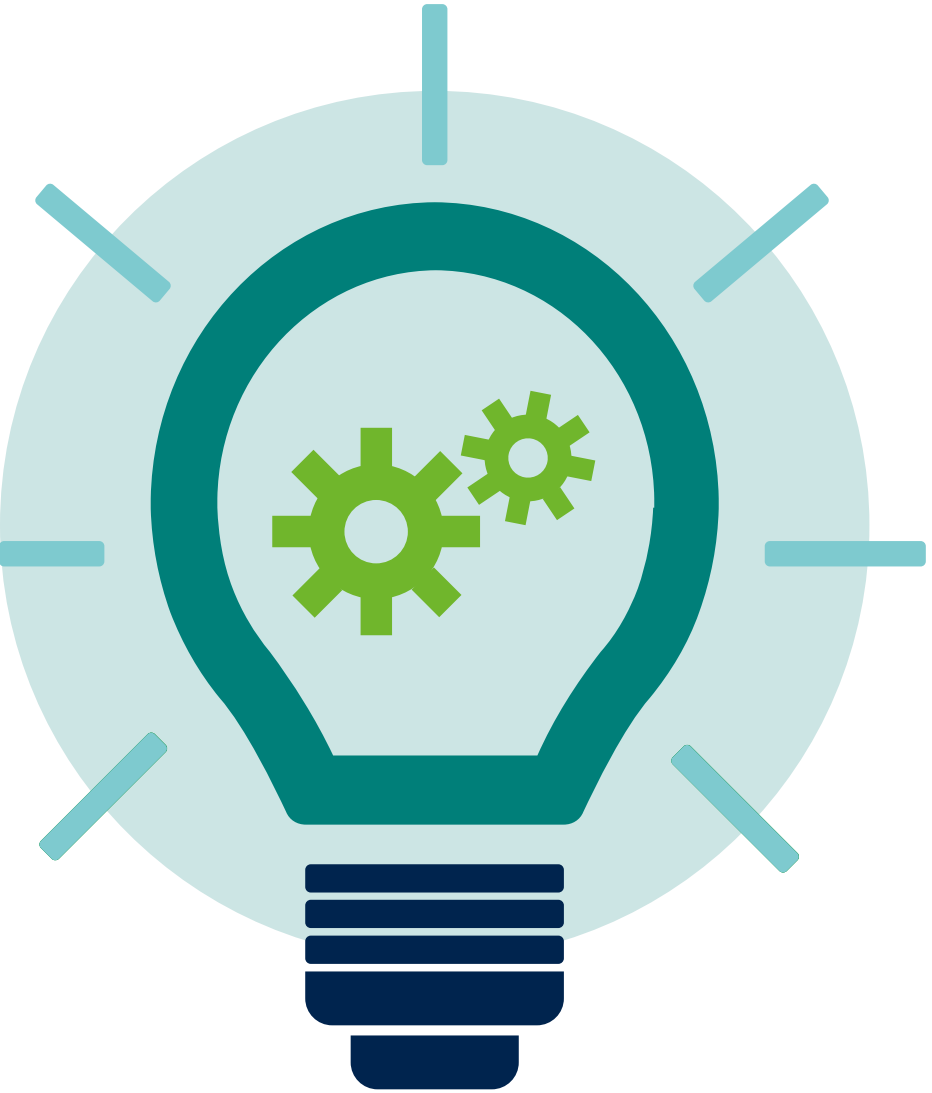
TransBiB
Boost. Industrial. Bioeconomy.



Bioökonomie in der Kunststoffbranche

Schulung zu Begriffen, Materialien und Technologien

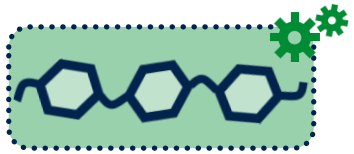
Neues lernen – Ideen entwickeln – Partner finden

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhalt

Biokunststoffe

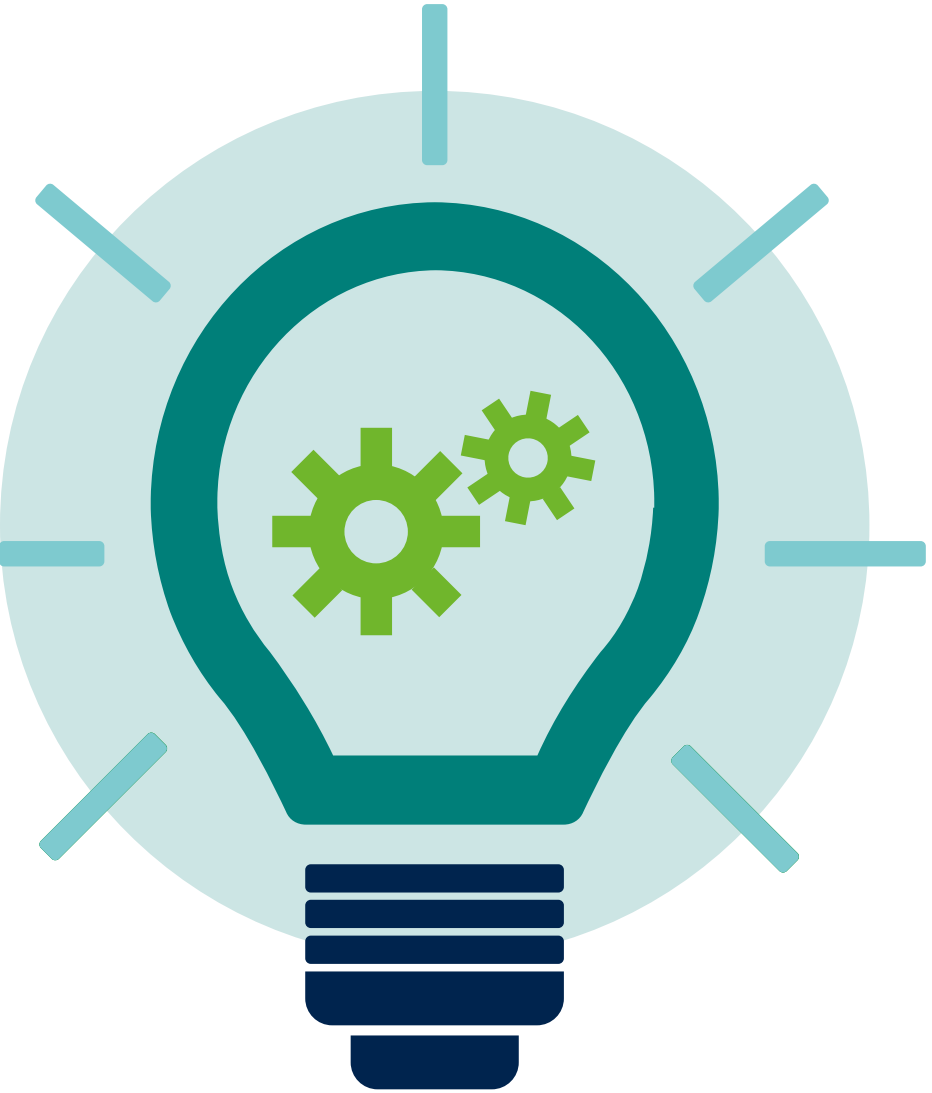
- Abbauverhalten
- Ressourcen
- Drop-in
- Biobasierte Kohlenstoffquellen
- Biobasierte Kunststoffe
- Enzymatischer Abbau



Modifizierte Biomasse

- Stärke
- Cellulose
- Polyhydroxyalkanoate

TransBiB
Boost. Industrial. Bioeconomy.



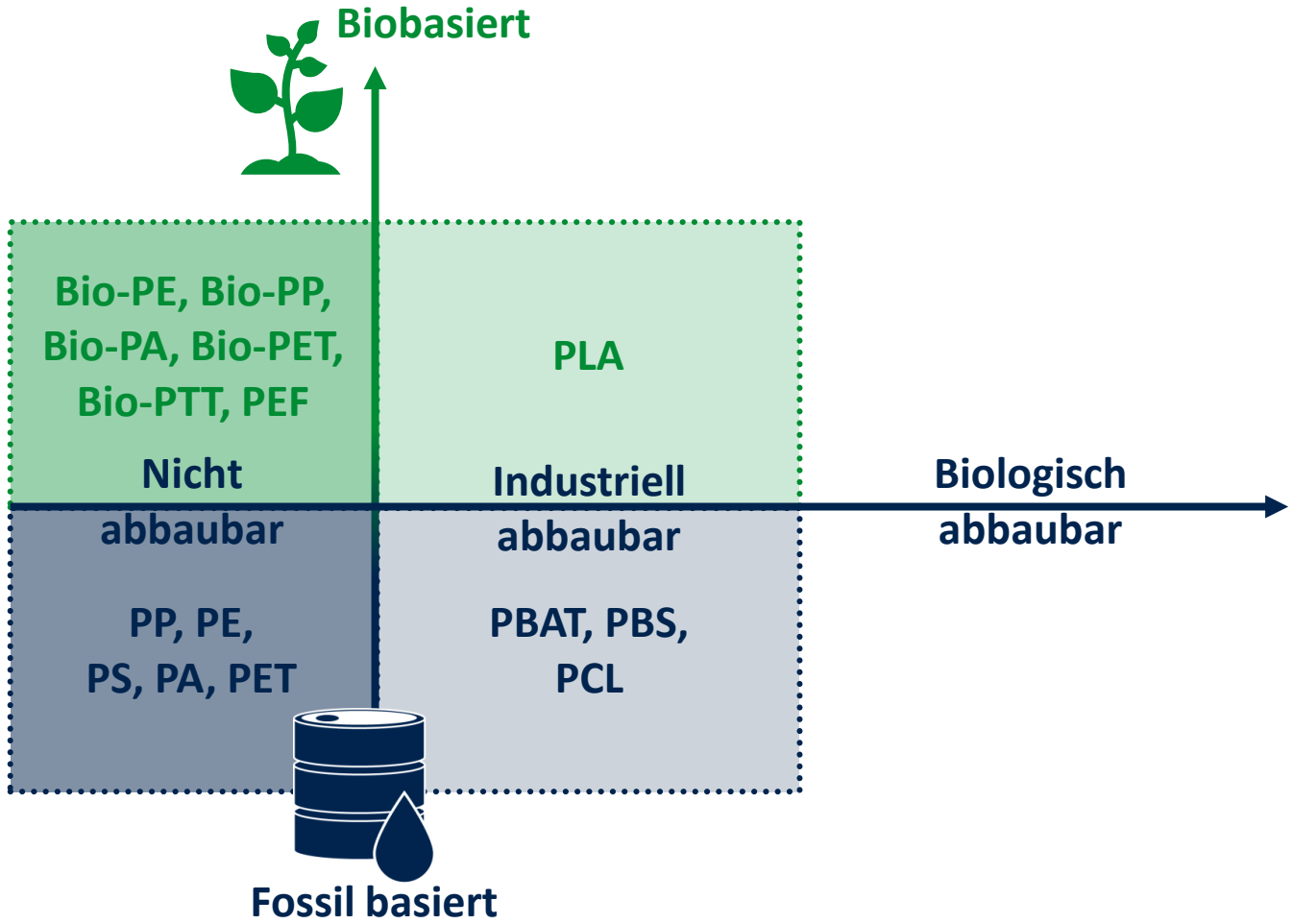
Biokunststoffe

Ursprung, Eigenschaften & Anwendungsbeispiele

Neues lernen – Ideen entwickeln – Partner finden

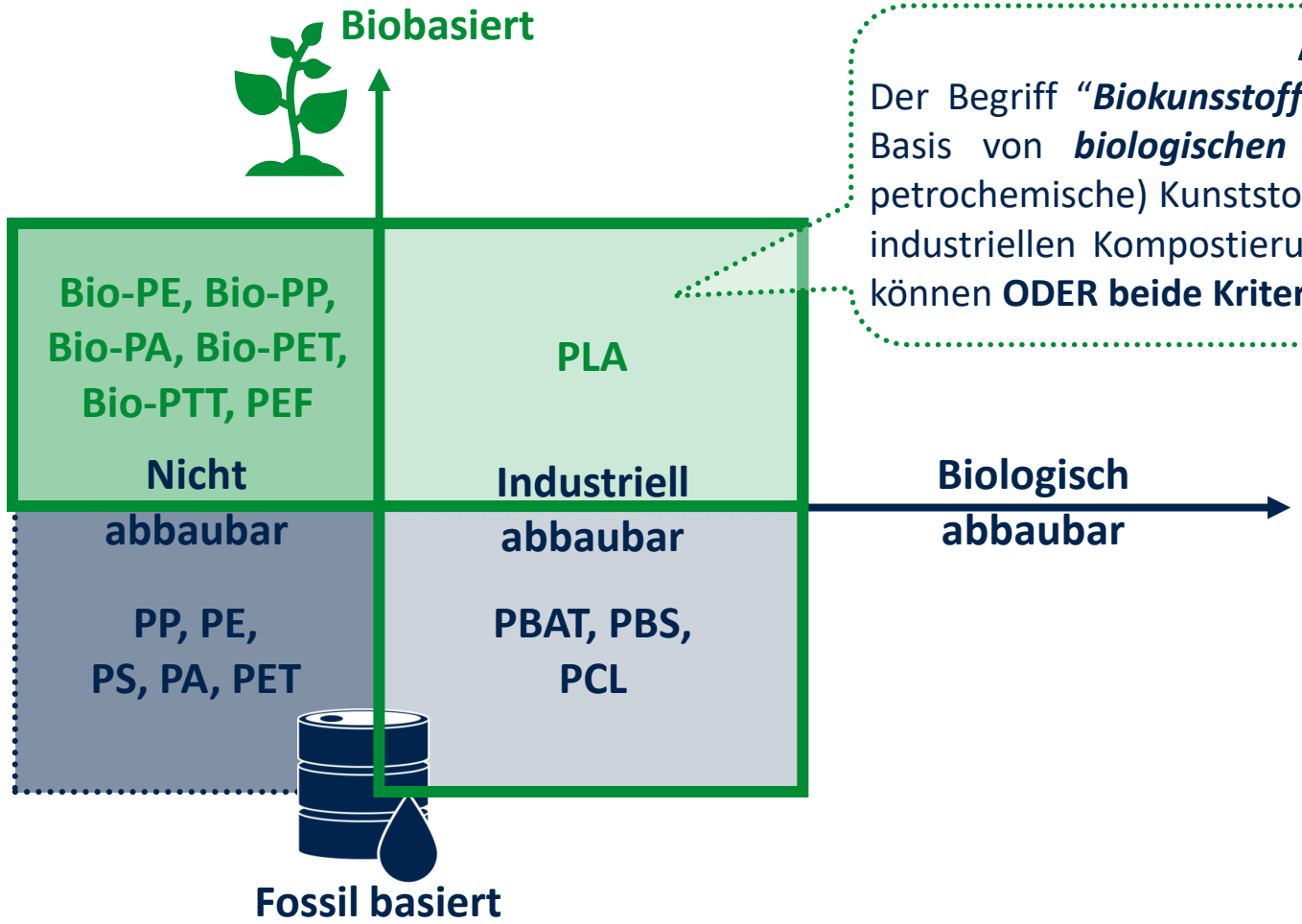
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Einordnung bezüglich Herkunft & Abbauverhalten



PA	Polyamid
PBAT	Polybutylen(adipat-co-terephthalat)
PBS	Polybutylensuccinat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranoat
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PLA	Polymilchsäure
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTT	Polytrimethylenterephthalat

Einordnung bezüglich Herkunft & Abbauverhalten

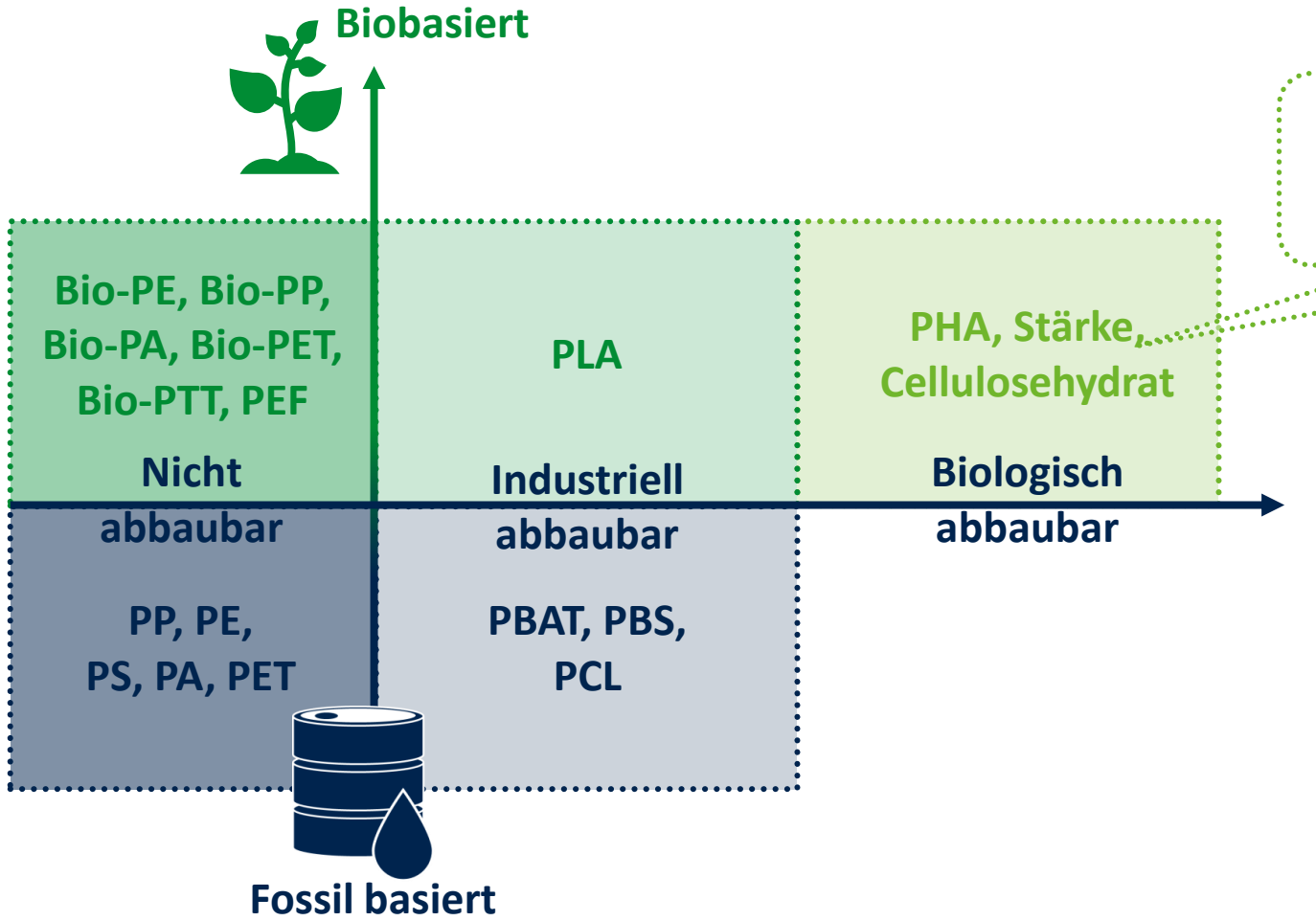


Achtung!

