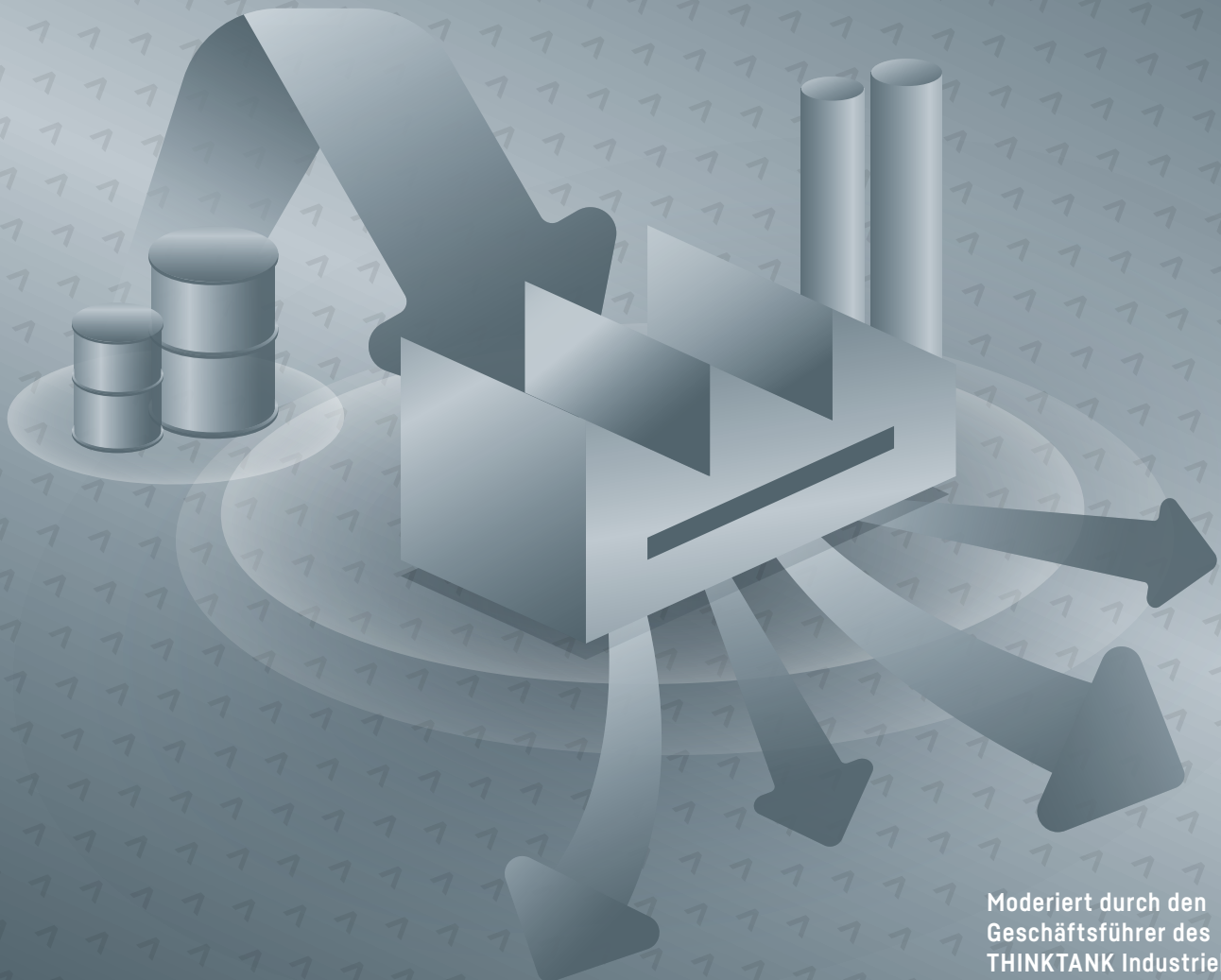


Unternehmerforum Chemisches Recycling (UFCR)

MASSENBIANZIERUNG FÜR DAS CHEMISCHE RECYCLING



Moderiert durch den
Geschäftsführer des
THINKTANK Industrielle
Ressourcenstrategien



Erläuterungen zum Handlungsfeld 3
**„Nutzung spezifischer und flexibler Massenbilanz-Verfahren“
des Papiers „Handlungsfelder der Politik für die Rohstoffwende
und die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft mittels
chemischen Recyclings in Deutschland“**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	04
1. Einführung	06
2. Mengenstrom und Massenbilanz – Unterschiede und Anwendungsfelder	07
2.1 Mengenstrom	07
2.2 Massenbilanz	09
3. Ansätze der Massenbilanzierung	11
3.1 Petrochemischer Prozess	11
3.2 Massenbilanz-Ansätze	14
4. Fazit	21

Zusammenfassung

Um das gesellschaftliche Ziel der Klimaneutralität und die Reduzierung der Importabhängigkeit zu erreichen, werden nicht-fossile Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie benötigt. Das Recycling von Kunststoffabfällen leistet dazu einen wichtigen Beitrag. Neben dem mechanischen kann auch das chemische Recycling Produkte aus Kunststoffabfällen für diesen Kreislauf bereitstellen, die bisher in die Verbrennung gehen und damit dem Kohlenstoffkreislauf entzogen werden.

Mit der Zugabe chemisch rezyklierter Produkte (Öle und Gase) als Ausgangsstoff in den petrochemischen Prozess (z. B. in einem Steam Cracker) eines Chemieunternehmens erfolgt die Vermischung mit konventionellen fossilen, also aus Erdöl oder Erdgas gewonnenen Ausgangsstoffen. Diese Vermischung von rezyklierten und fossilen Ausgangsstoffen macht ein Massenbilanz-Verfahren erforderlich. Um die **bestehende Infrastruktur der chemischen Industrie für eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffabfälle nutzen zu können** und damit auch fossile Rohstoffe zu ersetzen sowie den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, wird jetzt der **Massenbilanz-Ansatz "Fuel-Use-Excluded"** benötigt. Die alternativen Massenbilanz-Ansätze „Polymer-only“ oder „Proportionale Zuordnung“ ergeben für die Endprodukte zu niedrige rezyklierte Anteile, um Verbraucher zu Kaufentscheidungen zu bewegen, die die wirtschaftliche Basis für die Nutzung der großchemischen Infrastruktur bilden. Dieser Massenbilanz-Ansatz steht auch in Einklang mit der gesetzlichen Recyclingdefinition in der EU-Abfallrahmenrichtlinie.



Zusammenfassung zum Fuel-Use-Excluded-Ansatz

Die Anwendung des „Fuel-Use-Excluded“-Ansatzes mit dem Fokus auf schwierig zu rezyklierende Kunststoffe aus Haushalts- und Gewerbeabfällen – und nicht den klassischen Verpackungsabfällen – steigert im hohen Maße:

- die Akzeptanz für das chemische Recycling,
- die Investitionen von Unternehmen in die Ausweitung der bestehenden chemischen Recyclingverfahren und in neue Technologien zum Recycling derartiger Kunststoffe und Gummiprodukte,
- die Bereitschaft der chemischen Industrie, den Mehrpreis für die rezyklierten Gase und Öle zu entrichten; verbunden mit der Sicherheit, dafür Kunden zu finden, die diese Stoffe langfristig einsetzen können und müssen,
- die Bereitschaft der chemischen Industrie ihre Infrastruktur langfristig anzupassen, um künftig so viel wie möglich der rezyklierten, Ausgangsprodukte einzusetzen, einhergehend mit der Möglichkeit das Bilanzierungsverfahren dem des mechanischen Recyclings anzunähern.

Der „Fuel-Use-Excluded“-Ansatz ist der einzige Ansatz, der praktisch nachvollziehbar und gleichzeitig für die Großchemie wirtschaftlich ist. Über bestehende Standards wie ISO 22095 oder Zertifizierungs-Verfahren wie das von ISCC (International Sustainability and Carbon Certification) wird sichergestellt:

- dass nicht mehr rezyklierte Ausgangsprodukte zugeordnet werden, als ins System gelangt sind,
- dass zunächst der Anteil, der als Brennstoff Anwendung findet, von der Bilanz für rezyklierte Produkte abgezogen wird. Dann können die restlichen rezyklierten Anteile rechnerisch nach zertifiziertem Massenbilanz-Verfahren flexibel ausgewählten Produkten zugeordnet werden könne, deren Abnehmer schon heute bereit bzw. rechtlich aufgefordert sind, den Aufpreis für Zirkularität und die Reduktion von fossilen Rohstoffen zu zahlen.

