


# Konzepte und Nachhaltigkeitsbewertung der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft am Beispiel des chemischen Recyclings zur Olefinproduktion

Ludwig Georg Seidl<sup>1,\*</sup>, Witold-Roger Poganietz<sup>2</sup>, Florian Keller<sup>1</sup>, Roh Pin Lee<sup>1,3</sup>, Armin Grunwald<sup>2</sup>, und Bernd Meyer<sup>1,3</sup>

DOI: 10.1002/cite.202000102

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Am Beispiel erdölbasierter Olefinproduktion wird die Transformation der linearen Kohlenstoffwirtschaft zur Kohlenstoffkreislaufwirtschaft mit chemischem Recycling von Kunststoffabfällen und Kreislaufführung heimischer Kohlenstoffquellen untersucht. Die Szenarienbetrachtung mit Nachhaltigkeitsbewertung zeigt das Potential des chemischen Recyclings zur Deckung der Olefinproduktion in Deutschland. Im Zeithorizont bis 2050 könnte die gesamte Olefinproduktion unter Einkopplung von grünem e-Wasserstoff mit bisher verbrannten, nichtfossilen Abfällen realisiert werden.

**Schlagwörter:** Kohlenstoffkreislauf, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeitsbewertung, Sektorkopplung, Vergasung

*Eingegangen:* 04. Mai 2020; *revidiert:* 18. Oktober 2020; *akzeptiert:* 02. Dezember 2020

## Concepts and Sustainability Assessment of the Circular Carbon Economy: Chemical Recycling for Olefin Production

The transformation of the current linear carbon economy to a circular carbon economy with chemical recycling of plastic waste and recirculation of domestic carbon resources is investigated using the example of petroleum-based olefin production. The scenario-based sustainability assessment shows the potential of chemical recycling to cover olefin production in Germany. With perspective 2050, the entire olefin production could be realized by coupling green e-hydrogen with previously incinerated non-fossil waste.

**Keywords:** Carbon Cycle, Circular Economy, Gasification, Sector Coupling, Sustainability Assessment

## 1 Einleitung und Zielstellung

Um die Zukunftsfähigkeit der Wirtschaft zu erhalten, steht Deutschland als Rohstoff importierendes Land und Industriestandort vor zwei großen Herausforderungen. Zum einen soll bis 2050 eine weitgehende Treibhausgasneutralität erreicht und zum anderen eine nachhaltige Ressourcenbasis für die heimische Industrie sichergestellt werden. Für beides kommt Kohlenstoff eine Schlüsselrolle zu, sowohl in Rohstoffen für die chemische Industrie als auch in Energieträgern für die Stromerzeugung und die Mobilität. Am Anfang der Kette der linearen Kohlenstoffwirtschaft stehen Erdöl-, Erdgas- und Steinkohle-Importe sowie (noch) die heimische Braunkohle. Am Ende der Kette wird der in den chemischen Produkten oder Energieträgern enthaltene Kohlenstoff in Kraftwerken, Verbrennungsmotoren und Müllverbrennungsanlagen etc. verbrannt, d. h. als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre entlassen [1].

Während in den Sektoren Energiewirtschaft und Mobilität intensiv daran gearbeitet wird, bis 2050 auf Energieträger umzustellen, die frei von fossilem Kohlenstoff sind, wie z. B. regenerativ erzeugter Strom, e-Wasserstoff und

<sup>1</sup>Ludwig Georg Seidl, Florian Keller, Dr. Roh Pin Lee, Prof. Dr. Bernd Meyer  
ludwig.seidl@iec.tu-freiberg.de

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC), Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland.

<sup>2</sup>Dr. Witold-Roger Poganietz, Prof. Dr. Armin Grunwald  
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (KIT-ITAS), Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe, Deutschland.

<sup>3</sup>Dr. Roh Pin Lee, Prof. Dr. Bernd Meyer  
Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Außenstelle Kohlenstoff-Kreislauf-Technologien (KKT), Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland.

CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe, ist es der chemischen Industrie nicht möglich, den Kohlenstoffbedarf durch CO<sub>2</sub>-neutrale, biogene Kohlenstoffquellen zu decken. Der Hauptteil muss aus alternativen Quellen bereitgestellt werden. Das erfordert den Übergang von primären, fossilen zu sekundären, nicht-fossilen Kohlenstoffquellen, die der Verbrennung entzogen und im Kreislauf geführt werden. Dieser Übergang ist gleichbedeutend mit dem Wandel von der linearen Kohlenstoffwirtschaft zum Kohlenstoffkreislauf bzw. zur Kohlenstoffkreislaufwirtschaft [2]. De facto handelt es sich um eine Kohlenstoffwende, deren wirtschaftliche und gesellschaftliche Dimension der der Energiewende vergleichbar ist [3–6].

Im vorliegenden Beitrag werden zentrale Ergebnisse der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung beauftragten Studie „Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten für die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft unter Einbindung der stofflichen Braunkohlenutzung“ (FKZ: 03SF0559A und 03SF0559B), vorgestellt. Das Ziel der Studie war die Analyse und Bewertung der Prozessketten (Teil 1, TU Bergakademie Freiberg IEC) und der volkswirtschaftlichen Einordnung der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft mit alternativen Kohlenstoffquellen sowie deren Potential zur Erreichung der angestrebten Treibhausgasneutralität und nachhaltigen Rohstoffbasis für Deutschland (Teil 2, KIT ITAS). Die Studie wurde Anfang 2018 bewilligt, als über den Fahrplan des „Kohleausstiegs“ noch Unklarheit herrschte und die stoffliche Nutzung der heimischen Braunkohle zusammen mit Abfällen eine zu untersuchende Option darstellte.

Als alternative Kohlenstoffquellen wurden demgemäß zunächst heimischen Kohlenstoffquellen mit großem Mengenpotential betrachtet, die der Verbrennung entzogen werden könnten. Hierzu zählt, neben biogenen, primären und sekundären Rohstoffen sowie kohlenstoffhaltigen Abfällen, als einzige nennenswerte, nationale Kohlenstoffquelle auch die heimische Braunkohle. Mit Braunkohle wäre es theoretisch möglich, in einer Übergangszeit bis zur beschlossenen Beendigung des inländischen Kohlebergbaus 2038 die im Kohlenstoffkreislauf entstehende Kohlenstofflücke zu schließen. Die eigentliche Rohstoffbasis für den Kohlenstoffkreislauf speist sich jedoch aus kohlenstoffhaltigen kommunalen und gewerblichen Abfällen, darunter auch Reststoffe des werkstofflichen Recyclings sowie Abfälle der Land-, Forst- und Tierwirtschaft. Die Kreislaufführung dieser Abfälle leistet einen wesentlichen Beitrag zum chemischen Recycling, bei dem aus kohlenstoffhaltigen Abfällen neue chemische Produkte erzeugt werden [7–10]. Im weitesten Sinne der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft kann auch Kohlenstoffdioxid als Kohlenstoffquelle dienen (entweder aus der Luft abgetrennt oder aus Punktquellen, z. B. Verbrennungsprozessen). Durch Reaktion mit regenerativ erzeugtem e-Wasserstoff können über Power-to-X-Verfahren verschiedene Kohlenwasserstoffe hergestellt werden [1, 11, 12]. Im vorliegenden Artikel wird diese Route nicht weiter betrachtet, da hier primär die Emissionsminderungspotentiale durch vermiedene Verbrennung und Umstellung

der fossilen Rohstoffbasis der chemischen Industrie untersucht werden sollen.

Die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft benötigt nicht nur alternative Rohstoffe, sondern erfordert auch neue Technologien und Prozessketten, die in der Lage sind, die benötigten kohlenstoffhaltigen Produkte der Zukunft im großtechnischen Maßstab mit den geforderten Qualitäten bereitzustellen, aber gleichzeitig auch den Anforderungen an die Emissionsminderung und der Verringerung der Importabhängigkeit gerecht zu werden.

Die hier vorgestellte Studie geht daher den Fragen nach, ob die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft unter dem Aspekt der mengen- und qualitätsmäßigen Verfügbarkeit alternativer Kohlenstoffquellen im Zeitraum bis 2050 allein durch Vergasung von Abfällen möglich ist, welche technischen Voraussetzungen geschaffen werden müssen und wie die Bewertung aus Sicht der Nachhaltigkeit ausfällt. Als zentrales Szenario wird die Synthesechemie zur zirkularen Produktion von leichten Olefinen (Ethylen und Propylen) über den Zwischenschritt der Methanolsynthese betrachtet. Das stellt die Alternative zur heutigen petrochemischen Produktion der Olefine im Steam Cracker dar. Mit anderen Worten, es geht um eine Bewertung von Transformationsszenarien zur Einführung der Vergasung als Beitrag chemischen Recyclings zur Nutzung alternativer Kohlenstoffquellen im volkswirtschaftlichen Maßstab.

## 2 Methodik und Definition der Szenarien

Die vorliegende Studie ist in zwei Teile untergliedert: Im ersten Teil erfolgt die Analyse und Bewertung der Technologien der zirkularen Olefinproduktion. Zur Untersuchung der Prozessketten wird die kommerzielle Prozesssimulationsssoftware Aspen Plus™ V10 genutzt. Dabei kann auf detaillierte und validierte Einzelprozessmodelle zurückgegriffen werden [13–16]. Das Ergebnis der Prozessketten-simulation sind geschlossenen Masse-, Stoff- und Energiebilanzen.

Als zentrale Kenngröße der zirkularen Kohlenstoffwirtschaft wird die Kohlenstoff-Recyclingrate (carbon recycling rate, CRR) definiert (Eq. (1)).

$$\text{CRR} = \frac{\text{Kohlenstoff im Produkt}}{\text{Kohlenstoff im Einsatzstoff}} \quad (1)$$

Diese beschreibt den Einbindungsgrad des mit den Einsatzstoffen eingebrachten Kohlenstoffs in die Zielprodukte Olefine und gibt Auskunft über den Grad der Kreislaufschließung des chemischen Recyclings. Im Falle der Kreislaufschließung beträgt die Kohlenstoff-Recyclingrate 100 %, d. h. der gesamte Kohlenstoff wird im Kreislauf gehalten. Aufgrund naturgesetzlicher und technischer Limitierungen kann der Kreislauf niemals geschlossen werden. In der vorliegenden Betrachtung wird untersucht, welcher Grad der Kreislaufschließung mit angemessenem technischem Auf-

wand erreichbar ist. Die Prozesseffizienz wird anhand der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen, d. h. wieviel Kohlenstoffdioxid bei der Erzeugung der Produkte emittiert wird, bewertet.

Der zweite Teil der Studie fokussiert, aufbauend auf die im ersten Teil ermittelten Masse-, Stoff- und Energiebilanzen, auf die gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeitsanalyse für die Zeithorizonte 2030 und 2050. Dieser Teil wurde von KIT-ITAS unter Nutzung des eigenen Carbon Flow Model of Germany (CarboMoG), einem dynamischen, prozessbasierten Energie- und Materialflussmodell, erstellt. Das Modell umfasst in der genutzten Version 365 physische Prozesse, die die Gewinnung von fossilen und metallischen Rohstoffen, den Anbau von Pflanzen und die Haltung von Tieren zur Nahrungsmittelherstellung sowie zur energetischen und stofflichen Nutzung, die Produktion von Zwischen- und Endgütern, den Konsum von Waren und Dienstleistungen sowie die Entsorgung von Abfallstoffen abbilden, und berücksichtigt 285 Produkte und Energieträger. Der Schwerpunkt des Modells liegt auf Prozessen, die biogene und fossile Rohstoffe nutzen. Die chemische Industrie wird detailliert abgebildet. Der Aufbau und die Datengrundlage der Nachhaltigkeitsbewertung in CarboMoG sind umfangreich dokumentiert. Hierfür wird auf die Veröffentlichungen des KIT-ITAS verwiesen [17–21].

