



Vergleichende dynamische Bildanalyse mittels FlowCam® zur Bestimmung der Anzahl entstehender Partikeln während des Wasserkochens in Kunststoff- und Glaswasserkochern

Michael Toni Sturm^{1,3}, Sven Kluczka², Axel Wilde², Katrin Schuhen¹

¹Wasser 3.0 / abcr GmbH, ²Anasysta e.K,

³Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Engler-Bunte-Institute (EBI), Wasserchemie und Wassertechnologie

Zusammenfassung

In vielen Alltagsprodukten, die Kunststoffe enthalten, werden durch mechanische, thermische oder sonstige Einflüsse kleinste Kunststoff-Partikel generiert und gelangen auf verschiedenen Transportwegen in die Umwelt. Diese Partikel haben nicht nur eine lange Lebensdauer, sondern können im Ökosystem nur sehr langsam abgebaut werden. Schädigungen von Mensch und Tier sind möglich, wenn Partikel beispielsweise über die Nahrung aufgenommen werden. Anhand von Wasseruntersuchungen vor und nach dem Aufkochen in Kunststoff-basierten Wasserkochern im Vergleich zu einem Glaswasserkocher wurden die Anzahl entstehender Partikel bestimmt. Die Ergebnisse werden in diesem Paper diskutiert.

1 Einleitung

Viele Alltagsgegenstände bestehen teilweise komplett oder in Teilen aus Kunststoffen [38]. Während der private und gewerbliche Endverbrauch von Kunststoffen als „reines“ Kunststoffprodukt (z.B. Verpackung) oder als Teilkomponente eines Systems (z.B. Automobil) 2015 in Deutschland noch ca. 12,06 Mio. t betrug, stieg der Wert 2017 bereits auf ca. 14,3 Mio. t [6,7,20]. Weltweit sind ähnliche Anstiege in Produktion und Verarbeitung von Kunststoffen zu verzeichnen (Abbildung 1).

Der am häufigsten hergestellte und verarbeitete Kunststoff ist, neben Polypropylen, Polyethylen, das beispielsweise in Plastiktüten oder Mülltonnen steckt [31]. Kunststoffe entstehen durch

spezielle chemische Verfahren. Einer der wichtigsten Rohstoffe ist dabei das Erdöl. Je nach Zutaten und Begleitumständen dieser chemischen Verfahren kann der Kunststoff am Ende verschiedene Eigenschaften haben, die von elastisch, hitzebeständig bis hin zu bruchfest reichen [31]. Seit dem Start der Massenproduktion von Plastik in den 1950ern ist es kaum noch aus dem Alltag wegzudenken [15,31].

Durch Abbaureaktionen von Kunststoffen entsteht Mikroplastik, welches neben der allgemeinen Vermüllung durch Plastik derzeit eines der größten und meist diskutierten Umweltprobleme darstellt. [24]. Betrachtet man den Abbauprozess von Kunststoffen, so fallen mehrere Abbauewege auf [2,22,40]. Der Abbau von Polymeren kann durch Wärme (thermischer Abbau), Sauerstoff (oxidativer und thermisch-oxidativer Abbau), Licht (Photoabbau), Witterungseinflüsse (im Allgemeinen

UV/Ozonabbau) induziert werden. Polymere bauen sich während ihrer Lebensdauer kontinuierlich ab bzw. wandeln sich um. Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine stetige Abnahme der (mechanischen) Eigenschaften, die durch Änderungen des Molekulargewichts und der Molekulargewichtsverteilung sowie der Zusammensetzung des Polymers verursacht werden. Andere mögliche Änderungen umfassen Bindungsspaltung, -bruch, Farbveränderungen, Rissbildung und Gewichtsverlust. Übrig bleiben nach diesen langsamen Umwandlungsschritt Kunststoffteile, die kleiner als 5 mm sind. Diese werden als Mikroplastik definiert [9,11].