Dieser Ansatz steht damit am besten im Einklang mit den Zielen einer umfassenden Kreislaufwirtschaft.

1. Einführung

Das Unternehmerforum Chemisches Recycling (UFCR), ein Zusammenschluss aus Vertretern der gesamten industriellen Wertschöpfungskette, hat im August 2023 die „Handlungsfelder der Politik für die Rohstoffwende und die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft mittels chemischen Recyclings in Deutschland“ veröffentlicht. In 9 Handlungsfeldern sind die Punkte dargelegt, um die Umsetzung des chemischen Recyclings im industriellen Maßstab in Deutschland voranzubringen.

Im Handlungsfeld 3 „Nutzung spezifischer und flexibler Massenbilanz-Verfahren“ ist dargelegt, dass der „Fuel-Use-Excluded-Massenbilanzansatz“ als notwendiger regulatorischer Rahmen für chemisches Recycling notwendig und unter der Voraussetzung einer anerkannten externen Zertifizierung zu akzeptieren ist. Mit diesem Ansatz werden chemisch rezyklierte Ausgangsprodukte den Zielprodukten unter Ausschluss von energie- und prozessbedingten Verlusten zugeordnet (engl. attributed).

In diesem Papier wird dieses Handlungsfeld vertieft und erläutert, warum Massenbilanzen für Produkte des chemischen Recyclings aus Kunststoffabfällen notwendig ist und nur unter Anwendung des „Fuel-Use-Excluded“-Ansatzes eine wirtschaftlich stabile Nutzung der bestehenden Infrastruktur der chemischen Industrie gewährleistet werden kann. Im Folgenden werden die gegenwärtig diskutierten Massenbilanz-Verfahren und deren Ansätze vorgestellt und diese hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet.

2. Mengenstrom und Massenbilanz – Unterschiede und Anwendungsfelder

2.1 Mengenstrom

Im mechanischen Recycling spricht man generell von der Abbildung eines **Mengenstroms**, um physisch und bilanztechnisch den Verbleib von gesammelten Abfällen zu dokumentieren. So lässt sich beispielsweise der Einsatz von Granulaten in Produkten über die Sortierung, die mechanische Aufbereitung und die Veredelung verfolgen. Mit der Darstellung des Mengenstroms kann die gesammelte Menge eines Abfalls von einem Sammelplatz zur Sortieranlage über die Messung des angelieferten Gewichts nachgewiesen werden. Selbst wenn dann eine Mischung mit gleichen Abfällen bei gleichen Abfallarten (z. B. Haushaltsverpackungsabfall) aus anderen Plätzen und Regionen erfolgt, kann nach der Sortierung gewichts-technisch ermittelt werden, wie viele spezifische oder gemischte Kunststoffe, Papier und andere Stoffe und Reststoffe aussortiert wurden.

So bedeutet dies beispielsweise für Kunststoffabfälle, dass mit der Verladung eines spezifischen Ballens (z.B. eines Polyethylen-Ballens) an einen Recyclingbetrieb sich gewichts-technisch ermitteln lässt, wie viel von diesem sortierten, spezifischen Kunststoff (Polyethylen) einem Recycler übersandt wurde. Der Recycler wiederum bereitet diese angelieferten Mengen auf und erzeugt ein Granulat. Hierbei fügt er Zusatzstoffe zu und es fallen Reststoffe an. Anschließend gibt er das Granulat als 100% Rezyklat an einen Produzenten weiter, der jetzt entscheidet, ob sein eigenes Kunststoffprodukt aus 100% des rezyklierten Kunststoffes oder aus einem Gemisch mit konventionellem Kunststoff aus Rohöl produziert wird. Damit lässt sich der Gehalt an rezykliertem Kunststoff genau ermitteln. Im Weiteren kann somit über die gesamte Kette von der Sammlung bis zum Einsatz im Produkt buchhalterisch dargestellt werden, wieviel rezyklierter Kunststoff eines spezifischen Materials, Abfälle aus der Gesamtheit der gesammelten und sortierten in ein Produkt eingeflossen ist. Dieser Ansatz wird im mechanischen Recycling bisher umgesetzt.



Derselbe Ansatz lässt sich auch analog zur Herstellung eines rezyklierten Kunststoffgranulats für ein durch chemisches Recycling hergestelltes Produkt – vom Kunststoffabfall bis beispielsweise zu einem Pyrolyse-Öl – darstellen. Die Beteiligten müssen auch hier dokumentieren, was und wieviel sie gesammelt, selbst sortiert oder an einen Sortierbetrieb abgegeben haben (Haus-, Gewerbe- oder industrielle Abfälle). Der Sortierbetrieb wiederum stellt dar, welche Fraktionen er aussortiert hat, was er einer Verbrennung zugeführt und was er an einen weiterverarbeitenden Betrieb übergeben hat. Der weiterverarbeitende Betrieb – in diesem Fall der chemische Recycler – führt ebenfalls eine Mengenerfassung seines eingehenden Materials und Abfalls durch. Als weiterer Abfall-Behandler in der Prozesskette sortiert und prüft er das angelieferte Material, erstellt daraus eine Übersicht seiner Abfallmenge und dokumentiert, wie viel Öl, Gas und Reststoffe er erzeugt und welche Menge an rezyklierten Produkten er an die Chemieindustrie übergeben hat. Diese Prozesse sind rechtlich verankert im Kreislaufwirtschaftsgesetz, dem Verpackungsgesetz und der Gewerbeabfallverordnung. Dazu kommen weitere Ausführungsbestimmungen durch die LAGA (Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall).

WICHTIG:

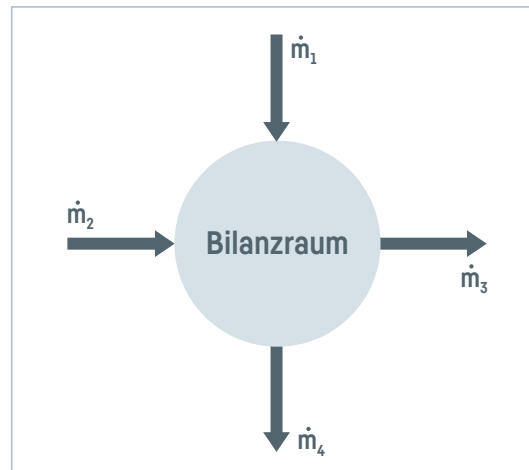
Diese buchhalterische und gewichtstechnische Erfassung der anfallenden Abfallmengen, die Sortierung und Verarbeitung bis zur Verbrennung oder Erzeugung eines Produktes sind **zwingend** und jeder weiteren Verarbeitung vorgeschaltet. Die Deklaration des „Abfallendes“ eines Abfalles erfordert zwingend die Darstellung der Herkunft und die Verarbeitungsschritte – unabhängig davon, ob ein mechanisches oder chemisches Recyclingverfahren durchgeführt wird.

Der chemische Recycler ist als abfallbehandelnder Betrieb ebenso registriert und hat nach den Grundlagen der Entsorgungsfachbetriebsverordnung auf Basis des §56 Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der NachwV (Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen) zu arbeiten. Er ist demnach verpflichtet, einen Mengenstrom zu führen und hat vom Eingang des Abfalls bis zur Erzeugung des Produktes und der Abgabe des Produktes an einen Abnehmer seine Bücher zu führen und den Behörden alle Nachweise zu liefern, die erforderlich sind, um die Behandlung des Abfalls bis zur Erzeugung des Produktes nachzuweisen. Dieses beginnt bereits mit dem Antrag für die Genehmigung des Betriebes nach der 4. BImSchV¹, die mit Anhang 1 Ziffer 8 die Grundlagen für die „Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen“ schafft.

¹ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV

2.1 Massenbilanz

In einem geschlossenen System ist die Betrachtung der Masse trivial: Da keine Masse über die Systemgrenze gelangen kann, bleibt die Masse im System stets konstant. In einem offenen System hingegen kann Masse mit der Umgebung ausgetauscht werden. Diese Massenströme mit der Umgebung werden von der **Massenbilanz** erfasst.² Hierzu muss der Bilanzraum mit seinen Bilanzgrenzen, an denen die Erfassung der Massenströme erfolgt, definiert sein.



