

Wasserstoff in der chemischen Industrie

Dominik Blaumeiser und das Wasserstoff-Kompass-Team

Executive Summary

Chemische Industrie in Deutschland



Die chemische Industrie zeichnet sich durch verknüpfte Wertschöpfungsketten aus. Produkte der chemischen Industrie werden oft in weiterführenden Prozessketten anderer Industrien genutzt.



Wasserstoff fällt zum Status quo als Nebenprodukt an oder wird ausgehend von fossilen Rohstoffen erzeugt. Der Bedarf von ca. 37 TWh Wasserstoff resultiert insbesondere aus der Ammoniak- und Methanol-Erzeugung.



Die THG-Emissionen der chemischen Industrie resultieren primär aus der stofflichen und energetischen Nutzung fossiler Rohstoffe sowie den Emissionen am Lebensende der chemischen Produkte.



Eine Defossilisierung der chemischen Industrie kann nur durch vielfältige, zeitnah gestartete Maßnahmen verwirklicht werden.



Wasserstoff wird eine wichtige Rolle bei der Defossilisierung der chemischen Industrie beigemessen. Durch unterschiedliche neue Anwendungen könnte der Bedarf bis auf über 220 TWh steigen.



In Roundtables wurden vielfältige Aussagen und Ergebnisse bzgl. der chemischen Industrie, auch im Zusammenhang mit der Rohstoffversorgung durch die Raffinerien, validiert und eingeordnet.

Die Struktur des Dokuments

Aufbau

Zu Beginn erfolgt eine Beschreibung der chemischen Industrie zum Status quo. Ausgehend von den Treibern der THG-Emissionen werden im Laufe des Dokuments Handlungsoptionen dargestellt, die zu einer Defossilisierung der chemischen Industrie beitragen könnten. Zum Abschluss des Dokuments werden studiengestützte Wasserstoffmengengerüste präsentiert und Kernaussagen der Expert:innen-Gespräche und Roundtable-Gespräche zusammengefasst.

Verlinkungen

Die unten dargestellte Fußleiste dient der schnellen Navigation zwischen den einzelnen Kapiteln des Dokuments. Die Verlinkung führt immer auf die erste Seite des jeweiligen Kapitels.

Glossar

Zur besseren Lesbarkeit des Textes befindet sich am Ende des Dokuments ein Glossar, in welchem relevante Begriffe kompakt erklärt werden.

Chemische Industrie

Chemische Industrie

Kennzahlen für Deutschland



Kalyakan - stock.adobe.com

- Der Gesamtumsatz der chemischen Industrie lag 2021 bei ~172,4 Mrd. €.^[1]
- Im Jahr 2021 waren knapp unter 352.000 Personen beschäftigt.^[1]
- Die chemische Industrie trägt zu 2-3% der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung bei.^[2]

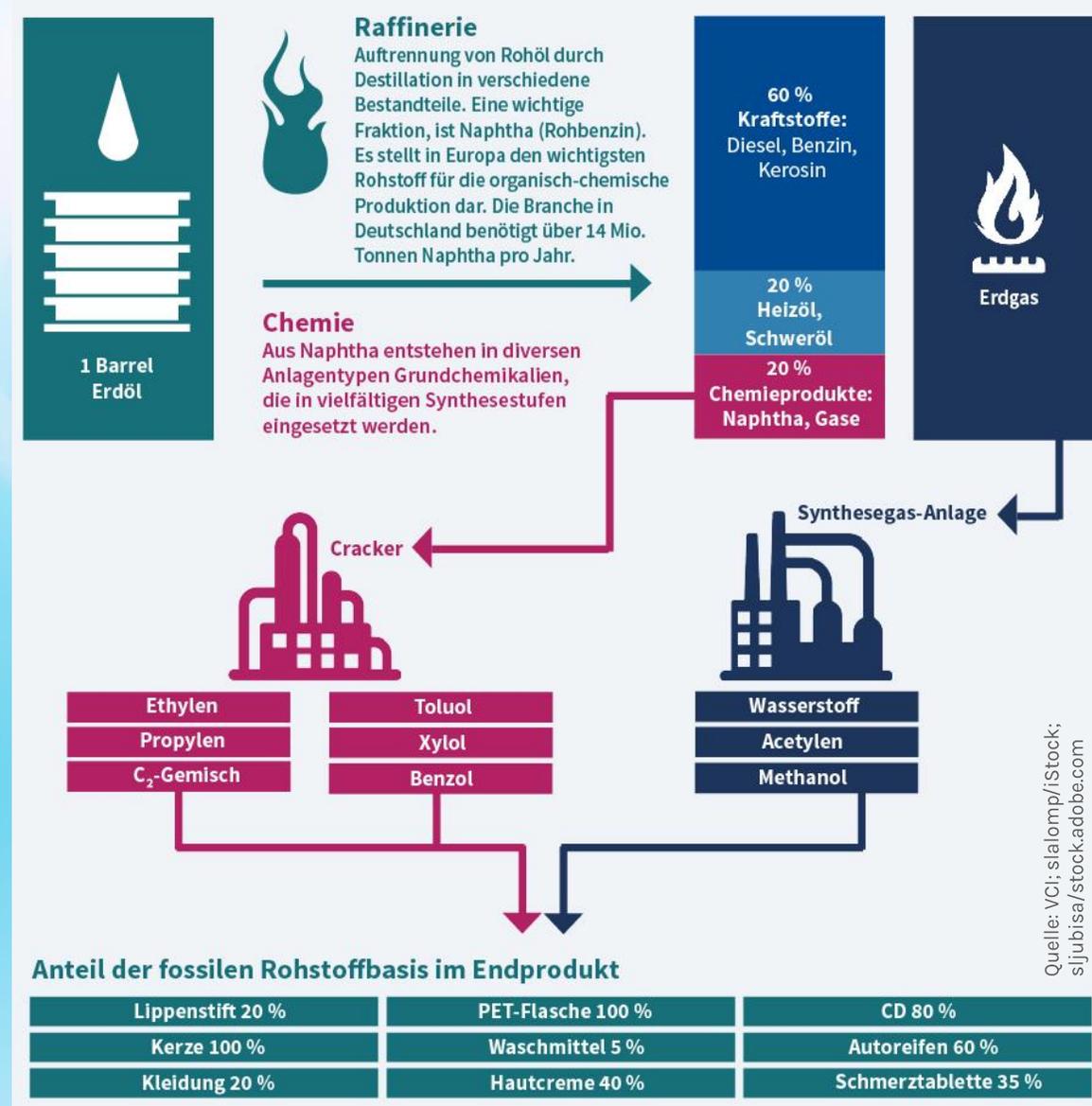
[1] VCI, Chemiewirtschaft in Zahlen, 2022.

[2] Statista aus Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung 2021, 2022.

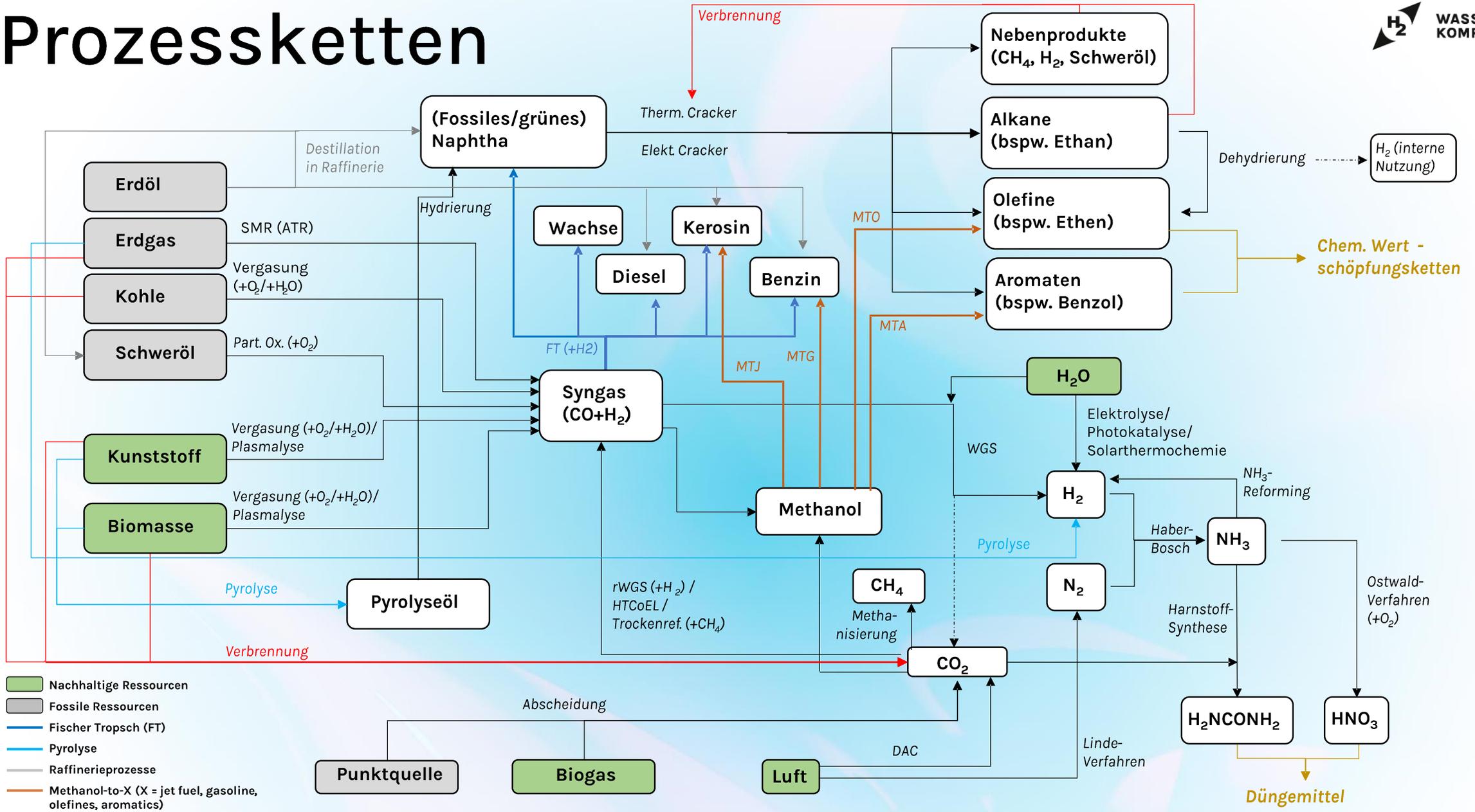
Chemische Industrie

Status quo

- Die chemische Industrie ist aktuell abhängig von fossilen Rohstoffen.
- Fossiles Naphtha wird von Raffinerien bereitgestellt. Daher besteht eine enge Verknüpfung der beiden Industrien.
- Der Anteil der fossilen Rohstoffbasis kann bis zu 100% im Endprodukt ausmachen.
- Auf der nächsten Seite sind vereinfachte Prozessketten und deren Zusammenspiel dargestellt.