Mikroplastik gelangt über die Nahrungskette oder durch Kontamination der Atemluft in den menschlichen Organismus [28,32,34,39]. Die Persistenz von Mikroplastik in Kombination mit steigenden Plastik- und Mikroplastikeinträgen

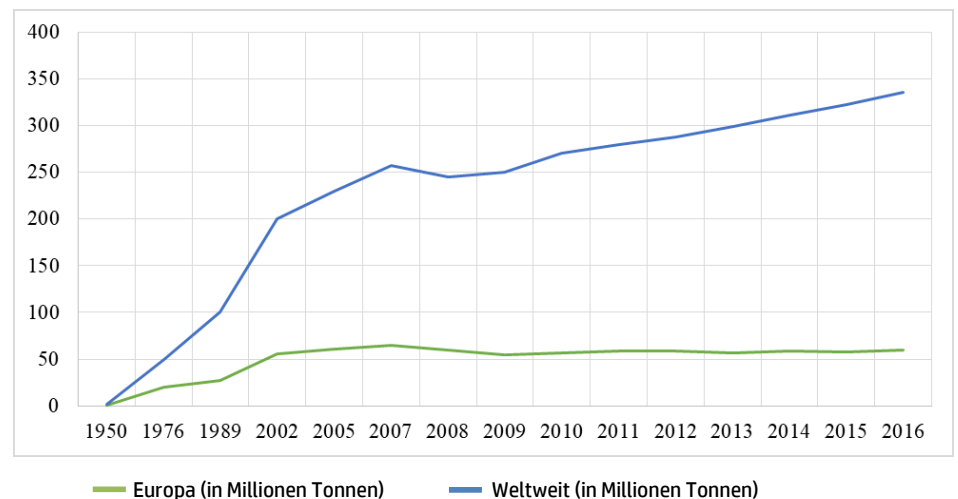


Abb. 1: Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den letzten Jahren von 1950 bis 2016 in Mio. t [5,36].

in die Umwelt sowie der stetigen Fragmentierung von bereits in die Umwelt eingetragenen Plastik, führen zu einer immer höheren Belastung der Umwelt und somit auch der Menschen. Verschiedene Untersuchungen konnten bereits zahlreiche schädliche Effekte von Mikroplastik auch auf den menschlichen Organismus nachweisen [13,39].

Bisher fehlen fundierte Aussagen darüber, ab welcher Aufnahmemenge ein Gesundheitsrisiko für den Menschen besteht. Dabei muss neben verschiedenen Größen der Polymerpartikel auch ihre chemische Zusammensetzung und deren Verhalten im Körper bzw. Organismus betrachtet werden. Mikroplastik konnte bereits in zahlreichen Nahrungsmitteln wie Meersalz, Honig, Zucker oder Bier nachgewiesen werden. Untersuchungen von Trinkwasser ergaben eine geringe Kontamination von wenigen Partikeln pro Kubikmeter (Varianz zwischen 0,4 bis 7 Partikel/m³) [21,25,30]. In Kunststoffflaschen gelagertes Trinkwasser zeigte mit durchschnittlich 325 Partikeln/m³ und maximal über 10000 Partikeln/m³ eine deutlich höhere Verunreinigung [29].

Wie sich die Partikelentstehung und Belastung in Alltagsgegenständen darstellt, wurde anhand des Wasserkochens in Wasserkochern aus Kunststoff und Glas experimentell erarbeitet und im Nachgang ausgewertet.

2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden vier Wasserkocher aus Kunststoff (Polyethylen, Polypropylen) von vier unterschiedlichen Herstellern (Tabelle 1) sowie ein Glaswasserkocher (Tabelle 2) getestet.

Für alle Messungen wurde partikelfreies Wasser verwendet, welches laut Herstellerangaben nach VDE 0510 entmineralisiert wurde. Des Weiteren wurde das Wasser vor der Verwendung noch einmal mit einem Millipak 100 (Millipore) Filter mit einer Porengröße von 0.22 µm vorfiltriert.

2.1 Inbetriebnahme der Wasserkocher gemäß der jeweiligen Bedienungsanleitungen

Vor den eigentlichen Messungen wurden alle Wasserkocher entsprechend der Angaben in den jeweiligen Bedienungsanleitungen vorbehandelt und gereinigt. Für die jeweiligen Wasserkocher wurden hierzu die in Tabelle 3 beschriebenen Schritte durchgeführt.

2.2 Versuchsbeschreibung

Nach der vorgeschriebenen Reinigung wurde jeder Wasserkocher für die Erstellung der realen Proben zu ca. 70% der maximalen Füllmarke (OK, Braun, Philips, CIATRONIK: ca. 1,25 l, Emerio: ca. 0,75 l) mit partikelfreiem Wasser befüllt. Vor jeder Füllung wurden 100 ml Wasser als Blindprobe abgefüllt. Das Wasser wurde im Wasserkocher gekocht und nach einer kurzen Abkühlzeit wurden 100 ml des gekochten Wassers als Probe entnommen. Das restliche Wasser im Wasserkocher wurde verworfen. Dieser Vorgang wurde für jeden Wasserkocher

dreimal wiederholt, so dass sich für jeden Wasserkocher 6 Proben ergaben (3x Blank, 3x Probe). Insgesamt wurden somit 30 Proben gemessen.