Der vorgelagerte Prozessschritt des chemischen Recyclings ist weder mit dem Verfahren noch mit dem hergestellten und lagernden Produkt Teil des Massenbilanz-Verfahrens. Es werden aus (Kunststoff-)Abfällen rezyklierte Produkte hergestellt (analog zum Kunststoffgranulat beispielsweise Öle), welche in der Lage sind, fossile Rohstoffe zu ersetzen. Sie gelten daher als 100% rezyklierte Produkte und sind gewichtsbezogen und buchhalterisch Teil des Mengenstromverfahrens.

Erst im nächsten Schritt, mit der Übergabe dieser rezyklierten Produkte beispielsweise an einen petrochemischen Prozess, wird der Bilanzraum für eine Massenbilanzierung gebildet. Mit der Zugabe der rezyklierten Produkte (Öle und Gase) als Ausgangsstoff in den nachgeschalteten petrochemischen Prozess (z. B. einen Steam Cracker) eines Chemieunternehmens erfolgt die Vermischung mit konventionellen fossilen, also aus Erdöl oder Erdgas gewonnenen Ausgangsstoffen. Und erst diese Vermischung von zirkulären und klassisch fossilen Ausgangsstoffen macht ein Massenbilanz-Verfahren erforderlich. Der petrochemische Prozess bildet dabei den betrachteten Bilanzraum.

Massenbilanzierung wird zur Berechnung von Eingang und Ausgang (Input-Output) komplexer Produktionsprozesse bereits in zahlreichen Bereichen eingesetzt. Sie ermöglicht nachvollziehbare, glaubwürdige Angaben zu den Endprodukten und ermöglicht dem Verbraucher, fundierte Kaufentscheidungen zu treffen. Die Massenbilanz gehört zu den Zuordnungsmodellen, die bereits heute in vielen Bereichen genutzt werden, z. B. für erneuerbare Energien (Ökostrom) und Biokraftstoffe, aber auch bei fair gehandelter Schokolade und in der nachhaltigen Forstwirtschaft (FSC®).



² Nach Wikipedia

So kauft zum Beispiel die Deutsche Bahn ein Kontingent an fossil gewonnenem Strom und aus erneuerbaren Energien. Die Bahn entscheidet, ob sie dem ICE 100% grünen Strom aus erneuerbaren Energien (solange das gekaufte Kontingent dafür ausreicht) und den anderen Zügen fossil gewonnenen Strom zuordnet. Die Züge fahren selbstverständlich über die gleichen Trassen und ziehen aus der Leitung den gleichen Strom. Die Zuordnung erfolgt ausschließlich bilanztechnisch. Ein analoger Ansatz erfolgt auch bei der Massenbilanz.

Ziel ist es, die Skalierung von nachhaltigen Lösungen – wie die Kreislaufführung von Kunststoffen – schnell und effizient durch die Nutzung bestehender Infrastrukturen umzusetzen. Im Produktionsprozess, der auf das chemische Kunststoffrecycling folgt, ist der Massenbilanzansatz das entscheidende Instrument, um die gewonnenen chemisch rezyklierten Produkte in die bestehende Infrastruktur der chemischen Industrie (petrochemische Prozesse) einzubinden und fossile Rohstoffe direkt zu ersetzen. In diesen petrochemischen Prozessen werden heute in großtechnischen Anlagen wie z. B. einem Steam Cracker mehrere Hunderttausende bis Millionen Tonnen primäre Ausgangsstoffe pro Jahr eingesetzt. Nur diese Größenordnung erlaubt einen wirtschaftlichen Betrieb der chemischen Industrie. Die verfügbaren Mengen an chemisch rezyklierten Produkten aus Kunststoffabfällen decken nur einen Bruchteil der benötigten Mengen ab. Ein separater Betrieb einer petrochemischen Anlage mit ausschließlich rezyklierten Ausgangsprodukten ist heute wirtschaftlich nicht möglich. Eine Mischung verschiedener Kohlenstoff-Quellen aus fossilen, zukünftig zunehmend aus nachwachsenden und nichtfossilen Quellen ist für die chemische Industrie noch notwendig.

Mit den Ansätzen der Massenbilanzierung können die Mengen an eingesetzten rezyklierten Produkten zielgerichtet einzelnen Produkten aus dem petrochemischen Prozess zugeordnet werden. Dies ist insbesondere für die Produktbereiche notwendig, die Kunststoffen in Neuausgangsmaterialität benötigen, die bisher nur durch fossil gewonnene Kunststoffe erzielt werden kann. Dazu gehören Anforderungen an die Leistungsfähigkeit, der Hygiene oder der Sicherheit, wie sie beispielsweise bei medizinischen Verpackungen, Lebensmittelverpackungen, sicherheitsrelevanten Automobilteilen oder Baustoffen herrschen.

Die Massenbilanz ist dabei gleichzeitig ein Modell, um Produktketten sicher zurückzuvollziehen (Beweiskette - chain of custody), bei dem Eingang und Ausgang in jedem Schritt des Produktionsprozesses überwacht und von Dritten geprüft und zertifiziert werden. Das ist von entscheidender Bedeutung, damit Glaubwürdigkeit und Transparenz der damit verbundenen Angaben über den Einsatz von rezyklierten Produkten sichergestellt und Greenwashing verhindert werden. Bereits heute prüfen unabhängige Zertifizierungsorganisationen wie ISCC oder REDcert auf der Basis von etablierten Standards (z.B. ISO 22095) die Verwendung von biobasierten und recycelten Kunststoffen, so dass klare Angaben auf den Endprodukten möglich sind. Die mittels dieser Verfahren auditierten Massenbilanzkalkulationen gestatten Angaben von rezyklierten Anteilen in Endprodukten, bei denen es technisch unmöglich ist, den Anteil an rezykliertem Material direkt zu messen.

3. Ansätze der Massenbilanzierung

3.1 Petrochemischer Prozess

In einem der gängigen petrochemischen Prozesse wird beispielsweise raffiniertes Erdöl als Ausgangsprodukt (Naphtha) zur Herstellung einer Vielzahl von Vorprodukten eingesetzt. Hierzu werden sogenannte Steam Cracker eingesetzt, die mittels Dampfs (Steam) die größeren Moleküle in kleinere Moleküle zerlegen (cracken). Mit Hilfe des Steam Crackers lässt sich dabei gezielt steuern, dass bestimmte Endprodukte bevorzugt entstehen. Damit gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, einen Cracker zu betreiben.

Was bedeutet dies für die Verarbeitung der chemisch rezyklierten Ausgangsprodukte und den petrochemischen Prozess? In den Abbildungen 1 und 2 sind zwei petrochemische Prozesse modellhaft am Beispiel von Steam Crackern dargestellt. Abbildung 1 zeigt den Betrieb eines Steam Crackers, um bevorzugt Vorprodukte der Kunststoffherstellung zu gewinnen. Abbildung 2 zeigt den Betrieb eines Steam Crackers, um neben Vorprodukten der Kunststoffherstellung bevorzugt auch weitere Produkte und Kraftstoffe zu gewinnen. Je nach unternehmerischer Entscheidung und Prozessbetrieb können unterschiedliche Anteile der Produktströme gezielt angepasst werden.



Im Steam Cracker werden 100 t von einem Gemisch aus Pyrolyse-Öl und Naphtha als Ausgangsprodukt eingesetzt.³ Im Falle der bevorzugten Gewinnung von Vorprodukten für die Kunststoffherstellung werden daraus gewonnen (Abbildung 1):

- > 29 t Vorprodukt für Polymer 1
- > 16 t Vorprodukt für Polymer 2
- > 28 t Vorprodukt für andere Produkte (wie pharmazeutische Produkte), davon für weitere Polymere 12 t (5 t + 7 t)
- > 11 t Brenn- und Kraftstoffe
- > 16 t für die Prozessenergie und Verlust.

Die Massenerhaltung in der Massenbilanz ist erfüllt: Input: 10 + 90 = 100 und Output: 29 + 16 + 28 + 11 + 15 + 1 = 100

Der für die Kunststoffherstellung genutzte Anteil der Ausgangsprodukte liegt in diesem Fall bei insgesamt 57 % (Kasten).

