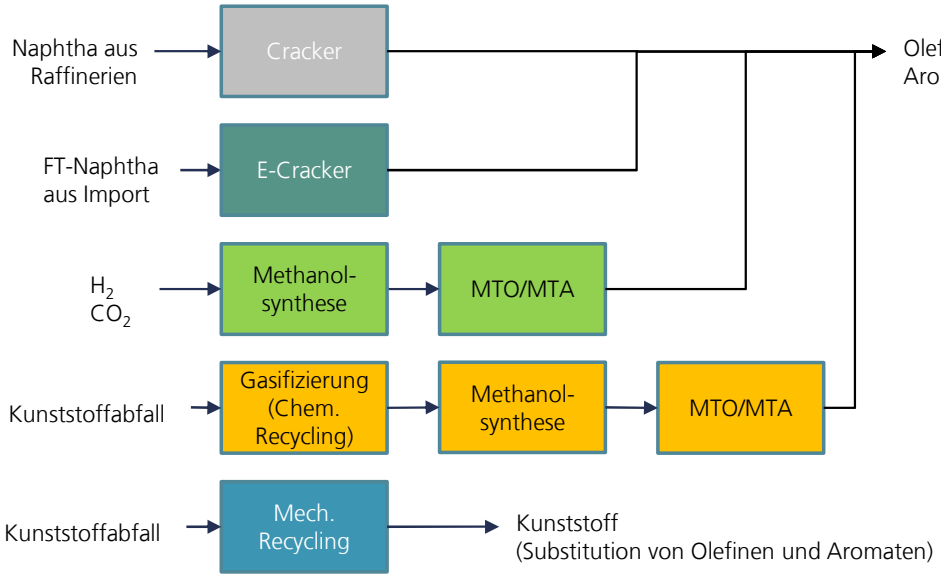
LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND (LFS4)

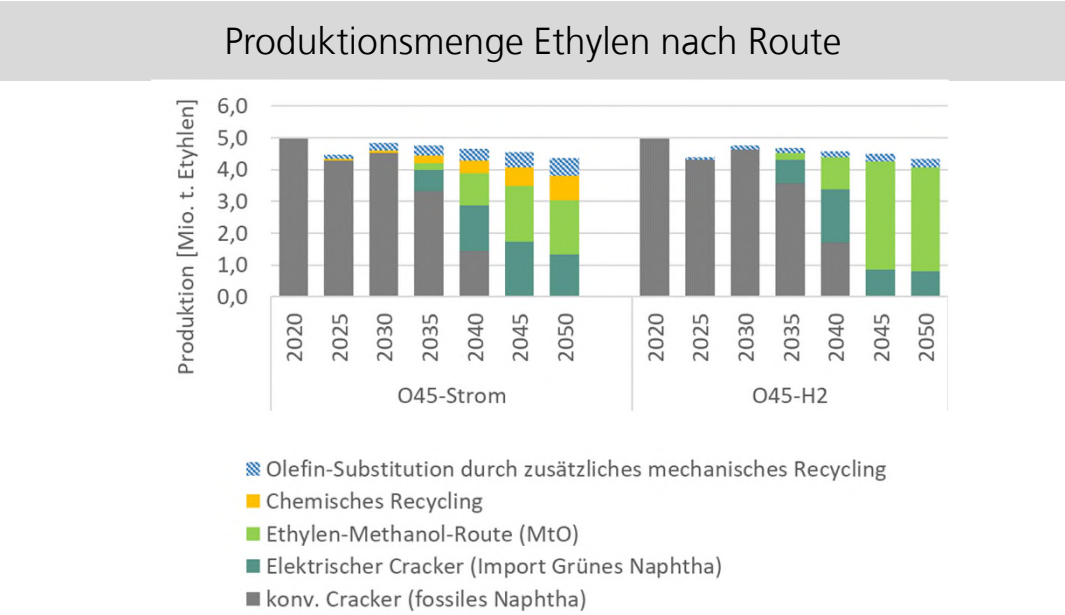
Vorstellung Vorabanalysen | 18.11.2025

Transformationspfade Chemieindustrie

Simon Lukas Bussmann, Matthias Rehfeldt, Marius Neuwirth, Tobias Fleiter

Ausgangslage – Bisherige Annahmen in den LFS III: Neue Routen verdrängen fossiles Naphtha

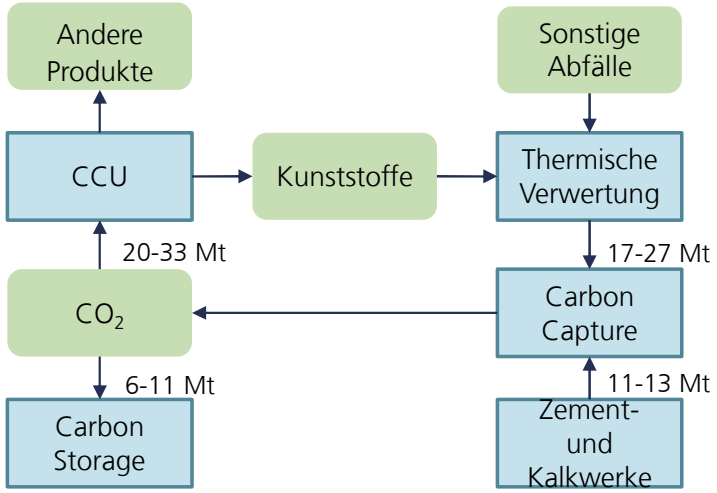




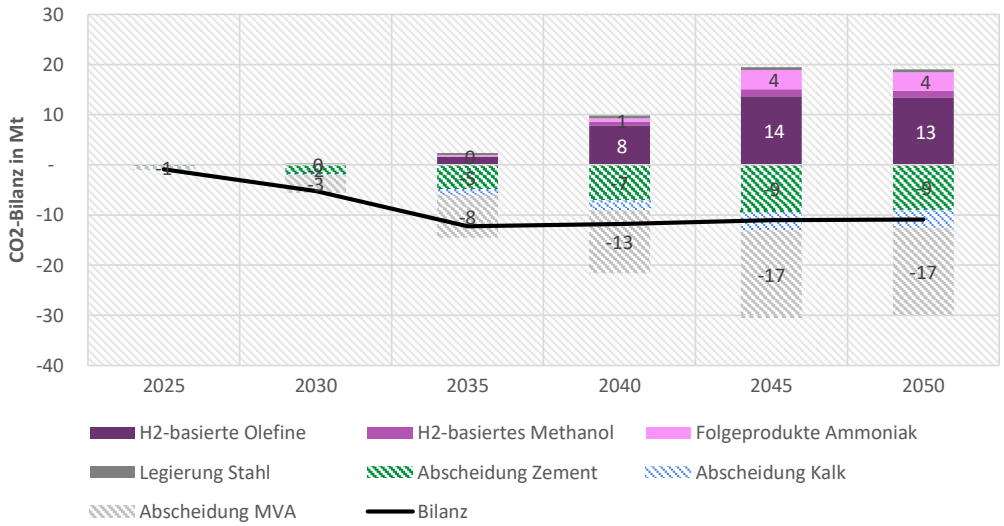
- In den LFS gehen wir bisher von einer vollständigen Verdrängung von fossilen Feedstocks aus
- Der Anteil importierter und in Deutschland produzierter Feedstocks variiert zwischen den Szenarien
- Getroffene Annahmen sind in Einklang mit Roadmaps des VCI
- Biomasse wurde bisher in den LFS der Industrie nur in geringen Mengen zugeteilt, um den Einsatz zusätzlicher Biomasse wegen Nachhaltigkeits-Bedenken zu minimieren

Ausgangslage – Bisherige Annahmen in den LFS III: Abgeschiedenes CO_2 wird Rohstoff

CO_2-Kreislauf in 2045 (O45-Strom und O45-H2)
(stark vereinfachte Darstellung)



CO_2-Bedarf und -Quellen (O45-Strom)



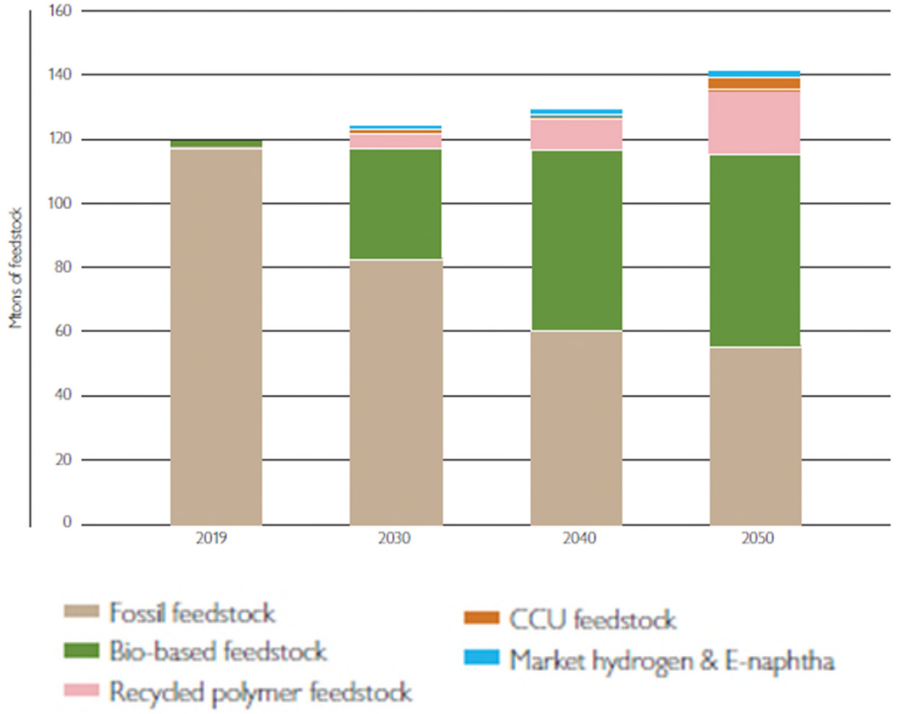
- CO_2 wird möglichst als Rohstoff genutzt
- Zementwerke, Kalkwerke und MVAs als CO_2 -Quellen
- Chemiestandorte als CO_2 -Senken
- CO_2 -Speicherung für restliche Emissionen

Aktuelle Analysen sehen eine stärkere Rolle von Biomasse und fossilen Feedstocks

Aktuelle Roadmap der europäischen Chemieindustrie zeigt alternative Wege auf:

- Eine weitere Nutzung von fossilen Feedstocks wird nicht ausgeschlossen
- Durch Abscheidung von CO_2 an Müllverbrennungsanlagen und Recycling wird eine Freisetzung des fossilen CO_2 verhindert
- Biomasse spielt eine wichtige Rolle und kompensiert Restemissionen
  - CEFIC nimmt in diesem Szenario an, dass sich die Verfügbarkeit von Biomasse verglichen zur jetzigen Nutzung in der EU bezogen auf den Energiegehalt verdreifacht und zu großen Teilen der chemischen Industrie zur Verfügung steht
  - Biomasse spielt in den Roadmaps vieler Industrien eine wichtige Rolle

