



OST

Ostschweizer
Fachhochschule

Biobasiert, abbaubar, erneuerbar – Versuch einer Einordnung

Nachhaltige Kunststoffe in komplexen Anwendungen
OST Campus Buchs, 27. September 2023

Prof. Daniel Schwendemann, Marc Akermann

27. September 2023

Technik / IWK

Inhaltsübersicht

1 Motivation und Situation Schweiz

2 Kreislaufwirtschaft

3 Biokunststoffe

4 Bioabbaubarkeit

5 Beispielprojekte: "Biokunststoffe"

Motivation

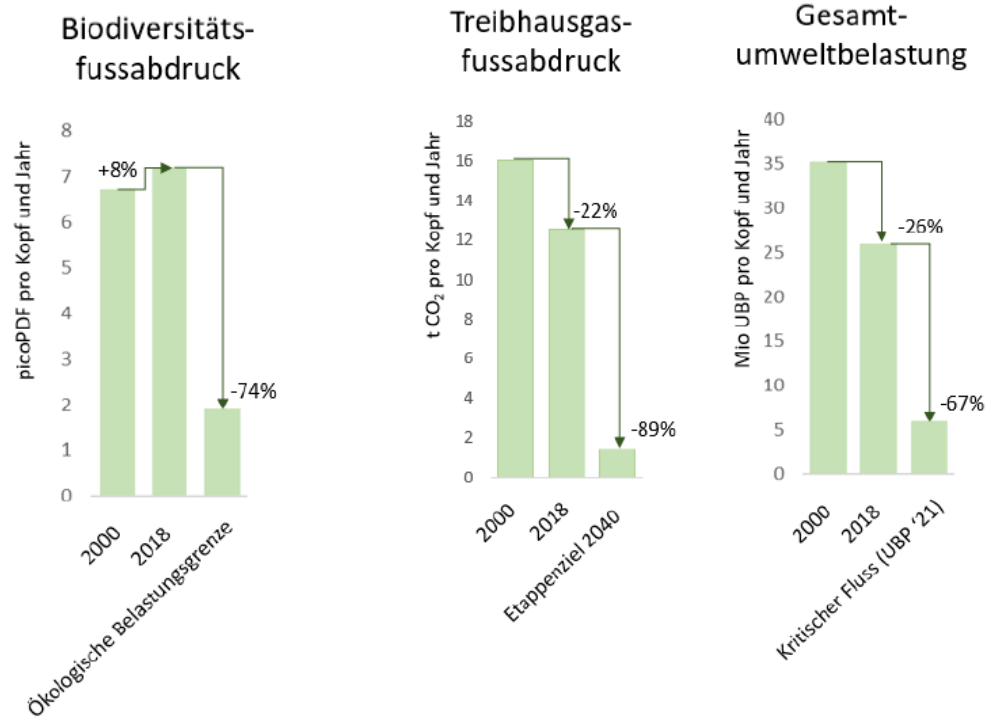
Nachhaltigkeitsziele kurz gefasst:



**"Heute nicht auf Kosten von Morgen,
hier nicht auf Kosten von Anderswo
und grundsätzlich nicht auf Kosten von Anderen"**

Motivation

Fussabdrücke der Schweiz übersteigen ökologische Belastbarkeitsgrenzen

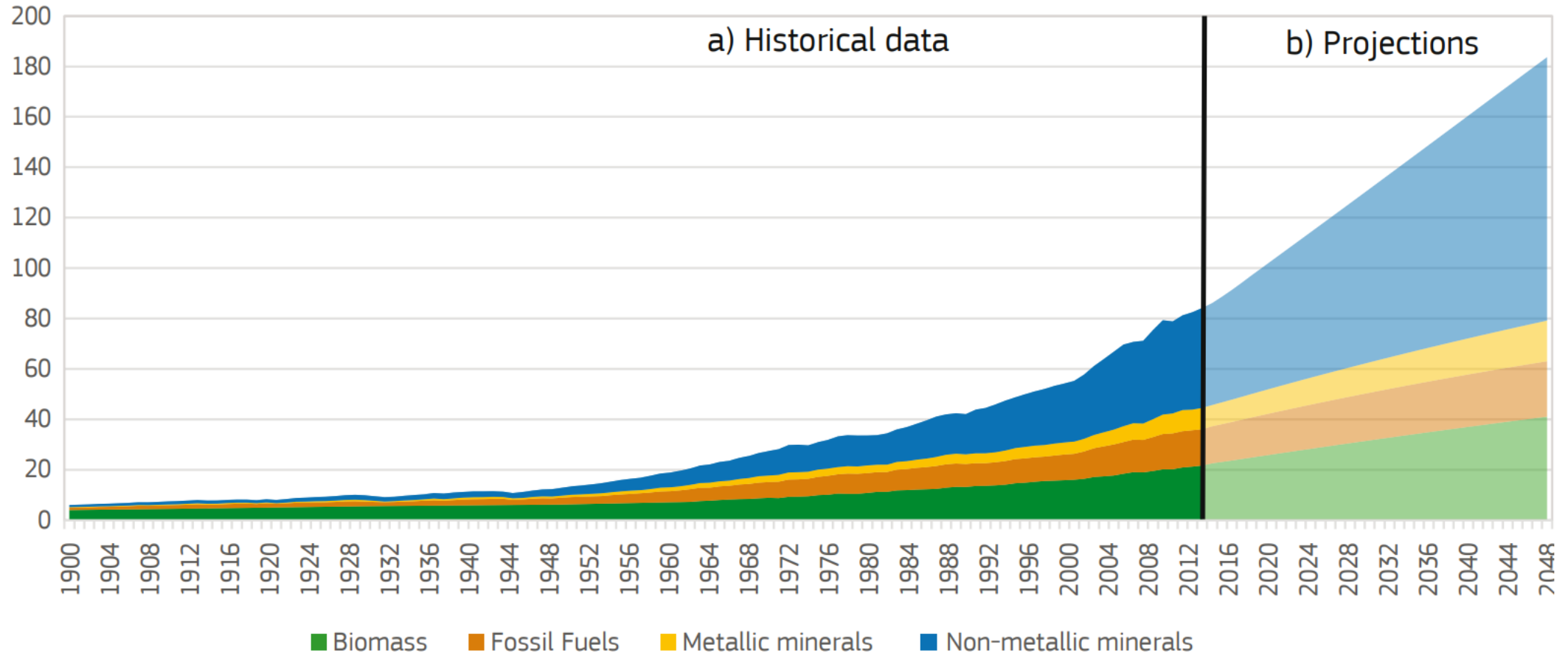


Geschätzter Reduktionsbedarf (EBP 2022)

- **Über 60 %** der gesamten Umweltbelastung in 3 Konsumbereichen: **Wohnen (25 %)** **Ernährung (25%)** **Mobilität (14%)**
- **Auslandsanteil** der Umweltbelastung des Schweizer Konsums: **68 %**