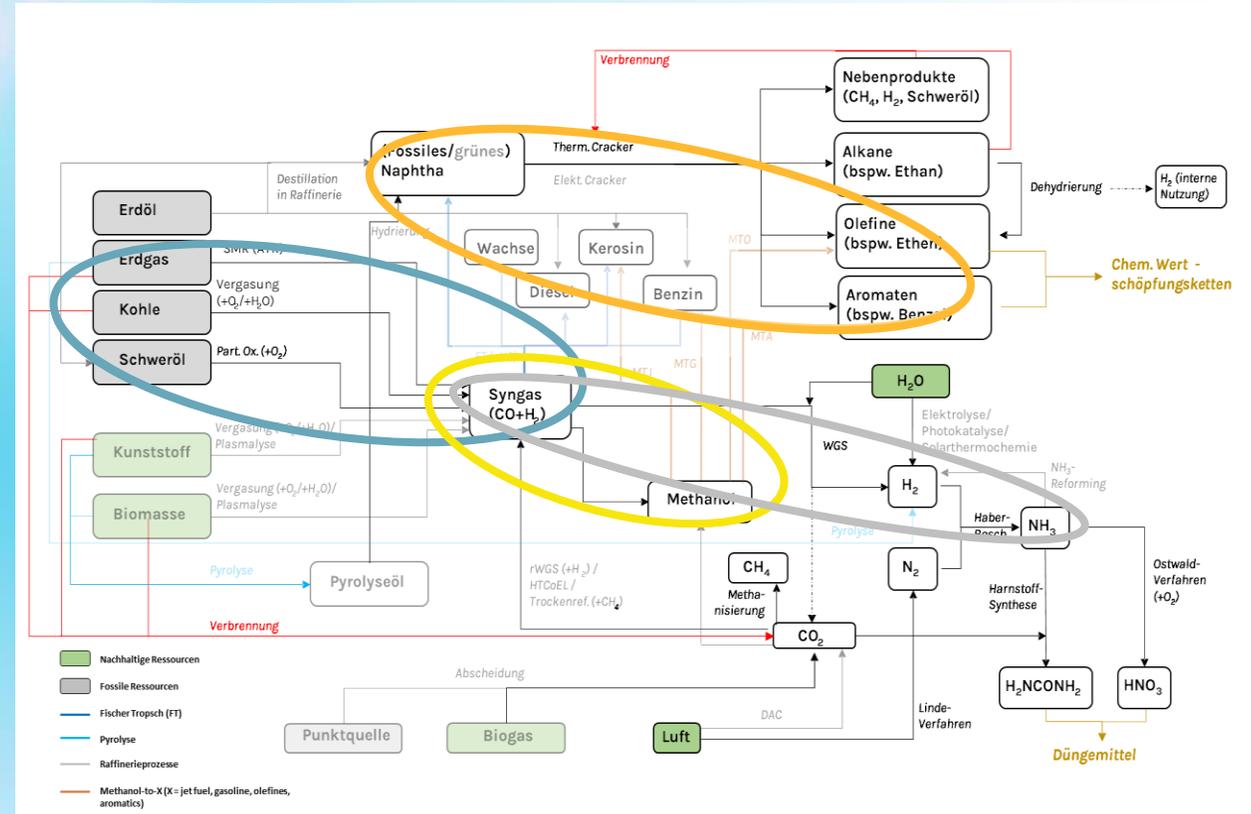
Prozessketten



Chemische Industrie

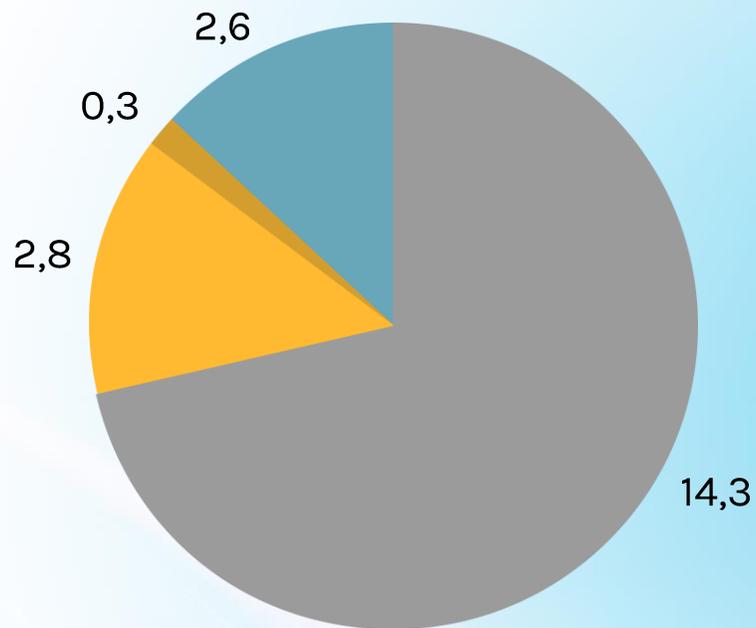
Beispiele aktueller fossil-basierter Prozessketten

- Wasserstoff- sowie Synthesegaserzeugung auf Basis fossiler Rohstoffe (blau).
- Bereitstellung von Olefinen und Aromaten mittels Cracking von fossilem Naphtha (grün).
- Herstellung von Methanol ausgehend von fossil-erzeugtem Synthesegas (gelb).
- Erzeugung von Ammoniak mit Wasserstoff, welcher primär über Erdgas bereitgestellt wird (grau).



Chemische Industrie

Stofflicher Rohstoffeinsatz



- Im Jahr 2020 wurden 20 Mt Rohstoffe stofflich eingesetzt.^[1]
- Der stoffliche Rohstoffbedarf wird von Naphtha und anderen Erdölprodukten dominiert.^[1]
- Nachwachsende Rohstoffe tragen nur zu etwas mehr als 10% der Rohstoffbasis bei.^[1]
- Recycling spielt bislang kaum eine Rolle.

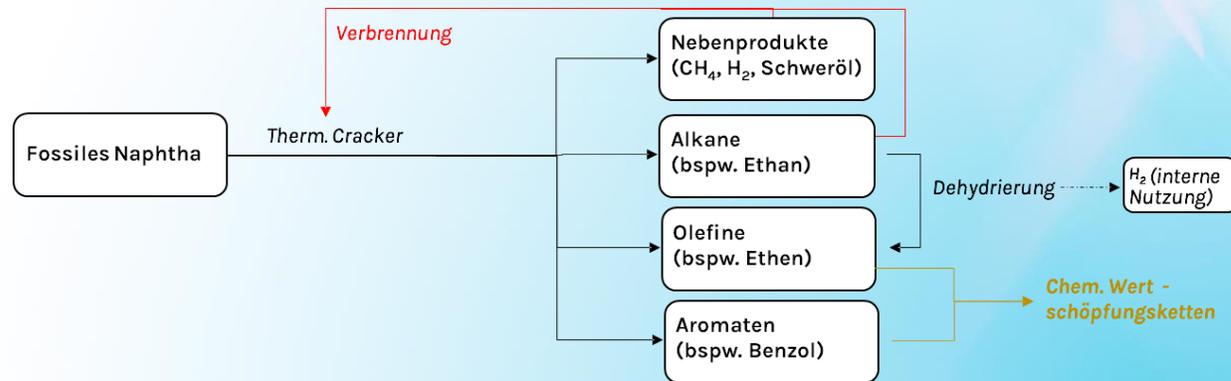
Stoffliche Rohstoffnutzung (insgesamt 20 Mt)^[1]



[1] VCI, Energiestatistik 2022.

Chemische Industrie

Exkurs: Fossiles Naphtha als Rohstoff



Ethen (C ₂ H ₄)	Propen (C ₃ H ₆)	Benzol (C ₆ H ₆)	Toluol (C ₇ H ₈)	Xylol (C ₈ H ₁₀)
5,2 Mt ^[2]	3,6 Mt ^[2]	1,6 Mt ^[2]	0,6 Mt ^[2]	0,4 Mt ^[2]

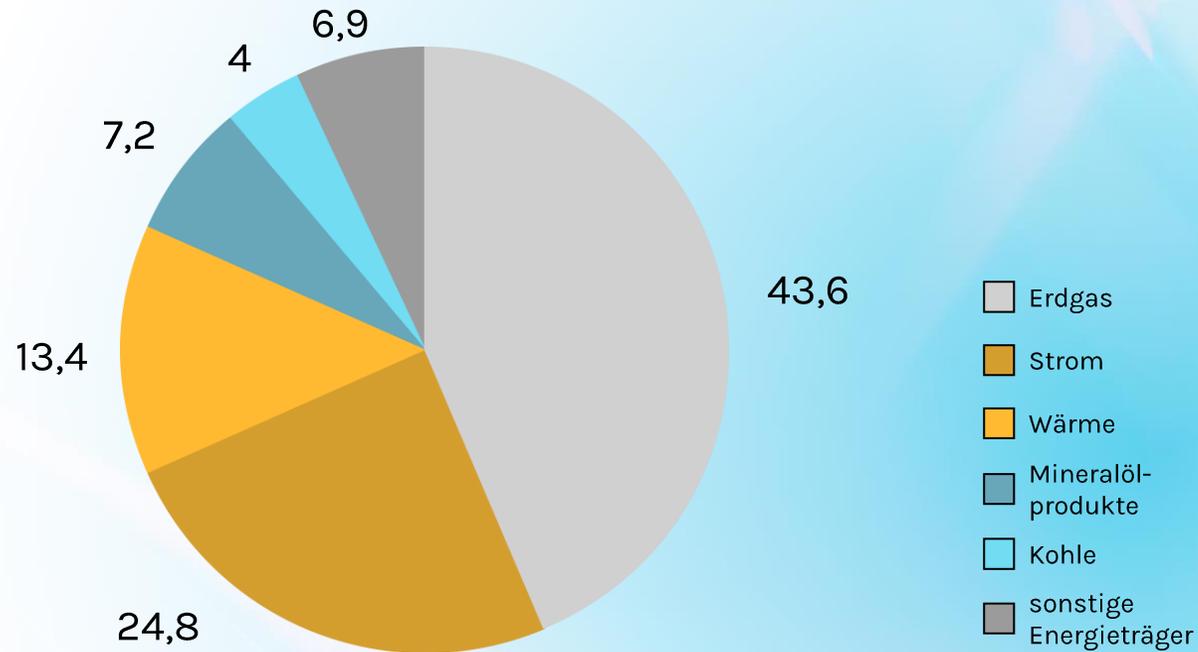
- Fossiles Naphtha wird im thermischen Cracker unter Zugabe von Wasserdampf gespalten (*Steamcracking*).
- Zielprodukte sind sogenannte High Value Chemicals (HVCs) wie Olefine (z.B. Ethen, Propen) und Aromaten (z.B. Benzol, Toluol, Xylol).
- Nebenprodukte werden entweder aufbereitet (Dehydrierung von Alkanen) oder als Brennstoff des Crackers eingesetzt.
- Cracking ist emissionsintensiv: energetische Emissionen von 0,87 t CO₂ / t HVC.^[1]

[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

[2] Produktion in Deutschland in 2021 (Xylol 2019) basierend auf VCI, Chemiewirtschaft in Zahlen, 2022.