CEFIC „The Carbon Managers“ (2024): Entwicklung des Feedstock-Einsatzes in der Grundstoffchemie



CEFIC The Carbon Managers (Dez 2024)

Umstellung des Verkehrssektors hat erhebliche Auswirkungen auf Petrochemie

- Zurzeit wird Naphtha zusammen mit Treibstoffen in Raffinerien produziert
- Defossilisierung des Verkehrs könnte zu einem Rückgang der Naphthaproduktion führen
- Roadmaps vernachlässigen bisher die Verbindung zum Verkehrssektor in Raffinerien
- In den LFS III wird angenommen, dass der gesamte Treibstoffbedarf aus importierten erneuerbaren Kraftstoffen gedeckt wird
- Mit dem Wechsel zu erneuerbaren Treibstoffen ist die Produktion von fossilen Treibstoffen in Deutschland unwahrscheinlich
- Deutsche Raffinerien müssten sich komplett auf die chemische Industrie fokussieren
- Der Import von fossilem Naphtha aus der Herstellung von fossilen Treibstoffen für andere Länder ist unwahrscheinlich, da weltweit eine sinkende Nachfrage nach fossilen Treibstoffen und eine steigende Nachfrage nach Kunststoffen erwartet wird
  - Fossiles Naphtha würde dann wahrscheinlich dort weiterverarbeitet werden, wo es gewonnen wird
- Bei einer Herstellung von FT-Treibstoffen im Ausland könnte als Nebenprodukt gewonnenes Naphtha zu Benzin weiterverarbeitet werden oder für die Chemische Industrie in Deutschland genutzt werden

Mögliche Energie- und Feedstockflüsse in einer auf Olefine ausgelegten Raffinerie

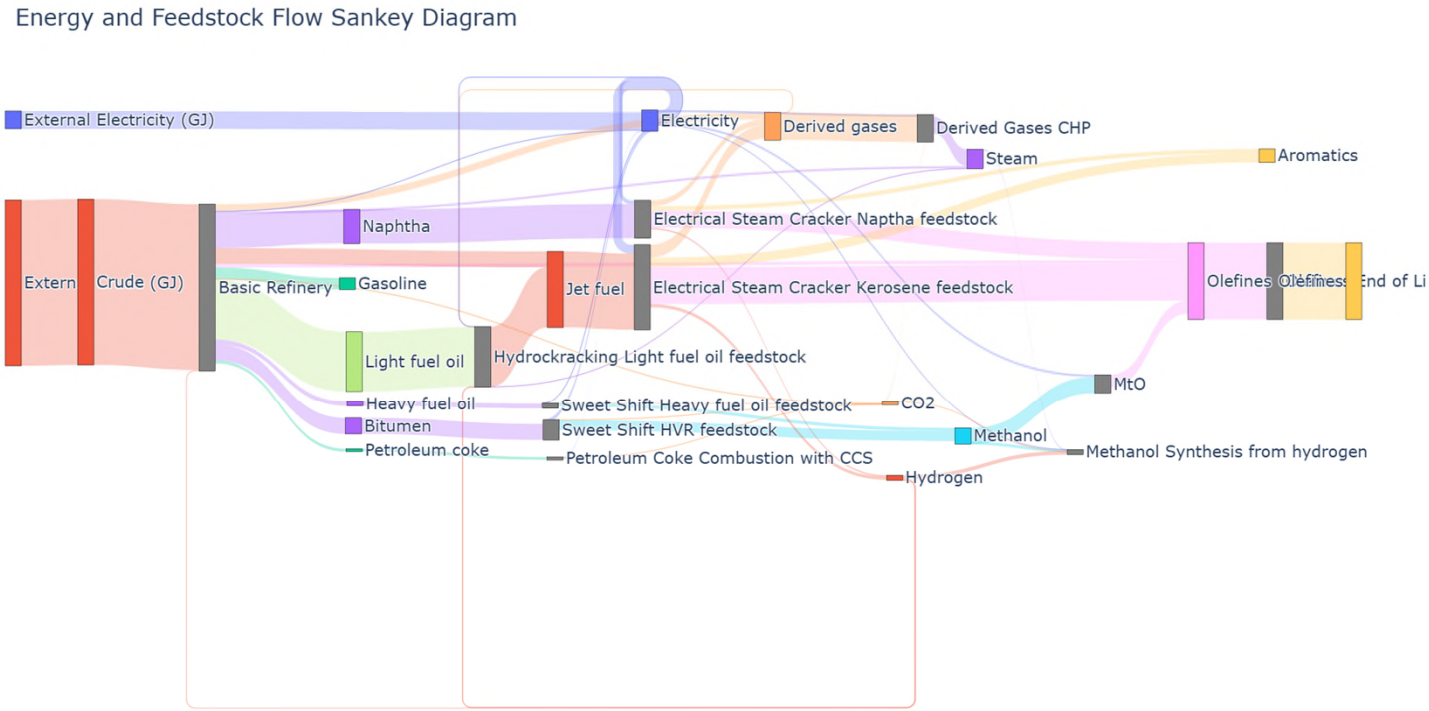
Durch Verfahren wie

- Hydrocracking
- Fluid, catyltic cracking (FCC)
- Katalytische Reformierung
- Gasifizierung von Nebenprodukten
- Katalytisches Cracking

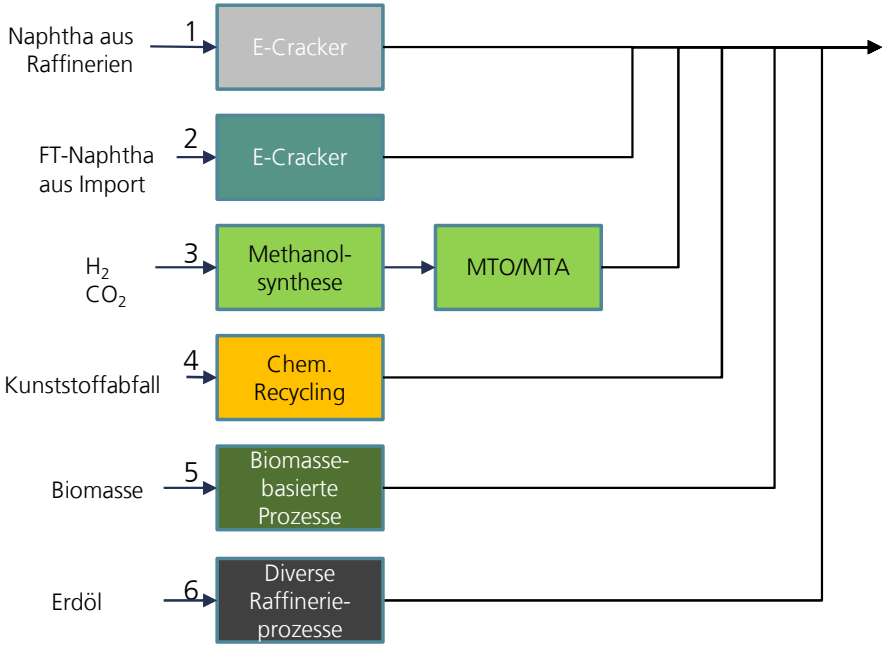
könnten sich Raffinerien auf die Produktion von Olefinen und Aromaten konzentrieren (Crude to chemicals)

Dies ist Energieintensiv und setzt eine Anpassung der Prozesse voraus.

International sind erste auf Chemikalien fokussierte Raffinerien gebaut und weitere in Planung.



Zielsetzung: Analyse weiterer Routen



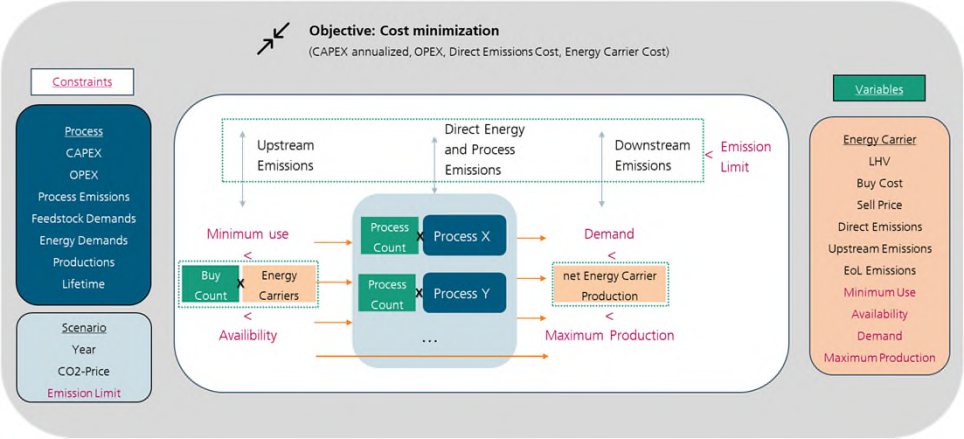
Ziel ist ein besseres Verständnis der Rolle verschiedener Routen, mit einem Fokus auf die **Rolle von fossilem Naphtha und Biomasse.**

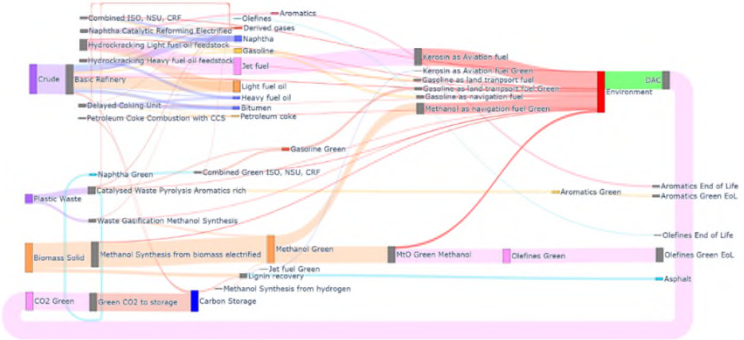
Zu berücksichtigen ist dabei die Verbindung zum Transportsektor in Raffinerien und produktspezifische Unterschiede.

