



Kunststoffrecycling – Status quo und Ausblick

Uwe Lahl, Dirk Lechtenberg, Barbara Zeschmar-Lahl

Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie, 30.1.2024

Die Leitfragen

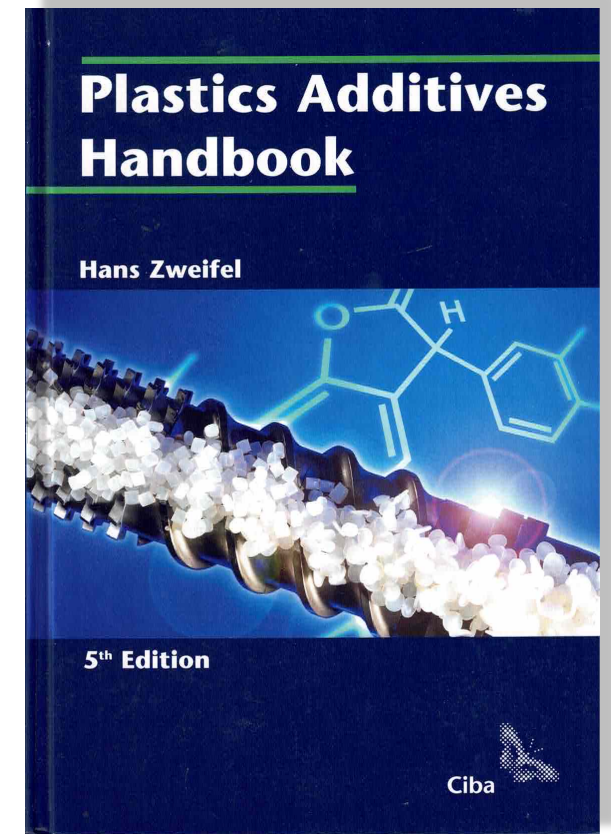
- Ist die Vision der 1970er Jahre, aus (gemischten post-consumer = PC) Kunststoffabfällen wieder neue Produkte machen zu können, heute noch realistisch?
- Was führen wir neben den Polymeren noch alles im Kreis?
- Wie viele Kreisläufe schafft das PC-Kunststoffrecycling?
- Wie funktioniert hochwertiges Recycling?



<https://www.sesotec.com/emea/fr/resources/food-safety-ueberblick-2>

Die Vielfalt

- Kunststoffe sind ein Gemisch aus Polymeren mit im Mittel einigen bis über 50 Gew.-% an Additiven.
- **Handbücher** geben einen guten Überblick darüber, welche Additiv-Gruppen wofür eingesetzt werden:
 - Weichmacher, Flammschutzmittel, Stabilisatoren, Antioxidantien, Säurefänger, Schmiermittel, Farbstoffe / Pigmente, Optische Aufheller, Oberflächenbehandler, Beschichtungsmittel, Biozide, Emulgatoren, Trennmittel, Treibmittel, Prozesshilfsstoffe, Antifoggingmittel, Antistatika, Streckmittel, Verstärkungsstoffe, Duftstoffe.
 - Hinzu kommen NIAS (Non Intentionally Added Substances).
- Jede dieser Gruppen wird durch knapp zehn bis über 100 Einzelstoffe repräsentiert.
- Die **gebräuchlichen Additive** insgesamt umfassen in Summe deutlich **über 1.000 Einzelstoffe**.



Die Vielfalt II

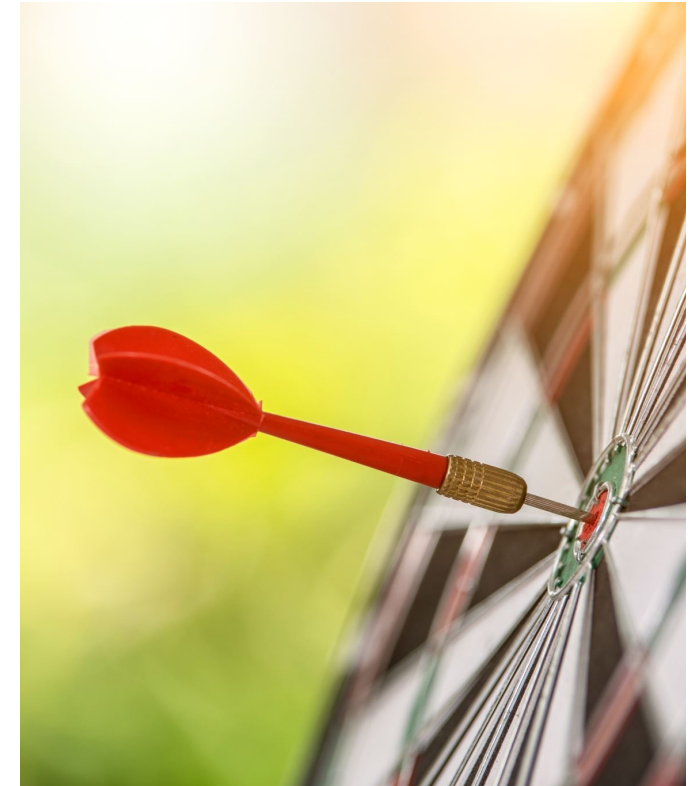
In heutigen Kunststoffprodukten ist das Polymermolekül in der Regel nicht mehr einheitlich; sogenannte **Homopolymere** nehmen ab.

- Polymere aus unterschiedlichen Monomeren (sog. Hetero- oder **Co-Polymere**) sind verbreitet.
- Kovalente Verbindungen zwischen unterschiedlichen Polymeren nehmen zu (**cross-linking**).
- Gemische mehrerer Polymere (sog. **Blends**) kommen verstärkt zum Einsatz.
- **Verbunde** aus Kunststoffen mit Kunststoffen oder anderen Materialien sind ebenfalls häufig anzutreffen.
- Es werden auch **Fasern/Gewebe** eingearbeitet.



Zwischenfazit I

- Diese heutige Vielfalt ist in gemischten post consumer (PC)-Kunststoffabfällen (Verpackungen, technische Geräte, PKW, Bau etc.) erwartungsgemäß besonders hoch.
- PC-Rezyklate sind ein Abbild dieser Vielfalt.
- **Neue hochwertige Produkte sind durch Polymerkompositionen und Additivrezepturen auf den jeweiligen Anwendungsfall hin optimiert.**
- PC-Rezyklate sind auf diesem hohen Niveau in der Regel nicht mehr integrierbar (dies gilt nicht für closed loop- und Produktionsrest-Recycling).
- Daher beobachten wir das Downcycling.



Die Kreisläufe

Kunststoffrecycling erfolgt zumeist über das erneute Aufschmelzen der Altkunststoffe.

- Hierbei werden Polymermoleküle geschädigt (Kettenverkürzungen, Oxidationen etc.).
- Die Migration von Additiven aus Produkten wird hierdurch erhöht.
- Es werden neue Schadstoffe gebildet (Non Intentionally Added Substances, NIAS → Backup).
- Verunreinigungen führen zu Materialmängeln.
- Mit jedem Kreislauf nehmen die Mängel zu.
- Rezyklate aus Verpackungsabfällen weisen oft üble Gerüche auf.
- Es gibt gravierende Vermarktungsprobleme.