Tab. 1: Übersicht der getesteten Wasserkocher aus Plastik

Hersteller	Modell	Max. Füllmenge
Emerio	WK-108992	1 Liter
Philips	HD4646	1,5 Liter
Braun	Multiquick 3	1,7 Liter
OK.	OWK 103-W	1,7 Liter

Tab. 2: Übersicht des getesteten Wasserkochers aus Glas

Hersteller	Modell	Max. Füllmenge
CIATRONIC	WKS 3641	1.5 Liter

Tab. 3: Beschreibung der Prozedur vor der erstmaligen Inbetriebnahme der Wasserkocher nach Bedienungsanleitung

Hersteller	Reinigungsvorschrift für die Wasserkocher vor Inbetriebnahme
Emerio	Der Wasserkocher wurde bis zum angegebenen Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden drei Kochvorgänge durchgeführt, ohne das Wasser zwischendurch zu wechseln. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
Philips	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurde ein Kochvorgang durchgeführt. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
Braun	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Es wurden zwei Kochvorgänge durchgeführt. Zwischen den beiden Kochvorgängen wurde das Wasser ausgetauscht und anschließend entsorgt.
OK.	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden drei Kochvorgänge durchgeführt, ohne das Wasser zwischendurch zu wechseln. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
CIATRONIC	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Es wurden drei Kochvorgänge durchgeführt. Zwischen den drei Kochvorgängen wurde das Wasser jeweils ausgetauscht und anschließend entsorgt.

2.3 Analytische Bestimmungen der Partikelkonzentration mittels dynamischer Bildanalyse

Für die Bestimmung der Partikelzahlen in den einzelnen Proben wurde ein dynamisches Bildanalyse-System vom Typ FlowCam®8400 der Firma Fluid Imaging Technologies verwendet. Bei diesem System handelt es sich um eine Kombination aus einem optischen Mikroskop und einem Durchflusssytometer. Durch ein optisches System, welches an eine Digitalkamera gekoppelt ist, werden alle Partikel in einem definierten Probenvolumen erfasst, die in einem festgelegten Zeitraum eine Glas-Durchflusszelle passieren (Abbildung 2).

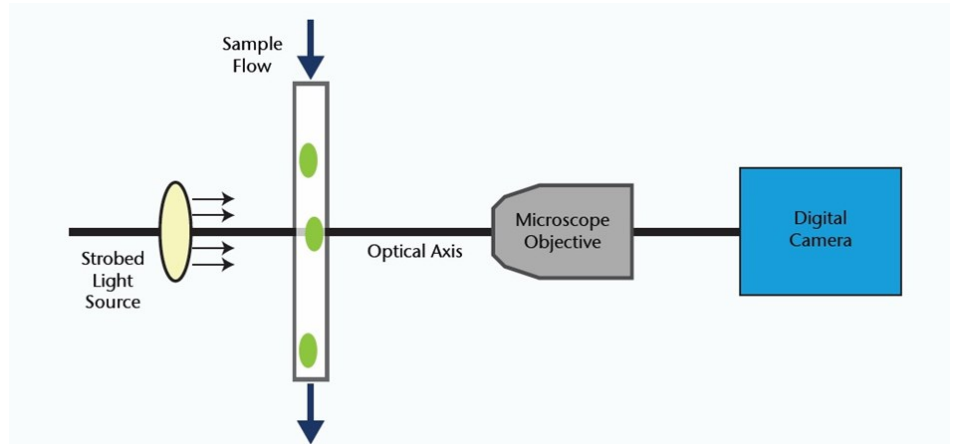


Abb. 2: Aufbau der Messapparatur bei der dynamischen Bildanalyse (Quelle: Fluid Imaging Technologies)

Bis zu 10.000 Bilder pro Minute können vom System erfasst werden und man erhält digitales Bild von jedem detektierten Partikel sowie über 30 unterschiedliche Parameter zur Beschreibung der Größe und der Morphologie der Partikel. Des Weiteren erhält man eine statistische Auswertung über die Partikelgrößenverteilung und die Partikelkonzentration pro Milliliter (siehe Abbildung 3). Die FlowCam®8400 lässt sich mit vier unterschiedlichen Objektiven ausstatten, wodurch eine Analyse von Partikeln in einem Größenbereich zwischen 1 und 1.000 µm möglich ist.