Chemische Industrie

Energetischer Verbrauch



Energetischer Verbrauch der chemischen Industrie ohne stofflichen Einsatz (215 TWh)^[1]

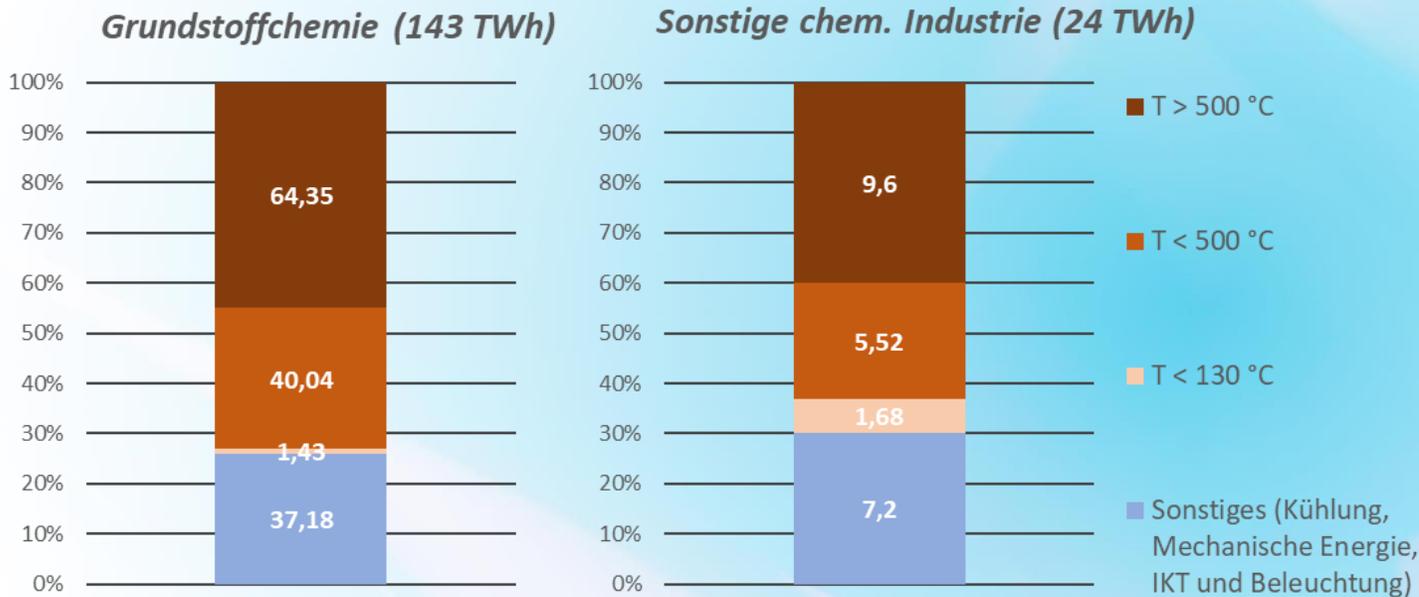
- Die chemische Industrie hat einen hohen Energieverbrauch. Dieser macht mehr als 20% des energetischen Verbrauchs der deutschen Industrie aus.^[1]
- Zum Status quo werden primär fossile Energieträger genutzt.
- Erdgas ist ein Spezialfall, da es sowohl stofflich als auch energetisch in enormen Mengen benötigt wird.

[1] VCI, Energiestatistik 2022.

Chemische Industrie

Benötigte Temperaturniveaus

Energiebedarf



- Prozesse laufen in verschiedenen Temperaturbereichen ab, insbesondere auf einem Mittel- bis Hochtemperaturniveau.^[1]
- Diese Temperaturniveaus werden durch fossile Energieträger gedeckt.
- Chemiestandorte zeichnen sich durch komplexe Systeme zur Nutzung der Abwärme aus.

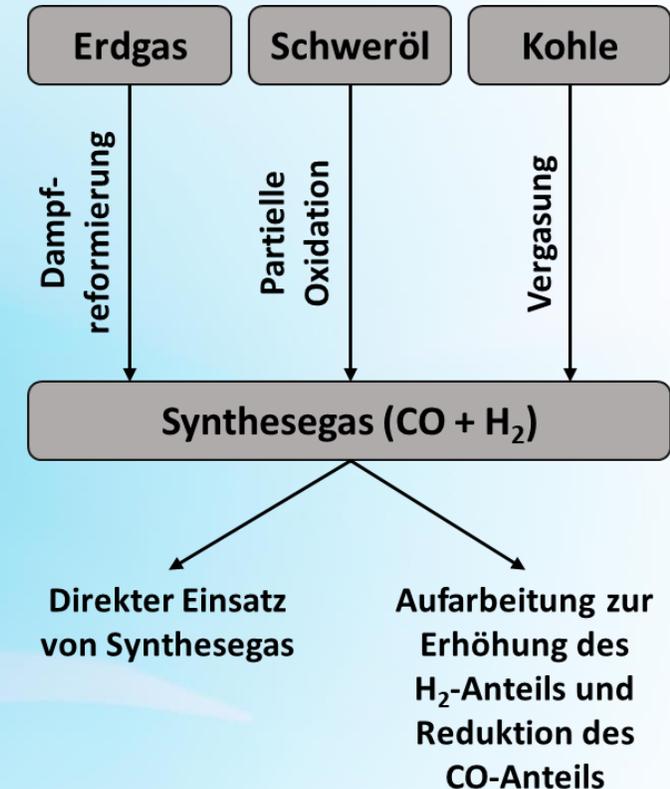
[1] BDI, Klimapfade 2.0, 2022.

Wasserstoff

Wasserstoff

Fossil-basierte Wasserstofferzeugung

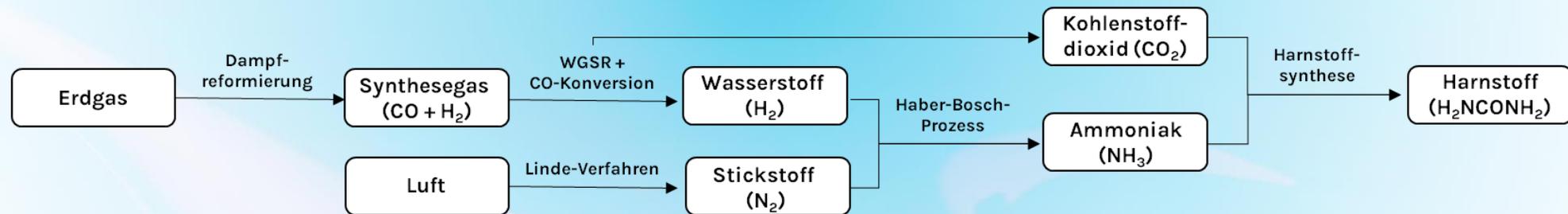
- Wasserstoff wird zum Status quo auf Basis fossiler Rohstoffe erzeugt oder fällt als Nebenprodukt an, bspw. in der Chlor-Alkali-Elektrolyse oder durch die Dehydrierung von Alkanen.
- In Deutschland hatte die chemische Industrie einen Wasserstoffbedarf von 1,1 Mt (37 TWh) im Jahr 2021.^[1]
- Das fossil-basierte Synthesegas kann direkt genutzt werden, z.B. in der Methanolerzeugung. Im Falle der Ammoniakherstellung muss erst noch eine Aufarbeitung erfolgen.



[1] Nationaler Wasserstoff Rat, Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021–2025, 2021.

Spezialfall: Ammoniaksynthese

- Die Ammoniakproduktion in Deutschland belief sich im Jahr 2021 auf 2,4 Mt Ammoniak,^[1] v.a. über das Haber-Bosch-Verfahren. Pro Tonne Ammoniak fallen stöchiometrisch 177,5 kg Wasserstoff an.
- Das Synthesegas wird durch die Wassergas-Shift Reaktion (WGSR) aufgereinigt. Die WGSR erhöht den Anteil an Wasserstoff bei gleichzeitiger Reduktion des CO-Anteils.
- Anschließend erfolgt eine CO-Konversion durch Oxidation oder Methanisierung, damit der Eisen-basierte Katalysator des Haber-Bosch-Prozesses nicht durch CO vergiftet wird.
- Bei anschließender Harnstoff-Produktion wird das prozessbedingte CO₂ direkt weiterverwendet.



THG-Emissionen

THG-Emissionen

Scope 1 - 3 Emissionen



- Im Scope 1 sind direkte Emissionen der Chemieproduktion infolge von prozess- und energiebedingten Emissionen aufgeführt.^[1]
- Scope 2 berücksichtigt indirekte Emissionen aus fremdbezogenem Strom oder fremdbezogener Wärme.^[1]
- Scope 3 berücksichtigt die Emissionen, welche durch den fossilen Kohlenstoffanteil chemischer Produkte bei Nutzung oder Verbrennung am Lebensende freigesetzt werden.^[1]

[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

THG-Emissionen

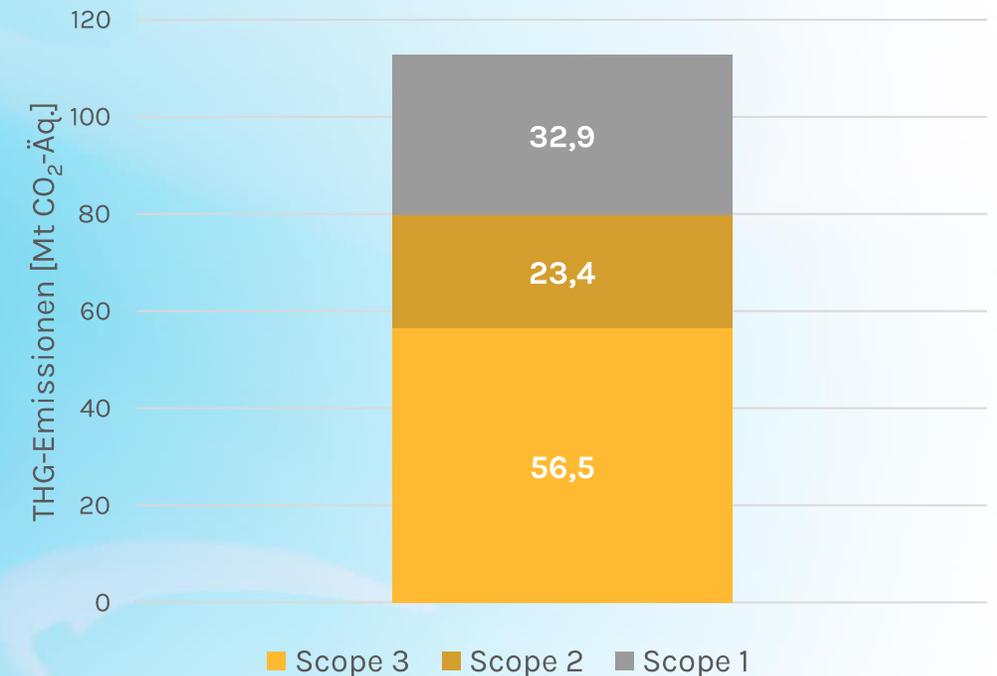
Hauptverursacher der Emissionen

- Emissionen am Lebensende aus Nutzung oder Verbrennung (ca. 56,5 Mt CO₂-Äq./a).^[1]
- Brennstoffemissionen inklusive der Eigenstromerzeugung (ca. 27,5 Mt CO₂-Äq./a).^[1]
- Externer Strombezug, z.B. für die Bereitstellung von Prozessdampf (ca. 16,8 Mt CO₂-Äq./a).^[1]
- Die Wasserstofferzeugung auf Basis fossiler Rohstoffe (allein ca. 4,4 Mt CO₂-Äq./a für die Ammoniakproduktion).^[2]
- Energetische Emissionen des thermischen Steamcrackers bei der Naphthaspaltung (für Ethylen, Propylen sowie BTX allein ca. 11,3 Mt CO₂-Äq./a).^[2]