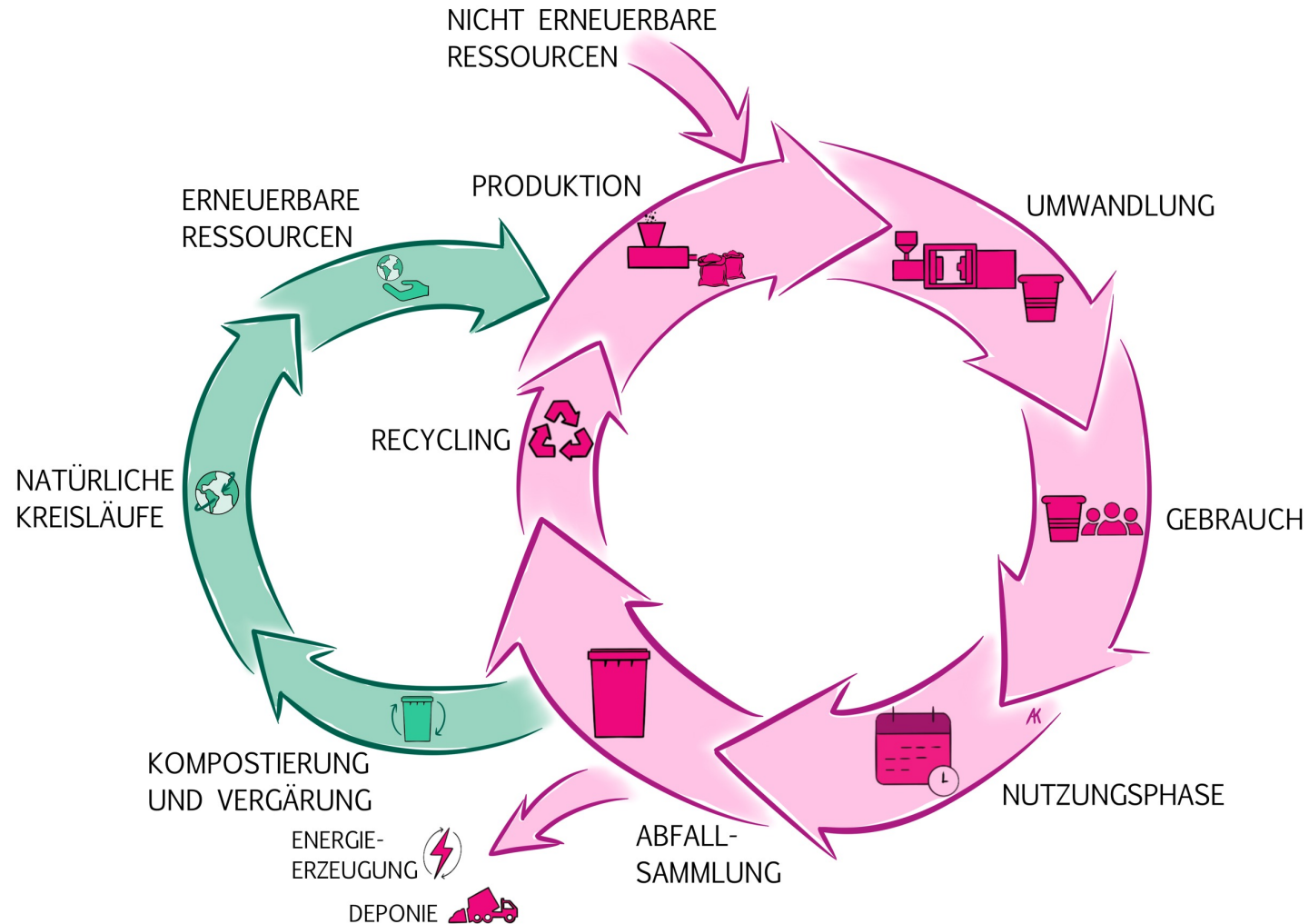
Quelle: EBP (2022): Umwelt-Fussabdrücke der Schweiz

Warum Kreislaufwirtschaft



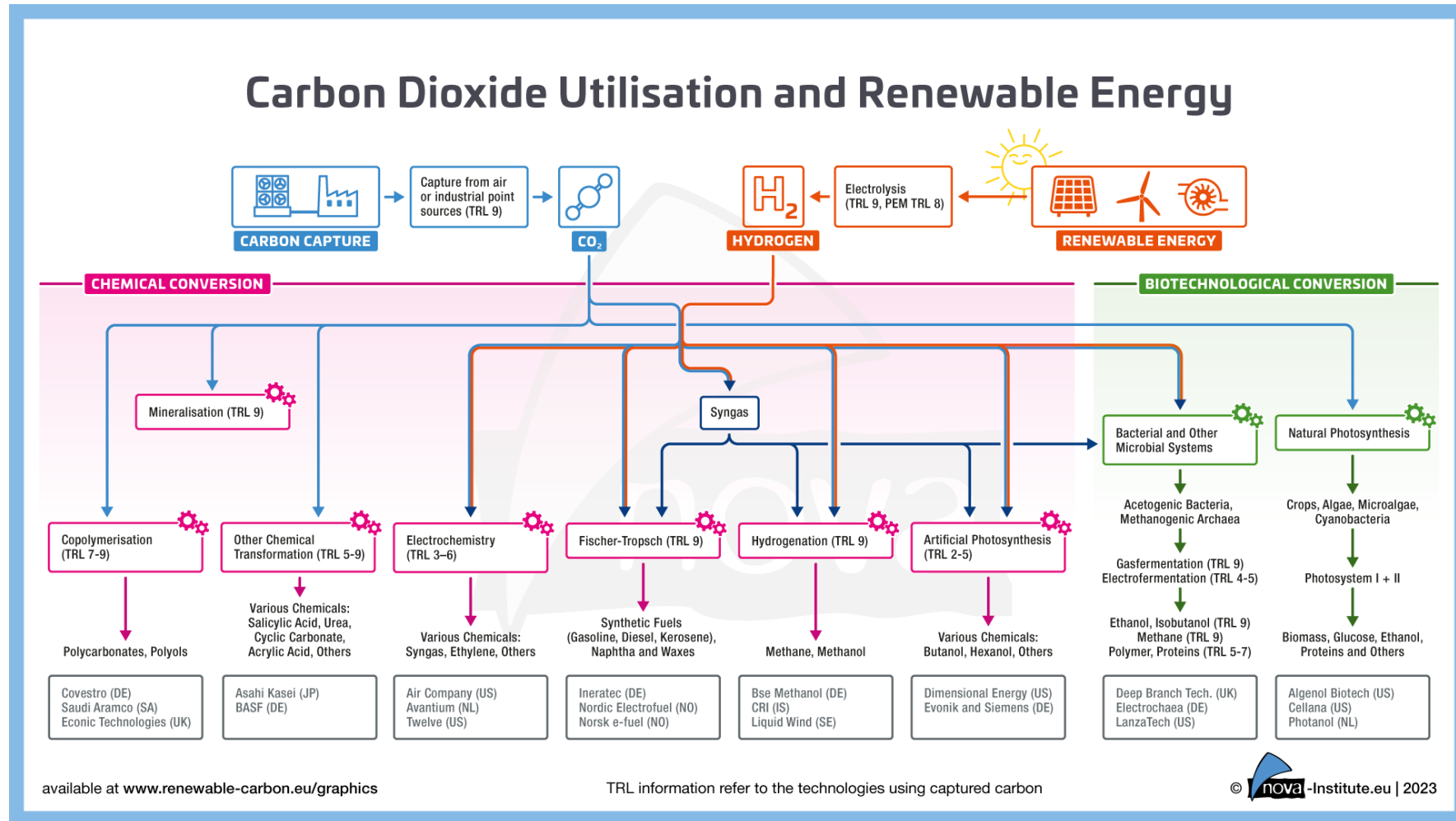
© EC JRC Raw materials scoreboard 2018

Warum Kreislaufwirtschaft?

