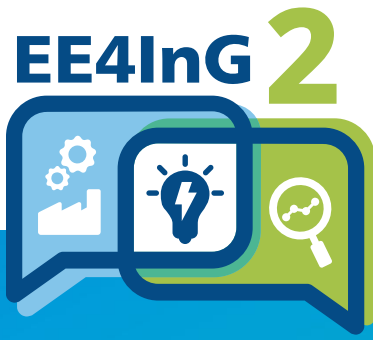




Transformation der Chemischen Verfahrenstechnik

Forschungs- und Handlungsbedarf für eine defossilisierte organische
Grundstoffchemie

EE4InG2

Begleitforschung für
Energieeffizienz in
Industrie und Gewerbe 2.0

ee4ing2.de

Karlsruhe, Aachen, Bensheim
22. Juli 2026

Präambel

Energie- und Ressourceneffizienz leisten wichtige Beiträge zur Minderung der Treibhausgasemissionen und dämpfen die im Trend steigenden Ressourcenkosten der Unternehmen. So tragen sie dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu sichern. Die **Forschungsförderung zur Steigerung der Energieeffizienz** für und mit der deutschen Industrie und dem Gewerbe hat zum Ziel, Innovationen und technologischen Fortschritt voranzubringen und so neue technisch-wirtschaftliche Effizienzpotenziale zu erschließen.

Das BMW-geförderte Verbundvorhaben EE4InG2 wurde konzipiert als **Begleitforschungsprojekt** für das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FN IuG)**. Ein zentrales Projektziel ist die **wissenschaftliche Querauswertung der angewandten Energieeffizienzforschung und -förderung** durch das Energieforschungsprogramm im Hinblick auf Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Ein weiteres Projektziel ist die **Förderung des Austausches zwischen relevanten Akteuren des Innovationssystems** (Industrie, Wissenschaft, Politik), koordiniert durch eine im Projekt eingerichtete Koordinierungsstelle für das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe. Das Projekt knüpft an die inhaltlichen Vorarbeiten des vorausgegangenen Verbundvorhabens „EE4InG: Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe – Vernetzung und Begleitung der FuE-Aktivitäten sowie Beschleunigung der Ergebnisverbreitung“ (FKZ: 03ET1630A-B) an.

Die vorliegende Auswertung fasst die Ergebnisse einer durch die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. ausgearbeiteten Studie zusammen. Die **Auswahl, Verdichtung und Einordnung der Forschungs- und Handlungsbedarfe** erfolgte durch IREES im Rahmen des **Begleitforschungsvorhabens EE4InG2**. Die über die technische Analyse hinausgehenden regulatorischen und förderpolitischen Empfehlungen stellen eine Einordnung der Begleitforschung dar und sind nicht notwendigerweise Positionen der Autorinnen und Autoren der zugrunde liegenden Studie.

Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Boumrifak, Chokri; Helle, Chelsea; Hiessl, Sebastian; Nisters, Arne; Schürle, Karsten; Tran, Dinh Du; Wendler, Katja (2026): Transformation der Chemischen Verfahrenstechnik – Effiziente Herstellungswege mit veränderter Rohstoffbasis. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt am Main. DOI: 10.5281/zenodo.20848947

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03EN2107A-C

Projektpartner und Kontakt

		
IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH Durlacher Allee 77 76131 Karlsruhe	RWTH Aachen University Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) Kopernikusstr. 10 52074 Aachen	ETA-Solutions GmbH Darmstädter Str. 239 64625 Bensheim
Ansprechpartnerin: Dr. Heike Brugger Tel.: +49 721 9152636-0 E-Mail: h.brugger@irees.de	Ansprechpartner: Felix Kaiser Tel.: +49 241 80 26068 E-Mail: kaiser@iob.rwth-aachen.de	Ansprechpartnerin: Juliane Heydemann Tel.: +49 6251 82555 42 E-Mail: heydemann@eta-solutions.de

projektleitungEE4InG2@irees.de

<https://ee4ing2.de/>

Hinweise

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „EE4InG2 – Begleitforschung für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe 2.0“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EN2107A-C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autorinnen und Autoren.

