

## Comparison of Chemical Recycling Options with Thermal Waste Treatment

Malte Hennig, Tristan Dreising, Anna Reeves, Hans-Joachim Gehrmann, Frank Richter, Britta Bergfeldt, Grazyna Straczewski, Salar Tavakkol and Dieter Staaf

Germany aims to achieve climate neutrality by 2045. However, despite efforts like the Energiewende, Germany currently is not on track to meet this target. Hence, additional measures are needed beyond the transition to green electricity. In 2020, waste treatment through energy recovery caused 9 Mt of CO<sub>2</sub> emissions, primarily through the incineration of fossil-based materials like plastics. Reducing emissions from waste incineration requires either a decrease in waste volume treated via energy recovery or improvements in emission reduction technologies. The circular economy approach seeks to minimize waste by recovering valuable resources through recycling. While mechanical recycling is generally limited to clean and sorted plastic streams, chemical recycling technologies such as pyrolysis or gasification offer potential for managing more complex waste streams. In contrast, carbon capture and storage (CCS) directly targets CO<sub>2</sub> emissions, e.g. from waste incineration. However, it remains unclear which concept is more effective for handling challenging waste streams. In this study, we develop mass and energy balances for several treatment pathways of mixed commercial plastic waste: direct gasification, plastic pyrolysis followed by entrained flow gasification of the resulting pyrolysis oil, energy recovery with CCS, and combinations of the chemical recycling pathways with CCS. We compare these treatment options with the current practice of energy recovery without CCS. Our results illustrate that both chemical recycling and energy recovery with CCS can significantly reduce primary CO<sub>2</sub> emissions. Direct gasification combined with CCS achieves the highest reduction of 98 % in primary CO<sub>2</sub> emissions. Energy recovery with CCS results in a reduction of 87 % but requires the largest amount of CO<sub>2</sub> to be stored. Furthermore, the heat required for CCS depletes almost all excess heat that would be available for district heating otherwise. The combination of gasification and CCS provides further advantages as the conversion of carbon into syngas product reduces the volume of CO<sub>2</sub> requiring long-term storage. Moreover, syngas cleaning already requires the separation of CO<sub>2</sub>, enabling CCS integration with minimal additional energy demands. In the next phase, these mass and energy balances will serve as the inventory for a life cycle assessment (LCA) to capture secondary effects beyond primary CO<sub>2</sub> emissions. This will allow for a more comprehensive evaluation of the environmental effects of each process route.

# Vergleich von chemischen Recyclingoptionen mit der thermischen Abfallverwertung

Malte Hennig, Tristan Dreising, Anna Reeves, Hans-Joachim Gehrmann,  
Frank Richter, Britta Bergfeldt, Grazyna Straczewski, Salar Tavakkol und Dieter Staff

1. Prozesskettenbeschreibung
  - 1.1. Energetische Verwertung
  - 1.2. Direktvergasung mittels Wirbelschichttechnologie
  - 1.3. Flugstromvergasung mit vorgeschalteter Pyrolyse
2. Bilanzierung der Prozessketten
  - 2.1. Kohlenstoffbilanzen der Prozessvarianten
  - 2.2. Energiebilanzen der Prozessvarianten
3. Diskussion
4. Zusammenfassung und Ausblick
5. Quellen

Deutschland hat sich mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität zu erreichen [1]. Nach dem Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamtes wird dieses Ziel mit den aktuellen und geplanten Maßnahmen verfehlt [4]. Die treibende Kraft der Reduktion der Treibhausgasemissionen stellt in den letzten Jahren die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien dar. Dieses Potenzial ist voraussichtlich durch das Erreichen eines Anteils an erneuerbaren Energien im Strommix von in etwa 80 % bis einschließlich 2030 weitgehend ausgeschöpft, sodass die weitere Reduktion durch zusätzliche Maßnahmen erfolgen muss [4]. Die energetische Verwertung von Abfällen fossilen Ursprungs führte im Jahr 2020 zu CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 9 Mio. t. [5], wovon ein wesentlicher Anteil auf die Behandlung von Kunststoffabfällen zurückzuführen war [2]. Zur Senkung dieser direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen daher entweder die zu verwertenden Abfallmengen reduziert oder die prozesseitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermindert werden.

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, Abfallmengen zu reduzieren, indem lineare Produktlebenszyklen durch die Rückgewinnung von Ressourcen in zirkuläre, geschlossene Rohstoffkreisläufe transformiert werden [3]. Im Kontext von Kunststoffabfall können die hierfür benötigten Recyclingverfahren in mechanisches und chemisches

Recycling unterteilt werden. Für stark verunreinigte, komplex zusammengesetzte Abfälle, die sich technisch oder wirtschaftlich nicht in verwertbare Einzelfraktionen sortieren lassen, ist das mechanische Recycling nicht geeignet. Die Pyrolyse und die Vergasung, die den Verfahren des chemischen Recyclings zugerechnet werden, können mit diesen Abfallströmen potenziell besser umgehen. Hierbei wird der Abfallstrom in chemische Grundbausteine zerlegt, die anschließend in weiteren Prozessen als Rohstoff zur Erzeugung neuwertiger Produkte verwendet werden können.