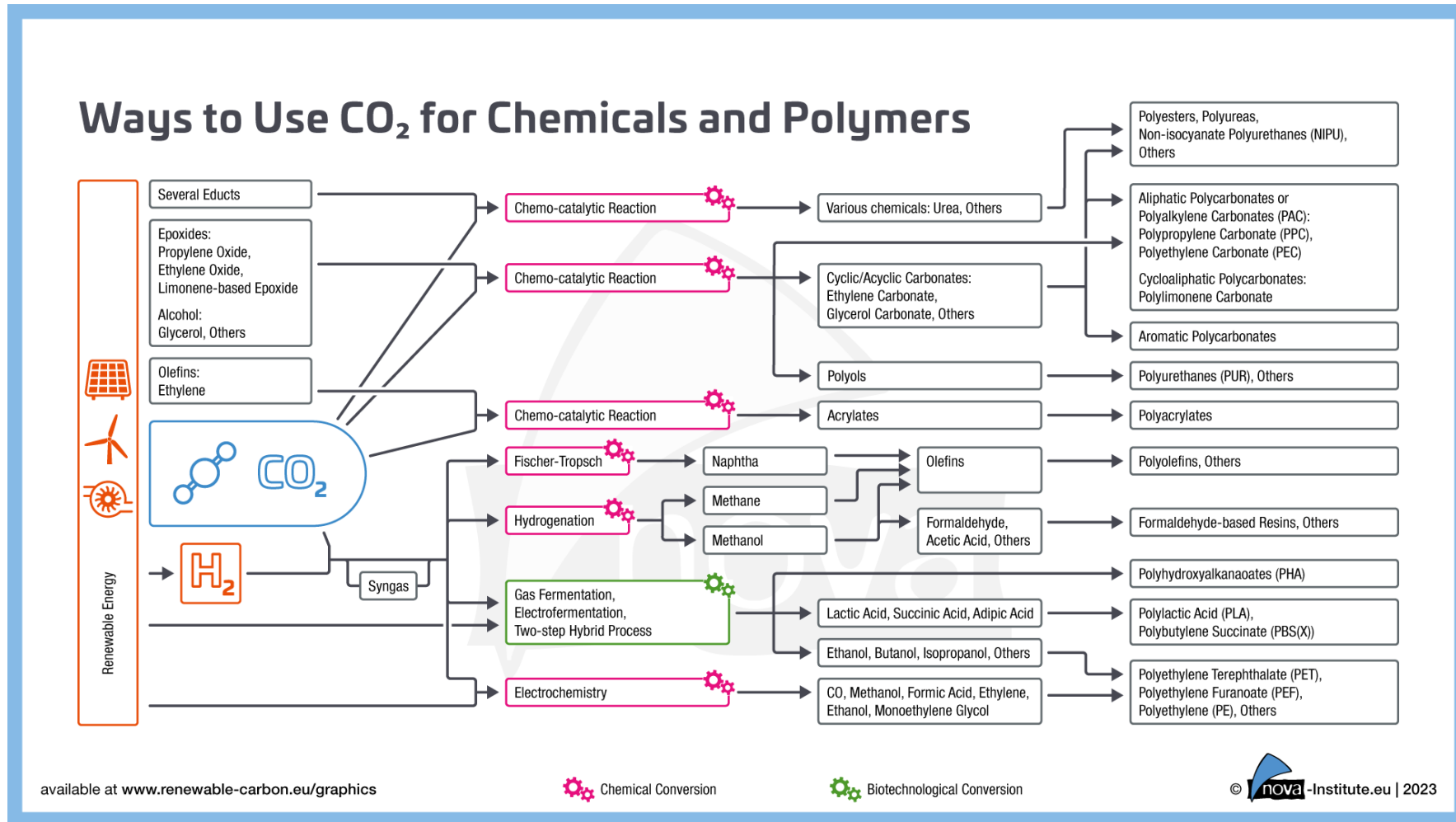


Biobasiert, bioabbaubar, erneuerbar - Versuch einer Einordnung

Herstellungswege über das CO₂ - erneuerbar?



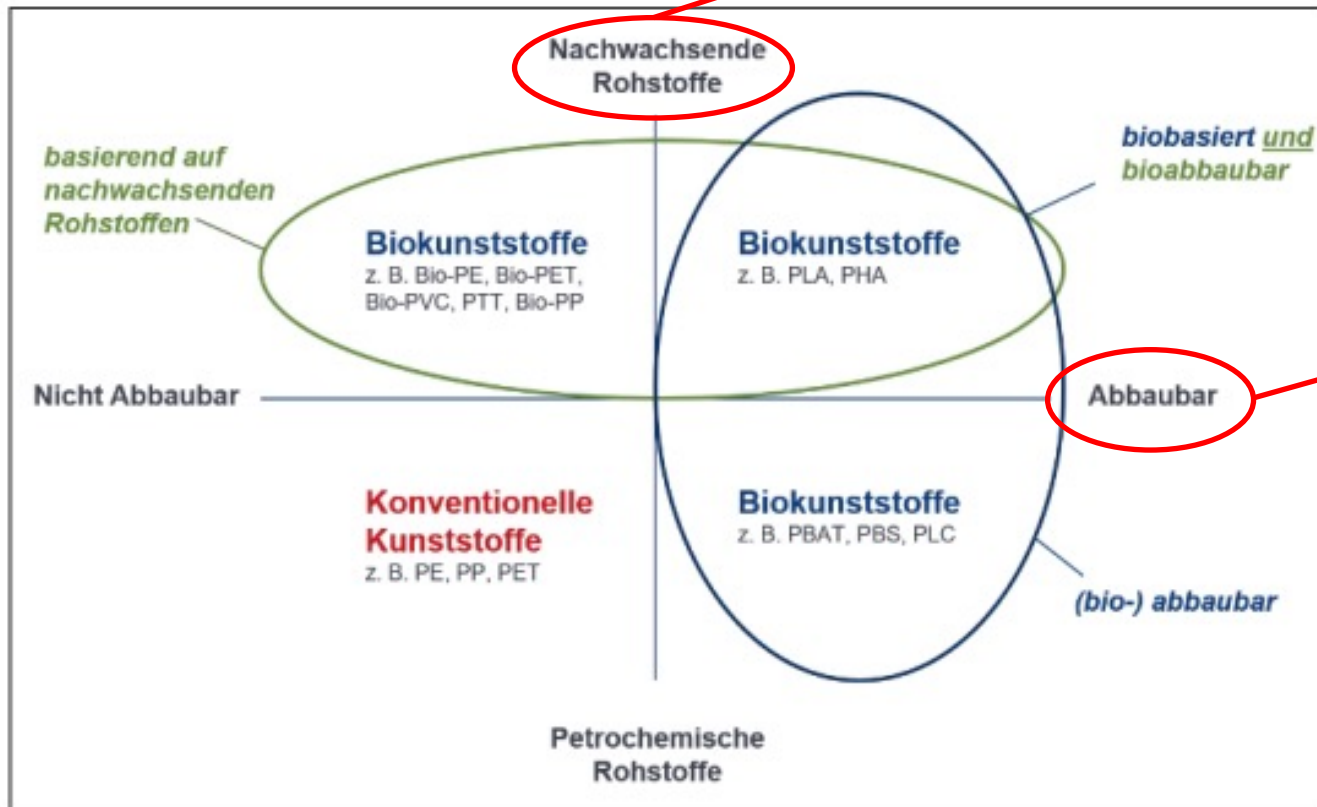
Herstellungswege über das CO₂ - erneuerbar?



