

FREISETZUNG VON MIKRO- PLASTIK AUS TEXTILIEN IN ABWASSER

UNTERSUCHUNGEN MIT TEXTILPFLEGEGERÄTEN

Textilien setzen beim Waschen sowie nachfolgendem Trocknen Mikroplastik frei. Deshalb wurden für einen Wäschemix und Fleece-Textilien die Freisetzung von Fasern und Partikeln über einen Wäschelebenszyklus untersucht. Die Frachtbilanz zeigt, welche Massnahmen erforderlich und umsetzbar sind.

Michael Burkhardt, HSR Hochschule für Technik Rapperswil*

Daniel Istvan Jenny; Philipp Hodel; Cornelia Hauseisen, HSR Hochschule für Technik Rapperswil

Edith Durisch-Kaiser, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Anna Bruenisholz, Gymnasium Burgdorf

Janko Auerswald, V-ZUG AG

RÉSUMÉ

LIBÉRATION DE MICROPLASTIQUES D'ORIGINE TEXTILE DANS LES EAUX USÉES – ANALYSES AVEC DES APPAREILS D'ENTRETIEN DE TEXTILES

Les microplastiques (MP) parvenus dans l'environnement proviennent de différentes sources. L'importance de l'infiltration des MP issus de textiles dans les eaux usées puis dans les cours d'eau fait l'objet d'intenses discussions, tout comme les solutions possibles.

Dans la présente étude, des produits textiles typiques des foyers suisses ont chacun été lavés et séchés à 50 reprises à l'aide d'appareils standards (appareils ménagers V-ZUG). Le linge en laine polaire étudié est composé à 100% de polyester (PES), le linge mixte à 70% de PES et 30% de coton et les serviettes en microfibre à 80% de PES et 20% de polyamide. Les échantillons d'eau ont été analysés à la recherche de la fraction des matières solides (indice GUS) et du nombre de MP.

Les résultats montrent que pour une charge de linge classique, le lavage et le séchage font perdre au total 16,5 g/kg (0,33 g/kg en moyenne) au linge en laine polaire et 7,8 g/kg (0,16 g/kg en moyenne) au linge mixte.

Le linge en laine polaire émet plus de microplastiques que le linge mixte, surtout dans les cinq premiers cycles de lavage. Lors du premier lavage principal, 266 mg/l GUS ont été mesurés. À partir

EINLEITUNG

Kaum eine Kunststofffraktion ist in den letzten Jahren breiter und emotionaler diskutiert worden als Mikroplastik (MP). Das Vorkommen von MP-Teilchen in Wasser, Boden, Luft und Nahrungsmitteln – sogar im menschlichen Körper – beschäftigt tagtäglich Wissenschaft, Politik und Medien [1–4]. Dabei wurde eine grosse Variabilität von MP-Formen und MP-Grössen sowie bis 1000 Partikel pro Liter in Oberflächengewässern gefunden. Sowohl bei Gewässer- als auch Trinkwasserstudien wurden die kleinsten nachgewiesenen Partikel oft durch die Porengrösse der bei der Probenahme verwendeten Filter bestimmt [5].

Quantitative Aussagen zur Umweltexposition und zu den Effekten auf Mensch und Umwelt sind noch lückenhaft [6, 7]. Daher ist das effektive Risiko kaum einzuschätzen. Eine Studie der Technischen Universität Wien fand MP in allen untersuchten Stuhlproben [8]. Die WHO folgert zu MP im Trinkwasser, dass Gesundheitsrisiken für den Menschen eher unwahrscheinlich seien, schliesst diese jedoch nicht komplett aus [5].

Bei MP handelt es sich in der Regel um feste Kunststoffteilchen mit Dichten zwischen 0,9 und 1,5 g/cm³, die gemäss Definitionsvorschlag der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) bei

* Kontakt: michael.burkhardt@hsr.ch

Partikeln in allen Dimensionen $1 \text{ nm} \leq x \leq 5 \text{ mm}$ Grösse und bei Fasern $3 \text{ nm} \leq x \leq 15 \text{ mm}$ Länge bei einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis > 3 aufweisen.

Primäres MP wird Produkten wie Kosmetika oder Kunstrasenplätzen absichtlich zugesetzt, sekundäres entsteht als Zersetzungsprodukt durch Alterung oder Abrieb grösserer Kunststoffteile wie beispielsweise aus sich zersetzenden Kunststoffabfällen, Pneus und Textilien [1, 9]. Die eingesetzten Mengen von primärem MP lassen sich vergleichsweise gut erfassen. Die ECHA schätzt, dass etwa 50 000 t MP in Europa eingesetzt werden. Dagegen sind Daten zu sekundär erzeugten Mengen sehr unsicher, dürften aber den primären Einsatz um Grössenordnungen übersteigen [10]. Vielfach sind die Freisetzungprozesse unklar und analytische Routinemethoden zur Quantifizierung von MP in Umweltproben fehlen [7, 11]. MP lässt sich im Wasser nur indirekt als unspezifischer Anteil der ungelösten Stoffe (gesamte ungelöste Stofffraktion, GUS) erfassen, mit einer unteren Grösse von $0,45 \mu\text{m}$ (operative Trenngrenze für partikuläres Material). Die Schweizer Gesetzgebung kennt MP nicht als eigenständigen Parameter, beispielsweise weder die Gewässerschutzverordnung (GSchV) noch die Verordnung über Trinkwasser (TBDV).

EINTRAGSWEGE IN DIE UMWELT

Der Eintrag von MP aus der Vielzahl an Quellen in die Gewässer erfolgt – wie bei anderen Stoffemissionen – über Kläranlagen oder über diffuse Eintragswege, z. B.

der Einleitung von Strassenabwasser oder Regenwasserentlastungen [10]. In Kläranlagen beträgt der Rückhalt von GUS und Nanopartikeln rund 95% [12]. Nach heutigem Wissensstand ist der Rückhalt von MP mindestens vergleichbar gut [11, 13–16]. Trotzdem liegt im Ablaufwasser von Kläranlagen die durchschnittliche Faserkonzentration 25-mal höher und die Partikelkonzentration 3-mal höher als im Gewässer [15]. Die Konzentration von MP in den Grössen von 125 bis $500 \mu\text{m}$ nahm nach der Kläranlage signifikant zu [17]. Die zurückgehaltene MP-Menge wird in der Schweiz mit dem Klärschlamm verbrannt, in anderen Ländern jedoch mit dem Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Böden ausgebracht [18]. Derjenige Anteil, der die Kläranlagen passiert oder mit dem Klärschlamm auf Felder gelangt, wird in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut, weithin verfrachtet und akkumuliert im Sediment [19].

KUNSTFASERN IN TEXTILIEN

Geschätzt wird, dass 5 bis 10% [20] oder sogar 35% des MP [3] in den Ozeanen aus Textilien stammen. Die Fasern gelangen vor allem über Haushalte und Wäschereien ins Abwasser. In der EU mit rund 500 Mio. Einwohnern werden jährlich bis 52 400 t MP aus Textilien freigesetzt und bis 23 000 t MP in Gewässer geleitet [20]. Bezogen auf die Schweizer Bevölkerung (8,5 Mio.) könnten bis 700 t pro Jahr ins Abwasser gelangen.