Der Begriff "***Biokunsstoff***" schließt sowohl Kunststoffe auf Basis von ***biologischen Rohstoffen*** ein, als auch (z.B. petrochemische) Kunststoffe, welche unter Bedingungen der industriellen Kompostierung ***(biologisch) abgebaut*** werden können **ODER beide Kriterien** erfüllen!

PA	Polyamid
PBAT	Polybutylen(adipat-co-terephthalat)
PBS	Polybutylensuccinat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranoat
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PLA	Polymilchsäure
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTT	Polytrimethylenterephthalat

Einordnung bezüglich Herkunft & Abbauverhalten



Unmodifizierte natürliche Biopolymere (= Naturpolymere) sind KEIN *Kunststoff*![1]

PA	Polyamid
PBAT	Polybutylen(adipat-co-terephthalat)
PBS	Polybutylensuccinat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranoat
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PLA	Polymilchsäure
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTT	Polytrimethylenterephthalat

[1] EU SUPD Art. 3 (40)

Klassifizierung anhand der Ressourcen

1. Generation (Lebensmittelbasiert)

Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **essbarer Biomasse** gewonnen.

Stärke: Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka, etc.

Glukose: Zuckerrohr, Zuckerrüben, etc.

Pflanzenöl: Soja, Sonnenblumen, Rizinus, Raps, Ölpalme, etc.

Klassifizierung anhand der Ressourcen

1. Generation (Lebensmittelbasiert)

Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **essbarer Biomasse** gewonnen.

2. Generation (Nicht-lebensmittelbasiert)

Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **nicht-essbarer Biomasse** gewonnen.

Stärke: Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka, etc.
Glukose: Zuckerrohr, Zuckerrüben, etc.
Pflanzenöl: Soja, Sonnenblumen, Rizinus, Raps, Ölpalme, etc.

Lignocellulose: Nebenprodukte oder Abfälle aus der Land- und Holzwirtschaft; Bagasse, Stroh, etc.
Siedlungsabfälle: organischer Abfall, Abwasser, etc.

Klassifizierung anhand der Ressourcen

1. Generation (Lebensmittelbasiert)

Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **essbarer Biomasse** gewonnen.

Stärke: Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka, etc.
Glukose: Zuckerrohr, Zuckerrüben, etc.
Pflanzenöl: Soja, Sonnenblumen, Rizinus, Raps, Ölpalme, etc.

2. Generation (Nicht-lebensmittelbasiert)

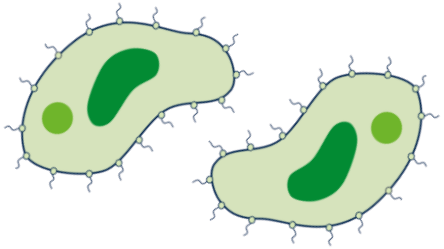
Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **nicht-essbarer Biomasse** gewonnen.

Lignocellulose: Nebenprodukte oder Abfälle aus der Land- und Holzwirtschaft; Bagasse, Stroh, etc.
Siedlungsabfälle: organischer Abfall, Abwasser, etc.

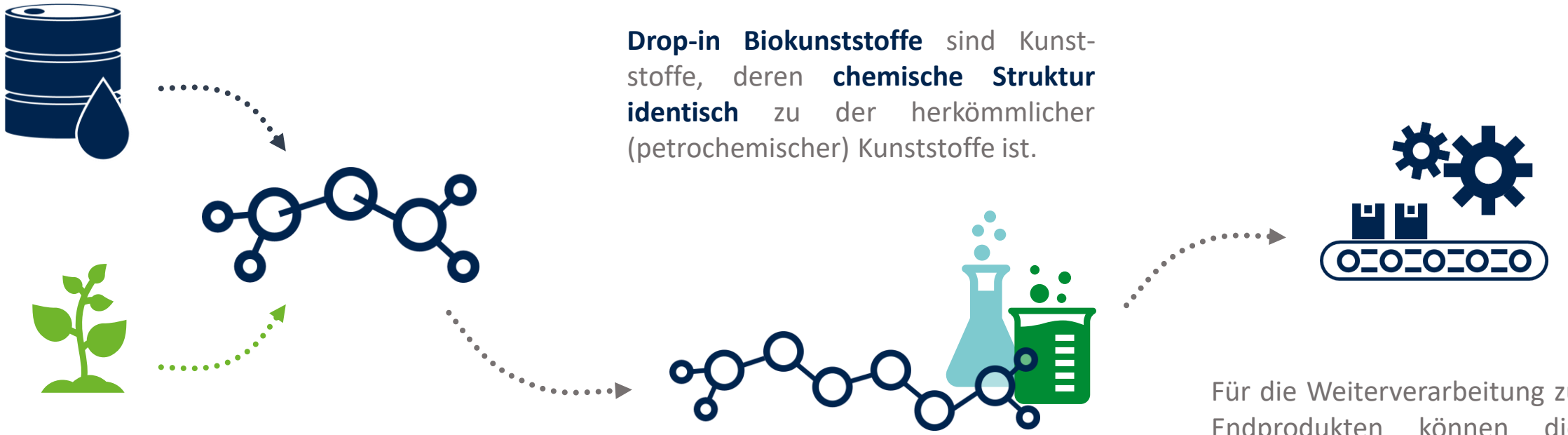
3. Generation (Nicht-lebensmittelbasiert & bodenunabhängig)

Die Grundsubstanzen und Rohstoffe werden aus **nicht-essbaren, bodenunabhängigen Kulturen** gewonnen.

Mikroorganismen: Mikroalgen, Bakterien, Pilze, Hefen, etc.



Biokunststoffe in der Prozesskette

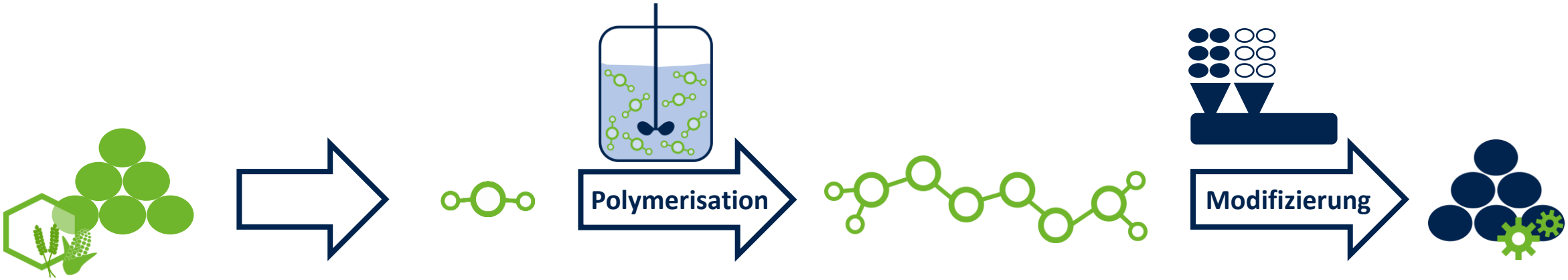


Drop-in Biokunststoffe sind Kunststoffe, deren **chemische Struktur identisch** zu der herkömmlicher (petrochemischer) Kunststoffe ist.

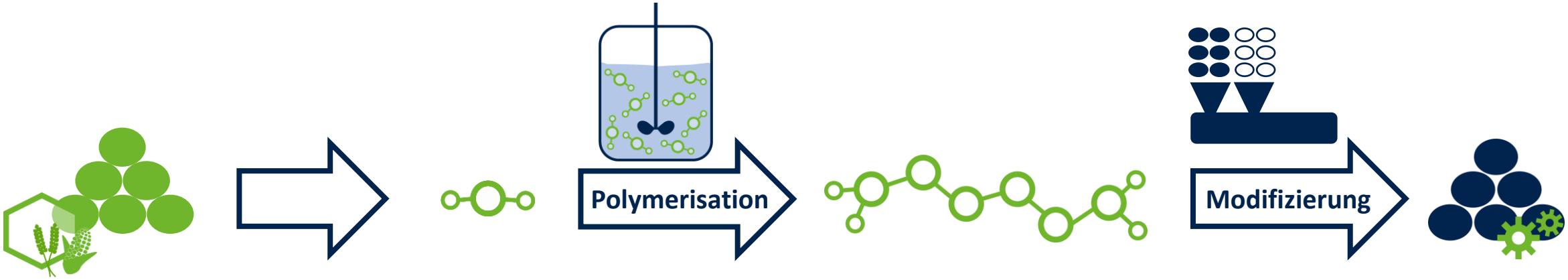
Die Grundchemikalien für die Herstellung von Drop-in Biokunststoffen werden anstatt aus Erdöl (fossile Quelle) **aus nachwachsenden Rohstoffen** (erneuerbare Quellen, z.B. Zuckerrohr) hergestellt.

Für die Weiterverarbeitung zu Endprodukten können die **gleichen Maschinen und Verfahren** genutzt werden, wie für die fossil-basierten Pendants.

Drop-in Lösungen



Drop-in Lösungen



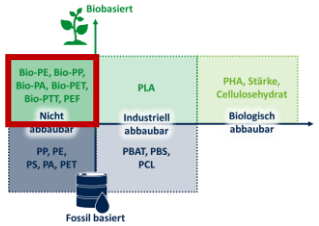
Rohstoff → **Monomer** → **Polymer** → **Werkstoff**

Biobasierte Kohlenwasserstoffe
(z.B. Öle, Fette)

Polymerisierbare Biomasse
(z.B. Lactide, Disäuren)

Biologische Polymere
(z.B. Stärke, Cellulose, Kautschuk)

Biobasierte Kohlenstoffquellen



Zuckerrohr

Brasilien (gute klimatische Bedingungen und etablierte Produktion)

Hoher Zuckergehalt

Umwelt Regenwaldabholzung für Anbauflächen

Mais

USA (generell dort, wo Zuckerrohr schlecht angebaut werden kann)

Effizienz Stärke muss zunächst in Zucker umgewandelt werden

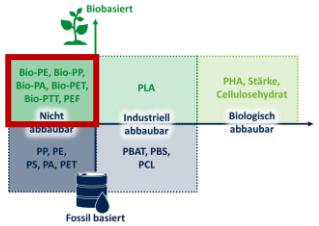
Nahrungsmittelkonkurrenz insb. durch Fehl-subventionen für die Treibstoffindustrie

Zuckerrübe

Europa (geeignet für gemäßigtes Klima)

Großer Ertrag pro Fläche

Biobasierte Kohlenstoffquellen



Zuckerrohr

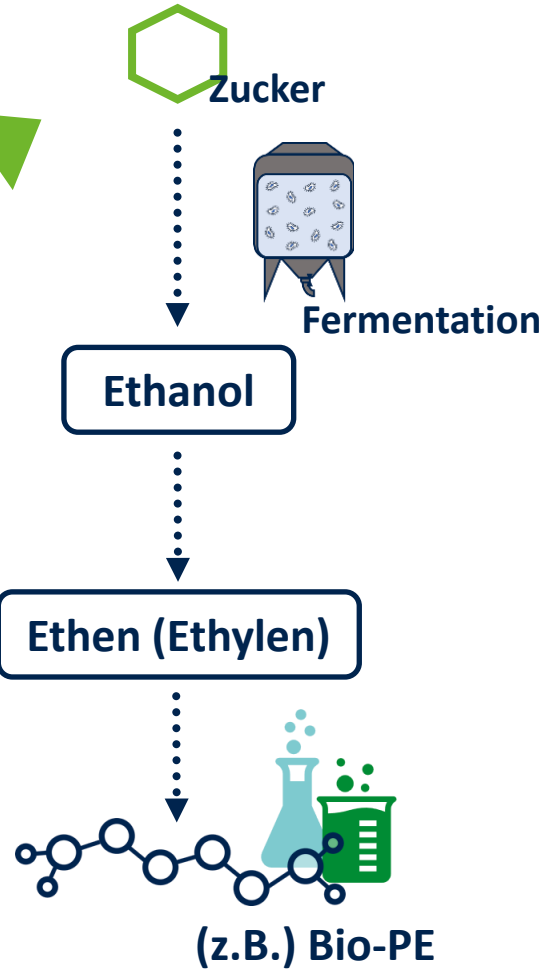
- **Brasilien** (gute klimatische Bedingungen und etablierte Produktion)
- ✓ **Hoher Zuckergehalt**
- ✗ **Umwelt** Regenwaldabholzung für Anbauflächen

Mais

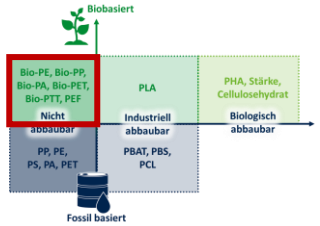
- **USA** (generell dort, wo Zuckerrohr schlecht angebaut werden kann)
- ✗ **Effizienz** Stärke muss zunächst in Zucker umgewandelt werden
  Nahrungsmittelkonkurrenz insb. durch Fehl-subventionen für die Treibstoffindustrie

Zuckerrübe

- **Europa** (geeignet für gemäßigtes Klima)
- ✓ **Großer Ertrag pro Fläche**



Biobasierte Kohlenstoffquellen

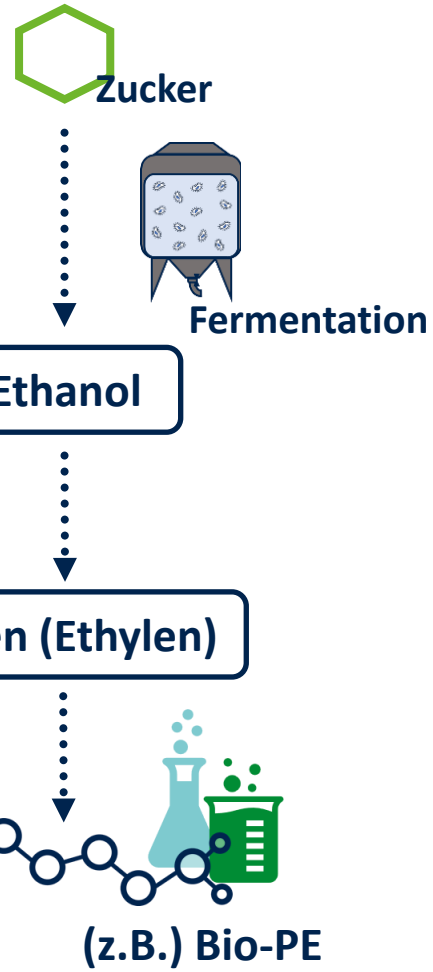


Zuckerrohr

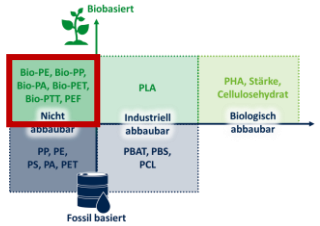
Mais

Zuckerrübe

- **Rohstoffverfügbarkeit: Regionalität** (kurze Transportwege) und **verfügbare Menge** an Rohmaterial haben einen entscheidenden Einfluss auf die **Kosten** und Umsetzung einer Transformation
- **Nachhaltigkeit:** die Nutzung von **nicht-essbarer Biomasse** (2. Generation) und Neben- & Abfallströmen mindert Sorge um **Ernährungssicherheit und Flächennutzung**
- **CO_2 Bilanz:** biobasierte Polymere wie Bio-PE weisen eine signifikant **geringere CO_2 Bilanz** auf, als ihre fossil-basierten Pendants