Für die gesamtwirtschaftliche Transformation werden drei voneinander unabhängige Transformationsszenarien betrachtet:

- 1) Zeithorizont 2030 (hypothetische Braunkohle-Szenarien): Die Produktion von Olefinen erfolgt auf Basis von Abfällen und Braunkohle ohne Einbindung von e-Wasserstoff. Die petrochemische Olefinproduktion wird vollständig durch chemisches Recycling und stoffliche Kohlenutzung substituiert. In verschiedenen Einsatzstoffkombination werden die maximal verfügbaren Abfallmengen berücksichtigt, wobei die verbleibende Kohlenstofflücke durch Braunkohle „aufgefüllt“ wird. Aufgrund der zusätzlichen stofflichen Kohlenutzung zur Olefinproduktion bezeichnet dieses Transformations-szenario nur partiell das chemische Recycling und darüber hinaus eine Umstellung der fossilen Rohstoffbasis der Olefinproduktion von Naphtha auf Braunkohle. Dieses Transformationsszenario entstammt den Rahmenbedingungen Anfang 2018 vor den Beschlüssen der Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung zum Kohleausstieg mit Ende der Kohleverstromung und Schließung der Tagebaue bis 2038 [22]. Daher ist dieses Transformations-szenario als hypothetische Betrachtung anzusehen.
- 2) Zeithorizont 2030 (Abfall-Szenarien): Die Produktion von Olefinen erfolgt ausschließlich auf Basis von Abfällen (ohne Braunkohle) und ebenfalls ohne Einbindung von e-Wasserstoff. Aufgrund der zur Verfügung stehenden, limitierten Abfallmengen kann hier nur ein Teil der deutschen Olefinproduktion mengenmäßig abgebil-

det werden. Der fehlende Teil wird durch die konventionelle Petrochemie bereitgestellt.

- 3) Zeithorizont 2050 (Abfall/e-Wasserstoff-Szenarien): Die Olefinproduktion erfolgt ausschließlich auf Basis von Abfällen (ohne Braunkohle), jedoch mit Einbindung von e-Wasserstoff. Auf diese Weise soll so viel Kohlenstoff im Kreislauf gehalten werden, dass die erwartete deutsche Olefinproduktion vollständig durch chemisches Recycling gedeckt werden kann.

Den Transformationsszenarien wird folgendes Referenzszenario gegenübergestellt:

- 4) Referenzszenario (lineare Kohlenstoffwirtschaft): Das Referenzszenario betrachtet die etablierte petrochemische Olefinproduktion mit Abfallverbrennung am Ende des Lebenswegs der chemischen Produkte. Entsprechend den Zeithorizonten der oben ausgeführten Transformationsszenarien wird jeweils ein Referenzszenario für die Zeithorizonte 2030 und 2050 definiert.

Der Vergleich des Referenzszenarios mit den Transformationsszenarien verdeutlicht das Potential der zirkularen Prozessketten der Kohlenstoffwirtschaft.

Die gesamtwirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind innerhalb der Transformationsszenarien identisch gewählt. Für den Zeithorizont 2030 wird eine Olefinproduktion von 9,96 Mio. t und für 2050 von 11,21 Mio. t prognostiziert. Der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung wird das im Rahmen des Kopernikus-Projektes ENavi entwickelte Szenario KSP90aE unterstellt, das von einem ambitionierten Klimaschutzziel in Europa ausgeht und, übertragen auf Deutschland, eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90 % gegenüber 1990 voraussetzt, wobei des Weiteren sektorspezifische Ziele berücksichtigt sind. Für die Industrie wird angenommen, dass die Möglichkeiten einer Reduktion der prozessbedingten Treibhausgasemissionen nicht vollständig bzw. nur mit sehr hohem Aufwand erfolgen können. In Kombination mit verstärkten Effizienzgewinnen bei den energiebedingten Emissionen müsste die Industrie die Emissionen insgesamt „nur“ um 83 % reduzieren. Eine ähnliche „Ausnahmeregelung“ wird für die Landwirtschaft angenommen. Aufgrund des relativ geringen Anteils an energiebedingten Emissionen an den landwirtschaftlichen Emissionen müsste die Landwirtschaft ihre Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 gegenüber 1990 nur um 56 % reduzieren. Für den Sektor Energie folgt bis 2030 eine Emissionsminderung von 61 % und bis 2050 um 96 % gegenüber 1990 [23]. Diese Emissionsminderung bestimmt den Energiemix der Nachhaltigkeitsbewertung der Szenarien für 2030 und 2050. Relevant ist dies besonders für die Allokation von Emissionen in den Transformationsszenarien durch den zusätzlichen Stromverbrauch des chemischen Recyclings und die verminderte Stromerzeugung durch die thermische Abfallbehandlung.

Als Rohstoffbasis für den Kohlenstoffkreislauf werden Restabfälle bzw. Hausmüll, ein hochkalorischer Ersatzbrennstoff, sowie Klärschlamm und Altholz berücksichtigt. Der hochkalorische Ersatzbrennstoff ist eine Mischung aus

kunststoffreichen Rückständen der Sortierung von Leichtverpackungen (Sortierreste der gelben Tonne), der Schredderleichtfraktion aus dem Recycling von Altfahrzeugen und Elektronik-Altgeräten sowie hochkalorischen Fraktionen aus der mechanisch-physikalischen und der mechanisch-biologischen Aufbereitung von Haushaltsabfällen (schwarze Tonne) und Bauabfällen.

Es werden folgende Abfall-Aufbereitungsschritte berücksichtigt: Zur Aufbereitung werden die Restabfälle zunächst mittels Rotorschere zerkleinert und anschließend von Eisen- und Nichteisenmetallen befreit. Nach einer Trocknungsstufe werden Stäube mittels Klassierung abgetrennt und inerte Schwerstoffe ausgeschleust [24]. Um Kosten für die Transportlogistik zu vermeiden, wird Klärschlamm mechanisch entwässert (40 % Trockenmasse TM). Die finale Trocknung auf 85 % TM erfolgt mit überschüssigen Niederdruckdampf am Standort der Recyclinganlagen [25]. Als fossiler, heimischer Kohlenstoffträger wird Trockenbraunkohle des Mitteldeutschen Reviers (Tagebau Schleenhain) betrachtet [26]. Altholz aus Gebrauchtholz und Restholz der Holzverarbeitung fließen als biogene Abfallfraktionen ein.

Die bilanzielle Verfügbarkeit der Sekundärrohstoffe beträgt im Einzelnen (Stand 2015): 17,4 Mio. t für nicht-

organischen Hausmüll, 2,8 Mio. t für Klärschlamm (TM), 14,1 Mio. t für Ersatzbrennstoffe, bestehend aus Kunststoffabfällen, unsortierten papierhaltigen und sonstigen Abfällen [27], und 7,7 Mio. t für Altholz (Daten von 2016) [28]. Von den genannten Gesamtmengen wird nur der Teil als für das chemische Recycling nutzbar angenommen, der derzeit thermisch genutzt wird. Bei Hausmüll sind es 11,6 Mio. t, bei Klärschlamm 2,0 Mio. t TM, bei Ersatzbrennstoffen 10,5 Mio. t und bei Altholz 4,6 Mio. t. Der Import von Abfällen nach Deutschland zur Steigerung des Mengenpotentials wird ausgeschlossen. Die den Einsatzstoffen zugrunde gelegten Daten sind in Tab. 1 dargestellt.

### 3 Möglicher Transformationspfad zu einer zirkularen Kohlenstoffwirtschaft

Nachfolgend wird ein möglicher Transformationspfad für den Übergang zur zirkularen Kohlenstoffwirtschaft am Beispiel der kurzkettingen Olefine Ethylen und Propylen beschrieben. Ausgangspunkt ist die lineare Prozesskette, für die im Folgenden ein kurzer Abriss gegeben wird (Abb. 1).

**Tabelle 1.** Charakterisierung der Einsatzstoffe und Potential für das chemische Recycling.

Typ Einsatzstoff	Abfall			Braunkohle	Biomasse
	Hausmüll	Hochkalorischer Ersatzbrennstoff	Klärschlamm	Tagebau Schleenhain	Altholz
Rohfeuchte [Ma.-%]	33,7	–	60,0	50,0	12,9
Feuchte nach Trocknung [Ma.-%]	20,0	2,1	15,0	12,0	–
Heizwert [kJ kg <sup>-1</sup> , wf]	14 404	26 538	11 354	26 023	18 188
Brennwert [kJ kg <sup>-1</sup> , wf]	15 417	28 962	13 558	27 252	22 512
<i>Immediatanalyse [Ma.-%, wf]</i>					
Fixer Kohlenstoff	8,0	11,1	5,6	32,6	14,4
Flüchtige Bestandteile	54,1	73,5	47,1	56,9	79,8
Asche	37,9	15,4	47,3	10,5	5,8
<i>Elementaranalyse [Ma.-%, wf]</i>					
Kohlenstoff	35,7	64,9	28,0	65,2	49,9
Wasserstoff	4,6	8,5	3,5	5,1	5,8
Stickstoff	1,1	1,1	4,0	0,5	0,6
Chlor	0,8	2,3	0,0	0,0	0,2
Schwefel	0,3	0,3	1,0	1,9	0,0
Sauerstoff	19,6	7,6	16,2	16,8	37,7
<i>Verfügbares Potential [1.000 t]</i>					
2015	11 619	10 536	1964	keine Limitierung	4635
2030	12 881	11 681	2057	keine Limitierung	5139
2050	14 703	14 859	2186	0	5867



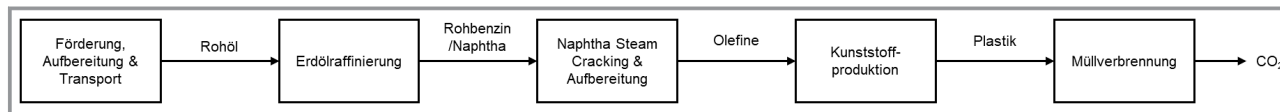


Abbildung 1. Lineare Kohlenstoffwirtschaft – Olefin-Petrochemie und Müllverbrennung.

### 3.1 Lineare Kohlenstoffwirtschaft

Stand der Technik der Produktion von kurzkettingen Olefinen [29] ist die Dampfspaltung (Steamcracking) von Naphtha. Naphtha (oder Rohbenzin) ist der bedeutendste Rohstoff der chemischen Industrie [30]. Von den im Jahr 2016 in der Petrochemie insgesamt eingesetzten 20,6 Mio. t Kohlenstoffträgern (hauptsächlich aus Importen) entfallen allein 74 % auf Naphtha und andere Erdölderivate. Die aus Naphtha erzeugten leichten Olefine werden anschließend mehrheitlich durch Polymerisation zu Plastik (Polyethylen, Polypropylen) verarbeitet. Für das Steamcracking von Naphtha wurde mittels Prozesskettenmodellierung ein Emissionsfaktor von 1,383 kg CO<sub>2</sub> pro kg Olefine bestimmt.

