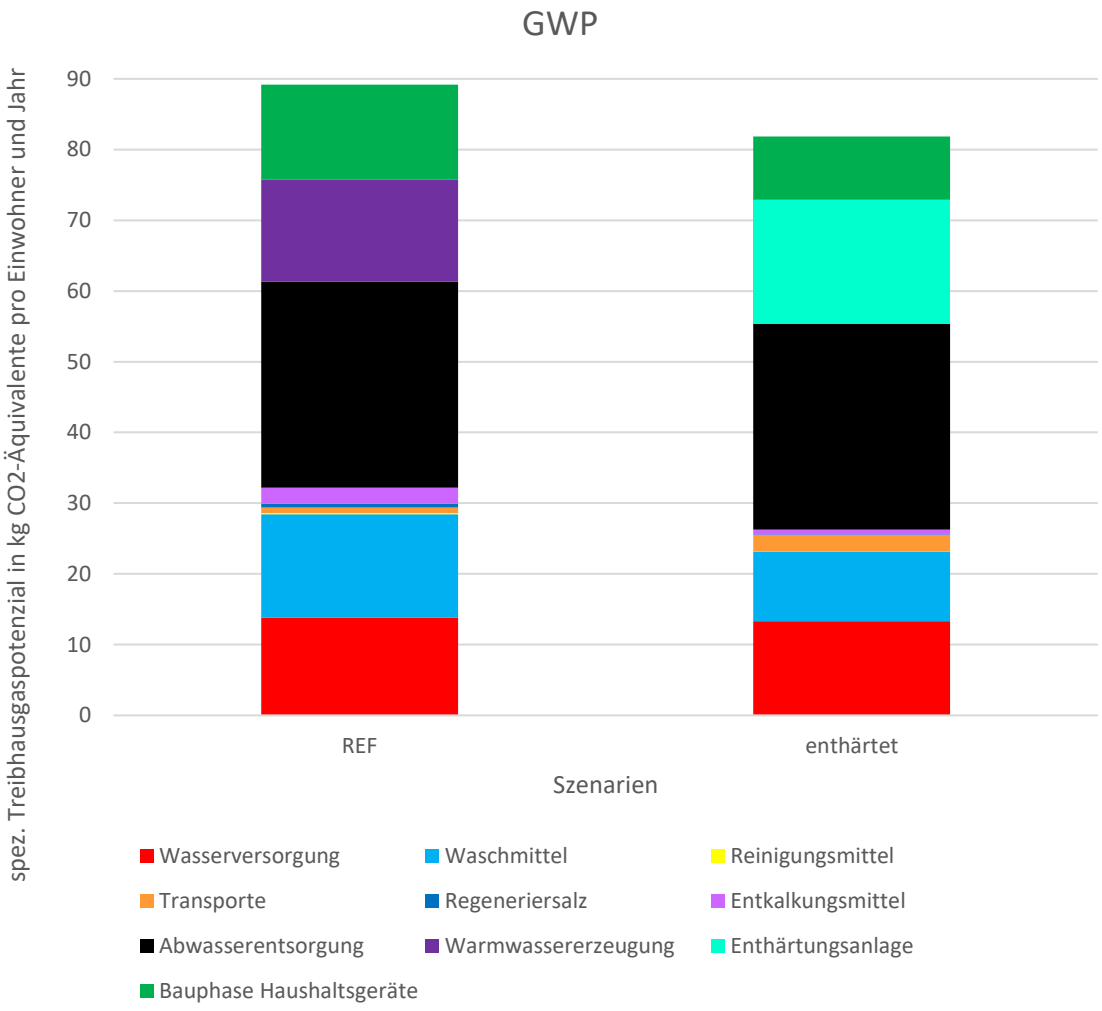
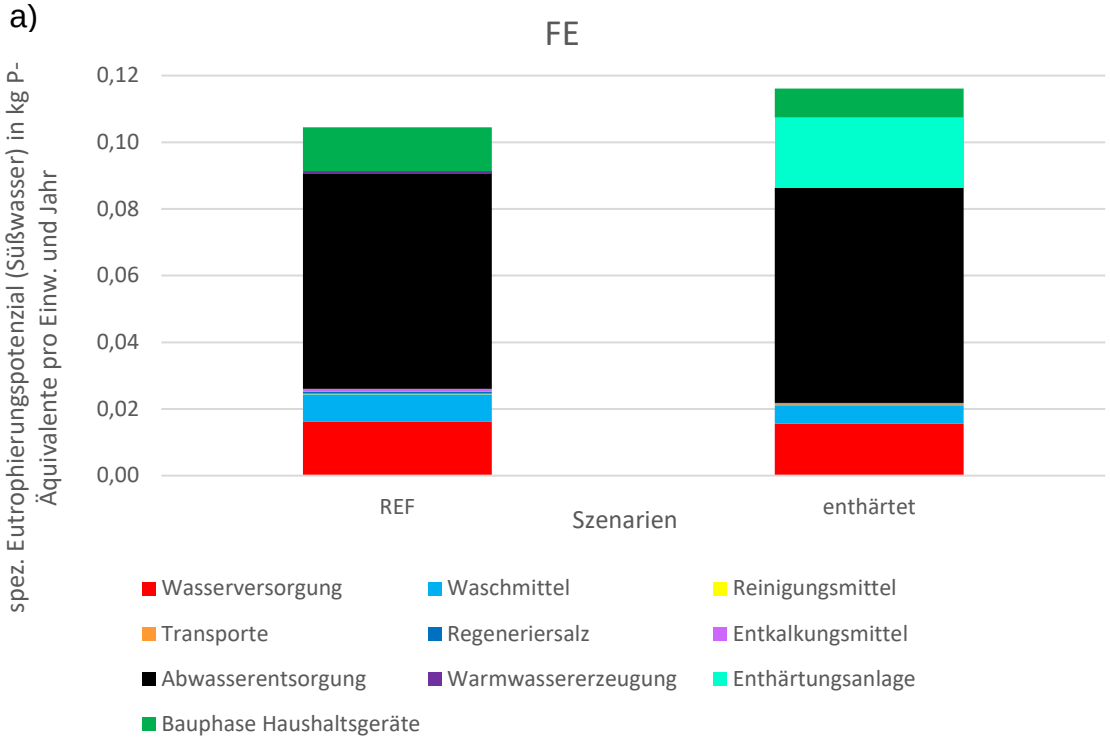