Methodik

1. Ökonomischer Vergleich einzelner isolierter Routen
   - Vergleich der Kosten für die Produktion von Olefinen/Aromaten bei der Verfügbarkeit von bestimmten Feedstocks

2. Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte in Deutschland im Jahr 2045 ohne räumliche und zeitliche Auflösung
   - **Minimierung der Kosten** unter Berücksichtigung von **Nachfrage** und **Energieträgerverfügbarkeit**
   - Berücksichtigung von einer Vielzahl möglicher Prozesse darunter
     - elektrifizierte Prozesse
     - Prozesse mit CCS
   - Analyse der Gesamtkosten, des Energiebedarfs und der Emissionen
   - Analyse der Rolle verschiedener Prozesse im optimierten Gesamtsystem
   - Vergleich von möglichen ETS-Regulierungen



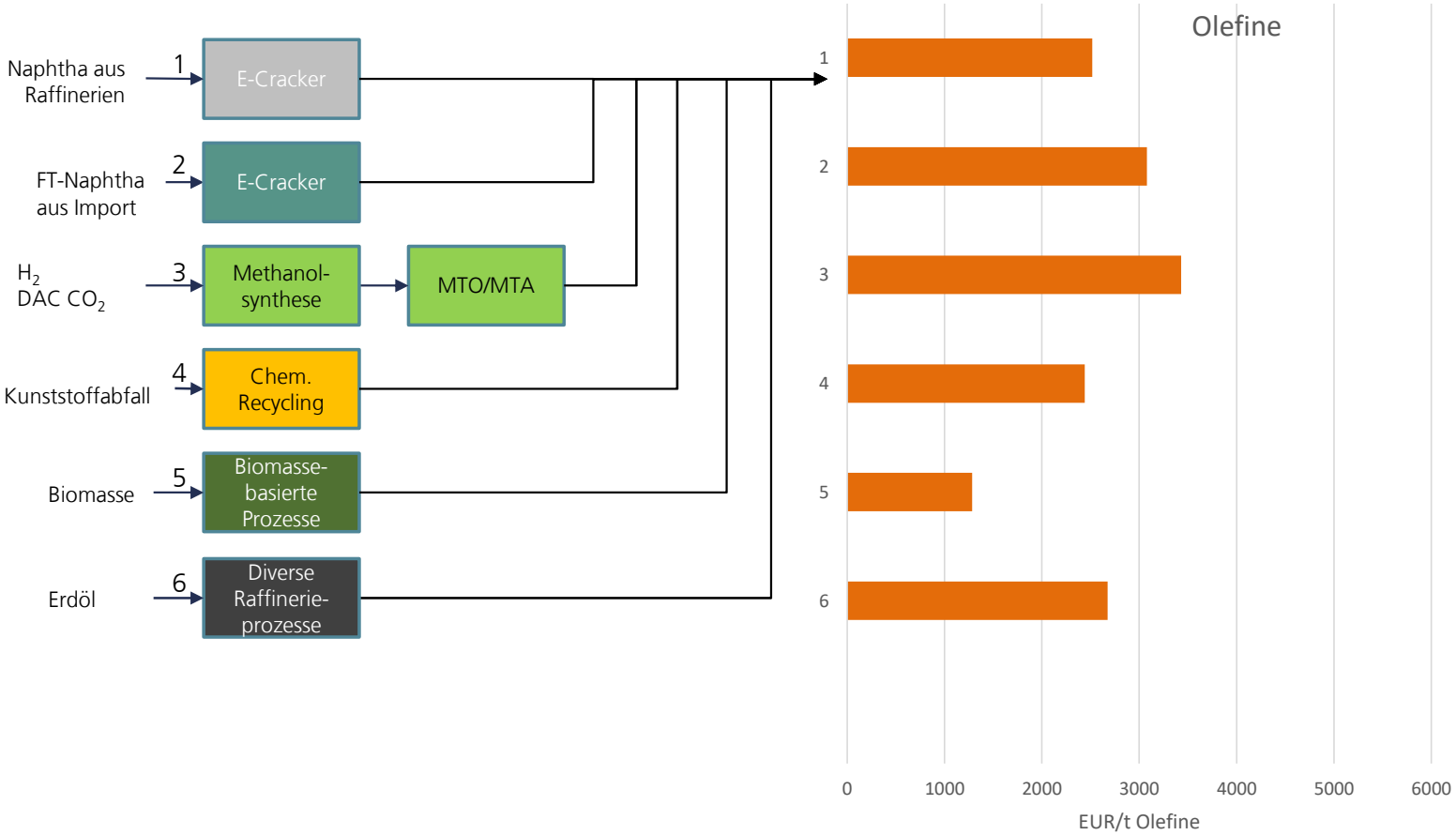


Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Annahmen

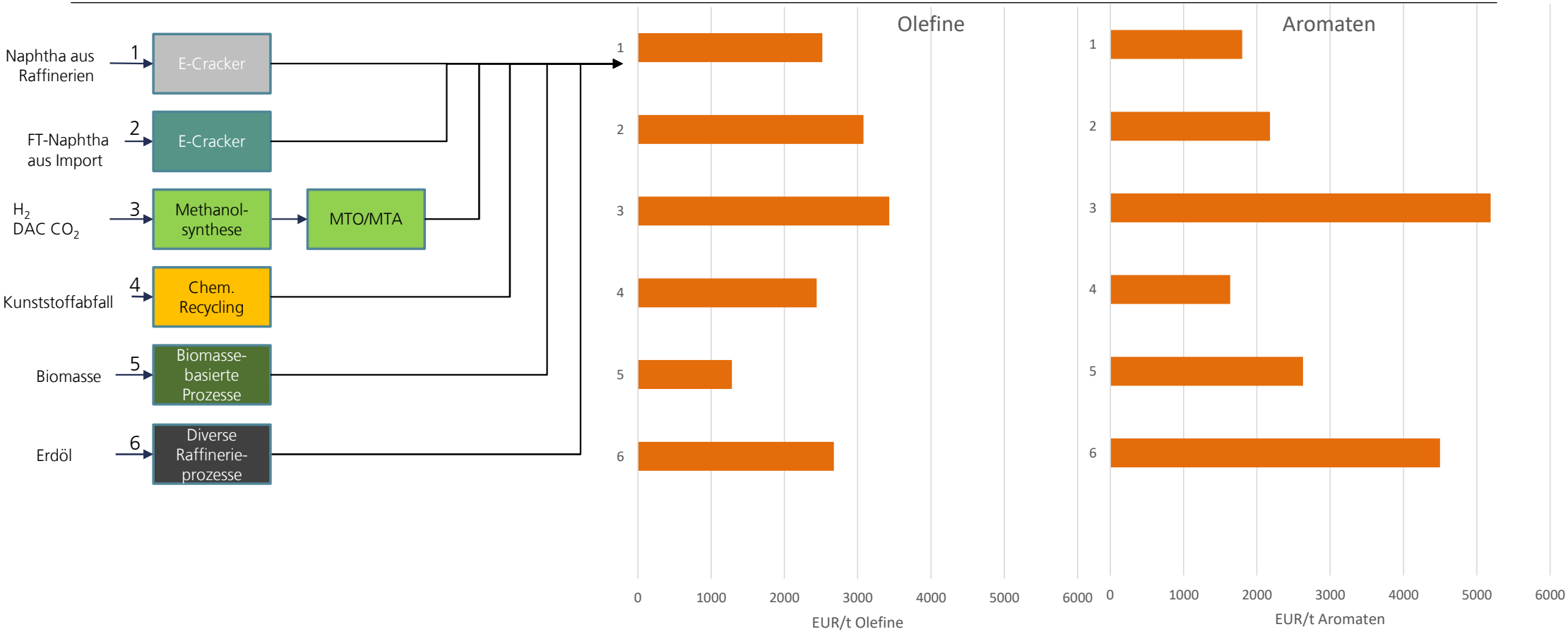
	Preis	Verfügbarkeit in Systembetrachtung	
Naphtha	77 EUR/MWh	0 t	Annahmen basierend auf Literatur und eigenen Analysen
Naphtha Grün	100 EUR/MWh	0 t	
Strom	72 EUR/MWh	Nicht limitiert	
H2	90 EUR/ MWh	Nicht limitiert	
Öl	54 EUR/ MWh	Nicht limitiert	
Biomasse	25 EUR/ MWh	56 TWh	Lediglich Holzartige Reststoffe – aufgrund der limitierten Verfügbarkeit und möglichen Konkurrenzen zur Lebensmittelproduktion wurde zunächst keine Verfügbarkeit von Pflanzenöl, Bioethanol und Stärkehaltigen-Energiepflanzen angenommen Preis basierend auf Importpreis nach JRC Konservative Annahme zum Biomassepotenzial (56 TWh) Vergleich: Bedarf der Chemischen Industrie 2023: 11 TWh; Verkehr 35 TWh
Kunststoff-Abfall	18 EUR/ MWh	44 TWh	Verfügbarkeit von Kunststoffabfall nach mechanischem Recycling aus LFS III
CO2	**250 EUR/t**, 380 EUR/t	Max. Speicherung: 156 Mt	
		Nachfrage	
Flugtreibstoff erneuerbar		128 TWh	Basierend auf LFS III
Schiffstreibstoff erneuerbar		50 TWh	
Straßenverkehrstreibstoff erneuerbar		13 TWh	
Olefine		7,6 Mt	
Aromaten		1,5 Mt	

Ökonomischer Vergleich einzelner isolierter Routen



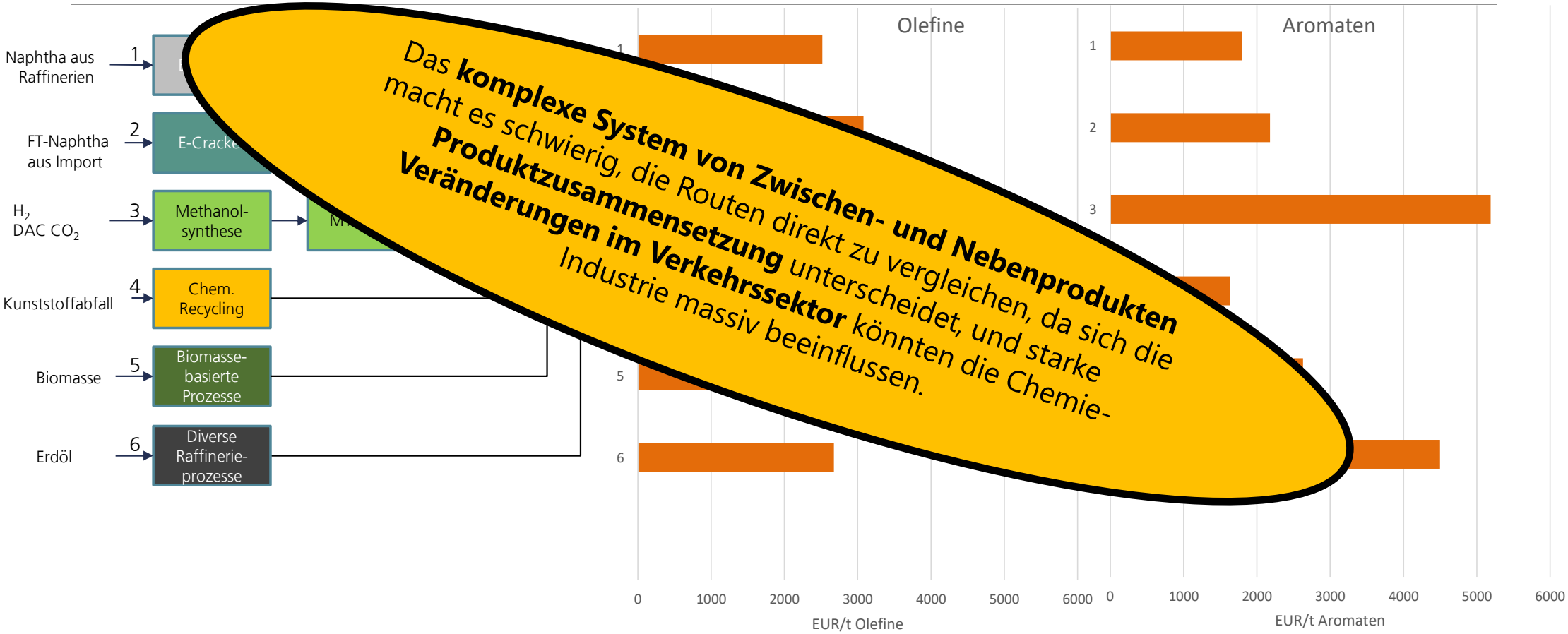
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Ökonomischer Vergleich einzelner isolierter Routen



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Ökonomischer Vergleich einzelner isolierter Routen



Das **komplexe System von Zwischen- und Nebenprodukten** macht es schwierig, die Routen direkt zu vergleichen, da sich die **Produktzusammensetzung** unterscheidet, und starke **Veränderungen im Verkehrssektor** könnten die Chemie-Industrie massiv beeinflussen.