Im Wasser von Waschmaschinen wurden etwa 210 000 Fasern pro Liter gefunden, davon sind rund 60% synthetisch [9]. Auf-

grund dieser Relevanz wurde bereits der Einfluss von Waschmitteln, Temperatur und Waschintensität auf die MP-Emission aus zwei Stofftüchern untersucht [21–22]. In Textilien werden Kunstfasern entweder sortenrein oder in Mischung mit anderen Kunst- oder Naturfasern eingesetzt. Polyester (PES) ist die wichtigste Kunstfaser, die eine Glasübergangstemperatur von etwa $80 \text{ }^\circ\text{C}$ und Dichte von ca. $1,4 \text{ g/cm}^3$ aufweist. Die PES-Fasern werden im Schmelzspinnverfahren hergestellt und gelten als biologisch schlecht abbaubar. Weltweit ist PES mit einem Anteil von rund 77% an der Gesamtproduktion und am Verbrauch von Chemiefasern die dominierende Chemiefaser und weist weiterhin grosse Wachstumsraten auf [23], u. a. auch wegen des starken Bevölkerungswachstums und *Fast Fashion Trends*. Von 2000 bis 2016 stieg der Einsatz von Polyester in der weltweiten Bekleidungsindustrie von 8,3 auf 21,3 Mio. t jährlich. Polyamide (PA) stellen ebenfalls eine weithin eingesetzte Gruppe von Kunststofffasern dar, mit ca. $1,2 \text{ g/cm}^3$ Dichte, elastisch und widerstandsfähig. Die Glasübergangstemperatur liegt zwischen 50 und $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Der Bestand an Textilien in den Haushalten ist immens. Bei einer Erhebung in Deutschland gaben 43% der Befragten an, 50 bis 100 Kleidungsstücke und ein Drittel sogar 100 bis über 300 Teile zu besitzen [24]. In der Schweiz besitzt damit jeder Haushalt durchschnittlich 286 kg Kleidung bzw. rund 125 kg pro Person. Deutsche Verbraucher kaufen jährlich 60 neue Kleidungsstücke (10 kg) und tragen



Fig. 1 Kleidungsstücke und Gewebe der Fleece-Wäsche (8 Jacken) und Mix-Wäsche (Pullover, Hemden, Bademantel).

diese nur noch halb so lange wie vor 15 Jahren [25]. Mehr als 50% aller Kleidungsstücke werden spätestens nach drei Jahren weggeworfen. Die am häufigsten angegebenen Gründe dafür sind Verschleiss (92%), weil die Kleidung nicht mehr passt oder nicht mehr gefällt (72 bzw. 64%).

ABKLÄRUNGEN ZU MASSNAHMEN

Durch die Verordnung REACH der EU sollen die Mengen von primärem MP europaweit deutlich reduziert werden. Dazu zählen beispielsweise kunststoffbasiertes Füllgranulat in Kunstrasenplätzen oder Kosmetika. Bei sekundärem MP sind Massnahmen schwerer umsetzbar, weil das MP unbeabsichtigt entsteht und die Prozesse wenig kontrollierbar sind [20].

Um mögliche Massnahmen bei MP aus Textilien zu priorisieren, sind verlässliche Daten nützlich. In vorliegender Untersuchung wurde deshalb die Freisetzung von MP aus zwei unterschiedlichen Wäscheclustern unter haushaltstypischen Bedingungen quantifiziert und Massnahmen, einschliesslich des *Guppyfriend*[®]-Waschbeutels, evaluiert.

METHODISCHES VORGEHEN

VERSUCHE MIT TEXTILIEN

Das erste Wäschecluster umfasste sechs neue Fleece-Jacken (Grössen 2 × Medium, 1 × XL und 3 × XXL, Flächengewicht 180 g/m², 100% PES, *Atrium*) und repräsentiert den «Worst-Case» bezogen auf die erwartete MP-Freisetzung (2,4 kg Fleece-Wäsche) (Fig. 1). Das zweite Wäschecluster entsprach in Menge und Zusammensetzung einer durchschnittlichen Waschmaschinenbeladung (3,2 kg Mix-Wäsche) [26]. Dazu zählten vier Oberhemden (rosa, Grössen S, M, L und XL, Flächengewicht 100 g/m², 65% PES und 35% Baumwolle, *H&M*), zwei Pullover (grau, Grössen S und M, Flächengewicht 350 g/m², 60% PES und 40% Baumwolle, *H&M*) und zwei Pullover (rot, Grössen S und M, Flächengewicht 260 g/m², 60% PES und 40% Baumwolle, *H&M*) sowie einen Kinderbademantel (schwarz, Grösse 152, Flächengewicht 300 g/m², 100% PES, *H&M*) (Fig. 1). Im Cluster Mix-Wäsche betrug der mittlere Anteil von PES 70%.

Die zwei Wäschecluster wurden je 50-mal gewaschen und getrocknet. Dies erfolgte in Anlehnung an die Anforderungen für *Corporate Identity*-Businesskleidung (Berufskleidung wie Sakos usw.), die so viele Zyklen ohne sichtbare Schäden aushalten sollte [27]. Normwäsche wird demgegenüber bis zu 80-mal, *Fast-Fashion*-Textilien im Mittel nur 5-mal gewaschen, bevor die Textilien entsorgt werden.

Gewaschen wurde mit einer handelsüblichen Waschmaschine (*V-ZUG, AdoraWaschen V2000, Artikel-Nr. 1102100024*). Das haushaltstypische Waschprogramm «Buntwäsche 40°» (1200 rpm Schleudern) umfasst Hauptwaschen, Spülen/Zwischenschleudern und Spülen/Endschleudern. Für Fleece-Wäsche wurden 80l (33l/kg, 13l Hauptwäsche) und für Mix-Wäsche 55l Wasser benötigt (17l/kg, 18l Hauptwäsche). Das gewählte Flüssigwaschmittel war *Total Color* (*Migros*; ohne Bleichmittel und optische Aufheller). Die Marke *Total* dominiert den Schweizer Markt für Waschmittel im Haushalt mit 18% Anteil knapp vor *Persil* und *Ariel* [25]. Dabei ist der Marktanteil von Flüssigwaschmitteln mit fast 68% am grössten. Pro Waschgang wurden 10 ml Waschmittel dosiert.

Die Wasserfraktionen des 1., 3., 5., 10., 20., 30., 40. und 50. Waschgangs (n=8) wurden mit drei Behältern (jeweils das Ab-

wasser der Hauptwäsche und der zwei Spülgänge) ablaufseitig der Waschmaschine vollständig aufgefangen und sowohl einzeln als auch in einer Mischprobe analysiert.

Nach jedem Waschgang wurde die Wäsche (Restfeuchte ca. 44%) mit dem Programm «normal trocken» getrocknet (*Wäschetrockner V-ZUG, AdoraTrocknen V2000, Artikel-Nr. 1201100004*). Die Trocknung der Fleece-Wäsche dauerte 30 min und die der Mix-Wäsche 90 min. Das Flusensieb wurde nach der 1., 3., 5., 10., 20., 30., 40 und 50. Trocknung (n=8) beprobt.