Autorenschaft, Zitationshinweise

Maertens, Robert (2026): Transformation der Chemischen Verfahrenstechnik – Forschungs- und Handlungsbedarf für eine defossilierte organische Grundstoffchemie. Analyse im Rahmen des Begleitforschungsvorhabens EE4InG2. Hg. v. IREES GmbH. Karlsruhe.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	5
2	Übergreifende Handlungsempfehlungen für die Forschungsförderung	7
3	Regulatorische Begleitung und Infrastrukturaufbau	8
4	CO ₂ -Abtrennung	9
5	Power-to-X-Prozesse	11
6	Biomasse-Vergasung	13
7	Thermochemisches Kunststoffrecycling	15

1 Executive Summary

Die chemische Industrie in Deutschland steht vor der Herausforderung, ihre derzeitige **rohstoffliche Kohlenstoffbasis von jährlich rund 15 Mio. Tonnen (überwiegend aus fossilem Naphtha und Erdgas) auf alternative Quellen umzustellen**. Um die Klimaneutralität zu erreichen, müssen etablierte Produktionsprozesse der organischen Grundstoffchemie transformiert und durch neuartige Verfahren ersetzt werden. Als zentrale zukünftige Kohlenstoffquellen zeichnen sich dabei **CO₂ aus Punktquellen** (z. B. Zement- und Kalkindustrie, Biogasanlagen, thermische Abfallbehandlung), **Biomasse** (insbesondere land- und forstwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe) sowie **Kunststoffabfälle** (Post-Industrial und Post-Consumer) ab. Eine rein isolierte Förderung von Einzeltechnologien reicht für diese Transformation nicht aus. Vielmehr bedarf es einer umfassenden Betrachtung, die neben der Energieforschung auch Infrastrukturbedarfe, sektorübergreifende Wechselwirkungen und rechtliche Rahmenbedingungen adressiert.

Zentrale Erkenntnisse und übergreifender Handlungsbedarf:

Um defossilisierte Verfahren zügig in die industrielle Anwendung zu überführen, sollte die Forschungsförderung Verbundeffekte im Gesamtsystem berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere die Etablierung dezentraler Vorbehandlungs- und Sortiertechnologien für heterogene Stoffströme, energieeffiziente Aufreinigungsverfahren für direkt in bestehenden Prozessen einsetzbare Zwischenprodukte sowie eine effiziente Prozess- und Wärmeintegration durch Demonstratoren an bestehenden Chemiestandorten.

Zusätzlich ist die **industrielle Anwendung an rechtliche Rahmenbedingungen** gebunden. Zu den drängendsten infrastrukturellen und politischen Notwendigkeiten gehören wettbewerbsfähige Industriestrompreise für elektrifizierte Anlagen, der Aufbau überregionaler CO₂- und Wasserstoff-Transportnetze sowie die klare Priorisierung der stofflichen Nutzung (statt energetischer Verbrennung) zur Auflösung von Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse und Kunststoffen.

Technologische Schwerpunkte:

Die zugrunde liegende DECHEMA-Studie identifiziert Forschungsbedarfe in vier zentralen Bereichen, die in der vorliegenden Auswertung verdichtet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Forschungsförderung eingeordnet werden.

- **CO₂-Abtrennung:** Hier bedarf es der Reduktion des Energiebedarfs etablierter Verfahren sowie der Entwicklung robuster Hochleistungsadsorbentien, Membranen und Hochtemperaturverfahren (Carbonat-Looping, Oxyfuel).

- **Power-to-X-Prozesse:** Der Fokus liegt auf der Prozessintensivierung der Syntheserouten (Methanol-to-X und Fischer-Tropsch) durch fortschrittliche Katalysatoren, direkte Co-Elektrolyse von CO₂/Wasser und maximale Wärmeintegration.
- **Biomasse-Vergasung:** Diese erfordert eine Skalierung durch resiliente Reaktor-konfigurationen, effizientes in-situ Teercracking und robuste Heißgasreinigungsssequenzen für stark fluktuierende, dezentrale Rohstoffströme.
- **Thermochemisches Kunststoffrecycling:** Es werden tolerante Pyrolyseverfahren zur Maximierung der Gesamtkohlenstoffausbeute sowie selektive Downstream-Aufreinigungen zur Erzeugung Cracker-fähiger Spezifikationen benötigt.

Im Folgenden werden zunächst die **übergreifenden Handlungsempfehlungen für die Forschungsförderung** beschrieben. Daran schließt sich ein Abschnitt zu den **regulatorischen und infrastrukturellen Notwendigkeiten** an, auch wenn diese nicht der primäre Fokus dieser Ausarbeitung sind.

In **vier thematischen Fact Sheets** werden dann die **zentralen Handlungsempfehlungen** für die Themenfelder CO₂-Abtrennung, Power-to-X-Prozesse, Biomasse-Vergasung sowie thermochemisches Kunststoffrecycling ausformuliert.