Erklärung Grundbegriffe - Biokunststoff

Problematik: Begriff biobasierte Kunststoffe ist nicht geschützt

- kein gesetzlich vorgeschriebener Mindestanteil nachwachsender Rohstoffe



Problematik: Abbaubarkeit ist gegeben, wenn der Kunststoff von Mikroorganismen in Biomasse, Wasser, mineralische Salze, Methan (CH₄) und CO₂ umgewandelt werden kann

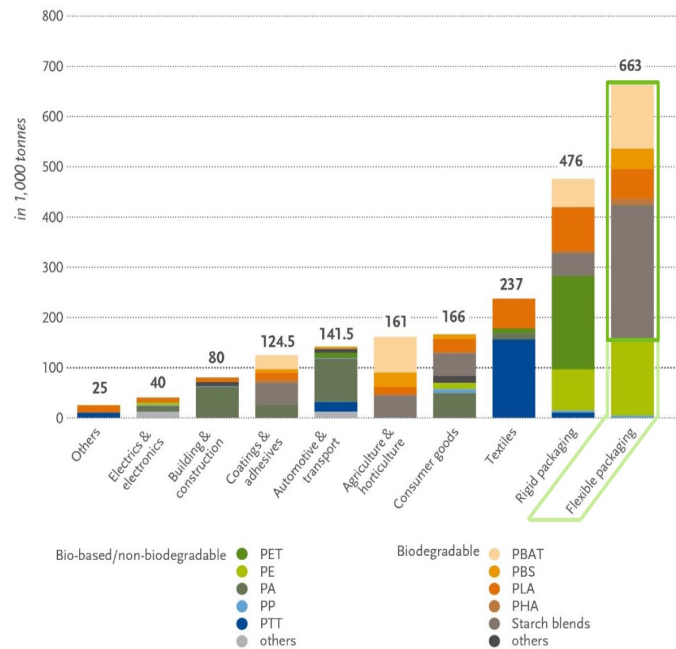
- Abbau von sehr vielen Umgebungsfaktoren abhängig, welche nur bedingt durch Prüfnormen abgedeckt werden können
- Auswirkung von entstehenden Mikropartikel bei nicht 100%igem Abbau nicht abschliessend untersucht

https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-11/211123_QST7_Sachstandpapier%20Bioabbaubarkeit_Kunststoffe_final.pdf

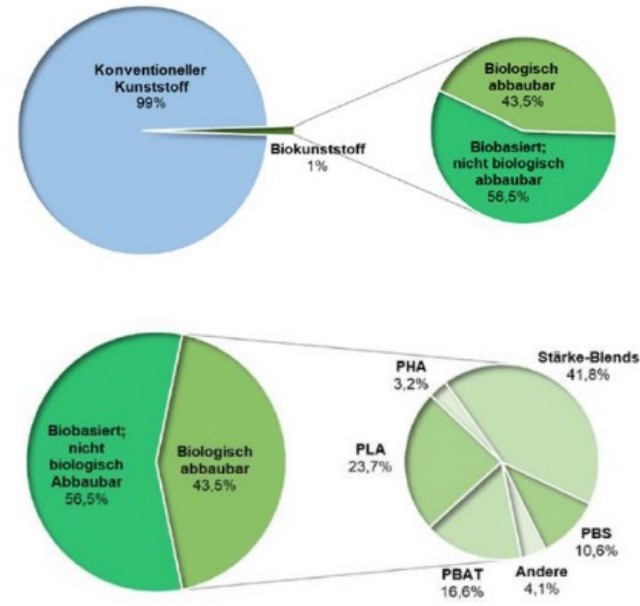
Biobasierte Kunststoffe

Entwicklung im Bereich biologisch abbaubare Kunststoffe

Global production capacities of bioplastics 2019 (by market segment)

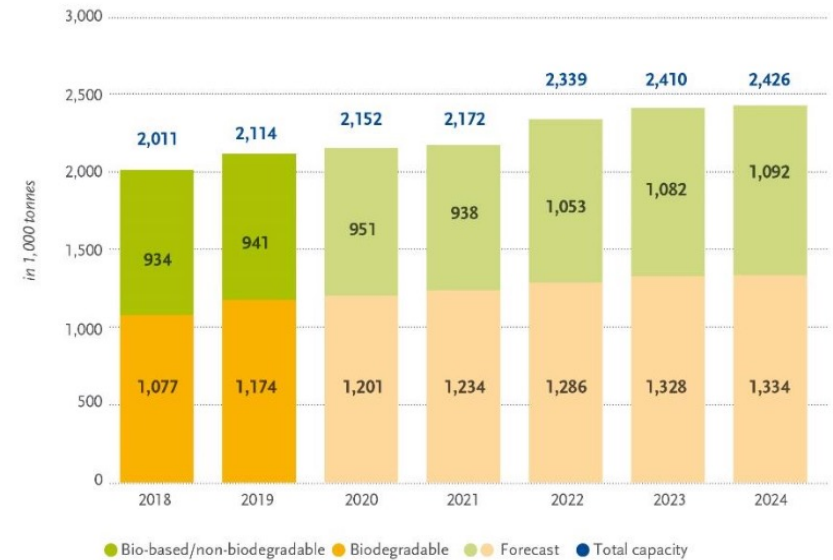


Source: European Bioplastics, nova-Institute (2019). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets



Marktanteil biologisch abbaubarer Kunststoffe im Jahr 2018 [Bildquelle: European Bioplastics 2021]

Global production capacities of bioplastics



Source: European Bioplastics, nova-Institute (2019). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Zukünftig moderates Gesamtwachstum erwartet

Heutige Einsatzgebiete von Biokunststoffen

Herausforderungen bei der Zertifizierung der Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Produkten

Grundlagen der biologischen Abbaubarkeit

Abbaubarkeit abhängig von:

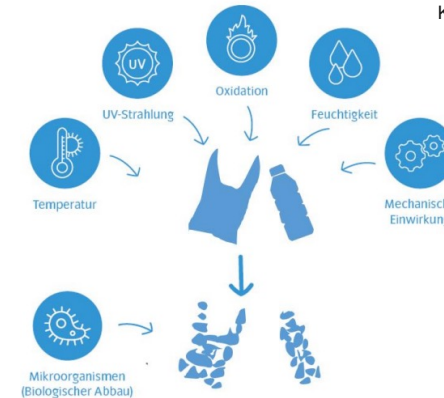
- Anwesenheit von Mikroorganismen wie Bakterien/ Pilzen
- Physikochemische Einflussfaktoren
- Materialeigenschaften
- Voraussetzung für reproduzierbare Aussage zu biologischem Abbau:
 - Konstante Bedingungen