Am Ende der Nutzung werden die Kunststoffe als Abfall gesammelt und abfallwirtschaftlich verwertet. Im Jahr 2017 sind in Deutschland 6,15 Mio. t Kunststoffabfälle angefallen, wovon 53 % in Müllverbrennungsanlagen (2,14 Mio. t) und in Ersatzbrennstoffkraftwerken (1,10 Mio. t) direkt verbrannt wurden. Die Müllverbrennung nimmt damit in der Abfallwirtschaft eine Schlüsselrolle ein. Die restlichen 47 % wurden exportiert oder im Inland dem mechanischen Recycling zur Erzeugung von Rezyklaten zugeführt. Die Herstellung der Rezyklate bedingt weitere Prozessverluste (Sortierreste), sodass letztlich nur 29 % der Kunststoffabfälle wieder der Kunststoffverarbeitung zugeführt werden. Im Falle von Endverbraucherabfällen, die nicht vergleichbar sind mit den qualitativ hochwertigen, überwiegend reinen Produktions- und Verarbeitungsabfällen, liegt deren Recyclingquote bei nur 16 % [31]. Zur Einhaltung der durch das Verpackungsgesetz vorgeschriebenen Recyclingquoten für Kunststoffverpackungen von 58,5 % ab 2019 und mindestens 63 % ab 2022 muss der Anteil des werkstofflichen Recyclings gegenüber der thermischen Verwertung gesteigert werden [32]. Zur Erhöhung des Anteils des werkstofflichen Recyclings ist kritisch anzumerken, dass Kunststoffrezyklate im Vergleich zu Neuware eine geringere Qualität aufweisen, da sie mit Verunreinigungen (Füllstoffe, Flammschutzmittel, Farbstoffe, Verschmutzungen etc.) belastet sind. Ihr Zumischanteil zu Neugranulat ist begrenzt oder sie können nur für Anwendungen mit geringeren Qualitätsanforderungen genutzt werden („Downcycling“) [33]. Somit werden alle Kunststoffabfälle derzeit entweder direkt oder im besten Falle nach ein- oder mehrfachem Recycling letztlich aufgrund von Downcycling verbrannt.

Vereinfachend kann festgehalten werden, dass der gesamte in Kunststoffabfällen gebundene, fossile Kohlenstoff nach einer mehr oder weniger großen Zeitspanne in Form von Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre emittiert wird. Die

Kohlenstoff-Recyclingrate der linearen Kohlenstoffwirtschaft beträgt 0 %. Bei der thermischen Verwertung von Abfällen werden teilweise auch Gutschriften für die Metallverwertung angeführt [34], welche in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da die Metallverwertung im Rahmen der vorgeschlagenen alternativen Olefinproduktion gleichermaßen erfolgen kann. Zur Bewertung der thermischen Abfallbehandlung in der szenarienbasierten Nachhaltigkeitsbewertung wurden Emissionsfaktoren aus Datensätzen der ecoinvent Datenbank von GaBi entnommen.

### 3.2 Zirkulare Kohlenstoffwirtschaft

Die Transformationsszenarien der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft basieren auf der thermochemischen Konversion der alternativen kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffe durch Vergasung bzw. Partialoxidation zu einem chemisch nutzbaren Gas (Synthesegas), das überwiegend aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid besteht. Das in den Einsatzstoffen vorgegebene Molverhältnis von Kohlenstoff und Wasserstoff bedingt einen erheblichen Wasserstoffmangel im Synthesegas für die Erzeugung des Zwischenprodukts Methanol. Durch Einkopplung von externem Wasserstoff – z. B. „grüner“ e-Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom – kann das durch die Vergasung gebildete Kohlenstoffdioxid im Syntheseprodukt gebunden und somit die Produktausbeute und die Kohlenstoff-Recyclingrate gesteigert und die gesamte Kohlenstoff-Effizienz des Recyclingprozesses deutlich verbessert werden. Neben der Vergasung existieren mit lösungsmittelbasierten Verfahren (Solvolyse), Depolymerisation und Pyrolyse noch weitere Verfahren des chemischen Recyclings. Die Alleinstellungsmerkmale der Vergasung gegenüber diesen Verfahren sind zunächst die Toleranz gegenüber heterogenen Einsatzmaterialien (gemischte Abfälle insb. Restmüll und verschiedene Plastikpolymere, und auch biogene Abfälle können vergast werden), sowie die vorteilhafte Skalierung in industrielle Größenordnungen mit mehreren 100 000 Jahrestonnen [10, 35]. Verfahren der Solvolyse und Depolymerisation sind nur für ausgewählte Plastikpolymere geeignet und benötigen diese in hoher Reinheit. Die Pyrolyse wird ebenfalls primär für Plastikabfälle genutzt, kann aber auch gemischte Plastikabfälle und in einigen Verfahren auch biogene Anteile umsetzen, wobei aber die Skalierung in hohe Leistungsgrößen durch den Wärmeeintrag in den Reaktor limitiert ist [10, 36, 37]. Aus diesen Gründen wurde für den vorliegenden Artikel die Vergasung als eine Schlüsseltechnologie identifiziert und wird nachfolgend fokussiert betrachtet.

Hinsichtlich der zukünftigen Marktentwicklung der Abfallwirtschaft und des chemischen Recyclings wird aufgrund der Vielzahl der Abfallströme (insb. in diesem Artikel nicht betrachtet: getrennt anfallende und separierte Plastikpolymere, gemischte Plastikabfälle, Sonderabfälle, diverse Produktionsabfälle, usw.) und der Breite des Marktes erwartet, dass sich verschiedene Verfahren parallel am Markt etablieren. Selbst im Falle eines aggressiven Markteintrittes des chemischen Recyclings – was in diesem Artikel durch die grundlegende Zielstellung der Deckung der deutschen Olefinproduktion durch chemisches Recycling unterstellt wird – werden voraussichtlich auch zukünftig parallel zum chemischen Recycling Abfälle weiterhin thermisch verwertet werden. In diesem Kontext können auch strombasierte Power-to-X-Verfahren zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufes beitragen. Daher zeigen die in diesem Artikel präsentierten Szenarien nur einen Ausschnitt einer möglichen Ausprägung der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft, deren Potential speziell am Beispiel der deutschen Olefinproduktion verdeutlicht wird.

Die betrachteten Prozessketten bestehen aus den Teilanlagen Einsatzstoffvorbehandlung, Vergasung, Gasreinigung und Konditionierung sowie Produktsynthese.

Im Zeithorizont 2030 wird angenommen, dass die Olefinsynthese in Großanlagen (Einsatzstoff-Input  $100 \text{ t h}^{-1}$  entsprechend einer thermischen Leistung von ca. 300 bis  $700 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) möglich ist. Als Folge der zunehmenden E-Mobilität wird davon ausgegangen, dass die Kraftstoffproduktion in diesem Zeitraum zurückgeht. Die erdölbasierte Produktion von Kraftstoffen ist an die petrochemische Olefinproduktion gekoppelt – konkret können die schwereren Kraftstofffraktionen nur eingeschränkt zu leichterem Naphtha konvertiert werden. Dies ist einerseits bedingt durch das vorgegebene H/C-Verhältnis bzw. die

Siedekurve des Rohöles – andererseits limitiert die bestehende Konfiguration von Raffinerien, die nachträglich nur begrenzt durch Investitionen in neue Anlagen und Umbau der Prozessführung flexibilisiert werden können [38, 39]. Daher wird angenommen, dass sich tendenziell ein Unterangebot von erdölbasiertem Naphtha ausbildet, das durch die zirkulare Kohlenstoffwirtschaft mit Nutzung des dargestellten Rohstoffpotentials (vgl. Tab. 1) geschlossen werden kann. Die stoffliche Nutzung der Braunkohle würde auch nach dem Ausstieg aus der Kohleverstromung 2038 [22] rein theoretisch eine mögliche Option bieten, einen Beitrag zum Strukturwandel zu leisten und hochwertige Arbeitsplätze in den Kohleregionen zu erhalten. Da die Tagebaugenehmigungen ausschließlich an den Kraftwerksbetrieb gekoppelt sind, stellt dies, wie bereits erwähnt, allenfalls eine hypothetische Option dar. Bis 2050 wird angenommen, dass auch Großanlagen der Olefinsynthese um Elektrolyseanlagen erweitert werden, um die  $\text{CO}_2$ -Emissionen kontinuierlich weiter zu senken. Bei ausreichender Verfügbarkeit von e-Wasserstoff kann das in der Vergasung gebildete Kohlenstoffdioxid stofflich nutzbar gemacht werden, sodass davon ausgegangen wird, dass keine fossile Braunkohle mehr benötigt wird.

Aus diesem Transformationspfad leiten sich zwei Technologieszenarien für die großtechnische Olefinproduktion ab: (1) Die Produktion beginnt zunächst ohne Elektrolyse und ohne Einkopplung von e-Wasserstoff (Abb. 2, Zeithorizont 2030). (2) Nachfolgend könne solche Anlagen durch zusätzliche Elektrolysekapazitäten bis hin zur maximal möglichen e-Wasserstoff-Einkopplung erweitert werden (Abb. 3, Zeithorizont 2050). Der Sauerstoff aus der Elektrolyse übersteigt dann sogar den Bedarf für die Vergasung, weshalb auf die kryogene Luftzerlegung zur Bereitstellung von Sauerstoff verzichtet werden kann. Auch die Konditionierung des

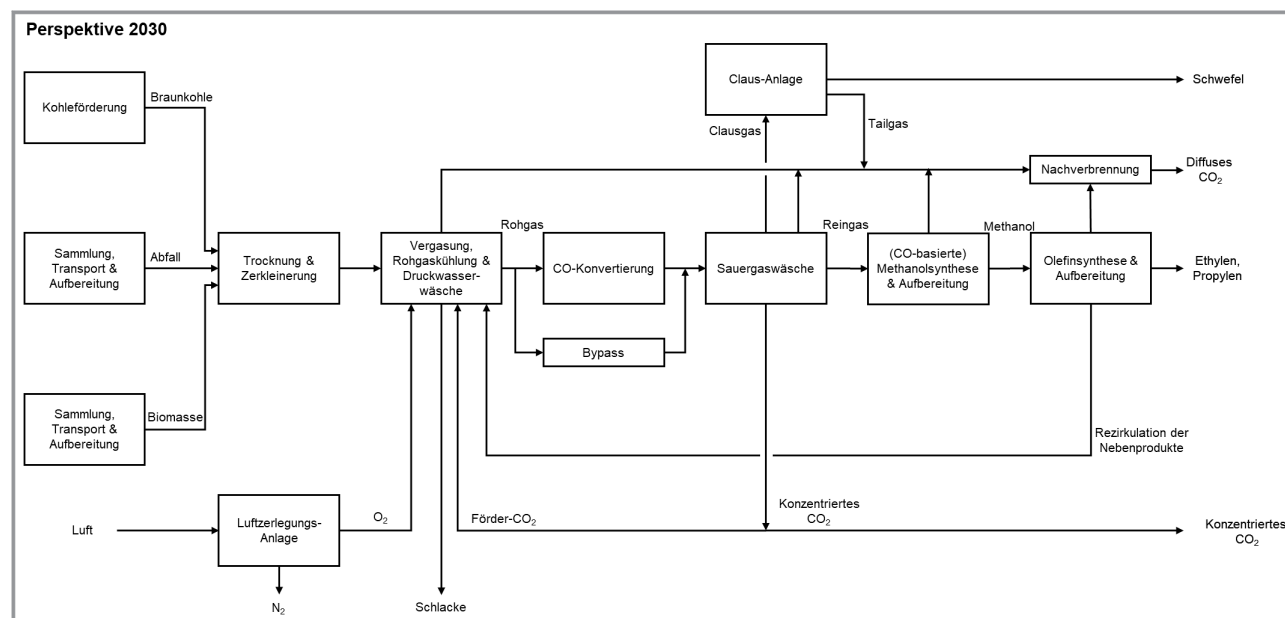


Abbildung 2. Zirkulare Kohlenstoffwirtschaft – Großanlage zur Produktion von Olefinen.