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte

H_2

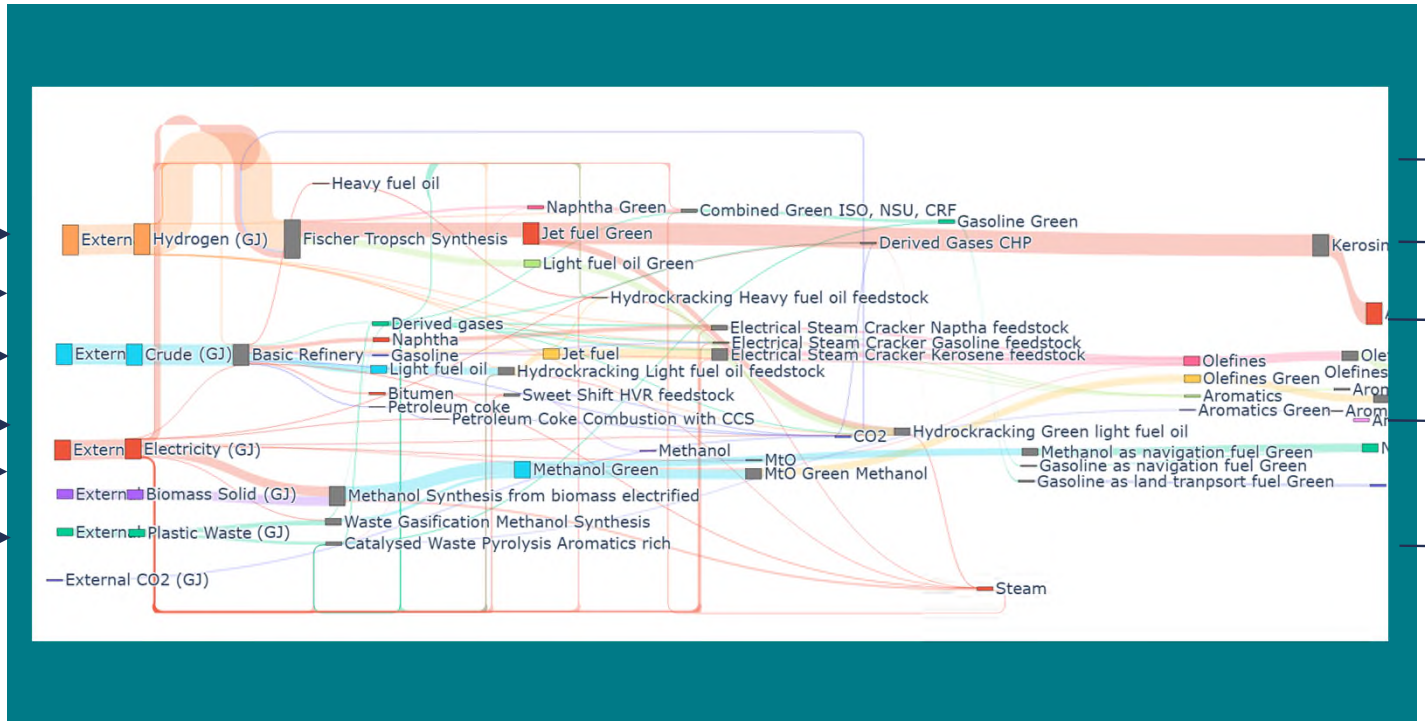
CO_2

Strom

Kunststoffabfall

Rohöl

Biomasse



Olefine

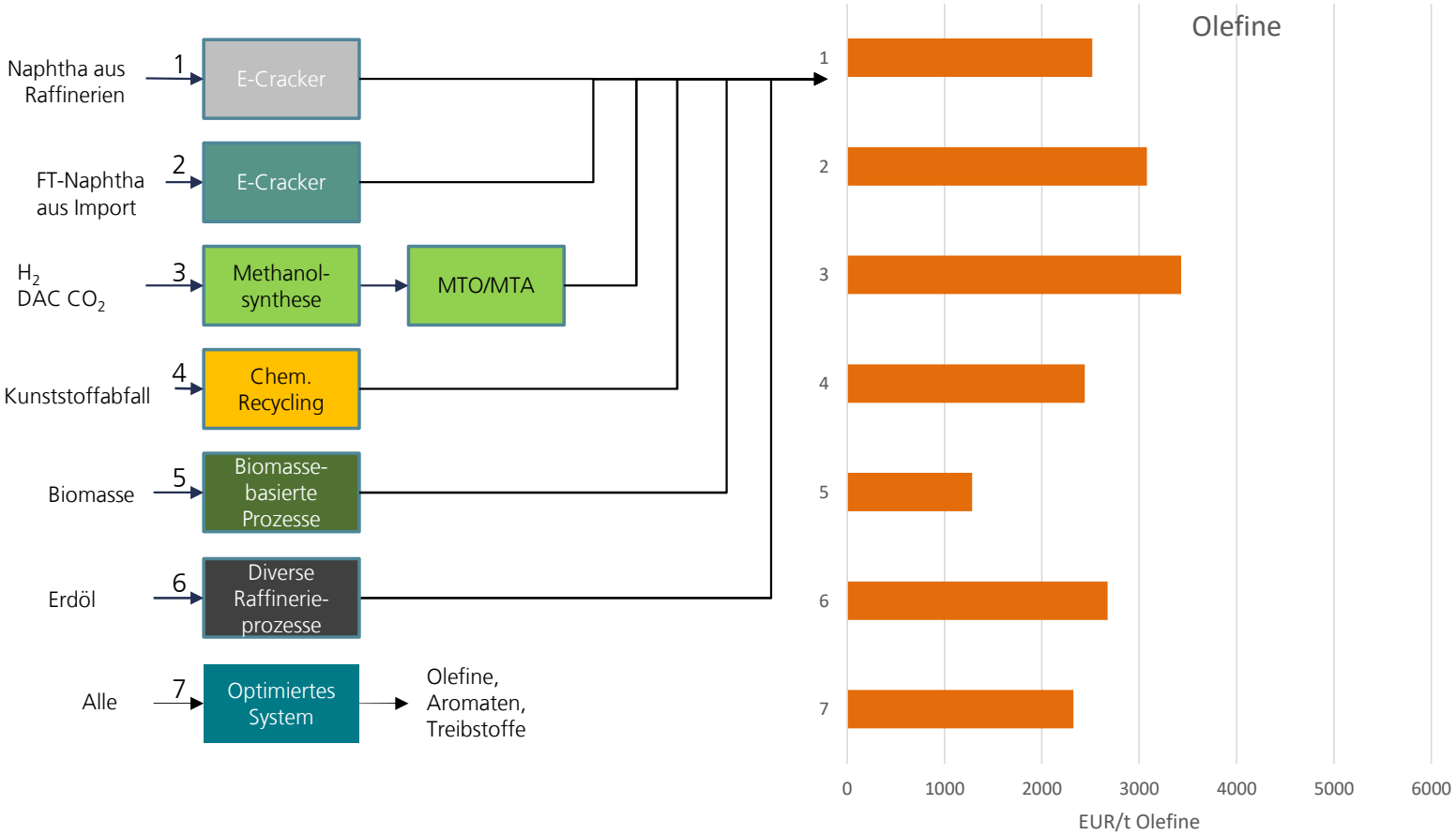
Aromaten

Flugtreibstoff (Kerosin)

Schiffstreibstoff
(Methanol, Diesel, Benzin, Schweröl)

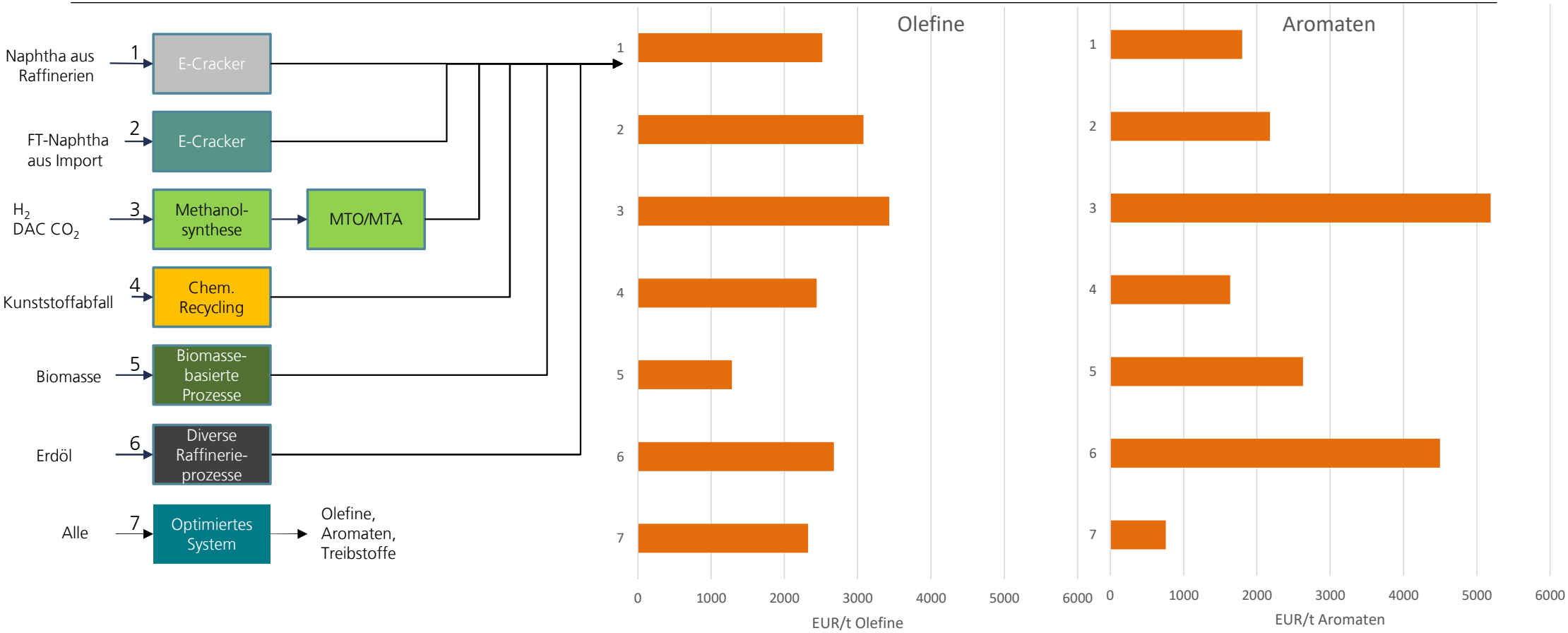
Straßenverkehrstreibstoff
(Diesel, Benzin)