2 Übergreifende Handlungsempfehlungen für die Forschungsförderung

Um defossilisierte Verfahren zügig vom Labor in die industrielle Anwendung zu überführen, sollte die Forschungsförderung systemische Synergien in den Fokus nehmen:

- **Vorbehandlungs- und Sortiertechnologien:** Bei der Nutzung hochkomplexer Stoffströme (wie gemischten Kunststoffabfällen oder heterogener Biomasse) entstehen oft signifikante Effizienzverluste im Reaktor, wenn die Eingangsstoffe stark schwanken. Die Förderung sollte verstärkt auf effiziente, auch dezentral einsetzbare Sortier- und Vorbehandlungsverfahren (z. B. sensorgestützte Sortierung, Torrefizierung) ausgerichtet werden, um homogene und verfahrenstechnisch gut handhabbare Eduktströme bereitzustellen.
- **Energieeffiziente CO₂-Abtrennung:** Die Erschließung von CO₂ als alternative Kohlenstoffquelle erfordert dessen Abscheidung aus unvermeidbaren industriellen Punktquellen. Da etablierte Trennverfahren sehr energieintensiv sind, empfiehlt sich eine gezielte Förderung innovativer Technologien (wie fortschrittliche gas-selektive Membranverfahren oder Carbonat-Looping), um die Gesamtenergiebilanz der CO₂-Bereitstellung maßgeblich zu optimieren.
- **Produktaufbereitung und Gasreinigung:** Die neuartigen Verfahrenswege erzeugen Zwischenprodukte – wie roh-Synthesegase aus der Biomassevergasung oder flüssige Pyrolyseöle aus dem Kunststoffrecycling –, die vor ihrer chemischen Weiterverarbeitung aufwendig von Störstoffen (z. B. Teere, Halogene, Heteroatome) befreit werden müssen. Hier sind Fördermittel für selektive Aufreinigungsprozesse wichtig, um verlässlich die strengen Qualitätsanforderungen für die bestehenden Verbundstrukturen der Chemieindustrie zu erreichen.
- **Systemische Prozessintegration:** Die Etablierung neuer Power-to-X- oder Biomass-to-X-Prozessketten erfordert zwar den Bau neuartiger Anlagenteile, entfaltet ihr volles Potenzial aber erst durch eine Verbundwirtschaft (in bestehenden Chemie-parks). Förderprogramme sollten großtechnische Demonstratoren explizit dort unterstützen, wo signifikante Synergien gehoben werden können. Dies umfasst die Nutzung vorhandener Infrastrukturen sowie eine gezielte Wärmeintegration. So kann beispielsweise die exotherme Abwärme aus der Fischer-Tropsch-Synthese sowie nutzbare Wärme aus heißen Produkt- und Abgasströmen der Vergasung direkt genutzt werden, um den Wärmebedarf vorgelagerter Prozesse (wie der Hochtemperatur-Elektrolyse oder der reverse Water-Gas-Shift-Reaktion) effizient zu decken.

3 Regulatorische Begleitung und Infrastrukturaufbau

Der Erfolg der Transformation der Chemischen Verfahrenstechnik ist auch an den zeitgerechten Ausbau externer Infrastrukturen und an verlässliche rechtliche Rahmenbedingungen gebunden:

- **Wettbewerbsfähige Strompreise und Grünstromverfügbarkeit:** Die Elektrifizierung der chemischen Industrie (z. B. durch Hochtemperatur-Elektrolyse und PtX-Verfahren) führt zu einem stark steigenden Bedarf an elektrischer Energie. Um diese stromintensiven, defossilisierten Verfahren gegenüber fossilen Routen wirtschaftlich betreiben zu können, sind international wettbewerbsfähige Industriestrompreise erforderlich. Die Politik sollte Rahmenbedingungen schaffen, die der Industrie langfristig planbare Konditionen garantieren und parallel den weiterhin starken Ausbau der Erneuerbaren Energien absichern.
- **Synchroner Ausbau der CO₂- und Wasserstoff-Infrastruktur:** PtX-Verfahren erfordern große Mengen an grünem Wasserstoff und reinem CO₂. Da die unvermeidbaren CO₂-Quellen (z. B. Zementwerke und Müllverbrennungsanlagen) oftmals räumlich von den Chemiestandorten getrennt sind, ist die politische Beschleunigung und Genehmigung von überregionalen Transportnetzwerken (wie dem Wasserstoff-Kernnetz und CO₂-Pipelines) eine Grundvoraussetzung, um Investitionsentscheidungen für großtechnische Anlagen überhaupt zu ermöglichen.
- **Priorisierung der stofflichen Nutzung:** Sowohl für biogene Reststoffe als auch für Kunststoffabfälle bestehen erhebliche Nutzungskonkurrenzen. Derzeitige regulatorische Rahmenbedingungen setzen häufig starke Anreize für die energetische Verwertung (Verbrennung oder Biokraftstoffe). Es bedarf verlässlicher politischer Rahmenbedingungen, um diese begrenzten Kohlenstoffträger prioritär in die hochwertigere, kreislauffähige stoffliche Verwertung der organischen Grundstoffchemie zu lenken.