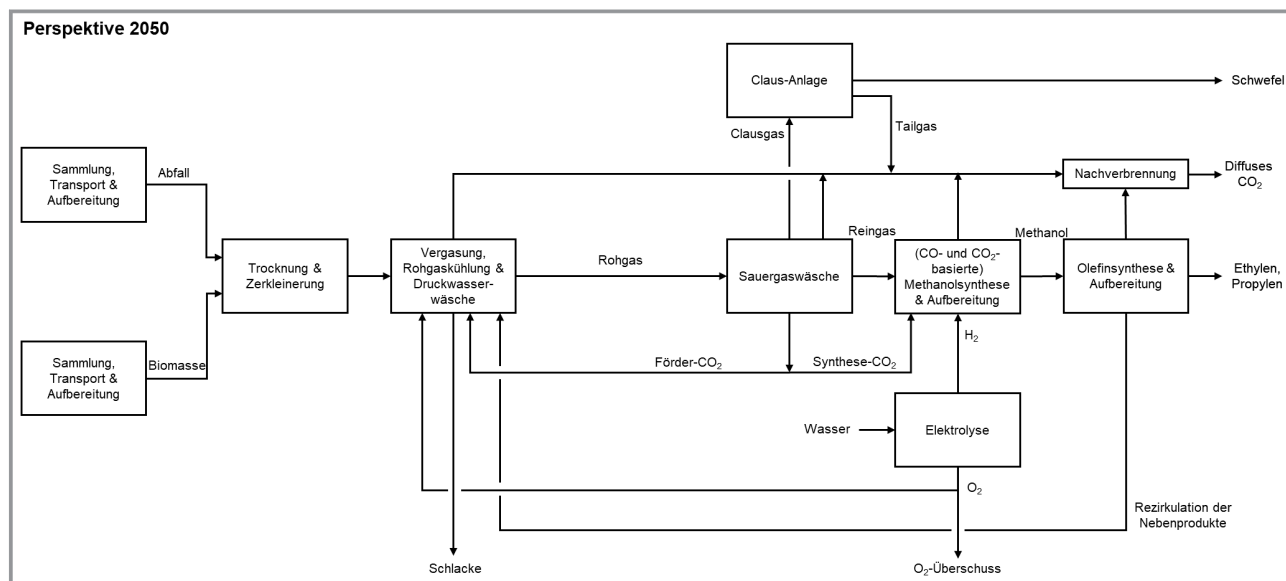


Abbildung 3. Zirkulare Kohlenstoffwirtschaft – Großanlage zur Produktion von Olefinen mit Wasserstoff-Integration.

Synthesegases durch CO-Konvertierung entfällt, da das Kohlenstoffdioxid zum Reaktionspartner einer CO<sub>2</sub>-toleranten Methanolsynthese wird.

### 3.3 Einzelprozessbeschreibung

Die Vergasung ist eine Schlüsseltechnologie der zirkularen Kohlenstoffwirtschaft. Bei hohen Temperaturen (700 bis 1500 °C) und Drücken bis zu 60 bar werden die kohlenstoffhaltigen Einsatzstoffe bei unterstöchiometrischer Sauerstoffzugabe in Synthesegas umgewandelt. Hinsichtlich des Verfahrensprinzips kann zwischen Flugstrom-, Wirbelschicht- und Festbettvergasung unterschieden werden [40]. In der großtechnischen Anwendung dominiert die Kohlevergasung mit Flugstromverfahren. Für den Einsatz in Flugstromvergasern müssen feste Einsatzstoffe auf eine Korngröße <0,1 mm (staubförmig) aufgemahlen werden. Der Einsatz von heterogenen Abfallstoffen in einem Flugstromvergaser ist durch die eingeschränkte Mahlbarkeit und Förderfähigkeit der Abfälle stark limitiert, weshalb die Flugstromvergasung für Abfälle im industriellen Maßstab bisher nicht demonstriert wurde [41].

Für die Wirbelschichtvergasung von Abfällen sind mit den in Betrieb befindlichen Anlagen von EBARA (Showa Denko, Japan), Enerkem (Alberta, Kanada) und der von der Rheinbraun AG (heute RWE) von 1993 bis 1997 betriebenen Hochtemperatur-Winkler-Vergasung (HTW) von Abfällen mehrere Referenzen vorhanden. Für den Einsatz in Wirbelschichten werden die Abfälle auf ca. 30–70 mm zerkleinert und entweder als loser „Fluff“ (Enerkem, drucklose Vergasung) oder kompaktiert als Pellets (EBARA und HTW, druckbeaufschlagte Vergasung) eingesetzt. Der Eintritt in den Vergasungsraum erfolgt mittels Schneckenförde-

rer. Er ist störanfällig (Abrasion, Blockierung durch Fasern, Verklebung) und limitiert den Vergaserdruck auf maximal 10 bar. Die Verfahren von Enerkem und EBARA erlauben nur den Einsatz von hochkalorischen Abfällen (Kunststoffabfälle bzw. kunststoffreiche Ersatzbrennstoffe) und werden aufgrund der notwendigerweise extrem breiten Einsatzstoffbasis für die Absicherung der um mehrere Größenordnungen größeren Olefin-Produktionskapazität nicht weiter betrachtet [42, 43].

Verfahren der Festbettvergasung sind entweder mit trockenem Ascheabzug oder mit flüssigem Schlackeaustrag ausgestattet, wobei letztere sich durch einen höheren Kohlenstoffumsatz und der Gewinnung eines nicht-auslaugbaren, umweltneutralen Schlackegranulats auszeichnen. Für die vorliegende Bewertung wird die Schlackebadvergasung ausgewählt. Diese Vergasungstechnologie hat sich für das chemische Recycling von Abfällen bereits 2003–2007 im Sekundärrohstoffverwertungszentrum Schwarze Pumpe bewährt [42]. In der Pilotanlage des IEC wurde die Schlackebadvergasung seit 2015 weiterentwickelt und anhand einer breiten Palette an Einsatzstoffen getestet, wobei die Vergasung von reinen Abfällen ohne Kohle im Mittelpunkt stand. Die hohen Vergasungsdrücke bis 40 bar sind vorteilhaft für die Realisierung großer Vergaser-Leistungsgrößen (niedrigere spezifische Kapitalkosten) und Senkung des Verdichtungsaufwand für die nachfolgende Gasaufbereitung und chemische Synthesen (niedrigere Betriebskosten). Das Rohgas durchläuft eine Nachvergasungszone und verlässt den Vergaser mit einer Temperatur von 1100–1150 °C. Es wird anschließend mit Wasser gequench und einer Druckwasserwäsche zur Entfernung von flüchtigen Chloriden und Ammoniak unterzogen.

Für das erzeugte Rohgas ist eine Aufbereitung erforderlich, um das H<sub>2</sub>/CO Verhältnis von ca. 1 auf den für die

Methanolsynthese notwendigen Wert von 2,1–2,3 zu erhöhen. Die Einstellung des gewünschten  $H_2/CO$ -Verhältnisses findet im Rohgas-Shift-Reaktor statt, in dem als Nebenprodukt Kohlenstoffdioxid entsteht. Anschließend werden die Sauerstoffkomponenten  $CO_2$  und  $H_2S$  in einer Methanol-Kaltwäsche (Rectisol-Verfahren) bei Temperaturen bis  $-55^\circ C$  selektiv entfernt. Das abgeschiedene Kohlenstoffdioxid kann z. B. für die  $CO_2$ -tolerante Methanolsynthese zurückgeführt werden.  $H_2S$  wird einem OxyClaus-Prozess zugeführt, wo es zu elementarem Schwefel als Verkaufsprodukt konvertiert wird. Das gereinigte und aufbereitete Synthesegas wird auf 80 bar komprimiert und der Methanolsynthese zugeführt. Die Methanolsynthese-Reaktion läuft thermodynamisch bedingt nur unvollständig ab. Um den Gesamtumsatz zu erhöhen, wird das nicht-umgesetzte Synthesegas aus dem Produktgemisch abgetrennt und in den Synthesereaktor zurückgeführt [44]. Für die Olefinsynthese kann auf eine destillative Aufbereitung des Methanols bis zum AA-Reinheitsgrad verzichtet werden, d. h. es wird nur eine Kolonne benötigt, um den Wassergehalt des Rohmethanols auf 20 Ma.-% zu reduzieren. Anschließend erfolgt die Konversion von Methanol zu Olefinen nach dem Methanol-to-Olefins(MtO)-Prozess. Dabei kommt ein zweistufiges Verfahren, basierend auf einem Wirbelschichtreaktor mit einem angeschlossenen Regenerator, zum Einsatz. Bei der stark exothermen Olefinsynthese wird der Katalysator innerhalb von einigen Minuten durch Koksablagerungen deaktiviert. Ein Teil des beladenen Katalysators wird permanent ausgekreist und in einem Regenerator oxidiert. Das Produktgemisch aus der MtO-Synthese wird in einem mehrstufigen kryogenen Destillationsprozess aufgetrennt. Ethylen und Propylen werden dabei in Polymerqualität gewonnen. Langkettige  $C_{4+}$ -Olefine fallen als Nebenprodukt an und werden im olefins cracking process (OCP) gespalten, um die Ausbeute an leichten Olefinen zu erhöhen. Bei der MtO-Synthese in Kombination mit dem OCP-Prozess wird ein Umsatz von  $> 99\%$  erreicht. Die Selektivität zu Ethylen und Propylen beträgt ca.  $90\%$  [45]. Die nach der Abtrennung der Produkte verbleibenden Nebenprodukte werden in den Vergaser zurückgeführt, um die Produktausbeute zu erhöhen. Die Exothermie der Shift-Reaktion und der Methanol- und Olefinsynthese werden zur Erzeugung von Dampf genutzt. Dieser dient primär zur Deckung des Prozessdampfbedarfs der Vergasung und Shift-Reaktion sowie zur Wärmebereitstellung. Der verbleibende Überschussdampf wird in einer dreistufigen Dampfturbine verstromt und deckt einen Teil des Strombedarfs der Prozesskette.

Emissionen fallen in allen Bereichen der Prozesskette an: Bei der Abwasserbehandlung, der Gasaufbereitung und bei den Synthesen werden Spül- und Purge-Gase ausgekreist, die unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid verbrannt werden. Das  $CO_2$  im Rauchgas der Nachverbrennung hat eine geringe Konzentration und wird daher als diffuses  $CO_2$  bezeichnet. Zusätzlich wird ein konzentrierter  $CO_2$ -Strom aus der Rectisol-Wäsche gewonnen, der teilweise als Schleusen-

gas für die Vergasung rezirkuliert wird. Der verbleibende Anteil des konzentrierten  $CO_2$ -Stromes wird im Fall ohne Integration von e-Wasserstoff emittiert (vgl. Abb. 2) und im Fall mit Integration stofflich in der Methanolsynthese stofflich genutzt (vgl. Abb. 3) Ausgewählte Randbedingungen der Prozesskettenmodellierung sind in Tab. 2 zusammengefasst.

## 4 Technologische Bewertung

Die wichtigsten Ergebnisse der Prozesskettenmodellierung sind in Tabs. 3–5 zusammengefasst. Die ausgewiesenen Emissionen beziehen sich ausschließlich auf die Prozesskette, nicht auf die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des chemischen Recyclings. Diese wurden im zweiten Teil der Studie ermittelt, s. Punkt 5. Für die Produktion von Olefinen mit stofflicher Nutzung von Braunkohle ohne zusätzlichen e-Wasserstoff kann eine CRR von 40,3 bis 45,4 % erreicht werden (Tab. 3). Für das chemische Recycling ohne co-Nutzung von Braunkohle vergrößert sich diese Bandbreite auf 35,3 bis 45,9 % (Tab. 4). Die größten Stromverbraucher sind in abnehmender Reihenfolge die Kältebereitstellung für die Rectisol-Wäsche und die Produktaufbereitung der Olefine (ca. 40 %), die Luftzerlegungsanlage (ca. 35 %), die Synthesegas- und Kreislaufverdichter der Methanolsynthese (ca. 15 %) gefolgt von der restlichen Anlagenperipherie (ca. 10 %). Durch die Verwertung von Überschussdampf in einer Dampfturbine können für alle betrachteten Fälle zumindest 70 % des Eigenbedarfs gedeckt werden, wodurch für fast alle Fälle im Saldo ein geringer Strombedarf verbleibt. Die einzige Ausnahme stellt die Verwertung von 100 % aufbereitetem Hausmüll dar: Durch die geringe Produktausbeute (0,118 kg Olefine pro kg Einsatzstoff, Tab. 4) sinkt der Stromverbrauch der produktmengenabhängigen Kältebereitstellung und Verdichter der Methanolsynthese stark ab, wobei gleichzeitig die Dampfproduktion (insb. in der Rohgas-Shift) moderat ansteigt. Somit resultiert für diesen Einsatzstoff maßgeblich infolge der geringen Produktausbeute ein leichter Stromüberschuss.