[1] DEHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

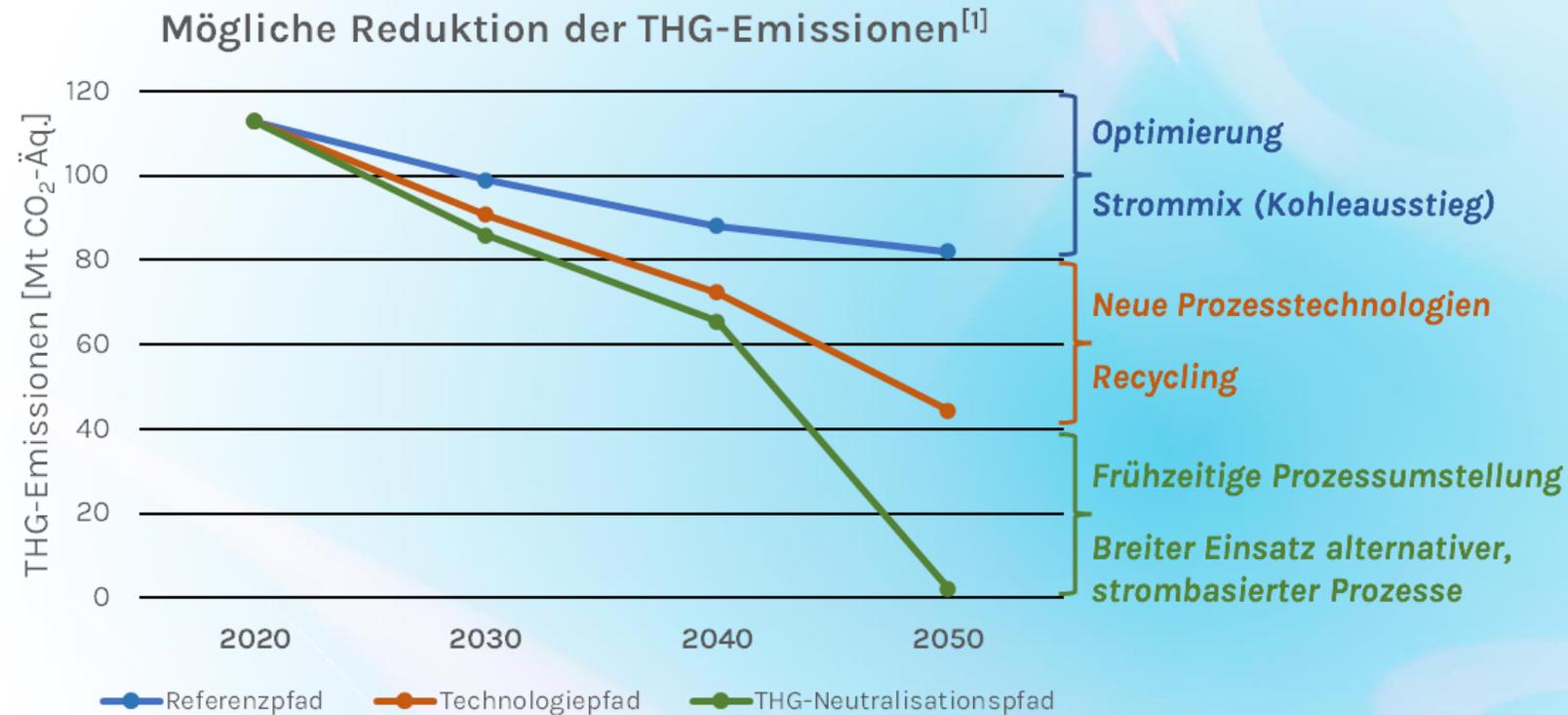
[2] Eigene Berechnung unter Annahme 0,87 t CO₂/t HVC^[1] bzw. 10 t CO₂/ t H₂ in der Erdgasdampfpreformierung sowie Berücksichtigung der deutschen Produktionsmengen.

Emissionen der chemischen Industrie
(~112 Mt CO₂-Äq.)^[1]



THG-Emissionen

Reduktion der Emissionen



Emissionsreduktionspotenzial
in Abhängigkeit von:

- den Maßnahmen (z.B. strombasierte Alternativen, Recycling)
- dem Einsatzzeitpunkt (relevant bei CO₂-Budgetbetrachtung)
- dem Umfang der Maßnahmen (nur bei breitem Einsatz kann eine Transformation gelingen)

Handlungsoptionen

Handlungsoptionen

Voraussetzungen

Es bedarf großer Anstrengungen, um eine Transformation der chemischen Industrie zu erreichen. Handlungsoptionen, die dazu beitragen könnten, sind im Folgenden dargestellt. Die Reihenfolge stellt keine Priorisierung dar.

Um diese Handlungsoptionen zu verwirklichen, bedarf es gewisser Grundvoraussetzungen. Diese betreffen alle Handlungsoptionen und werden daher hier im Vorfeld kurz benannt:

- Alternative Prozesse sind oftmals strom-basiert. Daher ist die Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen zur Erzeugung von Strom zu günstigen Preisen* elementar.
- Die entsprechende Infrastruktur (Gas- und Stromnetze) muss gegeben sein.
- Politische Rahmenbedingungen müssen Planungssicherheit gewährleisten.

*Anmerkung: Laut Aussage M. Steilemann, Präsident VCI, beim Energiedialog 2023 am 09.02.2023, werden hierfür Strompreise in der Größenordnung von 4-5 ct/kWh benötigt.

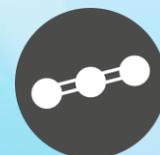
Alternative Wasserstoff- und Synthesegaserzeugung

Wasserstoff / Synthesegas

Fossil-basierter Wasserstoff inklusive CO₂-Abscheidung



Erzeugung von Wasserstoff ausgehend von fossilen Rohstoffen inklusive einer Abscheidung des anfallenden CO₂. Das CO₂ kann anschließend verpresst (*carbon capture and storage, CCS*) oder verwertet (*carbon capture and utilization, CCU*) werden.



Das CO₂-Einsparpotenzial ergibt sich aus der Abscheidung der CO₂-Emissionen. Bei CCU-Prozessen erfolgt zudem eine Substitution fossiler Rohstoffe durch die Verwendung von CO₂ als Rohstoff.



Die Abscheidung prozessbedingter CO₂-Emissionen in Kombination mit CCU-/CCS-Prozessen ist industriell verfügbar.

Wasserstoff / Synthesegas

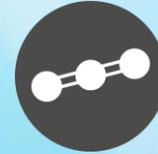
Wasserelektrolyse



Erzeugung von Wasserstoff durch elektrolytische Wasserspaltung in Wasserstoff und Sauerstoff:
 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$



Einige Technologien werden bereits mit TRL 9 eingestuft oder werden es zeitnah erreichen, bspw. die alkalische Elektrolyse (AEL) oder Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM).^[1, 2]



Das CO₂-Einsparpotenzial ergibt sich aus dem Ersatz fossiler Rohstoffe, sobald eine ausreichende Defossilisierung des deutschen Strommixes erfolgt ist (unter der Annahme der Verwendung von Netzstrom).^[3]

[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

[2] VCI, Eckpunkte zur Zukunft der Deutschen Chemie-Industrie, 2022.

[3] Kopernikus P2X, 3. Technologieroadmap, 2021.

Wasserstoff / Synthesegas

Methanpyrolyse



Mittels Methanpyrolyse werden Wasserstoff und Kohlenstoff durch die thermische Spaltung von Methan erzeugt: $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$



Die Methanpyrolyse wird mit einem TRL 6-7^[1-2] eingestuft und eine Einsatzreife wird zwischen 2030^[2] und 2040^[4] erwartet.



Neben energetischen Emissionen spielen auch THG-Emissionen aus Verlusten eine Rolle, v.a. nicht umgesetztes Methan. Erfolgt bei der Nutzung des gebildeten Kohlenstoffs im Lebenszyklus keine Umwandlung zu CO_2 , ist die Herstellung des H_2 klimaneutral, bspw. Endlagerung des Kohlenstoffs. Bei Verwendung von Biomethan kann sogar von negativen Emissionen gesprochen werden.^[1]

[1] <https://research.csiro.au/hyresource/hazer-commercial-demonstration-plant/>; aufgerufen 13.02.2023

[2] <https://www.chemanager-online.com/en/news/monolith-plans-carbon-free-ammonia-plant/>; aufgerufen am 13.02.2023.

[3] Diskussion mit relevanten Stakeholdern aus der Chemischen Industrie.

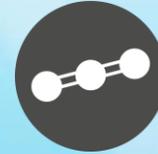
[4] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Wasserstoff / Synthesegas

Reverse Water-Gas Shift (rWGS) Reaktion



Das rWGS-Verfahren ist die Umsetzung von CO₂ mit (Elektrolyse-) Wasserstoff zur Erzeugung von Synthesegas: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$



Eine Emissionsreduktion wird durch die Vermeidung fossiler Rohstoffe sowie durch die Verwertung von CO₂ erreicht, sofern der eingesetzte Wasserstoff emissionsarm ist.

TRL

Die rWGS Reaktion besitzt die nötige Technologiereife, um im industriellen Umfeld eingesetzt zu werden.^[1]

[1] <https://www.ineratec.de/de/power-x-anlagen>; aufgerufen am 23.02.2023.

Wasserstoff / Synthesegas

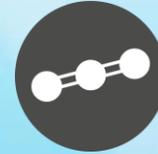
Vergasung von Biomasse



Biomasse kann stofflich im Rahmen von Vergasungsprozessen verwertet werden, um ein Synthesegas herzustellen: Biomasse \rightarrow CO + H₂



Das Erreichen eines TRL 9 wird bis 2025 erwartet.^[1]



Eine Emissionsreduktion ergibt sich aus der Substitution fossiler Rohstoffe.

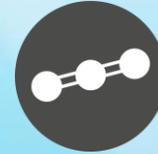
[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Wasserstoff / Synthesegas

Vergasung von Kunststoffen



Kunststoffabfälle können mittels Vergasung stofflich genutzt werden, um Synthesegas zu erzeugen:
Kunststoff \rightarrow CO + H₂



Eine Emissionsreduktion ergibt sich aus der stofflichen anstelle der energetischen Verwertung sowie der Substitution fossiler Rohstoffe.



Das Erreichen eines TRL 9 wird ab 2030 erwartet.^[1]

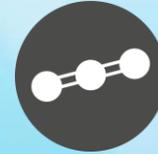
[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Wasserstoff / Synthesegas

Trockenreformierung



Die Methan-Trockenreformierung ist die Umsetzung von CO₂ und CH₄ zu Synthesegas (Calcor-Prozess):
$$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$$



Eine Emissionsreduktion wird durch die Verwertung von CO₂ erreicht.