4 CO₂-Abtrennung

Für die Nutzung von **CO₂ als alternativer Kohlenstoffrohstoff** in Power-to-X-Prozessen steht die effiziente Abtrennung aus konzentrierten, industriellen Punktquellen im Vordergrund. Während einige Abtrennungstechnologien prinzipiell weit fortgeschritten sind (TRL 9), wird ein flächendeckender industrieller Einsatz derzeit vor allem durch **den enormen verfahrenstechnischen Energiebedarf** für die CO₂-Abscheidung und die Lösungsmittelregeneration verhindert. Im Fokus der Energieforschung steht daher die **Reduktion dieser Energiebedarfe**. Die technologische Herausforderung besteht darin, neue **Abscheideverfahren, Membranen und Sorbentien robuster gegenüber realen, verunreinigten Abgasen** zu machen sowie **fortschrittliche Konzepte der Prozess- und Wärmeintegration** zu entwickeln. Die Forschungsförderung für die CO₂-Abtrennung sollte sich auf die Optimierung und Skalierung der zentralen Technologiepfade konzentrieren.

Absorptionsverfahren (Chemisch und Physikalisch)	Die etablierte chemische Absorption (z. B. mit Aminen) leidet unter einem sehr hohen Wärmebedarf bei der Lösungsmittelregeneration und einer allmählichen Degradation durch Restsauerstoff, Schwefel- und Stickoxide. Der Forschungsbedarf liegt in der Entwicklung neuartiger, toleranter Lösungsmittel sowie in der Prozessintensivierung durch Ultraschall oder neuartige Apparatedesigns (z. B. Rotationspackungen). Bei der physikalischen Absorption, die hohe Drücke erfordert, sollten effiziente Konzepte zur Kälteintegration und neuartige Phasenwechsel-Lösungsmittel erforscht werden, um den großen Energiebedarf für Umlaufraten und Kompression zu senken.
Adsorptionsverfahren	Die Druckwechseladsorption (PSA) ist für bestimmte Anwendungen wie Biogas ausgereift, weist jedoch Limitationen durch exotherme Wärmeentwicklung und unerwünschte Methanverluste von bis zu 5 Prozent im Restgas auf. Gefördert werden muss die Entwicklung neuartiger Hochleistungsadsorbentien (wie Zeolithe oder metallorganische Gerüstverbindungen), die tolerant gegenüber Feuchtigkeit und Schwefelwasserstoff sind. Ergänzend bedarf es einer Optimierung der PSA-Zyklussequenzen – etwa durch zweistufige Systeme mit einer minimierten Anzahl von Kolonnen –, um die Investitionskosten und die elektrische Kompressionsarbeit zu reduzieren.
Membrantrennverfahren	Membranen bieten durch ihre Einfachheit und lineare Skalierbarkeit große Perspektiven, weisen industriell jedoch noch einen geringen Reifegrad auf. Ein Hauptproblem ist die sogenannte Robeson-Grenze, also der Kompromiss zwischen Permeanz und Selektivität. Der Forschungsfokus sollte auf neuen Materialarchitekturen liegen, um diese Leistungsgrenzen zu durchbrechen. Zudem müssen mehrstufige Module

	prozesstechnisch so verschaltet werden, dass der hohe elektrische Strombedarf für Vakuumpumpen und Kompressoren bei geringen Triebkräften minimiert wird. Langzeit-Pilotierungen unter realen, korrosiven Abgasbedingungen sind erforderlich, um Fouling und Degradation zu beherrschen.
Carbonat-Looping	Die Abscheidung durch Carbonat-Looping bietet sich insbesondere für die Integration in die Zementherstellung an. Eine zentrale Limitierung ist jedoch die Deaktivierung des eingesetzten Sorbens: Durch die zyklische Carbonatisierung und Calzinierung kommt es zu stetigem Aktivitätsverlust durch Sinterung und Abrieb. Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung zyklenstabilerer Materialien sowie in der Optimierung von Reaktordesigns, um die Partikelhydrodynamik zu verbessern und die Carbonatisierung zu maximieren.
Oxyfuel-Verfahren	Auch das Oxyfuel-Verfahren ist für die Zementindustrie hochrelevant, birgt aber hohe verfahrenstechnische Komplexität in der Integration (Retrofits zur Minimierung von Falschluff). Da bei der Verbrennung der Luftstickstoff fehlt, verändern sich die Flammen-, Zünd- und Strahlungscharakteristiken maßgeblich. Die Forschung sollte sich auf die Anpassung von Brennerkonstruktionen, die Optimierung von Rohmehlrezepturen zur Sicherung der Klinkerqualität sowie auf die effiziente Prozessintegration konzentrieren.