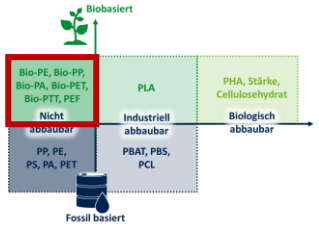
Biobasierte Kunststoffe | PA



Polyamide (technische Thermoplaste, Nylon)

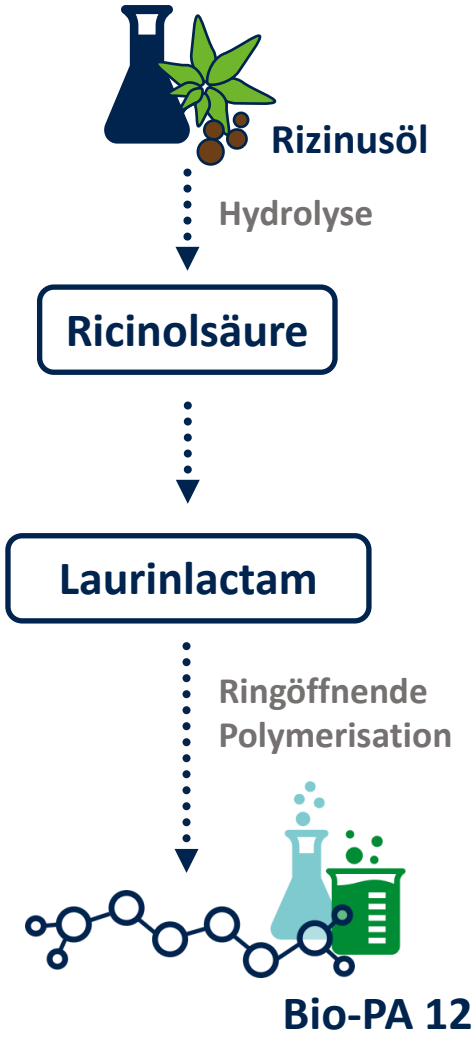
- PAs werden formal aus der **Kondensation einer Carbonsäure und eines Amins** hergestellt (Amidbindung)
- Industriell wichtig sind vor allem **PA 6.6 und PA 12**
- **hohe Festigkeit und Steifigkeit** bei guter Abrieb- und Verschleißfestigkeit
- **vielfältige Anwendung,** z.B. in Faserform

Biobasierte Kunststoffe | PA

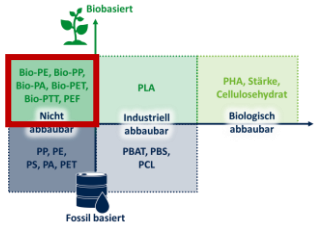


Polyamide (technische Thermoplaste, Nylon)

- PAs werden formal aus der **Kondensation einer Carbonsäure und eines Amins** hergestellt (Amidbindung)
- Industriell wichtig sind vor allem **PA 6.6 und PA 12**
- **hohe Festigkeit und Steifigkeit** bei guter Abrieb- und Verschleißfestigkeit
- **vielfältige Anwendung,** z.B. in Faserform
- **Biobasiert: PA aus Rizinusöl** -> keine Nahrungsmittelkonkurrenz

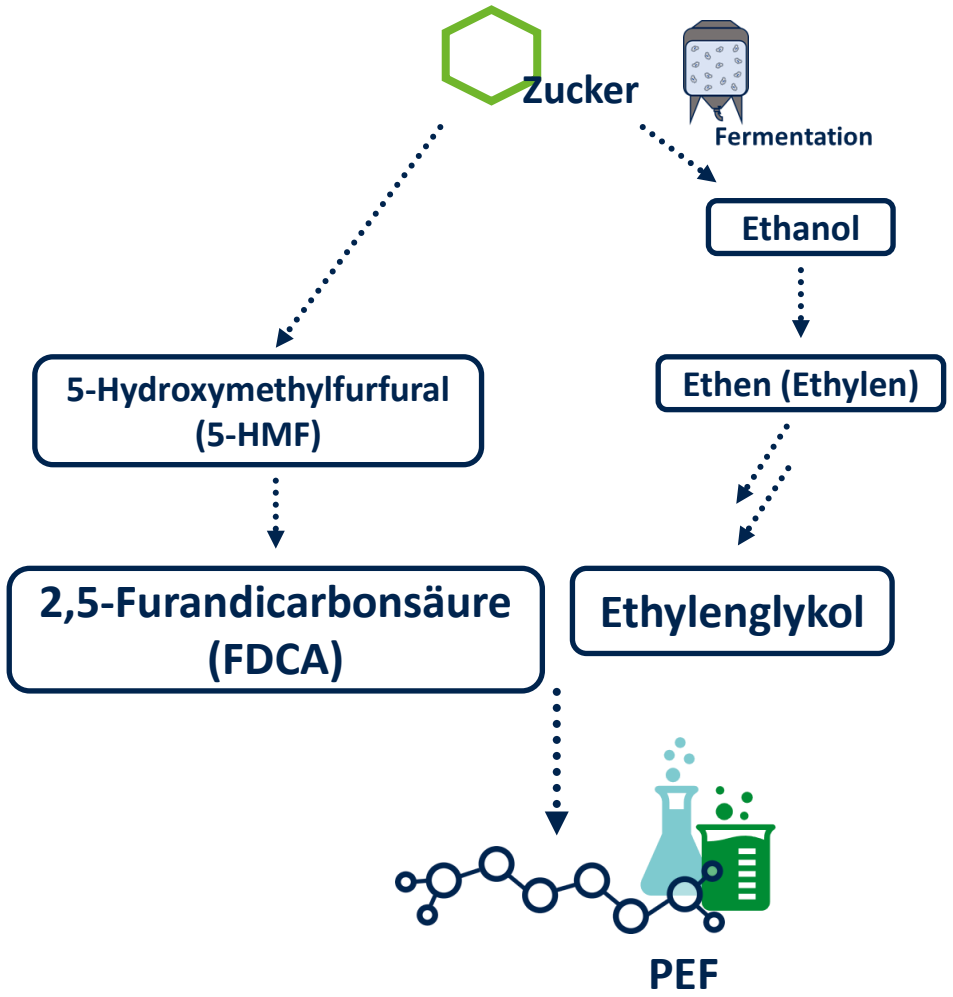


Biobasierte Kunststoffe | PEF

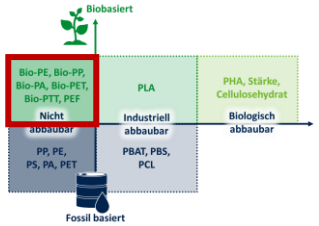


Polyethylenfuranoat (PEF) – Biobasierte PET-Alternative (technischer Thermoplast)

- Aromatischer Polyester: vergleichbar zu PET
- Ausgangsstoffe: **2,5-Furandicarbonsäure (FDCA) und Ethylenglykol (MEG)**
- FDCA wird aus Zucker (Fruktose) hergestellt
- Ethylenglykol könnte ebenfalls aus Zucker hergestellt werden, um **PEF vollständig biobasiert** zu produzieren
- **Industrielle Anwendung** als Flaschen, Filme und Fasern



Biobasierte Kunststoffe | PEF

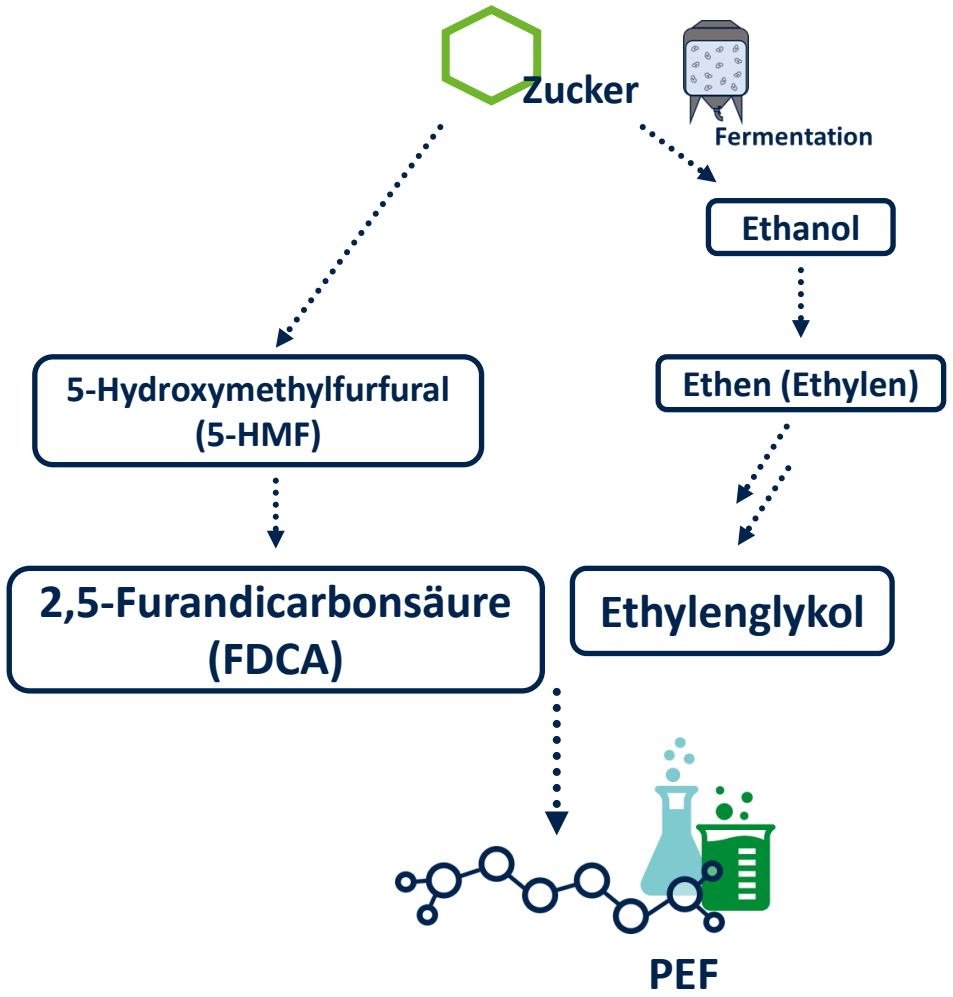


Polyethylenfuranoat (PEF) – Biobasierte PET-Alternative (technischer Thermoplast)

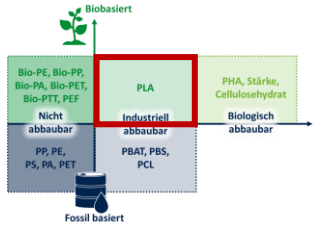
- Aromatischer Polyester: vergleichbar zu PET
- Ausgangsstoffe: **2,5-Furandicarbonsäure (FDCA) und Ethylenglykol (MEG)**
- FDCA wird aus Zucker (Fruktose) hergestellt
- Ethylenglykol könnte ebenfalls aus Zucker hergestellt werden, um **PEF vollständig biobasiert** zu produzieren
- **Industrielle Anwendung** als Flaschen, Filme und Fasern

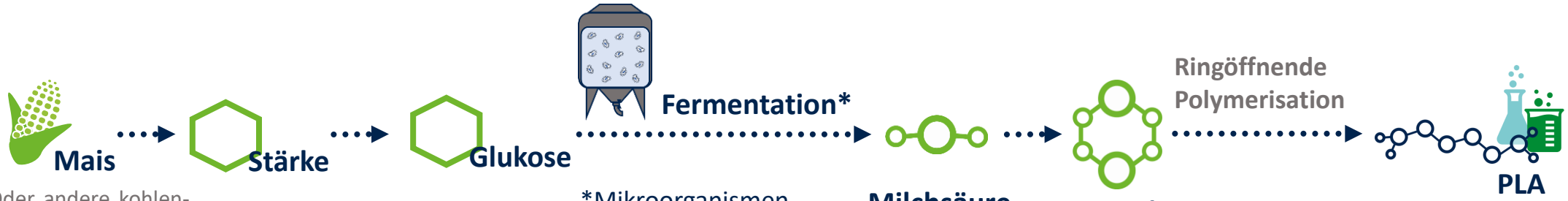
Vergleich mit PET

- Bessere O_2-, CO_2- und H_2O-Barriereeigenschaften
- Höhere Zugfestigkeit
- Niedrigerer Schmelzpunkt
- Höhere Glasübergangstemperatur



Biobasierte Kunststoffe | PLA





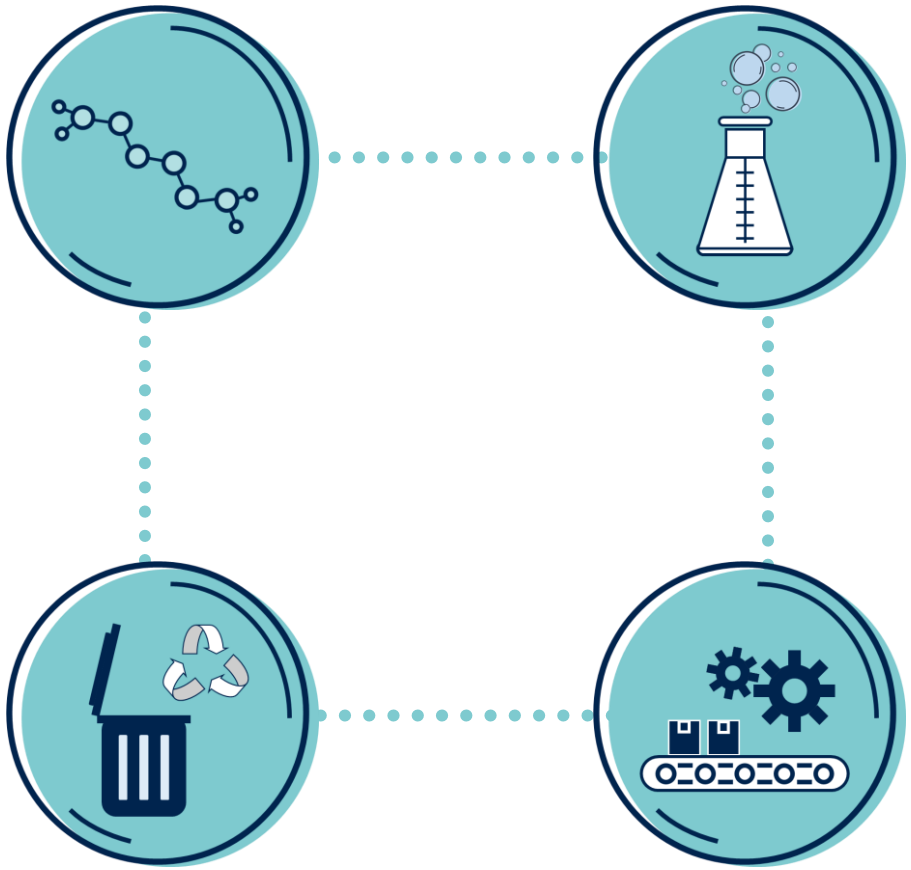
Polylactid (technischer Thermoplast)

- PLA gehört zu den **Polyestern**
- die Herstellung erfolgt i.d.R. auf Basis **stärkehaltiger Pflanzen**
- Durch **Fermentation** wird der aus der Stärke gewonnene Zucker Glukose zu Milchsäure, dem Monomer, umgesetzt

PLA - Polymilchsäure

Chemische Eigenschaften:

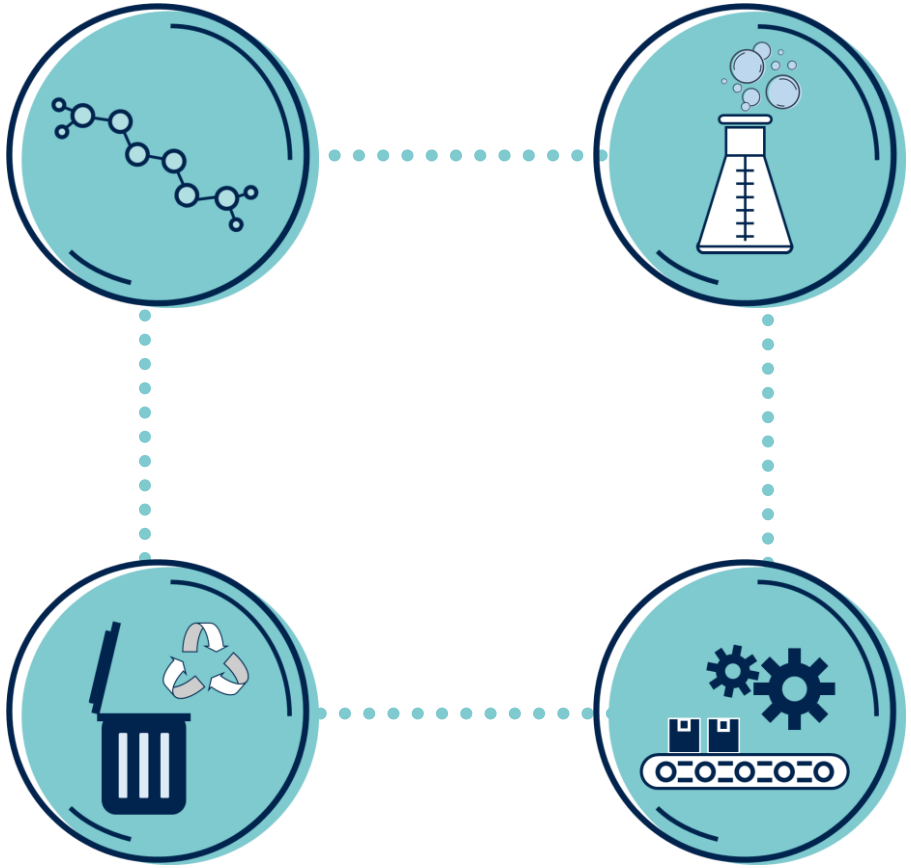
Milchsäure ist eine Hydroxy-carbonsäure (eine Säuregruppe und eine Alkoholgruppe im Molekül). Sie kommt in zwei enantiomeren Formen vor: **L- und D-Milchsäure**. PLA besitzt **hydrophobe Eigenschaften** aufgrund der unpolaren Polymerkette, ist jedoch weniger hydrophob als PE.