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Grenzkosten



Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

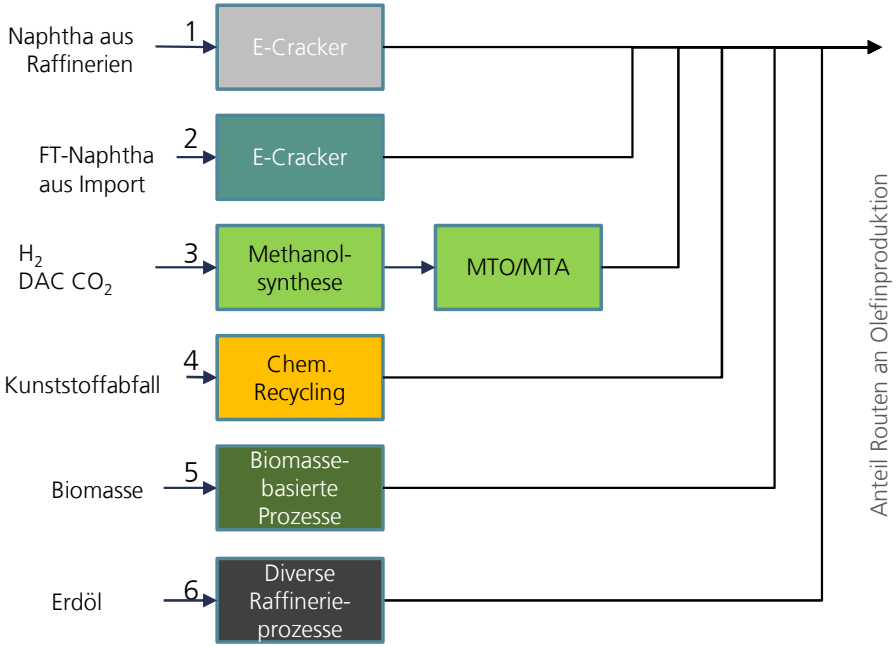
Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Grenzkosten

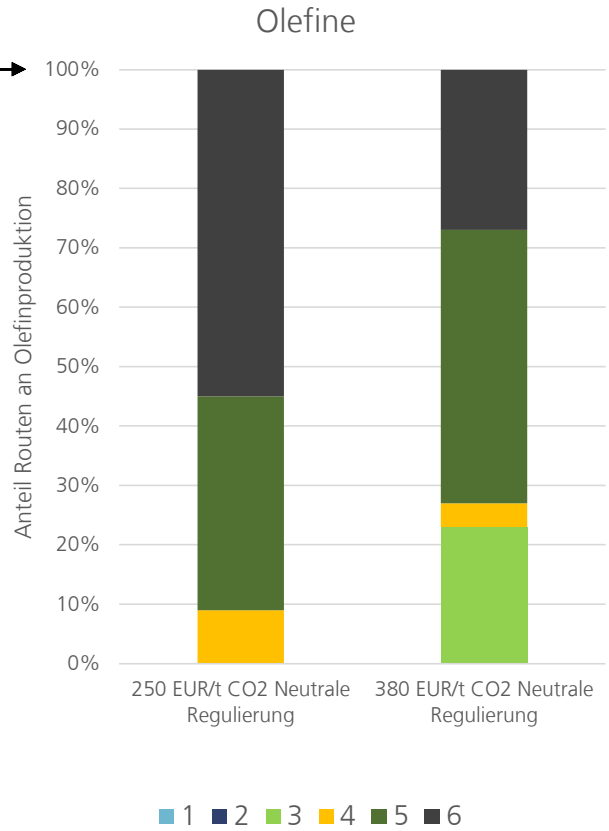


Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

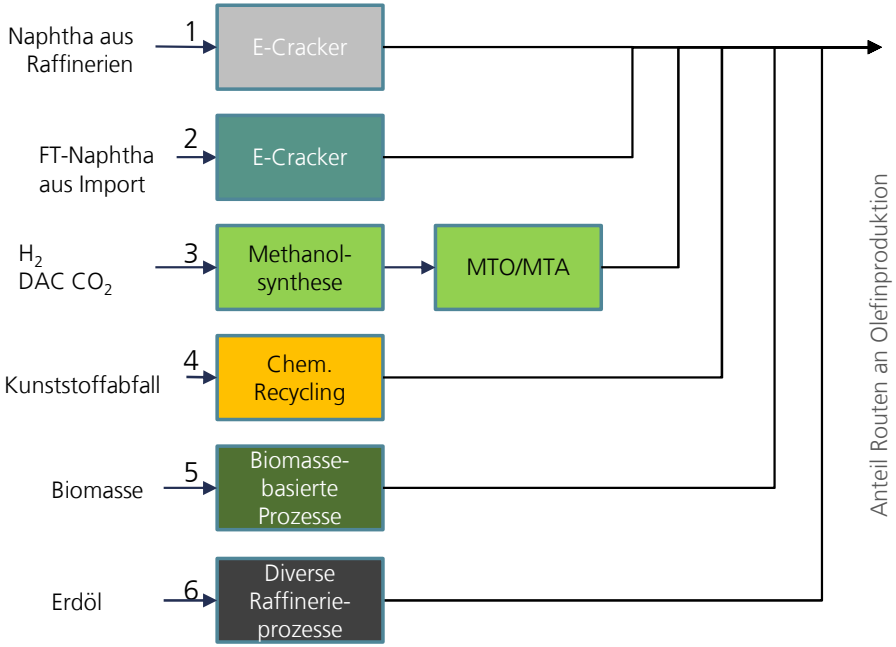
Optimiertes System

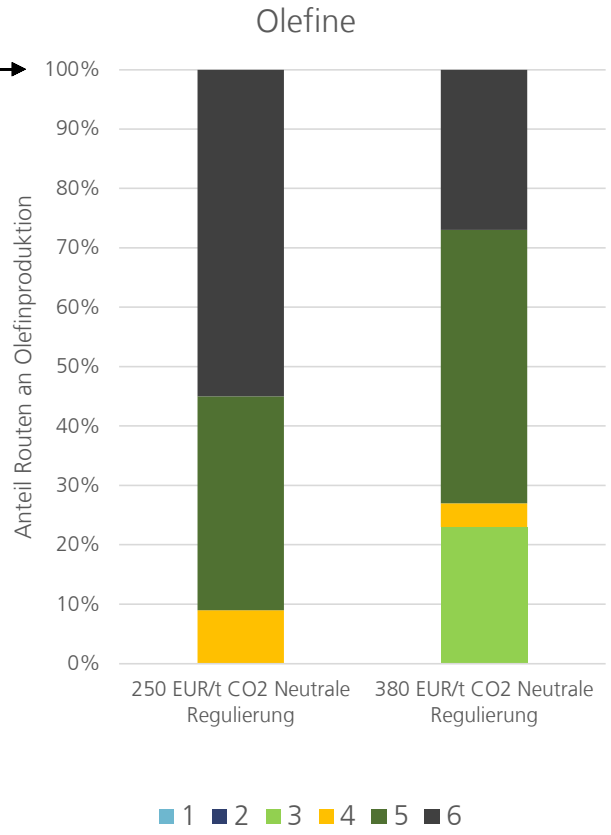
Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte - Routen

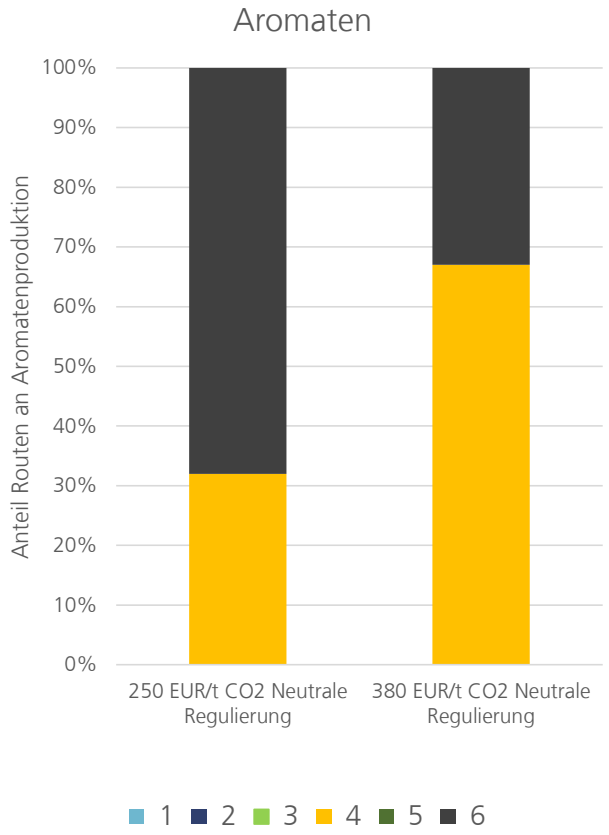




Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte - Routen







Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte - Routen

	CO2-Preis 250 EUR/t	CO2-Preis 380 EUR/t
Kerosin	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch
Straßenverkehr	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch
Schiffverkehr	Biomethanol	Biomethanol
Olefine	Erdölbasiert, Bio-MtO, Chem. Rec.	Erdölbasiert, Bio-MtO, Chem. Rec., CCU (upto 47 TWh H2)
Aromaten	Erdölbasiert, Chem. Rec.	Erdölbasiert, Chem. Rec.