RÜCKHALT VOM GUPPYFRIEND-WASCHBEUTEL

Der Waschbeutel (Grösse M, 50 × 74 cm, 100% PA, Maschenweite 34 µm, *Langbrett GmbH Berlin*) wurde mit jeweils acht Mikrofaser-Tüchern (Flächengewicht 560 g/m², 80% PES und 20% PA, *Landi*) befüllt und mit dem Reissverschluss verschlossen.

Gewaschen wurde bei 20 und 60 °C, um den Einfluss der Waschttemperatur auf die MP-Freisetzung und den MP-Rückhalt zu untersuchen. Als Referenz wurde die gleiche Anzahl Fasertücher ohne *Guppyfriend*-Beutel sowie ein leerer Beutel gewaschen.

UNTERSUCHUNGSPARAMETER

Um zu erfassen, wie viel Feststoffe durch das Waschen ins Wasser gelangen, sind die Textilien vor dem ersten Waschen und nach der letzten Trocknung gewogen worden (Gewichtsdifferenz). GUS wurde in den drei Wasserfraktionen sowie den Mischproben bestimmt. Dafür sind nacheinander 0,2l über 2 µm Filter (50 mm, Glasmikrofilter *GF6, Whatman*) und 0,45 µm Filter (50 mm, Zellulosemischesterfilter *ME 25, Whatman*) abgetrennt worden. Aus der Summe ergibt sich die GUS-Menge pro Filtervolumen. Die *Guppyfriend*-Proben wurden nur 0,45 µm filtriert.

MP wurde in Proben der Hauptwäsche sowie in Mischproben der *Guppyfriend*-Waschbeutel-Versuche erfasst. Die Vorgehensweise orientiert sich an *Cabernard et al.* [11] und *Hodel* [16]. Durch die Probenvorbereitung werden alle Naturfasern beseitigt, sodass nur MP-Teilchen vorliegen. Unter einem digitalen Mikroskop (10-fach, *Olympus DSX110*) wurden dann pro Filter (13,5 cm²) in fünf Quadraten (à 3 × 3 mm) die MP-Partikel und -Fasern drei Grössenklassen (<20 µm, 20–200 µm, >200 µm) zugeordnet. Die Siebfraktion aus dem Tumbler war trocken. Sie wurde nach der Wäschetrocknung vom Sieb entfernt und gewogen. Die Resultate sind auf den Lebenszyklus (50 Waschgänge) bezogen worden, indem die nicht analysierten Waschgänge und Trocknungen durch Mittelwerte näherungsweise berechnet wurden.

FREISETZUNG VON FESTSTOFFEN

GEWICHTSVERLUSTE DER KLEIDUNGSSTÜCKE

Die Gewichtsabnahme der Textilien über je 50-mal Waschen und Trocknen beträgt bei Fleece-Wäsche (2,4 kg, 100% PES) rund 40 g, und damit 1,6% des Anfangsgewichts. Die Gewichtsabnahme der Mix-Wäsche (3,2 kg Wäsche, 70% PES) um rund 25 g resultiert dagegen in einem mittleren Verlust von 0,8%. Beim Bademantel, der zu 100% aus PES besteht, lag der Massenverlust mit 0,6% deutlich niedriger als bei den Fleece-Jacken. Zu vermuten ist, dass entweder die lose textile Flächenstruktur oder die Reissverschlüsse der Fleece-Jacken die MP-Freisetzung z. B. durch Reibung verstärken. Ein hohes Wasser/Gewebe-Verhältnis scheint ebenfalls ein einflussreicher Faktor für die MP-Freisetzung zu sein [28].

Damit wurden aus der Fleece-Wäsche gesamthaft rund 16,5 g/kg (0,33 g/kg pro Waschgang) und aus der Mix-Wäsche rund 7,8 g/kg (0,16 g/kg pro Waschgang) freigesetzt. Aus Fleece werden 100% PES freigesetzt, dagegen ist aus dem Wäschecluster Mix-Wäsche eine freigesetzte Mischung aus Baumwolle und PES zu erwarten.

Folkö *et al.* [29] wusch mit einer Frontlader-Waschmaschine jeweils 4-mal ein Fleece-Shirt (100% PES) und einen Sportpulli (57% PA, 43% PES) und stellten fest, dass sie insgesamt 5 bzw. 1 g/kg ihrer Ausgangsmasse verloren. Bezogen auf einen Waschgang sind die Unterschiede zu vorliegender Untersuchung klein. Die demgegenüber geringeren Freisetzungen von 0,025 g/kg MP [21], 0,08 bis 0,21 g/kg [22] sowie 0,057 g/kg und 0,399 g/kg [30] MP pro Kilogramm Textil sind auf die anderen Waschbedingungen und Textilarten zurückzuführen (z.B. Waschprogramm, deionisiertes Wasser).

GUS IM WASCHWASSER

Die GUS-Konzentrationen nehmen bei der Fleece-Wäsche von 266 mg/l auf 50 mg/l GUS im dritten Waschgang ab (19%), während bei der Mix-Wäsche kein ausgeprägter Anfangspeak auftritt (*Fig. 2, links*). Ab dem zehnten Waschgang sind nur 10 bis 20 mg/l GUS zu messen. Die hohen Anfangskonzentrationen im Wasser der Fleece-Jacken deuten darauf hin, dass Faserreste aus der Produktion ausgewaschen wurden (*First-Flush*) [22, 29, 30]. Allgemein höhere GUS-Konzentrationen in Proben der Hauptwäsche als in den Mischproben unterstreichen, dass GUS vor allem durch den Waschprozess freigesetzt wird und weniger durch Spülgänge. Jedoch sinkt die Relevanz des Hauptwaschens gegenüber den Spülgängen vom ersten Waschgang (> 95% bei Fleece-, 70% bei Mix-Wäsche) bis zum letzten (40 bzw. 30%).

Die GUS-Frachten pro kg Wäsche nehmen von 2,2 g/kg auf 0,2 g/kg bei Fleece-Wäsche ab. Hingegen streuen sie nur zwi-

schen 0,2 und 0,3 g/kg beim Wäschemix. (*Fig. 2, rechts*). Die mittlere Fracht über alle Waschgänge umfasst 0,39 g/kg GUS bei Fleece und 0,27 g/kg GUS bei Mix-Wäsche.

Die grösseren Mengen als bei *Hernandez et al.* [21] werden wie folgt erklärt. Es wurden handelsübliche Kleidungsstücke, teils mit Reissverschlüssen, bei typischer Trommelbeladung gewaschen und nicht speziell präparierte Tücher in für Haushalte untypischen Laborwaschmaschinen mit eigener spezifischer Waschmechanik.

MIKROPLASTIK AUS TEXTILIEN

Die mikroskopische Auswertung zeigt eindrücklich die grosse Formenvielfalt und die Verteilungsdichte von MP auf den Filtern (*Fig. 3*). Von kleinen, vielgestaltigen Partikeln bis zu langen, verdrehten Fasern, die teils auch als Gemenge auftreten, sind sämtliche Variationen zu beobachten. Wenn solche Arten von MP im Abwasser erfasst werden sollen, sind die Probenvorbereitung und Analytik herausfordernd.