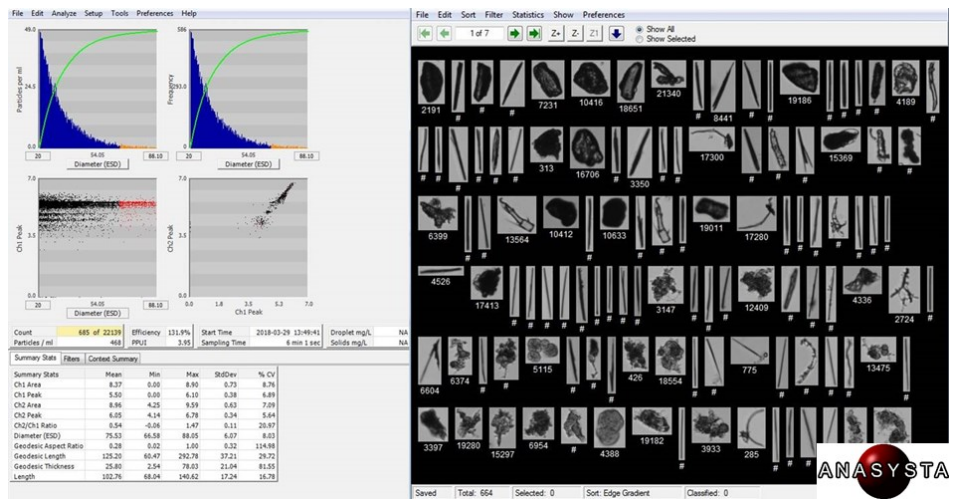


Abb. 3: Darstellung der Messergebnisse mit Visual Spreadsheet®. Im Histogramm auf der linken Seite wurden nur die größten Partikel ausgewählt (rot markiert). Im rechten Fenster werden die Bilder dieser markierten Partikel dargestellt (Quelle: Anasysta e.K.).

Für die durchgeführten Versuche wurde ein 10x-Objektiv und eine Durchflusszelle mit einer definierten Breite von 80 µm verwendet. Von jeder Probe wurde ein Probenvolumen von 1 ml mit einer Durchflussgeschwindigkeit von 0,2 ml/Minute analysiert, wodurch sich für jede Messung eine Messdauer von 5 Minuten ergibt. Vor jeder Messung wurde die Durchflusszelle mit 2 ml partikelfreiem Wasser und 2 ml Probe durchgespült. Nach den Messungen wurden die Proben luftdicht verschlossen und dunkel und gekühlt gelagert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Der innen mit Kunststoff verkleidete Wasserkocher von OK zeigt eine zunehmende Tendenz zur Partikelemission mit der Anzahl der Sidezyklen. Die anderen Wasserkocher auf Kunststoffbasis

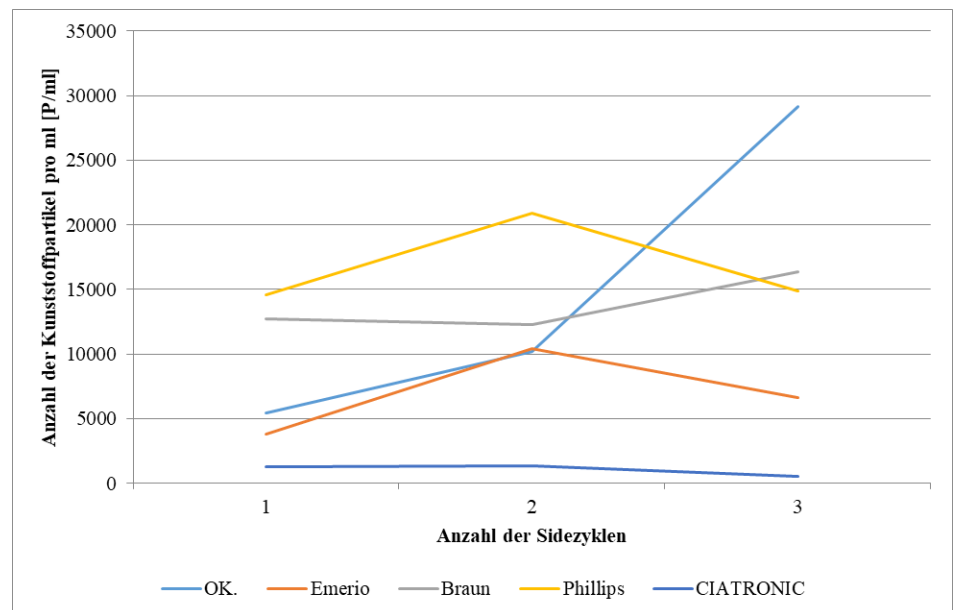


Abb. 4: Anzahl der abgegebenen Partikel je Siedezyklus

weisen schwankende Werte auf. Die gemessenen Daten sind in Tabelle 4 (siehe Anhang) zusammengefasst. Es fällt auf, dass die Mehrheit der Teilchen (P) im Größenbereich $<10\ \mu\text{m}$ liegt.