- Der verbleibende Treibstoffbedarf im Flug- und Straßenverkehr wird nicht allein durch den CO2-Preis defossilisiert
- Weitere Instrumente wie Quoten sind für eine defossilisierung im Verkehrssektor unerlässlich
- Vermeidungskosten übersteigen hier die Kosten von DACCS

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte - Routen

		Preis 380 EUR/t
Kerosin		
Straßenverkehr		
Schiffverkehr	Bio	
Olefine	Erdölbasiert, Chem. Rec.	
Aromaten	Erdölbasiert, Chem. Rec.	Erdö

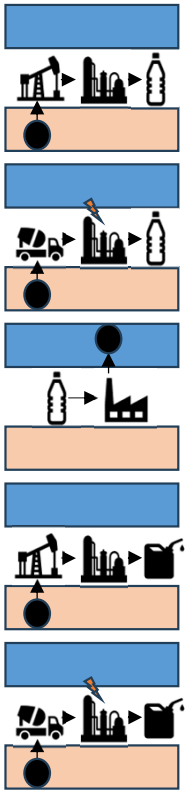
Bisherige Analysen waren unter der Voraussetzung, dass in Produkten gebundenes CO_2 als gebunden anerkannt wird. Im ETS wird zurzeit in Produkten gebundenes CO_2 nicht als gebunden anerkannt.

- Der Flug- und Straßenverkehr wird nicht allein durch den CO2-Preis defossilisiert
- Weitere Instrumente wie Quoten sind für ine defossilisierung unerlässlich
- gskosten übersteigen hier die CCS

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

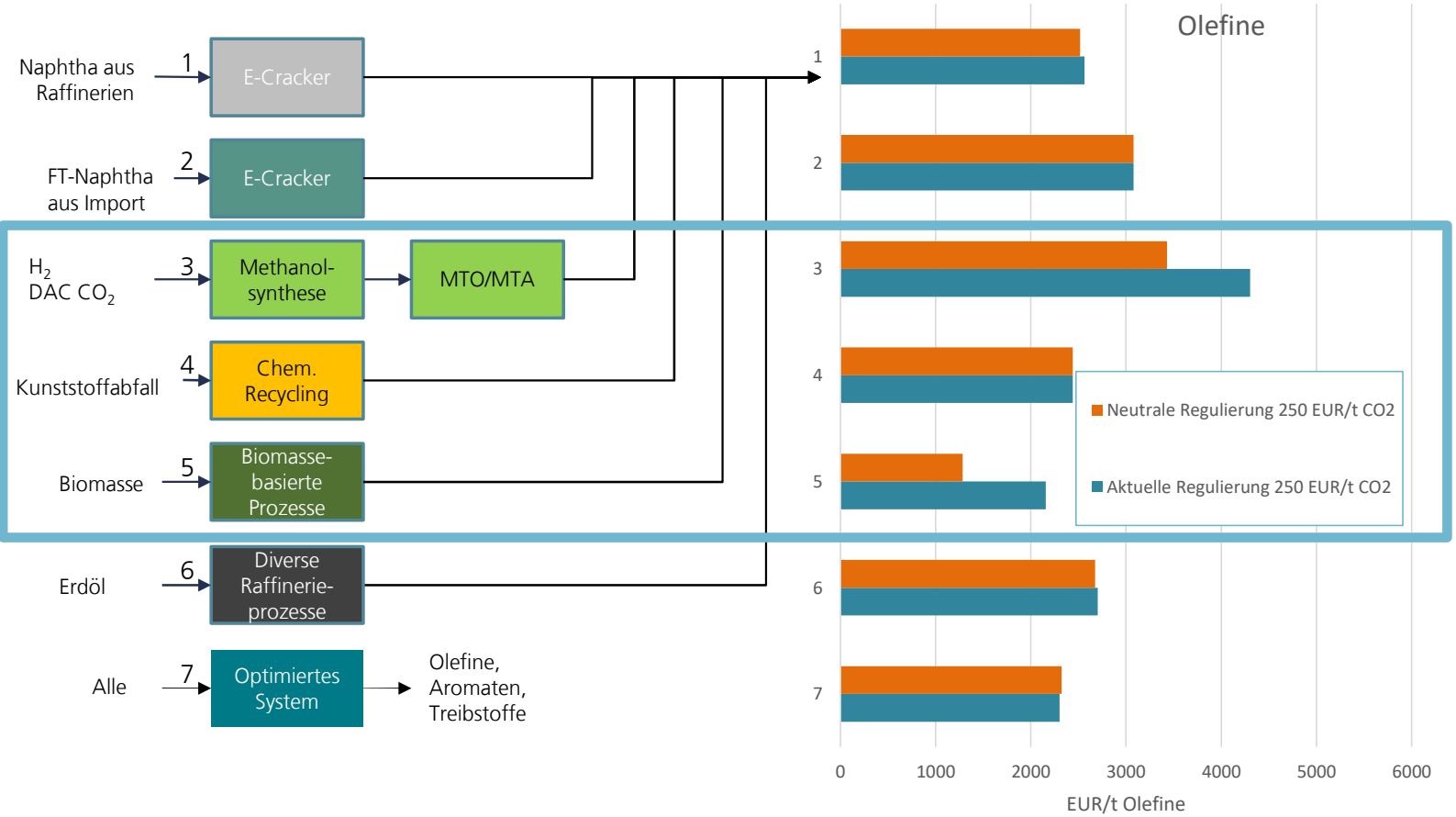
Aktuelle Diskussion zur Berücksichtigung von Feedstocks im ETS

- Bisher wurden in den LFS in Produkten gebundenes CO_2 als Gebunden anerkannt und Emissionen dort angerechnet, wo sie auftreten (neutrale Regulierung)
- Aktuell wird im ETS in Kunststoff gebundenes CO_2 nicht als gebunden anerkannt, dies führt zu einer Benachteiligung gegenüber fossilen Feedstocks
  - CCU wird dadurch lediglich für Treibstoffe angereizt
  - Dies hat auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Routen



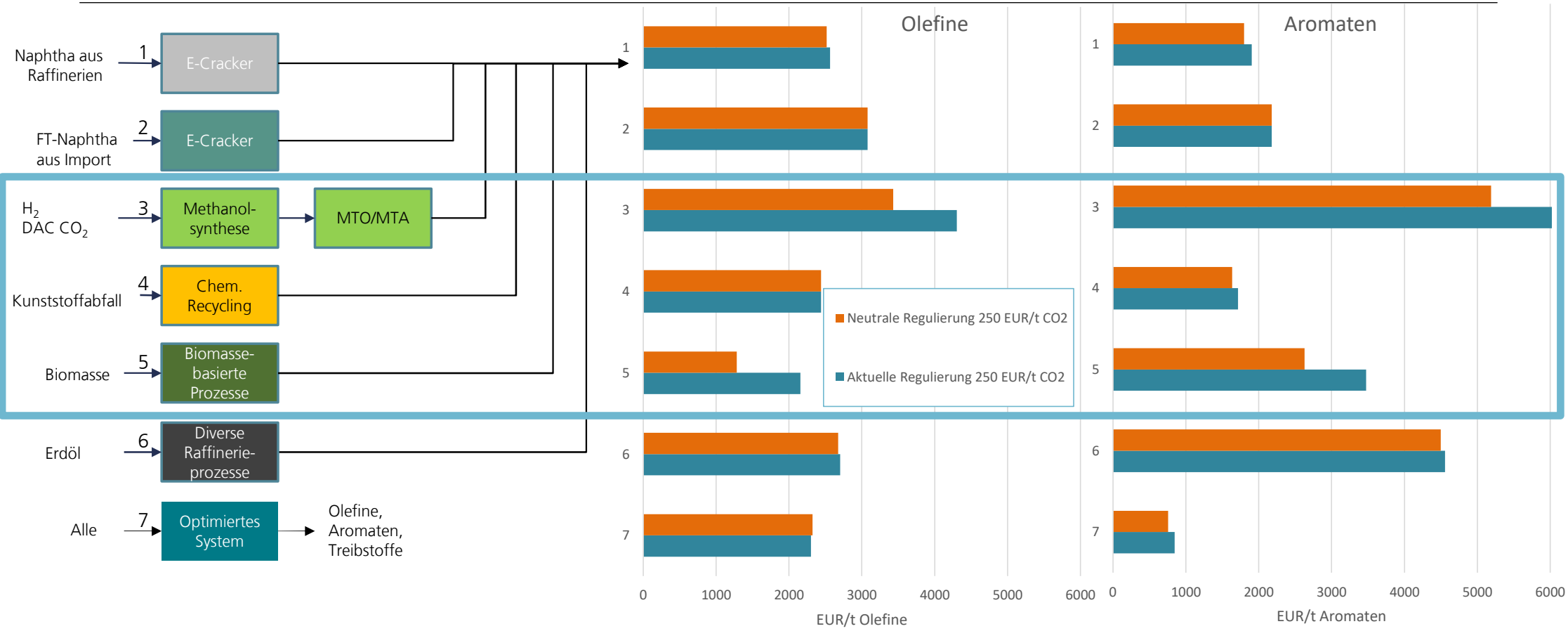
CO_2-Zertifikat nötig?	Neutrale Regulering	Aktuelle Regulierung
Fossile Feedstocks	✗	✗
CCU Feedstocks	✗	✓
Müllverbrennung	✓	✓
Fossile Kraftstoffe	✓	✓
CCU Kraftstoffe	✓	✓

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Einfluss der ETS-Regulierung



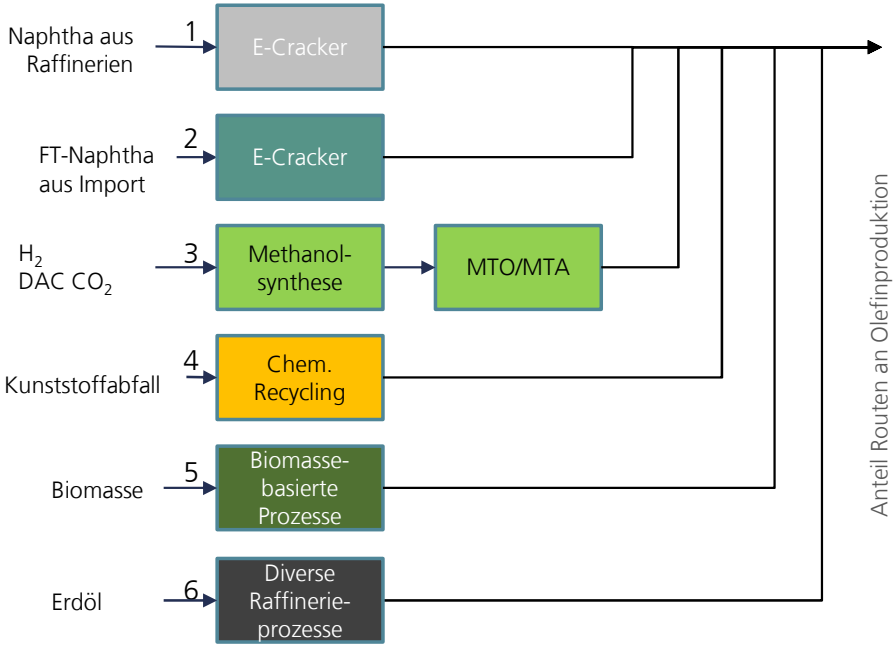
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