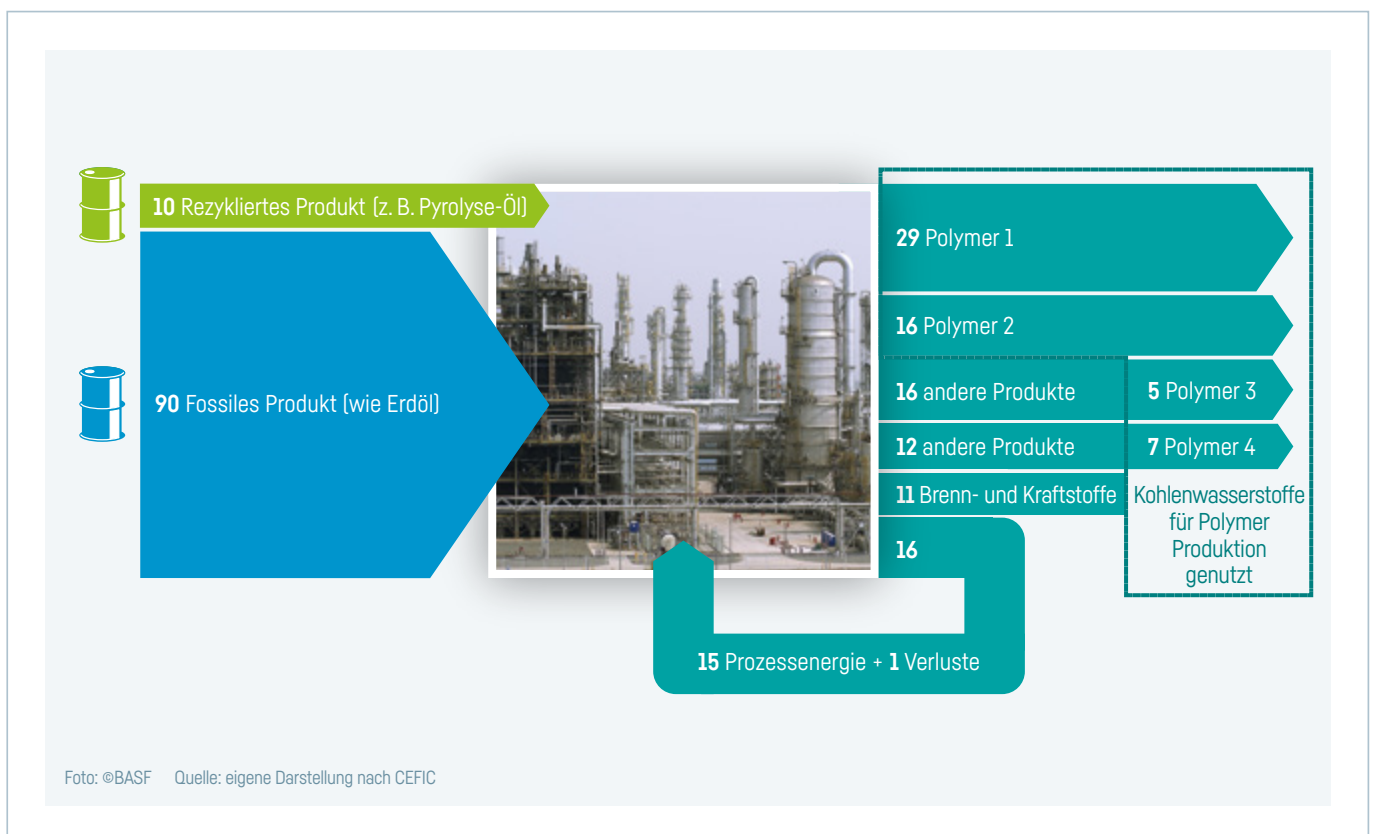


Abbildung 1: Mengenströme eines Steam Crackers, der bevorzugt zur Gewinnung von Vorprodukten für die Kunststoffherstellung betrieben wird

³ In dieser Beispielrechnung wird mit der Verteilung von 100 t Ausgangsstoffen gearbeitet. Wie oben ausgeführt, läuft der Betrieb eines gängigen Steam Crackers mit Hunderttausenden von Tonnen an Ausgangsstoffen

Im Falle der bevorzugten Gewinnung von anderen Produkten und Brennstoffen neben Vorprodukten für die Kunststoffherstellung werden daraus gewonnen (Abbildung 2):

- > 10 t Vorprodukt für Polymer 1,
- > 10 t Vorprodukt für Polymer 2,
- > 30 t Vorprodukt für andere Produkte (wie pharmazeutische Produkte),
- > 40 t Brenn- und Kraftstoffe und
- > 10 t für die Prozessenergie und Verlust

Die Massenerhaltung in der Massenbilanz ist erfüllt: Input: 10 + 90 = 100 und Output: 10 + 10 + 30 + 40 + 10 = 100.

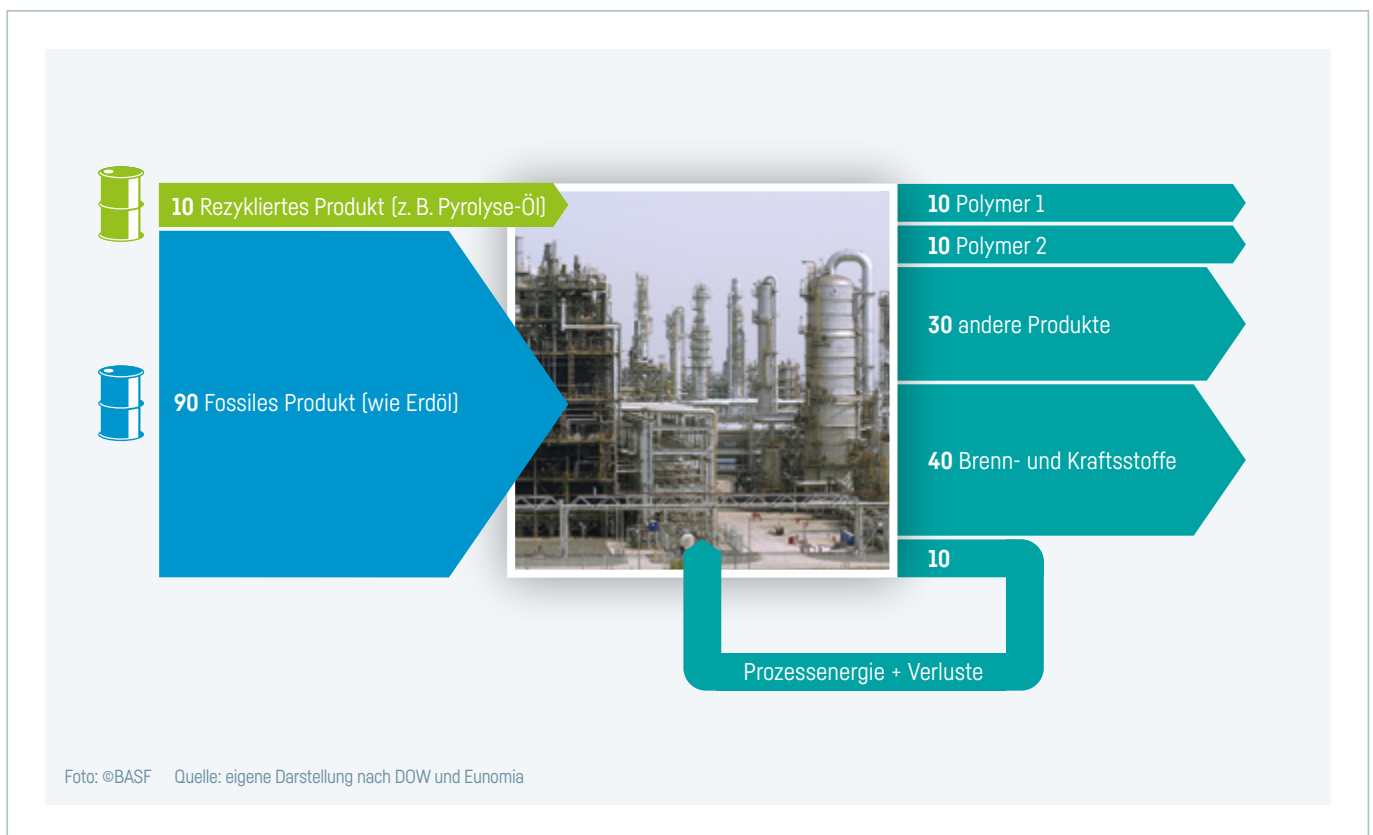


Abbildung 2: Mengenströme eines Steam Crackers, der bevorzugt zur Gewinnung von anderen Produkten und Brennstoffen neben Vorprodukten der Kunststoffherstellung betrieben wird