Abbauablauf:

- 1. Fragmentierung:** Zerfall von größeren in kleinere Objekte
 - Depolymerisation der Polymerkette in kleinere Fragmente
 - langsame/keine Depolymerisation bei Ketten mit überwiegend C
- 2. Desintegration:** physikalischer Zerfall in Mikropartikel & Verlust der Sichtbarkeit
 - keine Verstoffwechslung → Zerfall in Mikropartikel
 - vergrößerte Oberfläche begünstigen biologischen Abbau
 - Quantifizierung über Masseverlust unter realitätsnahen Bedingungen

Physikochemische Einflussfaktoren	Materialeigenschaften
Feuchtegehalt	Molekulargewicht
pH-Wert	Größe, Form, Oberfläche, Wandstärke
Temperatur	Kristallinität
Sauerstoffverfügbarkeit	Polymerzusammensetzung
Verfügbarkeit von Nährstoffen	Porosität
Redox-Potenzial	Additive / Füllstoffe
Wassergehalt	Schmelztemperatur und Glasübergangstemperatur
	Sterische Anordnung

Sachstandpapier zur Bioabbaubarkeit von Kunststoffen; Prof. Dr. Marc Kreutzbruck et al.

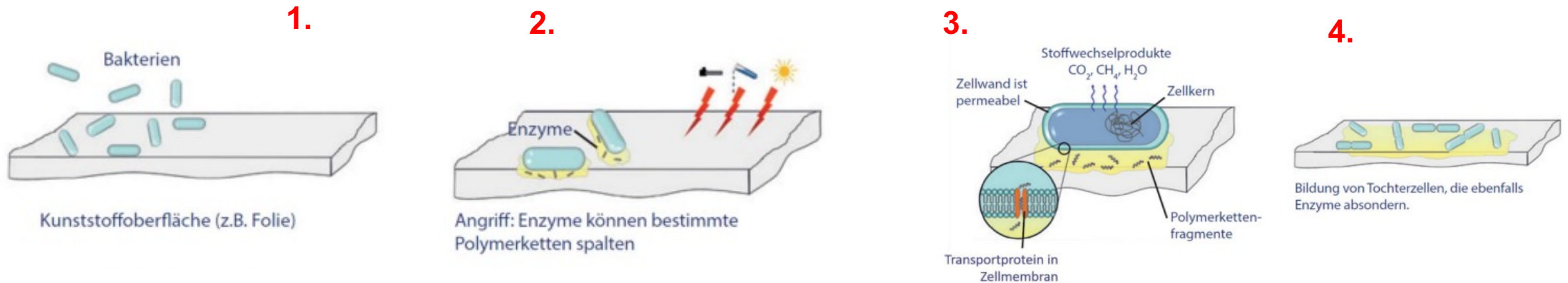


[Bildquelle: sustpkgg-blogspot.com]

Ablauf beim biologischen Abbau

3. Mikrobieller/ enzymatischer Abbau




- Mikroorganismen können Polymere grundsätzlich abbauen
 - Grösse verhindert Zelleinbindung ganzer Polymermoleküle
- Mikroorganismen sind osmotroph → Aufnahme von niedermolekularen / gelösten Stoffen
 - zuerst Depolymerisierung langer Polymerketten → limitierender Faktor bei Abbaugeschwindigkeit
- Depolymerisation findet extrazellulär in gebildeten Enzymen statt (Aufspaltung Polymere in Oligomere & Monomere)
- Wichtige Voraussetzung für enzymatischen Abbau:
 - Vorhandene Heteroatome wie Sauerstoff oder Stickstoff
- Entstehende Stoffwechselprodukte: **CO₂ / CH₄ (Methan) / H₂O und Biomasse**



BONTEN, C. Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. 3. Auflage. München: Hanser, 2020. ISBN 978- 3-446-46471-1.

Herausforderungen bei der Zertifizierung der Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Produkten

Überblick vorhandene Normen und Zertifizierungen

Art der Abbaubarkeit	Norm	Kriterien	Logos
Industriell	EN 13432	90% Abbau innerhalb 6 Monate bei 58°C +/-2°C Desintegrationstest: max. 10% dürfen in 2mm Sieb hängen bleiben max. 3 Monate	 <p>DIN CERTCO TÜV Austria</p>
Heim-/ Gartenkompostierung	AS 5810 NF T 51-800 EN 17427	90% Abbau innerhalb 12 Monate bei 25°C +/-5°C Desintegrationstest: max. 10% dürfen in 2mm Sieb hängen bleiben max. 6 Monate	 <p>DIN Gartenkompostierbar TÜV Austria HOME</p>
Biologischer Abbau im Boden	EN 17033 ISO 17556 ISO 11266 ASTM D5988	90% Abbau innerhalb 24 Monate bei 20-28°C +/-2°C Kein Desintegrationstest +Ökotoxizitätstest	 <p>DIN Bioabbaubar im Boden TÜV Austria SOIL</p>

* Achtung: Übersicht nicht abschliessend/ Zusammenfassung massgebendste Normen in EU

Herausforderungen bei der Zertifizierung der Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Produkten

Überblick biologischer Abbau verschiedener Materialien

NOTES

- proven biodegradability
- ◌ proven biodegradability under certain conditions or for certain grades
- ◌ biodegradability not proven

The biodegradability of plastics derived from these biodegradable polymers can only be guaranteed if all additives and (organic) fillers are biodegradable, too. Dyeing and finishing of cellulosic fibres, for example, may prevent their biodegradation in the environment.

Biodegradability depends on the complex biochemical conditions at each testing site (e.g. temperature, available nutrients and oxygen, microbial activity, etc.). Therefore, these generalised claims about biodegradation can only serve as approximations and need to be confirmed by standardised testing under lab conditions. In-situ behaviour can vary, depending on the mentioned conditions, size of the plastic, grade of the polymer and other factors. For instance, biodegradation testing is often performed after milling, showing the inherent nature of the material to biodegrade. In reality, the same level of biodegradation will be obtained, be it possibly within a different timeframe.

¹ PLA is only likely to be biodegradable in thermophilic anaerobic digestion at temperatures of 52°C.

² Biodegradability in home composting and in soil of PBAT is only proven for certain polymer grades.

³ Complete biodegradation of materials with a high lignin content is not easily measurable with standard biodegradation tests, but does take place (slowly). Instead of CO₂, especially humus is produced by the biodegradation of lignin-rich materials.

⁴ The biodegradation of CA in all environments is only proven for certain polymer grades.

⁵ Incl. P3HB, P4HB, P3HB4HB, P3HB3HV, P3HB3V4HV, P3HB3Hx, P3HB3HO, P3HB3HD

ENVIRONMENTS

Details on test conditions and, if available, applicable pass/fail criteria.