Der Trockenreformierung wird ein TRL 9 zugewiesen, da es industriell verfügbare Anwendungen gibt.^[1]

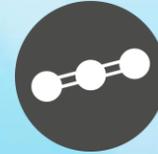
[1] <https://www.engineering.linde.com/dryref>; aufgerufen am 13.02.2023.

Wasserstoff / Synthesegas

Ko-Elektrolyse



In der Ko-Elektrolyse werden CO₂ und Wasserdampf unter hohen Temperaturen zu Synthesegas umgewandelt:
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{O}_2$



Die Emissionsreduktion ergibt sich aus der Verwertung von CO₂ sowie der Substitution fossiler Rohstoffe.

TRL

Das TRL befindet sich aktuell auf einem mittleren Niveau (TRL 4 - 6).^[1] Ein Erreichen der industriellen Reife ist zeitlich noch nicht abzuschätzen.

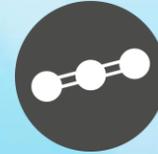
[1] FNE H2, Langfassung der Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff, 2022.

Wasserstoff / Synthesegas

Alternative Technologien



Alternative Prozesse zur Erzeugung von Wasserstoff oder Synthesegas beinhalten photokatalytische oder solarthermochemische Verfahren.



Eine Emissionsreduktion ergibt sich durch die Substitution fossiler Rohstoffe.



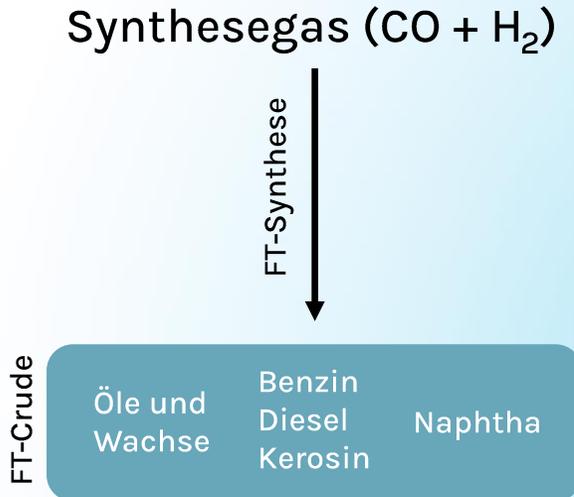
Eine ausreichende technologische Reife wird frühestens in 15 Jahren erwartet.^[1]

[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Alternative Rohstoffbasis

Alternative Rohstoffbasis

Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese)

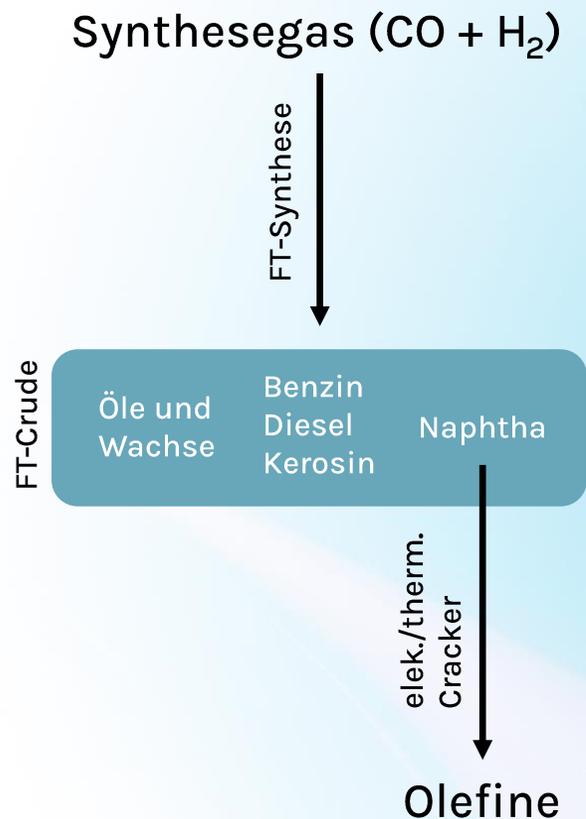


- Unter der FT-Synthese versteht man die Umsetzung von Synthesegas zu Kohlenwasserstoffen.
- Die FT-Synthese ist industriell verfügbar.
- In Abhängigkeit der Katalysatoren und Prozessparameter ergibt sich ein Produktgemisch mit unterschiedlicher Verteilung (FT-Crude).^[1]
- Das FT-Crude ist eine Mischung aus Ölen und Wachsen, Kraftstoffen sowie Naphtha.

[1] H. Mahmoudi, M. Mahmoudi, O. Doustdar, H. Jahangiri, A. Tsolakis, S. Gu und M. Wyszynski, A review of Fischer Tropsch synthesis process, mechanism, surface chemistry and catalyst formulation, 2017. <https://doi.org/10.1515/bfuel-2017-0002>

Alternative Rohstoffbasis

Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese)

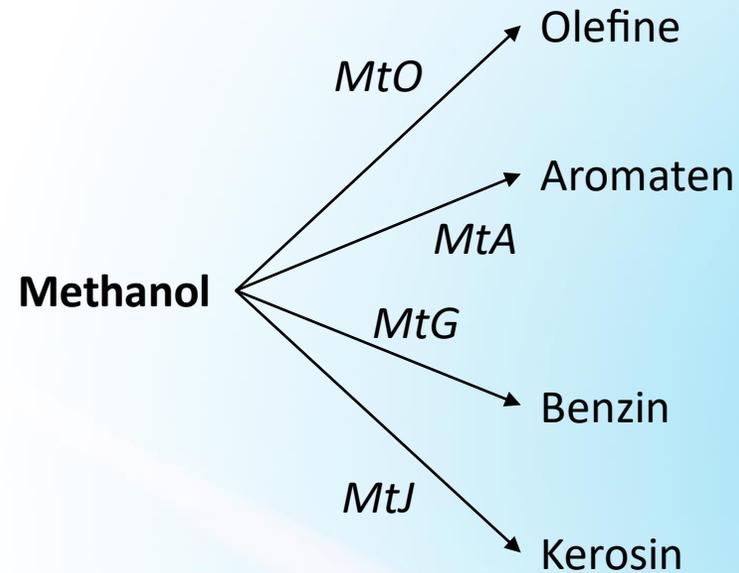


- Die FT-Naphtha-Fraktion ist für die chemische Industrie relevant als Ersatz des fossilen Naphthas.
- FT-Naphtha kann in bestehenden Steamcrackern aufgearbeitet werden. Eine Beimischung zu fossilem Naphtha ist ebenfalls möglich.
- Aus FT-Naphtha lassen sich Olefine erzeugen. Die Bereitstellung von Aromaten ist noch nicht geklärt.
- Eine Kostenparität von FT-Naphtha ggü. fossilem Naphtha wird nicht vor 2050 erwartet.^[1]

[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Alternative Rohstoffbasis

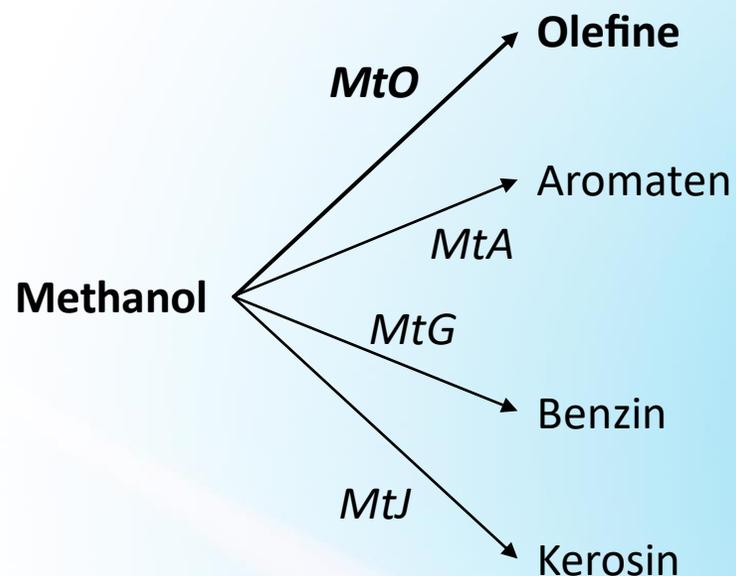
Methanol-to-X



- Unter Methanol-to-X versteht man die Umwandlung von Methanol zu anderen Produkten.
- Aufgrund der Bedeutung der HVCs sind für die chemische Industrie insbesondere die Methanol-to-Olefines (MtO) und Methanol-to-Aromatics (MtA) Routen relevant. Methanol-to-Gasoline (MtG) und Methanol-to-Jet (MtJ) werden anwendungsbedingt in der Wasserstoff-Kompass-Publikation zu Raffinerien beschrieben.
- Methanol-to-X Routen können zu einer deutlichen Steigerung der Methanol-Nachfrage führen.^[1]

Alternative Rohstoffbasis

Methanol-to-Olefines (MtO)



Über MtO-Prozesse können selektiv Propylen oder eine Ethylen-/Propylen-Mischung erzeugt werden.^[1] Stöchiometrisch werden 2,8 Tonnen Methanol pro Tonne Olefine benötigt.^[2]

TRL

MtO weist ein TRL 9 auf und wird großindustriell eingesetzt.^[2]



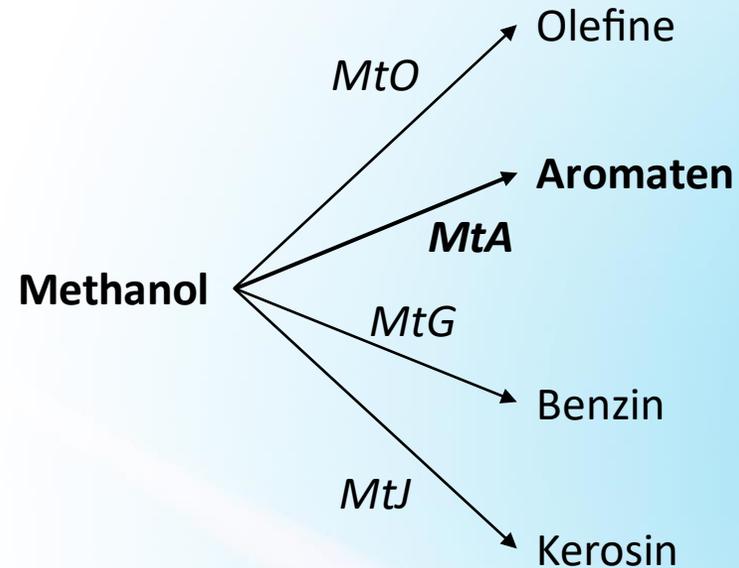
Das Minderungspotenzial ergibt sich aus der Vermeidung fossiler Rohstoffe sowie der Verwendung von CO₂.

[1] M. R. Gogate, Methanol-to-olefins process technology: current status and future prospects, 2019. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1555589>.