Die Auszählung zeigt, dass vom ersten bis letzten Waschgang die Anzahl MP-Fasern und -Partikel bei Fleece um 76% und bei Mix-Wäsche um 91% abnehmen (*Fig. 4*). Im ersten Waschgang emittieren zwar fast gleich viele Fasern aus Fleece- und Mix-Wäsche (166 000 vs. 178 000 1/l), aber nur halb so viele Partikel aus dem Mix (411 000 vs. 707 000 1/l) (*Fig. 4*). Ab dem zehnten Waschgang verliert sich der Unterschied, bis sich das Verhältnis kehrt, und in der letzten Probe sogar sechsmal mehr Partikel bei der Mix-Wäsche als beim Fleece auftreten (50 000 vs. 8 000 1/l). Die höheren GUS-Konzentrationen bei der Mix-Wäsche lassen die Beobachtung plausibel erscheinen.

Ausserdem liegen bei Mix-Wäsche rund 3-mal, bei Fleece-Wäsche sogar 8-mal mehr Partikel als Fasern vor (*Tab. 1*). Den Hauptanteil bei den MP-Teilchen machen Partikel aus: rund 90% bei Fleece- und 75% bei Mix-Wäsche (*Fig. 5, Tab. 1*). Partikel <20 µm Grösse sind sehr dominant vorhanden, Fasern >200 µm Länge spielen dagegen bei der Anzahl eine untergeordnete Rolle.

Die hier nachgewiesene hohe Partikelzahl ist bemerkenswert, weil in den anderen Studien die kleinen Teilchen nicht erfasst wurden.

Bei Fleece bleibt die Partikelzahl über die ersten fünf Waschgänge auf hohem

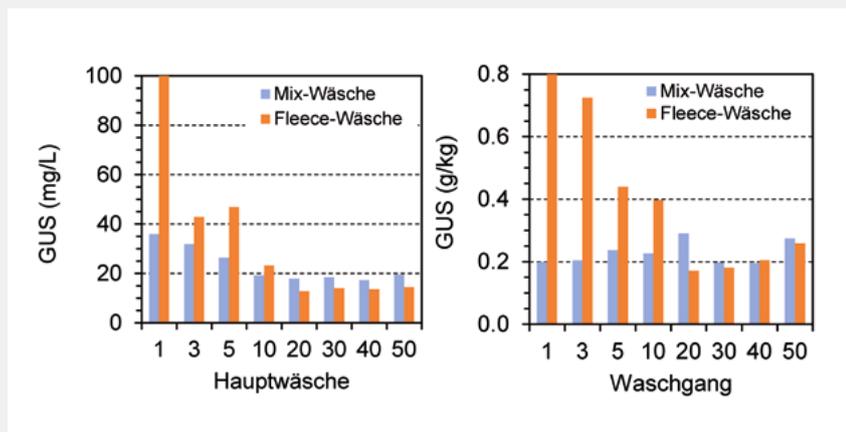


Fig. 2 GUS-Konzentrationen pro Hauptwäsche (links, mg/l) und GUS-Freisetzung pro Kilogramm pro Waschgang (rechts, g/kg; umfasst Hauptwäsche und Spülgänge) für die Fleece- und Mix-Wäsche.



Fig. 3 Verteilung der Mikroplastik-Fasern und -Partikel der ersten (links) und zehnten Hauptwäsche (rechts) von Fleece-Wäsche.

Niveau (Fig. 4). Dieses Resultat ist nicht vergleichbar mit den GUS-Konzentrationen, weil die vielen Partikel keinen wesentlichen Einfluss auf die Massenkonzentration haben.

Die berechnete Anzahl MP-Teilchen je Wäschecluster ergibt, dass im ersten Waschgang rund 6,91 Mio. 1/kg MP aus Fleece und 2,28 Mio. 1/kg aus Mix-Wäsche ins Abwasser emittiert werden,

die im 50. Waschgang auf 0,53 Mio. 1/kg bzw. 0,58 Mio. 1/kg sinken (Fig. 4). Über den hochgerechneten Lebenszyklus von 50 Waschgängen (Waschen und Spülen bei 40°C) emittieren die Fleece-Jacken (29,4 Mio. 1/kg MP) fast doppelt so viele MP-Teilchen wie der Wäschecluster Mix-Wäsche (15,3 Mio. MP 1/kg pro Kilogramm Textilien) ins Abwasser, woraus sich pro Waschgang durchschnittlich

0,59 Mio. 1/kg MP bei Fleece und 0,31 Mio. 1/kg MP bei Mix-Wäsche ergeben (Tab. 1).

Hann et al. [20] gehen für PES-Textilien von einer durchschnittliche MP-Freisetzungsrates von 1 bis 2,5 Mio. 1/kg MP-Teilchen aus, die mindestens doppelt so hoch liegt wie die hier vorgestellten Resultate.

FESTSTOFFE IM TUMBLER

Auf dem Tumblersieb nehmen Flusen von von beiden Wäscheclustern über 50 Trockengänge vergleichbar ab (Fig. 6); von 0,14g/kg für Fleece bzw. 0,21g/kg für Mix-Wäsche nach der ersten Trocknung, auf 0,04g/kg in der zehnten Trocknung sowie ähnliche Flusenmengen bei den weiteren Trocknungen. Über alle 50 Trocknungen hinweg wurden bei Fleece- und Mix-Wäsche je 2 und 3g/kg, bzw. gemittelt pro Trocknung ca. 0,05g/kg aufgefangen.

Überraschend ist, dass die höchste Beladung des Siebs im ersten Trocknungszyklus der Mix-Wäsche auftrat und nicht beim Fleece. Es ist anzunehmen, dass sich die Fleece-Fasern einfacher mit dem Waschwasser entfernen lassen und daher im Sieb vergleichsweise wenige Flusen gefunden wurden. Dazu muss erwähnt werden, dass die Fleece-Wäsche entsprechend der voreingestellten dynamischen Programmparameter der haushaltstypischen Waschmaschine fast mit der doppelten Wassermenge gewaschen wird. Der Anteil von zurückgehaltenen Feststoffen auf dem Sieb ist um Größenordnungen relevanter als der Feststoffanteil im Kondensatabfluss, wie Stichproben unterhalb der Bestimmungsgrenze von 1 mg/l GUS ergaben. Zudem ist die Kondensatwassermenge sehr gering, sodass die Frachten vernachlässigbar sind.

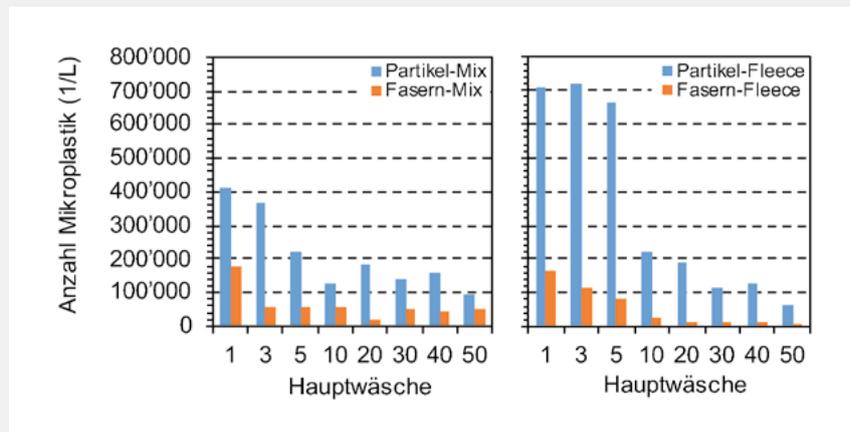


Fig. 4 Anzahl Partikel und Fasern in der Hauptwäsche (1/l) für Mix- und Fleece-Wäsche.