Um die prozessseitigen CO<sub>2</sub>-Emissionen der energetischen Verwertung zu reduzieren, wird der Einsatz der Carbon Capture and Storage (CCS) Technologie diskutiert [1, 6]. Hierbei wird mit Bezug auf die energetische Verwertung von Kunststoffabfällen das im Prozess entstandene CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas abgetrennt und dauerhaft sequestriert, also beispielsweise in erschöpften Gasfeldern eingelagert.

Des Weiteren ist auch eine Kombination der CCS-Technologie mit dem chemischen Recycling möglich. Hierbei wird das im Recyclingprozess entstehende CO<sub>2</sub> abgetrennt und sequestriert. Welcher der Ansätze durch die unterschiedlichen erzeugten Produkte sowie Energiebedarfe ein Optimum für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellt, muss im Detail untersucht werden. Dazu werden im Rahmen dieser Studie Massen- und Energiebilanzen für das chemische Recycling mittels direkter Vergasung, einer Kombination von Pyrolyse und Flugstromvergasung, energetischer Verwertung mit CCS sowie der Kombination der untersuchten Verfahren des chemischen Recyclings mit CCS erarbeitet.

## 1. Prozesskettenbeschreibung

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Gewerbeabfall ist eine komplexe Mischung bestehend aus verschiedenen Kunststoffarten, Biomasse sowie inerten Bestandteilen. Er steht damit exemplarisch für die gemischten Kunststoffabfälle, die sich nicht mechanisch recyceln lassen und heute hauptsächlich energetisch verwertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Technologien (Direktvergasung in der Wirbelschicht, Pyrolyse mit anschließender Flugstromvergasung, energetische Verwertung) betrachtet, die jeweils in zwei Varianten mit und ohne CCS unterteilt werden, sodass in Summe sechs Varianten untersucht werden.

### 1.1. Energetische Verwertung

Die erste, in Bild 1 illustrierte Variante der Prozessführung stellt die energetische Verwertung (engl.: energy recovery, im Weiteren abgekürzt (ER)) dar. Diese bildet den Stand der Technik für die Verwertung von Gewerbeabfall und vielen weiteren komplexen Abfallströmen ab und dient daher als Referenzfall für alle folgenden Varianten. Der Gewerbeabfall wird in einer Müllverbrennungsanlage mit Rostfeuerung verbrannt, in der die Verbrennungswärme zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Fernwärme genutzt wird. Das Rauchgas der Abfallverbrennung wird einer Rauchgasreinigung nach dem Stand der Technik unterzogen. Im Referenzfall (ER) erfolgt im Anschluss die

Emission des gereinigten Rauchgases. Für die Prozessvariante energetische Verwertung mit CCS (ER + CCS) erfolgt im Anschluss an die Rauchgasreinigung die Sequestrierung des im Rauchgas enthaltenen CO<sub>2</sub> mittels Aminwäsche mit dem Waschmittel Monoethanolamin (MEA).

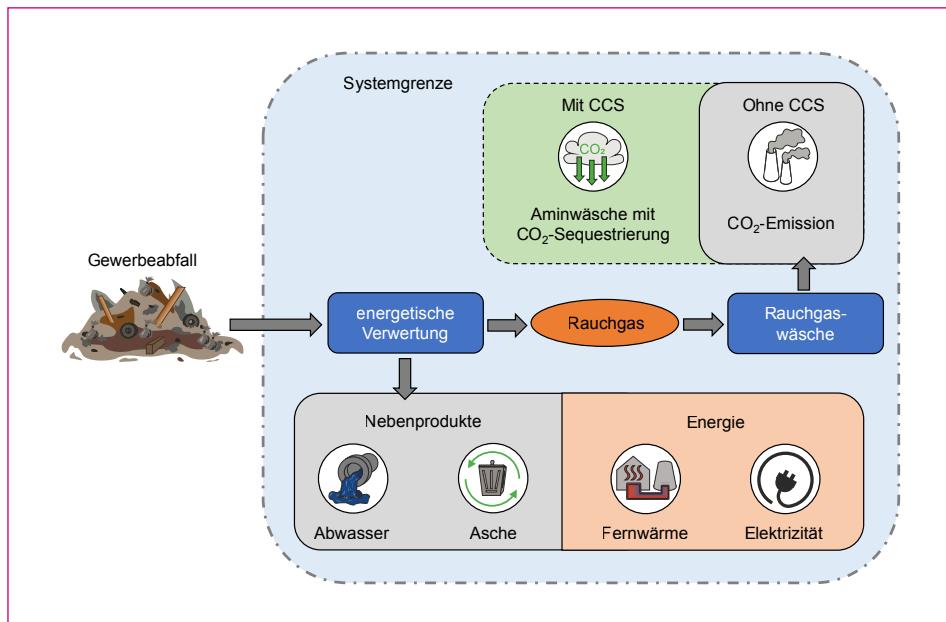


Bild 1: Übersichtsfließbild der Gewerbeabfallverbrennung zur energetischen Verwertung ohne (ER) und mit Sequestrierung von CO<sub>2</sub> (ER + CCS) aus dem Rauchgasstrom