- MARINE ENVIRONMENT**
Temperature 30°C, 90% biodegradation within a maximum of 6 months (Certification: TÜV AUSTRIA OK biodegradable MARINE (ISO under preparation))
- FRESH WATER**
Temperature 21°C, 90% biodegradation within a maximum of 56 days (Certification: TÜV AUSTRIA OK biodegradable WATER)
- SOIL**
Temperature 25°C, 90% biodegradation within a maximum of 2 years (Certification: TÜV AUSTRIA OK biodegradable SOIL; DIN Certico DIN-Geprüft biodegradable in soil)
- HOME COMPOSTING**
Temperature 28°C, 90% biodegradation within a maximum of 12 months (Certification: TÜV AUSTRIA OK compost HOME; DIN Certico DIN-Geprüft Home Compostable)
- LANDFILL**
No standard specifications or certification scheme available, since this is not a preferred end-of-life option
- ANAEROBIC DIGESTION**
Thermophilic 52°C / mesophilic 37°C; standard specification not yet available, but 90% generally considered as completely biodegradable
- INDUSTRIAL COMPOSTING**
Temperature 58°C, 90% biodegradation within a maximum of 6 months (Standard: EN 13432)



Nachweismethoden biologischer Abbau im Labor

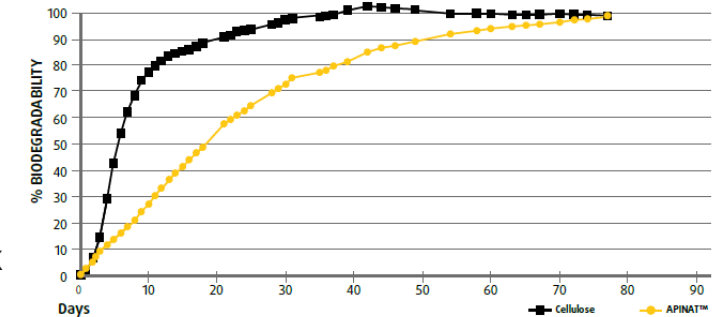
- Untersucht wird die grundsätzliche biologische Abbaubarkeit
 - Positives Ergebnis: Nachweis über vorhandenes Enzymsystem, das Prüfmaterial bei Laborbedingungen mineralisieren kann
- **Labortests: nur bedingt Aussage über Abbaukinetik in natürlicher Umgebung möglich**
- Definition optimaler Umgebungsbedingungen (O₂-Versorgung, Nährstoffgehalt, Temperatur, etc.)
 - Prüfparameter werden während der Prüfung konstant gehalten
- Wahl eines nicht an Prüfmaterial adaptiertes Inokulum (Reinkultur von Mikroorganismen)
 - Mischung mit **Prüfmaterial (Pulverform)** in bestimmten Verhältnis

Matrix	Temperatur	Messparameter	Masseverhältnis Prüfsubstanz / Inokulum	Relevante Normen
Kompost	57 ±2 °C	CO ₂ -Produktion	14 % (TM)	ISO 14855-1
Kompost	25 ±5 °C	CO ₂ -Produktion	14 % (TM)	ISO 14855-1 bei 25 ±5 °C
Süßwasser	20 – 25 °C	O ₂ -Verbrauch CO ₂ -Produktion	min. 100 mg/L	ISO 14851 ISO 14852
Boden	20 – 28 °C	O ₂ -Verbrauch oder CO ₂ -Produktion	0,1 %	ISO 17556
Meerwasser	30 ±2 °C	CO ₂ -Produktion	min. 267 mg/L	ASTM D6691

Sachstandspapier zur Bioabbaubarkeit von Kunststoffen; Prof. Dr. Marc Kreutzbruck et al.

CO₂-Nachweis / O₂-Verbrauch:

- Allgemein anerkannte Messgröße für aeroben biologischen Abbau
 - CO₂ als Endprodukt der Mineralisierung von Bakterien
- Vergleichsmessung mit Referenzansatz (Inkolum + biologisch abbaubares Polymer z.B. Cellulose)
 - Ermittlung Aktivität Mikroorganismen ohne Prüfmaterial
- CO₂-Produktion überlagert aus Kunststoffabbau und Verrottung verwendeter Kompost-/ Bodenmatrix
 - Einsatz von C₁₄-Isotope als Markierungssubstanz → gezielte Ermittlung CO₂-Entwicklung bei Abbau



Beispiel: Vergleichsmessung Cellulose und Biokunststoff

[Übersicht Apinat Bio Compounds]

Herausforderungen bei der Zertifizierung der Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Produkten

Nachweismethoden Desintegration / Ökotoxizität im Labor

Desintegration (Heim- und Industriekompostierung):

- Definition: physikalische Zerlegung in sehr kleine Fragmente
- Zusätzlich zum Nachweis der grundsätzlichen biologischen Abbaubarkeit
- Parameter für Zersetzungsprüfung abhängig von gewünschtem Zertifikat
- Materialien werden in **finaler Produktform** geprüft → Zertifikat nur für spezifische Produktform/ Schichtdicke gültig
- Auswertung Rückstandsmengen > 2mm nach Kompostierungszeit von 3 (Industrial) oder 6 Monaten (Home)
- Desintegrationstest führt nur in Kombination mit Nachweis der biologischen Abbaubarkeit zu Zertifizierung

Ökotoxizität (Heim-/ Industriekompostierung sowie Bodenabbaubarkeit):

- Qualität von Boden und Kompost darf durch Kunststoffabbau nicht negativ beeinflusst werden
- Keimrate von z.B. Kressesamen in Prüfmischung (Bodenmatrix + Kunststoff) > 90% im Vergleich zu unbehandelter Matrix

Fazit: Normen / Zertifizierungen

- wichtigste Informationsquelle für Endverbraucher
- keine allgemeingültige nur angenäherte Abbildung der natürlichen Bedingungen
 - z.B. Keine Zulassung für zertifizierte Produkte in Biomüllentsorgung (PLA-Becher, etc.)
- Begriff/ Zertifikat „bioabbaubar“ ≠ Kompostierung
 - Begriff/ Zertifikat nur verwenden, wenn Kompostier-/Sammelmöglichkeit gegeben
- Einfluss von Mikropartikeln und Restmonomeren?

Zertifikate sind keine “licence to litter” !

Projektbeispiele: Biobasierte Kunststoffe



Projekt «FluidSolids»

Prozessoptimierung / Compoundierung

- Ziele

- Analyse des Prozesses

- Optimierung des Systems (screw design, position of feeding, process parameters, ...)

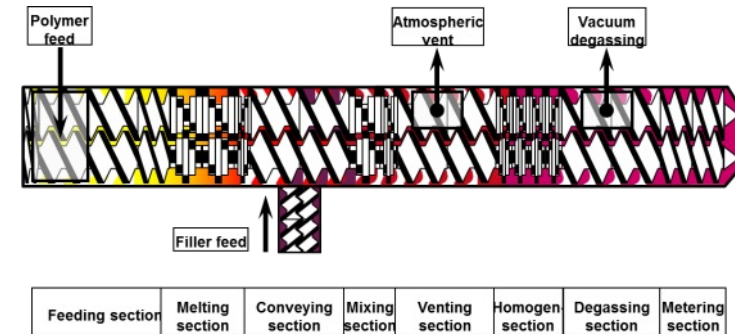
- Versuchsreihen


- Partner seit 2013

- FluidSolids AG, Zürich

- Funding

- Public and Private



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Kommission für Technologie und Innovation KTI