PLA - Polymilchsäure

Chemische Eigenschaften:

Milchsäure ist eine Hydroxy-carbonsäure (eine Säuregruppe und eine Alkoholgruppe im Molekül). Sie kommt in zwei enantiomeren Formen vor: **L- und D-Milchsäure**. PLA besitzt **hydrophobe Eigenschaften** aufgrund der unpolaren Polymerkette, ist jedoch weniger hydrophob als PE.



Herstellung:

Milchsäure Monomere (L- und D-Milchsäure) können über **Fermentation aus Kohlenhydraten** wie Zucker oder Stärke hergestellt werden. Die Polymerisation erfolgt entweder über eine **direkte Kondensation oder eine Ringöffnungs-kondensation**, ausgehend vom Lactid (Dimer).

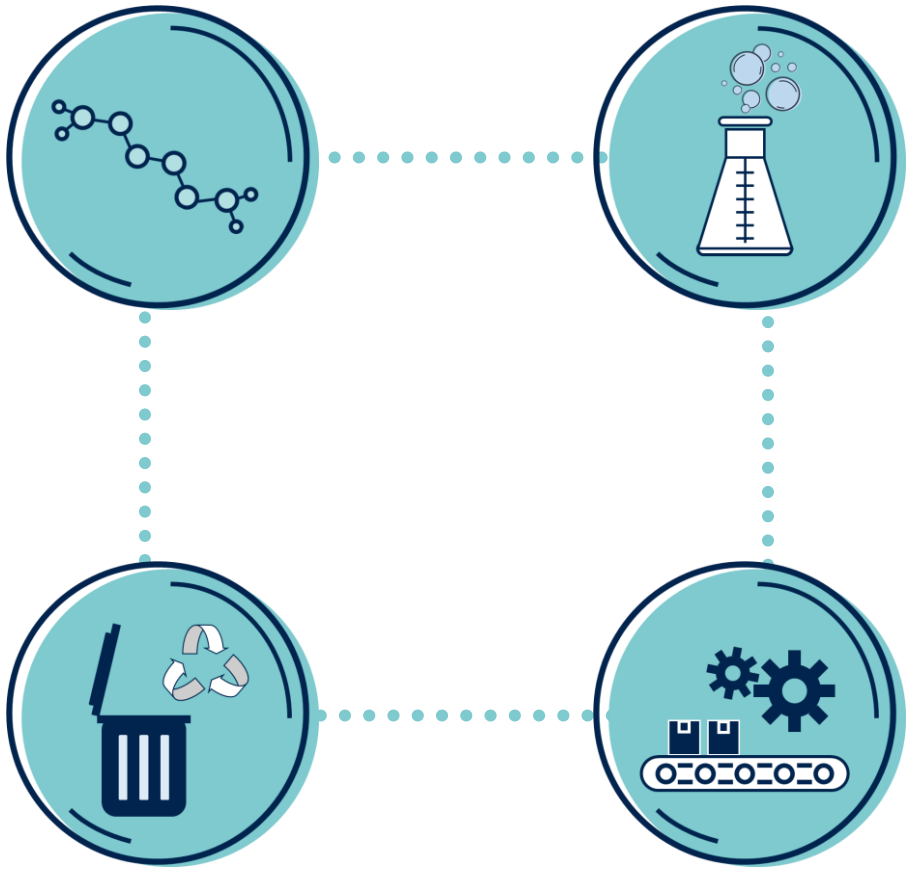
PLA - Polymilchsäure

Chemische Eigenschaften:

Milchsäure ist eine Hydroxy-carbonsäure (eine Säuregruppe und eine Alkoholgruppe im Molekül). Sie kommt in zwei enantiomeren Formen vor: **L- und D-Milchsäure**. PLA besitzt **hydrophobe Eigenschaften** aufgrund der unpolaren Polymerkette, ist jedoch weniger hydrophob als PE.

Abbaubarkeit:

PLA ist bei Raumtemperatur oder unkontrollierten Umweltbedingungen **nicht oder nur unzureichend abbaubar!** Es werden Bedingungen der **industriellen Kompostierung** benötig. Zusätzlich wirkt sich der Grad der Kristallinität auf die Abbaubarkeit aus.



Herstellung:

Milchsäure Monomere (L- und D-Milchsäure) können über **Fermentation aus Kohlenhydraten** wie Zucker oder Stärke hergestellt werden. Die Polymerisation erfolgt entweder über eine **direkte Kondensation oder eine Ringöffnungs-kondensation**, ausgehend vom Lactid (Dimer).

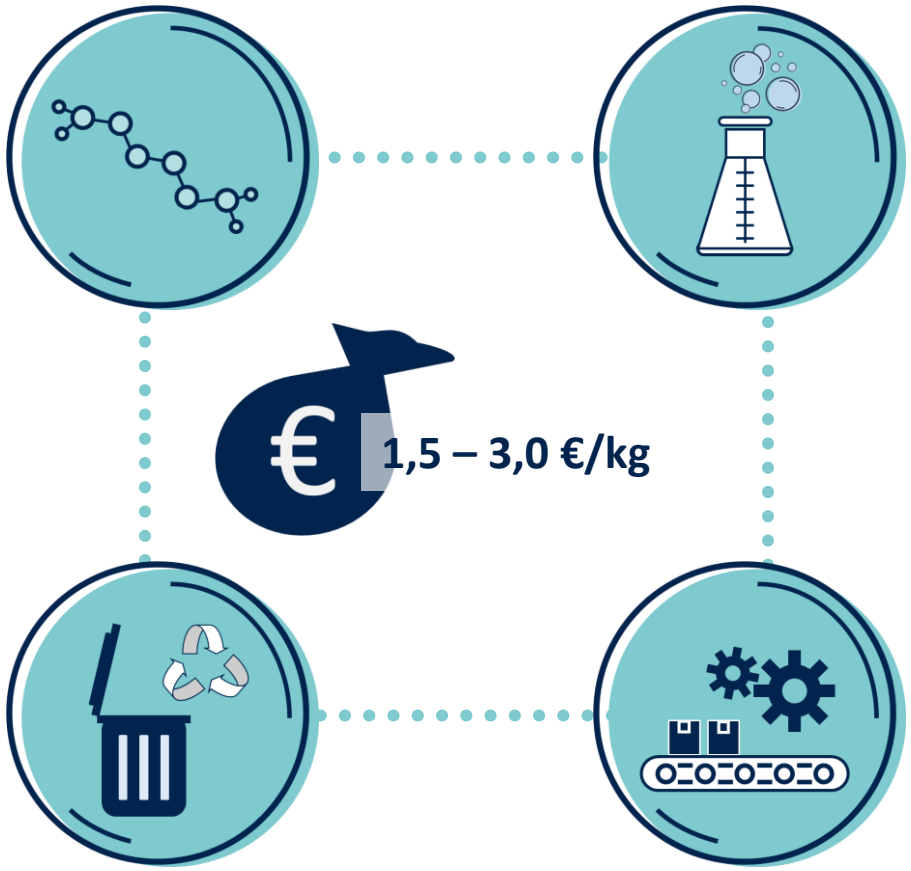
PLA - Polymilchsäure

Chemische Eigenschaften:

Milchsäure ist eine Hydroxy-carbonsäure (eine Säuregruppe und eine Alkoholgruppe im Molekül). Sie kommt in zwei enantiomeren Formen vor: **L- und D-Milchsäure**. PLA besitzt **hydrophobe Eigenschaften** aufgrund der unpolaren Polymerkette, ist jedoch weniger hydrophob als PE.

Abbaubarkeit:

PLA ist bei Raumtemperatur oder unkontrollierten Umweltbedingungen **nicht oder nur unzureichend abbaubar!** Es werden Bedingungen der **industriellen Kompostierung** benötig. Zusätzlich wirkt sich der Grad der Kristallinität auf die Abbaubarkeit aus.



Herstellung:

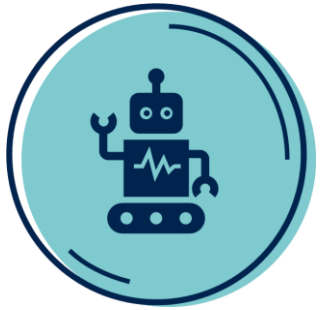
Milchsäure Monomere (L- und D-Milchsäure) können über **Fermentation aus Kohlenhydraten** wie Zucker oder Stärke hergestellt werden. Die Polymerisation erfolgt entweder über eine **direkte Kondensation oder eine Ringöffnungs-kondensation**, ausgehend vom Lactid (Dimer).

Verarbeitung:

Modifizierungen sind möglich über das Verhältnis von PLLA und PDLA, die **Kettenlänge** der Polymere und deren **Kristallinität** sowie durch die Zugabe von **Additiven, Füll- oder Verstärkungsstoffe** möglich. Die **Verarbeitungstemperatur** liegt bei ca. **150 – 180 °C**.

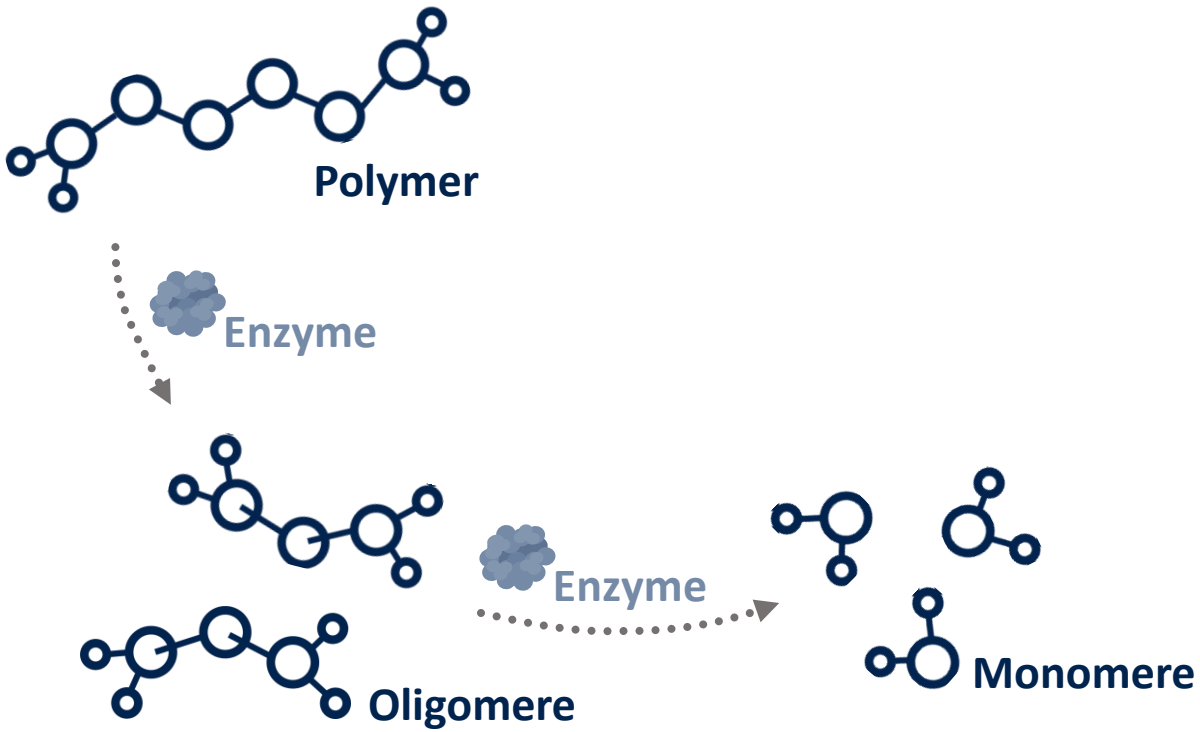
Eigenschaften & Anwendungen von PLA

- Nicht toxisch
- Bioverträglich
- Moderate Barriereeigenschaften ggü. Wasserdampf (etwas geringer als beispielsweise PET) -> als Blend oder mit einer Beschichtung kann diese verbessert werden
- Transparent
- Gute mechanische Festigkeit -> allerdings sehr spröde



- Geeignet **für Extrusion** und **Spritzguss:** Filme, Folien, Fasern und Platten
- 3D Druck (Additive Fertigung)
- **Verpackungen** für den Lebensmittelkontakt (z.B. für Einwegverpackungen)
- **Medizinische Implantate**

Enzymatischer Kunststoffabbau



- Polymere wie PET und PLA, die **Esterbindungen** in ihrer chemischen Struktur enthalten, **können enzymatisch abgebaut werden.**
- **Verschiedene Enzyme** der Cutinasen, Lipasen, Laccasen, Esterasen und PETasen sind **in der Lage die Esterbindungen zu hydrolysieren.**
- Ihre Herkunft liegt in unterschiedlichen Mikroorganismen (Bakterien, Algen, Pilze)
- **Bei der Hydrolyse nimmt das Molekulargewicht kontinuierlich ab:** es bilden sich zunächst Oligomere (kurzkettigere Polymer) und dann auch die Monomere.
- Bei biobasierten Polymeren können sich die Monomere zu CO_2 und H_2O abbauen (z.B. bei PLA).

Enzymatischer Kunststoffabbau

- Die Aktivität der Enzyme für den Abbau kann mittels ***Protein Engineering*** gesteigert werden.
- Eine **material-spezifische Anbindung der Enzyme**[1] an das Polymer kann den Abbau zusätzlich steigern.[2],[3]

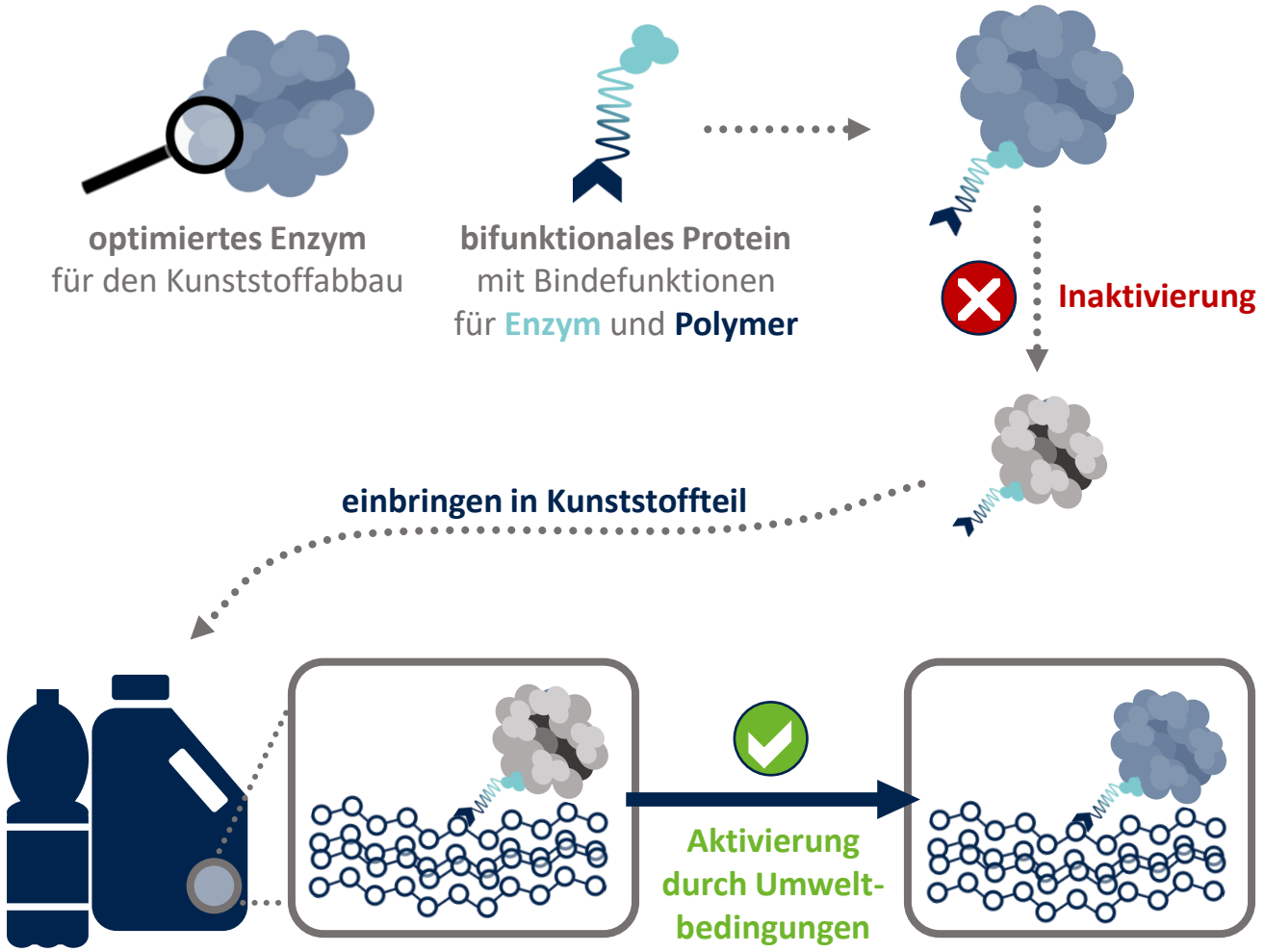
optimiertes Enzym
für den Kunststoffabbau

bifunktionales Protein
mit Bindefunktionen
für **Enzym** und **Polymer**

[1] *Chem. Soc. Rev.* **2024**, 53, 6445-6510.
[2] *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, *136*, e202317419.
[3] *ACS Catal.* **2023**, 13, 12746-12754.