Die Abtrennung von CO₂ ist nur dann zielführend, wenn Transport und Verwertung gesichert sind. Für die organische Grundstoffchemie ist die Umwandlung direkt an lokalen CO₂-Quellen oft nur mit teuren Greenfield-Investitionen realisierbar. Da die meisten Chemiestandorte nicht über ausreichende eigene Quellen verfügen, ist der **zügige Aufbau eines CO₂-Transportnetzes** unerlässlich. Erste Planungen der Fernleitungsnetzbetreiber sollten politisch begleitet und in ihren **Genehmigungsverfahren beschleunigt** werden, um die Versorgungssicherheit und Planbarkeit für Einzelanlagen herzustellen.

Damit sich die CO₂-Nutzung (CCU) gegen die Speicherung (CCS) und etablierte fossile Verfahren behaupten kann, sollten regulatorische Anreize gesetzt werden. Für nicht dauerhaft kohlenstoffbindende CCU-Produkte ist eine konsistente Bilanzierung der späteren CO₂-Freisetzung erforderlich. Der im Rahmen der EU-ETS-Überarbeitung vorgeschlagene Ansatz einer nachgelagerten Emissionsbilanzierung kann die Anreize für die CO₂-Abscheidung und -Nutzung stärken, seine endgültige regulatorische Ausgestaltung ist jedoch noch abzuwarten.

5 Power-to-X-Prozesse

Die Defossilisierung der organischen Grundstoffchemie erfordert die **Etablierung von Power-to-X-Prozessketten**, bei denen **grüner Wasserstoff und abgetrenntes CO₂ zu Plattformchemikalien** umgesetzt werden. Im Zentrum der Betrachtung stehen zwei Haupttrouten: Die Synthese von Methanol mit anschließender Weiterverarbeitung zu Olefinen oder Aromaten (**Methanol-to-X, MTX**) sowie die **Fischer-Tropsch-Synthese (FTS)** zu synthetischem Naphtha und Wachsen mit anschließendem Cracking. Während die MTX-Route aus heutiger Sicht deutliche Vorteile beim Energie- und Investitionsbedarf aufweist, bietet die FT-Route den Vorteil, dass ihre Produkte in die bestehende petrochemische Cracker-Infrastruktur in Deutschland integriert werden können. Die **hohen Produktgestehungskosten** von PtX-Verfahren erfordern eine **signifikante Prozessintensivierung und Energieeinsparung** entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Synthesegas-bereitstellung und direkte Co-Elektrolyse	Um die sehr energieintensive und endotherme reverse Water-Gas-Shift-Reaktion (rWGS) zur Erzeugung von Kohlenmonoxid zu umgehen, sollte die Erforschung der direkten Co-Elektrolyse von CO ₂ und Wasser vorangetrieben werden. Der Forschungsbedarf liegt hier in der Materialentwicklung von hochaktiven, langlebigen und degradationsarmen Elektroden sowie keramischen Membranmaterialien (wie Perowskiten), die eine hohe Ionenleitfähigkeit bei moderaten Temperaturen unter 800 °C ermöglichen.
Reaktionsführung und Katalyse der Methanolsynthese	Die Umsetzung von CO ₂ -reichen Gasen führt bei etablierten heterogenen Verfahren zu einem hohen Wasseranfall, was die Katalysatoren hydrothermal belastet. Forschungsschwerpunkte können die Entwicklung wasserresistenter Katalysatoren sowie der Einsatz von Membranreaktoren zur In-situ-Wasserabtrennung sein. Auch die Entwicklung von elektrochemischen Membranreaktoren für eine direkte Methanolsynthese in einem integrierten Schritt birgt großes Potenzial. Ein weiteres wichtiges und förderwürdiges Feld bietet zudem die homogen-katalysierte Methanolsynthese, die bei deutlich niedrigeren Temperaturen und Drücken operiert (z. B. 120 °C, 20 bar) und sehr hohe Umwandlungsraten zeigt.
Optimierung der MTX-Prozesse	Die Umwandlung von Methanol zu Olefinen und Aromaten ist stark exotherm und leidet unter der schnellen Deaktivierung der eingesetzten Zeolith-Katalysatoren durch Koksbildung. Es bedarf Forschung zur hydrothermalen Stabilisierung und zum gezielten Struktur-Design von Katalysatoren, um Diffusionslimitationen und Verkokung zu bremsen. Anlagenseitig sollten optimierte zirkulierende Wirbelschichtreaktoren mit präziser Kontaktzeitführung sowie fort-