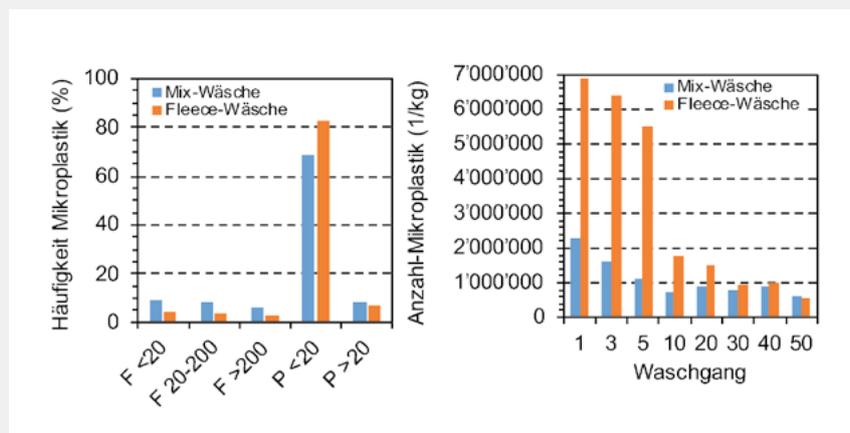


Fig. 5 MP-Verteilung der relativen Häufigkeit von Fasern (F) und Partikeln (P) (links, %) und berechnete Anzahl MP-Teilchen (Fasern und Partikel) pro Kilogramm Textilien über 50 Waschgänge (rechts, 1/kg; umfasst Hauptwäsche und Spülgänge).

Mix	F <20 1/l	F 20-200 1/l	F >200 1/l	P <20 1/l	P >20 1/l	Total Fasern 1/l	Total Partikel 1/l	Total MP 1/l	Total MP 1/kg
50 Hauptwäschen	997267	882008	617541	7222649	838570	2496816	8061220	10558035	10905670
pro Hauptwäsche	19945	17640	12351	144453	16771	49936	161224	211161	218113
50 Waschgänge	1396173	1234811	864558	10111709	1173999	3495542	11285707	14781249	15267937
pro Waschgang	27923	24696	17291	202234	23480	69911	225714	295625	305359
Fleece									
50 Hauptwäschen	590397	494371	326512	10374375	810528	1411280	11184903	12596183	21045421
pro Hauptwäsche	11808	9887	6530	207487	16211	28226	223698	251924	420908
50 Waschgänge	826556	692119	457117	14524125	1134740	1975792	15658865	17634657	29463589
pro Waschgang	16531	13842	9142	290482	22695	39516	313177	352693	589272

Tab. 1 Anzahl MP-Teilchen pro Liter (1/L) Waschwasser und pro Kilogramm Wäsche (1/kg), differenziert nach MP-Fasern (F) und MP-Partikel (P) für 50 Hauptwäschen bzw. pro Hauptwäsche sowie 50 Waschgänge und pro Waschgang (hochgerechnete Hauptwäschen plus Spülgänge).

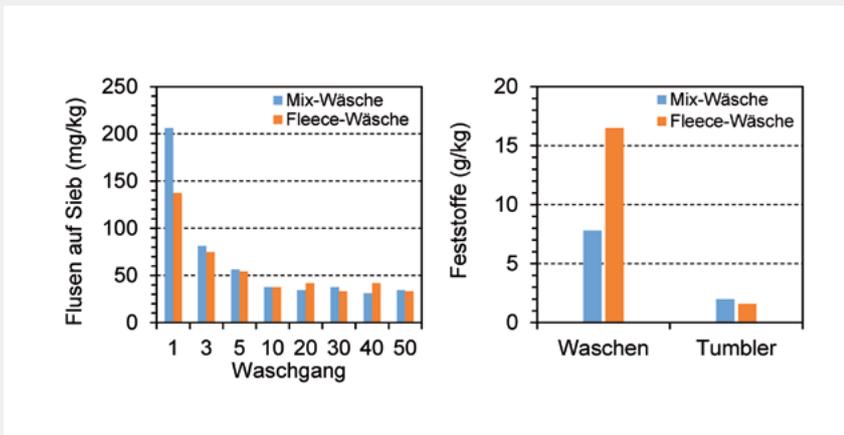


Fig. 6 Feststoffmengen auf dem Flusensieb des Tumblers aus Fleece- und Mix-Wäsche über 50 Trocknungen (links, mg/kg) und die freigesetzten Feststoffmengen aus 50 Waschgängen und Trocknungen im Vergleich (rechts, mg/kg).

VERGLEICH DER FRACHT VON WASCHMASCHINE UND TUMBLER

Fleece-Jacken setzen über 50 Zyklen in Waschmaschine und Tumbler 19,5g/kg GUS (17,2g/kg beim Waschen, 1,6g/kg beim Trocknen) und Mix-Wäsche 13,7g/kg GUS (11,4 g/kg beim Waschen, 2g/kg beim Trocknen) frei (Fig. 6).

Die GUS-Mengen der Fleece-Jacken sind vergleichbar mit den gravimetrisch bestimmten Masseverlusten (17,2 vs. 16g/kg). Bei der Mix-Wäsche liegt die hochgerechnete GUS-Menge von 11,4g/kg über der Gewichtsabnahme von 8g/kg Textilien. Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass sich leicht höhere Messwerte aus den Waschgängen 20 und 50 in der berechneten Gesamtbilanz niederschlagen.

Von der freigesetzten Feststoffmenge gelangen 80 bis 90% durch die Waschmaschine ins Abwasser. Dagegen werden 10 bis 20% auf dem Flusensieb des Tumblers zurückgehalten. Diese sollten nicht abgewaschen, sondern trocken mit dem Kehrriech entsorgt werden, um nicht zusätzlich ins Abwasser zu gelangen.

EINTRAG VON MIKROPLASTIK INS ABWASSER

Die Abschätzungen zur hier präsentierten MP-Emission berücksichtigen die Anzahl Haushalte in der Schweiz (3,7 Mio.), einen Lebenszyklus von 50 Waschgängen pro Kleidungsstück und einen Rückhalt von 95% bei Kläranlagen (Fig. 7).

Das «Fleece-Szenario» geht davon aus, dass jeder Schweizer eine Fleece-Jacke (0,4kg) aus 100% PES besitzt, die alle drei Wochen gewaschen wird (jährlich 17-mal waschen). Bei einer

Freisetzungsmenge von 0,33g/kg pro Waschgang (ca. 2,2g/a MP pro Fleece-Jacke) resultiert alleine für diese Art von Jacken eine Emission von jährlich rund 19,1t/a MP in das Schweizer Abwassernetz, von denen 0,96t/a mit dem behandelten Abwasser in die Gewässer eingeleitet werden.