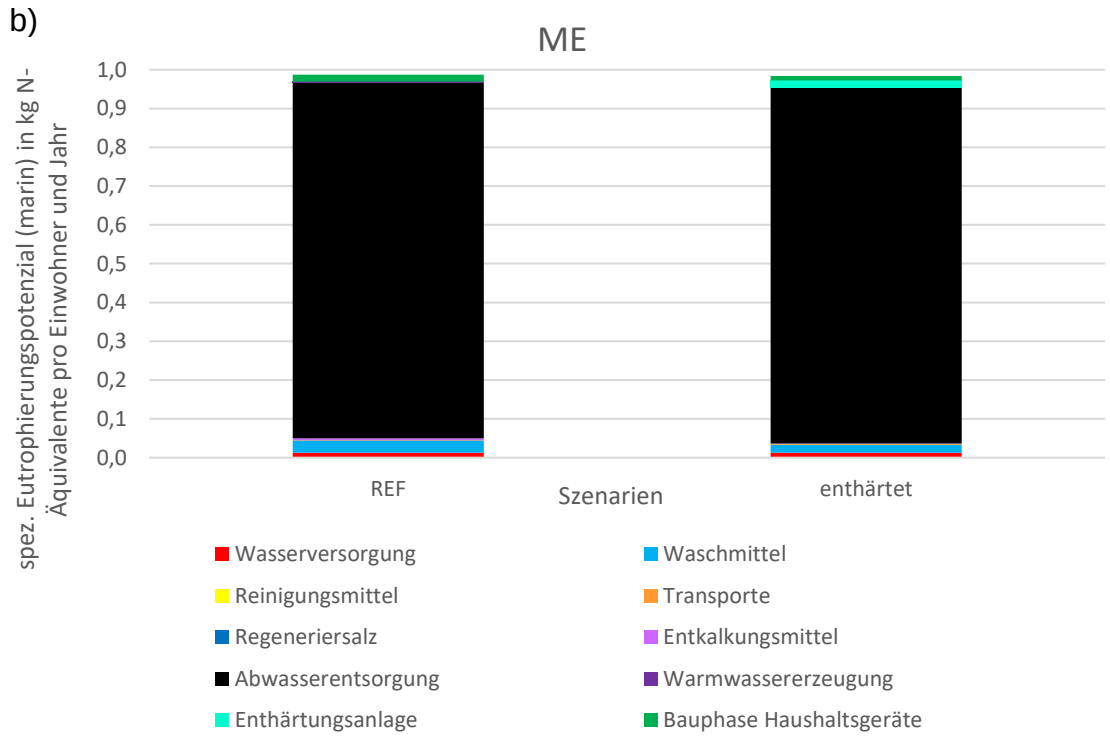
Abbildung 20: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (GWP).

Quelle: Eigene Darstellung

a)


FE
spez. Eutrophierungspotenzial (Süßwasser) in kg P-Äquivalente pro Einw. und Jahr
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
REF
enthärtet
Szenarien
Wasserversorgung
Waschmittel
Reinigungsmittel
Transporte
Regeneriersalz
Entkalkungsmittel
Abwasserentsorgung
Warmwassererzeugung
Enthärtungsanlage
Bauphase Haushaltsgeräte

b)


ME
spez. Eutrophierungspotenzial (marin) in kg N-Äquivalente pro Einwohner und Jahr
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
REF
enthärtet
Szenarien
Wasserversorgung
Waschmittel
Reinigungsmittel
Transporte
Regeneriersalz
Entkalkungsmittel
Abwasserentsorgung
Warmwassererzeugung
Enthärtungsanlage
Bauphase Haushaltsgeräte

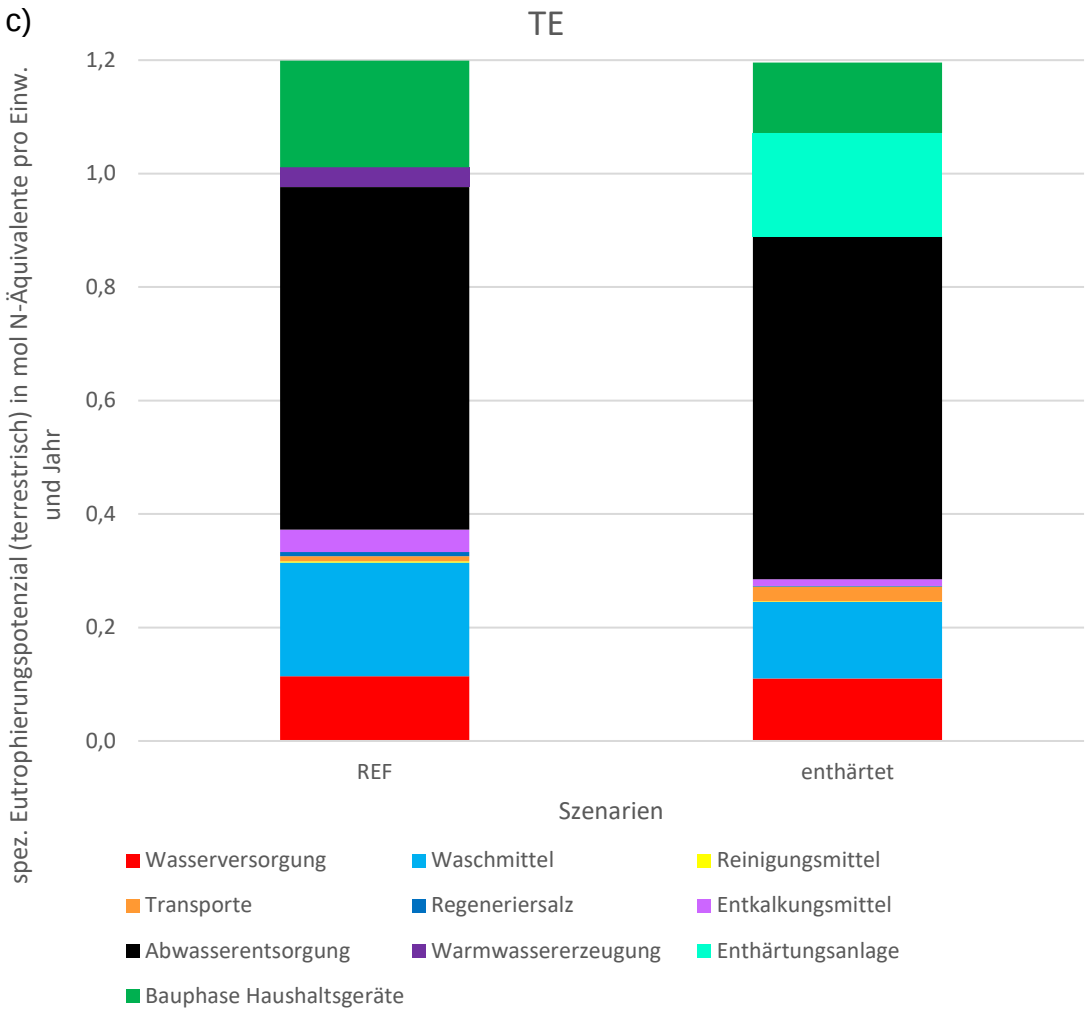


Abbildung 21: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial - unterteilt in a) aquatische (Süßwasser (FE) und b) marin (ME)) und c) terrestrische (TE) Eutrophierung.