[2] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Alternative Rohstoffbasis

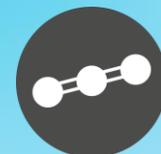
Methanol-to-Aromatics (MtA)



Aromaten können über MtA-Prozesse erzeugt werden. Stöchiometrisch werden 4,3 Tonnen Methanol pro Tonne Aromaten benötigt.^[1] M

TRL

MtA wird aktuell mit TRL 7 eingestuft.^[1] Ein Erreichen von TRL 9 wird bis 2030 prognostiziert.^[2]



Die Emissionsreduktion ergibt sich aus der Vermeidung fossiler Rohstoffe sowie der Verwendung von CO₂.

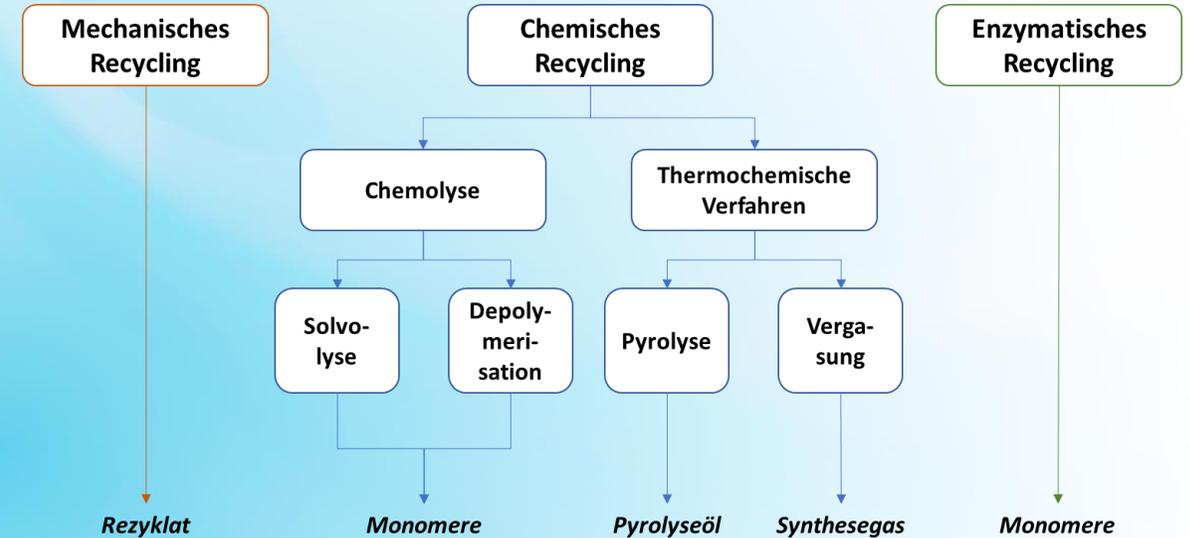
[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

[2] Präsentation BMWK Langfristszenarien, Modul Industrie, 16.11.2022.

Alternative Rohstoffbasis

Kunststoffrecycling

- 99,4% des Kunststoffabfalls werden am Lebensende verwertet (davon 35% stofflich und 65% energetisch).^[1]
- Recyclingverfahren können in mechanisches, chemisches sowie enzymatisches Recycling unterschieden werden.^[2-3]
- Industriell verfügbar sind nur mechanisches und chemisches Recycling.
- Recycling im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft verringert den Bedarf an fossilen Rohstoffen.



[1] CONVERSIO, Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021, Oktober 2022.

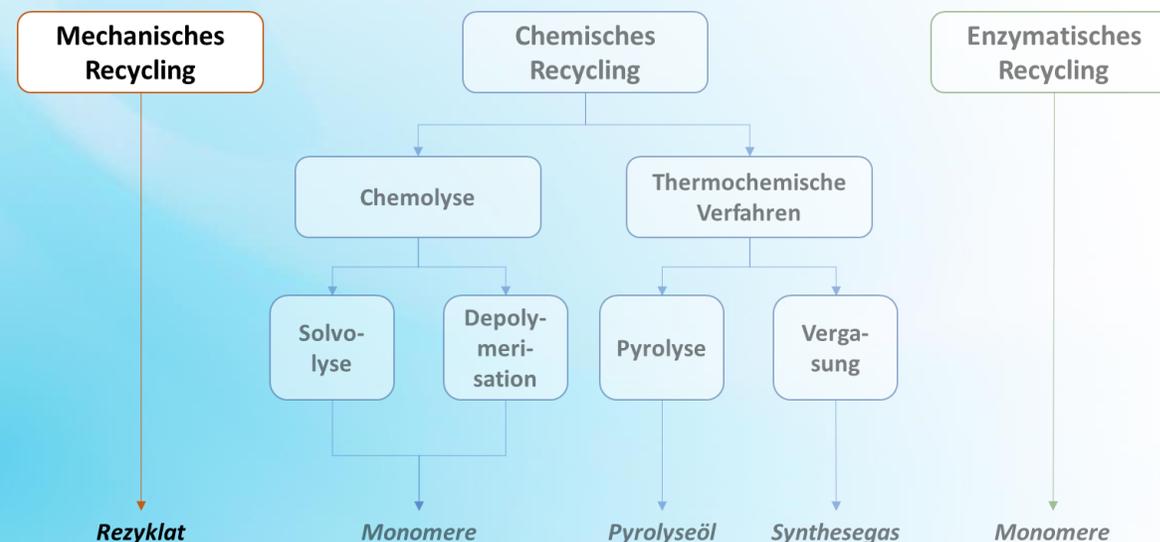
[2] VCI, Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling - neue Verfahren und Konzepte, 2021.

[3] <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/der-grosse-ueberblick-zum-kunststoffrecycling-519.html>, aufgerufen am 21.11.2022.

Alternative Rohstoffbasis

Mechanisches Kunststoffrecycling

- Beinhaltet die sortenreine Trennung sowie die mechanische Zerkleinerung und Aufbereitung.^[1]
- Erzeugt wird ein Sekundärrohstoff, das Rezyklat, welches neu-produzierte Kunststoffe ganz oder teilweise ersetzen kann.^[2]
- Daher bietet sich mechanisches Recycling für sortenreine und saubere Abfallfraktionen an.^[2]



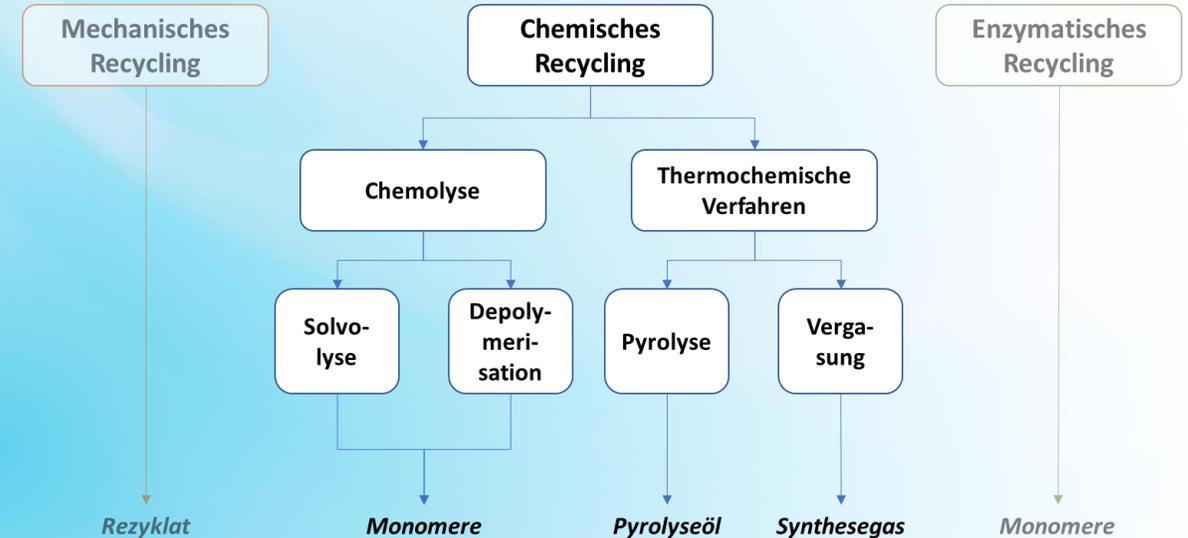
[1] <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/der-grosse-ueberblick-zum-kunststoffrecycling-519.html>, aufgerufen am 21.11.2022.

[2] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

Alternative Rohstoffbasis

Chemisches Kunststoffrecycling

- Mögliche Verwertung verschmutzter sowie nicht-sortenreiner Abfallfraktionen.^[1]
- In der Chemolyse wird der Kunststoffabfall durch Lösungsmittel (Solvolyse) oder Energiezufuhr (Depolymerisation) in Monomere gespalten.^[2]
- Thermochemische Verfahren eignen sich für komplexe Abfallfraktionen. Unter Sauerstoffmangel können Öle und Gase (Pyrolyse) oder Synthesegas (Vergasung) erzeugt werden.^[1-3]
- Wasserstoffbedarfe können bei der Aufarbeitung der Produkte anfallen.^[1, 3]



[1] DECHEMA/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

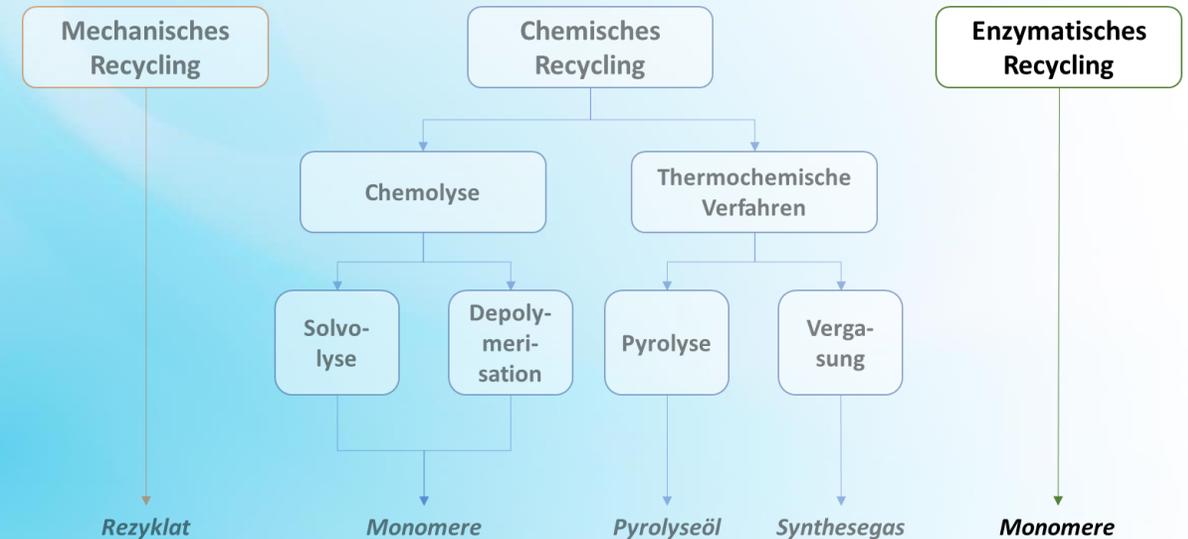
[2] <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/der-grosse-ueberblick-zum-kunststoffrecycling-519.html>, aufgerufen am 21.11.2022.