Dem «Mix-Wäsche-Szenario» wird zugrunde gelegt, dass jeder Schweizer Haushalt 200-mal im Jahr je 3,2kg Textilien aus Natur- und Kunstfasern wäscht [26] (Fig. 7). Bei geschätzten 286kg Kleidung pro Haushalt wird jedes Kleidungsstück mindestens 1,5-mal pro Jahr gewaschen. Für alle Haushalte resultieren 740 Mio. Waschgänge mit rund 2,37 Mio. t Textilien. Bei einer Freisetzungsrate von 0,16g/kg pro Waschgang emittieren 118,4t/a GUS pro Jahr. Unter der weiteren Berücksichtigung, dass diese Feststoffe im für die Umwelt ungünstigsten Fall zu 70% aus MP bestehen (entsprechend der Zusammensetzung in der Mix-Wäsche) oder im besten Fall nur zu

20% aus MP (Hinweis aus anderen Studien), resultieren Jahresfrachten von 23,1 bis 80,8t/a MP (pro Kopf und Jahr 2,7 bis 9,5g/a). Davon gelangen bei einem Rückhalt von 95% in Kläranlagen rund 1,2 bis 4,0t/a in die Gewässer (Fig. 7). Werden die Frachten der Fleece- und Mix-Wäsche addiert, gelangen zwischen 42,2 und 99,9t/a ins Abwasser sowie 2,1 bis 4,9t/a in Schweizer Gewässer.

In der Literatur finden sich breit streuende Mengenabschätzungen. Die Unterschiede beruhen auf den Datengrundlagen, die durch die Versuchsbedingungen (Textilart, Waschmittel, Waschprogramm etc.) und Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung von MP bestimmt werden. Verglichen mit der Freisetzung von geschätzten 700t/a MP pro Jahr aus Textilien (s. «Kunstfasern in Textilien»), sind die hier ermittelten MP-Mengen rund 4- bis 10-mal kleiner. Die viel zitierte UMSICHT-Studie operiert mit einer MP-Emission für Textilien von 80g pro Einwohner und Jahr [4] und liegt damit am oberen Rand aller Abschätzungen. Für Schweden wurden 8 bis 960t/a MP-Emission ins Abwasser bilanziert [19]. Dies entspricht etwa 1 bis 100g MP pro Kopf und Jahr, einer Freisetzung, die einen weiten Bereich abdeckt. Bei Kawecki & Nowack [10] wurde der Eintrag aus Textilien in Schweizer Gewässer auf jährlich 3,1 ± 5,7 MP t/a geschätzt. Diese Abschätzung deckt sich ausgezeichnet mit den in vorliegender Studie ermittelten MP-Mengen.

Von Cabernard et al. [11] wurde für die Zürcher Kläranlagen der MP-Eintrag in die Gewässer auf 0,21t/a MP pro Jahr geschätzt. Auf die Schweiz bezogen sind rund 1,2t/a MP zu erwarten [10]. Dabei sind aber sämtliche Quellen zusammen-

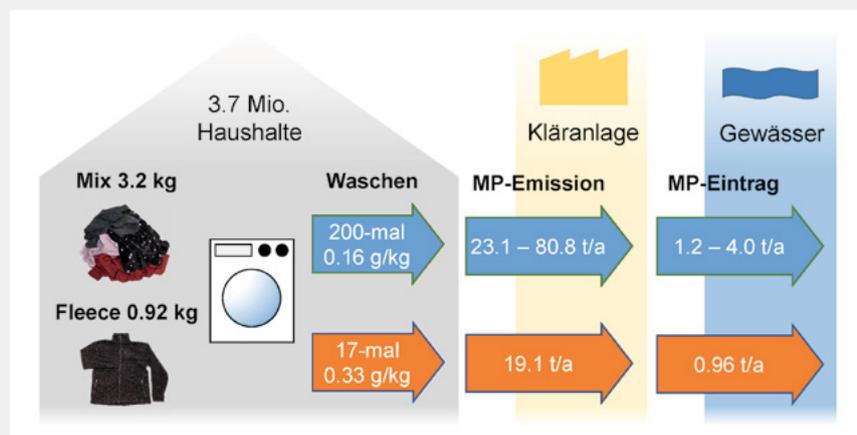


Fig. 7 Jährliche MP-Emission in Abwasser durch Waschen von Mix-Wäsche und Fleece-Jacken in Schweizer Haushalten und der MP-Eintrag in Gewässer.

gefasst. Allein die in vorliegender Studie berechnete MP-Menge für das Waschen von Textilien liegt schon in diesem Bereich, sodass die Abschätzung für die Zürcher Kläranlagen eher zu konservativ ausgelegt ist.

MASSNAHMEN ZUR REDUKTION

GUPPYFRIEND-WASCHBEUTEL

Mit dem *Guppyfriend*-Beutel liegt eine durch verschiedene Gruppierungen breit unterstützte, günstige und scheinbar verblüffend einfache Massnahme zur Reduktion des MP-Eintrags in der Umwelt vor. Nach der Wäsche sollen die im Beutel aufgefangenen Fasern als Abfall entsorgt werden. Die Resultate zeigen nun, dass selbst mit dem Beutel im Waschwasser mehr als 35 mg/l GUS nachweisbar sind (Fig. 8). Der GUS-Rückhalt lag bei rund 44% bei 20 °C und rund 27% bei 60 °C Waschttemperatur, wobei die Mikrofaser-Tücher rund 14 g/kg Feststoffe (1,4%) abgegeben haben. Die Maschenweite von 34 µm ist der entscheidende Grund für den geringen Rückhalt von durchschnittlich 30 Massen-%. Die dominierende Anzahl und Masse von MP-Fasern und -Partikeln passiert die Maschenweite des *Guppyfriend*-Beutels. Die Resultate der grössenklassierten Teilchen aus beiden Wäscheclustern unterstreichen, dass dominant kleine Partikel aus Textilien freigesetzt werden. Daher ist die Anzahl MP-Teilchen im Waschwasser trotz Waschbeutel noch sehr hoch. Damit weist der *Guppyfriend*-Beutel einen ähnlich schlechten Rückhalt wie der sogenannte *Cora-Ball* auf [31]. Bemerkenswert ist weiterhin, dass bei

20 °C mehr MP entsteht als bei 60 °C. Dies kann als Folge der Glastemperatur interpretiert werden. Bei 20 °C sind die Fasern noch nicht duktil bzw. wesentlich spröder als bei 60 °C, und die Fasern brechen leichter.

Guppyfriend-Beutel sind verhältnismässig schwierig zu reinigen. Naheliegender ist für viele Konsumenten, den Stoffbeutel regelmässig auszuspülen; womit das zunächst zurückgehaltene Material doch den direkten Weg in die Kläranlage findet und für solche Fälle den Einsatz der Beutel als eher fragwürdige Rückhalte-Massnahme disqualifiziert.

BETRIEBSOPTIMIERUNG

Aus Textilien werden durch Waschen und Tumbeln durchschnittlich 0,8 bis 1,6% als Fasern und Partikel freigesetzt. Reines PES setzt mehr MP als Mix-Wäsche frei. Die Resultate unterstreichen, dass MP über die gesamte Lebensdauer von Textilien freigesetzt wird. Abgelöst werden Feststoffe, die einerseits ab der Herstellung der Textilien lose in der Flächenstruktur vorliegen, und die andererseits als Faserbruchstücke durch Tragen bzw. den Wasch- und Trocknungsprozess entstehen. Verbraucher können die MP-Freisetzung reduzieren, indem sie Waschgänge mit hohem Wasservolumen (Schonwaschgänge) vermeiden und sicherstellen, dass volle Waschladungen verwendet werden.