Quelle: Eigene Darstellung

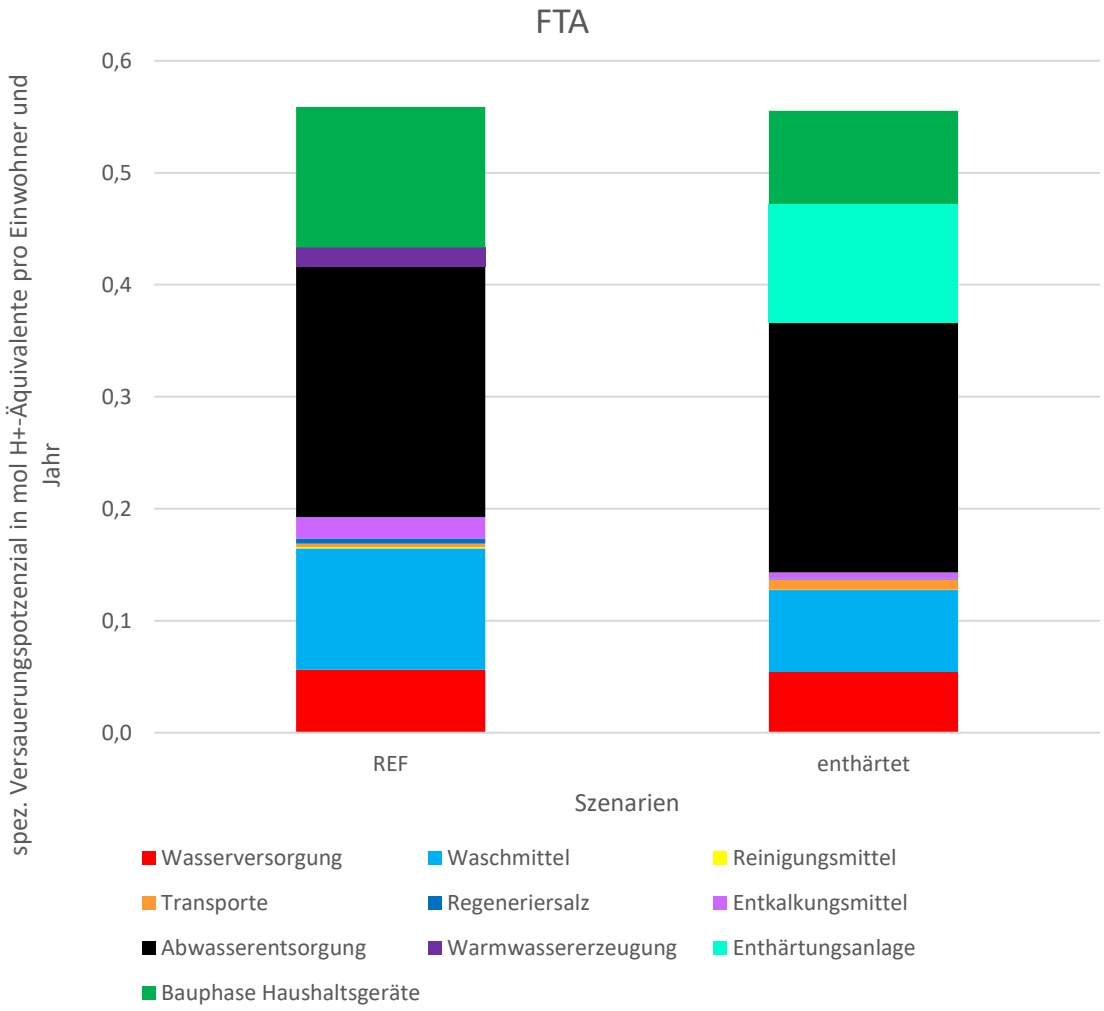


Abbildung 22: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial (freshwater and terrestrial acidification - FTA).

Quelle: Eigene Darstellung

3.6.2 Ergebnisse der weitergehenden Szenario-Analysen

Aufgrund der besonderen Bedeutung der Wirkungskategorie GWP und der geringen Unterschiede bei den anderen betrachteten Wirkungskategorien, wird für die Auswertung der weitergehenden Szenario-Analysen im Wesentlichen auf die Ergebnisse zu dieser Kategorie zurückgegriffen (s. Abbildung 23). Folgende Aspekte kennzeichnen die in den Abbildungen gezeigten Szenarien:

- REF: Referenzszenario (Wasser A),
- Wasser B: Szenario mit Wasser B,
- DH: Warmwassererzeugung mit elektrisch betriebenem Durchlauferhitzer,
- Bau A: Berücksichtigung des zusätzlichen Materialienaufwands in der Bauphase im Referenzfall nur für Wasserkocher und Kaffeemaschine,

- ohne Bau: keine Berücksichtigung des zusätzlichen Materialienaufwands in der Bauphase bei Haushaltsgeräten und Ionenaustauscher.

Bei den Enthärtungsszenarien ist zusätzlich zu unterscheiden:

- enthärtet: Ausgangsszenario mit Enthärtung,
- +6: Nutzung der Enthärtungsanlage durch 6 Personen,
- + UBA (F): Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom für den im Vordergrund stehenden Betrieb des Enthärters,
- Best Case: Optimierte Bedingungen für den Einsatz der Enthärtungsanlage (27,3 kWh als jährlicher Strombedarf, Wartung mit einem Elektroauto, Entfernung Wartung 8,4 km, geringer Salzbedarf). Ohne Berücksichtigung des Materialaufwands in der Bauphase.

Die wichtigsten Ergebnisse der Szenarienbetrachtungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Fall von Wasser B mit geringerer Gesamthärte (Härtebereich 3) ist die Vorteilhaftigkeit des Enthärtungsszenarios um etwa die Hälfte reduziert.
- 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 gleich auf.
- Wird der Materialien-Aufwand 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 6 Nutzern pro Enthärtungsanlage verringert die spezifischen GWP-Emissionen gegenüber dem ursprünglichen Enthärtungsszenario um etwa 13 %.

  Wird für den Enthärter regenerativ erzeugter Strom eingesetzt ("UBA (F)"), verringern sich die spezifischen GWP-Emissionen um 7 % gegenüber dem Ausgangsszenario für die Enthärtung.
- Im Best-Case-Enthärtungsszenario ergibt sich - insbesondere durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, den reduzierten Strombedarf des Enthärters und die Nutzung eines Elektroautos bei der Wartung - eine deutliche Verringerung der direkt durch den Ionenaustauscher/Enthärter verursachten GWP-Emissionen (roter Teilbereich) um ca. 57 % (bzw. für den gesamten betrachteten Stoffffluss um ca. 14 %).