## 1.2. Direktvergasung mittels Wirbelschichttechnologie

Die zweite Technologie zur Verwertung des Gewerbeabfalls ist die direkte Wirbelschichtvergasung (engl.: fluidized bed gasification (FBG)), die dem chemischen Recycling zuzuordnen ist (Bild 2). Bei der Wirbelschichtvergasung handelt es sich um einen thermochemischen Prozess, bei dem der Gewerbeabfall bei 850 °C mit Dampf und Sauerstoff zu einem Rohsynthesegas – ein Gas mit den Hauptkomponenten Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) – konvertiert wird. Zur Behandlung von teerartigen Verunreinigungen wird eine Hochtemperatur-Sekundärvergasung nachgeschaltet, die diese Komponenten bei 1.350 °C umsetzt. Als Produkt wird Synthesegas gewonnen, welches aus dem Rohsynthesegas über das Wasser-Gas-Gleichgewicht (WGS) auf ein Verhältnis von H<sub>2</sub> zu CO von 2:1 eingestellt wird. Im Anschluss wird das im Synthesegas enthaltene CO<sub>2</sub> sowie Schwefelverbindungen aus dem Gas mittels Rectisolwäsche selektiv entfernt. Das abgetrennte CO<sub>2</sub> wird in den beiden Varianten des Verfahrens wahlweise emittiert (FBG) oder sequestriert (FBG + CCS). Das schlussendlich gewonnene Reinsynthesegas kann für die Methanol-Synthese genutzt werden, welches als Plattformchemikalie für die Synthese einer Vielzahl an verschiedenen Produkten dient.

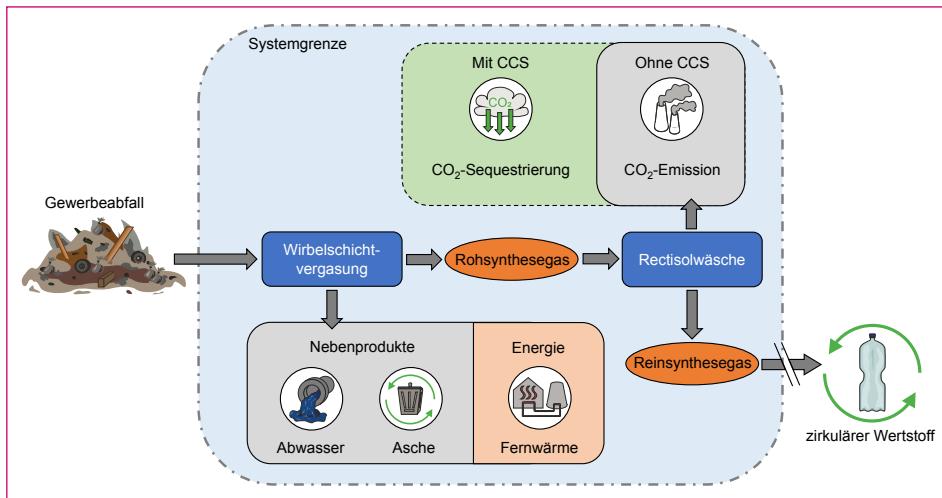


Bild 2: Übersichtsfließbild der Direktvergasungsroute von Gewerbeabfall (FBG) mit der Möglichkeit zur zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Sequestrierung (FBG + CCS)

### 1.3. Flugstromvergasung mit vorgeschalteter Pyrolyse

Die dritte Prozesskette besteht aus der Kombination von Pyrolyse und Flugstromvergasung (engl.: pyrolysis and entrained flow gasification (Pyr EFG)) (Bild 3). Bei der Pyrolyse werden die Kohlenwasserstoffe im Gewerbeabfall (hauptsächlich Kunststoffe sowie Biomasse) unter inerter Atmosphäre durch thermische Spaltung zu Produkten mit kürzeren Kettenlängen umgesetzt, sodass ein gasförmiges, ein flüssiges und ein festes Produkt entsteht. Das Pyrolysegas sowie der feste Pyrolyserückstand werden energetisch verwertet: Das Pyrolysegas wird zur Beheizung des Pyrolysereaktors genutzt, während der Pyrolyserückstand äquivalent zur Referenzprozesskette verwertet wird. Das Pyrolyseöl dient als Feedstock für die Flugstromvergasung. Bei dieser handelt es sich um einen, in der Industrie etablierten, Prozess zur Synthesegaserzeugung, der

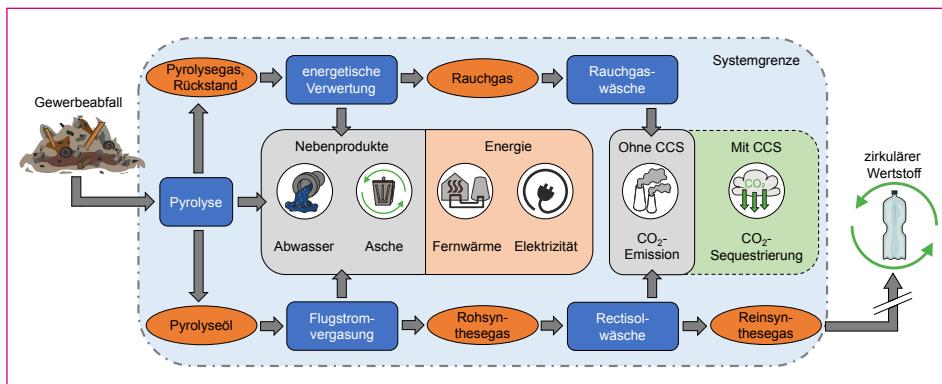


Bild 3: Übersichtsfließbild der Kopplung von Pyrolyse und Flugstromvergasung von Gewerbeabfall (Pyr EFG) mit der Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung (Pyr EFG + CCS)

allerdings nur mit flüssigen Brennstoffen wie Pyrolyseöl beschickt werden kann. Das bei der Vergasung bei 1.350 °C entstehende Rohsynthesegas wird analog zur Direktvergasung auf ein H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis von 2:1 eingestellt, in einer Rectisolwäsche aufgereinigt und als Methanol-Synthesegas bereitgestellt. In der Variante ohne CCS (Pyr EFG) wird das gesamte CO<sub>2</sub> aus der energetischen Verwertung der Pyrolysenebenprodukte sowie der Rectisolwäsche emittiert. Im Vergleich dazu wird das CO<sub>2</sub> in der Variante mit CCS (Pyr EFG + CCS) zusätzlich aus den Rauchgasen der energetischen Verwertung der Pyrolysenebenprodukte mittels Aminwäsche abgeschieden und gemeinsam mit dem CO<sub>2</sub> aus der Rectisolwäsche sequestriert.

## 2. Bilanzierung der Prozessketten

Zur Bilanzierung der Prozessketten werden experimentell erhobene Daten aus Pyrolyseversuchen und Daten aus der Prozesssimulation von energetischer Verwertung, Direktvergasung und Flugstromvergasung verwendet. Der verwendete reale Gewerbeabfall ist in Bild 4 mit seiner umfassenden Charakterisierung dargestellt. Für die Pyrolyseversuche im Technikumsmaßstab [9] wurde die Probe zusätzlich aufbereitet (getrocknet, zerkleinert und pelletiert).

unbehandelter Gewerbeabfall

pelletierter Gewerbeabfall

C	H	N	S	Cl	O	Asche	Brennwert
Ma.-%	MJ/kg						
54,3	7,4	1,2	0,5	1,2	16,3	19,1	24,2

Bild 4:

Unbehandelter und für die Pyrolyseversuche pelletierter Gewerbeabfall sowie Elementarzusammensetzung und Brennwert bezogen auf die Trockenmasse

Für die energetische Verwertung wurde mit diesen Werten eine Rostfeuerung mit anschließender Rauchgaswäsche berechnet. Die zugrunde liegenden elektrischen und thermischen Netto-Wirkungsgrade von 14,3 % und 39,1 % wurden als Durchschnitt moderner Müllverbrennungsanlagen angenommen [7]. In der Variante mit CCS wurde eine Aminwäsche zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung mittels Prozesssimulation integriert. Die Wirbelschichtvergasung der zweiten Prozesskette wurde ebenfalls durch eine Prozesssimulation abgebildet. Die Bilanzierung der dritten Verfahrensvariante erfolgte in drei Schritten: Die Pyrolyse des Gewerbeabfalls wurde auf Basis der experimentell ermittelten Pyrolyseproduktverteilung sowie -zusammensetzung bilanziert (32 % Pyrolysegas, 27 % Pyrolyseöl, 11 % wässriges Kondensat, 30 % Pyrolyserückstand). Die Flugstromvergasung des Pyrolyseöls einschließlich der Konditionierung des Rohsynthesegases wurde mittels Prozesssimulation abgebildet. Die energetische Verwertung der Pyrolysenebenprodukte wurde analog zur energetischen Verwertung des Gewerbeabfalls bilanziert.

## 2.1. Kohlenstoffbilanzen der Prozessvarianten

Die Kohlenstoffbilanz der Prozessvariante Flugstromvergasung mit vorgeschalteter Pyrolyse (Pyr EFG + CCS) ist exemplarisch in Bild 5 dargestellt. Insgesamt kann in dieser Prozesskonfiguration 27 % des Kohlenstoffs aus dem Gewerbeabfall in das Zielprodukt Synthesegas überführt werden. Der Großteil des CO<sub>2</sub> (73 %) wird wahlweise emittiert (Pyr EFG) oder mit einem Anteil von 65 % sequestriert (Pyr EFG + CCS). Die Differenz zwischen den Prozessvarianten mit und ohne CCS ergibt sich durch die unvollständige Abscheidung von CO<sub>2</sub> in den Gaswäschen zur Synthesegasreinigung und zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus den Rauchgasen.

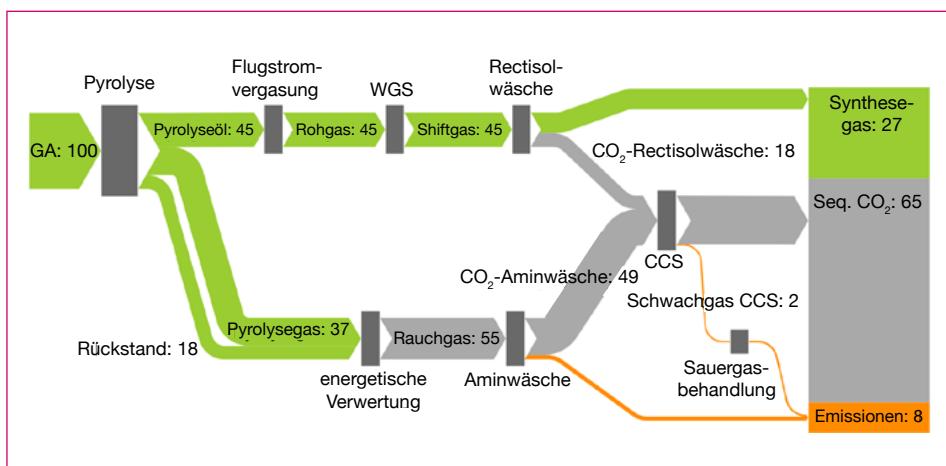


Bild 5: Kohlenstoffbilanz der Prozesskette mit Pyrolyse, Flugstromvergasung und CCS (Pyr EFG + CCS), Zahlenwerte beziehen sich auf den Kohlenstoffanteil relativ zum Kohlenstoffgehalt des Gewerbeabfalls

Die Kohlenstoffbilanzen mit den resultierenden Werten für den stofflich genutzten, sequestrierten und emittierten Kohlenstoff wurden für alle Prozessketten bestimmt und sind in Bild 6 dargestellt. Bedingt durch die Verfahrensdefinition weisen die Varianten ohne CCS keinen sequestrierten Anteil auf. Der höchste Anteil an stofflich genutztem Kohlenstoff wird in den Prozessvarianten mit Wirbelschichtvergasung erzielt (45 %), unabhängig davon ob CCS-Technologie zum Einsatz kommt. Wird CCS in Kombination mit der Wirbelschichtvergasung eingesetzt, wird der Anteil des emittierten CO<sub>2</sub> bis auf 2 % reduziert. Im Vergleich erzielen die Verfahren mit Flugstromvergasung geringere Anteile an stofflich genutztem Kohlenstoff, da nur das Pyrolyseöl anstatt des gesamten Abfallstromes vergast wird und somit geringere Mengen an Synthesegas erzeugt werden. Der höchste Anteil an sequestriertem Kohlenstoff wird im Fall der energetischen Verwertung mit CCS erzielt (87 %), während der Referenzfall der energetischen Verwertung ohne CCS zu einer vollständigen Emission des Kohlenstoffs in Form von CO<sub>2</sub> führt.

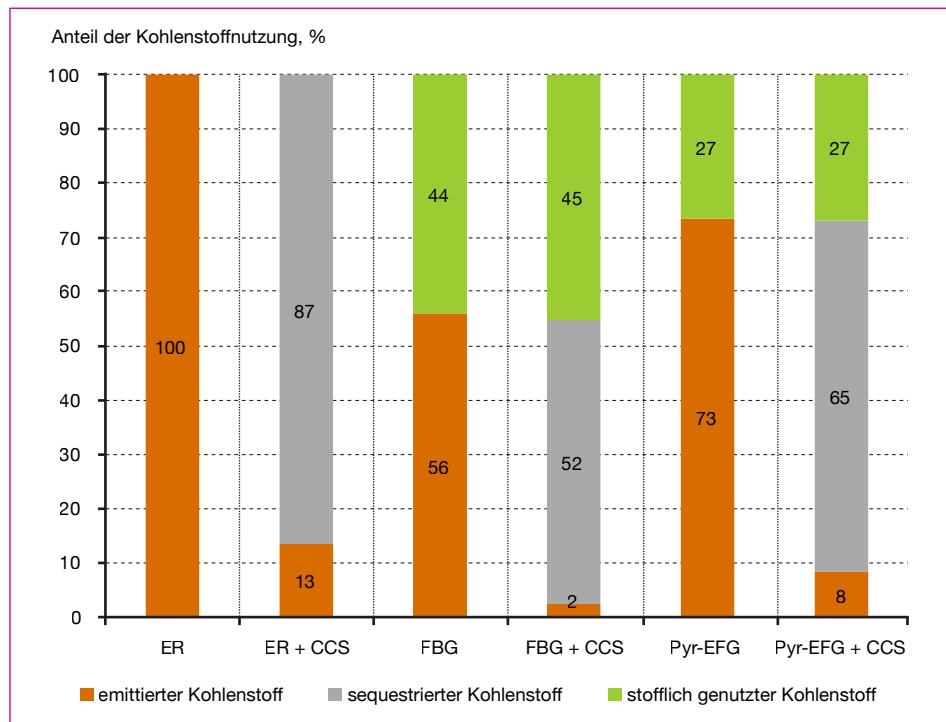


Bild 6: Kohlenstoffbilanzen der Prozessketten: Energetische Verwertung ohne Sequestrierung (ER), mit Sequestrierung (ER + CCS), Wirbelschichtvergasung ohne Sequestrierung (FBG), mit Sequestrierung (FBG + CCS), Pyrolyse mit Flugstromvergasung ohne Sequestrierung (Pyr EFG) und mit Sequestrierung (Pyr EFG + CCS)

## 2.2. Energiebilanzen der Prozessvarianten

Neben den Kohlenstoffbilanzen ist für den Vergleich der Prozessketten untereinander ebenfalls die Energiebilanz von Bedeutung. Hierfür wurde der Strom- und Wärmebedarf aller Prozessschritte auf Grundlage einer vereinfachten thermischen Integration berechnet (Bild 7). Für überschüssige Prozesswärme wird eine Fernwärmearauskopplung angenommen. Die Betrachtung von Prozesswärme zur Stromerzeugung erfolgt derzeit nicht. Die im Synthesegas gebundene chemische Energie wird auf Grundlage des Heizwerts des Synthesegases berechnet.

Es ist zu erkennen, dass im Referenzfall (ER) ein großer Überschuss an elektrischer und thermischer Energie besteht, wohingegen im Verfahren mit CCS (ER + CCS) der Wärmebedarf für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung soweit ansteigt, dass nahezu keine Überschusswärme zur Fernwärmeverteilung mehr zur Verfügung steht. Bei der Wirbelschichtvergasung steht auch in der Variante mit CCS (FBG CCS) ein Wärmeüberschuss von etwa 20 %, der durch den Gewerbeabfall eingetragenen Energiemenge, zur Fernwärmearauskopplung zur Verfügung, während ein Anteil von 70 % der Energie in das Synthesegas transferiert werden kann. Durch die Luftzerlegung zur Bereitstellung des Sauerstoffs für die

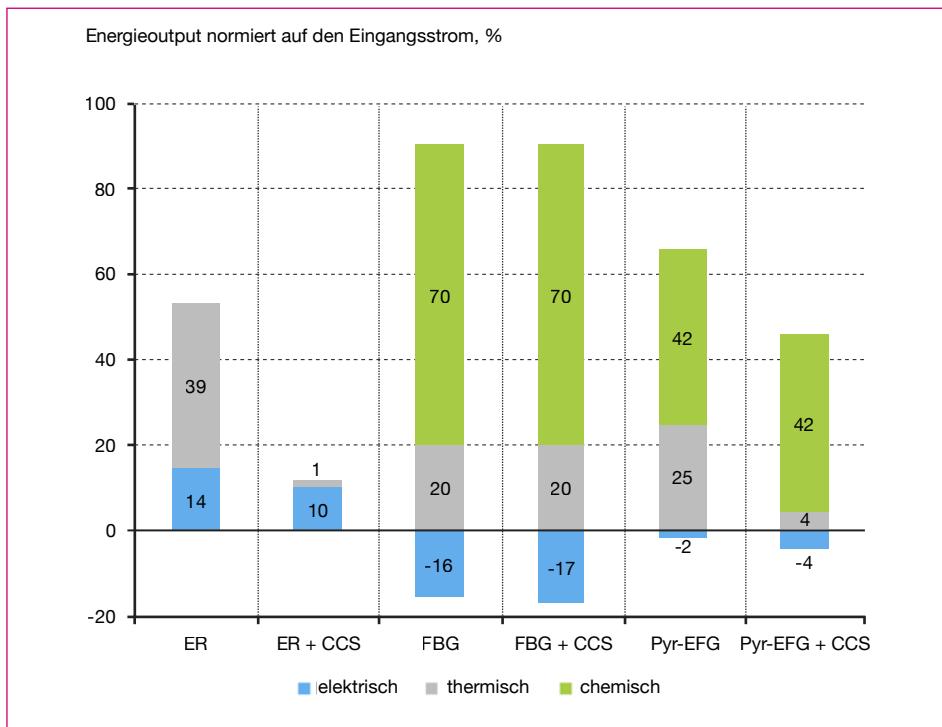


Bild 7: Aufteilung der Energiebedarfe und -überschüsse für die einzelnen Prozessketten: Energetische Verwertung ohne Sequestrierung (ER), mit Sequestrierung (ER + CCS), Wirbelschichtvergasung ohne Sequestrierung (FBG), mit Sequestrierung (FBG + CCS), Pyrolyse mit Flugstromvergasung ohne Sequestrierung (Pyr EFG) und mit Sequestrierung (Pyr EFG + CCS), Bezugsgröße ist der Energiegehalt (heizwertbezogen) des behandelten Gewerbeabfalls

Vergasung sowie die Rectisolwäsche zur Synthesegasreinigung besteht ein Strombedarf von 16 % des Energiegehalts des Gewerbeabfalls, der durch eine Anpassung des Verfahrens im Falle der Variante mit CCS auf 17 % ansteigt. Im Vergleich dazu erreicht die Synthesegasausbeute in der Verfahrensvariante mit Flugstromvergasung 42 %. In der Variante ohne CCS besteht ein Wärmeüberschuss, während dieser in der Variante mit CCS größtenteils zur Deckung des Wärmebedarfs der zusätzlichen Aminwäsche benötigt wird. Der Strombedarf fällt in beiden Varianten durch die energetische Verwertung der Pyrolysenabprodukte sowie die geringere Synthesegaserzeugung der Flugstromvergasung deutlich geringer als bei der Wirbelschichtvergasung aus.

### 3. Diskussion

Die energetische Verwertung als Stand der Technik führt zur Emission der gesamten eingesetzten Kohlenstoffmenge. Allerdings wird mit diesem Verfahren auch die größte Menge an Elektrizität gewonnen und eine substanzielle Menge Fernwärme erzeugt. Eine Erweiterung der energetischen Verwertung durch eine Kohlenstoffdioxid-Sequestrierung

geht aufgrund der energieintensiven Aminwäsche mit einem Verlust der Fernwärmeerzeugung einher. Soll weiterhin Fernwärme bereitgestellt werden, kann dies nur auf Kosten der elektrischen Leistung geschehen.

Bei der Wirbelschichtvergasung ist auffällig, dass die Varianten mit und ohne CO<sub>2</sub>-Sequestrierung sehr ähnliche thermische Überschüsse generieren. Der Hauptunterschied besteht im leicht erhöhten Strombedarf der Variante mit CCS, der auf eine geänderte Verfahrensführung in der Rectisolwäsche sowie die zur Sequestrierung zusätzlich notwendige CO<sub>2</sub>-Kompression zurückzuführen ist. Da das im Rohsynthesegas enthaltene CO<sub>2</sub> ohnehin abgeschieden werden muss, handelt es sich bei dieser Abtrennung im Unterschied zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Rauchgas nicht um einen zusätzlichen Verfahrensschritt, sondern um eine Optimierung der Betriebsweise. Die Nutzung von CCS in der Wirbelschicht-Verfahrenskette ist daher ohne nennenswerten Zusatzaufwand möglich und verhältnismäßig einfach zu realisieren.

Die dritte Prozesskette aus Pyrolyse und Flugstromvergasung stellt eine Kombination der Prozessvarianten energetische Verwertung und chemisches Recycling dar: Die Pyrolyse fungiert hierbei als Vorbehandlungsschritt und erzeugt aus dem Gewerbeabfall ein hochkalorisches Pyrolyseöl zur stofflichen Nutzung sowie Pyrolysenbenzoproducte zur energetischen Nutzung. Der Einsatz von Pyrolyseöl im Flugstromvergaser ermöglicht aufgrund des höheren Heizwertes im Vergleich zum Gewerbeabfall eine höhere Konversionseffizienz. Bedingt durch den Verlust an Kohlenstoff in der Pyrolyse ergibt sich in der Flugstromvergasung eine geringere Synthesegasmenge als in der Wirbelschichtvergasung. Durch die insgesamt geringeren Energiebedarfe sowie die teilenenergetische Nutzung des Gewerbeabfalls fällt der zusätzliche Strombedarf im Vergleich allerdings deutlich niedriger aus.

Das chemische Recycling von Gewerbeabfall würde für die untersuchten Prozessketten dazu führen, dass sich der Abfallbehandlungsprozess im Vergleich zu heute von einem Stromerzeuger hin zu einem -abnehmer entwickeln würde. Eine abschließende Bewertung der Auswirkungen der untersuchten Abfallbehandlungsprozesse ist alleine auf Grundlage der Produktausbeuten und Energiebedarfe jedoch nicht möglich, da die Produkte Strom, Fernwärme und Synthesegas hinsichtlich ihrer Wertigkeit nicht unmittelbar miteinander verglichen werden können. Diese Bewertung ist aus thermodynamischer Sicht nur mittels einer Exergie-Analyse sowie aus Umweltsicht nur anhand eines Life Cycle Assessments möglich. Letzteres fasst sowohl die Produktausbeuten als auch die Energieeffizienz in Impact-Kategorien zusammen und wurde bereits für andere Verwertungstechnologien und Abfallströme angewendet [8].

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl das chemische Recycling als auch der Einsatz von CCS in der energetischen Verwertung konnten als wirksame Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Primäremissionen bei der Verwertung von Gewerbeabfall identifiziert werden. Der Einsatz von CCS in der energetischen Verwertung ermöglicht eine Reduktion der Primäremissionen um 87 %. Im Vergleich dazu führt das chemische Recycling mittels Direktvergasung zu einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Primäremissionen auf bis zu 44 % des Referenzfalls. Die zusätzliche Erweiterung der Direktvergasung um CCS ermöglicht eine maximale Reduktion der

Primäremissionen auf 2 %. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass kein wesentlicher Mehraufwand zur Sequestrierung entsteht, da das CO<sub>2</sub> zur Reinigung des Rohsynthesegases ohnehin abgetrennt werden muss. Gleichzeitig sinkt die Menge an einzuspeicherndem CO<sub>2</sub> durch die stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs im Synthesegas.

Die untersuchten Maßnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Primäremissionen führen jedoch dazu, dass die Abfallverwertung des untersuchten Gewerbeabfalls unabhängig von der gewählten Maßnahme weniger Nutzenergie in Form von Strom und Wärme zur Verfügung stellen kann oder sogar ein zusätzlicher Bedarf entsteht: Wird CCS in Kombination mit der energetischen Verwertung angewendet, kann nahezu keine Fernwärme mehr ausgekoppelt werden, während das chemische Recycling in den untersuchten Prozessvarianten zu einem zusätzlichen Strombedarf führt. Die Prozessvariante der Flugstromvergasung mit vorgeschalteter Pyrolyse kann durch eine teilenergetische Nutzung des Gewerbeabfalls diesen zusätzlichen Strombedarf auf Kosten einer niedrigeren Synthesegasausbeute im Vergleich zur Direktvergasung verringern. Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Primäremissionen verändert allerdings in jedem Fall die Art und die Ausbeute der Produkte, die künftig durch die Abfallbehandlung zur Verfügung gestellt werden können.

Für eine ganzheitliche Bewertung der Prozessketten ist im nächsten Schritt ein Life Cycle Assessment erforderlich, um auch die Effekte, die über die Primäremissionen hinausgehen, zu erfassen. Dies betrifft insbesondere die Umweltwirkungen, die durch das Erbringen zusätzlicher Leistungen wie der Produktion von Synthesegas oder der Bereitstellung von Strom im Vergleich zu deren konventioneller Erzeugung eingespart werden oder durch deren Bedarf anfallen. Diese Arbeiten werden derzeit durchgeführt und anschließend wissenschaftlich veröffentlicht.

## 5. Quellen

- [1] Bundestag: Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie. Drucksache 20/11585. 2024.
- [2] Conversio: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. 2022.
- [3] Dechema: Circular Economy – Die Perspektive von chemischer Technik und Biotechnologie. 2024.
- [4] Harthan, R. O.; Förster, H. et al.: ProJEktionsbericht 2023 für Deutschland. Climate Change | 39/2023. Herausgeber: Umweltbundesamt. 2023.
- [5] Icha, P.; Lauf, T.: Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2023. Climate Change | 23/2024. Herausgeber: Umweltbundesamt. 2024.
- [6] IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); 2023.
- [7] ITAD – Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehanlungsanlagen in Deutschland e.V. (Hrsg.): ITAD Jahresbericht 2022/23. 2023.
- [8] Stallkamp, C.; Hennig, M. et al.: Economic and environmental assessment of automotive plastic waste end-of-life options: Energy recovery versus chemical recycling. J Ind Ecol. 27(5):1319–34. 2023.
- [9] Zeller, M.; Netsch, N. et al.: Chemical Recycling of Mixed Plastic Wastes by Pyrolysis – Pilot Scale Investigations. Chem Ing Tech. 93(11):1763–70. 2021.

## Ansprechpartner



### Malte Hennig, M.Sc.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Technische Chemie  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
+49 721 608 24351  
malte.hennig@kit.edu

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker,  
Alexander Gosten, Ella Stengler (Hrsg.):

## **Abfallwirtschaft und Energie, Band 2**

ISBN 978-3-911006-86-6 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2025

Redaktion: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm

Erfassung und Layout: Julia Joschko, Carolin Pawel, Janin Burbott-Seidel, Roland Richter,  
Cordula Müller, Lena Stucke

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.