Im normalen Betrieb des Tumblers verfangen sich Fasern und Partikel im Flusensieb. Diese Stofffracht umfasst 10 bis 20% der freigesetzten Feststoffe und sollte mit dem Kehrrecht entsorgt werden. Das trockene Reinigen scheint jedoch nicht immer gängige Praxis zu sein. Benutzer reinigen das Sieb auch gerne unter dem Wasserhahn. Darüber hinaus sehen erste Hersteller von Tumblern und Waschtrocknern vor, Flusen mit dem Kondenswasser automatisch abzureinigen und der Kläranlage zuzuleiten. Vor allem in Ländern, in denen die Abwasserreinigung weniger effektiv ist oder wo Klärschlamm auf Feldern ausgebracht wird, verschärft diese Art der Reinigung des Flusensiebs das Problem des MP-Eintrags in die Umwelt.

Um den Eintrag von MP ins Abwasser zu minimieren, könnten alternative Lösungsansätze bei Kleidungsstücken, insbesondere solche aus reiner Kunstfaser in Fleece-Kleidung, greifen. Besonders effizient dürfte ein Vorwaschen dieser Tex-

tilien vor dem Verkauf sein. Hiermit ist eine Frachtreduktion um 10 bis 20% MP möglich, bei einem besonders wirkungsvollen Vorwaschen vielleicht bis 30% MP. Das anfallende Abwasser sollte separat behandelt werden.

TECHNISCHE LÖSUNGEN

Im Bereich technischer Lösungen an der Waschmaschine sind die Verfahren der Filtration, der hydrodynamischen Abscheidung und der Flotation möglich, besonders zur Reinigung des Waschwassers aus der Hauptwäsche. Allen dezentralen technischen Verfahren ist gemeinsam, dass unspezifisch die gesamte Feststofffraktion, d. h. sowohl natürliche als auch kunststoffbasierte, zurückgehalten und jedes wirksame System mit einem hohen betriebstechnischen Aufwand verbunden sein wird. Bei der Filtration ist mit einem schnellen Zusetzen des Filters zu rechnen, sodass regelmässig rückgespült oder der Filter entsorgt werden muss (Einweg-Filter). Wenn sich mit dem *Lint LUV-R*-Filter ein hoher Rückhalt erzielen lässt [31], dann nur mit einer regelmässigen Deckschicht-Reinigung. Mittels Hydrozyklon ist ein unterbrechungsarmer Betrieb zu erwarten, aber bei Mischungen aus Fasern und Partikeln unterschiedlicher Längen und Dichten dürfte ein hoher Wirkungsgrad unsicher sein. Bei der Flotation heftet sich bestenfalls hydrophobes MP an ins Wasser eingeblasene Luftbläschen, steigt zusammen an die Wasseroberfläche und bildet dort einen abschöpfbaren Schaum.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Summenparameter GUS zusammen mit der MP-Analytik haben sich für die quantitative Abschätzung des MP-Eintrags aus Textilien ins Abwasser bewährt. Diese Methodenkombination ist sowohl für industrielles und gewerbliches Abwasser als auch kommunales Abwasser geeignet [11, 16].

Die ermittelten Freisetzungsmengen bedeuten, dass MP aus Textilien nicht zu den Top 10 der mengenrelevantesten MP-Quellen gehört und, aufgrund der gängigen Praxis der Abwasserreinigung, gegenüber anderen Quellen eher einen kleinen Anteil in Gewässern darstellen. Viele *Fast-Fashion*-Unternehmen setzen heute auf günstigen Preis anstatt Qualität. Eine längere Lebensdauer und bessere Verarbeitungsqualität (unbeschädigte

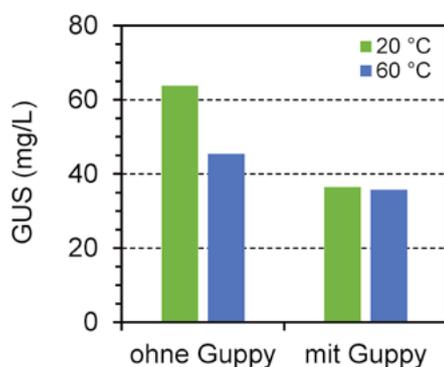


Fig. 8 GUS-Konzentrationen im Abwasser nach dem Waschen der Mikrofaser-Tücher im *Guppyfriend*-Beutel.

Fasern nach dem Herstellungsprozess und kein mechanisches Zuschneiden von PES-Stoffen) bei der Herstellung von Textilien würden höchstwahrscheinlich schon die MP-Emissionen reduzieren.

Benutzer von Tumblern sollten über die fachgerechte (trockene) Entsorgung der Flusen in den Kehrriech stärker sensibilisiert werden. Herstellern ist abzuraten, eine automatische Siebreinigung ins Abwasser vorzusehen, weil diese den MP-Eintrag ins Abwasser um bis zu 20% GUS erhöhen wird.

Mit dem *Guppyfriend*-Waschbeutel lässt sich die MP-Menge im Waschwasser lediglich um 25 bis 45% reduzieren. Trotzdem nutzt diese Massnahme nur bedingt, denn sowohl die Befüllung der kleinen Stoffsäcke als auch die Reinigung sind mühsam, und damit werden diese Waschbeutel häufig nicht fachgerecht eingesetzt.

Das separate Vorwaschen von synthetischer Kleidung im industriellen Massstab ist als weitere Massnahme denkbar, um den Eintrag von MP aus Textilien um 10 bis 30% zu reduzieren. Nachfolgend ist zwingend eine Vorreinigung dieser Waschwässer notwendig. Sofern das Vorwaschen mit wenig Waschwasser, Waschmittel und einem speziellen Waschprogramm erfolgt, könnte der ökologische Nutzen den Wasser- und Energieverbrauch überwiegen.