	schrittliche Trenntechniken (wie Wärmepumpen oder kaskadierende Wärmeintegration) entwickelt werden, um den extrem hohen Strombedarf der Kryo-Kältesysteme bei der Produkttrennung zu minimieren. Alternativ ist der Syngas-to-Olefins-Pfad über bifunktionale Katalysatoren zu erforschen, bei dem CO ₂ und Wasserstoff in direkter Kopplung zu leichten Olefinen umgesetzt werden.
Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) und Wärmeintegration	Die FTS ist weit entwickelt, erzeugt jedoch ein breites Produktspektrum mit kaum Aromaten und leidet unter hydrothermalen Alterung der Kobalt-Katalysatoren. Benötigt werden modifizierte, wasserresistente und direkter auf CO ₂ ansprechende Katalysatoren (z. B. bimetallische Systeme). Der größte Effizienzhebel liegt jedoch in der Wärmeintegration durch die Nutzung der FTS-Reaktionswärme für die Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC) oder die rWGS-Reaktion.
Downstream-Aufarbeitung der FT-Produkte	Um die stoffliche Ausbeute zu maximieren, müssen auch die anfallenden schweren FT-Wachse und Mitteldestillate in leichtere Kohlenwasserstoffe und für Steamcracker geeignete Einsatzstoffe aufbereitet werden. Dazu bedarf es der Optimierung von nachgeschalteten Veredelungsprozessen wie dem Hydrocracking oder dem Fluid Catalytic Cracking.

Die Wirtschaftlichkeit von PtX-Anlagen ist stark von der **Infrastrukturanbindung** und rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig: Der Aufbau isolierter Greenfield-Anlagen ist aufgrund der erforderlichen kapitalintensiven Peripherie (Logistik, Wasseraufbereitung, Speicher) kaum wirtschaftlich darstellbar. **Förderprogramme sollten den Aufbau an integrierten Verbundstandorten (Brownfield) priorisieren**, wo Stoff- und Dampfnetzwerke zur Abwärmenutzung bereits bestehen. Besonders die FT-Route profitiert davon, dass sich ihre Zwischenprodukte nach geeigneter Aufarbeitung **in bestehende petrochemische Wertschöpfungsketten** integrieren lassen.

Da die Produktionskosten aktuell noch um ein Vielfaches über denen fossiler Referenzverfahren liegen, vor allem dominiert durch den **Strombedarf der Elektrolyse**, ist eine verlässliche politische Begleitung erforderlich. Neben **wettbewerbsfähigen Preisen für erneuerbaren Strom** spielen hier insbesondere **verlässliche CO₂-Preise und Differenzkostenförderungen** eine Rolle.

6 Biomasse-Vergasung

Die Gasifizierung von Kohle zur Herstellung von Synthesegas ist ein seit **Jahrzehnten etablierter Prozess**. Im Gegensatz dazu wurde die Vergasung von Biomasse in der Vergangenheit fast ausschließlich für die energetische Nutzung (Wärme und Strom) eingesetzt. Die aktuelle **technologische Herausforderung besteht nun in der Transformation zur stofflichen Nutzung der Biomasse**. Im Gegensatz zur energetischen Nutzung werden dadurch höhere Qualitätsansprüche an die Reinheit des erzeugten Synthesegases gestellt. Die **Variabilität der biogenen Rohstoffe** (hinsichtlich Zusammensetzung, Asche- und Feuchtigkeitsgehalt, Verunreinigungen und saisonal fluktuierender Verfügbarkeit) verursacht dabei einen signifikanten Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Entwicklungen zur **verlässlichen Bereitstellung einheitlicher Rohstoffströme und zur Überführung der Prozesse in industrielle Maßstäbe** sollten die Hauptaufgabe der Forschungsförderung sein.

Dezentralität und Logistik	Die Dezentralität und die geringe Energiedichte saisonaler Biomassequellen stellen eine Hürde für eine wettbewerbsfähige Bereitstellung dar. Benötigt werden tragfähige Logistiklösungen und gute Systemintegrationen, die eine dezentrale Vorbehandlung mit einer zentralen, hochskalierten Gasifizierung koppeln. Dies erweitert den Einzugsbereich für Rohstoffe und steigert die Gesamteffizienz der Anlagen. Zudem muss die Integration in existierende oder aufzubauende Downstream-Prozesse (wie Methanol- oder Fischer-Tropsch-Anlagen) an integrierten Verbundstandorten erforscht werden, um die Abwärme der Gasifizierung synergetisch nutzen zu können.
Tolerante Vorbehandlung (Upstream)	Zerkleinerung und Trocknung sind erforderlich, um Biomasse in Wirbelschicht- oder Flugstromgasifizierern effizient umzusetzen, verbrauchen jedoch bis zu 10 Prozent der produzierten Energie. Die Förderung sollte auf die Entwicklung dezentraler thermischer Vorbehandlungsverfahren (wie Torrefizierung, Pyrolyse oder hydrothermale Carbonisierung) ausgerichtet werden. Diese Verfahren erhöhen die Mahlbarkeit der Biomasse und reduzieren die spätere Teerbildung. Erforscht werden sollten zudem zusätzliche chemisch-biologische Konditionierungsschritte, wie das chemische Leaching von Alkalimetallen zur Verringerung der Schlackebildung, sowie die Integration der Wärme- und Stoffströme in diesen Vorbehandlungssequenzen.
Reaktionsführung und Prozessstabilität	Die Gasifizierungsprozesse müssen resilienter gegenüber Spezifikationschwankungen der Einsatzstoffe werden. Es mangelt an einem verbesserten Prozessverständnis und an Modellen, welche Ascheeffekte sowie die Schlacke-, Teer- und Rußbildung realitätsnah abbilden und so eine prädiktive Steuerung ermöglichen. Die Weiterentwicklung

	von Gasifizierer-Konfigurationen (z. B. Chemical Looping, Flugstrom- oder Dual-Fluidized-Bed-Gasifizierer) für den Betrieb unter Druck ist ebenso essenziell wie die Erforschung der Co-Gasifizierung von Biomasse und Kunststoffabfällen, bei der synergetische Effekte höhere Umwandlungseffizienzen versprechen und die Teerbildung reduzieren können.
Effiziente Teerminde- rung	Die Teerbildung ist eine der zentralen Herausforderungen, da sie die Umwandlungseffizienz um 5 bis 15 Prozent reduziert und nachfolgende Prozessschritte durch Blockaden, Korrosion oder Katalysatorvergiftung schädigt. Benötigt wird eine vertiefte Untersuchung zum Einsatz langzeitstabiler Katalysatoren (wie nickelbasierte Katalysatoren, Olivine oder Zeolithe) sowie alternativer Bettmaterialien für das in-situ Teer cracking unter realen Bedingungen.
Aufreinigung und Synthesegas-Konditionierung (Downstream)	Die Abtrennung von sauren Gasen, Alkali- und Schwermetallen sowie Schwefel-, Halogen- und Stickstoffkomponenten erfordert komplexe, mehrstufige Reinigungssequenzen, die Mengen an Prozessenergie erfordern. Der Forschungsfokus sollte auf der Weiterentwicklung robuster Heißgas-Reinigungssequenzen ($T > 300\text{ °C}$) liegen, die im Vergleich zur Kaltgasreinigung den Energiebedarf signifikant senken. Zudem bedarf es der Entwicklung von festen Sorptionsmitteln zur Schadstoffabtrennung bei hohen Temperaturen sowie toleranter Katalysatoren für das Teer cracking. Abschließend muss das gewonnene Synthesegas konditioniert werden, da dessen Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Verhältnis oft zu niedrig für nachfolgende Synthesen ist. Hier besteht Forschungsbedarf zur gezielten Kopplung mit Elektrolyseprozessen oder der Water-Gas-Shift-Reaktion.

Homogene, lignocellulosereiche Biomasseströme sind für effiziente Gasifizierungsprozesse höchst attraktiv. Ihre Verfügbarkeit wird jedoch durch **Nutzungskonkurrenzen** stark limitiert. Bestehende Förder- und Anreizstrukturen für Bioenergie können weiterhin Nutzungskonkurrenzen zwischen energetischer und stofflicher Nutzung verstärken. Die Ausgestaltung dieser Instrumente sollte konsequent am **Kaskadenprinzip**, an der Abfallhierarchie und an der Gesamtwirkung auf Treibhausgasemissionen und Ressourceneffizienz ausgerichtet werden, um diese **wertvollen Kohlenstoffquellen prioritär in die Gasifizierung für die anschließende stoffliche Downstream-Verwertung** der Chemieindustrie zu lenken.

7 Thermochemisches Kunststoffrecycling

Post-Consumer und Post-Industrial Kunststoffabfälle stellen ein großes, bisher nur unzureichend genutztes Kohlenstoffreservoir dar. Da das etablierte werkstoffliche (mechanische) Recycling bei stark verschmutzten, gemischten oder mehrschichtigen Kunststoffabfällen an seine physikalischen und wirtschaftlichen Grenzen stößt, werden diese Ströme derzeit überwiegend der thermischen Verwertung (Müllverbrennung sowie Nutzung als Ersatzbrennstoffe) zugeführt.

Um den Kohlenstoffkreislauf für die organische Grundstoffchemie zu schließen, werden **thermochemische Recyclingverfahren (insbesondere Pyrolyse und Vergasung) als komplementärer Ansatz zum mechanischen Recycling** benötigt. Diese Verfahren spalten die Polymere in Kohlenwasserstofffraktionen bzw. chemische Zwischenprodukte, die fossile Rohstoffe wie Naphtha teilweise ersetzen können.