Werden mehrheitlich Einsatzstoffe mit geringem Heizwert wie Klärschlamm und Hausmüll eingesetzt, so sinkt die CRR und es steigen die  $CO_2$ -Emissionen. Die niedrigste CRR von 35,3 %, verbunden mit den höchsten spezifischen  $CO_2$ -Emissionen von  $5,7\text{ kg } CO_2$  pro kg Olefine, wurde für den Einsatz von 100 % aufbereitetem Hausmüll ermittelt. Ursächlich für dieses Ergebnis ist der hohe Aschegehalt (37,9 Ma.-%, wf) und der daraus resultierende niedrige Heizwert (Heizwert  $14,4\text{ MJ kg}^{-1}$ , wf) des aufbereiteten Hausmülls (vgl. Tab. 1), der in einer hohen  $CO_2$ -Produktion in der Vergasung zur Erreichung der Rohgasaustrittstemperatur von  $1125^\circ C$  resultiert. Die höchste CRR von 45,9 % mit den niedrigsten spezifischen  $CO_2$ -Emissionen von  $3,7\text{ kg } CO_2$  pro kg Olefine folgt für den Einsatz von 100 % Ersatzbrennstoff (Heizwert  $26,5\text{ MJ kg}^{-1}$ , wf). Abb. 4 verdeutlicht exemplarisch für diesen Fall die Kohlenstoffmas-



**Tabelle 2.** Übersicht ausgewählter Rahmenbedingungen der Prozesskettenmodellierung.

Parameter	Wert
<i>Vergasung</i>	
Anzahl und Kapazität	4 Vergaser mit 25 t h <sup>-1</sup> ; insgesamt 100 t h <sup>-1</sup>
Druck [bar]	40
Dampf/Sauerstoff-Verhältnis [kg m <sup>-3</sup> i.N.]	0,5
Kohlenstoffumsatz [%]	99,5 bis 99,9
Restkohlenstoff in Schlacke [Ma.-%]	< 0,5
Rohgasaustrittstemperatur [°C]	1125
<i>Luftzerlegung</i>	
Sauerstoffreinheit [Mol.-%]	99,8
Stromverbrauch [kWh kg <sup>-1</sup> (O <sub>2</sub> )]	245
<i>CO-Konvertierung</i>	
Dampf/Trockengas-Verhältnis [mol mol <sup>-1</sup> ]	1,2
Temperatur des 1. Reaktors [°C]	320 bis 510
Temperatur des 2. Reaktors [°C]	280 bis 295
<i>Sauergaswäsche</i>	
Temperatur H <sub>2</sub> S-Absorber [°C]	-25 bis -30
Temperatur CO <sub>2</sub> -Absorber [°C]	-40 bis -60
CO <sub>2</sub> -Anteil im Reingas [Mol.-%]	3,0
H <sub>2</sub> S-Anteil in Reingas [ppmv]	0,1
<i>Methanol-Synthese</i>	
Synthesegasmodul [mol(H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> ) mol(CO+CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> ]	2,03
Recycle-Verhältnis [kg(Kreislaufgas) kg(Frischgas) <sup>-1</sup> ]	3,3
Synthesedruck [bar]	80
Reaktortemperatur [°C]	235 bis 255
Methanolausbeute [mol(MeOH) mol(CO+CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> ]	0,91 bis 0,97
<i>Methanol-to-Olefins-Synthese</i>	
Reaktortemperatur [°C]	480
Methanol-Umsatz [%]	> 99,3
Olefinausbeute (Ethylen + Propylen) [%]	> 89,0
<i>PEM-Elektrolyse</i>	
Wirkungsgrad (brennwertbezogen) [%]	2030: 80,0; bzw. 49,3 kWh kg(H <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> 2050: 84,0; bzw. 46,9 kWh kg(H <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> -Druck [bar]	40

senströme vom Einsatzstoff bis zu den Produkten Ethylen und Propylen. Der größte Anteil der Kohlenstoffverluste (ca. 85 %) entfällt auf die Vergasung und die Konditionierung des Synthesegases. Die restlichen Verluste entstammen der Methanol- und Olefinsynthese. Der geringe Anteil der

Kohlenstoffverluste in den chemischen Synthesen verdeutlicht die hohe Effizienz und technologische Reife dieser Verfahren. Die Kohlenstoffverluste in der Vergasung entstammen aus der partiellen Oxidation der Einsatzstoffe zur Wärmebereitstellung für die endothermen Vergasungsreaktionen. Bei Einsatzstoffen mit geringerem Heizwert muss entsprechend mehr Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid oxidiert werden, um die benötigte Wärme bereitzustellen. Dies wird durch den Vergleich der Heizwerte der Einsatzstoffe aus Tab.1 mit den in Tabs.3–5 erreichten CRR deutlich: Ausgehend vom vorteilhaften Ersatzbrennstoff mit hohem Heizwert sinkt für jeden weiteren Einsatzstoff und Einsatzstoffkombination mit geringeren Heizwerten die CRR ab, wobei die niedrigsten CRR für aufbereiteten Hausmüll bzw. Kombinationen mit hohem Anteil aufbereitetem Hausmüll auftreten. Eine weitere Optimierung der Prozessbedingungen ist hier nur begrenzt möglich, da z. B. beim Absenken der Rohgasaustrittstemperatur Teer und andere Kohlenwasserstoffe nur unvollständig zersetzt werden, was die Synthesegasausbeute negativ beeinflussen und in der nachfolgenden Gasaufbereitung eine aufwende Teerabtrennung und Abwasseraufbereitung notwendig machen würde [40,41]. Somit verbleibt ein großes Potential zur Steigerung der Kohlenstoff-Recyclingrate durch Anpassung der Synthesegasqualität, das durch zusätzlich eingebrachten e-Wasserstoff erschlossen werden kann. Durch Substitution der Gaskonditionierung mittels der direkten Integration von e-Wasserstoff kann die maximal mögliche Kohlenstoffeinbindung durch Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Produktion der Wassergas-Shift-Reaktion bei gleichzeitig stofflicher Nutzung von Kohlenstoffdioxid in der Methanolsynthese erschlossen werden.

**Tabelle 3.** Ergebnisse der Prozesskettenmodellierung – Zeithorizont 2030, Szenarien mit Braunkohle.

Parameter	Einsatzstoffkombinationen				
<i>Einsatzstoff</i>					
Hochkalorischer Ersatzbrennstoff [t h <sup>-1</sup> ]	80	0	20	40	0
Aufbereiteter Hausmüll [t h <sup>-1</sup> ]	0	50	0	0	40
Klärschlamm [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	40	0	20
Braunkohle – Mitteldeutschland [t h <sup>-1</sup> ]	20	50	40	20	40
Altholz [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	0	40	0
<i>Vergaser</i>					
Thermische Leistung [MW]	704,6	478,1	506	591,9	436,1
Sauerstoffbedarf [m <sup>3</sup> i.N. kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,754	0,597	0,597	0,537	0,582
Dampfbedarf [kg kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,373	0,293	0,294	0,265	0,286
H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis im Rohgas [mol mol <sup>-1</sup> ]	1,129	1,126	1,126	1,128	1,126
<i>Produkte</i>					
Methanolproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	2002	1251,5	1371,6	1741,6	1128
Methanolproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,834	0,521	0,572	0,726	0,47
Olefinproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	792	490,7	537,9	686,3	442,4
Olefinproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,33	0,204	0,224	0,286	0,184
davon Ethylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,155	0,096	0,105	0,134	0,087
davon Propylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,175	0,108	0,119	0,152	0,098
<i>Kohlenstoffbilanz</i>					
Olefine-CRR [Olefin(C) Input(C) <sup>-1</sup> ]	45,35 %	40,75 %	42,48 %	45,10 %	40,34 %
CO <sub>2</sub> -Emission [kg(CO <sub>2</sub> ) kg Olefine <sup>-1</sup> ]	3,783	4,557	4,243	3,823	4,632
davon konzentriert [kg(CO <sub>2</sub> ) kg Olefine <sup>-1</sup> ]	3,367	4,107	3,716	3,375	4,130
davon diffus [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,417	0,450	0,526	0,447	0,501
<i>Energiebilanz</i>					
Strombedarf [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	1,857	2,099	2,091	1,754	2,158
Stromerzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	1,326	1,611	1,474	1,288	1,732
Saldo, Bedarf-Erzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,531	0,488	0,617	0,466	0,426
<i>Emissionen</i>					
Feinstaub [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	5,556	7,540	8,738	5,828	8,816
CO [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	231,944	308,539	361,591	242,314	365,054
NO <sub>x</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	739,899	984,512	1153,560	772,840	1164,105
SO <sub>2</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	320,833	1074,384	1118,609	292,875	1181,962

Das langfristige Szenario mit Zeithorizont 2050 verdeutlicht dies (vgl. Tab. 5). Mittels Wasserstoff-Integration und maximaler Einbindung von Kohlenstoffdioxid durch Substitution der CO-Konvertierung und zusätzlicher CO<sub>2</sub>-basierten Methanolsynthese wird hier eine CRR für Olefine von 87,2 bis 91,8 % erreicht. Im Vergleich zu den Anlagen ohne Integration von e-Wasserstoff kann die CRR somit

deutlich gesteigert werden. Gleichzeitig verringert sich die Bandbreite der CRR zwischen hochwertigen und minderwertigen (bzw. heizwertreichen und heizwertarmen) Einsatzstoffen. Aufgrund der vollständigen Integration des konzentrierten CO<sub>2</sub>-Stroms aus der Rectisol-Wäsche verbleiben nur diffuse CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Rauchgas der Nachverbrennung der Spül- und Purge-Gase mit geringer

**Tabelle 4.** Ergebnisse der Prozesskettenmodellierung – Zeithorizont 2030, Szenarien ohne Braunkohle.

Parameter	Einsatzstoffkombinationen				
<i>Einsatzstoff</i>					
Hochkalorischer Ersatzbrennstoff [t h <sup>-1</sup> ]	100	60	60	20	0
Aufbereiteter Hausmüll [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	0	80	100
Klärschlamm [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	40	0	0
Altholz [t h <sup>-1</sup> ]	0	40	0	0	0
<i>Vergaser</i>					
Thermische Leistung [MW]	721,7	609	540,2	400,4	320,1
Sauerstoffbedarf [m <sup>3</sup> i.N. kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,804	0,591	0,732	0,735	0,698
Dampfbedarf [kg kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,399	0,292	0,361	0,362	0,342
H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis im Rohgas [mol mol <sup>-1</sup> ]	1,129	1,126	1,126	1,126	1,126
<i>Produkte</i>					
Methanolproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	2064,7	1805,2	1494,6	995,9	720,6
Methanolproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,86	0,752	0,623	0,415	0,3
Olefinproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	817,5	708	586,1	390,6	282,6
Olefinproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,341	0,295	0,244	0,163	0,118
davon Ethylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,16	0,139	0,115	0,077	0,055
davon Propylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,181	0,156	0,129	0,086	0,062
<i>Kohlenstoffbilanz</i>					
Olefine-CRR [Olefin(C) Input(C) <sup>-1</sup> ]	45,90 %	45,49 %	43,90 %	39,21 %	35,33 %
spez. CO <sub>2</sub> -Emission [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	3,699	3,795	4,002	4,849	5,712
davon konzentriert [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	3,287	3,306	3,485	4,355	5,149
davon diffus [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,412	0,489	0,518	0,494	0,563
Strombedarf [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	1,824	1,745	1,993	2,082	2,304
Stromerzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	1,373	1,581	1,745	2,023	2,545
Saldo, Bedarf-Erzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,451	0,163	0,248	0,059	-0,241
<i>Emissionen</i>					
Feinstaub [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	5,355	5,932	7,886	7,954	9,873
CO [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	221,854	245,749	326,712	329,565	408,995
NO <sub>x</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	707,640	783,855	1042,097	1051,196	1304,551
SO <sub>2</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	143,713	130,623	395,891	264,337	343,592

CO<sub>2</sub>-Konzentration. Hinsichtlich des Energiebilanz steigt der Stromverbrauch infolge der Integration von e-Wasserstoff durch Elektrolyse stark an (von ca. 1,7 bis 2,3 kWh pro kg Olefine – vgl. Tabs. 3 und 4, auf 11,8 bis 14,9 kWh pro kg Olefine – vgl. Tab. 5). Der Stromverbrauch wird zu ca. 92–93 % durch die Elektrolyse bestimmt, wodurch die relative Bedeutung der anderen Stromverbraucher deutlich absinkt.