Enzymatischer Kunststoffabbau

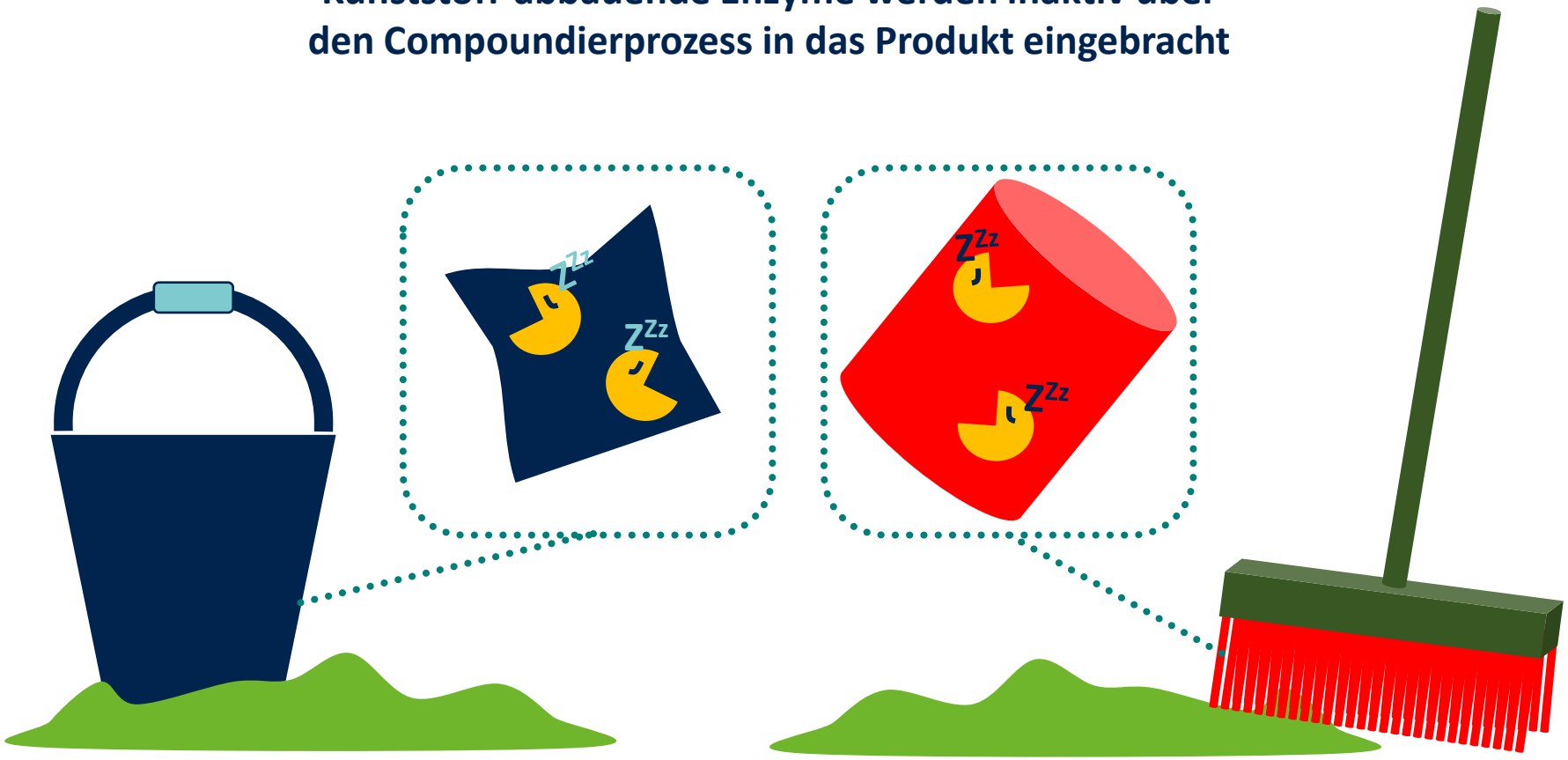
- Die Aktivität der Enzyme für den Abbau kann mittels ***Protein Engineering*** gesteigert werden.
- Eine **material-spezifische Anbindung der Enzyme**[1] an das Polymer kann den Abbau zusätzlich steigern.[2],[3]
- Enzyme können **inaktiv in Material eingebracht** werden, um für einen **programmierten Abbau** bei bestimmten Bedingungen zu sorgen.
- **Herausforderungen** sind die vorliegenden Umwelt-bedingungen, die **Kristallinität des Polymers** sowie ein langsamer Abbau, der einer schnell wachsenden Menge an Kunststoffabfall gegenübersteht.



[1] *Chem. Soc. Rev.* **2024**, 53, 6445-6510.
[2] *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, *136*, e202317419.
[3] *ACS Catal.* **2023**, 13, 12746-12754.

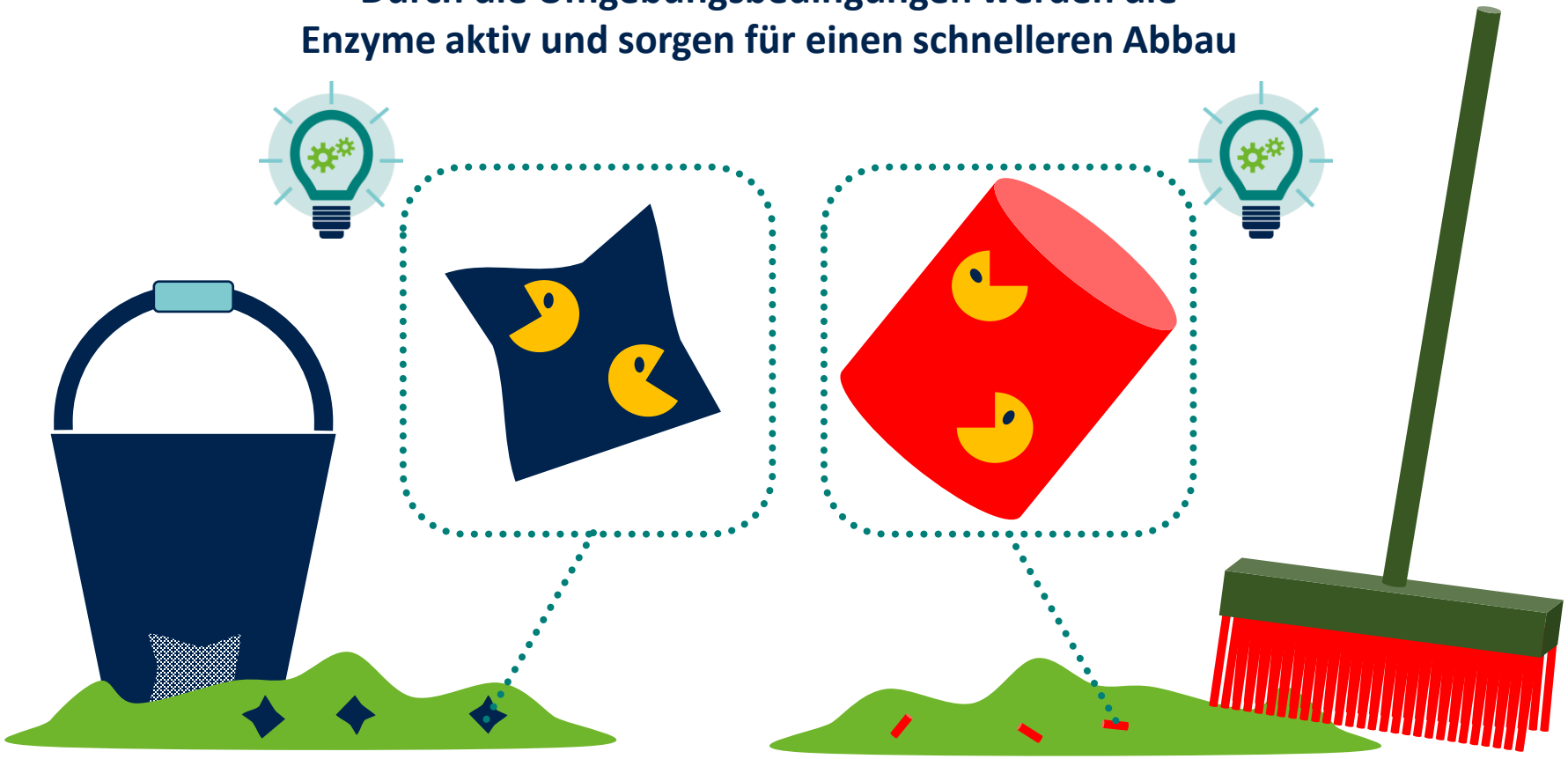
Use Case: Programmierter Kunststoffabbau

Kunststoff-abbauende Enzyme werden inaktiv über den Compoundierprozess in das Produkt eingebracht



Use Case: Programmierter Kunststoffabbau

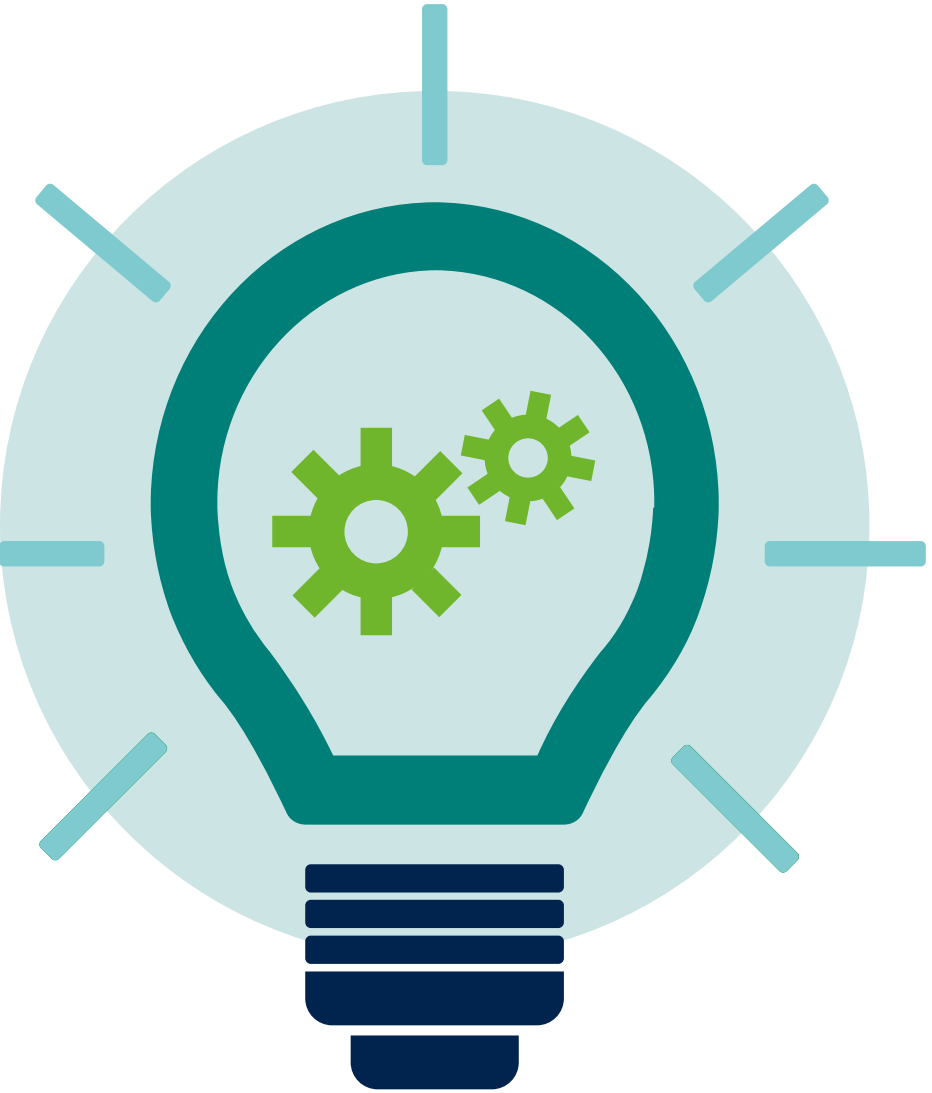
Durch die Umgebungsbedingungen werden die Enzyme aktiv und sorgen für einen schnelleren Abbau



Use Case: Programmierter Kunststoffabbau

Dieser programmierte Abbau ist besonders für Anwendungen interessant, bei denen Fragmente zwangsläufig in die Umwelt gelangen (z.B. durch Alterung oder im Agrarbereich) oder eine große Gefahr von Littering, d.h. dem Wegwerfen in die Umwelt, besteht.

TransBiB
Boost. Industrial. Bioeconomy.



Modifizierte Biomasse

Eigenschaften, Verarbeitung und Recycling

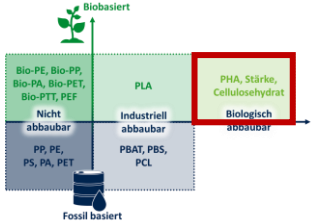
Neues lernen – Ideen entwickeln – Partner finden

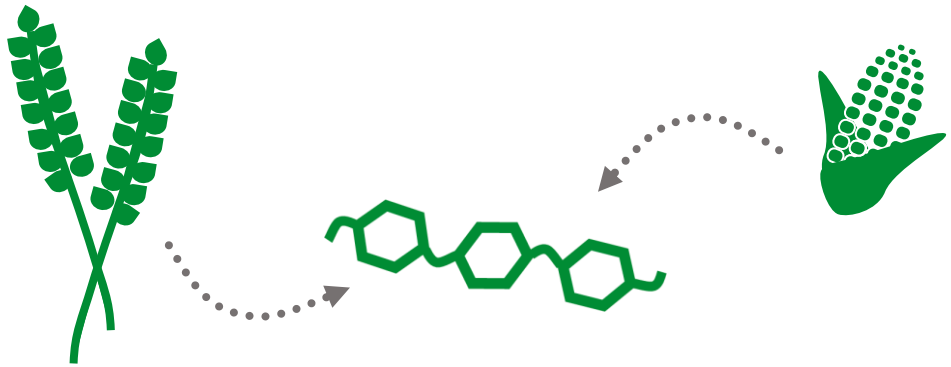
Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Natürlich, biobasiert & -abbaubar

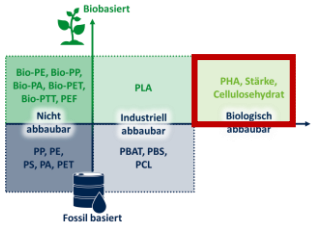


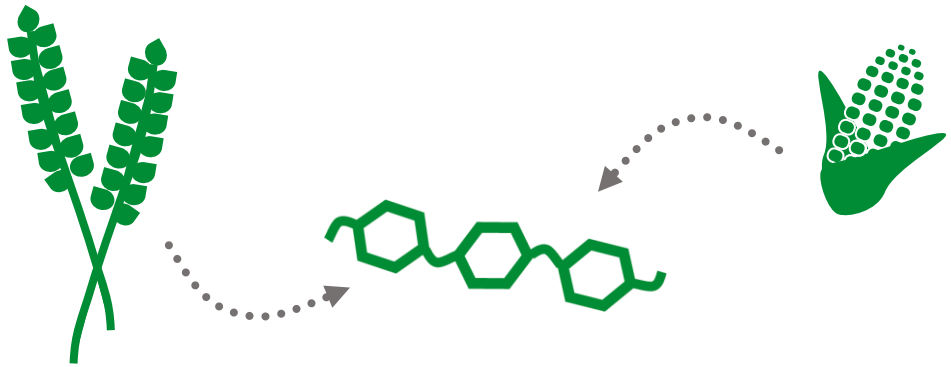


- In der Natur kommt eine Vielzahl an **natürlichen Polymeren** vor
- **(Chemisch) unmodifizierte Naturpolymere** sind per Definition **kein Plastik!** (bilden also auch kein Mikroplastik)[1]
- In der Regel handelt es sich um **Polysaccharide (Zuckerpolymere)**
- **Naturpolymere** besitzen eine **inherente biologische Abbaubarkeit**

[1] EU SUPD Art. 3 (40)

Natürlich, biobasiert & -abbaubar





- In der Natur kommt eine Vielzahl an **natürlichen Polymeren** vor
- **(Chemisch) unmodifizierte Naturpolymere** sind per Definition **kein Plastik!** (bilden also auch kein Mikroplastik)[1]
- In der Regel handelt es sich um **Polysaccharide (Zuckerpolymere)**
- **Naturpolymere** besitzen eine **inherente biologische Abbaubarkeit**

Industrielle Anwendung finden z.B.