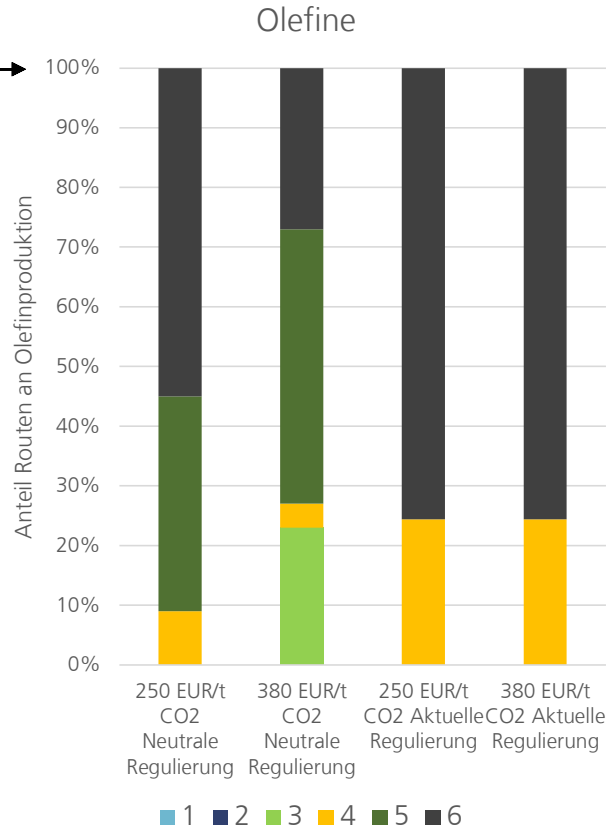
Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Einfluss der ETS-Regulierung

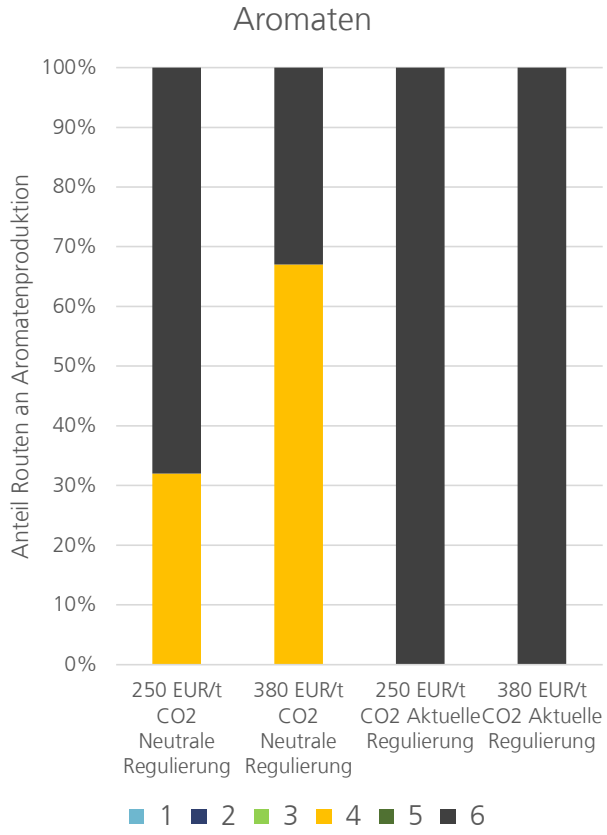


Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Einfluss der ETS-Regulierung







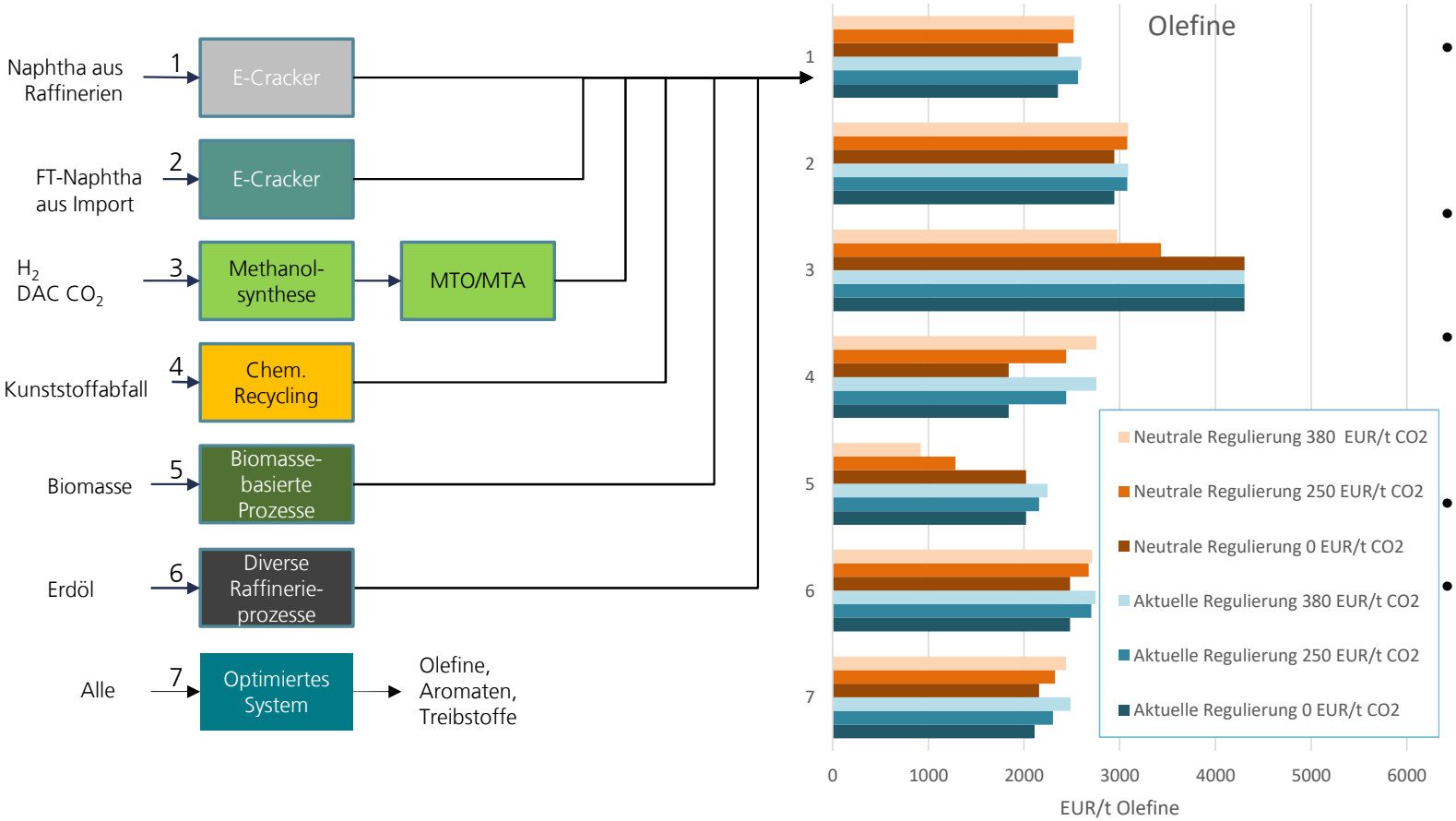
Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Einfluss der ETS-Regulierung

- **Die Regeln des ETS bezüglich Feedstocks haben einen massiven Einfluss auf die Attraktivität erneuerbarer Routen im Vergleich zu fossilen Routen**
- **Aktuell reizt der ETS bereits den Wechsel zu erneuerbaren Brennstoffen an, jedoch nicht zu erneuerbaren Feedstocks**

Dominierende Routen je Produkt und CO_2-Preis:

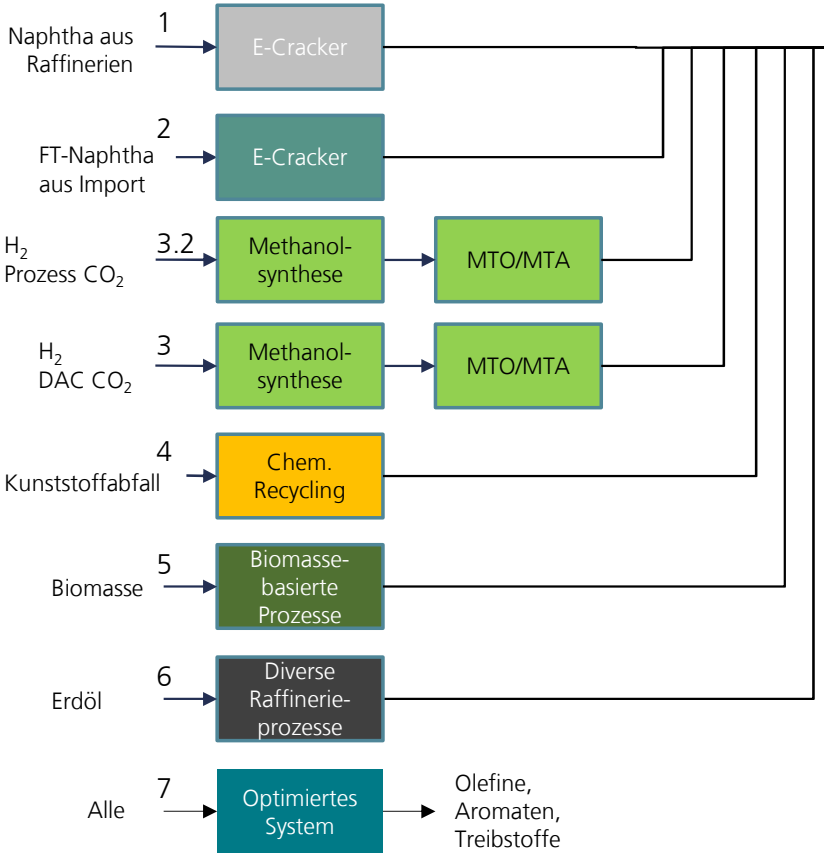
	Neutrale Regulierung CO2-Preis 250 EUR/t	Neutrale Regulierung CO2-Preis 380 EUR/t	Aktuelle Regulierung CO2-Preis 250 EUR/t	Aktuelle Regulierung CO2-Preis 380 EUR/t
Kerosin	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch
Straßenverkehr	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch	Fischer Tropsch
Schiffverkehr	Biomethanol	Biomethanol	Biomethanol	Biomethanol
Olefine	Erdölbasiert, Bio-MtO, Chem. Rec.	Erdölbasiert, Bio-MtO, Chem. Rec., CCU (upto 47 TWh H2)	Erdölbasiert, Chem. Rec.	Erdölbasiert, Chem. Rec.
Aromaten	Erdölbasiert, Chem. Rec.	Erdölbasiert, Chem. Rec.	Erdölbasiert	Erdölbasiert