Die großtechnische Skalierung des thermochemischen Recyclings leidet aktuell an der **starken Heterogenität der Abfallströme** und den daraus resultierenden **qualitativen Mängeln der erzeugten Zwischenprodukte**. Die Forschungsförderung sollte sich auf folgende technologische Aspekte konzentrieren.

Standardisierte Analytik und Datenbasis für Einsatzstoffe	Für viele komplexe Kunststoffabfallströme fehlen belastbare Daten zu Zusammensetzung und Schadstoffgehalten. Forschungsförderung sollte daher auch standardisierte Analytik-, Monitoring- und Datenkonzepte unterstützen, um die Auslegung und den Betrieb thermochemischer Recyclinganlagen zu verbessern.
Tolerante Vorbehandlung (Upstream)	Parallel zur Verbesserung der Reaktoren sollten dezentrale und effiziente Vorbehandlungs- und Sortierverfahren erforscht werden, die Störstoffe (wie Flammenschutzmittel, Füllstoffe oder PVC) im Vorfeld detektieren und abtrennen. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zur Auslegung robuster Prozesse und Reaktorkonzepte, die auch bei schwankender Zusammensetzung der Einsatzstoffe stabile Produktqualitäten ermöglichen.
Katalysator- und Reaktorentwicklung für die Pyrolyse	Ein Hauptproblem bei der Pyrolyse gemischter Kunststoffe ist die geringe Ausbeute an nutzbaren flüssigen Fraktionen sowie die unerwünschte Koks- und Wachsbildung. Benötigt werden gezielte Förderungen für die Entwicklung robuster, gegenüber Heteroatomen toleranter Katalysatoren, welche die Selektivität in Richtung der gewünschten Kohlenwasser-

	stoff-Kettenlängen verschieben und die Verkokung minimieren.
Stoffliche Verwertung aller Pyrolyse-Fractionen zur Ausbeutemaximierung	Neben den flüssigen Produkten entstehen bei der Pyrolyse unweigerlich signifikante Mengen an Pyrolysegasen (z. B. leichte Kohlenwasserstoffe, kurzkettige Olefine, Wasserstoff) und Feststoffen. Anstatt diese Produkte lediglich energetisch zu nutzen, sollte sich die Forschung die Maximierung der stofflichen Gesamtausbeute zum Ziel setzen. Erforderlich sind technologische Konzepte zur direkten chemischen Nutzung dieser Fraktionen (z. B. Auftrennung und Einspeisung in bestehende Chemieparks-Netze) oder zur internen Rückführung und Nutzung im Prozess.
Downstream-Processing: Selektive Produktaufbereitung	Das erzeugte Pyrolyseöl entspricht meist nicht den strengen Spezifikationen der petrochemischen Industrie. Es ist stark verunreinigt durch Heteroatome (Sauerstoff, Stickstoff) und Halogene (insbesondere Chlor aus PVC-Anteilen), die in Steamcrackern stark korrosiv wirken oder Katalysatoren vergiften. Hier besteht ein kritischer Forschungsbedarf für energieeffiziente und selektive Aufreinigungstechnologien (z. B. katalytisches Hydrotreating oder neuartige Membrantrennverfahren).

Die technologische Reife allein wird nicht zu einem Markthochlauf führen, wenn die Rahmenbedingungen ungelöst bleiben. Thermochemisch rezyklierte Rohstoffe (wie Pyrolyseöl) werden in bestehenden, hochintegrierten Verbundanlagen unweigerlich mit fossilen Rohstoffen vermischt. Es bedarf einer **transparenten und glaubwürdigen, europäisch harmonisierten und rechtssicheren Zertifizierung (Massenbilanzierung)**, damit Unternehmen den rezyklierten Anteil glaubhaft ihren Endprodukten (z. B. neuen Kunststoffen) zuordnen können. Für Einweggetränkeflaschen wurden auf EU-Ebene inzwischen Regeln zur Berechnung und Verifizierung chemisch rezyklierter Anteile unter Anwendung einer Massenbilanzierung geschaffen. Für weitere Kunststoffprodukte und Wertschöpfungsketten bedarf es jedoch weiterhin einer konsistenten, europäisch harmonisierten und rechtssicheren Regelung.

Solange die energetische Verwertung (Verbrennung) von Kunststoffabfällen wirtschaftlich attraktiv bleibt, fehlt den Recyclinganlagen der Zugang zum Rohstoff. Regulatorische Instrumente sollten greifen, um einen **deutlichen preislichen Anreiz für das rohstoffliche Recycling** gegenüber der reinen Verbrennung zu setzen.