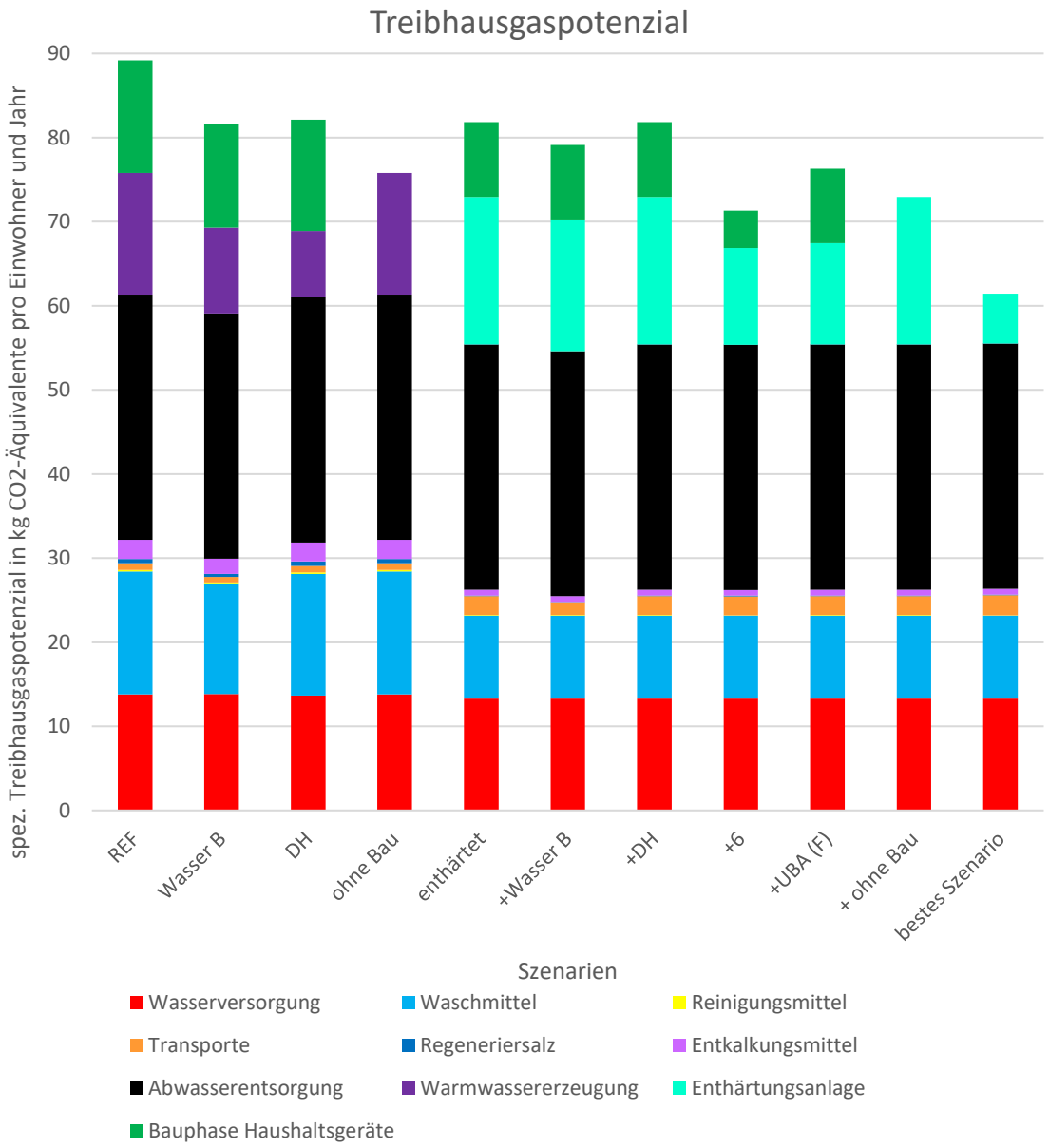


Abbildung 23: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (GWP).

REF: Referenzszenario

DH: mit Durchlauferhitzer

Bau A: nur Wasserkocher + Kaffeemaschine

ohne Bau: ohne Bauphase

enthärtet: Ausgangsszenario mit Enthärtung

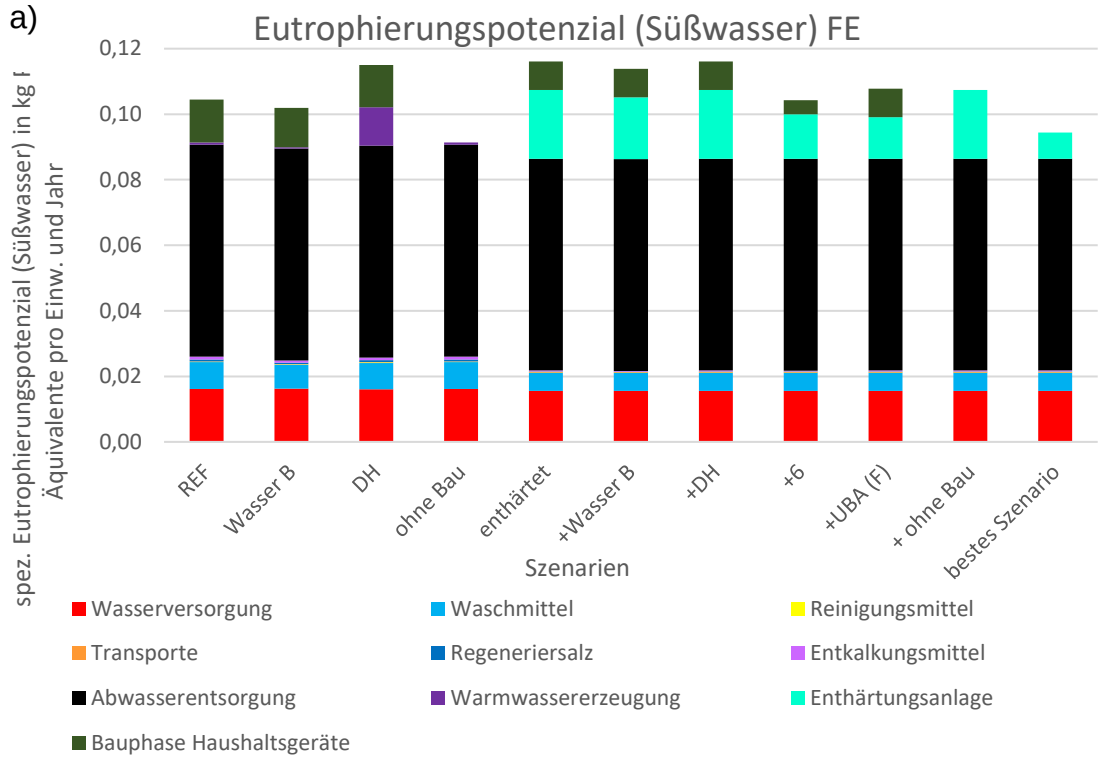
+6: Nutzung durch 6 Personen

+ UBA (F): Ökostrom für Enthärter

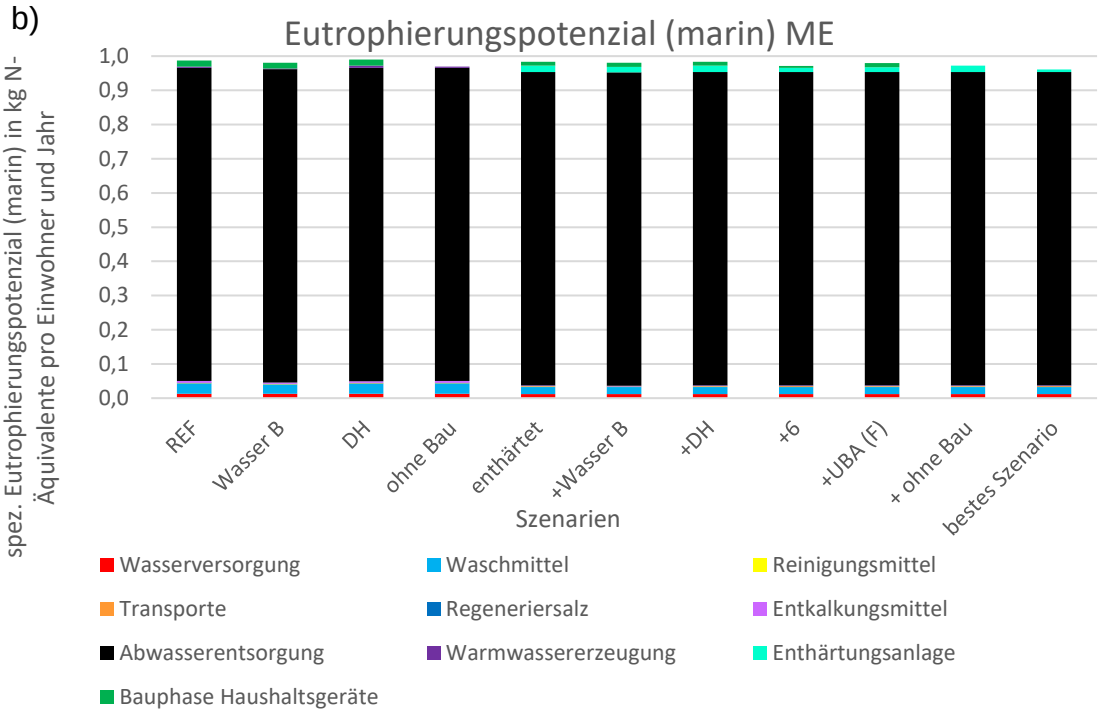
Best Case: 27,3 kWh als jährlicher Strombedarf, Wartung mit einem Elektroauto, Entfernung Wartung 8,4 km, geringer Salzbedarf, ohne Bauphase

Quelle: Eigene Darstellung

a)