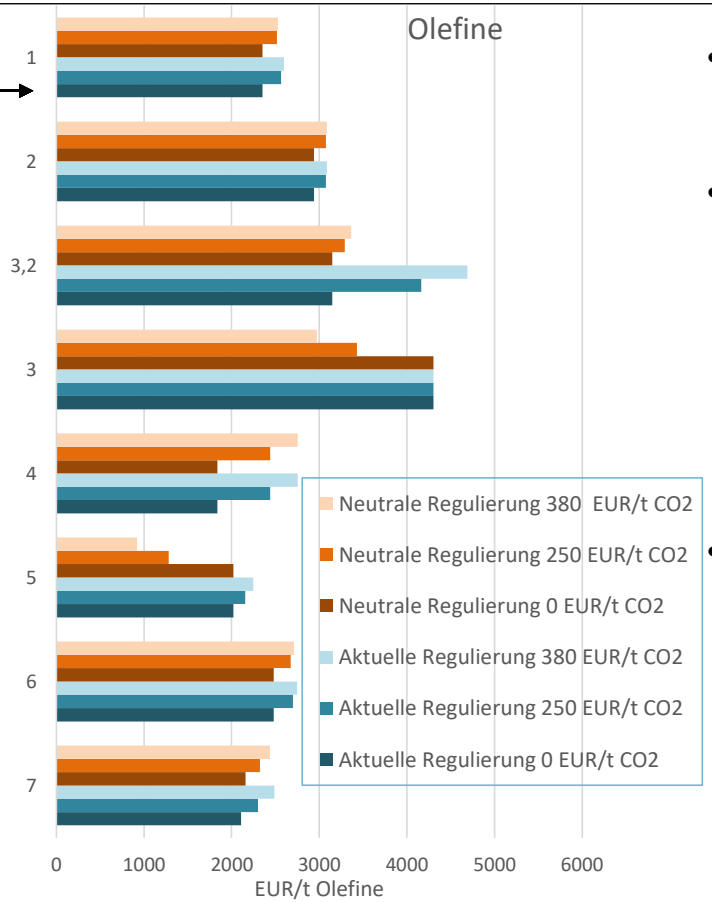
Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Einfluss des CO2-Preises



- Bei steigendem CO_2-Preis und neutraler Regulierung profitieren Routen, welche Negativemissionen ermöglichen
- Prozessbedingte Emissionen erhöhen die Kosten bei steigendem CO_2-Preis
- Grenzkosten werden stark durch fossile Route beeinflusst und werden hier nicht stark durch neutrale Regulierung reduziert
- Recycling wird bei beiden Regulierungen gleich behandelt
- Chemisches Recycling und Biomassebasierte Routen sind in jedem Fall attraktiv – es gibt jedoch Konkurrenz um die Ressourcen

Optimierung des Petrochemischen Systems und wichtiger Raffinerieprodukte – Nutzung von Prozess-CO_2





- Bei Aktueller Regulierung wird das gesamte im Produkt gebundene CO_2 bepreist
- Formal fallen diese Kosten beim ursprünglichen Verursacher an – z.B. beim Zementwerk, jedoch würden diese Kosten voraussichtlich an Chemiewerke weitergegeben werden, wenn alternativ CO_2-Speicher zur Verfügung stehen
- Bei neutraler Regulierung werden nur im Prozess freiwerdende Emissionen bepreist

Schlussfolgerung für Szenariodefinition

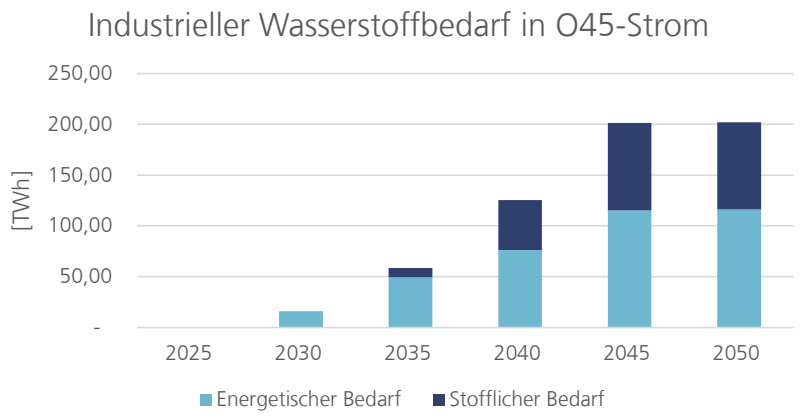
- **Mechanisches Recycling** bleibt wichtig zur Reduktion des Bedarfs von Olefinen und Aromaten
- **Chemisches Recycling** ist gesicherter Bestandteil einer effizienten klimaneutralen Chemieindustrie
- Die Rolle von **fossilen Feedstocks, Biomasse und Wasserstoff** hängt stark von der Regulierung ab:
- Bei einem neutralen ETS:
  - **Biomasse** spielt eine wichtige Rolle
  - **Wasserstoff** kann bei hohen CO2-Preisen und limitierter Verfügbarkeit von Biomasse eine Rolle spielen
  - **Fossile Feedstocks** können zur Produktion weiterhin beitragen
- Bei der aktuellen Regulierung:
  - **Biomasse** sinnvoll zur energetischen Nutzung
  - Importierte **fossile Feedstocks** zentral zur Produktion von Olefinen und Aromaten

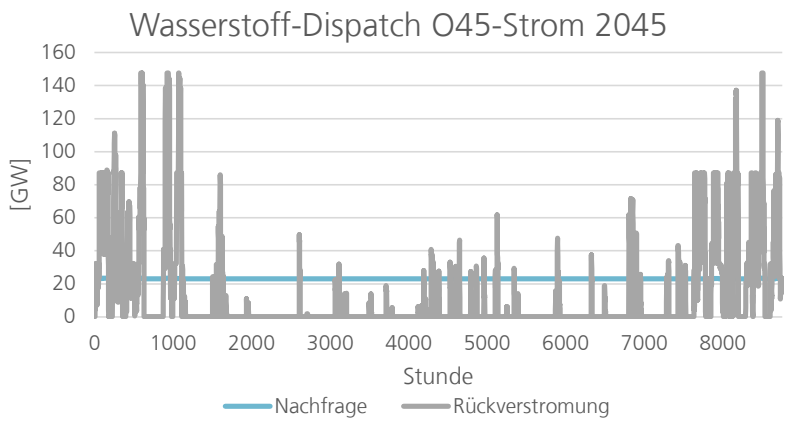
Weitere Schlussfolgerungen

- Die aktuelle Regulierung im ETS führt zu einer Benachteiligung von erneuerbaren Feedstocks
  - Das verschiebt die relative Attraktivität zwischen Routen und führt zu Fehlanreizen
  - Dies kann die Kosten, Emissionen und den Energiebedarf erhöhen
- Biomasse und hochwertige Kunststoffabfälle sind in Zukunft wichtige Ressourcen
  - Steigt der Biomassepreis aufgrund hoher Nachfrage auf das gleiche Niveau wie der Wasserstoff-Preis (90 EUR/MWh) reduziert dies vor allem die Attraktivität von BECCS – Die Nutzung von Biomasse für Olefine und Treibstoffe bleibt entsprechend der Szenarien erhalten
- Berücksichtigung des Verkehrssektors bei Strategien für die chemische Industrie unerlässlich
- Die Option des Imports von Methanol aus Regionen mit günstigeren Potenzialen für erneuerbare Energie oder Biomasse kann die Produktionskosten für nicht-fossile Olefine und Aromaten weiter reduzieren
  - z.B. könnte bei 20% niedrigeren Wasserstoff und Strompreisen die Kosten für Methanol um 10 bis 20% gesenkt werden

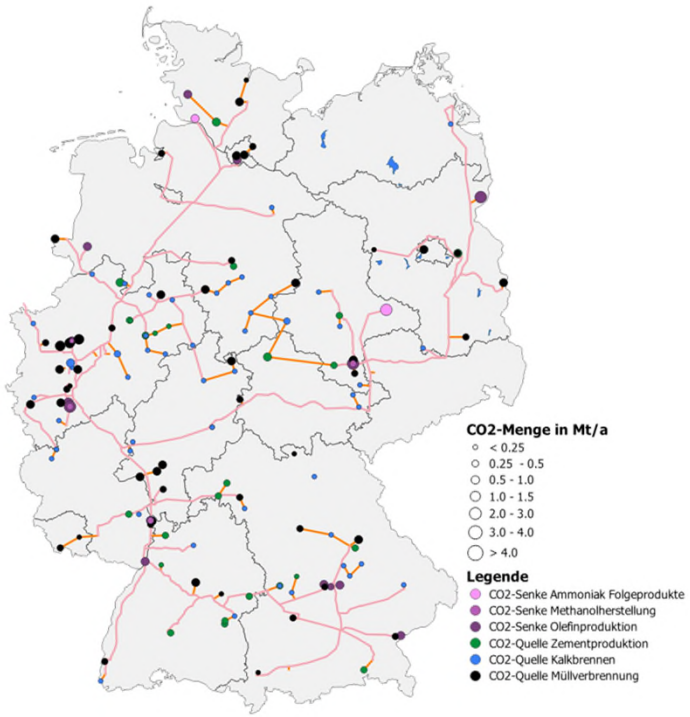
Implikationen für die Wasserstoffinfrastruktur

- Der stoffliche Bedarf für Olefine, Aromaten und Methanol macht in O45-Strom über 40 % des industriellen Wasserstoffbedarfs aus
- Die Chemische Industrie wäre ein wertvoller Ankerkunde für das Wasserstoff-Kernnetz
- In Szenarien in denen CCU in Deutschland nicht stattfindet fällt dieser Bedarf weg
- Die Kosten für das Kernnetz müssen dann auf weniger Verbraucher umgelegt werden
- Für die Auslegung des Netzes sind jedoch auch Reservekraftwerke entscheidend, aufgrund ihres hohen Spitzenverbrauchs





Implikationen für die CO_2-Infrastruktur

- Bereits die LFS III zeigten den großen Einfluss des Recyclings auf die abzuscheidenden Mengen an Müllverbrennungsanlagen
- Durch den Wegfall von CCU würden Chemiestandorte als Nutzer von CO_2 weg fallen
- Abgeschiedenes CO_2 aus der fossilen Route oder aus biomassebasierten Routen könnte abgeschieden und in das Netz eingespeist werden
- Der Bedarf für CO_2 -Speicher würde dadurch im vergleich zu vorherigen Szenarien deutlich steigen

Mögliche CO_2-Senken, -Quellen und -Netz in 2045
O45-Strom