Die spezifischen Emissionen können im Vergleich zu den Großanlagen ohne Integration von e-Wasserstoff (Zeithori-

zont 2030) um mehr als 90 % reduziert werden und liegen im Bereich von 0,32 bis 0,45 kg CO<sub>2</sub> pro kg Olefine. Bei unverändertem Abfalleinsatz steigt die Syntheseproduktion durch den eingebrachten e-Wasserstoff deutlich. Abb. 5 zeigt wiederum exemplarisch für den Einsatz von 100 % Ersatzbrennstoff die Kohlenstoffmassenströme entlang der Prozesskette. Im Vergleich zum Fall ohne Integration von e-Wasserstoff (vgl. Abb. 4) wird die gesteigerte Prozesseffizienz infolge der vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emission aus der

**Tabelle 5.** Ergebnisse der Prozesskettenmodellierung – Zeithorizont 2050, Szenarien mit Wasserstoff-Einkopplung.

Parameter	Einsatzstoffkombinationen				
<i>Einsatzstoff</i>					
Hochkalorischer Ersatzbrennstoff [t h <sup>-1</sup> ]	100	60	60	0	0
Aufbereiteter Hausmüll [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	0	50	100
Klärschlamm [t h <sup>-1</sup> ]	0	40	0	0	0
Altholz [t h <sup>-1</sup> ]	0	0	40	50	0
<i>Vergaser</i>					
Thermische Leistung [MW]	721,7	540,2	609	380,1	320,1
Sauerstoffbedarf [m <sup>3</sup> i.N. kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,829	0,754	0,611	0,434	0,722
davon gedeckt durch Elektrolyse [%]	129,68	138,39	153,91	198,67	157,51
Dampfbedarf [kg kg(Input) <sup>-1</sup> , waf]	0,411	0,372	0,302	0,212	0,354
H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis im Rohgas [mol mol <sup>-1</sup> ]	1,126	1,126	1,126	1,126	1,126
<i>Produkte</i>					
Methanolproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	4128,2	3036,4	3598,7	2224,5	1779,5
Methanolproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	1,72	1,265	1,499	0,927	0,741
Olefinproduktion [t d <sup>-1</sup> ]	1618,9	1191,7	1412	926,6	698
Olefinproduktion [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,675	0,497	0,588	0,386	0,291
davon Ethylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,317	0,234	0,277	0,182	0,137
davon Propylen [kg kg(Einsatzstoff) <sup>-1</sup> ]	0,357	0,263	0,312	0,205	0,154
<i>Kohlenstoffbilanz</i>					
Olefine-CRR [Olefin(C) Input(C) <sup>-1</sup> ]	90,90 %	89,25 %	90,73 %	91,79 %	87,24 %
spez. CO <sub>2</sub> -Emission [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,315	0,374	0,322	0,35	0,447
davon konzentriert [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
davon diffus [kg(CO <sub>2</sub> ) kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	0,315	0,374	0,322	0,350	0,447
<i>Energiebilanz</i>					
Strombedarf [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	11,882	12,308	11,843	12,568	14,874
Stromerzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	1,130	1,247	1,135	1,890	1,570
Saldo, Bedarf-Erzeugung [kWh kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	10,752	11,061	10,708	10,677	13,304
<i>Emissionen</i>					
Feinstaub [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	3,336	4,951	3,399	5,072	7,593
CO [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	138,180	205,169	141,289	208,288	317,192
NO <sub>x</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	440,670	654,443	450,708	664,256	1011,891
SO <sub>2</sub> [mg kg(Olefine) <sup>-1</sup> ]	75,422	214,735	50,708	121,735	193,983

Gasaufbereitung ersichtlich. Für den Einsatz von 100 % Ersatzbrennstoff könnte somit durch die Integration von e-Wasserstoff die CRR annähernd von 45,9 % auf 90,9 % verdoppelt werden. Die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs durch Integration von Elektrolyseanlagen in das chemische Recycling ist damit ein wichtiger Beitrag der chemischen Industrie zur CO<sub>2</sub>-Minderung und Klimaneutralität.

## 5 Nachhaltigkeitsbewertung

Die gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeitsbewertung (zweiter Teil der Studie, erstellt von KIT-ITAS) zeigt, dass durch chemisches Recycling signifikante Reduktionen an Treibhausgasen und anderen gesundheitsrelevanten Emissionen erzielt werden können. Bereits mittelfristig (Zeithorizont



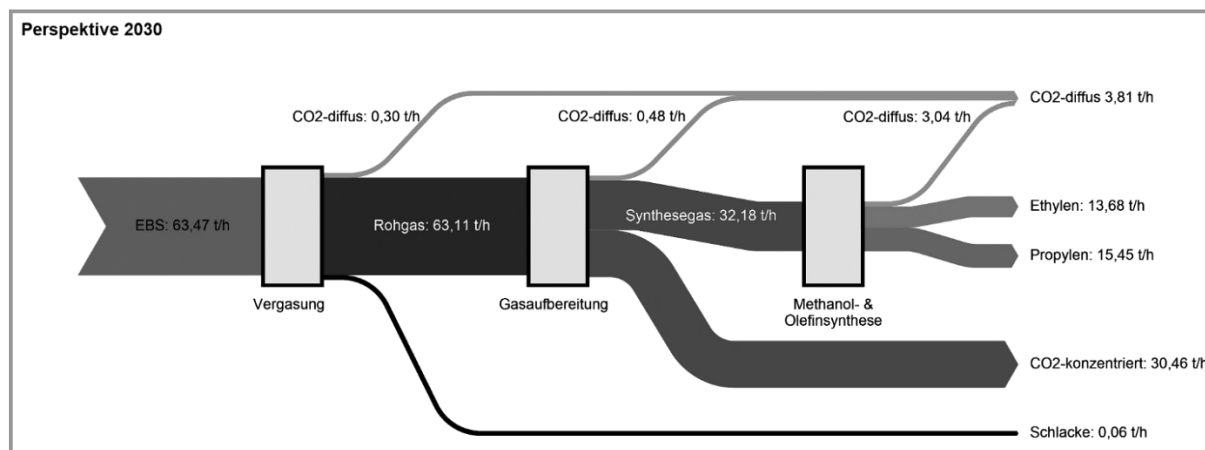


Abbildung 4. Kohlenstoff-Flussdiagramm der Olefinproduktion ohne Elektrolyse – exemplarisch für Ersatzbrennstoff.

2030) kann eine erhebliche Emissionssenkung erreicht werden. Die großen Effekte werden jedoch langfristig (Zeithorizont 2050) wirksam.

Im Referenzszenario 2030 fallen in Deutschland insgesamt 722,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. an, wovon wiederum 25,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. auf das Steamcracking bzw. die Olefinproduktion und 70,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. auf die thermische Abfallbehandlung entfallen. Insgesamt betragen somit im Referenzszenario die spezifischen Treibhausgasemissionen 9,58 kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro kg Olefine. Der vergleichsweise hohe Anteil von petrochemischer Olefinproduktion und thermischer Abfallbehandlung an den gesamten Treibhausgasemissionen begründet sich durch die Annahme des Referenzszenarios, dass diese Technologien weiterhin mit dem aktuellen Stand der Technik genutzt werden, während die restlichen Sektoren ihre vorgegebenen Einsparungsziele erreichen [23]. Die betrachteten Transformationsszenarien mit Zeithorizont 2030 (Tab. 6) zeigen, dass mengenmäßig ausreichend Einsatzstoffe vorhanden sind, die der Verbrennung entzogen werden können und einen signifikanten Einstieg in die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft ermöglichen. Selbst im Transformationsszenario 1 mit stofflicher co-Nutzung von Braunkohle und ohne Integration von e-Wasserstoff können Einsparungen von Treibhausgasemissionen in Höhe

von 12,3 bis 18,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. erzielt werden. Auf volkswirtschaftlicher Ebene entspricht dies einer Reduktion um mindestens 1,7 % (durchschnittlich 2,1 %) gegenüber dem Referenzfall mit petrochemischer Olefinproduktion und Müllverbrennung. Zusätzlich würden bei Berücksichtigung der Erdöl-assozierten Emissionen, die außerhalb Deutschlands anfallen (globale Betrachtung), durch die reduzierte Erdölförderung weitere 17,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. vermieden. Diese Emissionsminderung kann dem Bilanzraum Deutschland jedoch nicht angerechnet werden. Bei den weiteren umweltrelevanten Emissionen von Feinstaub bzw. Stickstoffdioxid sind nur geringe Verminderungen um mindestens 0,1 % bzw. um mindestens 0,3 % zu erwarten. Lediglich das Versauerungspotential würde bei stofflicher co-Nutzung von Braunkohle im ungünstigsten Fall geringfügig um 0,5 % gegenüber dem Referenzszenario ansteigen. Somit würden selbst bei Einbeziehung der stofflichen co-Nutzung von Braunkohle die positiven Umwelteffekte des chemischen Recyclings gegenüber petrochemischer Olefinproduktion und Müllverbrennung überwiegen.

Im Transformationsszenario 2 – dem Einsatz von Abfällen ohne stoffliche co-Nutzung von Braunkohle – kann im Vergleich zu Transformationsszenario 1 für alle betrachteten umweltrelevanten Indikatoren eine deutliche Verbes-

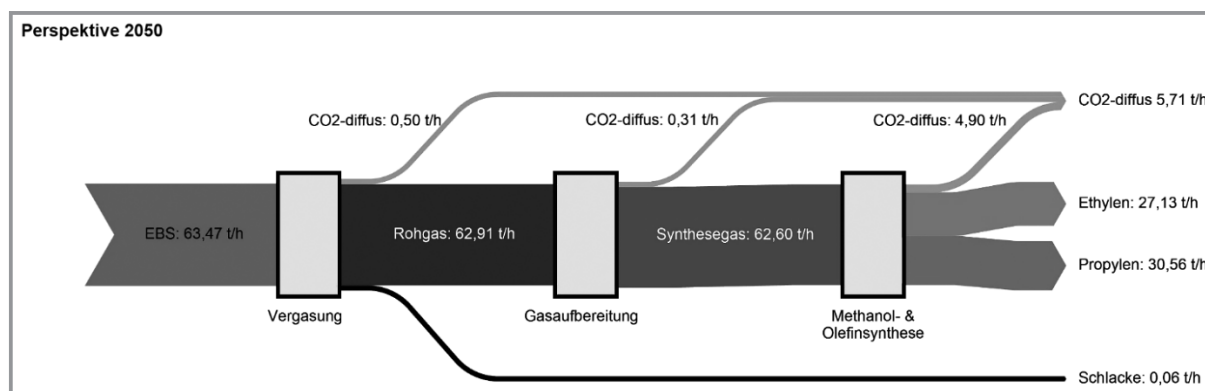


Abbildung 5. Kohlenstoff-Flussdiagramm der Olefinproduktion mit Elektrolyse – exemplarisch für Ersatzbrennstoff.