Der Wasserkocher von Emerio hat die niedrigste Partikelfreisetzung unter den Kunststoffkochern mit gemessenen Werten zwischen 3.779 und 10.433 Partikeln pro ml (P/ml). Der Wasserkocher der Firma Braun, der zwischen 12.294 und 16.396 P/ml liefert, erreicht deutlich höhere Werte, gefolgt vom Wasserkocher der Firma Philips mit 14.610 bis 20.936 P/ml.

Der OK. Wasserkocher gab im ersten Durchlauf nur 5.297 P/ml ab, die Werte stiegen jedoch auf den Maximalwert von 29.194 P/ml in den folgenden Durchläufen an. Mit einem Gesamtprobenvolumen von 0,75-1,25 l ist die Gesamtzahl der Partikel alarmierend hoch. Es wurden ein Minimum von 5 Millionen Partikeln im Emerio Wasserkocher im ersten Siedezyklus und ein Maximum von 33 Millionen Partikeln im OK. Wasserkocher im dritten Sidezyklus gemessen. Im Vergleich dazu enthält der CIATRONIC Wasserkocher aus Glas und Metall deutlich niedrigere Teilchenzahlen von 578 bis 1.351 P/ml. Außerdem konnte keine Veränderung der Partikelabgabe über die Zeit beobachtet werden. Die Unterschiede zwischen dem Glaswasserkocher und den Kunststoffwasserkochern sind in Abbildung 4 dargestellt. Die gemessenen Blindproben enthalten eine maximale Partikelanzahl von 304 P/ml, was eine geringe externe Kontamination der Proben zeigt.

Die rein optische Partikeldetektion erlaubt keine eindeutige Identifizierung von Kunststoffen oder Polymeren. Da das Wasser in den Wasserkochern auf Kunststoffbasis jedoch ausschließlich mit deren Kunststoff in Kontakt kommt und die Blindproben kaum Partikelbelastung aufweisen, können andere Partikelquellen ausgeschlossen werden. Somit besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass es sich um Kunststoff-

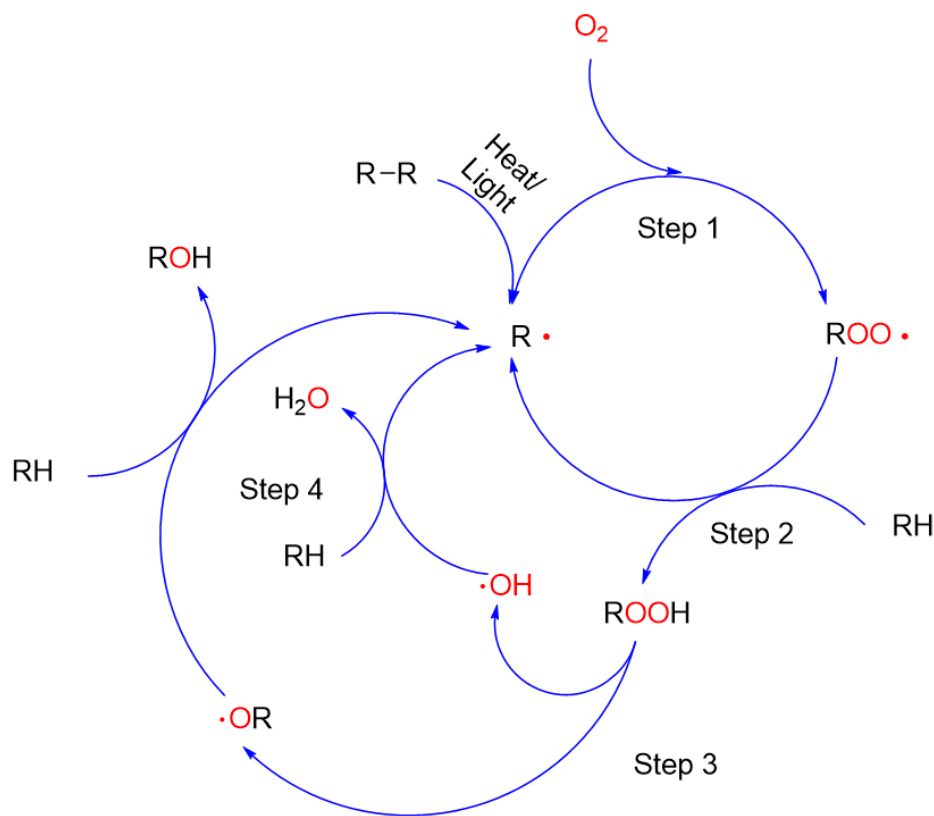


Abb. 5: Darstellung des Mechanismus der Abbaureaktion durch thermische Zersetzung oder UV-Einfluss von Polymerverbindungen (z.B. PE oder PP) [8].

partikel handelt, die durch die thermische Belastung der Wasserkocher emittiert werden.