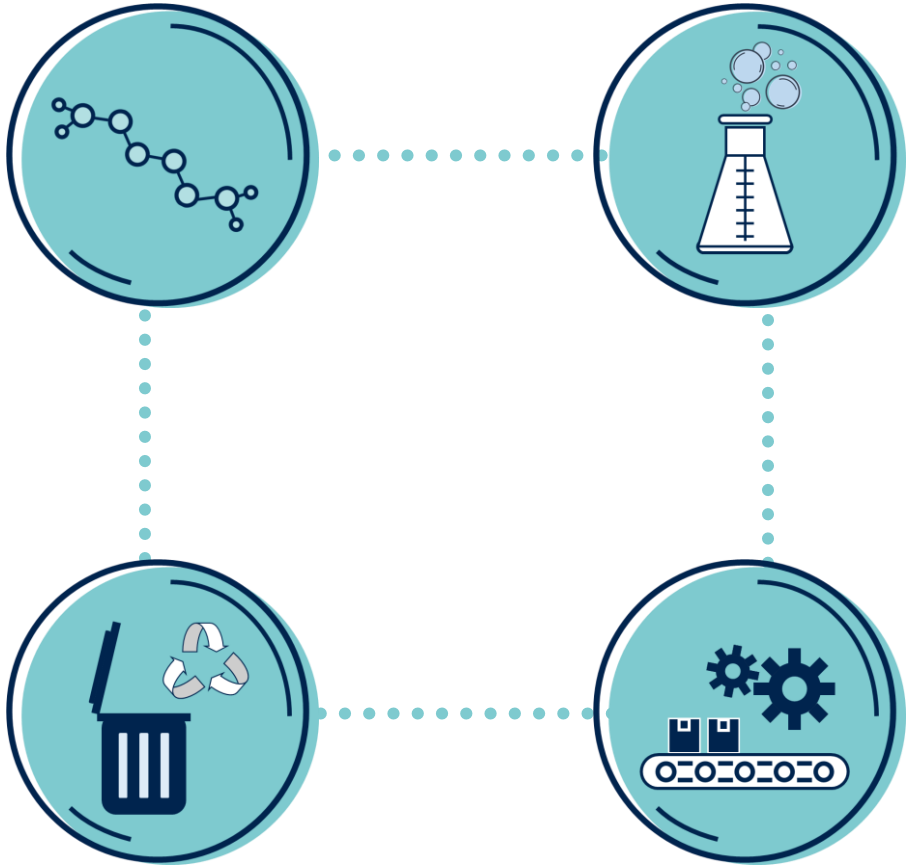
- **Pektin** (Zuckerpolymer aus pflanzlichen Rohstoffen; Apfel- oder Rübentrester) als Geliermittel
- **Chitin** (Zuckerpolymer aus Pilzen oder den Panzern von Insekten/Krebstieren) als Basis für **Chitosan**, welches sich zur Herstellung von Fasern, Schaumstoffen und Folien eignet
- **Cellulose** aus Holz und cellulosereichen Pflanzen – hierzu gehören die Bastpflanzen wie Hanf, Flachs, Kenaf und Ramie; Baumwolle besteht fast ausschließlich aus Cellulose
- **Stärke –** Zuckerpolymer aus stärkehaltigen Pflanzen wie Mais und Kartoffeln

[1] EU SUPD Art. 3 (40)

Thermoplastische Stärken (TPS)

Chemische Eigenschaften:

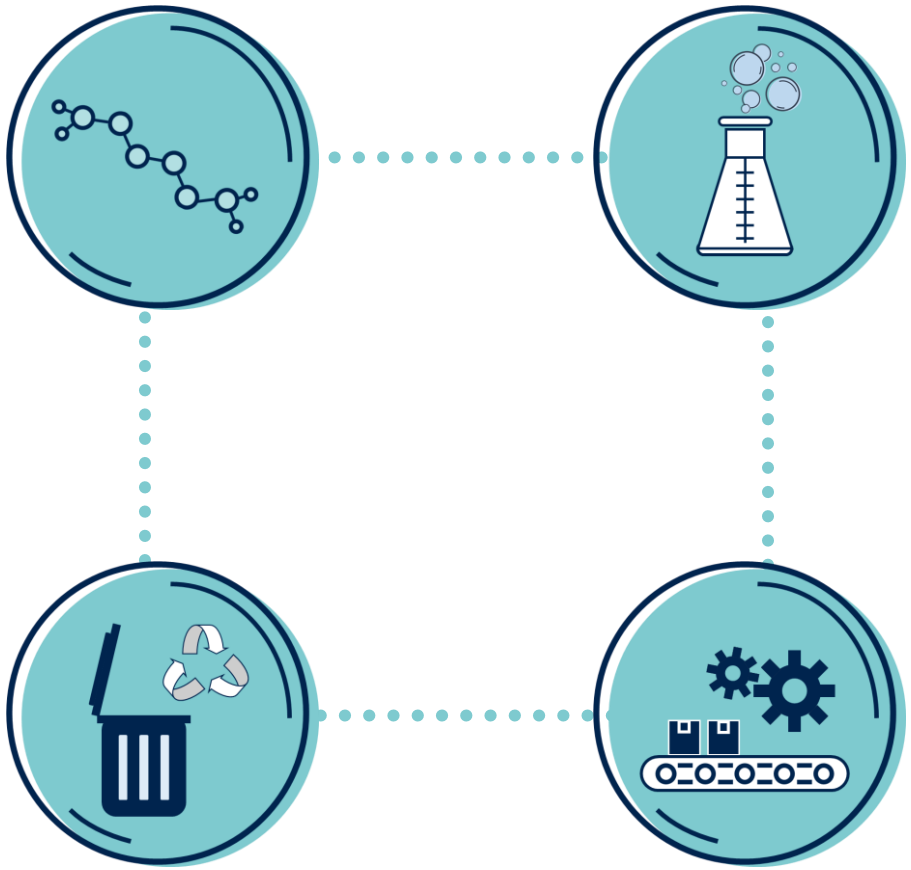
Stärke besteht aus **Zuckermolekülen** die entweder als lineare Ketten (Amylose) oder stark verzweigte Strukturen (Amylopektin) verbunden sind. Aufgrund ihrer Eigenschaft **Feuchtigkeit zu absorbieren** werden in der Regel **Stärkeblends** aus Stärke und Zusatzstoffen verwendet (z.B. Glycerin).



Thermoplastische Stärken (TPS)

Chemische Eigenschaften:

Stärke besteht aus **Zuckermolekülen** die entweder als lineare Ketten (Amylose) oder stark verzweigte Strukturen (Amylopektin) verbunden sind. Aufgrund ihrer Eigenschaft **Feuchtigkeit zu absorbieren** werden in der Regel **Stärkeblends** aus Stärke und Zusatzstoffen verwendet (z.B. Glycerin).



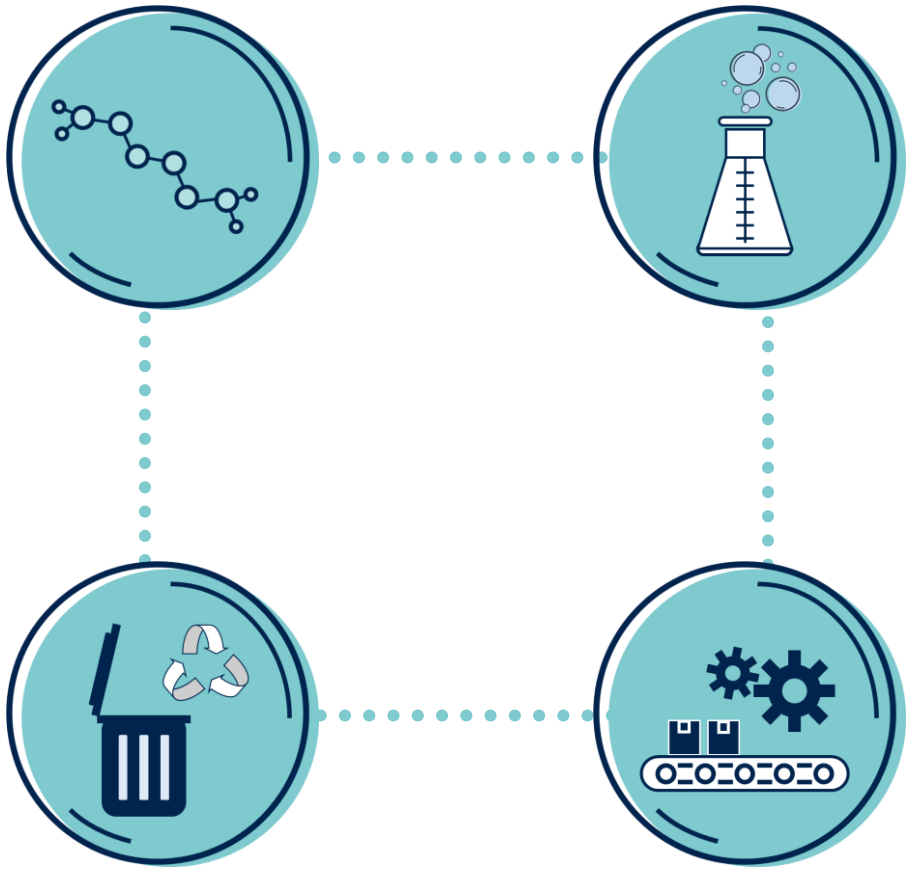
Herstellung:

Stärke kann aus verschiedenen **Pflanzen** (z.B. Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka) gewonnen werden. Die gewonnen Stärkekörner werden **destrukturiert** durch **Zugabe von Wasser** und **thermomechanische Bearbeitung** im Extruder. Beides, Wassergehalt und Scherung, beeinflussen die mechan. Eigenschaften des Produkts.

Thermoplastische Stärken (TPS)

Chemische Eigenschaften:

Stärke besteht aus **Zuckermolekülen** die entweder als lineare Ketten (Amylose) oder stark verzweigte Strukturen (Amylopektin) verbunden sind. Aufgrund ihrer Eigenschaft **Feuchtigkeit zu absorbieren** werden in der Regel **Stärkeblends** aus Stärke und Zusatzstoffen verwendet (z.B. Glycerin).



Entsorgung/Recycling:

Stärke besitzt als **natürliches Biopolymer** eine inherente, **biologische Abbaubarkeit**. Produkte aus **reiner Stärke** sind damit für den **Heimkompost** geeignet. Bei Stärkeblends zeigt sich ein beschleunigter Zerfall in Fragmente, durch den Abbau der Stärkematrix.

Herstellung:

Stärke kann aus verschiedenen **Pflanzen** (z.B. Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka) gewonnen werden. Die gewonnen Stärkekörner werden **destrukturiert** durch **Zugabe von Wasser** und **thermomechanische Bearbeitung** im Extruder. Beides, Wassergehalt und Scherung, beeinflussen die mechan. Eigenschaften des Produkts.

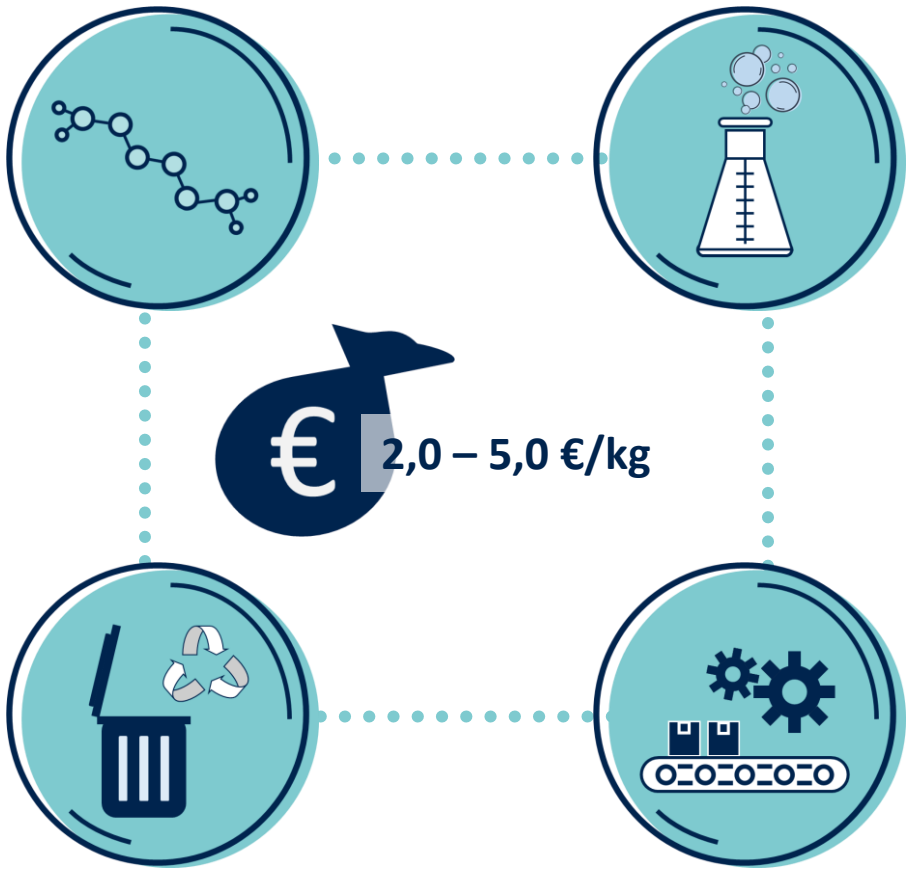
Thermoplastische Stärken (TPS)

Chemische Eigenschaften:

Stärke besteht aus **Zuckermolekülen** die entweder als lineare Ketten (Amylose) oder stark verzweigte Strukturen (Amylopektin) verbunden sind. Aufgrund ihrer Eigenschaft **Feuchtigkeit zu absorbieren** werden in der Regel **Stärkeblends** aus Stärke und Zusatzstoffen verwendet (z.B. Glycerin).

Entsorgung/Recycling:

Stärke besitzt als **natürliches Biopolymer** eine inherente, **biologische Abbaubarkeit**. Produkte aus **reiner Stärke** sind damit für den **Heimkompost** geeignet. Bei Stärkeblends zeigt sich ein beschleunigter Zerfall in Fragmente, durch den Abbau der Stärkematrix.



Herstellung:

Stärke kann aus verschiedenen **Pflanzen** (z.B. Mais, Weizen, Kartoffeln, Tapioka) gewonnen werden. Die gewonnen Stärkekörner werden **destrukturiert** durch **Zugabe von Wasser** und **thermomechanische Bearbeitung** im Extruder. Beides, Wassergehalt und Scherung, beeinflussen die mechan. Eigenschaften des Produkts.