**Tabelle 6.** Umweltbilanz des Referenzszenarios und der Transformationsszenarios mit Zeithorizont 2030 ohne Wasserstoff-Integration, absolute und prozentuale Veränderung gegenüber Referenz.

Szenarien mit unterschiedlichen Einsatzstoffkombinationen	Substitution petrochemischer Olefinproduktion	Treibhausgas-emission <sup>a)</sup>	Feinstaubemissionen	NO <sub>x</sub> -Emissionen	Versauerungspotential
	–	[Mio. t] CO <sub>2</sub> -Äq.	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t] SO <sub>2</sub> -Äq.
Referenzszenario 2030	0 %	722,4	236,2	1.661,0	804,0
<i>Olefinproduktion mit Abfällen und Braunkohle (chemisches Recycling und stoffliche Kohlenutzung)</i>					
BK-EBS-HM	100 %	–12,3 (–1,7 %)	–0,3 (–0,1 %)	–4, (–0,3 %)	+4,2 (+0,5 %)
BK-EBS-HM-AltH	100 %	–18,1 (–2,5 %)	–0,6 (–0,3 %)	–5,9 (–0,4 %)	+2,1 (+0,3 %)
BK-EBS-HM-KS	100 %	–14,1 (–2,0 %)	–0,4 (–0,2 %)	–5,8 (–0,3 %)	+3,8 (+0,5 %)
BK-EBS-HM-KS-AltH	100 %	–17,3 (–2,4 %)	–0,7 (–0,3 %)	–6,4 (–0,4 %)	+2,2 (+0,3 %)
<i>Olefinproduktion mit Abfällen ohne Braunkohle (chemisches Recycling)</i>					
EBS-HM	55 %	–24,3 (–3,4 %)	–0,7 (–0,3 %)	–9,1 (–0,5 %)	–3,4 (–0,4 %)
EBS-HM-AltH	67 %	–31,0 (–4,3 %)	–1,1 (–0,5 %)	–11,3 (–0,7 %)	–4,5 (–0,6 %)
EBS-HM-KS	58 %	–26,3 (–3,6 %)	–0,9 (–0,4 %)	–10,8 (–0,7 %)	–3,8 (–0,5 %)
EBS-HM-KS-AltH	69 %	–33,0 (–4,6 %)	–1,3 (–0,6 %)	–12,3 (–0,7 %)	–5,0 (–0,6 %)

a) Einschließlich biogener Emissionen

serung festgestellt werden. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen wird annähernd verdoppelt, d.h. sie erhöht sich auf insgesamt 24,3 bis 33,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Gegenüber dem Referenzszenario beträgt die Minderung mindestens 3,4 % (durchschnittlich 4,0 %), auch hier ohne Anrechnung der durch den Erdöl-Minderverbrauch verringerten Erdöl-assozierten außerdeutschen Emissionen in Höhe von 10,4 bis 13,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Dieses Szenario weist eine leicht positive Entwicklung aller umweltrelevanten Emissionen aus. Die Stickstoffoxidemissionen sinken um mindestens 0,5 %, die Feinstaubemissionen um 0,3 % und das Versauerungspotential um 0,4 %. Je nach Einsatzstoffkombination könnte bereits mittelfristig (Zeithorizont 2030) allein durch Abfälle – ohne zusätzlichen e-Wasserstoff – 55 bis 69 % der gesamten inländischen Olefinproduktion durch chemisches Recycling bedient werden.

Im Referenzszenario 2050 fallen in Deutschland insgesamt 195,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. an, wovon wiederum 14,57 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. auf das Steamcracking bzw. die Olefinproduktion und 81,11 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. auf die thermische

Abfallbehandlung entfallen. Die resultierenden spezifischen Emissionen betragen 8,53 kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro kg Olefine. Im langfristigen Transformationsszenario 3 mit Zeithorizont 2050 und Integration von e-Wasserstoff kann eine vollständige Deckung der inländischen Olefinproduktion durch chemisches Recycling erreicht werden (Tab. 7). Zwar kann durch den e-Wasserstoff die vorhandene Rohstoffbasis aus Abfällen und Biomasse effizienter genutzt und die Olefinproduktion durch chemisches Recycling auf 11,21 Mio. t pro Jahr gesteigert werden, jedoch resultiert dies je nach Einsatzstoffkombination in einem zusätzlichem Strombedarf von 92 bis 125 TWh. Zum Vergleich: Im Jahr 2018 betrug die deutsche Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien 244 TWh [46]. Dies verdeutlicht zunächst die signifikante Größe der benötigten erneuerbaren Energie für die Integration von e-Wasserstoff, gleichzeitig erscheint diese Größenordnung für den Zeithorizont 2050 und die angestrebte vollständige Substitution der petrochemischen Olefinproduktion durch chemisches Recycling nicht prohibitiv. Das chemische Recycling weist aufgrund der gesteigerten

**Tabelle 7.** Umweltbilanz des Referenzszenarios und der Transformationsszenarien mit Zeithorizont 2050 mit Wasserstoff-Integration, absolute und prozentuale Veränderung gegenüber Referenz.

Szenarien mit unterschiedlichen Einsatzstoffkombinationen	Substitution petrochemischer Olefinproduktion	Treibhausgasemission <sup>a)</sup>	Feinstaub-Emissionen	NO <sub>x</sub> -Emissionen	Versauerungspotential
	–	[Mio. t] CO <sub>2</sub> -Äq.	[1000 t]	[1000 t]	[1000 t] SO <sub>2</sub> -Äq.
Referenzszenario 2050	0 %	195,0	199,7	1.061,5	502,5
<i>Olefinproduktion mit Abfällen und Wasserstoff-Integration (chemisches Recycling)</i>					
EBS-HM	100 %	–49,9 (–25,6 %)	–1,4 (–0,7 %)	–19,1 (–1,8 %)	–8,1 (–1,6 %)
EBS-HM-AltH	100 %	–48,7 (–25,0 %)	–1,6 (–0,8 %)	–19,4 (–1,8 %)	–8,2 (–1,6 %)
EBS-AltH-HM	100 %	–56,2 (–28,8 %)	–1,9 (–1,0 %)	–21,2 (–2,0 %)	–9,3 (–1,9 %)
EBS-KS-AltH	100 %	–50,7 (–26,0 %)	–1,8 (–0,9 %)	–20,2 (–1,9 %)	–8,8 (–1,8 %)

a) Einschließlich biogener Emissionen

gerten Prozesseffizienz infolge der Integration von e-Wasserstoff noch wesentlich geringere Treibhausgasemissionen auf, zusätzlich verstärkt durch die vermiedene Müllverbrennung. Gegenüber dem Referenzszenario können zwischen 48,7 und 56,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Volkswirtschaftlich betrachtet entspricht dies einer Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 25,0 % (durchschnittlich 26,4 %). Diese Zahlen unterstreichen die erhebliche volkswirtschaftliche Relevanz der Emissionsminderung der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft für die chemische Industrie. Bei globaler Betrachtung der Einsparungen durch vermiedene Rohölförderung und -transport wäre eine weitere Verringerung um 19,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. anzurechnen. Schließlich ist auch eine leichte Umweltentlastung durch Reduzierung der Emissionen von Feinstaub (mindestens 0,7 %) und Stickstoffoxid (mindestens 1,8 %) und des Versauerungspotentials (mindestens 1,6 %) zu verzeichnen.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das zentrale Ergebnis der vorliegenden Studie liegt in der quantifizierten Aussage, dass die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft mit chemischem Recycling von Abfällen und Synthese neuer Kunststoffe ein erhebliches Treibhausgas-Minderungspotential gegenüber der heute etablierten linearen Kohlenstoffwirtschaft mit petrochemischer Olefinproduktion und Verbrennung der Kunststoffabfälle am Ende des Lebenswegs aufweist. Gegenstand der Studie war auch die co-Nutzung von Braunkohle für das chemische Recycling als heimischer Kohlenstoffträger. Selbst in diesem Falle ist die volkswirtschaftliche Treibhausgasbilanz positiv.

Die volkswirtschaftliche Bilanzierung der Treibhausgasemissionen für das chemische Recycling von Abfällen – mit optionaler Einkopplung von grünem e-Wasserstoff – führt im Wesentlichen zu folgenden Ergebnissen: Bereits der Einstieg in die abfallbasierte Kohlenstoffkreislaufwirtschaft ohne Integration von e-Wasserstoff, die im Zeithorizont 2030 möglich ist, würde zu einer Entlastung der deutschen Treibhausgas-Bilanz um bis zu 33,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. führen. Die im Zeithorizont 2050 erwartete, großskalige Einkopplung von e-Wasserstoff würde nicht nur zu einer weit darüberhinausgehenden Emissionsminderung von bis zu 56,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. – wobei die Emissionsminderungen der Lieferketten für Erdöl nicht eingerechnet sind –, sondern auch zu einer mengenmäßigen Bedarfsdeckung der deutschen Olefinproduktion von jährlich ca. 11,2 Mio. t beitragen. Der starke Emissionsminderungseffekt von grünem e-Wasserstoff begründet das technologische Erfordernis, bereits im Einstiegsszenario für das chemische Recycling die spätere Erweiterungsoption für Wasserstoff zu berücksichtigen.

Zur Bewertung der Kreislaufschließung des Kohlenstoffkreislaufs gibt die Kohlenstoff-Recyclingrate Auskunft. Bei der Olefin-Produktion ohne Nutzung von e-Wasserstoff ist der Kreislauf knapp halb geschlossen (CRR 46 %). Durch schrittweise Integration von zusätzlichem e-Wasserstoff können langfristig (Zeithorizont 2050) Kohlenstoffverluste in der Prozesskette ausgeglichen und eine Kohlenstoff-Recyclingrate von über 90 % (entsprechend einer weiteren Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission von 80 bis 90 % gegenüber dem chemischen Recycling ohne Wasserstoffintegration) erreicht werden.

Eine entscheidende Frage ist, ob auch die benötigten Technologien zur großtechnischen Umsetzung der Trans-

formationsszenarien für das chemische Recycling rechtzeitig zur Verfügung stehen werden. Die technologische Betrachtung zeigt: Alle Technologien sind kommerziell verfügbar, mit der Einschränkung, dass sie für Kohle entwickelt wurden und in Ländern wie China und Indien auf Kohlebasis betrieben werden. In China bilden sie sogar die Basis der organischen chemischen Industrie mit z. T. weltweit größten Anlagen [47]. Insofern steht einem Markteintritt im Zeit-horizont 2030 nichts entgegen, vorausgesetzt die erforderlichen Entwicklungen zur Übertragung der für Kohle verfügbaren Technologien für das chemische Recycling von Abfällen werden angeschoben. Die Technologieentwicklungen betreffen vor allem die Aufbereitung und Konditionierung der heterogenen Abfälle für die Vergasung sowie die Mono-Vergasung der aufbereiteten Abfälle, beides im Demonstrations- und großtechnischen Maßstab. Dabei kann auf Pionierleistungen der Technologieentwicklung und der großtechnischen Anwendung des chemischen Recyclings in Deutschland in den 1990er und 2000er Jahren zurückgegriffen werden. Eine aussichtsreiche Technologie der Abfallvergasung basiert auf dem Verfahren der Schlackebadvergasung (Firma Lurgi), das bis 2007 im Sekundärrohstoffverwertungszentrum Schwarze Pumpe mit verschiedensten Abfallstoffen und einer Kohlebeimischung von 25 Ma.-% betrieben wurde. Ein Alleinstellungsmerkmal der Schlackebadvergasung für Abfälle ist die vollständige Vergasung der mineralischen Rückstände mit dauerhafter, umweltneutraler Einbindung problematischer und toxischer Bestandteile in das Schlackegranulat. Die erforderliche technologische Weiterentwicklung der Schlackebadvergasung betrifft die Ertüchtigung und den Dauerbetriebsnachweis der Erzeugung eines teer- und ölfreien Synthesegases für die 100 % Abfall-Vergasung. Hierzu liegen erste positive Ergebnisse von Versuchskampagnen in der Pilotanlage zur Schlackebadvergasung (40 bar, max. 10 MW<sub>th</sub>) am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen der TU Bergakademie Freiberg vor [48].