Eutrophierungspotenzial (Süßwasser) FE
spez. Eutrophierungspotenzial (Süßwasser) in kg P-Äquivalente pro Einw. und Jahr
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
REF
Wasser B
DH
ohne Bau
enthärtet
+Wasser B
+DH
+6
+UBA (F)
+ ohne Bau
bestes Szenario
Szenarien
Wasserversorgung
Waschmittel
Reinigungsmittel
Transporte
Regeneriersalz
Entkalkungsmittel
Abwasserentsorgung
Warmwassererzeugung
Enthärtungsanlage
Bauphase Haushaltsgeräte

b)


Eutrophierungspotenzial (marin) ME
spez. Eutrophierungspotenzial (marin) in kg N-Äquivalente pro Einwohner und Jahr
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
REF
Wasser B
DH
ohne Bau
enthärtet
+Wasser B
+DH
+6
+UBA (F)
+ ohne Bau
bestes Szenario
Szenarien
Wasserversorgung
Waschmittel
Reinigungsmittel
Transporte
Regeneriersalz
Entkalkungsmittel
Abwasserentsorgung
Warmwassererzeugung
Enthärtungsanlage
Bauphase Haushaltsgeräte

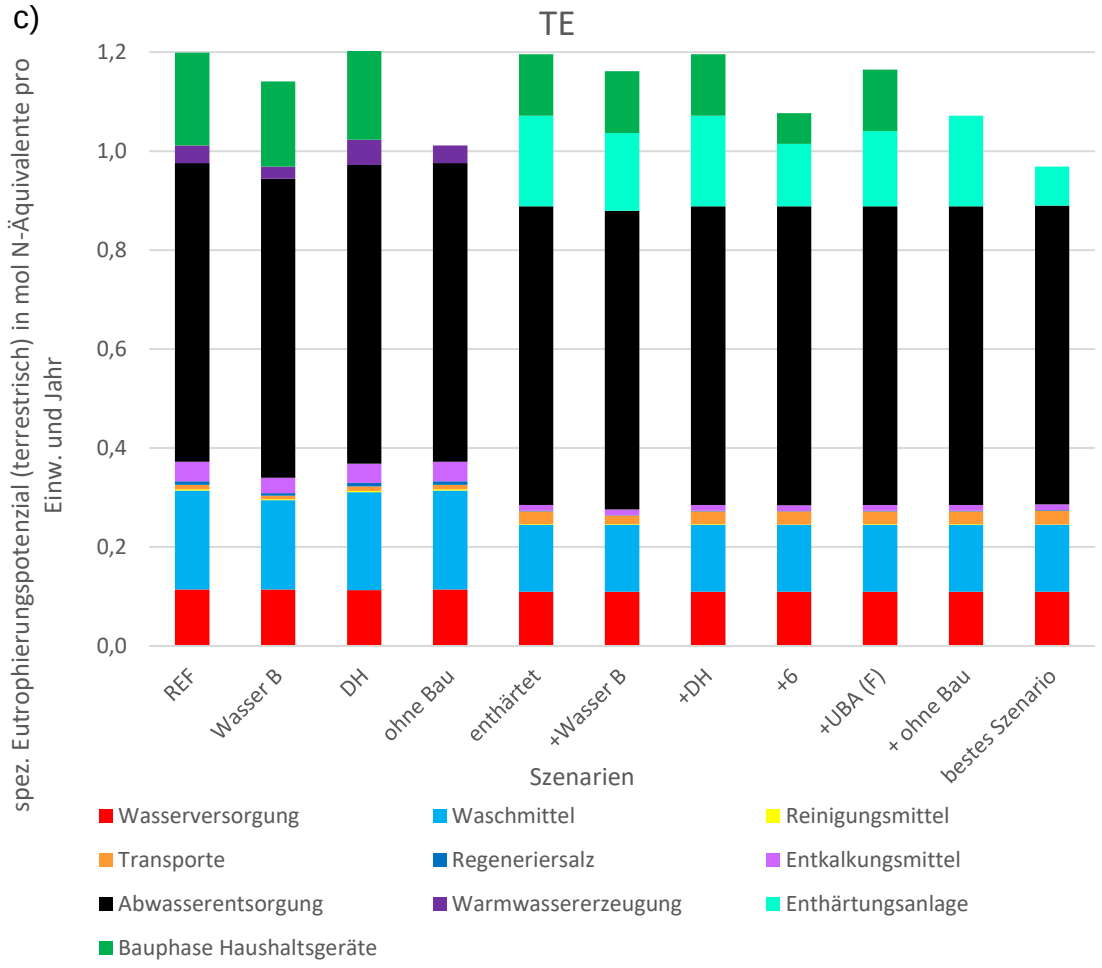


Abbildung 24: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial - unterteilt in aquatische Eutrophierung – a) Frischwasser (FET) und b) marin (MET) - und c) terrestrische (TE) Eutrophierung.

Quelle: Eigene Darstellung

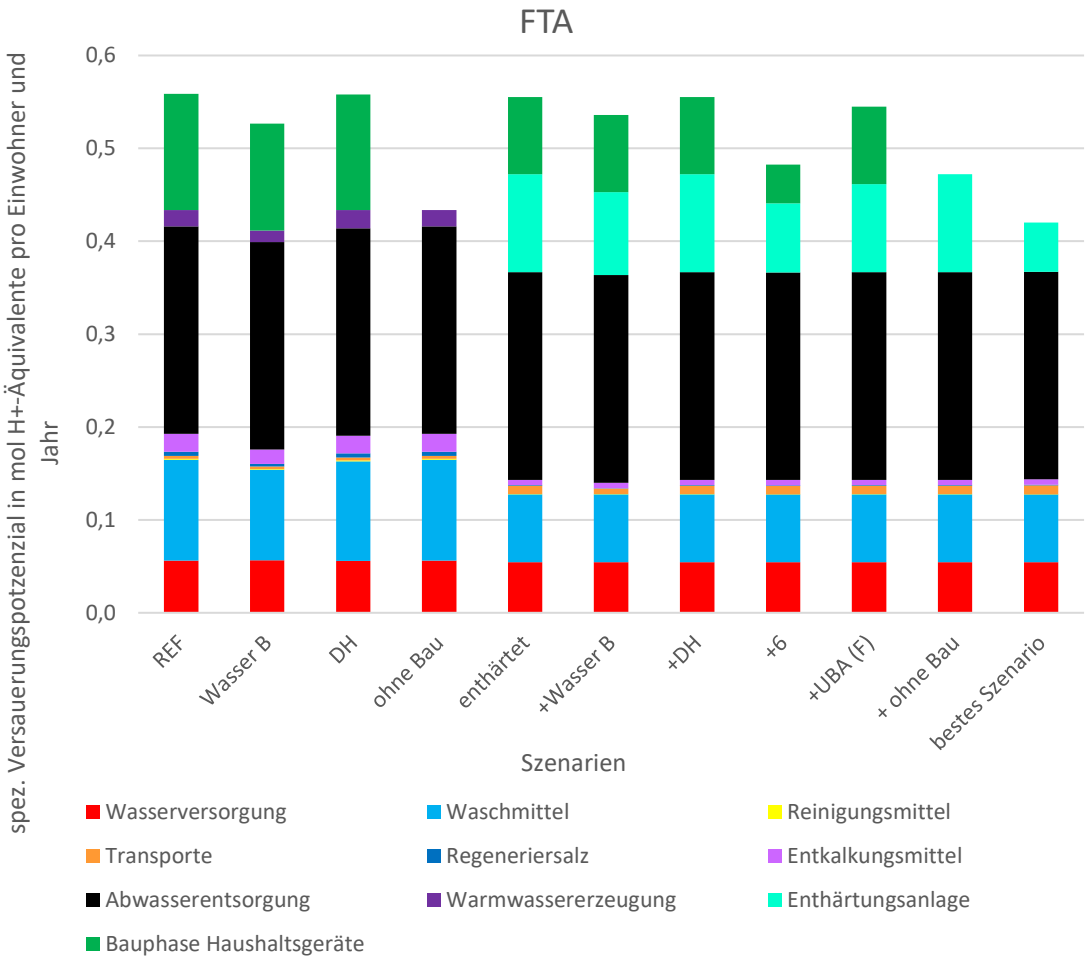


Abbildung 25: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial (FTA).