Die Ergebnisse des Wasserkochertests zeigen eine signifikant höhere Partikelanzahl nach dem Kochen des Wassers in den Kunststoffwasserkochern, verglichen mit dem Wasserkocher aus Glas.

Im Allgemeinen hängt die Beständigkeit gegen Abbau von der chemischen Zusammensetzung des Polymers ab. Beispielsweise sind Polymere wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), wie sie in den getesteten Warmwasserbereitern verwendet werden, selbst bei Raumtemperatur sehr anfällig für thermischen Abbau und können einem Abbau nur widerstehen, wenn sie mit UV-Stabilisatoren und Antioxidationsmitteln formuliert werden [4,14,16,23]. Der allgemeine Mechanismus des thermooxidativen Abbaus von Polymeren ist bekannt und basiert auf einer typischen dreistufigen Radikalreaktion (Abbildung 5).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Untersuchungsergebnisse und den wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Polymeren und deren Verhalten bei Hitzekontakt oder unter UV Einfluss sowie dem Wissen, dass bei der Aufnahme von Mikroplastik über die Nahrung schätzungsweise 90% des aufgenommenen Mikroplastiks wieder ausgeschieden wird, ergeben sich aus den Partikelzahlen abschätzbare Auswirkungen auf Mensch und Umwelt [10,13,28,34].

Entscheidender Faktor für den Transport in Säugetieren ist die Größe des Partikels. Mikroplastikpartikel $<150\ \mu\text{m}$ können potenziell über die Darmschleimhaut aufgenommen werden und in das Lymphsystem gelangen, Partikel $<110\ \mu\text{m}$ können bereits über die Pfortader in den Blutkreislauf gelangen und Partikel $<20\ \mu\text{m}$ werden über den Blutkreislauf verteilt und können von dort in die inneren Organe gelangen. Partikel $<100\ \text{nm}$ können sogar ins Gehirn, die Geschlechtsorgane und über die Plazentaschranke in einen Fötus transportiert werden [28]. Allgemein gilt: Je kleiner die Partikel sind, desto

höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie in den Organismus aufgenommen werden [39]. Die Aufnahmewahrscheinlichkeit wird zusätzlich von der Hydrophobie sowie der Ladung und Funktionalisierung der Partikeloberfläche bestimmt. Geringe Hydrophobie und negative Oberflächenladung führen zu einer höheren Aufnahmewahrscheinlichkeit. Des Weiteren wird vermutet, dass sich durch die Anlagerung von Biomolekülen auf der Partikeloberfläche eine Proteinkorona bildet, welche das Aufnahme- und Transportverhalten im Körper ebenfalls stark beeinflusst [13,21,39].

Zusätzliche zu den Auswirkungen bei Aufnahme in den Organismus gilt es den Effekt einzuschätzen, dass Mikroplastik Schadstoffe wie beispielsweise DDT, Dioxin, oder Schwermetalle binden, transportieren und nach der Aufnahme in den Körper freisetzen kann [1,35]. Auch enthalten die meisten Polymermischungen herstellungsbedingt schädliche Inhaltstoffe wie Weichmacher oder Monomere, die einen direkten Einfluss auf den Organismus ausüben, da diese Stoffe meist potenziell als gefährlich und/oder krebserregend eingestuft werden [3,27]. Bei einer Einbettung dieser Stoffe ins Gewebe kann es hier

durch die Abgabe in das umliegende Gewebe zu einer lokal erhöhten Konzentration und punktuellen Schädigung kommen. Zu Gefahren von Mikroplastik als Fremdkörper in Gewebe gehören die Bildung von Läsionen und Entzündungen. Weiterhin können oxidativer Stress, Nekrosen und Schädigungen der DNA ausgelöst werden [28]. Zusätzlich sind neurologische Verhaltensstörungen möglich [33].

Um die Bildung und die Auswirkungen von Mikroplastik auf den Menschen und die Umwelt einzudämmen, gehört neben einer globalen Vermeidungsstrategie für Einwegplastikprodukte und Substitution von Kunststoffartikeln im Bereich des täglichen Bedarfs auch ein auf allen Ebenen (politisch, wirtschaftlich und wissenschaftlich) entwickeltes und vor allem für alle Menschen umsetzbares Recyclingkonzept, ebenso wie eine effiziente Entfernungsstrategie für wasserführende Systeme und Prozesse beispielsweise in der Kunststoffverarbeitung zu den aktuellen Lösungsansätzen [12,17,18,19,37].

Danksagung

Die Forschungsprojekte von **Wasser 3.0** werden mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch die Bereitstellung von ZIM-Projektmitteln durchgeführt.

Michael Sturm dankt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für das Promotionsstipendium.

Anhang

Tab. 4: Datenerfassung von Partikelanzahl und Verteilung pro Durchlauf (Nummer 1 – 3)

Durchlaufnummer und Hersteller	+50micron [ESD] P/ml	+25micron [ESD] P/ml	+10micron [ESD] P/ml	+5micron [ESD] P/ml	+2micron [ESD] P/ml	+1micron [ESD] P/ml	P/ml
OK.							
1	4	16	116	420	2665	2214	5435
2	0	1	34	153	4746	5262	10196
3	7	9	115	379	13588	15096	29194
OK. Blanks							
1	0	1	13	15	75	150	254
2	0	0	1	18	94	145	258
3	1	1	18	13	114	170	318
Emerio							
1	1	1	34	106	1180	2456	3779
2	0	0	23	73	4416	5920	10433
3	1	10	45	122	2770	3658	6607
Emerio Blanks							
1	0	0	6	15	104	110	235
2	0	0	4	12	65	113	194
3	0	0	0	4	85	214	304
Braun							
1	0	9	46	167	4890	7599	12711
2	0	9	51	178	3768	8288	12294
3	1	1	43	217	6320	9812	16396
Braun Blanks							
1	0	0	6	13	79	156	254
2	0	0	0	7	56	101	164
3	0	1	0	10	56	136	204
Philips							
1	0	1	54	376	6665	7514	14610
2	3	9	68	348	7827	12682	20936
3	1	4	38	242	5031	9570	14888
Philips Blanks							
1	0	1	6	10	79	126	223
2	0	0	1	12	65	97	175
3	1	1	4	4	75	175	261
CIATRONIC							
1	0	3	16	78	552	683	1281
2	0	1	16	97	490	747	1351
3	0	1	16	34	245	282	578
CIATRONIC Blanks							
5	0	0	3	6	126	139	274
6	0	1	6	9	97	128	241
7	0	0	4	12	63	85	164