Entscheidend ist nun die Frage, welchen Endprodukten die 10 % chemisch rezyklierte Ausgangsprodukte zugeordnet werden.⁴

⁴ In den folgenden beispielhaften Zuordnungen bleiben wir bei dem etwas einfacheren Fall des Steam Crackers mit weniger Kunststoff-Vorprodukten

3.2 Massenbilanz-Ansätze

Bei der Auswahl eines Ansatzes der Massenbilanzierung ist die Zielsetzung, die verfolgt wird, entscheidend. Die Massenbilanzierung selbst ist eine rein rechnerische Zuordnung der Ströme innerhalb des Bilanzraums - unabhängig von der physikalisch realen Situation. Die Summe der Eingangs- und Ausgangsmassenströme muss dabei identisch sein. Prinzipiell gibt es zwei verschiedene Verrechnungsmethoden für ein eingesetztes Stoffgemisch [Abbildung 3]:

A Gleitender Durchschnitt / Rolling Average:⁵ Die im folgenden dargestellten drei Ansätze beziehen sich auf die Gutschriftmethode/credit method. Die Endprodukte erhalten die gleiche anteilige Zusammensetzung wie das Ausgangsgemisch.

B Gutschriftmethode / Credit Method: Den Endprodukten werden rechnerisch die jeweils verfügbaren Anteile der Einzelkomponenten der Ausgangsprodukte zugeordnet. Die Massenerhaltung muss gewährleistet bleiben.

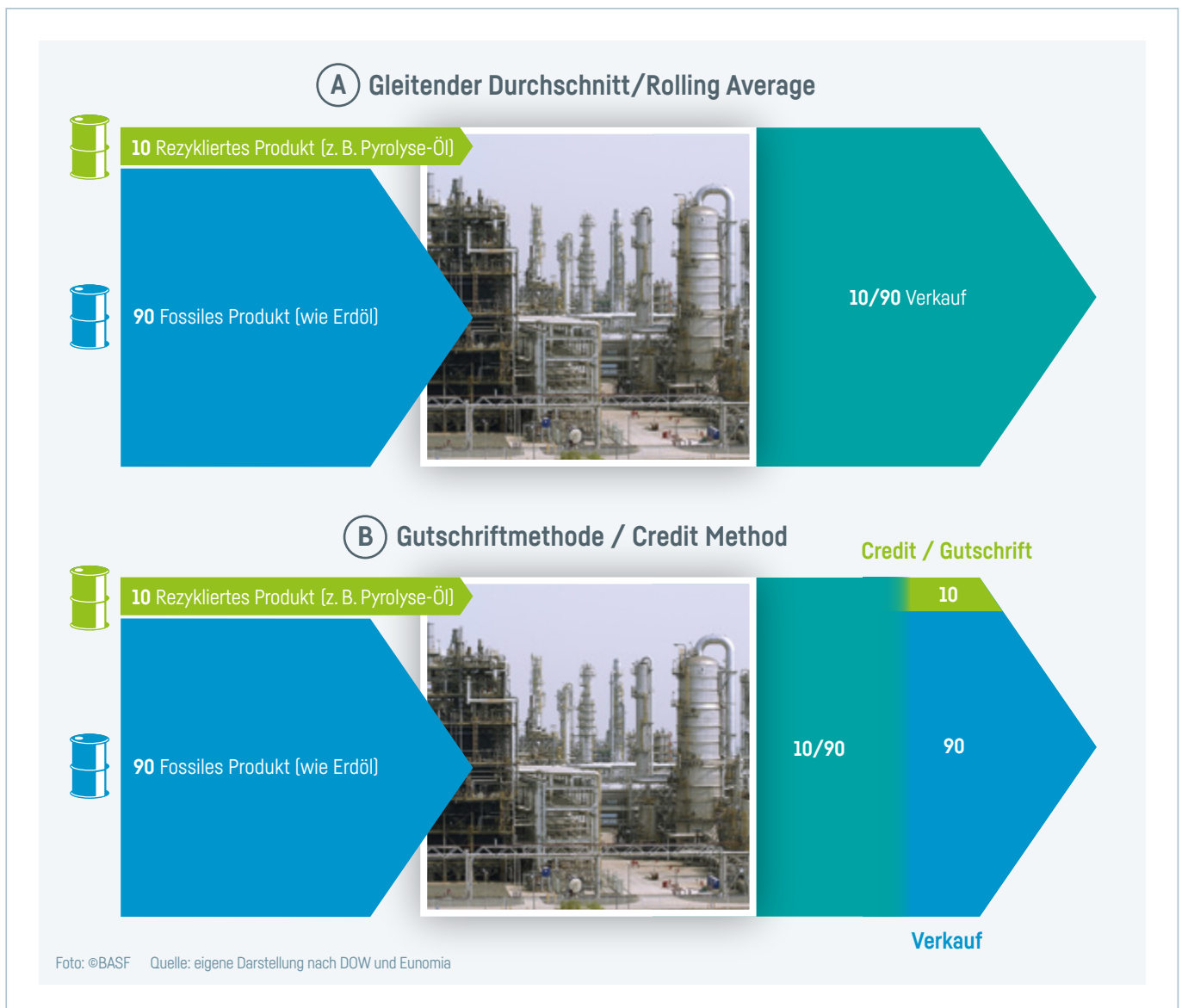


Abbildung 3: Methoden der Massenbilanzierung

⁵ Die Rolling Average-Methode wird im Zuge der SUPD (Single use plastics-Direktive) nicht in Betracht gezogen. Die SUPD ihrerseits wird die Vorlage für viele weitere Regulierungen mit Bezugnahme zur Massenbilanz.

Proportionaler Ansatz

Bezogen auf den parallelen Einsatz von rezyklierten neben nicht rezyklierten Ausgangsprodukten bedeutet dies, dass für alle gebildeten Produkte der gleiche Anteil an rezyklierten (grün) und nicht rezyklierten, fossilen (blau) Ausgangsprodukten (proportional dem Anteil im Einsatzgemisch) zugeordnet wird.

In einem petrochemischen Prozess der Chemieindustrie würden alle Produktgruppen, unabhängig davon, wozu sie weiterverarbeitet werden, den gleichen, aktuell sehr geringen Anteil an rezykliertem Material erhalten. Für das genannte Beispiel eines Steam Crackers mit einem Eingang von 100 t (Abbildung 4)

- > 10 t chemisch rezyklierte Produkte (wie Pyrolyseöl) und
- > 90 t fossiles Erdölprodukt (Naphtha)

bedeutet dies, dass allen Stoffströmen an Endprodukten der Anlage wiederum genau 10 % rezyklierter Materialanteil zugeordnet wird:

- > 10 t Vorprodukt für Polymer 1, mit 9 t fossilem und 1 t rezykliertem Materialanteil,
- > 10 t Vorprodukt für Polymer 2, mit 9 t fossilem und 1 t rezykliertem Materialanteil,
- > 30 t Vorprodukt für andere Produkte (wie pharmazeutische Produkte), mit 27 t fossilem und 3 t rezykliertem Materialanteil,
- > 40 t Brenn- und Kraftstoffe, mit 36 t fossilem und 4 t rezykliertem Materialanteil,
- > 10 t für die Prozessenergie und Verlust, mit 9 t fossilem und 1 t rezykliertem Ausgangsprodukt.