Quelle: Eigene Darstellung

3.6.3 Zusätzliche Aspekte: ökotoxikologisch relevante Emissionen

Wie beschrieben, kann der Härtegrad des Trinkwassers einen deutlichen Einfluss auf die im Haushalt verwendeten Wasch- und Reinigungsmittel haben. Grundsätzlich enthalten Wasch- und Reinigungsmittel eine große Vielzahl unterschiedlicher Stoffe, die teilweise nicht leicht oder nicht vollständig biologisch abbaubar sind, Gewässerorganismen schädigen oder sich in der Umwelt anreichern können. Auch wenn seitens der Hersteller der Wasch- und Reinigungsmittel ökologische Aspekte bei der Auswahl der Inhaltsstoffe dieser Mittel inzwischen eine wesentliche Rolle spielen, haben diese Mittel einen wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffbelastungen der Gewässer.

Bei den Waschmittelinhaltsstoffen kann unterschieden werden zwischen Tensiden, Bleichmittel, Enzymen, Farbübertragungsinhibitoren und optischen Aufhellern und variieren je nach Waschmitteltyp (z. B. Voll-, Color-, Fein-, Woll- oder Spezialwaschmittel) und Hersteller in ihrer Zusammensetzung und Konzentration.

Von Seiten des IKW (2021) werden regelmäßig Erhebungen zu den wichtigsten Inhaltsstoffen von Waschmitteln durchgeführt. Dabei werden Einsatzmengen der organischen Stoffen und Stoffgruppen, die pauschal als persistent, d. h. schwer abbaubar, bezeichnet werden (englisch: Poorly Biodegradable Organics – PBO) separat ausgewiesen. Darunter fallen Carboxymethylcellulose, Farbmittel, Farbübertragungsinhibitoren, Paraffine, Parfümöle/Duftstoffe, Phosphonate, Polycarboxylate oder auch Silikone. Die Menge der PBO, die in abwassergängigen Produktgruppen eingesetzt wurde, lag 2017 bei 30.900 Tonnen, ihr Anteil an der Gesamteinsatzmenge der wichtigsten Inhaltsstoffe bzw. -gruppen lag bei 5,9 %.

Als Beispiel einer aus Gewässerschutzgründen wichtigen, in Wasch- und Reinigungsmittel eingesetzten Stoffgruppe sind die Benzotriazole zu nennen. Im Rahmen der Spurenstoffstrategie des Bundes wurde aus dieser Stoffgruppe die Verbindung 1H-Benzotriazol genauer betrachtet und vorliegende Untersuchungen ausgewertet.[2] Danach wird 1H-Benzotriazol in deutschen Oberflächengewässern regelmäßig im µg/L-Bereich nachgewiesen mit Spitzenwerten von bis zu 11 µg/L. Auch im Grundwasser waren Konzentrationen an 1H-Benzotriazol von bis zu 1,54 µg/L nachweisbar. Der Stoff wird als persistent und mobil gemäß den verwendeten Kriterien eingestuft. Insgesamt wird der Stoff deshalb als relevanter Spurenstoff bewertet. Aktuell erarbeitet ein Runder Tisch Maßnahmen zur Verringerung der Gewässerbelastungen. Ein wichtiger Eintragspfad für die Stoffgruppe der Benzotriazole stellt ihre Verwendung im Bereich der Geschirrspülmittel dar. Eine IKW-Erhebung für das Berichtsjahr 2019 ergab eine Einsatzmenge an Benzotriazolen in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelprodukten von 76 Tonnen (IKW, 2021, S. 24).

Zu den hochpolaren, somit sehr mobilen und persistenten Spurenstoffen, die eine hohe Umweltrelevanz aufweisen, gehört auch der Entkalker Sulfamidsäure bzw. Amidosulfonsäure, der zum Teil in zweistelligen Mikrogrammkonzentrationen in Fließgewässern gefunden wird.

Vor diesem Hintergrund der mit der Nutzung von Wasch- und Reinigungsmittel grundsätzlich verbundenen Umweltbelastung gilt die Zielsetzung aus ökologischen Gründen diese Mittel effizient zu nutzen und ihren Verbrauch möglichst gering zu halten.[3]

---

2 Siehe https://www.dialog-spurenstoffstrategie.de/spurenstoffe-wAssets/docs/Checkliste-Relevanzbewertung-1H-Benzotriazol.pdf.

3 Aktuell werden etwa 553.000 Tonnen Waschmittel jährlich in Deutschland verbraucht. Umgerechnet verbraucht jeder Einwohner ca. 7 Kilogramm Waschmittel im Jahr. Hinzukommen u. a. Weichspüler inkl. Waschadditive (ca. 332.000 Tonnen pro Jahr) und Maschinengeschirrspülmittel (ca. 176.000 Tonnen pro Jahr) (IKW, 2021).

Eine detaillierte Modellierung und Bewertung dieser stofflichen Einträge in die Umwelt ist allerdings im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Zum einen da die Zusammensetzung der Wasch- und Reinigungsmittel auf der Ebene der Einzelstoffe, die hier zu betrachten wären, nicht bekannt ist. Zum anderen da die Methoden für die Bewertung der Emissionen aufgrund der Vielzahl an Einzelstoffen, der Komplexität der Reaktions- und Abbaupfade und der starken Standorteinflüsse auf der Ebene einer solchen ökobilanziellen Betrachtung nicht in ausreichender Qualität vorliegen, auch wenn in den letzten Jahren dazu erhebliche Fortschritte erzielt werden konnten (vgl. Entwicklung des Modells "USEtox" https://usetox.org/).

Trotz dieser Einschränkungen ist es grundsätzlich von hoher Bedeutung, dass durch eine Reduktion der Wasch- und Reinigungsmittel (bei den Waschmitteln nach den oben beschriebenen Abschätzungen um ca. 30 %) auch eine deutliche Reduktion der Gewässerbelastungen erreicht wird. Voraussetzung dafür ist, dass die Anleitungen zur verringerten Dosierung der Mittel bei weicherem Wasser von den Nutzern auch umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang kann der Einsatz von dezentralen Enthärtungsanlagen eine wichtige Rolle spielen.

3.7 Zusammenfassung und Diskussion

Die Nutzung von hartem Wasser in Haushalten kann mit deutlichen Nachteilen verbunden sein. Kalk bzw. Kalkablagerungen erhöhen den Putz- und Reinigungsaufwand und können damit verbunden den Verbrauch an Entkalkungs-, Reinigungs- und Waschmittel erhöhen. Kalk bzw. Kalkablagerungen können zudem die Effizienz bei der Warmwasserbereitung und auch die Nutzungsdauern von Haushaltsgeräten (insbesondere Wasserkocher, Kaffeemaschine, Geschirrspül- oder auch Waschmaschine) beeinträchtigen. Um diesen Nachteilen zu begegnen ist eine zentrale Enthärtung im Wasserwerk möglich - die dazu notwendigen Entscheidungsprozesse sind jedoch von den einzelnen Verbrauchern nur sehr eingeschränkt zu beeinflussen. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung von dezentralen Enthärtungsanlagen, die von den einzelnen Haushalten zu betreiben sind. In beiden Fällen ist die Wasserenthärtung mit Aufwand verbunden, der in Relation zu den möglichen Verbesserungen bei der Wassernutzung zu setzen ist. In dieser Studie wird der Einsatz von Ionenaustauschern als dezentrale Enthärtungsanlagen betrachtet.