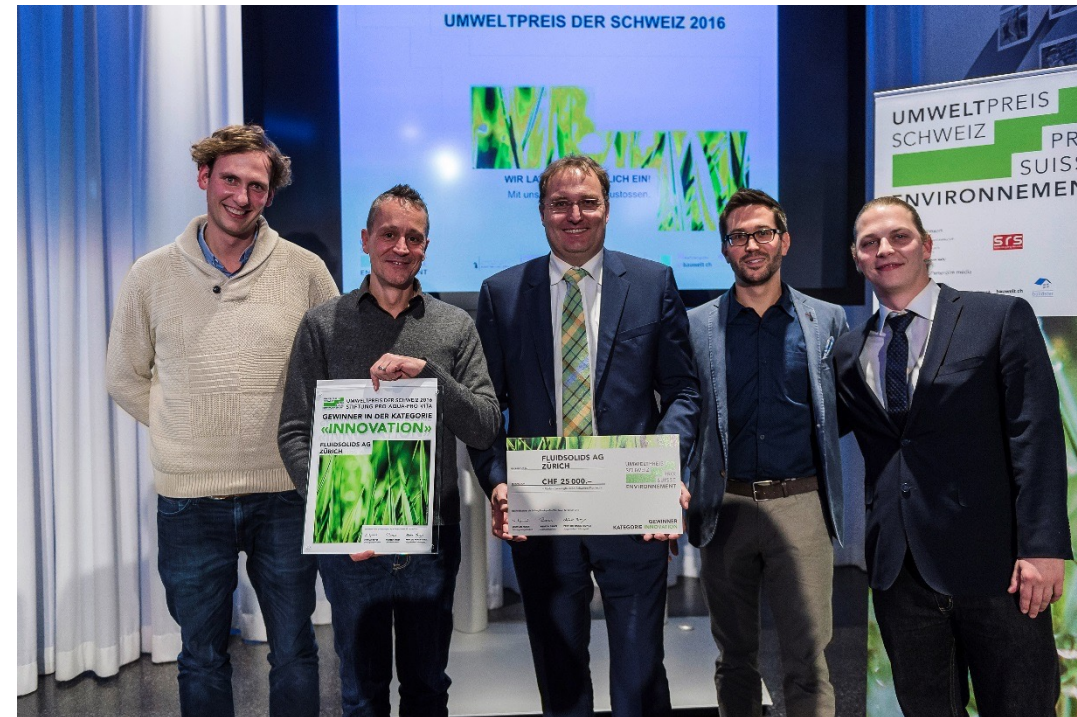
Biobasiert und bioabbaubar

Projekt: «FluidSolids®»



Umweltpreis der Schweiz 2016

Environmental Award of Switzerland 2016



Biobasiert und bioabbaubar Fluidsolids®

Kompostierbares Besteck

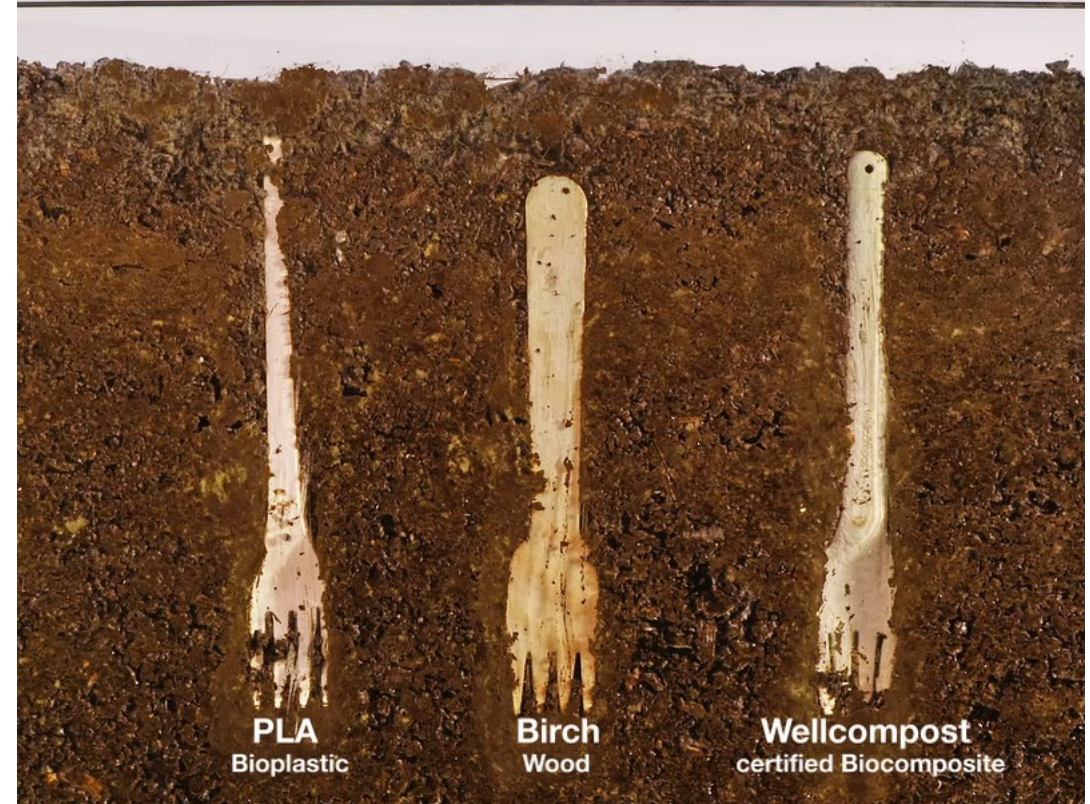
Fluidsolids®



Compostability Test
in soil at room temperature



Wellcompost



Biobasiert und bioabbaubar

Bioabbaubare Verbisschutzhüllen



Biobasiert und bioabbaubar

Pflanztopf Netpot

Anwendung/ Anforderungen:

- Biologisch abbaubarer Pflanztopf
- Genügend hohe Eigenstabilität / Stapelbarkeit
- Netzstruktur für optimalen Sauerstoffaustausch mit Inhalt / Unterstützung hydroponischer Kultur
- Verarbeitbar auf existierenden Anlagen

Motivation biologische Abbaubarkeit:

- manuelle Entfernung nach Einpflanzung entfällt
- Kundenwunsch (Grossgärtnereien, Privatpersonen)



Netpot von Projektpartner
Bachmann Plantec AG

<https://www.bachmann-pflanzen trays.ch/produkte/netpot/>

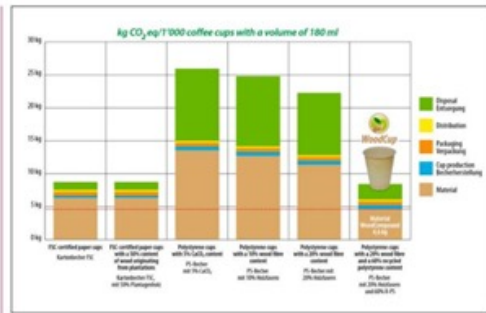
Material- und Prozessentwicklung für Kunststoff-Automatenbecher

Reduktion des CO₂-Fussabdruck

Die aktuellen Diskussionen und Probleme bezüglich Meeresverschmutzung durch Kunststoffe stellen weitere Ansprüche an die Verpackungsindustrie. Neben dem Schutz des Gutes kommen Forderungen wie biologische Abbaubarkeit und eine Reduktion des Carbon Footprints hinzu. Vor allem Kaffeebecher werden hier immer wieder beispielhaft genannt. Im Rahmen eines Innosuisse (vormals KT) Projektes entwickelte das IWK mit dem Industriepartner der SwissPrimePack AG neuartige Lösungsansätze.