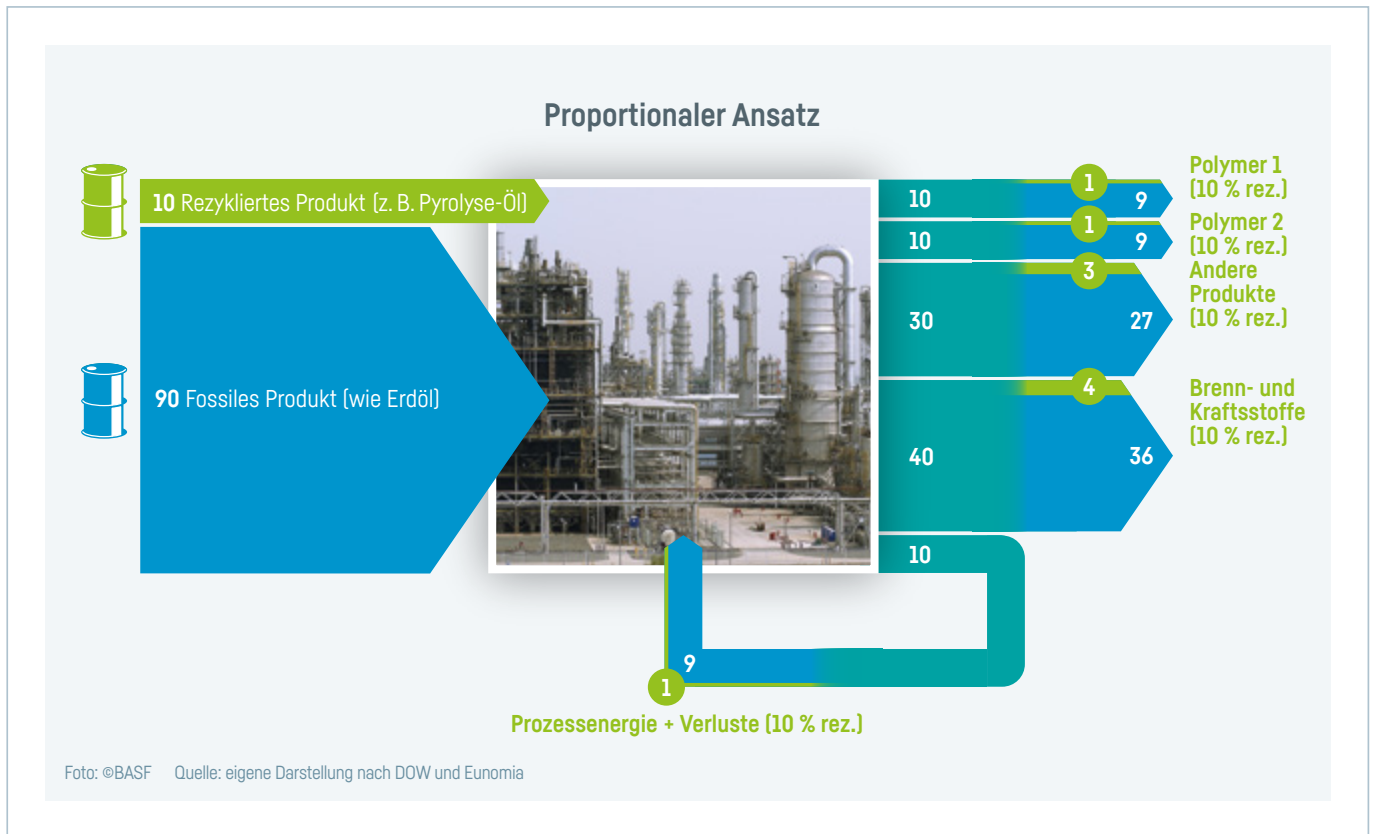


Abbildung 4: Mengenströme und Zuordnungen für den „Proportionalen Ansatz“

Da für den Markt nur das Polymer 1 mit einem Anteil an rezyklierten Produkt relevant ist, bedeutet dies in der Praxis, dass von 10 t rezyklierte Ausgangsprodukt faktisch nur 1 t ökonomisch verwertet werden kann. Die anderen 9 t „verschwinden unerkannt“ in für den Markt nicht relevanten Produkten, für die kein Bedarf an rezyklierten Produkten vorhanden ist. Wenn nur 10 % der rezyklierten Ausgangsprodukte für die Vermarktung hochwertiger Recyclingprodukte zur Verfügung stehen, ist ein wirtschaftlicher Betrieb eines petrochemischen Prozesses nicht möglich. Die bestehende Infrastruktur der Chemieindustrie kann so nicht für die Kreislaufwirtschaft genutzt werden.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Prozesse im Cracker deutlich komplexer sind als in dieser einfachen Darstellung gezeigt, die rezyklierten Ausgangsprodukte nicht identisch sind, sondern durchaus Varianzen im Rahmen der zulässigen Spezifikation aufweisen und auch ein zeitlicher Versatz in der Produktion berücksichtigt werden muss. Insofern ist auch dies ein rechnerischer Ansatz, da sich Moleküle des rezyklierten Materials nicht exakt zu je 10 % in den Endprodukten des Steam Crackers befinden.

Für die folgenden zwei Ansätze muss man sich von dem Gedanken trennen, dass der Anteil des rezyklierten Ausgangsstoffs sich in einzelnen Endprodukten direkt zahlenmäßig wiederfindet. Durch die komplexen chemischen Prozesse ist das nicht möglich.

Nur-Polymer- / Polymers-Only-Ansatz

Bei diesem Verfahrensansatz dürfen nur die rezyklierten Mengen Endprodukten des Steam Crackers zugeordnet werden, die prozesstechnisch zu neuen Kunststoffen (Polymeren) führen. Hier wird jetzt gedanklich der Anteil des rezyklierten Ausgangsmaterials, der insgesamt in Vorprodukte der Kunststoffherstellung (hier Polymer 1 und 2) fließen würde, dem gewünschten marktrelevanten Zielprodukt (hier Polymer 1) zugeordnet.

Für das genannte Beispiel eines Steam Crackers mit einem Eingang von 100 t

- > 10 t chemisch rezyklierte Produkte (wie Pyrolyseöl) und
- > 90 t fossiles Erdölprodukt (Naphtha)

bedeutet dies, dass die Stoffströme der beiden Vorprodukte für Polymere 1 und 2 von insgesamt 2 t dem marktrelevanten Polymer 1 zugeordnet werden können. Polymer 2 erhält dementsprechend keine Zuordnung an rezykliertem Material (Abbildung 5):

- > 10 t Vorprodukt für Polymer 1, mit 8 t fossilem und 2 t rezykliertem Ausgangsproduktanteil,
- > 10 t Vorprodukt für Polymer 2, mit 10 t fossilem und 0 t rezykliertem Ausgangsproduktanteil,
- > 30 t Vorprodukt für andere Produkte (wie pharmazeutische Produkte), mit 27 t fossilem und 3 t rezykliertem Ausgangsproduktanteil,
- > 40 t Brenn- und Kraftstoffe, mit 36 t fossilem und 4 t rezykliertem Materialanteil,
- > 10 t für die Prozessenergie und Verlust, mit 9 t fossilem und 1 t rezykliertem Materialanteil.