Verarbeitung:

Die **Verarbeitungstemperatur** liegt bei ca. **120 – 180 °C** (Einsatz von Weichmachern wie Glycerin notwendig). Bei höheren Temp. muss mit Verfärbung und Abbau gerechnet werden. Bei modifizierter Stärke und Stärkeblends variiert die Verarbeitungs-temperatur in Abhängigkeit von der Art der Modifizierung/dem beigemischten Polymer (bis max. 200 °C). **Extrusion wird bei 140 – 190 °C durchgeführt.**

Eigenschaften & Anwendungen von TPS

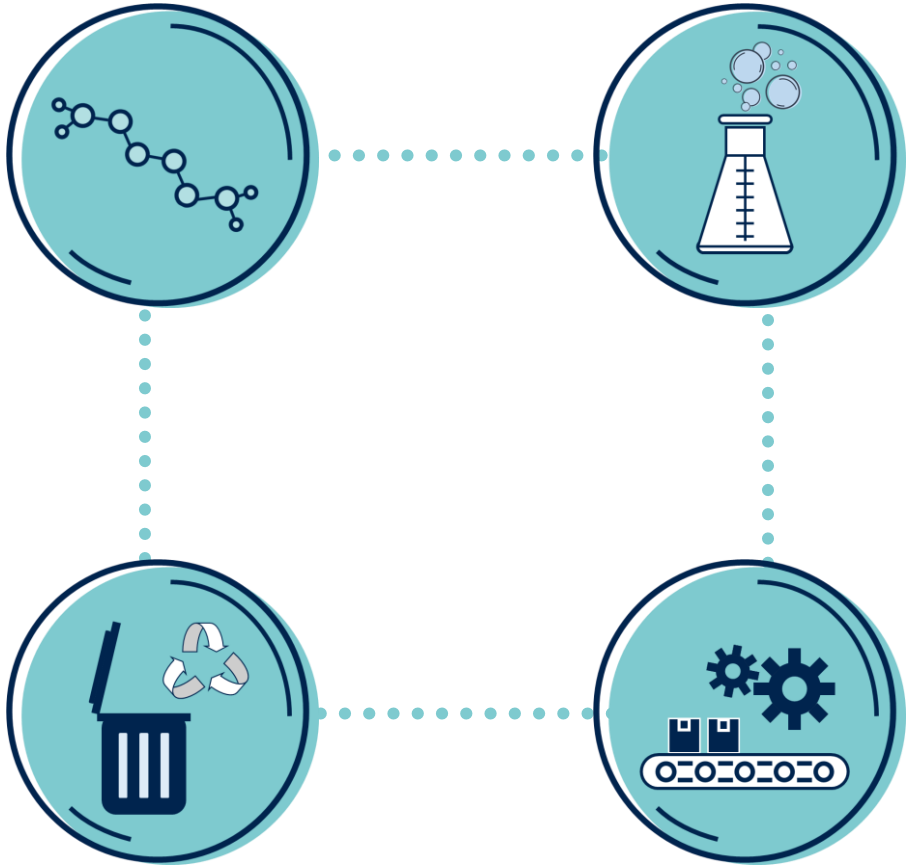
- geeignet für Lebensmittelkontakt
- Grundsätzlich hydrophil; nimmt Wasserdampf auf
- Hydrophobizität kann durch Modifikation erhöht werde
- Eher geringe mechanische Festigkeit; spröde
- Modifikationen können die mechanische Festigkeit erhöhen
- Geeignet für Blends mit anderen Polymeren
- Nutzbar in **Spritzguss-Verfahren**

- **Folie**: Lebensmittelverpackung; Einkaufstüten
- **Beschichtungen**
- **Landwirtschaft**
  Mulchfolien
- **Einweg-Anwendungen** (z.B. Einweggeschirr und -besteck)
- **Schaumverpackungen:**
  Ersatz von Polystyrolschäumen
  Verpackungschips

Cellulosen

Chemische Eigenschaften:

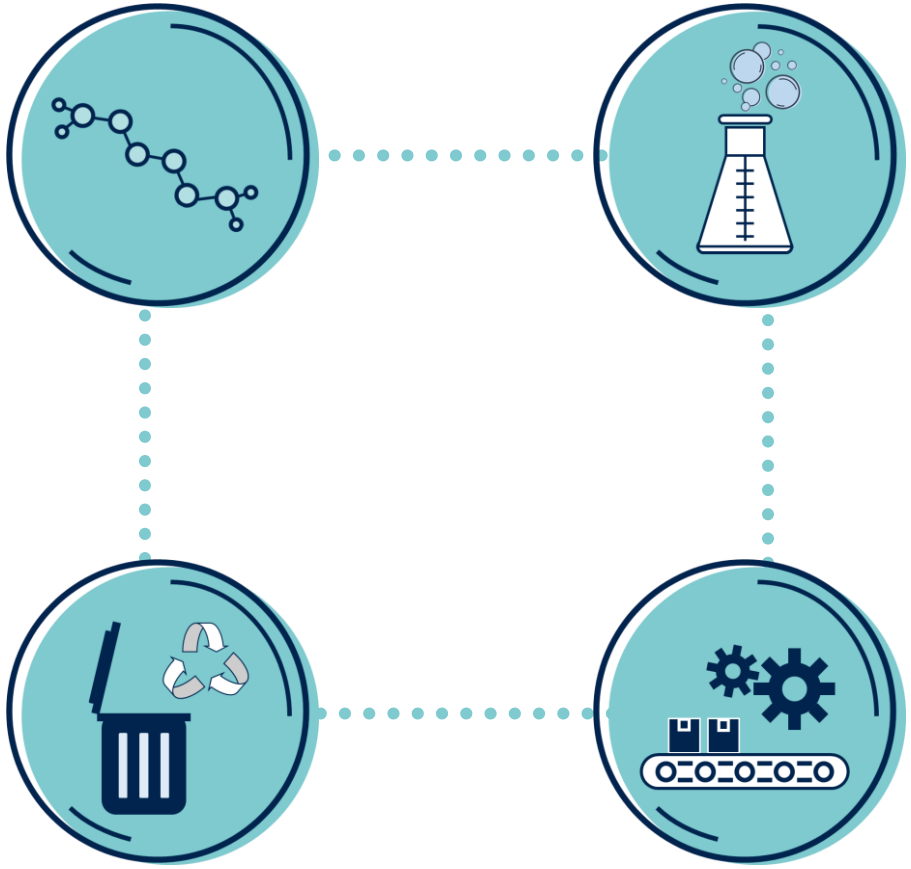
Wenn die chemische Struktur erhalten bleibt spricht man von **Cellulose Regeneraten**, wird sie verändert von **Derivaten**. Typische Beispiele sind das Cellulosehydrat (Zellglas) und Celluloseacetat (Thermoplast).



Cellulosen

Chemische Eigenschaften:

Wenn die chemische Struktur erhalten bleibt spricht man von **Cellulose Regeneraten**, wird sie verändert von **Derivaten**. Typische Beispiele sind das Cellulosehydrat (Zellglas) und Celluloseacetat (Thermoplast).



Herstellung:

Cellulose ist ein **Bestandteil pflanzlicher Zellen** und wird daher aus Biomasse wie Holz und Stroh gewonnen. **Celluloseacetat** entsteht durch anteilige **Acetylierung** mittels Essigsäure (Anhydrid). **Mikrokristalline Cellulose** entsteht durch die **Hydrolyse** gereinigter Cellulose mit starken Säuren. Bei **Nanocellulose** handelt es sich um mechanisch oder enzymatisch auf **Nanodimensionen** prozessierte Cellulose (Fasern, Kristalle).

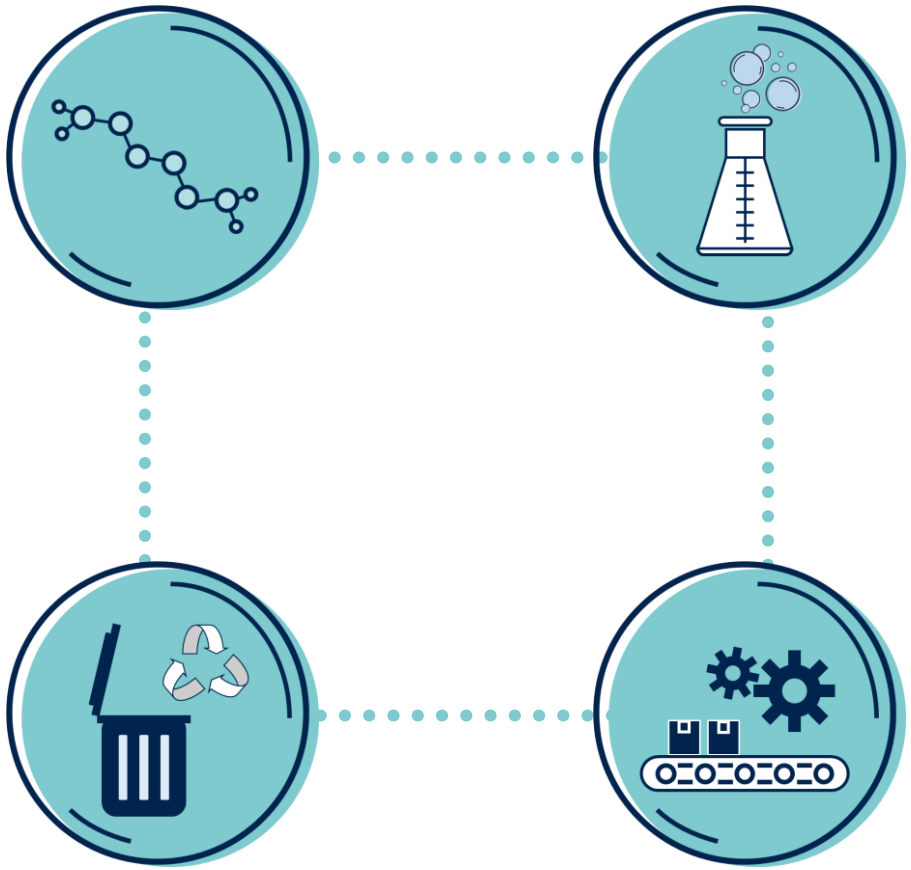
Cellulosen

Chemische Eigenschaften:

Wenn die chemische Struktur erhalten bleibt spricht man von **Cellulose Regeneraten**, wird sie verändert von **Derivaten**. Typische Beispiele sind das Cellulosehydrat (Zellglas) und Celluloseacetat (Thermoplast).

Entsorgung / Recycling:

Cellulosederivate können recycled werden, wobei z.B. die Qualität und Länge der Fasern mit jedem Zyklus abnimmt.
Cellulosen (Regenerate) eignen sich für **Heimkompostierung und industrielle Kompostierung** da sie von verschiedenen Mikroorganismen und Enzymen abgebaut werden können.



Herstellung:

Cellulose ist ein **Bestandteil pflanzlicher Zellen** und wird daher aus Biomasse wie Holz und Stroh gewonnen. **Celluloseacetat** entsteht durch anteilige **Acetylierung** mittels Essigsäure (Anhydrid). **Mikrokristalline Cellulose** entsteht durch die **Hydrolyse** gereinigter Cellulose mit starken Säuren. Bei **Nanocellulose** handelt es sich um mechanisch oder enzymatisch auf **Nanodimensionen** prozessierte Cellulose (Fasern, Kristalle).

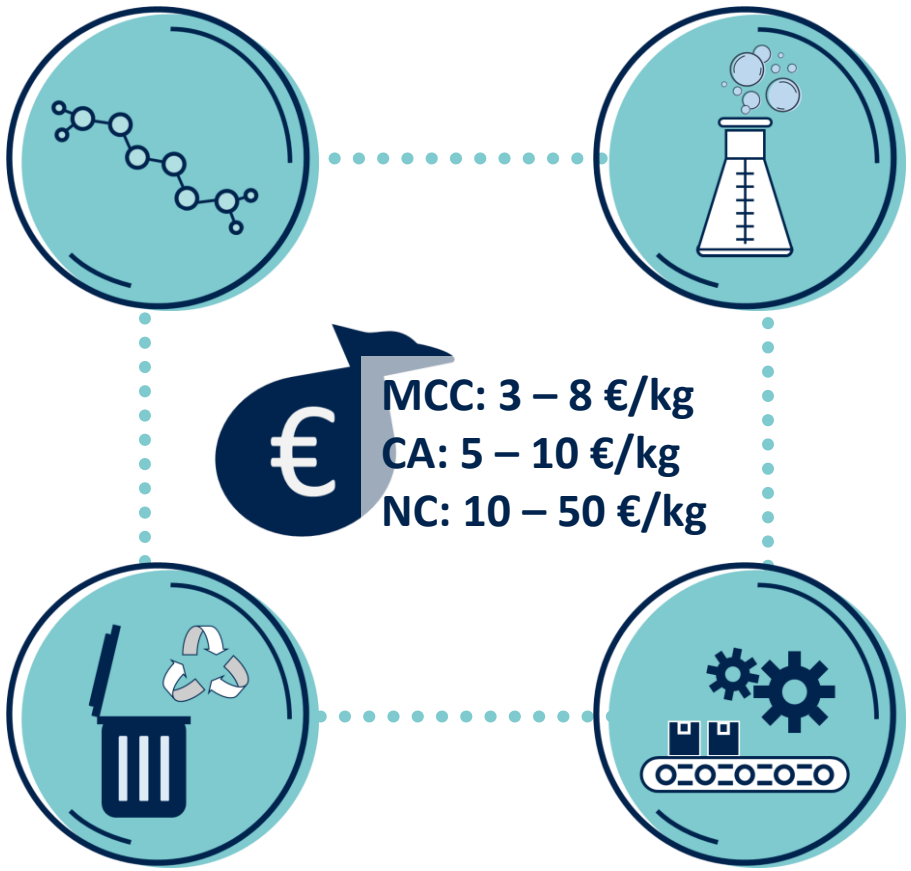
Cellulosen

Chemische Eigenschaften:

Wenn die chemische Struktur erhalten bleibt spricht man von **Cellulose Regeneraten**, wird sie verändert von **Derivaten**. Typische Beispiele sind das Cellulosehydrat (Zellglas) und Celluloseacetat (Thermoplast).

Entsorgung / Recycling:

Cellulosederivate können recycled werden, wobei z.B. die Qualität und Länge der Fasern mit jedem Zyklus abnimmt.
Cellulosen (Regenerate) eignen sich für **Heimkompostierung und industrielle Kompostierung** da sie von verschiedenen Mikroorganismen und Enzymen abgebaut werden können.



Herstellung:

Cellulose ist ein **Bestandteil pflanzlicher Zellen** und wird daher aus Biomasse wie Holz und Stroh gewonnen. **Celluloseacetat** entsteht durch anteilige **Acetylierung** mittels Essigsäure (Anhydrid). **Mikrokristalline Cellulose** entsteht durch die **Hydrolyse** gereinigter Cellulose mit starken Säuren. Bei **Nanocellulose** handelt es sich um mechanisch oder enzymatisch auf **Nanodimensionen** prozessierte Cellulose (Fasern, Kristalle).

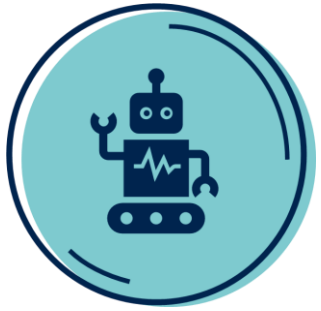
Verarbeitung:

Die **Verarbeitungstemperatur** liegt, abhängig von der Modifikation der Cellulose, bei ca. **80 – 200 °C**. Cellulose weist keine scharfe Schmelztemperatur auf, sondern zersetzt sich bei ca. 260 °C.