[3] VCI, Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling - neue Verfahren und Konzepte, 2021.

Alternative Rohstoffbasis

Enzymatisches Kunststoffrecycling

- Kunststoffrecycling durch den Einsatz von Enzymen.
- Zerlegung der Polymere in ihre Monomere kann für ausgewählte Polymerabfälle, z.B. PET, erfolgen.^[1]
- Enzymatisches Recycling wird mit einem niedrigen bis mittleren TRL eingestuft. Ein erster proof-of-concept wurde erbracht.^[2]



[1] C. Sonnendecker, et al. Low Carbon Footprint Recycling of Post-Consumer PET Plastic with a Metagenomic Polyester Hydrolase, 2021. <https://doi.org/10.1002/cssc.202101062>

[2] <https://www.plastverarbeiter.de/roh-und-zusatzstoffe/solvay-und-carbios-recyclen-pvdc-beschichtete-pet-folien-306.html>, aufgerufen am 03.03.2023.

Defossilisierung der Prozesswärme

Defossilisierung der Prozesswärme

Für Anwendungen in der Chemischen Industrie

	Anwendung	Niedertemperaturniveau	Mitteltemperaturniveau	Hochtemperaturniveau	Anmerkungen
Elektrisch	Wärmepumpe	✓	✓ (bis 300 °C) ^[1]	✗	Hochtemperaturwärmepumpen (bis zu 300 °C) sind in der Entwicklung. ^[1] Eine Leistungszahl über 1 ist möglich. ^[2]
Elektrisch	(Dampf-)Elektrodenkessel	✓	✓ (bis 300 °C) ^[2]	✗	Widerstandsheizung, daher Wirkungsgrad ≤ 100%
Elektrisch	Elektrischer Cracker	✓	✓	✓	Befindet sich im Teststadium ^[3]
Biomasse	Energetische Nutzung	✓	✓	✓	Keine signifikante Steigerung der Biomassennutzung zu erwarten aufgrund von Flächenverfügbarkeit ^[2, 4]
Wasserstoff	Beimischung zu Erdgas	✓	✓	✓	Beimischung bis 20vol% in bestehenden Anlagen möglich ^[1]
Wasserstoff	Wasserstoff-Brenner	✓	✓	✓	Wasserstoffbrenner sind in der Entwicklung. ^[1]
Biomethan/ synth. Methan	Energetische Nutzung	✓	✓	✓	Einsatz möglich, aber v.a. für synth. Methan müssen die hohen Kosten berücksichtigt werden ^[1]

Anmerkung: Im Rahmen von Expert:innen-Interviews und Diskussionsrunden wurde deutlich, dass in der Chemischen Industrie noch keine klare Präferenz bzgl. der Bereitstellung von Wärme auf Mittel- oder Hochtemperaturniveau zu erkennen ist.

[1] https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/03/20220908_cobra-unterstuetzt-waermewende-in-der-industrie.html; aufgerufen 13. 02.2023.

[2] IN4climate.NRW GmbH (Hrsg.), Industriewärme Klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation, 2021.

[3] <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>; aufgerufen 01.09.2022.

[4] V. Lenz, et al., Status and Perspectives of Biomass Use for Industrial Process Heat for Industrialized Countries, 2020.

Auslagerung der Produktion

Produktionskapazität

Verlagerung ins Ausland



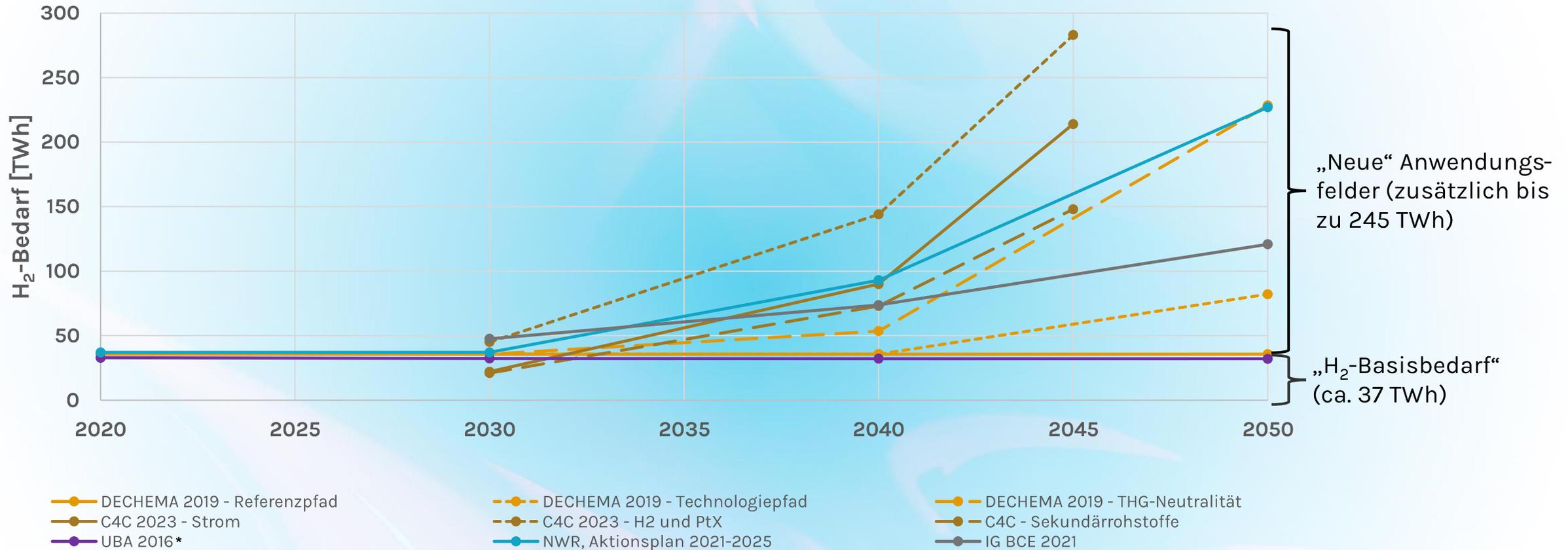
Alexey Lesik - stock.adobe.com

- Senkung des inländischen Energiebedarfs, insbesondere von erdgasintensiven Prozessen.
- Es kann auf bestehenden Handelsstrukturen aufgebaut werden.
- Chemische Wertschöpfungsketten müssen berücksichtigt werden. Denn die Auslagerung von Produktionskapazitäten kann enorme Auswirkungen auf nachfolgende Prozessketten haben!
- Carbon Leakage muss vermieden werden!

Wasserstoff- Mengengerüste

Wasserstoffmengenengerüste

Zukünftige Bedarfe der Chemischen Industrie



[DECHEMA 2019] DECEMA und FutureCamp, Roadmap Chemie 2050, 2019.

[C4C 2023] VCI und VDI, Wie die Transformation der Chemie gelingen kann, 2023.

[NWR] NWR, Aktionsplan 2021-2025, 2021.

[IG BCE 2021] IG BCE, Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa, 2021.

[UBA 2016] UBA, Klimaschutz und regenerativ erzeugte chemische Energieträger, 2016.

* UBA 2016 berücksichtigt nur Ammoniak und Methanol.

Wasserstoff-Mengengerüste

Zukünftige Bedarfe der chemischen Industrie

- Deckung des „H₂-Basisbedarfs“, welcher v.a. auf der Ammoniak- und Methanolerzeugung basiert (~37 TWh).
- Der Wasserstoffbedarf steigt zusätzlich durch „neue Anwendungen“ um bis zu 245 TWh:
 - Erzeugung von Synthesegas aus Elektrolyse-Wasserstoff für die weitere stoffliche Nutzung, bspw. für synthetisches Naphtha oder neue Methanol-Routen
 - Wasserstoff oder synthetisches Methan in der Wärmebereitstellung für Prozesse, die nicht elektrifizierbar sind.
 - Aufarbeitung von Pyrolyse-Produkten oder biogenen Rohstoffen mittels Hydrierung.

Wasserstoff-Mengengerüste

Beeinflussung des Wasserstoffbedarfs

- Der Wasserstoffbedarf fällt höher aus, je mehr auf CO₂-basierte Prozessrouten (FT-Synthese oder Methanol-to-X) gesetzt wird.
- Der Wasserstoffbedarf fällt niedriger aus, wenn vermehrt auf Biomasse oder Kunststoffabfälle als Rohstoffe anstelle der oben genannten CO₂-basierten Routen gesetzt wird. Insbesondere für die Biomasse sind allerdings starke Nutzungskonkurrenzen aufgrund begrenzter Verfügbarkeiten zu erwarten.
- Der Wasserstoffbedarf fällt niedriger aus, wenn Prozesswärme, insbesondere im Mittel- und Hochtemperaturbereich elektrisch bereitgestellt werden kann.

Roundtables zu Raffinerien und der chemischen Industrie

Roundtables

Format



- Gemeinsame Diskussionsrunden mit Expert:innen aus dem Raffinerie- und Chemiebereich aufgrund der engen Verknüpfung der beiden Industrien.
- Beteiligt waren Vertreter:innen von Verbänden, Gesellschaften und Industriefirmen.
- Das Ziel war die Validierung der zusammengetragenen Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Kompass sowie das Erstellen eines Meinungsbildes bzgl. offener Fragen und blinder Flecken.
- Nachfolgend sind die Kernaussagen dargestellt.

Roundtables

Rohstoffversorgung und Resilienz

- Es herrscht ein klarer Konsens, dass sowohl die Methanol-Routen als auch die Fischer-Tropsch-Routen zukünftig Verwendung finden werden. Die Frage ist nur, in welchem Verhältnis.
- Koppel- und Nebenprodukte wurden bisher zu wenig betrachtet und es gibt oftmals keine klaren Lösungen, z.B. für Aromaten, Schwefel oder Bitumen (letztere für Raffinerien relevant).
- Die Biomassenutzung ist limitiert und logistische Aspekte bei der Nutzung von Biomasse (Transport/Lagerung) würden oft vernachlässigt.
- Deutschland werde auch zukünftig auf Importe angewiesen sein (Rohstoffe/Strom).
- Es gab einen Dissens bzgl. der Auslagerung der energieintensiven Prozesse der chemischen Industrie an Standorte mit besseren Potenzialen für erneuerbare Energien.

Roundtables

Wasserstoff und Wasserstoffderivate

- Der Wasserstoffbedarf der chemischen Industrie hängt stark davon ab, welcher Anteil der Rohstoffbasis zukünftig ausgehend von CO₂ erzeugt wird (Fischer-Tropsch und Methanol-to-X).
- Elektrolysewasserstoff kann problemlos in bestehende Raffinerie- und Chemieanlagen integriert werden. Die einzige Ausnahme stellt der Ersatz des Ammoniak-Dampfreformers dar. Dieser spielt eine wichtige Rolle bei der Wärmeverteilung zwischen Anlagenkomponenten am Standort, so dass ein einfacher Ersatz durch einen Elektrolyseur nicht ausreichend ist.