Die notwendigen Daten für eine ökologische Bewertung unterschiedlicher Szenarien zum Einsatz von hartem oder enthärtetem Wasser im Haushalt stammen aus unterschiedlichen Literaturquellen, aus Expertengesprächen sowie eigenen Berechnungen und Abschätzungen. Detaillierte Feldstudien zum Einsatz entsprechender Anlagen (vorher-nachher-Vergleiche oder Parallelerhebungen in vergleichbaren Haushalten

mit nichtenthärtetem und enthärtetem Wasser) liegen nicht vor. Vor diesem Hintergrund wurden die in Abstimmung mit Literaturangaben getroffenen Abschätzungen über eine zusätzliche Befragung von Haushalten abgesichert.

Methodisch wurde eine Herangehensweise in Anlehnung an die normierte Ökobilanzmethode gewählt. In einem zusätzlichen Schritt wurden die Effekte hinsichtlich des Gewässerschutzes betrachtet.

Die Ergebnisse des ökologischen Vergleichs zeigen, dass unter den betrachteten Randbedingungen die dezentrale Enthärtung des Trinkwassers mit leichten ökologischen Vorteilen verbunden ist, wenn der Betreiber das Einsparpotenzial z.B. an Wasch- und Reinigungsmitteln oder Entkalkungsmitteln nutzt (siehe Seiten 31 und 32). Auf Basis der Ökobilanz-Methodik und der damit gut zu erfassenden Wirkungskategorien sind dabei insbesondere die Auswirkungen bei den emittierten Treibhausgasemissionen zu betrachten. 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 Treibhausgasemissionen. Die Szenarien beinhalteten z.B. die Nutzerzahl pro Anlage, Betriebsdaten der Anlage, Berücksichtigung der Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten, Einfluss Strommix.

Im Verhältnis zu den durchschnittlichen Treibhausgas-Gesamtemissionen pro Person in Europa sind die dadurch erreichbaren Verbesserungen (d.h. die Unterschiede zwischen den Szenarien) allerdings mit 0,1 % vergleichsweise gering.

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 Treibhausgasemissionen, 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.

Auch wenn sich die Zusammensetzung von Wasch- und Reinigungsmitteln in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert hat und die Umwelteigenschaften verbessert wurden, sind immer noch Stoffe enthalten, die im Rahmen einer auf kommunalen Kläranlagen gängigen Abwasserbehandlung nur teilweise abgebaut werden können. Die verbleibende Restbelastung wird in die Gewässer eingeleitet, kann dort als Spurenstoff oder Mikroverunreinigung nachgewiesen werden (siehe das Beispiel Benzotriazol) und

kann bereits in sehr niedrigen Konzentrationen nachteilige Wirkungen auf die aquatischen Ökosysteme haben, ggf. auch die Gewinnung von Trinkwasser aus dem Rohwasser negativ beeinflussen.

Die nach den Herstellerangaben mögliche spezifische Reduktion der eingesetzten Wasch- und Reinigungsmittelmengen durch die Enthärtung liegt bei bis zu 30 %. Dieser hohe Anteil weist auf ein beträchtliches Umweltentlastungs- bzw. konkreter Gewässerschutzpotenzial für Gebiete mit hartem Trinkwasser hin, sofern die Verbraucher dieses Reduktionspotenzial bei der Dosierung und Nutzung von Wasch- und Reinigungsmittel auch tatsächlich nutzen. Wesentliche Voraussetzung für die Realisierung entsprechender ökologischer Vorteile ist somit ein Nutzerverhalten, dass die durch die Enthärtung möglichen Einsparungen bei Wasch- und Reinigungsmittel auch tatsächlich realisiert (entsprechend den allgemeinen Dosieranleitungen der Hersteller). Die Ergebnisse der durchgeführten Befragung der Nutzer zeigen, dass dies in geringem Maße geschieht, aber noch nicht das gesamte Potential realisiert wird.

Für die Hersteller der Enthärtungsanlagen zeigen die Untersuchungen, dass der Betriebs- und Wartungsaufwand eine wichtige Rolle hinsichtlich der ökologischen Bewertung spielt. Ökologische Optimierungen sind bspw. durch den Anschluss einer möglichst hohen Nutzerzahl pro Anlage, eine Optimierung des Salz- und Energiebedarfs und 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.

4 Anhang:

4.1 Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Parameter der zwei ausgewählten Wässer 22

Tabelle 2: Typische Beispielrezeptur eines Voll- und Colorwaschmittels nach Henkel AG & Co. KGaA, zitiert in IKW (2020) (Gehaltsangaben in %) 29

Tabelle 3: Waschmittel-Komponenten und die zur Modellierung genutzten Ecoinvent-Module 30

Tabelle 4: Verwendete Ecoinvent-Module zur Bilanzierung des Reinigungsmittelverbrauchs 31

Tabelle 5: Nutzungsdauer der Küchengeräte und des Enthärters bei nicht enthärtetem bzw. enthärtetem Trinkwasser (in Jahre) 34

Tabelle 6: Materialmengen und genutzte Ecoinvent-Module zur Berücksichtigung der Bauphasen bei der Bilanzierung verlängerter Nutzungsdauern von Küchengeräten (Angaben in kg) 34

Tabelle 7: Materialien Bauphase Enthärter 36

Tabelle 8: Überblick über die Zusammensetzung der verwendeten Stromerzeugungsmodule 37

Tabelle 9: Überblick über wichtige Input-Parameter der Berechnungen 38

Tabelle 10: Input-Parameter der untersuchten Szenarien - (Ref = Referenzszenario, enthärtet = Enthärtungsszenario) 40

4.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematischer Aufbau eines Ionenaustauscherharzes. 5

Abbildung 2: Schematischer Ablauf der a) Enthärtung sowie b) Regeneration in einer Enthärtungsanlage. 6

Abbildung 3: Produktzertifikat-Logo der DVGW CERT GmbH. 7

Abbildung 4: a) Wohnflächen und b) entsprechende Wasserverbrauchsmengen der untersuchten Haushalte. 8

Abbildung 5: a) Anzahl der Haushaltsangehörigen sowie deren tägliche Abwesenheiten b) ganz- und c) halbtägig. 9

Abbildung 6: Wasserhärtenverteilung der untersuchten Haushalte. 9

Abbildung 7: Bewertung der Trinkwasser-/Leitungswasserqualität nach Befragung aller Haushalte. 10

Anhang:

Abbildung 8 Verwendung des Leitungswassers sowie Informationen zum Kalkverhalten nach Befragung aller Haushalte..... 11

Abbildung 9: Veränderung der Trinkwasserqualität durch Anschaffung der Enthärtungsanlagen nach Befragung aller Haushalte. 12

Abbildung 10: Exemplarische Entnahmestellen vor und nach der Enthärtungsanlage. 13

Abbildung 11: Mittelwert der Trinkwasserhärte vor und nach der Enthärtungsanlage. 14

Abbildung 12: Mittlere Veränderung der Konzentrationen an Ca2+, Mg2+ und Na+-Ionen vor und nach der Enthärtungsanlage. SKALA Y..... 14

Abbildung 13: Mittlere Veränderungen der Chlorid-, Nitrat-, Sulfat-, ortho-Phosphat und TOC-Konzentrationen. SKALA Y..... 15

Abbildung 14: Mittlere Messwerte nach Enthärtung der Chlorat-, Chlorit-, Perchlorat-, Summe der THM-, AOX- sowie Brotmat-Konzentrationen und gegebenenfalls vorhandene Grenzwerte. SKALA Y und andere Farben!! .....