MCC = Mikrokristalline Cellulose
CA = Cellulose Acetat
NC = Nanocellulose

Eigenschaften & Anwendungen von Cellulose

- geeignet für Lebensmittelkontakt
- als Cellulosehydrat farblose, transparente Optik
- Durchlässig für Wasserdampf



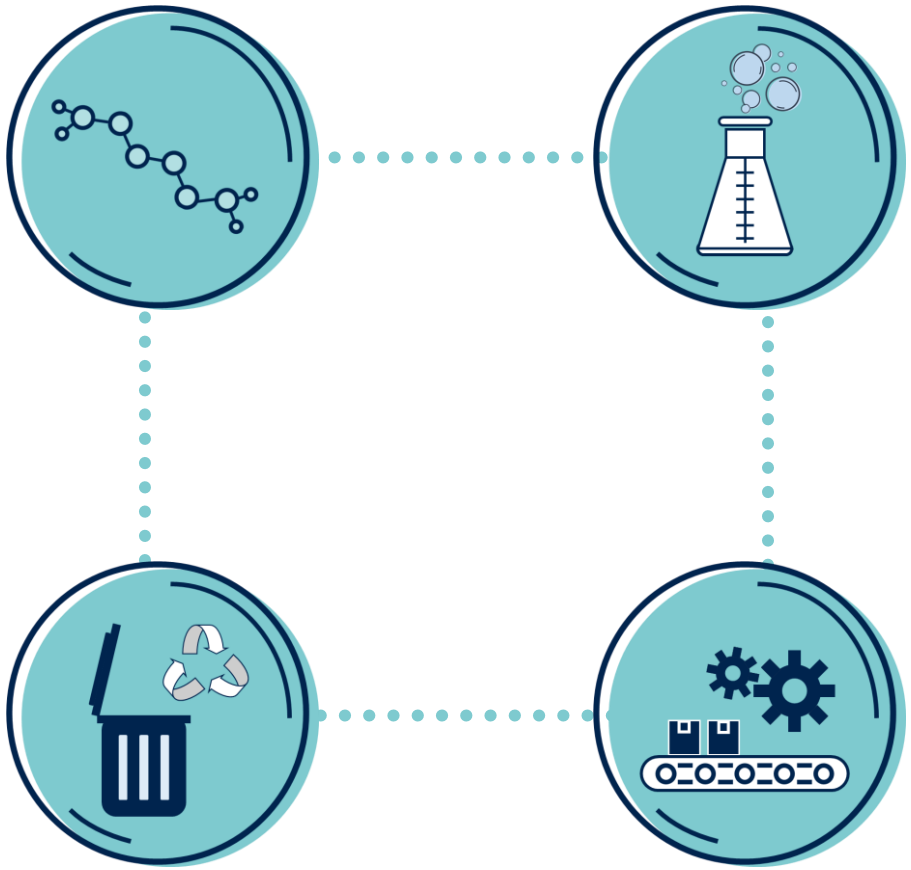
- **Folie** (Cellulosehydrat = Zellglas)*: Lebensmittelverpackung; verhindert Kondenswasser
- **Beschichtungen**
- **Medizinische Anwendungen** (z.B. Wundauflagen)
- **Faser:**
  Textilien
  Filter
  Kompositmaterialien

* bekannt unter dem früheren Markennamen Cellophan

Polyhydroxyalkanoate (PHA)

Chemische Eigenschaften:

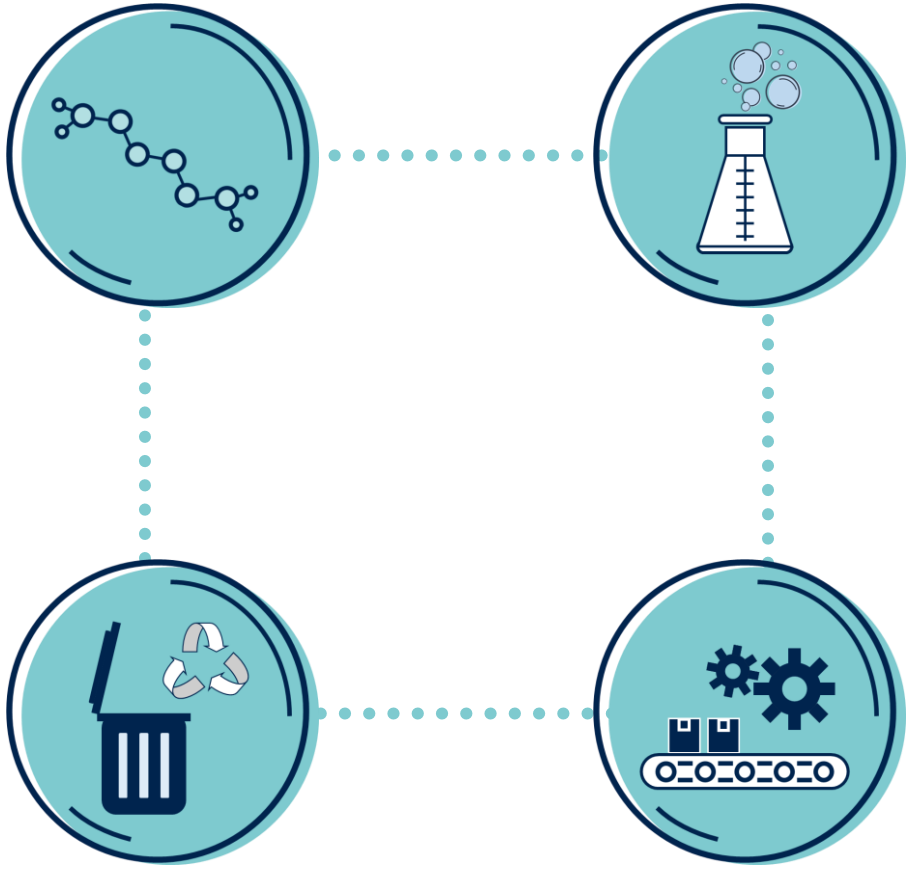
PHAs sind wasserunlösliche, **lineare Bio-polyester,** die als Reservestoffe für Kohlenstoff und Energie von vielen Bakterien gebildet werden (vergleichbar mit menschlichem Fettpolster). Da sie auf Basis unterschiedlicher **Hydroxy-carbonsäuren** gebildet werden können, ist **PHA der Oberbegriff einer Substanzklasse**, zu der z.B. PHB (Polyhydroxybutyrat) und PHV (Polyhydroxyvaleriansäure) gehören.



Polyhydroxyalkanoate (PHA)

Chemische Eigenschaften:

PHAs sind wasserunlösliche, **lineare Bio-polyester,** die als Reservestoffe für Kohlenstoff und Energie von vielen Bakterien gebildet werden (vergleichbar mit menschlichem Fettpolster). Da sie auf Basis unterschiedlicher **Hydroxy-carbonsäuren** gebildet werden können, ist **PHA der Oberbegriff einer Substanzklasse**, zu der z.B. PHB (Polyhydroxybutyrat) und PHV (Polyhydroxyvaleriansäure) gehören.



Herstellung:

I.d.R. erfolgt keine Polymerisation, sondern eine **Extraktion aus der Zellmasse** im Bioreaktor.
Die **Art der PHAs** wird durch die verwendeten **Mikroorganismen**, die verwendete **Biomasse (Feed)** und die Prozessparameter beeinflusst.

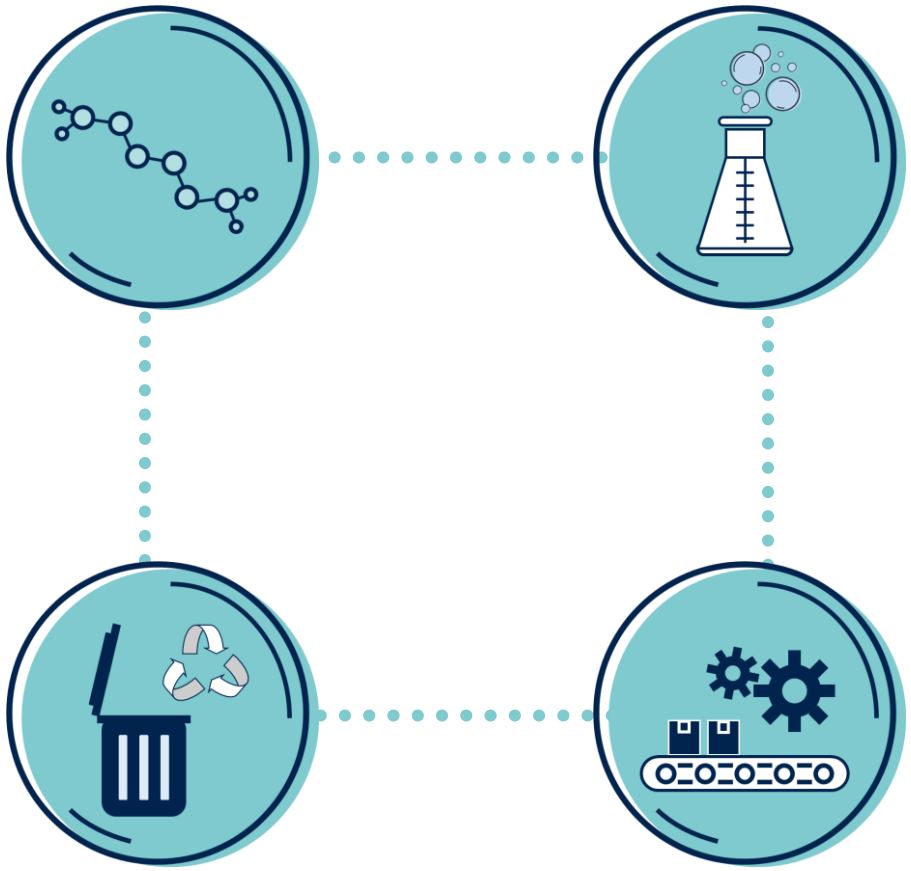
Polyhydroxyalkanoate (PHA)

Chemische Eigenschaften:

PHAs sind wasserunlösliche, **lineare Biopolyester,** die als Reservestoffe für Kohlenstoff und Energie von vielen Bakterien gebildet werden (vergleichbar mit menschlichem Fettpolster). Da sie auf Basis unterschiedlicher **Hydroxycarbonsäuren** gebildet werden können, ist **PHA der Oberbegriff einer Substanzklasse**, zu der z.B. PHB (Polyhydroxybutyrat) und PHV (Polyhydroxyvaleriansäure) gehören.

Entsorgung / Recycling:

Aufgrund der Esterbindung sind PHAs **biologisch abbaubar** (vgl. auch chirurgisches Nahtmaterial). Sie eignen sich für **Heimkompostierung und industrielle Kompostierung** sowie Erde und Meer als Umgebung.



Herstellung:

I.d.R. erfolgt keine Polymerisation, sondern eine **Extraktion aus der Zellmasse** im Bioreaktor.
Die **Art der PHAs** wird durch die verwendeten **Mikroorganismen**, die verwendete **Biomasse (Feed)** und die Prozessparameter beeinflusst.

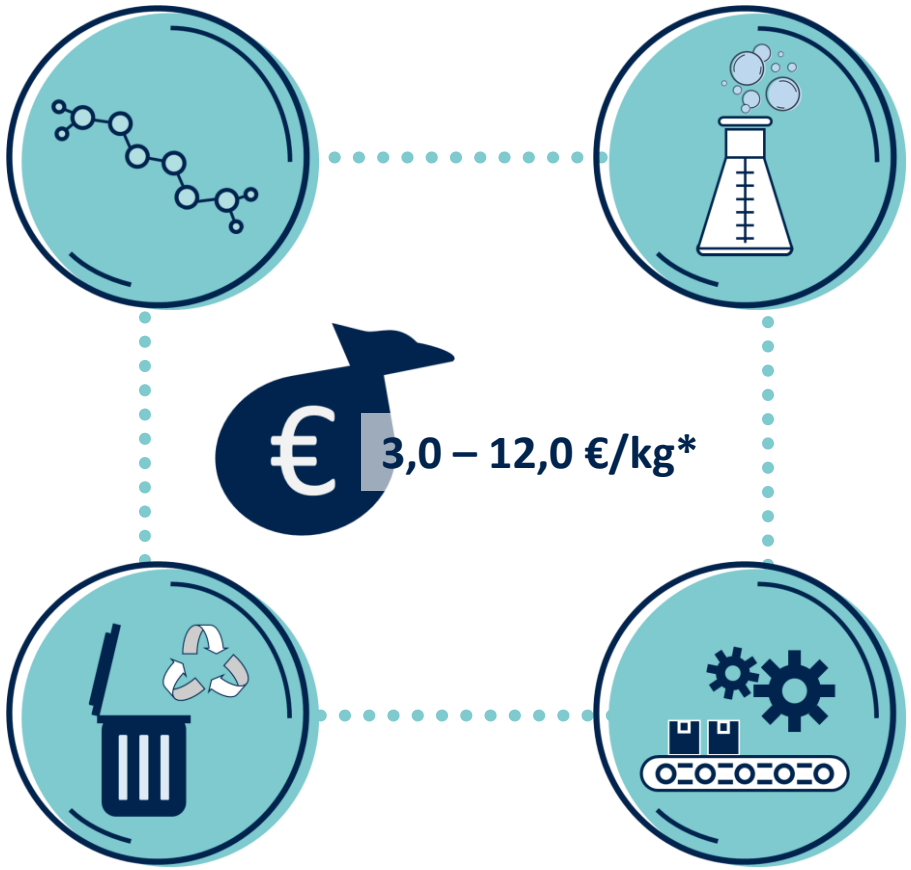
Polyhydroxyalkanoate (PHA)

Chemische Eigenschaften:

PHAs sind wasserunlösliche, **lineare Biopolyester,** die als Reservestoffe für Kohlenstoff und Energie von vielen Bakterien gebildet werden (vergleichbar mit menschlichem Fettpolster). Da sie auf Basis unterschiedlicher **Hydroxycarbonsäuren** gebildet werden können, ist **PHA der Oberbegriff einer Substanzklasse**, zu der z.B. PHB (Polyhydroxybutyrat) und PHV (Polyhydroxyvaleriansäure) gehören.

Entsorgung / Recycling:

Aufgrund der Esterbindung sind PHAs **biologisch abbaubar** (vgl. auch chirurgisches Nahtmaterial). Sie eignen sich für **Heimkompostierung und industrielle Kompostierung** sowie Erde und Meer als Umgebung.



Herstellung:

I.d.R. erfolgt keine Polymerisation, sondern eine **Extraktion aus der Zellmasse** im Bioreaktor.
Die **Art der PHAs** wird durch die verwendeten **Mikroorganismen**, die verwendete **Biomasse (Feed)** und die Prozessparameter beeinflusst.

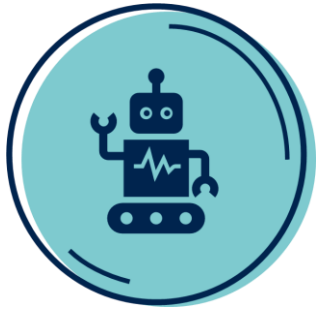
Verarbeitung:

Nutzbar für **thermoplastische Anwendung** in Extrusion und Spritzguss bei Temperaturen von ca. **160 – 190 °C.** Reines **PHB weißt eine hohe Kristallinität auf** und ist daher spröde und steif. Copolymere, z.B. mit **PHV, erhöhen die Elastizität** und verbessern die Verarbeitbarkeit.

*für Verpackungsanwendungen günstiger, als für medizinische Anwendungen (medical grade)

Eigenschaften & Anwendungen von PHA

- Nicht toxisch
- Bioverträglich
- Gute Beständigkeit ggü. Feuchtigkeit
- Geringe Permeation von Wasser
- Aroma-Barriere Eigenschaften
- Gute Beständigkeit gegen UV-Strahlung
- geeignet für **Spritzguss**
- geeignet für **Extrusion (Folien, Hohlkörper)**



- **Lebensmittelverpackungen**/Einweg verpackungen
- Kompostierbare Gefäße
- **Medizinische Anwendungen:**
  - Freisetzung von Wirkstoffen
  - Implantate
  - Antimikrobielle Wundnaht
- Hygienartikel
- **Kosmetik** (Mikroplastikersatz, Verdickungsmittel)

"Bioplastics have the potential to play a significant role in reducing the environmental impact of plastics. However, the industry needs a clear and supportive policy framework to reach its full potential."

Hasso von Pogrell,
Managing Director of European Bioplastics

Neues lernen – Ideen entwickeln – Partner finden

Ihr Kontakt und Partner zu Biokunststoffen

Tobias Göbel
SKZ – Das Kunststoffzentrum

transbib@skz.de

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

(4) PHA ist der Oberbegriff einer Polymerklasse zu der z.B. PHB und PHV gehören.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

Richtig! PHAs (Polyhydroxyalkanoate) werden von verschiedenen Mikroorganismen (Bakterien) als Energiespeicher gebildet. Die Art der PHAs sowie die Möglichkeit zur Bildung von Copolymeren hängt sowohl von den verwendeten Bakterien als auch vor allem vom „verfütterten“ Substrat ab (z.B. verschiedene Zucker, kurzkettige Säuren oder Alkohole wie Glycerin).

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

(4) PHA ist der Oberbegriff einer Polymerklasse zu der z.B. PHB und PHV gehören.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

Falsch! Cellulosehydrat ist als Verpackungsfolie für die Lebensmittelindustrie bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts im Einsatz. Das Bewusstsein um die Endlichkeit und Umweltauswirkungen durch die Nutzung nicht-erneuerbarer fossiler Rohstoffe, führt nun jedoch zu einer gesteigerten Aufmerksamkeit und Suche nach biobasierten Materialien.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

(4) PHA ist der Oberbegriff einer Polymerklasse zu der z.B. PHB und PHV gehören.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

Falsch! Aus Biomasse lassen sich viele Produkte der Kunststoff- und Verpackungsbranche herstellen. Als sogenannte Drop-in Lösungen sind die verwendeten Substanzen dabei sogar chemisch identisch zu ihren fossil-basierten Pendants.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

(4) PHA ist der Oberbegriff einer Polymerklasse zu der z.B. PHB und PHV gehören.

Selbstcheck

Richtig oder falsch? Bewerten Sie die folgenden Aussagen auf Basis der Inhalte aus dem aktuellen Kapitel (Auflösung jeweils auf der nächsten Folie).

(1) Nicht nur die Agrarmasse, sondern auch Bestandteile von Zellen können als Rohstoff dienen.

(2) Die Verwendung von Biomasse in der Kunststoff- und Verpackungsindustrie ist ein neuartiger Trend.

(3) Biomasse eignet sich ausschließlich für die Herstellung von Folien.

(4) PHA ist der Oberbegriff einer Polymerklasse zu der z.B. PHB und PHV gehören.

Richtig! Zu den Polyhydroxyalkanoaten (PHAs) gehören neben vielen anderen Verbindungen auch das Polyhydroxybutyrat (PHB) und die Polyhydroxyvaleriansäure (PHV). Sie werden über Fermentation hergestellt und gehören chemisch gesehen zu den (Poly)Hydroxycarbonsäuren.

Hinweis

Diese Präsentation ist mit ihren Inhalten Eigentum des Projekts TransBIB, des SKZ – Das Kunststoffzentrum und des Lehrstuhls für Biotechnologie der RWTH Aachen University.

Eine Weitergabe oder Verwendung der Inhalte ist ohne vorherige Zustimmung nicht gestattet.

© TransBIB 2025