Roundtables

Infrastruktur

- Die bestehende Infrastruktur (Pipelines/ Strom) soll weitestgehend ausgenutzt werden, aber ein Ausbau der Infrastruktur werde vermutlich benötigt.
- Für Fischer-Tropsch-Crudes können bestehende Infrastrukturen (Transport/ Aufbereitung) genutzt werden. Auch eine Beimischung zu fossilen Crudes ist möglich.
- Die Wärmebereitstellung in der chemischen Industrie ist eine Herausforderung. Nicht alle Prozesse können elektrifiziert werden. Insbesondere Mittel- und Hochtemperaturanwendungen sind davon betroffen.
- Die Schnittstelle zwischen chemischer Industrie und Raffinerie werde oftmals zu wenig betrachtet, bspw. im Hinblick auf die Rohstoffversorgung der chemischen Industrie.

Roundtables

Rahmenbedingungen

- Es müsse eine Anpassung der politischen Rahmenbedingungen erfolgen. Es gibt eine starke Abhängigkeit von Investitionen und administrativen Hürden. Daher werde eine Beschleunigung von Genehmigungsverfahren benötigt. Bspw. wurde ein limitierter Ausbau von elektrischer Anschlussleitungen durch langsame Beantragungsprozesse genannt.
- Es ist aktuell schwierig, rentable Geschäftsmodelle für Wasserstoff-basierte Produkte zu generieren.
- Die Beibehaltung von Technologieoffenheit sei unerlässlich, bspw. bezogen auf die Stromerzeugung oder CO₂-Quellen.

Roundtables

Hochlauf / Skalierung

- Auf dem Energiemarkt gebe es wenig finanziellen Spielraum. Die Gewinnmargen seien gering, da die Preise insbesondere durch Steuern und Abgaben getrieben werden.
- Es darf nicht auf die „beste“ / ideale Lösung gewartet werden. Die deutsche chemische Industrie und die Raffinerien müssen daher parallel zum Aufbau der Import-Routen schnell in eine Skalierung kommen, um wettbewerbsfähig zu bleiben.
- Ein paralleler Ausbau der Erneuerbaren Energien und die Erschließung von alternativen Kohlenstoff-Quellen ist unerlässlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

- Die chemische Industrie ist durch ihre Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen aktuell ein emissionsintensiver Industriezweig. Dies resultiert insbesondere aus der energetischen und stofflichen Nutzung der fossilen Rohstoffe sowie den Emissionen am Lebensende der Produkte.
- Die chemische Industrie zeichnet sich durch komplexe und miteinander verbundene Wertschöpfungsketten aus. Dadurch wirkt sich die Substitution eines Prozess(-schritts) oftmals auch auf die nachfolgende Prozesskette aus.
- Das Zusammenspiel verschiedener Handlungsoptionen unterstützt den Transformationsprozess der chemischen Industrie. Allerdings gibt es immer noch ungeklärte Fragestellungen, bspw. die Bereitstellung von Prozesswärme auf Mittel- und Hochtemperaturniveau.

Zusammenfassung und Ausblick

- Die Umstellung der chemischen Industrie wird zu einem steigenden Wasserstoffbedarf führen. So könnte der heutige Bedarf von ca. 37 TWh auf bis zu 283 TWh für die chemische Industrie im Jahr 2050 steigen (und entsprechende Bedarfe an grünem Strom nach sich ziehen).
- Der steigende Wasserstoff-Bedarf wird v.a. folgenden Anwendungen zugeschrieben:
 - Der Deckung des „H₂-Basisbedarfs“, welcher aktuell über fossile Rohstoffe bedient wird.
 - Neue stoffliche Anwendungen zum Ersatz fossiler Rohstoffe, bspw. Fischer-Tropsch-Synthese und Ausbau der Methanol-to-X Prozesse
 - Der Einsatz von Wasserstoff oder synthetischem Methan in der Wärmebereitstellung
 - Die Aufarbeitung biogener Produkte oder Pyrolyseöle aus der thermischen Behandlung von Kunststoffabfällen und biogenen Reststoffen mittels Hydrierung

Bei einer großflächigen Transformation bietet sich so die Chance, eine weitestgehende Klimaneutralität der chemischen Industrie zu erreichen.

Glossar

Begriff	Erläuterung
Alkane	Alkane sind nicht-zyklische, gesättigte Kohlenwasserstoffe. D.h. sie bestehen nur aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und weisen nur Einfachbindungen auf, z.B. Ethan ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$).
Alkene (= Olefine)	Alkene sind nicht-zyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe. D.h. sie bestehen nur aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und weisen mindestens eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung auf, z.B. Ethen bzw. Ethylen ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$).
Alkine	Alkine sind nicht-zyklische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe. D.h. sie bestehen nur aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und weisen mindestens eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Dreifachbindung auf, z.B. Ethin ($\text{HC}\equiv\text{CH}$).
Aromaten	Aromatische Moleküle besitzen ein konjugiertes, planares Ringsystem mit delokalisierten Elektronen. Dies bedeutet, dass in einem Aromaten nicht zwischen Einfach- und Doppelbindung unterschieden werden kann. Der bekannteste Vertreter der Aromaten ist Benzol.
CO₂-Budget	Im Kontext von Klimaschutzmaßnahmen wird oft von einem CO ₂ -Budget gesprochen. Das ist die Menge CO ₂ , die maximal noch emittiert werden darf, um im Rahmen einer gewissen Wahrscheinlichkeit die globale Erwärmung auf ein bestimmtes Niveau zu begrenzen.
Crude	Unter einem Crude versteht man ein nicht-aufbereitetes Kohlenwasserstoffgemisch.

Begriff	Erläuterung
Dehydrierung	Unter Dehydrierung versteht man die Abspaltung von Wasserstoff aus einer chemischen Verbindung. Beispielsweise entsteht Ethen ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) bei der Dehydrierung von Ethan ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$).
Erdgasdampf-reformierung	Erdgasdampfreformierung (engl. <i>Steam methane reforming, SMR</i>) beschreibt ein Verfahren, bei dem Erdgas, primär Methan (CH_4), unter Zugabe von Wasserdampf (H_2O) bei hohen Temperaturen von bis zu $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ zu Synthesegas ($\text{CO} + \text{H}_2$) umgesetzt wird.
Erneuerbare Energien	Unter erneuerbaren Energien versteht man Energiequellen, welche im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung quasi unbegrenzt zur Verfügung stehen (Windkraft, Sonnenenergie, Wasserkraft, Biomasse, Geothermie).
Fischer-Tropsch Synthese	In der Fischer-Tropsch (FT-)Synthese wird Synthesegas zu einem Gemisch aus Kohlenwasserstoffen (FT-Crude) umgesetzt. Das Produkt-Spektrum enthält Flüssiggase, Benzin, Kerosin, Weich- und Hartparaffine. Die Verteilung des Produktspektrums wird durch Katalysatoren und Prozessparameter beeinflusst.
Haber-Bosch-Verfahren	Das Haber-Bosch-Verfahren ist ein großindustrielles Verfahren für die Erzeugung von Ammoniak (NH_3) ausgehend von der katalysierten Reaktion von Stickstoff (N_2) und Wasserstoff (H_2). Der Eisen-basierte Katalysator kann leicht durch CO vergiftet werden.
High Value Chemicals	Die Zielprodukte aus der Naphthaspaltung werden auch als High Value Chemicals (HVCs) bezeichnet. Dazu zählen Olefine, z.B. Ethylen, Propylen, oder Aromaten (z.B. Benzol, Toluol und Xylol, auch bekannt als „BTX“).

Begriff	Erläuterung
Methanol-to-X	Unter Methanol-to-X versteht man Prozesse, bei denen Methanol zu weiteren Produkten umgewandelt wird. Dazu zählen Methanol-to-Aromatics (MtA), Methanol-to-Olefines (MtO), Methanol-to-Jet (MtJ) und Methanol-to-Gasoline (MtG).
Monomer	Als Monomere werden in der Polymerchemie Ausgangsstoffe bezeichnet, die über Polyreaktionen, z.B. Kettenpolymerisation oder Polykondensation, zu Polymeren verknüpft werden. Typische Monomere sind bspw. Ethylen oder Propylen.
Naphtha	Fossiles Naphtha ist eine Erdölfraktion (C ₄ - C ₁₀) und ist aktuell der wichtigste stoffliche Rohstoff der chemischen Industrie. Naphtha wird im Steamcracker aufbereitet und in einzelne Produkte (u.a. High Value Chemicals) gespalten.
Polymer (= Kunststoff)	Polymere sind chemische Stoffe, die aus sich wiederholenden Struktureinheiten bestehen.
Pyrolyse	Pyrolyse ist ein thermochemisches Verfahren, bei dem Ausgangsstoffe (z.B. Biomasse, Kunststoffe) unter hohen Temperaturen unter (weitestgehendem) Sauerstoffmangel gespalten werden. Die entstehenden Produkte (z.B. Pyrolyseöle oder Gase) bedürfen teilweise einer weiteren Aufarbeitung mittels Hydrierung.
Rezyklat	Unter Rezyklaten versteht man Produkte des Recyclings, die als Sekundärrohstoffe direkt wieder in der Kunststoffherzeugung verwendet werden können, ohne als Monomer zunächst über Polyreaktionen umgesetzt zu werden.

Begriff	Erläuterung
Steamcracker	Im Steamcracker erfolgt eine Aufspaltung von (längerkettigen) Kohlenwasserstoffen (z.B. Naphtha) in kurzkettige Kohlenwasserstoffe durch Wasserdampf unter hohen Temperaturen. Diese Zwischenprodukte werden dann in weiteren Prozessketten verwendet.
Synthesegas	Unter Synthesegas versteht man ein Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H ₂), welches in unterschiedlichen Verhältnissen vorliegen kann.
Technologie-reife	Mit Hilfe der Technologiereife (engl. <i>Technology Readiness Level, TRL</i>) erfolgt eine Einschätzung des Reifegrads einer Technologie auf einer Skala bis 9. Eine genauere Einstufung findet sich hier .
Vergasung	Unter Vergasung versteht man die thermochemische Umwandlung, bspw. von Biomasse oder Kunststoffabfällen, zu einem Synthesegas. Vergasung erfolgt meist unter sauerstoff-/luftarmen Bedingungen, um die vollständige Verbrennung inklusive CO ₂ -Erzeugung zu vermeiden.
Wassergas-Shift-Reaktion	In der Wassergas-Shift Reaktion erfolgt die katalysierte Umsetzung von Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasser (H ₂ O) zu Kohlenstoffdioxid (CO ₂) und Wasserstoff (H ₂). Diese Reaktion spielt eine wichtige Rolle bei der Reduktion des CO-Anteils bei gleichzeitiger Erhöhung des H ₂ -Anteils, bspw. in der Ammoniakproduktion.

Kontakt

Ansprechpartner:

Dr. Dominik Blaumeiser
dominik.blaumeiser@dechema.de

Dr. Jens Artz
jens.artz@dechema.de

www.wasserstoff-kompass.de

Herausgeber:



Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
info@dechema.de
www.dechema.de



Pariser Platz 4a
10117 Berlin
info@acatech.de
www.acatech.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages