



## Sicheres und nachhaltiges Recycling braucht Kontrollen und mehr Transparenz – eine Fallstudie zu PVC-Bodenbelägen

Helene Wiesinger<sup>1\*</sup> ([wiesinger@ifu.baug.ethz.ch](mailto:wiesinger@ifu.baug.ethz.ch)), Christophe Bleuler<sup>2</sup> ([Christophe.Bleuler@etat.ge.ch](mailto:Christophe.Bleuler@etat.ge.ch)), Verena Christen<sup>3</sup> ([verena.christen@fhnw.ch](mailto:verena.christen@fhnw.ch)), Philippe Favreau<sup>2</sup> ([philippe.favreau@etat.ge.ch](mailto:philippe.favreau@etat.ge.ch)), Stefanie Hellweg<sup>1,4</sup> ([stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch](mailto:stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch)), Miriam Langer<sup>3,5</sup> ([miriam.langer@fhnw.ch](mailto:miriam.langer@fhnw.ch)), Roxane Pasquettaz<sup>2</sup> ([roxane.pasquettaz@etat.ge.ch](mailto:roxane.pasquettaz@etat.ge.ch)), Andreas Schönborn<sup>6</sup> ([sand@zhaw.ch](mailto:sand@zhaw.ch)), Zhanyun Wang<sup>1,4,7</sup> ([zhanyun.wang@empa.ch](mailto:zhanyun.wang@empa.ch))

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Ökologisches Systemdesign, ETH Zürich, 8093 Zürich, Schweiz

<sup>2</sup> Service de l'air, du bruit et des rayonnements non ionisants (SABRA), 1205 Genf, Schweiz

<sup>3</sup> Institut für Ecopreneurship, Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 4132 Muttenz, Schweiz

<sup>4</sup> NCCR Catalysis, Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), ETH Zürich, 8093 Zürich, Schweiz

<sup>5</sup> Eawag, 8600 Dübendorf, Schweiz

<sup>6</sup> Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), 8820 Wädenswil, Schweiz

<sup>7</sup> Technology and Society Laboratory, Empa, 9014 St. Gallen, Schweiz

### Abstract

Kunststoffe sind allgegenwärtig und tragen zu globalen Problemen wie der Umweltverschmutzung und dem Klimawandel bei. Mechanisches Recycling kann helfen, diese Probleme abzumildern. Jedoch muss den in Kunststoffen beigemischten Chemikalien Aufmerksamkeit geschenkt werden, da sie den Recyclingansatz vor Herausforderungen stellen. Bis zu 13'000 unterschiedliche Chemikalien werden bei der Produktion von Kunststoffen verwendet. Neben positiven Eigenschaften können diese aber auch den Recyclingprozess beeinflussen, den Abbau der Polymerketten beschleunigen und das Rezyklat verunreinigen. Chemoanalytische und wirkungsbasierte Methoden sind ein interessanter Ansatz, um problematische Chemikalien in Kunststoffen zu identifizieren. Im Recyclingkontext stößt ihre Anwendung aber auf Schwierigkeiten. Diese Herausforderungen werden anhand einer Fallstudie zu PVC-Bodenbelägen beleuchtet. 16 % der Proben enthielten inzwischen verbotene Chemikalien, vor allem DEHP und Blei, und mehr als 17% der Proben lösten Reaktionen in den Bio-tests aus. Um alle problematischen Proben zu identifizieren, wurden viele unterschiedliche Analysemethoden benötigt, was mit der momentanen Recyclingpraxis nicht kompatibel wäre. Lösungsansätze finden sich neben weiteren Fortschritten in der Analysetechnologie vor allem im verbessertem Produktdesign und zeigen auf, dass Transparenz entlang der Lieferkette dringend erforderlich ist.

### Einleitung

Kunststoffe sind in unserem Alltag allgegenwärtig. Mit ihrer Produktion und -entsorgung sind einige globale Probleme verknüpft, etwa die hohen Treibhausgasemissionen oder die Verbreitung von Mikro- und Makroplastik in der Umwelt [1, 2]. Mechanisches Recycling von Kunststoffen kann helfen, diese Probleme abzumildern [2]. Beispielsweise könnten in der Schweiz 31% des Kunststoffabfalls rezykliert und damit 1,3% der Schweizer Treibhausgasemissionen vermieden werden, wenn das System für mechanisches Recycling ausgebaut und

optimiert würde [3]. Neben Schwierigkeiten aufgrund der Produktvielfalt (z.B. schwierige Sammellogistik, unterschiedliche Qualitäten, nicht-rezyklierbare [Verbund-]Materialien), stellen Chemikalien in Kunststoffen eine Herausforderung für erfolgreiches Recycling dar [4].

Kunststoffe bestehen nicht nur aus den Polymerketten, sondern enthalten eine Vielzahl weiterer Chemikalien. Während der Produktion werden Monomere, Prozesshilfen und Additive zum Erlangen verschiedener gewünschter Materialeigenschaften verwendet und verbleiben zum Teil im fertigen Produkt. Insgesamt sind laut einem Bericht für das United Nations Environmental Programme (UNEP) bis zu 13'000 Substanzen in Verwendung [5]. Weitere Chemikalien können durch Rohmaterialverunreinigungen, Nebenreaktionen, Abbau oder Verschmutzung unabsichtlich im Material vorhanden sein [6]. Einige von diesen Substanzen können sich negativ auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt und die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen auswirken [5, 7, 8].

Chemikalien in Kunststoffen können verschiedene negative Auswirkungen auf das mechanische Recycling haben. Sie stören teilweise den Sortierprozess, da beispielsweise mit Carbon-Black versetzte Kunststoffe nicht mit der Near-infrared (NIR) Technologie sortiert werden können [9]. Sie können den Zerfall der Polymerketten beschleunigen und somit die Rezyklatqualität verschlechtern, beispielsweise, wenn bestimmte Metallionen gerade bei hohen Temperaturen den Abbau beschleunigen [10]. Sie können während des Recyclings durch die hohe Temperatur und große Oberfläche freigesetzt werden und dadurch die Exposition für Mensch und Umwelt erhöhen. Beispielsweise wurde für Arbeiter\*innen in Recyclinganlagen für „Styrenics“ (z.B. Polystyrol – PS, High Impact Polystyrene – HIPS, Acrylonitril Butadien Styrene – ABS) ein erhöhtes Krebsrisiko festgestellt, wahrscheinlich verursacht durch die erhöhte Exposition zu dem Monomer Styrol (CASRN: 100 42 5) [11, 12]. Schlussendlich können Chemikalien das erzeugte

Rezyklat verschmutzen. Dies ist vor allem ein Problem für potentiell schädliche Additive, die nur in bestimmten Anwendungen nützlich sind und in neuen Produkten mit enthaltenen Recyclingmaterial potentiell ein Gesundheitsrisiko darstellen können. Beispielsweise wurden bromierte Flammschutzmittel in Kinderspielzeugen und Kochutensilien gefunden, die aus dem Recycling von „Elektroschrott“ stammen [13]. Manche Chemikalien, die eigentlich gar nicht mehr eingesetzt werden dürfen (im Englischen: „legacy substances“), bleiben durch das Recycling weiterhin im Gebrauch [14].

Obwohl es Konzepte gibt, um diesen negativen Auswirkungen entgegenzusteuern, etwa die „Clean Cycle“ Strategie [15], gibt es in der Praxis Herausforderungen mit der Umsetzung. In diesem Beitrag wird die Verschmutzung von Rezyklat durch inzwischen verbotene Additive anhand des Recyclings von verbotenen Weichmachern in PVC-Bodenbeläge illustriert [16]. Im Anschluss stellen wir einige analytische Methoden vor, die geeignet sind, um die Verschmutzung von Rezyklat zu vermeiden, und diskutieren deren Grenzen und Anwendbarkeit im Recyclingkontext.

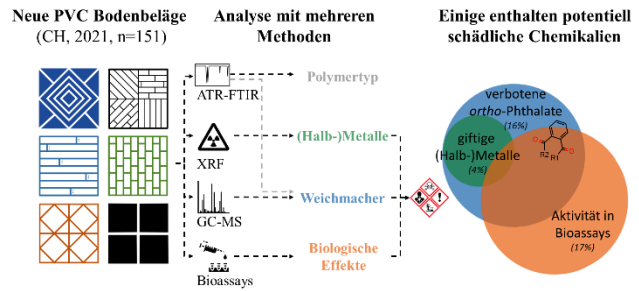
## Verbotene Weichmacher und Stabilisatoren gelangen wahrscheinlich durch Recycling in neue PVC-Bodenbeläge

Für unsere Fallstudie zu PVC-Bodenbelägen haben wir 151 neue Produkte aus dem Schweizer Markt mittels ATR Infrarotspektroskopie (ATR FTIR), Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF), Gaschromatographie–Massenspektrometrie (GC-MS), sowie in-vitro Biotests untersucht. Die detaillierten Methoden und Ergebnisse sind andernorts publiziert [16].