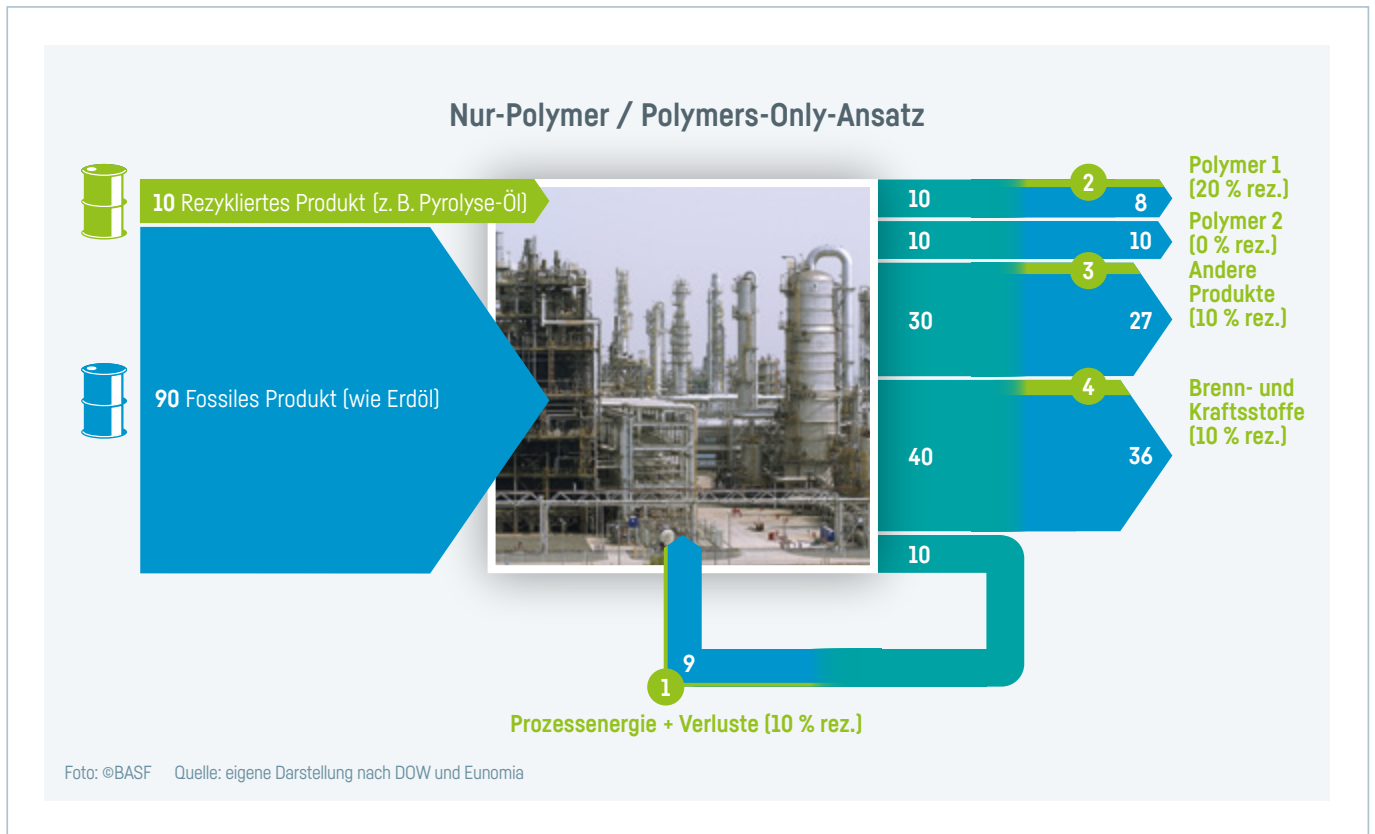


Abbildung 5: Mengenströme und Zuordnungen für den „Nur-Polymer / Polymers-Only-Ansatz“

Die Massenbilanz geht entsprechend wieder auf:

- > fossiler Anteil: $8 + 10 + 27 + 36 + 9 = 90$ (blau)
- > rezyklierter Anteil: $2 + 0 + 3 + 4 + 1 = 10$ (grün)

Damit sind in diesem Fall 2 t für das marktrelevante Polymer 1 – also bis zu 20 % der eingesetzten rezyklierten Ausgangsprodukte des Steam Crackers – zuordnungsfähig und nutzbar. Aber auch hier sind mit nur 20 % nutzbarem Anteil der 10 t eingesetzten rezyklierten Ausgangsproduktes hohe Verluste für das Zielprodukt verbunden und ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich.

Brennstoffnutzungsfrei / Fuel-Use-Excluded-Ansatz

Gemäß der Definition des VCI/PED, der sich das UFCR anschließt, erfüllen „chemische Verfahren die Prozesse für die Recyclingdefinition immer dann, wenn die hieraus resultierenden Produkte für Neumaterialien genutzt werden (Materialsubstitution). In diesem Fall handelt es sich dann um „Chemische Recycling-Verfahren“. Wenn die hieraus resultierenden Produkte als Brennstoff eingesetzt werden, sind die Prozesse keine Chemischen Recycling-Verfahren.“⁶

Wendet man diesen Ansatz auf den petrochemischen Prozess an, lassen sich, mit Ausnahme der für die Herstellung von Brennstoffen und der für den Prozessbetrieb notwendigen Mengen, alle Stoffströme für die Zuordnung zu den gewünschten chemisch rezyklierten Endprodukten nutzen.

In dem konkreten Fall bedeutet dies, dass dem für den Markt interessantesten Polymer 1 die gesamte Menge mit Ausnahme der als Brennstoff benutzten und durch Prozessenergie und Verlust anfallenden Teile des rezyklierten Ausgangsprodukt des Crackers zugeordnet werden. Demzufolge bleiben für keine anderen Produkte, sei es Polymer 2 oder andere Produkte die Möglichkeit, rezyklierte Anteile zu vermarkten (Abbildung 6).

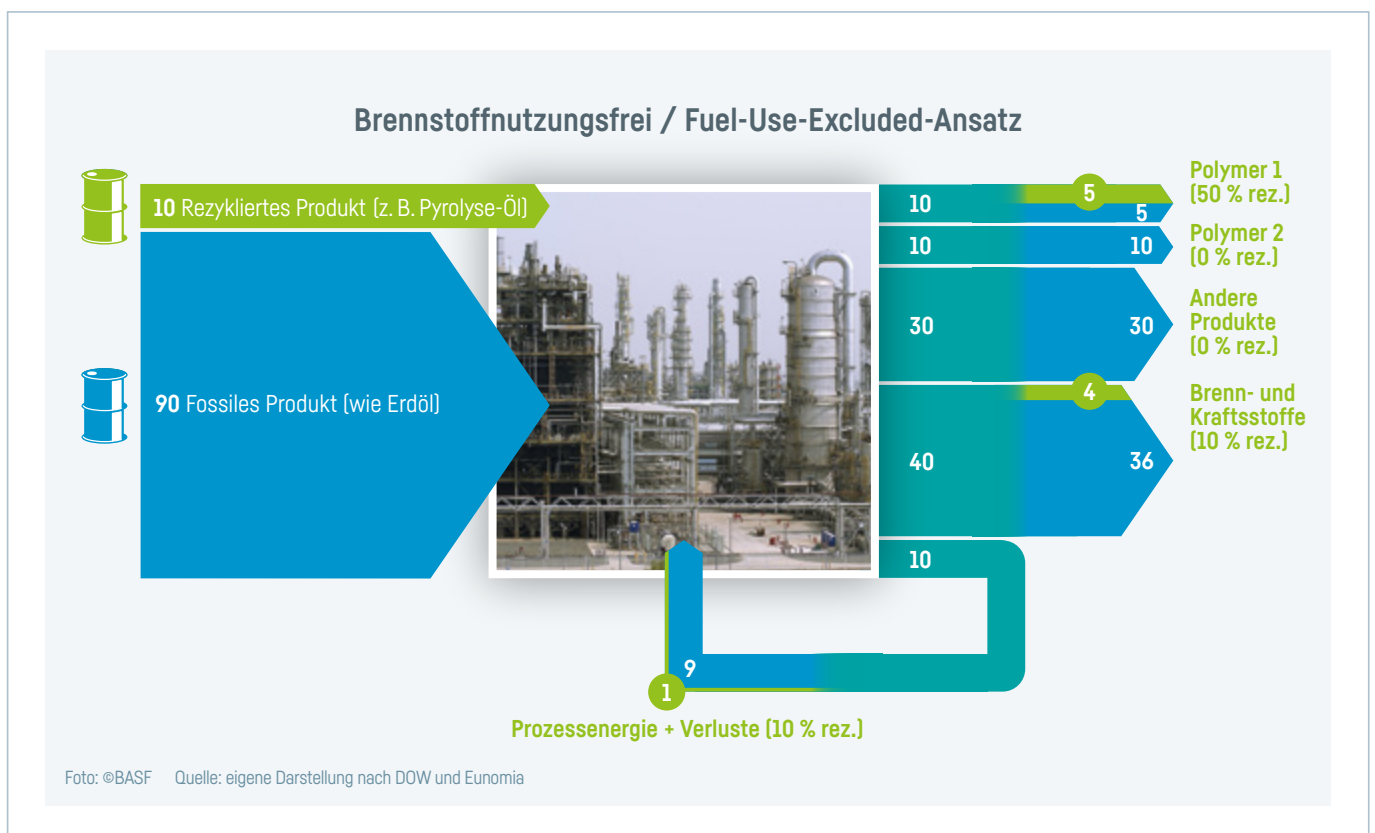


Abbildung 6: Mengenströme und Zuordnungen für den „Brennstoffnutzungsfrei / Fuel-Use-Excluded-Ansatz“

⁶ Quelle Verband der Chemischen Industrie (VCI)/Plastics Europe Deutschland (PED)

Für das Polymer 1 erhöht sich der zugeordnete Anteil an rezyklierten Ausgangsprodukten:

- > 10 t Vorprodukt für Polymer 1, mit 5 t fossilem und 5 t rezykliertem Ausgangsproduktsanteil,
- > 10 t Vorprodukt für Polymer 2, mit 10 t fossilem Ausgangsproduktanteil,
- > 30 t Vorprodukt für andere Produkte (wie pharmazeutische Produkte), mit 30 t fossilem Ausgangsproduktanteil,
- > 40 t Brenn- und Kraftstoffe, mit 36 t fossilem und 4 t rezykliertem Ausgangsproduktanteil,
- > 10 t für die Prozessenergie und Verlust, mit 9 t fossilem und 1 t rezykliertem Ausgangsproduktanteil.