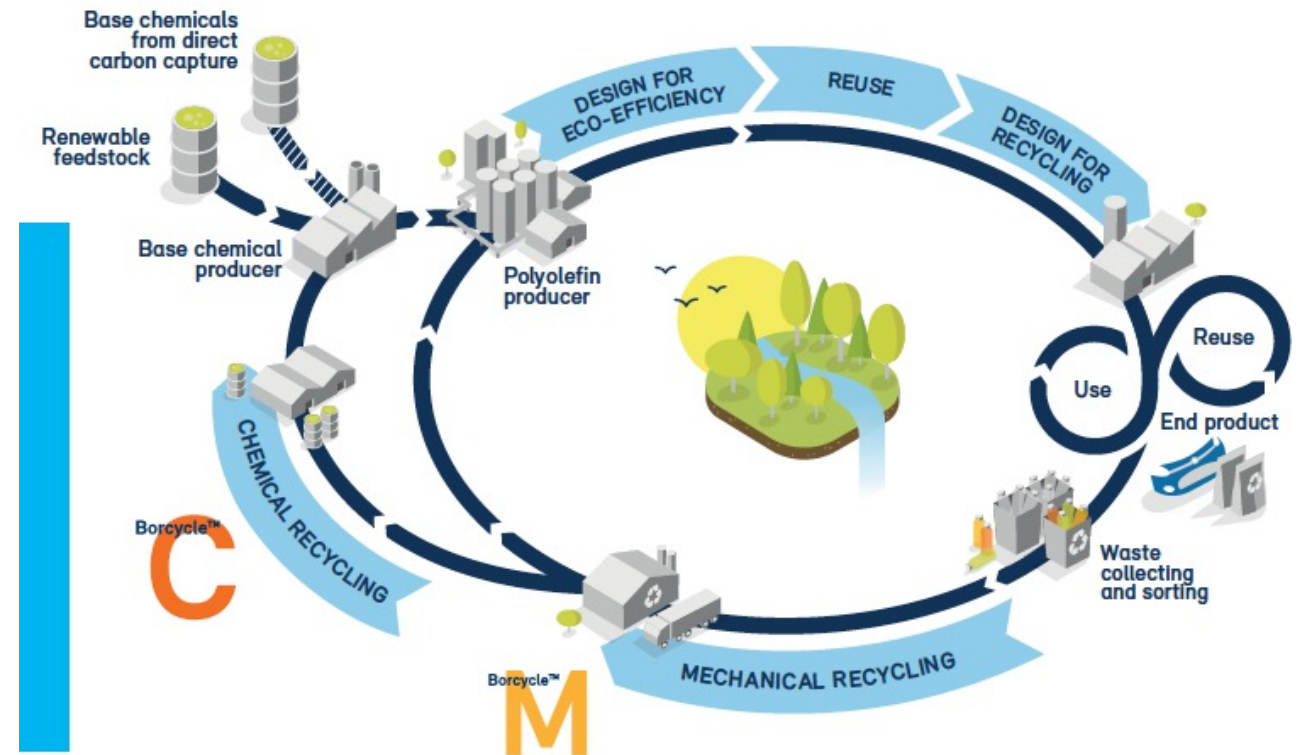


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Downcycling_symbol.svg#/media/File:Downcycling_symbol.svg

Zwischenfazit II

- Das Kreislaufkonzept benötigt genaugenommen unendliche Kreisläufe von Stoffen.
- Stoffliches Recycling von Glas oder Metallen schafft dies.
- Stoffliches Recycling von gemischten PC-Altkunststoffen schafft nur sehr wenige Kreisläufe – wenn überhaupt.
- Downcycling widerspricht dem Kreislaufkonzept.

Beispiel Borealis



<https://www.borealisgroup.com/storage/Polyolefins/Circular-Economy-Solutions/Borcycle/Borcycle-C-The-solution-for-high-purity-high-performance-recycled-materials.pdf>

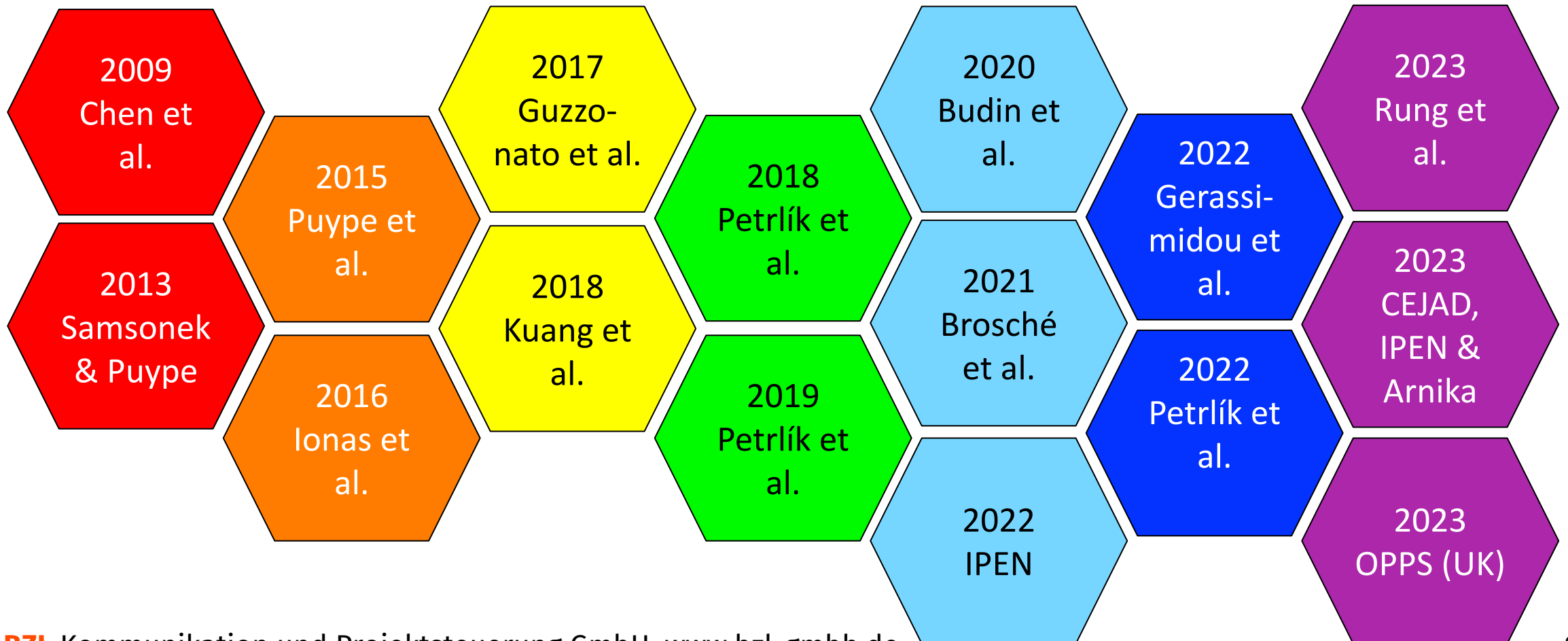
Verbotene Additive

Viele Additive, die in der Vergangenheit legal eingesetzt wurden, sind heute verboten, wie bestimmte **POPs** oder **SVHCs**. Eine Auswahl:

Funktion	Stoffgruppe	Vertreter	Wirkung/Risiko
Weichmacher	Phthalate	DEHP, DBP, BBP, DIBP	Hormonelle Wirkung → Fortpflanzungsgefährdung
Flammhemmer	Halogenverbindungen	Polybromierte und Polychlorierte Verbindungen, Chlorparaffine (CP)	Krebserzeugend, bioakkumulativ, entwicklungsneurotoxische Wirkungen
Stabilisatoren	Schwermetalle	Cadmium, Blei, Zinn	Nierentoxisch, krebserzeugend
Farbmittel	Organisches Pigment	Carbon Black, Azoverbindungen (aromatische Amine)	Möglicherweise krebserzeugend
Oberflächenbehandlung	Perfluorierte organische Stoffe, PFAS	Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) Perfluoroktansäure (PFOA)	Persistent, bioakkumulativ, gesundheitsschädlich, ggf. krebserzeugend

Risk Cycle

Risk Cycle = verbotene Additive gelangen über Rezyklate in neue Produkte! Die Liste der Untersuchungen hierüber ist lang. Hier eine **Auswahl** (mehr → Backup):



Verpackungen nicht betroffen?

Sind Verpackungen für den Lebensmittelbereich (**FCM**, Food Contact Materials) für das Recycling weniger problematisch, auch weil sie im Unterschied zu den technischen Kunststoffen nicht aus der „dunklen“ Vorzeit stammen?



- In einer **aktuellen** Studie (Zimmermann et al., 2022) wurden **197 Chemikalien** identifiziert, die absichtlich in Kunststoffmaterialien mit Lebensmittelkontakt eingesetzt werden und die nach den Kriterien der EU-Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit als gefährlich gelten (**FCCoCs**, Food Contact Chemicals of Concern). Einige von ihnen sind als **krebserregend**, **erbgutverändernd** oder **fortpflanzungsgefährdend** eingestuft.
- Und Additive sind in den Lebensmitteln festzustellen: Eine **aktuelle** Meta-Studie zu FCM-Verpackungen hat 116 Labor-Untersuchungen ausgewertet, die die Migration von Additiven in Lebensmittel gemessen haben. Es wurden **211 Substanzen** gefunden, die aus PE-Lebensmittelverpackungen in Lebensmittel übergetreten sind. Nur 25 % dieser Stoffe sind für den FCM-Bereich in der EU zugelassen (Gerassimidou et al., 2022).

- Gerassimidou, S.; Lanska, P.; Hahladakis, J.; Lovat, E.; Vanzetto, S.; Geueke, B.; Groh, K. S.; Muncke, J.; Maffini, M.; Martin, O. V.; Iacovidou, E. (2022): Unpacking the Complexity of the PET Drink Bottles Value Chain: A Chemicals Perspective. Journal of Hazardous Materials 430: 128410. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128410>
- Zimmermann, L.; Scheringer, M.; Geueke, B.; Boucher, J. M.; Parkinson, V.; Groh, K.J.; Muncke, J. (2022): Implementing the EU Chemicals Strategy for Sustainability: The case of Food Contact Chemicals of Concern. Journal of Hazardous Materials, 129167. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129167 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422009578/pdf?md5=f935c48924af08dcefb3f12126effcbe&pid=1-s2.0-S0304389422009578-main.pdf>

Risk Cycle – „schwarze Schafe“

Eine **aktuelle** Untersuchung von Verbraucherprodukten und Kinderspielzeugen mit **schwarzen Kunststoffen** aus allen Kontinenten dieser Welt hat **sehr besorgniserregende** Ergebnisse erbracht (**Behnisch et al., 2023**).



So wiesen mehr als 60 % der analysierten Produkte höhere Konzentrationen an Dioxinen auf als der in der Basler Konvention enthaltene vorläufige Grenzwert für giftige Abfälle (1 mg TEQ/t). Die Autoren bestätigen damit eigene ältere Ergebnisse (Petrлік et al., 2019; Budin et al., 2020).

- Behnisch, P.; Petrлік, J.; Budin, C.; Besselink, H.; Felzel, E.; Strakova, J.; Bell, L.; Kuepouo, G.; Gharbi, S.; Bejarano, F.; Jensen, G. K.; DiGangi, J.; Ismawati, Y.; Speranskaya, O.; Da, M.; Pulkrabova, J.; Gramblicka, T.; Brabcova, K.; Brouwer, A. (2023): Global survey of dioxin- and thyroid hormone-like activities in consumer products and toys. Environment International 178 (2023) 108079 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108079>
- Petrлік, J.; Behnisch, P.; Di Gangi, J. (2018): Toxic Soup – Dioxins in plastic toys. IPEN, Arnika, HEAL, and BUND. ISBN 978-80-87651-46-9 https://ipen.org/sites/default/files/documents/Toxic_Soup_brochure_en_web04.pdf
- Budin, C.; Petrлік, J.; Strakova, J.; Hamm, S.; Beeler, B.; Behnisch, P.; Besselink, H.; van der Burg, B.; Brouwer, A. (2020): Detection of high PBDD/Fs levels and dioxin-like activity in toys using a combination of GC-HRMS, rat-based and human-based DR CALUX reporter gene assays. Chemosphere 251, 126579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126579>
- Petrлік, J.; Brabcova, K.; Ozanova, S.; Beeler, B. (2019): Toxic Soup Flooding Through Consumer Products: Brominated dioxins recycled together with flame retardants into toys and other consumer products – now a widespread problem. DOI: 10.13140/ RG.2.2.17350.52805 und https://ipen.org/sites/default/files/documents/toxic_flood_web2.pdf

Risk Cycle – Erweiterte Herstellerverantwortung



(Keine Aktionen verfügbar)



Filter by...

food contact chemicals

Chemical name(s) OR

CAS registry number(s) OR

PFAS Oligomers

food contact material

main

Plastics

additional

Adhesive

Coating

Plastic lamin...

Printing ink

Wax

what type of experiment was performed

Extraction Migration into Food

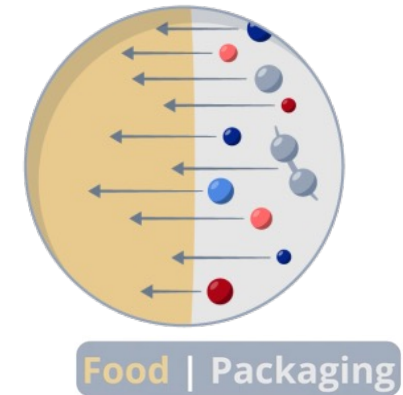
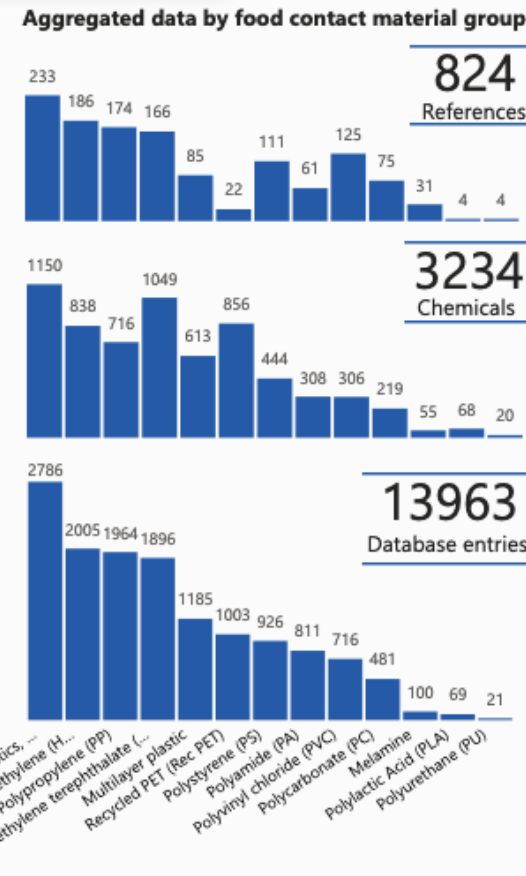
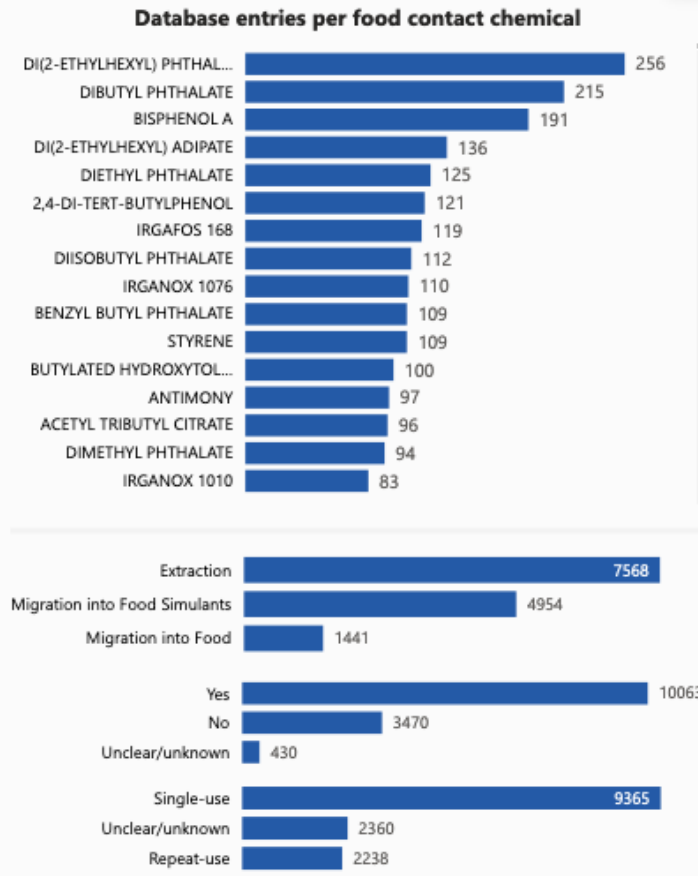
Migration into Food Simulants

whether the chemical was detected

No Unclear/unknown Yes

type of food contact article

Repeat-use Single-use



<https://www.foodpackagingforum.org/fcmigex>

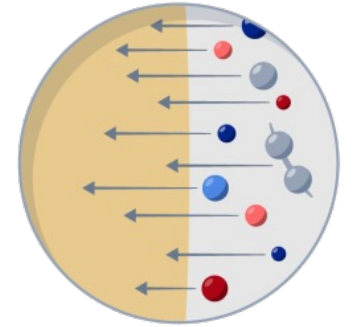
Risk Cycle – es kommt raus

Viele dieser Schadstoffe **migrieren** aus den Kunststoffen.

- Additive, die aus Kunststoffen freigesetzt werden und den Verbraucher belasten (Weber et al. 2023), sind insbesondere folgende toxikologisch besonders relevante Stoffe/Stoffgruppen:

- Weichmacher (insbesondere Phthalate),
- bromierte Flammschutzmittel,
- Organophosphor-Flammschutzmittel,
- Tetrabrom-Bisphenol A (TBBPA),
- kurz- und mittelkettige Chlorparaffine,
- Bisphenol A,
- Bisphenol-A-Dimethacrylat,
- Blei und Cadmium,
- Organozinn-Verbindungen,
- Formaldehyd,
- Acetaldehyd,
- 4-Nonylphenol,
- Methyl-tert-Butylether,
- Benzol und
- viele andere VOCs.

- Weber et al. (2023) haben darüber hinaus die Literatur zusammengestellt, die belegt, dass diese Belastungen bedenklich sind.

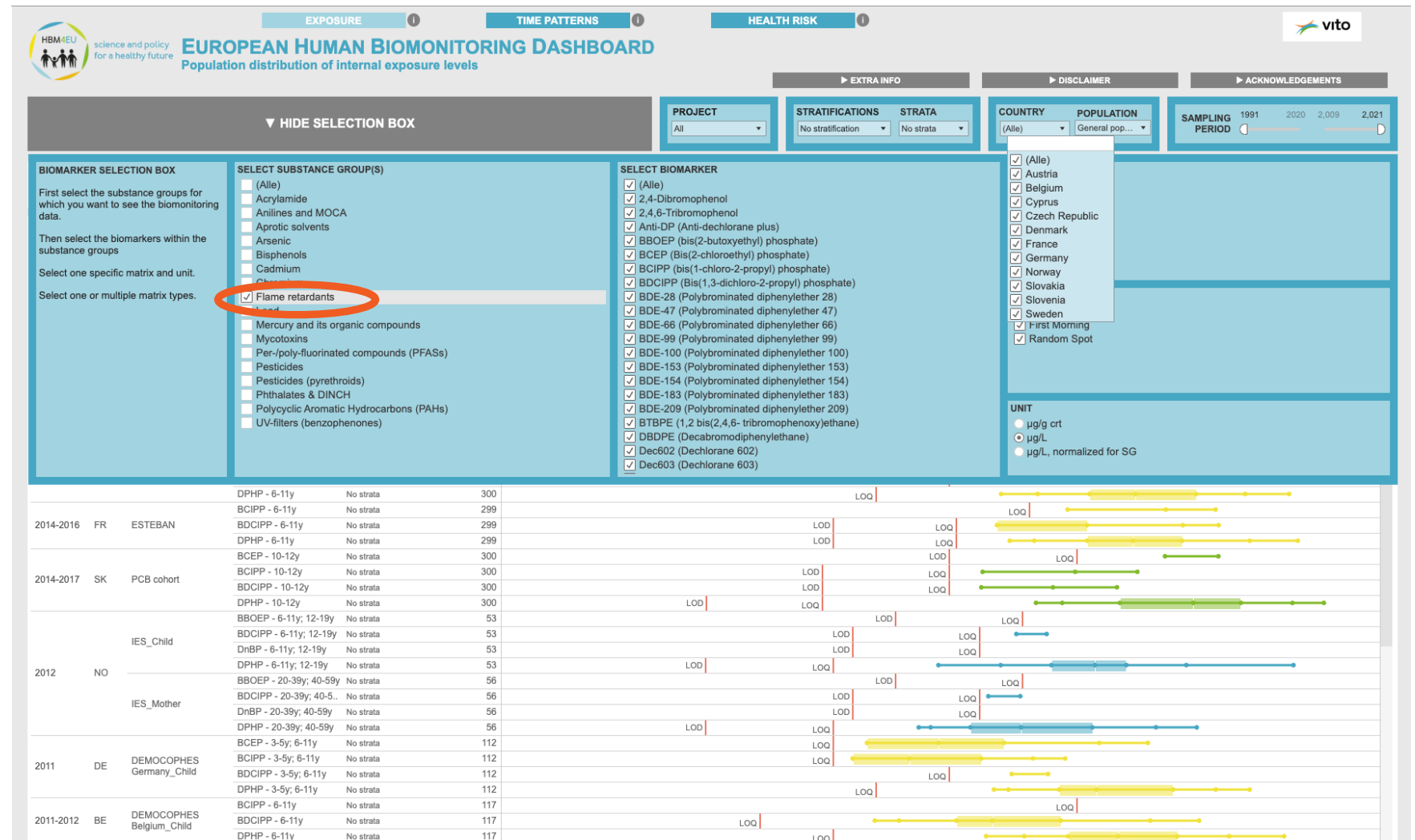


Weber, R.; Ashta, N. M.; Aurisano, N.; Wang, Z.; Outters, M.; De Miguel, K.; Schlummer, M.; Blepp, M.; Wiesinger, H.; Andrade, H.; Scheringer, M.; Fantke, P. (2023): Chemicals in plastics: a technical report. United Nations Environment Programme and Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions. Geneva. <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report>

Human Biomonitoring

Viele Additive sind im Menschen in besorgniserregenden Konzentrationen nachweisbar.

Weitere Literatur → Backup



<https://www.hbm4eu.eu/what-we-do/european-hbm-platform/eu-hbm-dashboard/>

EU: Regelungen gegen Risk Cycle

Die EU-Gesetzgebung hat das chemiepolitische Ziel, die Kreisläufe „zu säubern“. So gelten in der EU seit 2022 für die Verwendung von Rezyklaten für Kunststoffprodukte, die in Kontakt mit Lebensmittel kommen (FCM),

verschärfte Regelungen:

- Die Verwendung von Rezyklaten aus PC-Kunststoffabfällen für FCM ist grundsätzlich nicht mehr zulässig (außer PET-Flaschen).
- Zulässige Rezyklate müssen unbedingt aus dem FCM-Bereich stammen und dürfen nur bei **Herkunft aus gesicherten Kreisläufen („solely obtained from a product loop which is in a closed and controlled chain, and excludes collection from consumers“)** verwendet werden (→ Backup).

- European Commission: Food Safety. Legislation. https://food.ec.europa.eu/safety/chemical-safety/food-contact-materials/legislation_en?prefLang=de
- EU-Verordnung 2022/1616 der Kommission vom 15. September 2022 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 282/2008 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1616>
- European Commission: Food Contact Materials: Plastic Recycling https://food.ec.europa.eu/safety/chemical-safety/food-contact-materials/plastic-recycling_de

Zwischenfazit III

- Verbotene Additive werden durch das stoffliche Recycling weiter im Kreis geführt. Hohe Expositionen sind die Konsequenz.
- Wir empfehlen daher, die Verwendung von PC-Rezyklaten (aus Verpackungen oder technischen Produkten) für die Herstellung von Produkten mit direktem Kontakt zu Menschen bis auf weiteres **einzustellen**. Dies gilt insbesondere für:
 - Kinderspielsachen (EU: reguliert),
 - Food Contact Material (FCM)/Verpackungen (EU: reguliert),
 - Indoor-Produkte (noch nicht reguliert),
 - Kunstfasern (noch nicht reguliert).



Besser kontrollieren?

- Könnte das von uns vorgeschlagene Rezyklat-Verbot durch umfassende chemische Kontrollen vermieden werden?
- Das muss man natürlich diskutieren (für Deutschland in der Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie – NKWS). Wir sind skeptisch, ob der Vollzug so etwas hinbekommen würde (Stoffvielfalt, Internethandel, mangelnde Laborausstattung).
- Ein zeitlich befristetes Rezyklat-Verbot ist deutlich einfacher kommunizier- und kontrollierbar.
- Die Outdoor-Nutzung von Rezyklaten kann u.E. weiter stattfinden, aber keine höheren Schadstoff-Grenzwerte als für Neu-Produkte! Mit der Überwachung wäre der Vollzug schon gut beschäftigt.



Gesamtfazit I

1. Die Realität der letzten Jahrzehnte hat gezeigt, dass die Neuproduktion von Kunststoffartikeln immer ausgefeilter und anspruchsvoller geworden ist, was die Polymere, aber auch die Additiv-Rezepturen anbelangt.



Daher stellt sich insgesamt die **konzeptionelle Frage**, ob **stoffliches Recycling von vermischten Kunststoffabfällen (post consumer)** überhaupt in der Breite in Lage sein kann, die heutigen **Anforderungen an Neuprodukte** zu erfüllen.

Wir halten dies für **illusorisch**.

Gesamtfazit II

2. Nur 73 % der Kunststoffverpackungen aus Privathaushalten werden über die getrennte Sammlung erfasst. Das quantitative stoffliche Recycling-Ergebnis dieser getrennt gesammelten Kunststoffverpackungen ist mager (Rezyklate in neuen Produkten → Backup).

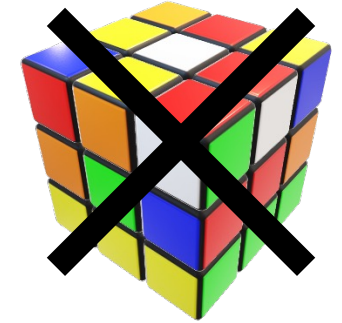


Die Recyclingprodukte aus diesen Abfällen sind fast nur minderwertig (Downcycling, geringe materialidentische Substitution, nicht „virgin“) und problematisch (Risk Cycle).

Rezyklate aus technischen Geräten können – je nach Herkunft – besonders problematisch sein.

Gesamtfazit III

3. Risk Cycle: Wir raten aus Vorsorgegründen dazu, PC-Rezyklate (aus Verpackungen, technischen Geräten o.a.) nicht mehr für Neu-Produkte zu verwenden, die eine hohe Verbrauchernähe aufweisen (insbesondere Kinderspielzeug, Food-Contact-Material / Verpackungen, Indoor-Produkte, Textilien).



Gesamtfazit IV

https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Industrie_Produkte/%C3%96kobilanz_PET-Einweg-LCA-PET-EW-Kreislaufflasche_der_MEG_inkl.CR.pdf

4. Wir schlagen weiter vor, Verpackungen besser **unvermischt** über **erweiterte Pfand- und Bringsysteme kontrolliert** zu erfassen und einem hochwertigen stofflichen Recycling zuzuführen (closed loop, gleiche Produktarten wie PET-Flaschen zu PET-Flaschen, PET-Schalen zu PET-Schalen).

Die bestehende getrennte Sammlung von Leichtverpackungen könnte **mittelfristig** in eine **trockene Wertstoff-Sammlung** umgewandelt werden, um z.B. auch bisher stofflich nicht oder schwer recycelbare Kunststoffe (z.B. technische Kunststoffprodukte) einzubeziehen und für das **chemische Recycling** bereit zu stellen.



Gesamtfazit V

5. Viele deutsche Kunststoffabfälle werden seit vielen Jahren **legal** in Entwicklungs- und Schwellenländer exportiert, in denen sie dann „**verwertet**“ werden. Hinzu kommen **illegale Exporte** (siehe z.B. Berichte von Interpol oder der Weltzollunion).

Zukünftig soll die Ausfuhr dieser Kunststoffabfälle aus der EU in Nicht-OECD-Staaten **verboten** und für die Ausfuhr in OECD-Staaten das **PIC-Verfahren** (vorherige schriftliche Notifizierung und Zustimmung) **vorgeschrieben** werden. → **Backup**

<https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/11/17/waste-shipments-council-and-parliament-reach-agreement-on-more-efficient-and-updated-rules/>



Zahlen aus <https://dserver.bundestag.de/btd/20/062/2006264.pdf>

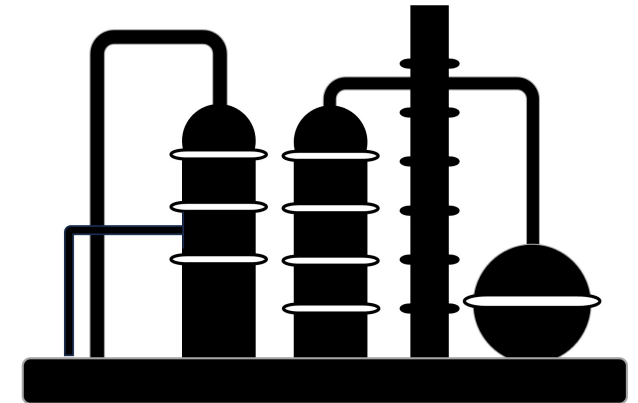


<https://www.fao.org/3/y5877e/y5877e.pdf>

Exkurs: Chemisches Recycling

Chemisches Recycling ist ein Oberbegriff für:

- die Depolymerisation des Polymers/der Polymere in (seine/ihre) Monomere, oder
- eine thermische Umwandlung der Kunststoffe zu insbesondere Pyrolyseöl und dann Verwendung des Öls als Naphtha-Ersatz für das Steam-Cracking, oder
- eine Vergasung und die Nutzung des Synthesegases als Erdgasersatz ebenfalls in der chemischen Industrie (beispielsweise zur Dampfreformierung), oder
- die Solvolyse, die Hydrierung, die Katalyse u.v.m.



Ausblick I

Koalitionsvertrag Ampel (2021): „Wir nehmen chemisches Recycling im Verpackungsgesetz als Recyclingoption auf.“

Welche Verfahren sind gemeint? Nehmen wir Pyrolyse:

- Vorteil: Hochwertiges Recycling, d.h. Qualität wie heutige neue Polymere („virgin plastic“), kein Risk Cycling.
- Der „Preis“ für dieses positive Ergebnis: Kunststoff-Input wird anteilig für die Energiebereitstellung „verzehrt“. Zusätzlicher externer Energiebedarf?
Es fehlen Betriebserfahrungen und Betriebsdaten!
- Kritik: Hoher Energiebedarf: trifft zu, aber siehe „Vorteil“, und: das Argument gilt für viele Bereiche der Transformation der Wirtschaft (Chemische Industrie beispielsweise).
- Kritik: Schadstoffemissionen: wichtiges Thema für die gesamte Abfalltechnik (u.a. Nanoplastikemissionen aus Sortieranlagen, Schadstoffbildung bei der Pyrolyse). Lösung über BREFs. Ganz übliches Verfahren in der EU.
- Kritik: Bisher keine Großanlagen: Erfahrung aus Kohlechemie. Viel im Aufbau, dezentrale Infrastruktur und (Mitbe)Nutzung von vorhandenen chemischen Industrieanlagen.



Ausblick II

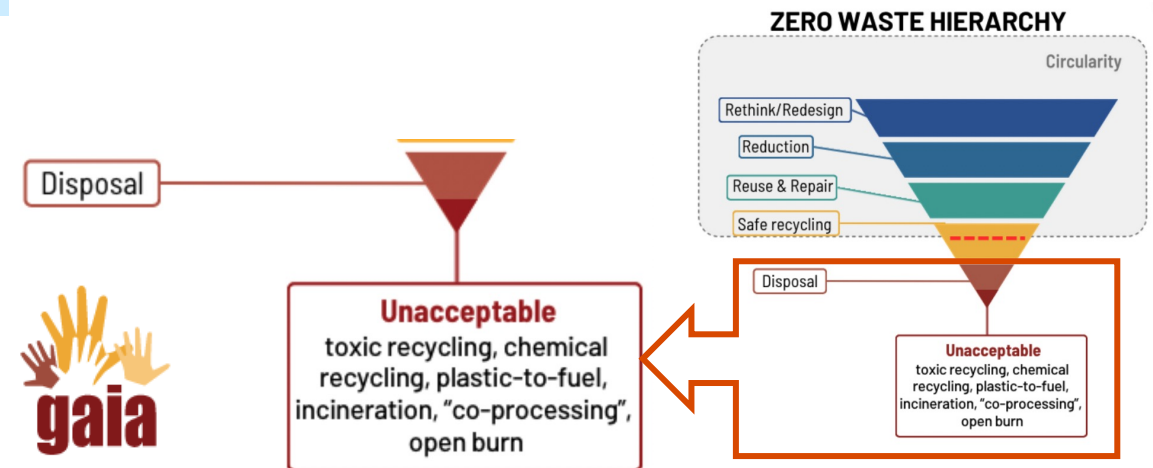
Techniken werden sich bis 2050 deutlich verändern, beispielsweise:

- Müllverbrennung: Upgrade, beispielsweise Vorsortierung und CCU/CCS.
- Stoffliches Recycling: bessere Sortiertechniken, chemische Kontrollen/ digitaler Produktpass/KI, Mindeststandards § 21 (3) VerpackG/*Design for Recycling*.
- Chemisches Recycling: Investitionsboom, Rohstoffwende der Kunststoffindustrie, open loop-Konzepte, Betriebserfahrungen, Nachsteuern, Emissionen/BREFs.

2050

Warum nicht eine konzeptionsoffene Hierarchie in Leistungsgruppen?

- Hochwertige Verwertung beispielsweise: Klimaneutralität, > 50 % Kohlenstoff-Recycling, keine relevanten Schadstoffemissionen, kein Risk Cycle. Techniken auf diesem Niveau ergänzen sich.
- Intelligente Antwort auf „Zero Waste Hierarchy“ erforderlich!



<https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2023/11/INC3-booklet.pdf>

Technologieoffenheit und Optimismus



Kontakt



Prof. Dr. habil. Uwe Lahl,
Ministerialdirektor i.R.

BZL Kommunikation und
Projektsteuerung GmbH
Lindenstr. 33
D-28876 Oyten
Fon +49 4207 699 837
Mobile +49 170 100 6513
ul@bzl-gmbh.de
www.bzl-gmbh.de



BACKUP

Referenzen NIAS (Auswahl), Folie 6

- Alvarado Chacon, F.; Brouwer, M.; van Velzen, E. (2020): Effect of Recycled Content and rPET Quality on the Properties of PET Bottles, Part I: Optical and Mechanical Properties. Packaging Technology and Science 33(2): 347–357.
<http://doi.org/10.1002/pts.2490>
- Bradley, E.; Coulier, L. (2007): An investigation into the reaction and breakdown products from starting substances used to produce food contact plastics. Report FD 07/01.
<https://www.foodpackagingforum.org/fpf-2016/wp-content/uploads/2014/06/Bradley-and-Coulier-2007.pdf>
- Geueke, B. (2013): Dossier – Non-intentionally added substances (NIAS). Dossier of the Food Packaging Forum. April 2013.
doi.org/10.5281/zenodo.33514.
https://www.foodpackagingforum.org/fpf-2016/wp-content/uploads/2015/11/FPF_Dossier03_NIAS.pdf
- Geueke, B. (2018): Dossier – Non-intentionally added substances (NIAS). Dossier of the Food Packaging Forum. June 2018.
DE: https://www.foodpackagingforum.org/fpf-2016/wp-content/uploads/2018/06/FPF_Dossier03_NIAS_German.pdf,
EN: https://www.foodpackagingforum.org/fpf-2016/wp-content/uploads/2018/06/FPF_Dossier03_NIAS_2nd-edition.pdf
- Geueke, B.; Groh, K. J., Maffini, M. V.; Martin, O. V.; Boucher, J. M.; Chiang, Y.-T.; Gwosdz, F.; Jieh, P.; Kassotis, C. D.; Łańska, P.; Myers, J. P.; Odermatt, A.; Parkinson, L. V.; Schreier, V. N.; Srebny, V.; Zimmermann, L.; Scheringer, M.; Muncke J. (2023): Systematic evidence on migrating and extractable food contact chemicals: Most chemicals detected in food contact materials are not listed for use, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63:28, 9425-9435, DOI: 10.1080/10408398.2022.2067828 <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2022.2067828>
- Pan, H. (2018): The Use of Solvents in the Plastics Industry and Safer Alternatives. September 17, 2018
<https://www.plasticsfacts.com/blog/2018/9/17/the-use-of-solvents-in-the-plastics-industry-and-safer-alternatives>
- Rung, C.; Welle, F.; Gruner, A.; Springer, A.; Steinmetz, Z.; Munoz, K. (2023): Identification and Evaluation of (Non-) Intentionally Added Substances in Post-Consumer Recyclates and Their Toxicological Classification. Recycling 8(1): 24.
<https://doi.org/10.3390/recycling8010024>

Referenzen (Auswahl), Folie 9

- Brosché, S.; Strakova, J.; Bell, L.; Karlsson, T. (2021): Widespread Chemical Contamination of Recycled Plastic Pellets Globally. IPEN. <https://ipen.org/documents/widespread-chemical-contamination-recycled-plastic-pellets-globally>
- Budin, C.; Petrлік, J.; Strakova, J.; Hamm, S.; Beeler, B.; Behnisch, P.; Besselink, H.; van der Burg, B.; Brouwer, A. (2020): Detection of high PBDD/Fs levels and dioxin-like activity in toys using a combination of GC-HRMS, rat-based and human-based DR CALUX reporter gene assays. Chemosphere 251, 126579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126579>
- CEJAD, IPEN & Arnika (2023): Hazardous Chemicals in Plastic Products and Food Chain in Kenya. https://ipen.org/sites/default/files/documents/kenya_es_web_fin.pdf
- Chen, S. J.; Ma, Y.J.; Wang, J.; Chen, D.; Luo, X.-J.; Mai, B.-X. (2009): Brominated Flame Retardants in Children's Toys: Concentration, Composition, and Children's Exposure and Risk Assessment. Environmental Science & Technology 43 (11), 4200-4206. <https://doi.org/10.1021/es9004834>
- Gerassimidou, S.; Lanska, P.; Hahladakis, J.; Lovat, E.; Vanzetto, S.; Geueke, B.; Groh, K. S.; Muncke, J.; Maffini, M.; Martin, O. V.; Iacovidou, E. (2022): Unpacking the Complexity of the PET Drink Bottles Value Chain: A Chemicals Perspective. Journal of Hazardous Materials 430: 128410. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128410>, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37099905/>
- Guzzonato, A.; Puype, F.; Harrad, S. J. (2017): Evidence of Bad Recycling Practices: BFRs in Children's Toys and Food-Contact Articles. Environmental Science: Processes & Impacts 19(7): 956-963. <https://doi.org/10.1039/c7em00160f>
- Ionas A. C.; Ulevicus, J.; Gómez, A. B.; Brandsma, S. H.; Leonards, P. E.; van de Bor, M.; Covaci, A. (2016): Children's exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through mouthing toys. Environ Int. 87, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.018>
- IPEN (2022): How Plastics Poison the Circular Economy: Data from China, Indonesia and Russia and Others Reveal the Dangers. https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-plastic-poison-circ-econ-v1_4w-en.pdf
- Kuang, J.; Abdallah, M.; Harrad, S. (2018): Brominated flame retardants in black plastic kitchen utensils: Concentrations and human exposure implications. Sci Total Environ 610-611, 1138-1146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.173>.

Referenzen (Auswahl), Folie 9

- Office for Product Safety & Standards (UK) (2023): The use of recycled materials in consumer products and potential chemical safety concerns: Scoping study, March 2023 (Main report).
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1142745/recycled-materials-in-consumer-products-main-report.pdf
- Petrлік, J.; Beeler, B.; Straková, J.; Allo'o Allo'o, S.M.; Amera, T.; Brosché, S.; Gharbi, S.; Hajri, I.; Kuepouo, G.; Mng'anya, S.; Ngakeng, A.; Ochieng Ochola, G.; Rhalem, N.; Al-Refa'i, O.A.; Baro, R.; Malass, R.; Mohamed, K. E. E.; Aly, S.; Walaska, H.; Grechko, V.; Zulkovska, K. (2022): Hazardous Chemicals in Plastic Products: Brominated flame retardants in consumer products made of recycled plastic from eleven Arabic and African countries. International Pollutants. International Pollutants Elimination Network (IPEN), June 2022.
https://ipen-toxic-plastic-products-africa-v2_3w-en.pdf
- Petrлік, J.; Behnisch, P.; DiGangi, J. (2018): Toxic Soup: Dioxins in Plastic Toys. IPEN, Arnika, HEAL, and BUND. ISBN 978-80-87651-46-9
https://ipen.org/sites/default/files/documents/Toxic_Soup_brochure_en_web04.pdf
- Petrлік, J.; Brabcova, K.; Ozanova, S.; Beeler, B. (2019): Toxic Soup Flooding Through Consumer Products: Brominated dioxins recycled together with flame retardants into toys and other consumer products – now a widespread problem.
DOI: 10.13140/ RG.2.2.17350.52805 und https://ipen.org/sites/default/files/documents/toxic_flood_web2.pdf
- Puype, F.; Samsonek, J.; Knoop, J.; Egelkraut-Holtus, M.; Ortlieb, M. (2015): Evidence of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Relevant Substances in Polymeric Food-Contact Articles Sold on the European Market. Food Additives & Contaminants: Part A 32(3): 410–426. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1009499>
- Rung, C.; Welle, F.; Gruner, A.; Springer, A.; Steinmetz, Z.; Munoz, K. (2023): Identification and Evaluation of (Non-)Intentionally Added Substances in Post-Consumer Recyclates and Their Toxicological Classification. Recycling 8(1): 24.
<https://doi.org/10.3390/recycling8010024>
- Samsonek, J.; Puype, F. (2013): Occurrence of brominated flame retardants in black thermo cups and selected kitchen utensils purchased on the European market. Food Additives & Contaminants: Part A, 30:11, 1976-1986.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2013.829246>

Risk Cycle: Additive, im Menschen nachweisbar, Folie 14

Folglich sind diese Additive auch weltweit **im Menschen** in hohen Konzentrationen nachweisbar, siehe etwa (**Auswahl**):

- US EPA (2013): America's Children and the Environment. Third Edition, EPA 240-R-13-001
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=515537&Lab=NCEE
- Umweltbundesamt (2017): Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit, GerES
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/human-biomonitoring>
- HBM4EU: Europäische Human Biomonitoring Initiative (2020): Reporting for first and second set of substances. Deliverable Report AD5.4, WP5 – Translation of results into policies
https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2021/03/HBM4EU_AD5.4_Reporting_first_and_second_set_substances_v1.1.pdf
- Umweltbundesamt (2023): Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit, GerES V (2014-2017).
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/umwelt-survey/5-umwelt-survey-von-2013-bis-2016#undefined>
- EEA (2023): Public exposure to widely used Bisphenol A exceeds acceptable health safety levels. Press release. Published 14 Sept 2023 <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/public-exposure-to-bisphenol-a>

Verpackungen: „Herkunft aus gesicherten Kreisläufen“, Folie 15

“Commission Regulation (EU) 2022/1616

on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods will enter into force on 10 October 2022.



...

After the entry into force, further rules will become applicable:

...

- from 10 July 2023, only plastics containing recycled plastic manufactured with a suitable recycling technology may be placed on the market, unless manufactured with a novel technology and in accordance with Chapter IV of the Regulation; the Regulation lays down two suitable technologies:
 - post-consumer mechanical PET recycling; this requires authorisation of individual processes
 - recycling from product loops which are in a closed and controlled chain; this requires the use of a recycling scheme
- from 10 October 2024, quality assurance systems used to collect and pre-process plastic input need to be certified by a third party.”

European Commission: Food Contact Materials: Plastic Recycling

https://food.ec.europa.eu/safety/chemical-safety/food-contact-materials/plastic-recycling_de

Verpackungen: „Herkunft aus gesicherten Kreisläufen“, Folie 15

Table 1

List of suitable recycling technologies

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Recycling technology number	Technology name	Polymer type (detailed specification in Table 2)	Short description of the recycling technology (detailed specification in Table 3)	Specification of plastic input	Specification of output	Subject to the authorisation of individual processes	Specifications and requirements (reference to Table 4)	Derogations (reference to Table 5)	Recycling scheme applies
1	Post-consumer mechanical PET recycling	PET (2.1)	Mechanical recycling (3.1)	Only PET PCW containing maximum 5 % of materials and articles that were used in contact with non-food materials or substances.	Decontaminated PET, final materials and articles not to be used in microwave and conventional ovens; additional specifications may apply to output from individual processes	Yes	-	-	No
2	Recycling from product loops which are in a closed and controlled chain	All polymers manufactured as primary materials in compliance with Regulation (EU) No 10/2011	Basic cleaning and microbiological decontamination during remoulding (3.2)	Chemically uncontaminated plastic materials and articles produced from a single polymer or from compatible polymers which were used or intended for use under the same conditions of use and solely obtained from a product loop which is in a closed and controlled chain, and excludes collection from consumers	Remoulded materials and articles intended to be used for the same purpose and under the same conditions of use as the materials and articles circulated in the recycling scheme from which the plastic input was obtained.	No	4.1	-	Yes

20.9.2022

EN

Official Journal of the European Union

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1616>

Stoffliche Verwertungsquoten in offiziellen Dokumenten, Folie 19

Werkstoffliche Verwertung von getrennt gesammelten PC-Kunststoffabfällen in 2021 = 32,7 %. Zahlen nach CONVERSIO Market & Strategy GmbH 2021. Berechnungspunkt: Input Endverwerter. Kunststoff-Verpackung 60 % der PC-Abfälle. LVP-Verpackung (ohne PET) bei Berechnung Output Endverwerter wahrscheinlich deutlich unter 30%.

PET-Flaschenrecycling rund 15 % der Verpackungskunststoffe, > 90 % Recyclingquote.

Aufkommen und Verbleib von Kunststoffabfällen in Deutschland 2021 in Millionen Tonnen (und Prozent)

Anfallort	Gesamt-Kunststoffabfälle*	Post-Consumer-Abfälle**
Stoffliche Verwertung***	1,98 (35 %)	1,81 (33,2 %)
- werkstofflich	1,96 (34,6 %)	1,78 (32,7 %)
- rohstofflich / chemisch	<0,03 (0,4 %)	<0,03 (0,5 %)
Energetische Verwertung	3,66 (64,4 %)	3,60 (66,2 %)
- in Müllverbrennungsanlagen	2,13 (37,4 %)	2,09 (38,4 %)
- als Ersatzbrennstoff / Sonstiges	1,53 (27 %)	1,51 (27,8 %)
Beseitigung / Deponie	0,03 (0,6 %)	0,03 (0,6 %)
Abfallaufkommen insgesamt	5,67 (100 %)	5,44 (100 %)

*inklusive Kunststoffabfälle aus Produktion und Verarbeitung

**Kunststoffabfälle nach Gebrauch / Endverbraucherabfälle ohne Abfälle aus der Produktion und Verarbeitung

***nach neuem Berechnungspunkt gemäß EU-Durchführungsbeschluss 2019/665 unter Berücksichtigung von Verlusten bei der Aufbereitung

Quelle: Umweltbundesamt 2023, eigene Zusammenstellung mit Daten der CONVERSIO Market & Strategy GmbH - Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#hohe-verwertungsquoten->

Ausfuhr von Kunststoffabfällen aus der EU, Folie 22

● Rat der EU Pressemitteilung 17. November 2023 03:40

Abfallverbringung: Rat und Parlament erzielen Einigung über effizientere und aktualisierte Vorschriften

Diese Pressemitteilung wurde am 7. Dezember aktualisiert, um den Wortlaut der vorläufigen Einigung aufzunehmen

Die Verhandlungsführer des Rates und des Europäischen Parlaments haben heute eine **vorläufige politische Einigung** über die Aktualisierung der Vorschriften für die Verbringung von Abfällen erzielt.

Die Überarbeitung der Verordnung zielt darauf ab, die Verbringung problematischer Abfälle in Länder außerhalb der EU zu reduzieren, die Verbringungsverfahren vor dem Hintergrund der Ziele der Kreislaufwirtschaft zu aktualisieren und die Durchsetzung zu verbessern.

Es werden Verfahren und Kontrollregelungen festgelegt, um sicherzustellen, dass die internationale Verbringung von Abfällen keine Gefahr für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellt, und um die Nutzung von Abfällen als Ressource in einer Kreislaufwirtschaft innerhalb der EU zu fördern.

Die Einigung ist bis zur förmlichen Annahme durch beide Organe vorläufig.



Für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist es von entscheidender Bedeutung, dass wir Abfälle als wertvolle Ressource betrachten und nicht als etwas, das es zu entsorgen gilt. Die heutige Einigung bietet den notwendigen Rahmen für eine bessere Verwertung und Wiederverwendung von Abfällen als Sekundärmaterial. Gleichzeitig können wir durch diese Einigung besser dafür sorgen, dass die von uns exportierten Abfälle für die Umwelt und die menschliche Gesundheit nicht schädlich sind. Die heutige Einigung ist ein weiterer wichtiger Schritt für die Verwirklichung der Null-Schadstoff- und Klimaneutralitätsziele der EU.

— Teresa Ribera Rodríguez, amtierende dritte stellvertretende Ministerpräsidentin und Ministerin für den Übergang zu einer grünen Wirtschaft und den demografischen Wandel Spaniens

<https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/11/17/waste-shipments-council-and-parliament-reach-agreement-on-more-efficient-and-updated-rules/>