Literatur

- [1]Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC (2014) *Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. Environmental pollution.* (Barking, Essex : 1987) 185:16–23.
- [2]Barnes, D. K. A., Galgani F, Thompson RC, Barlaz M (2009) *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments.* Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 364(1526):1985–1998.
- [3]Bergmann M, Gutow L, Klages M (2015) *Marine Anthropogenic Litter.*
- [4]Beyler CL, Hirschler MM (2002) *Thermal Decomposition of Polymers.* SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2 (Section 1, Chapter 7): 111–131
- [5]CHEManager (2018) *Kunststoff-Stoffströme in Deutschland.* Accessed 26 Nov 2018
- [6]Consultic, IK, PlasticsEurope, BVSE, VDMA, BKV (2016) *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung.* Accessed 05 Jun 2018
- [7]Conversio Market & Strategy GmbH (2018) *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017.* Accessed 26.22.2018
- [8]CROW polymerdatabase.com (2015) *Thermal-Oxidative Degradation of Polymers.* Accessed 26 Nov 2018
- [9]Eerkes-Medrano D, Thompson RC, Aldridge DC (2015) *Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs.* Water Research 75:63–82.
- [10]EFSA CONTAM Panel (2016) *Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood.* EFS2 14(6):30 pp.
- [11]Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, Borroero JC, Galgani F, Ryan PG, Reisser J (2014) *Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea.* PLoS one 9(12):e111913.
- [12]European Commission (2018) *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.* COM(2018) 28 final, Brussels
- [13]Galloway TS, Cole M, Lewis C (2017) *Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem.* Nature ecology & evolution 1(5):116.
- [14]Gardette M, Perthue A, Gardette J-L, Janecska T, Földes E, Pukánszky B, Therias S (2013) *Photo- and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content.* Polymer Degradation and Stability 98(11): 2383–2390.
- [15]Geyer R, Jambeck JR, Law KL (2017) *Production, use, and fate of all plastics ever made.* Sci. Adv. 3(7):e1700782.
- [16]Hakkarainen M, Albertsson A-C (2004) *Environmental Degradation of Polyethylene.* In: Albertsson A-C (ed) Long Term Properties of Polyolefins, vol 169. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 177–200
- [17]Herbort AF, Schuhen K (2016) *A concept for the removal of microplastics from the marine environment with innovative host-guest relationships.* Environmental Science and Pollution Research (24(12)):1–5.
- [18]Herbort AF, Sturm MT, Fiedler S, Abkai G, Schuhen K (2018a) *Alkoxy-silyl Induced Agglomeration: A New Approach for the Sustainable Removal of Microplastic from Aquatic Systems.* J Polym Environ 62(8):1–13.
- [19]Herbort AF, Sturm MT, Schuhen K (2018b) *A new approach for the agglomeration and subsequent removal of polyethylene, polypropylene, and mixtures of both from freshwater systems - a case study.* Environmental science and pollution research international (25(15)):15226–15234.
- [20]Hüthig GmbH (2017) *Plasticseurope: Kunststoff weithin beliebt.* Accessed 26 Nov 2018
- [21]Iñiguez ME, Conesa JA, Fullana A (2017) *Microplastics in Spanish Table Salt.* Scientific reports 7(1):8620.
- [22]Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL (2015) *Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean.* Science (New York, N.Y.) 347(6223):768–771.
- [23]Kuroki T, Sawaguchi T, Niikuni S, Ikemura T (1982) *Mechanism for long-chain branching in the thermal degradation of linear high-density polyethylene.* Macromolecules 15(6): 1460–1464.
- [24]Law KL, Thompson RC (2014) *Oceans. Microplastics in the seas.* Science (New York, N.Y.) 345(6193):144–145.
- [25]Liebezeit G, Liebezeit E (2013) *Non-pollen particulates in honey and sugar. Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment* 30(12):2136–2140.
- [26]Liebezeit G, Liebezeit E (2014) *Synthetic particles as contaminants in German beers. Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment* 31(9):1574–1578
- [27]Lithner D, Larsson A, Dave G (2011) *Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition.* The Science of the total environment 409(18):3309–3324.
- [28]Lusher A, Hollman PCH, Mendoza-Hill J (2017) *Microplastics in fisheries and aquaculture. Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety.* FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, vol 615. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

- [29]Mason SA, Welch VG, Neratko J (2018) *Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water*. *Frontiers in chemistry* 6:407.
- [30]Mintenig S, Gerdt G Dr., Löder M Dr. (2014) Abschlussbericht Mikroplastik in Trinkwasser. *Untersuchung im Trinkwasserversorgungsgebiet des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen*. Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie (Accessed 22.01.2019)
- [31]PlasticsEurope (2016) *Plastics – the Facts 2015*. An analysis of European plastics production, demand and waste data, Brussels, Belgium: Association of Plastics Manufacturers (Accessed 22.01.2019)
- [32]Prata JC (2018) *Airborne microplastics: Consequences to human health?* *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987) 234:115–126.
- [33]Rafiee M, Dargahi L, Eslami A, Beirami E, Jahangiri-Rad M, Sabour S, Amereh F (2018) *Neurobehavioral assessment of rats exposed to pristine polystyrene nanoplastics upon oral exposure*. *Chemosphere* 193:745–753.
- [34]Revel M, Châtel A, Mouneyrac C (2018) *Micro(nano)plastics. A threat to human health?* *Current Opinion in Environmental Science & Health* 1:17–23.
- [35]Rochman CM, Hentschel BT, Teh SJ (2014) *Long-term sorption of metals is similar among plastic types: implications for plastic debris in aquatic environments*. *PLoS one* 9(1):e85433.
- [36]Statista (2018) *Global plastic production from 1950 to 2016*. Accessed 25 Nov 2018
- [37]Sturm MT, Wilde A, Kluczka S, Schuhen K (2018) *Detektion von Mikroplastik im (Ab-)Wasser – Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen?* *Analytik-News – Das Online-Labormagazin*(6):1–6
- [38]Umweltbundesamt (2017) *Kunststoffabfälle*. Accessed 26 Nov 2018
- [39]Wright SL, Kelly FJ (2017) *Plastic and Human Health: A Micro Issue?* *Environmental science & technology* 51(12):6634–6647.
- [40]Wright SL, Thompson RC, Galloway TS (2013) *The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review*. *Environmental Pollution* 178:483–492.