Als Fazit bleibt festzustellen, dass die in der Studie „Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten für die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft unter Einbindung der stofflichen Braunkohlenutzung“ ermittelten und im vorliegenden Artikel auszugsweise wiedergegebenen Potentiale der Treibhausgas-minderung und der Ressourcenschonung von erheblicher volkswirtschaftlicher Relevanz sind. Es hängt vom politischen Willen ab, wie Deutschland den Transformationspfad von der linearen zur zirkularen Kohlenstoffwirtschaft beschreiten und die Herausforderungen zur Erreichung der Treibhausgasneutralität und einer nachhaltigen Ressourcenbasis für die chemische Industrie meistern will. Die noch notwendigen Technologieentwicklungen mit Demonstration der Dauerbetriebsreife der Abfallbehandlung und der Abfallvergasung müssten jetzt in Angriff genommen werden, wenn das im Rahmen der Studie ermittelte, große volkswirtschaftliche Nachhaltigkeitspotential bis 2050 erschlossen werden soll.

Diese Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projektes „Nachhaltigkeitsbewertung von Konzepten für die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft unter Einbindung der stofflichen Braunkohlenutzung“ (FKZ: 03SF0559A und 03SF0559B) gefördert. Ansichten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen sind die der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit den Positionen des BMBF überein. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

## Abkürzungen

AltH	Altholz
Äq.	Äquivalente
BK	Braunkohle
CarboMoG	Carbon Flow Model of Germany
CRR	Carbon Recycling Rate (Kohlenstoff-Recyclingrate)
EBS	Ersatzbrennstoff
HM	Hausmüll
IEC	Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
KIT-ITAS	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
KS	Klärschlamm
MeOH	Methanol
MtO	Methanol-to-Olefins
OCP	Olefins Cracking Process
TM	Trockenmasse
th	thermisch
waf	wasser- und aschefrei
wf	wasserfrei

## Literatur

- [1] M. Bertau, in *Energie und Rohstoffe*, Vol. 38 (Eds: P. Kausch, J. Gutzmer, M. Bertau, J. Matschullat), Spektrum, Heidelberg **2011**.
- [2] B. Schäfer, J. Sauer, *Chem. Ing. Tech.* **2020**, 92 (3), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201900178>
- [3] A. M. Bazzanella, F. Ausfelder, *Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industry*, Technology Study, DECHEMA, Frankfurt **2017**.
- [4] R. P. Lee, A. Scheibe, *J. Cleaner Prod.* **2020**, 244, 118629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118629>
- [5] R. P. Lee, *J. Cleaner Prod.* **2019**, 219, 786–796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.316>
- [6] R. P. Lee, R. Reinhardt, F. Keller, S. Gurtner, L. Schiffer, in *Managing Natural Resources* (Eds: G. George, S. Schillebeeckx), Edward Elgar, Cheltenham, UK **2018**.
- [7] R. P. Lee, F. Keller, B. Meyer, *Clean Energy* **2017**, 1 (1), 102–113. DOI: <https://doi.org/10.1093/ce/zkx004>



- [8] B. Meyer, F. Keller, C. Wolfersdorf, R. P. Lee, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90* (1–2), 241–248. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201700088>
- [9] L. G. Seidl, R. P. Lee, F. Keller, B. Meyer, in *Energie aus Abfall* (Eds: S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, A. Gosten), Thomé-Kozmiensky Verlag, Neuruppin **2020**.
- [10] P. Mamani-Soliz, L. G. Seidl, F. Keller, R. P. Lee, B. Meyer, in *Recycling und Sekundärrohstoffe, Band 13*, Recycling und Rohstoffe, Vol. 13 (Eds: E. Thomé-Kozmiensky, O. Holm, B. Friedrich, D. Goldmann), Thomé-Kozmiensky Verlag, Nietwerder **2020**.
- [11] W. M. Budzianowski, *IJGW* **2017**, *12* (2), 272–296. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGW.2017.084510>
- [12] B. Rego de Vasconcelos, J.-M. Lavoie, *Front. Chem.* **2019**, *7*, 392. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00392>
- [13] K. Boblenz, C. Wolfersdorf, K. Uebel, K. Günther, M. Reinmüller, S. Guhl, *HotVeGasII – Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung zukünftiger Hochtemperaturvergasungs- und -gasaufbereitungsprozesse für dynamische Stromerzeugungs- und -speichertechnologien*, Abschlussbericht FKZ 0327773G, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg **2016**.
- [14] R. Pardemann, Stoff-Kraft-Kopplung in kohlebasierten Polygenerationskonzepten, *Dissertation*, TU Bergakademie Freiberg **2013**.
- [15] C. Wolfersdorf, Elektroenergieeinkopplung bei der stofflichen Nutzung von Braunkohle und CO<sub>2</sub>, *Dissertation*, TU Bergakademie Freiberg **2017**.
- [16] F. Keller, R. P. Lee, B. Meyer, *J. Cleaner Prod.* **2020**, *250*, 119484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119484>
- [17] L. Schebek, W.-R. Poganietz, in *Methoden der Stoffstromanalyse: Konzepte, agentenbasierte Modellierung und Ökobilanz* (Eds: F. Beckenbach), Metropolis, Marburg **2011**.
- [18] W.-R. Poganietz, M. Fuss, Sustainability assessment of selected concepts to close the carbon cycle, *9th Int. Freiberg Conf. on IGCC & XTL Technologies Closing the Carbon Cycle*, Berlin, Juni **2018**.
- [19] M. Cote, W.-R. Poganietz, L. Schebek, *Mater. Tech.* **2015**, *103* (1), 104. DOI: <https://doi.org/10.1051/mattech/2015001>
- [20] A. Uihlein, W.-R. Poganietz, L. Schebek, *Resour. Conserv. Recycl.* **2006**, *46* (4), 410–429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.09.001>
- [21] A. Uihlein, Modellierung der Kohlenstoffströme zur Untersuchung der Nutzung von Kohlenstoffträgern in Deutschland, *Dissertation*, Technische Universität Darmstadt **2006**.
- [22] *Abschlussbericht Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin **2019**.
- [23] Fahl, U., Gaschnig, H., Hofer, C., Hufendiek, K., Maier, B., Pahle, M., *Das Kopernikus-Projekt ENavi: Die Transformation des Stromsystems mit Fokus Kohleausstieg*, IASS, Potsdam **2019**.
- [24] *CO<sub>2</sub>-arme Kohlechemie und chemisches Recycling als Beitrag zu einer nachhaltigen und emissionsarmen Kreislaufwirtschaft in Sachsen und seinen Nachbarregionen: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben STOBRA*, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Freiberg **2018**.
- [25] A. Roskosch, P. Heidecke, *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau **2018**.
- [26] S. Krzack, H. Gutte, B. Meyer, *Stoffliche Nutzung von Braunkohle*, Springer, Heidelberg **2018**.
- [27] *Umwelt – Abfallentsorgung 2015*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden **2017**.
- [28] Döring, P., Cords, M., Mantau, U., *Altholz im Entsorgungsmarkt: Aufkommen und Verwertung 2016* **2018**.
- [29] J. G. Speight, *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, Elsevier, Amsterdam **2011**.
- [30] *Daten und Fakten Rohstoffbasis der chemischen Industrie*, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt **2019**.
- [31] CONVERSIO, *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017*, BKV, Frankfurt **2018**.
- [32] *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen*, Verpackungsgesetz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin **2017**.
- [33] P. Kempkes, A. Fendel, J. von Smuda, H. Wilms, H. Zahn, *Chem. Ing. Tech.* **2017**, *89* (12), 1706–1713. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201600112>
- [34] ITAD – Interessengemeinschaft der Thermischen, *Jahresbericht 2018*, **2019**.
- [35] J. Hrbek, *Status Report on Thermal Gasification of Biomass and Waste*, IEA Bioenergy Task 33 Special Report, IEA Bioenergy, Dublin **2019**.
- [36] K. Ragaert, L. Delva, K. van Geem, *Waste Manage.* **2017**, *69*, 24–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [37] A. Lechleitner, D. Schwabl, T. Schubert, M. Bauer, M. Lehner, *Oesterr. Wasser- Abfallwirtsch.* **2020**, *72* (1–2), 47–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w>
- [38] Z. Zhang, W. Zhang, Y. Zhang, D. Ji, H. Jin, G. Wang, Z. Zhang, *Appl. Petrochem. Res.* **2017**, *7* (2–4), 67–77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13203-017-0187-0>
- [39] R. A. Meyers, *Handbook of Petroleum Refining Processes*, McGraw-Hill, New York **2004**.
- [40] C. Higman, M. van der Burgt, *Gasification*, 2nd ed., Elsevier Science, Burlington **2011**.
- [41] M. Gräbner, *Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal*, Wiley-VCH, Weinheim **2015**.
- [42] *Die Veredlung und Umwandlung von Kohle – Technologien und Projekte 1970 bis 2000 in Deutschland* (Eds: J. Schmalfeld), DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg **2008**.
- [43] L. Waldheim, *Gasification of Waste for Energy Carriers: A Review*, IEA Bioenergy, Dublin **2018**.
- [44] *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future* (Eds: M. Bertau et al.), Springer, Heidelberg **2014**.
- [45] *Multiphase Reactor Engineering for Clean and Low-Carbon Energy Applications* (Eds: Y. Cheng, Y. Jin), Wiley, Hoboken **2017**.
- [46] *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland (Stand: Februar 2020)*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin **2020**.
- [47] C. Higman, *GSTC Syngas Database: 2017 Update, Gasification & Syngas Technologies Conference*, Colorado Springs, Oktober **2017**.
- [48] B. Meyer, *Gute Nachrichten für die Umwelt aus Freiberg: Kunststoffmüll wird Rohstoff*, Pressemitteilung TU Bergakademie Freiberg **2018**. (<https://tu-freiberg.de/presse/gute-nachrichten-fuer-die-umwelt-aus-freiberg-kunststoffmuell-wird-rohstoff>)

DOI: 10.1002/cite.202000102

## Konzepte und Nachhaltigkeitsbewertung der Kohlenstoffkreislaufwirtschaft am Beispiel des chemischen Recyclings zur Olefinproduktion

L. G. Seidl\*, W.-R. Poganietz, F. Keller, R. P. Lee, A. Grunwald, B. Meyer

**Forschungsarbeit:** Die Transformation hin zu einer Kohlenstoffkreislaufwirtschaft mit chemischem Recycling und Synthesegaschemie wird am Beispiel der Olefinproduktion in Deutschland betrachtet. Die Nachhaltigkeitsbewertung zeigt ein Treibhausgasminderungspotential von um bis 33,0 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. mit Zeithorizont 2030 und bis zu 56,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. mit Zeithorizont 2050. ....