Prof. Daniel Schwendemann, Daniel Vetter, Alex Ramsauer¹, Jana Walker, Beat Wick²

Die Verpackungsindustrie verbraucht heute weltweit circa 40% der verarbeiteten Kunststoffmenge [1]. Auf Grund der aktuellen Problematik verschmutzter Meere, des «Littering-Problems» an Land und den Mikroplastikpartikeln in Seen und Flüssen, setzt die Gesellschaft die Industrie massiv unter Druck, nachhaltigere Produkte zu entwickeln. Ein Beispiel ist der Bann von Wegwerfartikeln des Europäischen Parlamentes [2]. Kaffee wird in sehr grossen Mengen konsumiert. Die Einwegbecher stehen in vielen Diskussionen exemplarisch für die hohe Abfallmenge. Aus diesem Grund starteten das IWK und die SwissPrimePack AG bereits 2016 ihr Projekt mit dem Ziel, den CO₂-Fussabdruck für Automatenbecher zu reduzieren. Die Alternative zum Kunststoffbecher ist der



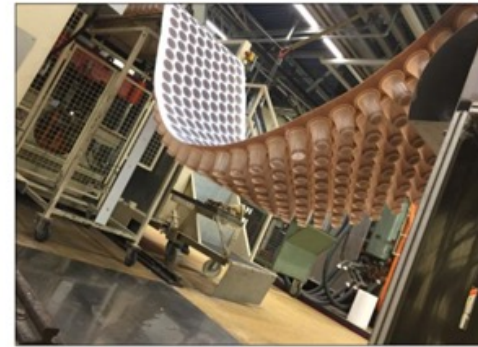
Vergleich des CO₂-Fussabdrucks verschiedener 180-ml-Automatenbecher.

Papierbecher, der häufig von Konsumenten unterbringen und es kommt zu weniger Störfällen im Betrieb, da sich diese Becher leichter entstapeln lassen. Das Tiefziehverhältnis und die Produktionsgeschwindigkeiten sind als zwei der grössten Herausforderungen zu nennen. Die zu entwickelnden Automatenbecher sollten alle geforderten Eigenschaften, wie Heisswasserbeständigkeit, enge Dimensionstoleranzen für den problemlosen Einsatz im Automaten sowie die Geschmacksneutralität, erfüllen. Es wurden daher keine Abstriche an der Spezifikation gemacht.

Das Projekt war zweigleisig und es wurde in zwei Richtungen entwickelt. Zum einen wurden auf Basis des aktuell eingesetzten Polymers Möglichkeiten zum Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen bzw. Reststoffen der Lebensmittelindustrie als Füll- und Verstärkungsmittel untersucht. Zum



Extrusion von Folienmustern auf der 3-Schicht-Flachfolienanlage am IWK.



Produktion auf der inline Extrusionsanlage mit einem 54-Fach-Werkzeug.



Neuentwickelter Kaffeebecher Woodcup.

anderen wurden diverse Möglichkeiten biologisch abbaubarer Materialien als Matrixwerkstoff untersucht. Eine grosse Palette von Füllstoff-Varianten wurde evaluiert. Neben verschiedenen Füllstoffen auf Holzbasis, wurde ein grosses Augenmerk auf Roststoffe der Lebensmittelproduktion gelegt, so wurden unter anderem Reste der Mehlproduktion als auch Kaffeesatz auf deren Eignung untersucht.

Die Versuche wurden mehrstufig durchgeführt, zuerst wurden auf der Compoundieranlage kleinere Versuchsmustern hergestellt, die anschliessend auf der 3-Schichtflachfolienanlage am IWK zu Folien mit einer Stärke vom 0,8 mm und etwa 300 mm Breite extrudiert wurden. Mit Hilfe dieser Folien konnten bei der SwissPrimePack AG auf einer kleinen Thermoformanlage Musterbecher gefertigt werden. Die so produzierten Prototypen wurden im Labor analysiert und auf ihre Eignung ausgewertet. In einem weiteren Schritt wurden dann mit den Rezepturen, die die Spezifikation erfüllen, Mustern von 300 kg hergestellt. Diese Mindestmenge war notwendig, um die Umsetzung auf der Produktionsanlage zu prüfen. Insgesamt wurden dazu über 50 Materialmischungen am IWK ausgearbeitet, compoundiert und anschliessend auf die jeweiligen Eigenschaften getestet.

Neben der materialtechnischen Entwicklung wurde auch das Augenmerk auf die Ökobilanz der verschiedenen Kunststoffbecher und des vergleichbaren Papierbechers gelegt. Die Studie wurde von der Carbotech AG im Auftrag der SwissPrimePack AG durchgeführt. Hier zeigte sich, dass das Recycling von Kunststoffbechern einen sehr grossen Einfluss auf den CO₂-Fussabdruck hat. So weist ein Kunststoffbecher mit 20% Holzfüllung und 60% Rezyklatanteil den geringsten CO₂-Fussabdruck auf. Die Produktionsversuche mit bioabbaubaren Polymeren und naturbasierten Füllstoffen sind sehr vielversprechend. Der Becherherstellungsprozess muss für diese Rezepturen noch weiter optimiert und angepasst werden, da sich die Abkühlzeiten ändern. Dies ist auf einer Produktionsanlage, die über 100 000 Becher pro Stunde produziert noch eine Herausforderung. Derzeit laufen weitere Versuche und Abmusterungen. In einem ersten Schritt wurde von der SwissPrimePack AG der Becher mit Holzfüllung im Markt eingeführt. Sowohl die Haptik als auch die Optik der neuentwickelten Becher, die auf dem aktuell eingesetzten Kunststoff basieren, treffen die heutigen Konsumentenwünsche. Der Becher ist auf eine äusserst positive Resonanz gestossen. Bis zum Projektende wurden bereits über 100 Millionen Becher produziert.

Literatur

- [1] Plastics Europe. Plastics – the Facts 2018 [online]. An analysis of European plastics production, demand and waste data, 2018. Verfügbar unter: https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf
- [2] European Parliament. Parliament seals ban on throwaway plastics by 2021. Strasburg, 27. März 2019.

Kontakte

Hochschule für Technik Rapperswil
IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
Prof. Daniel Schwendemann
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
+41 55 222 49 16
daniel.schwendemann@hsr.ch
www.iwk.hsr.ch

SwissPrimePack AG
Jana Walker
Oberrietstrasse 53
CH-9450 Altstätten
Jana.walker@swissprimepack.com
www.swissprimepack.com

Nachhalige Kunststoffe in der Verarbeitung



- Compoundieren
- Extrusion
 - Flach- und Blasfolie
 - Profilextrusion
 - Filament- und Strangextrusion
- Analytik



OST
Ostschweizer
Fachhochschule

Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit

Prof. Daniel Schwendemann
Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung IWK
Fachbereich Compoundieren / Extrusion

daniel.schwendemann@ost.ch

+41 58 257 49 16

27. September 2023

Technik / IWK



**INSTITUTE FOR MATERIALS TECHNOLOGY
AND PLASTICS PROCESSING**