Obwohl es sich um Neumaterial handelt, enthielten 16 % der Proben verbotene Chemikalien mit mehr als 0,1 Gew-%, hauptsächlich Blei und Bis(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP, CASRN: 117-81-7). Die gemessenen DEHP Konzentrationen lagen meist unterhalb der typischen Konzentrationen für Weichmacher in flexiblem PVC (5-50 Gew-%) [17], und in fast allen Proben fanden sich neben DEHP zusätzliche (Haupt) Weichmacher und neben Blei zusätzliche (Haupt) Stabilisatoren. Dies deutet darauf hin, dass das Vorhandensein von verbotenen Chemikalien vor allem mit der Verwendung von recyceltem PVC in neuen Bodenbelägen zusammenhängt. Weitere 35 % der Proben sind potenziell schädlich, da sie Reaktionen in den Biotests auslösten (Abbildung 1) bzw. andere *ortho*-Phthalate oder andere potentiell schädliche (Halb-)Metalle enthielten.

Darüber hinaus deuten die Ergebnisse der Biotests und des GC-MS „Suspect-Screenings“ auf das Vorhandensein weiterer potenziell schädlicher Substanzen hin, die nicht (eindeutig) identifiziert wurden. Insgesamt zeigt diese Fallstudie, dass das Recycling von alten Materialien mit potentiell schädlichen und inzwischen verbotenen Zusatzchemikalien stattfindet und derzeit keine ausreichenden Kontrollen vor dem Recycling durchgeführt werden oder greifen. Das aktuell noch in Verwendung

befindliche belastete Material stellt somit ein Problem für das heutige und das zukünftige Recyclingsystem dar.



**Abb. 1:** Methoden und Ergebnisse der PVC-Bodenbelag-Fallstudie.

## Viele Analysen wären nötig, wenige davon sind praktikabel

Die Analyse von Kunststoffprodukten oder -abfällen gestaltet sich aufgrund der Vielfalt von möglichen vorhandenen Chemikalien als äußerst schwierig und ähnelt diesbezüglich der Analyse verschiedener Umweltmedien [5, 18]. Der Recyclingkontext stellt außerdem spezifische Anforderungen an die praktische Anwendbarkeit von Analysemethoden. Einerseits müssen große Mengen an Material charakterisiert werden, weshalb die Analysen schnell durchführbar sein müssen und mit bestehenden Sortiersystemen kompatibel sein sollten [19]. Andererseits sind Abfallströme sehr divers, sowohl was den Materialtyp (und somit die „Matrix“) als auch den Verschmutzungsgrad angeht [20].

Chemoanalytische Methoden können einzelne Chemikalien oder Chemikaliengruppen in Materialien identifizieren und quantifizieren. Die meisten chemoanalytischen Methoden zielen aber spezifisch auf bestimmte Chemikaliengruppen. Für ein vollständiges Bild bedarf es also einer Vielzahl chemoanalytischer Methoden [21]. Alternativ muss die Analyse auf einzelne ausgewählte Substanzen limitiert werden, wodurch das Vorhandensein von neuen oder nicht erwarteten Chemikalien, oder deren Abbauprodukte, möglicherweise nicht erkannt wird.

In unserer Fallstudie wurden verschiedene chemoanalytische Methoden angewendet, welche sich vor allem auf die Detektion und Quantifizierung von Weichmachern und Stabilisatoren fokussierten. Einzig das GC-MS „Suspect-Screening“ hatte einen breiten Fokus. Allerdings müssen Chemikalien mit den ausgewählten Lösungsmitteln kompatibel und für das GC-MS (halb)flüchtig sein, damit sie detektiert werden können. Das heisst, dass trotz der Methodenvielfalt in unserer Studie nur bestimmte Chemikalien detektierbar waren und weitere Wissenslücken verbleiben [16].

Von den angewendeten chemoanalytischen Methoden sind nur wenige im Recyclingkontext realistisch anwendbar. Die auf GC-MS beruhenden Methoden sind durch aufwendige Probenvorbereitung und dem Zeitaufwand pro Probe kaum mit der momentanen Recyclinginfrastruktur kompatibel. XRF und

ATR-FTIR (bzw. NIR) Spektroskopie hingegen werden bereits häufig in der Abfallsortierung eingesetzt [19] und könnten so die Erkennung und Ausschleusung belasteter Produkte unterstützen. Durch die Beschränkung auf diese Methoden wird aber nur ein Bruchteil aller potentiell schädlichen Chemikalien abgedeckt.

Wirkungsbasierte Methoden sind eine weitere Möglichkeit, um mit komplexen Mischungen und wenig bekannten oder unerwarteten Chemikalien umzugehen. Bei diesen bioanalytischen Methoden wird die Reaktion ganzer Organismen (in vivo) oder zellulärer Biotests (in vitro) auf eine Probe (z.B. eine Mischung verschiedener Chemikalien) genutzt, um relevante Effekte bezüglich verschiedener Endpunkte nachzuweisen [18, 22].