Die Massenbilanz geht wieder auf:

- > fossiler Anteil: $5 + 10 + 30 + 36 + 9 = 90$ [blau]
- > rezyklierter Anteil: $5 + 0 + 0 + 4 + 1 = 10$ [grün]

Damit können insgesamt 5 t und damit bis zu 50 % des rezyklierten Ausgangsprodukts dem marktrelevantesten Produkt des Steam Crackers zugeordnet werden.

Die Methode ermöglicht es der chemischen Industrie, schnell und skalierbar nennenswerte rezyklierte Anteile zum Beispiel solchen Produkten zuzuordnen, für die gesetzlich in Zukunft der Einsatz von chemisch rezyklierten Ausgangsprodukten erforderlich ist, für die aus qualitativen Gründen aber mechanisch rezyklierte Kunststoffe nicht oder nur sehr begrenzt einsetzbar oder gar nicht verfügbar sind (z. B. kontaktsensitive oder sicherheitstechnische Produkte). Sie sichert die wirtschaftlich stabile Finanzierung des gesamten chemischen Recyclingprozesses, da die tatsächlich vorhandenen rezyklierten Einsatzstoffe genau diesen Produkten zugewiesen werden können. Dies gilt so lange, wie die Infrastruktur ein Gemisch von fossilen und rezyklierten Einsatzstoffen gemeinsam verarbeitet.

4. Fazit

Um die bestehende Infrastruktur der chemischen Industrie für eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffabfälle nutzen zu können und damit auch fossile Rohstoffe zu ersetzen sowie den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, wird jetzt der **Massenbilanz-Ansatz "Fuel-Use-Excluded"** benötigt. Hierbei lässt sich die gesamte Menge der eingesetzten rezyklierten Ausgangsprodukte, mit Ausnahme der als Brennstoffe energetisch genutzten, als rezyklierter Anteil allen oder jeweils ausgewählten Endprodukten vollständig zuordnen.

Dies steht auch in Einklang mit der gesetzlichen Recyclingdefinition in der EU-Abfallrahmenrichtlinie. Da bei der Herstellung von Kunststoffen in großem Maßstab verschiedene fossile und rezyklierte Ausgangsprodukte parallel eingesetzt werden und gleichzeitig mehrere verschiedene chemische Vorprodukte produziert werden, ist eine Massenbilanz erforderlich. Für eine wirtschaftlich tragfähige Ausweitung der Kreislaufwirtschaft muss die Industrie in der Lage sein, den rezyklierten Anteil der Ausgangsprodukte frei denjenigen Endprodukten zuzuordnen, für die ein ausreichender Markt mit entsprechender Kaufverpflichtung und -bereitschaft besteht. Erste rechtliche Marktanforderungen werden durch Regelungen wie aktuell die SUPD (Single Use Plastic Directive) und PPWR (Packaging and Packaging from Waste Regulation) bereits gestellt und benötigen diese technischen und wirtschaftlichen Lösungen. Die Verwendung des "brennstoffnutzungsfreien" (Fuel-Use-Excluded) Ansatzes wird es dem gesamten System der petrochemischen Produktion ermöglichen, ihre Infrastruktur wirtschaftlich zur Verfügung zu stellen, den Übergang zu mehr Kreislaufwirtschaft zu vollziehen und einen Systemwechsel einzuleiten.

Gleichzeitig dürfen Endprodukte, die ebenfalls im Produktionsverbund technisch Anteile an rezyklierten Ausgangsprodukten haben, aber der Markt dies nicht honoriert oder gesetzlich vorschreibt, nur als nicht rezykliert (fossil) deklariert werden. Auf diese Weise wird nur zugewiesen und vermarktet, was mengenmäßig tatsächlich und nachweislich an neuen zirkulären Ausgangsprodukten ins Produktionssystem kommt.



Um die Komplementarität des chemischen Recyclings mit dem mechanischen Recycling zu gewährleisten, sollen Kennzeichnungen massenbilanzierter rezyklierter Anteile aus dem chemischen Recycling in Endmärkten mit Leistungs- und Regulationsanforderungen verbunden werden, die mit mechanischen Recyclingverfahren im großen Maßstab nicht erfüllt werden können. Dies ist z. B. bei besonderen Kunststoffverpackungen und Hochleistungskunststoffkomponenten für den Automobil- und Bausektor, aber auch bei anspruchsvollen Haushalts- und Alltagsprodukten der Fall.

Das UFCR befürwortet dabei unterschiedliche Kennzeichnungen für die Angaben zum rezyklierten Anteil aus physisch getrennten und Massenbilanz-Routen (mechanisches und chemisches Recycling), um die Transparenz der Verfahren und so die Glaubwürdigkeit gegenüber den Verbrauchern zu erhöhen.⁷ Die Massenbilanz dient auch als Nachweis von chemisch rezyklierten Produkten bei Werbeaussagen (Claims) gegenüber den Endverbrauchern. Das UFCR befürwortet zu diesem Zweck ein durch den Gesetzgeber vorgegebenes „Label“ zum chemischen Recycling parallel zum mechanischen Recycling, um von vorne herein jede mögliche Verbrauchertäuschung und Greenwashing auszuschließen. Im Gegenteil, ein solches Label erhöht die Transparenz und Glaubwürdigkeit beim Endverbraucher und den damit einhergehenden Verbraucherschutz. Das UFCR erarbeitet gegenwärtig einen Vorschlag für verbraucherorientierte Claims und Label.

⁷ Unternehmerforum Chemisches Recycling (UFCR) – Handlungsfelder der Politik für die Rohstoffwende und die Transformation zu einer zirkulären Wirtschaft mittels chemischen Recyclings in Deutschland, 2023

Impressum

Titel

Unternehmerforum Chemisches Recycling (UF CR)
Massenbilanzierung für das chemische Recycling

Herausgeber

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
angesiedelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
c/o UBW Service GmbH
Türlestrasse 2, 70191 Stuttgart
Homepage: www.thinktank-irs.de
LinkedIn: THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Autoren

- > Markus Klatte, MBA, ARCUS Greencycling Technologies GmbH
- > Julian Odenthal, ARCUS Greencycling Technologies GmbH
- > Dr. Klaus Wittstock, BASF SE
- > Dr. Sabine Philipp, BASF SE
- > Dipl.Kfm. MA econ. Christian Haupts, carboliq GmbH
- > Dr. Peter Sandkühler, Dow Europe
- > Valentina Beatovic-Dobmann, M.B.S., Dow Deutschland Inc.
- > Dr. Markus Helftewes, Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH
- > Dr. Patrick Glöckner, Evonik Operations GmbH
- > Hendrik Rasch, Evonik Operations GmbH
- > Dr. Arndt Scheidgen, Henkel AG & Co. KGaA
- > Dr. Andreas Neumann, LyondellBasell
- > Ruediger Klein, Lyondellbasell
- > Dipl. Wi-Ing. André Dungs, Mura Technology
- > Dr. Peter Dziezok, Procter & Gamble
- > Jan Schäfer, LL.M., B.A., Pruvia GmbH
- > Dr. Andreas Kurz, Pruvia GmbH
- > Martin Nitz, Pruvia GmbH
- > Pascal Klein, MBA, Pyrum Innovations AG
- > Dr. Ralf Burgstahler, Recenso GmbH
- > Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. Jürgen F. Ephan, REMONDIS Recycling GmbH & Co. KG
- > Arne Köhne, REMONDIS Recycling GmbH & Co. KG
- > Patrick Runge M.Sc, SÜDPACK Verpackungen GmbH & Co. KG

Moderiert durch Dr. Christian Kühne, THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Stand

Veröffentlicht 10/2023

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategien GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.