Haushaltstypische Waschmaschinen mit technischen Rückhaltverfahren auszurüsten, erscheint dagegen weder technisch sinnvoll noch für einen Dauereinsatz geeignet. So zeigt die MP-Auswertung, dass feinste Filter nötig wären, um die Anzahl MP-Teilchen massgeblich zu reduzieren. Eine signifikante Entlastung des kommunalen Abwassers von MP, auch unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit, ist vor allem durch effiziente Kläranlagen, idealerweise mit nachfolgender Filtration, zu erreichen (*end-of-pipe*). Schweizer Kläranlagen sind heute in der Lage, mehr als 95 % des MP aus dem Abwasser zu filtern, ohne dass eine zusätzliche bauliche oder betriebliche Anpassung erforderlich wäre. Durch die vollständige Verbrennung von Klärschlamm in der Schweiz ist zudem dieser Entsorgungsweg von der Umwelt vollständig entkoppelt.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *GESAMP (2015): Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Kershaw, P. J. (Hrsg.) Report, No. 90, London*
- [2] *Stöven, K. et al. (2015): Mikroplastik: Ein selbst verschuldetes Umweltproblem im Plastikzeitalter. Journal f. Kulturpflanzen, 67(7): 241-250*
- [3] *Boucher, J., Friot, D. (2017): Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. IUCN, Gland*
- [4] *Bertling, J. et al. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik – Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Fraunhofer-Institut UMSICHT, Oberhausen*
- [5] *WHO (2019): Microplastics in Drinking Water. Bericht, World Health Organization, Genf*
- [6] *Koelmans, A. A. et al. (2019): Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. Water Research, 155: 410-422*
- [7] *Rocha-Santos, T., Duarte, A.C. (2015): A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behaviour of microplastics in the environment. Trends Anal. Chem., 65: 47-53*
- [8] *Schwabl, P. et al. (2019): Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series. Ann. Intern. Med., 171(7): 453-457*
- [9] *Browne, M. A. et al. (2011): Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. Environ. Sci. Technol., 45: 9175-9179*
- [10] *Kawecki, D., Nowack, B. (2019): Polymer-Specific Modeling of the Environmental Emissions of Seven Commodity Plastics As Macro- and Microplastics. Environ. Sci. Technol., 53: 9664-9676*
- [11] *Cabernard, L. et al. (2016): Mikroplastik in Abwasser und Gewässern. Aqua & Gas 7/8, 78-85*
- [12] *Kägi, R. et al. (2011): Behavior of Metallic Silver Nanoparticles in a Pilot Wastewater Treatment Plant. Environ. Sci. Technol., 45: 3902-3908*
- [13] *Magnusson, K.; Noren, F. (2014): Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm*
- [14] *Murphy, F. et al. (2016): Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. Environ. Sci. Technol., 50(11): 5800-5808*
- [15] *Talvitie, J. et al. (2015): Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics?*

> SUITE DU RÉSUMÉ

du dixième lavage, les différences se réduisent. Les charges diminuent de 2,2 g/kg à 0,2 g/kg GUS pour le linge en laine polaire et oscillent entre 0,2 et 0,3 g/kg GUS pour le linge mixte.

Durant le cycle de vie, les MP émis par la laine polaire qui parviennent dans les eaux usées représentent près du double de ceux provenant du linge mixte (29,4 millions contre 15,3 millions de MP par kilogramme de textiles), et en moyenne 0,59 million de MP pour 1 kg pour la laine polaire et 0,31 million de MP pour 1 kg pour le linge mixte. Le nombre de particules de MP se compose d'environ 90% de particules et 10% de fibres, avec une part importante de particules d'une taille < 20 µm. Pour le linge mixte, tous les lavages ont émis 75% de particules, soit 3 fois plus de particules que de fibres.

0,05 g/kg de peluches a été recueilli dans le sèche-linge après chaque séchage. L'élimination avantageuse des peluches avec les ordures ménagères ne doit pas être sapée par le rinçage du tamis à peluches dans les eaux usées.

Dans une hypothèse de linge mixte calculée pour la Suisse, on obtient une charge annuelle libérée de 23,1 à 80,8 t/a de MP, dont seulement 1,2 à 4,0 t/a parviennent dans les cours d'eau, car les stations d'épuration retiennent au moins 95% GUS. Dans l'hypothèse d'un linge en laine polaire, environ 0,9 t/a de l'émission annuelle de MP (19,1 t/a) parvient chaque année dans les cours d'eau.

Les résultats d'essais avec le sac de lavage *Guppyfriend* affichent une retenue de 27 à 44% GUS. La faible retenue s'explique par le maillage grossier du tissu du sac.

Si les textiles, en particulier les vêtements en laine polaire, étaient lavés avant la vente et ces eaux usées épurées séparément, on pourrait compter sur une réduction des émissions de MP de 10 à 20%.

Dans le cas des machines à laver, des procédés techniques décentralisés d'épuration des eaux usées paraissent peu efficaces pour réduire les MP dans les cours d'eau. À l'inverse, des stations d'épuration bien conçues représentent la meilleure protection pour les cours d'eau contre les MP issus des textiles, à condition que les boues d'épuration soient brûlées et non épandues dans les champs.

- tics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea. *Wat. Sci. Technol.*, 72(9): 1495-1504
- [16] Hodel, P.; Rohr, M. (2016): Mikroplastik in kommunalem und industriellem Abwasser in der Schweiz. Studienarbeit, HSR Hochschule für Technik, Rapperswil
- [17] Estahbanati, S.; Fahrenfeld, N.L. (2016): Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water. *Chemosphere*, 162: 277-284
- [18] Eurostat (2015): [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2015_\(%25_of_total_mass\).png&oldid=349089](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2015_(%25_of_total_mass).png&oldid=349089)
- [19] Magnusson, K. et al. (2016): Swedish sources and pathways for microplastics to the marine environment. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm
- [20] Hann, S. (2018): Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products. Final report, Eunomia Research & Consulting Ltd
- [21] Hernandez, E. et al. (2017): Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release During Washing. *Environ. Sci. Technol.*, 51(12): 7036-7046
- [22] Pirc, U. et al. (2016): Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing. *Environ. Sci. Poll. Res.*, 23: 22206-22211
- [23] Textile Value Chain (2012): <https://textilevaluechain.in/2012/05/27/polyester-change-dynamics>
- [24] Greenpeace (2015): Wegwerfware Kleidung - Repräsentative Greenpeace-Umfrage zu Kaufverhalten, Tragedauer und der Entsorgung von Mode. Greenpeace e. V., Hamburg
- [25] Euromonitor (2018): Market Research. www.euromonitor.com
- [26] IKW (2015): Zahlen zum Waschen in Deutschland 2014. Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e. V., Frankfurt am Main
- [27] wfk (2019): Hygienische Aufbereitung empfindlicher CI-Kleidung mit plasmaaktiviertem Wasserdampf. Forschungsbericht IGF 19034 N, wfk - Cleaning Technology Institute e. V., Krefeld
- [28] Kelly, M. R. et al. (2019): Importance of Water-Volume on the Release of Microplastic Fibers from Laundry. *Environ. Sci. Technol.*, 53(20): 11735-11744
- [29] Folkö, A. (2015): Quantification and characterization of fibers emitted from common synthetic materials during washing. Report for Käppala
- [30] De Falco, F. et al. (2018): Evaluation of Microplastic Release Caused by Textile Washing Processes of Synthetic Fabrics. *Environ. Pollut.*, 236: 916-925
- [31] McIlwraith, H.K. et al. (2019): Capturing microfibers - marketed technologies reduce microfiber emissions from washing machines. *Marine Pollution Bulletin*, 139: 40-45

SCHNECKENPUMPEN

SCHNECKENPUMPEN

Revision • Fabrikation • Trogsanierung

Service und Revision von
Schneckenpumpen-Anlagen

Neuanlagen inkl. Montage von
«Landustrie» Schneckenpumpen



arnold systems
anlagen-technik

arnold systems ag • Industriestrasse 19 • 6260 Reiden
Tel. +41 (0)62 296 81 81 • Fax +41 (0)62 296 08 27
www.arnoldsystems.ch • info@arnoldsystems.ch

Faszination Wasser



**BRUNNER
PUMPEN**

BRUNNER-ANLIKER AG
8302 Kloten, Schweiz
Tel. 044 804 21 00
brunnerpumpen.ch

Wir bringen Wasser in Bewegung