Abbildung 15: Koloniebildende Einheiten bei 22 °C und 36 °C der untersuchten Haushalte sowohl vor als auch nach Enthärtung.Farben anpassen und SKALA und GRENZWERT → INDIKATOR..... 17

Abbildung 16: Bausteine einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040..... 19

Abbildung 17: Modellierung von Trinkwasserbereitstellung, Nutzung in den Haushalten und Abwasserentsorgung..... 26

Abbildung 18: Schematische Darstellung der Systemgrenzen der Untersuchung. 27

Abbildung 19: Typische Dosierungsempfehlungen für Waschmittel in Abhängigkeit von Härtebereich und Verschmutzungsgrad der Wäsche (Forum Waschen, 2019)..... 28

Abbildung 20: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (GWP). 42

Abbildung 21: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial - unterteilt in a) aquatische (Süßwasser (FE) und b) marin (ME)) und c) terrestrische (TE) Eutrophierung. 44

Abbildung 22: Ergebnisse der Ausgangsszenarien für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial (freshwater and terrestrial acidification - FTA). 45

Abbildung 23: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial (GWP). 47

Abbildung 24: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Eutrophierungspotenzial - unterteilt in aquatische Eutrophierung –

Anhang:

a) Frischwasser (FET) und b) marin (MET) - und c) terrestrische (TE) Eutrophierung. 49

Abbildung 25: Ergebnisse der Zusatz-Szenarien für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial (FTA)..... 50

4.3 Literaturverzeichnis

BDEW (2019a): Entwicklung des personenbezogenen Wassergebrauches - in Litern pro Einwohner und Tag, Deutschland. Unter: https://www.bdew.de/media/documents/PI_20190417_Entwicklung_personenbezogener_Wassergebrauch_ab_1990.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

BDEW (2019b): Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Unter:https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

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. Journal of Cleaner Production, 278, 123925. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123925.

DEHOGA (o. A.): Warmes Wasser - Energiesparblatt 7. Unter: https://energiekampagne-gastgewerbe.de/system/files/2021-01/esb_07_warmwasser.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

DIN EN 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); German version EN ISO 14040:2006 + A1:2020

DIN EN 14743: Water conditioning equipment inside buildings - Softeners - Requirements for performance, safety and testing; German version EN 14743:2005+A1:2007 (2007-09).

DIN 19636-100: Enthärtungsanlagen (Kationenaustauscher) in der Trinkwasserinstallation - Teil 100: Anforderungen zur Anwendung von Enthärtungsanlagen nach DIN EN 14743 (2008-02).

DIN 1988-200: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe (2012).

Directive (EU) 2020/2184: Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption (2020).

Europäische Kommission (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for life cycle assessment: detailed guidance. Publications Office of the European Union (Scientific and technical research series). Luxemburg. ISBN: 9789279190926. Unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

European Commission (2011): (Joint Research Center – Institute for Environmental and Sustainability - Huppes und L. van Oers, 2011): Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2011: Unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LCIA-Evaluation-of-weighting-methods-in-EU27.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

Europäische Kommission (2012): Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods - Database and supporting information. Unter:

https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/LCIA-characterization-factors-of-the-ILCD.pdf.

Fazio, S.; Castellani, V.; Sala, S.; Schau, E.; Secchi, M.; Zampori, L. and Diaconu, E. (2018): Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods: New methods and differences with ILCD, EUR 28888 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-76742-5, doi:10.2760/671368, JRC109369.

Fraunhofer ISE (2020): Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2019. Unter: https://energy-charts.info/ bzw. https://www.energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung_2019_3.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

Forum Waschen (2019): Richtiges Dosieren von Geschirrspül- und Waschmitteln. Unter:

https://www.forum-waschen.de/files/content/Materialien/Faltblaetter,%20Broschueren/2019_Faltblatt_Richtiges_Dosieren.pdf
(abgerufen am 09.08.2021).

Godskesen, B.; Hauschild, M.; Rygaard, M.; Zambrano, K. & Albrechtsen, H.-J. (2012): Life cycle assessment of central softening of very hard drinking water. Journal of Environmental Management, 105, 83–89.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.030.

Hancke, K.: Wasseraufbereitung, Chemie und chemische Verfahrenstechnik. Zweite verbesserte Auflage. VDI-Verlag, Düsseldorf 1991, ISBN 3-18-401123-2 (1991).

Hillenbrand, T.; Böhm, E.; Kotz, C.; Schikorra, V.; Schleich, J.; Hesse, S.; Baldauf, G. (2004): Zentrale Enthärtung von Trinkwasser - Eine ökologische und ökonomische Bewertung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, 165 S.

Hesse, S.; Baldauf, G.; Hillenbrand, T. (2004): Ökologische und ökonomische Aspekte einer zentralen Enthärtung von Trinkwasser. Energie-, Wasser-Praxis 55, 5, S. 46-49.

IKW (2021): Bericht Nachhaltigkeit in der Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittelbranche in Deutschland - Ausgabe 2021. Unter:
https://www.ikw.org/fileadmin/ikw/downloads/Haushaltspflege/2021_IKW_Nachhaltigkeitsbericht.pdf (abgerufen am 09.08.2021).

IKW (2020): Zahlen zum Waschen in Deutschland 2014. Unter:
https://www.ikw.org/fileadmin/ikw/Haushaltpflege/Informationsserie/WM/dateien/html/3_5_1.html
(abgerufen am 31.10.2020)

NF T90-601: Ionenaustauscherharze - Freisetzungsprüfung (2011).

Niederste-Hollenberg, Jutta; Jenny Winkler, Markus Fritz, Lin Zheng, Thomas Hillenbrand, Gerd Kolisch, Gitta Schirmer, Julia Borger, Hannes Doderer, Ilka Dörrfuß (2021): Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale in der Abwasserwirtschaft - aktueller Stand und Perspektiven. UBA-Texte 50/2021, Dessau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-12_texte_50-2021_klimaschutz_abwasserwirtschaft_0.pdf .

Parsons, S.: The effect of domestic ion-exchange water softeners on the microbiological quality of drinking water. Water Research, Volume 34, Issue 8, 2369-2375 (2000).

ResAP (2004) 3: Ion exchange and adsorbant resins in the processing of foodstuffs (2007).

Rüdenauer, I.; Eberle, U. & Grießhammer, R. (2006): Ökobilanz und Lebenszykluskostenrechnung Wäschewaschen: Vergleich des Waschens bei durchschnittlichen Waschtemperaturen mit Waschen bei niedrigeren Waschtemperaturen (Vol. 49).

Stat. Bundesamt (2020): Wasserverluste in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2017. Unter:
https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155684/umfrage/wasserverluste-in-der-oeffentlichen-wasserversorgung-seit-1991/
(abgerufen am 18.08.2020).

Stat. Bundesamt (2012): Bauen und Wohnen - Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten - Wohnsituation der Haushalte. Fachserie 5 Heft 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

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. Water Science and Technology: Water Supply, 19(7), 2088-2097. DOI: 10.2166/ws.2019.088.

TrinkwV (2020): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV). Aktuelle Fassung, zuletzt geändert 2020;

http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/BJNR095910001.html#BJNR095910001BJNG000201310
(abgerufen am 09.08.2021).

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. Journal of Environmental Management. 91, 541-549.

Anhang:

UBA (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf (abgerufen am 18.08.2020).

VDI 2067-12 (2000): Wirtschaftlichkeit Gebäudetechnischer Anlagen - Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. Beuth Verlag, Berlin.