Unsere Fallstudie hat gezeigt, dass wirkungsbasierte Methoden eine wertvolle Ergänzung zur Charakterisierung mittels chemoanalytischen Methoden darstellen (Abbildung 1). Aber auch hier werden verschiedene Biotests für die unterschiedlichen Endpunkte benötigt werden. Das high-throughput screening mittels MTT-Biotests konnte die Wirkeffekte in anderen Biotests nicht vorhersagen [22]. Es verbleiben aber auch hier bezüglich der möglichen Effekte weitere Wissenslücken auf der analytischen Landkarte, einerseits aufgrund der Auswahl einzelner Proben, andererseits durch die Vielzahl von möglichen Zelllinien und Endpunkten.

Im Recyclingkontext sind vorgängig durchgeführte Biotests nicht realistisch, da die Probenvorbereitung und Testdurchführung sehr zeit- und kostenintensiv ist. Eine vereinfachte Probenaufbereitung (z.B. die Verwendung von Wasser statt organischer Lösungsmittel oder die direkte Beprobung des Materials) und die laufende Weiterentwicklung der Biotestsysteme könnte sie gegebenenfalls in Zukunft auch für das Recyclingsystem nutzbar machen. Diese Entwicklung steckt momentan noch in den Kinderschuhen.

Ein Testen des Materials vor dem Recycling auf potentiell schädliche Substanzen oder biologische Effekte kann nützlich sein kann, wenn schnelle Methoden zur Verfügung stehen (z.B. XRF oder ATR-FTIR). Detaillierte und umfassende Analysen hingegen sind mit erheblichem Aufwand verbunden, und daher im Recyclingkontext aktuell nicht umsetzbar. Aus diesen Gründen kann derzeit nur bedingt sichergestellt werden, dass recycelte Materialien keine schädlichen Substanzen enthalten. Dies unterstreicht die dringende Notwendigkeit für weitere Massnahmen, die die Sicherheit von Kunststoffprodukten und -rezyklaten sicherstellen.

## **Neben Analysen braucht es besseres Produktdesign und mehr Transparenz**

Chemoanalytische und wirkungsbasierte Methoden stossen im Recyclingkontext durch die Vielfalt an Chemikalien und die großen zu analysierenden Materialmengen an ihre Grenzen. Um sicheres und nachhaltiges Kunststoffrecycling zu gewährleisten, braucht es daher zusätzlich ein besseres und ins-

besondere vereinfachtes Produktdesign und mehr Transparenz über die chemischen Inhaltsstoffe von Kunststoffen entlang der gesamten Lieferkette.

Vor allem bei langlebigen Produkten sollte auf die chemische Zusammensetzung geachtet werden. Gemäß dem Vorsorgeprinzip sollten nur Substanzen eingesetzt werden, die ausreichend untersucht und unschädlich sind [23]. Eine Harmonisierung der verwendeten Polymere und Formulierungen, zumindest innerhalb einer Produktgruppe, könnte sowohl die chemische Analyse und somit das Aussortieren vor dem Recycling als auch die Rezyklierbarkeit selbst erhöhen [4].

Transparenz über die chemische Zusammensetzung von Produkten kann die Aussortierung von belasteten Materialien erleichtern und die Rezyklatqualität erhöhen. Derartige Transparenz könnte mittels Labels und/oder sogenannten „digitalen Zwillingen“ (z.B. in einem digitalen Produktpass oder in einem digitalen Gebäudedatenmodell – BIM) gewährleistet werden. Derartige Initiativen sind vielversprechend, stecken aber noch in den Kinderschuhen und enthalten bisher meist nur Informationen zum Material und nur selten Informationen zu den eingesetzten Chemikalien.

Um qualitativ hochwertiges und sicheres Kunststoffrezyklat zu erzeugen, werden ausreichende Informationen über die Zusammensetzung der zu recycelnden Kunststoffabfälle gebraucht. Mehr Transparenz bezüglich der chemischen Zusammensetzung von Kunststoffprodukten und -abfällen und neue vereinfachte chemoanalytische und wirkungsbasierte Methoden sind notwendig, um ein sicheres Kunststoffrecycling zu garantieren. Heute die Transparenz von Kunststoffzusammensetzung zu erhöhen ist eine Chance, um in Zukunft eine sichere Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen.

## **Literatur**

- [1] M. MacLeod, H. P. H. Arp, M. B. Tekman, and A. Jahnke, "The global threat from plastic pollution," *Science*, vol. 373, no. 6550, pp. 61–65, Jul. 2021.
- [2] Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD), *Global Plastics Outlook*. Paris, France: OECD Publishing, 2022.
- [3] M. Klotz, C. Oberschelp, C. Salah, L. Subal, and S. Hellweg, "The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics," *Sci. Total Environ.*, vol. 906, p. 167586, Jan. 2024.
- [4] Z. O. G Schyns, M. P. Shaver, Z. O. G Schyns, and M. P. Shaver, "Mechanical recycling of packaging plastics: A review," *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 42, no. 3, p. 2000415, Feb. 2021.
- [5] United Nations Environment Programme (UNEP) et al., *Chemicals in Plastics - A Technical Report*. Geneva: United Nations Environment Programme, 2023.
- [6] B. Geueke, "Dossier - Non-intentionally added substances (NIAS)," 2018. [Online]. Available:

<https://www.foodpackagingforum.org/food-packaging-health/non-intentionally-added-substances-nias>.

[Accessed: 25-Sep-2023].

- [7] H. Wiesinger, Z. Wang, and S. Hellweg, "Deep dive into plastic monomers, additives, and processing aids," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 13, pp. 9339-9351, acs.est.1c00976, Jun. 2021.
- [8] N. Aurisano, R. Weber, and P. Fantke, "Enabling a circular economy for chemicals in plastics," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 31, p. 100513, 2021.
- [9] A. Turner, "Black plastics: Linear and circular economies, hazardous additives and marine pollution," *Environ. Int.*, vol. 117, pp. 308–318, Aug. 2018.
- [10] M. Day, J. D. Cooney, and M. MacKinnon, "Degradation of contaminated plastics: A kinetic study," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 48, no. 3, pp. 341–349, Jan. 1995.
- [11] D. Loomis et al., "Cancer mortality in an international cohort of reinforced plastics workers exposed to styrene: a reanalysis," *Occup. Environ. Med.*, vol. 76, no. 3, pp. 157–162, Mar. 2019.
- [12] CIEL et al., "Plastic & Health: The hidden costs of a plastic planet," 2019.
- [13] A. Guzzonato, F. Puype, and S. J. Harrad, "Evidence of bad recycling practices: BFRs in children's toys and food-contact articles," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 19, no. 7, pp. 956–963, 2017.
- [14] S. Wagner and M. Schlummer, "Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 158, p. 104800, Jul. 2020.
- [15] U. Kral, K. Kellner, and P. H. Brunner, "Sustainable resource use requires 'clean cycles' and safe 'final sinks,'" *Sci. Total Environ.*, vol. 461–462, pp. 819–822, Sept. 2013.
- [16] H. Wiesinger et al., "Legacy and emerging plasticizers and stabilizers in PVC floorings and implications for recycling," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1894-1907, acs.est.3c04851, Jan. 2024.
- [17] G. Wypych, "PVC Additives," *PVC Formul.*, 2020.
- [18] W. Brack et al., "Effect-based methods are key. The European Collaborative Project SOLUTIONS recommends integrating effect-based methods for diagnosis and monitoring of water quality," *Environ. Sci. Eur.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–6, Dec. 2019.
- [19] G. Maier, R. Gruna, T. Langle, and J. Beyerer, "A survey of the state of the art in sensor-based sorting technology and research," *IEEE Access*, 2024.
- [20] G. N. Anastassakis, "Solid Waste Separation and Processing," *Handb. Environ. Eng.*, pp. 627–671, Aug. 2018.
- [21] C. Nerin, P. Alfaro, M. Aznar, and C. Domeño, "The challenge of identifying non-intentionally added substances from food packaging materials: A review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 775, pp. 14–24, May 2013.
- [22] I. Severin, E. Souton, L. Dahbi, and M. C. Chagnon, "Use of bioassays to assess hazard of food contact material

extracts: State of the art,"

*Food Chem. Toxicol.*, vol. 105, pp. 429–447, 2017.

- [23] D. Bourguignon, European Parliament, and Directorate-General for Parliamentary Research Services, "The precautionary principle: Definitions, applications and governance - in-depth analysis," *Eur. Parliam. Res. Serv.*, 2016.

## Korrespondenzadresse

Helene Wiesinger

Lehrstuhl für Ökologisches Systemdesign

ETH Zürich

HIF D 16.2

Laura-Hezner-Weg 7

8093 Zürich

Schweiz

Tel.: +41 44 633 71 19

E-Mail: [wiesinger@ifu.baug.ethz.ch](mailto:wiesinger@ifu.baug.ethz.ch)