DER MITTELDEUTSCHE STOFFVERBUND 2035

Rohstoffwende in der chemischen Industrie

Dr. Andrea Weiße[1], Robert Röllig[2], Lisa Plümer[1], Hem Dipakbhai Thothawala[1], Felix Schwarzenberger[1], Mario Sternberg[3], Prof. Dr. Thomas Kirschstein[1,4]

[1] Fraunhofer IKTS; [2] BioEconomy e.V.; [3] Fraunhofer IWES; [4] Hochschule RheinMain.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich bei allen Personen, die zur Entstehung dieser Studie durch fachliche Hinweise, Diskussionen und organisatorische Unterstützung beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt Manja Polednia in ihrer Funktion als Leiterin des Projekts „House *of* Transfer" sowie Dr. Gerd Unkelbach, Prof. Dr. Markus Pietzsch und Dr. Daniela Pufky-Heinrich, die die Studie als Mitglieder des Sounding Boards begleiteten und mit fachlichen Hinweisen unterstützten. Niklas Grimm wirkte in der frühen Phase der Arbeiten mit, während Dr. Christoph Mühlhaus den dargestellten Status quo evaluierte. Fachliche Hinweise zur Modellierung der biotechnologischen Transformationspfade lieferte Arne Gröngröft. Das Lektorat übernahm Annett Graf, Satz und Layout erfolgten durch Peter Peuker. Für die Organisation der Abschlussveranstaltung bedanken wir uns bei Christian Hiemisch, Diana Berger und Julia Dubiel sowie allen weiteren Beteiligten.

Die Studie entstand im Rahmen des Projekts „House *of* Transfer", das aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert wird (Laufzeit 01/2023–12/2026).

HOUSE *of* TRANSFER

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Hinweise zur Haftung und zu Interessenkonflikten

Die vorliegende Studie wurde auf Grundlage der zum Zeitpunkt der Erstellung verfügbaren Daten und Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erarbeitet. Trotz dessen kann keine Gewähr für die Vollständigkeit, Aktualität und Richtigkeit der Inhalte übernommen werden. Die Ergebnisse und Bewertungen stellen wissenschaftliche Einschätzungen dar und sind nicht als verbindliche Prognosen oder Handlungsempfehlungen zu verstehen. Eine Haftung für Entscheidungen oder Maßnahmen, die auf Grundlage der Inhalte dieser Studie getroffen werden, ist ausgeschlossen.

Die Autorinnen und Autoren erklären, dass im Zusammenhang mit der Erstellung dieser Studie keine Interessenkonflikte bestehen.

Executive Summary

Ausgangslage: Strukturbruch im Mitteldeutschen Stoffverbund

Der Mitteldeutsche Stoffverbund (MDSV) zählt zu den bedeutendsten integrierten Chemieclustern Deutschlands. Seine Produktionsstruktur basiert auf eng miteinander verbundenen Stoffströmen zwischen den Standorten Böhlen, Schkopau, Leuna, Bitterfeld-Wolfen, Piesteritz und Zeitz. Ein zentrales Element dieser Integration ist der Steamcracker in Böhlen, der bislang große Mengen petrochemischer Basischemikalien wie Ethylen, Propylen und Aromaten bereitstellt.

Die angekündigte Stilllegung dieser Anlage bis Ende 2027 ist daher kein isolierter Vorgang, sondern markiert einen tiefgreifenden Strukturbruch für den gesamten regionalen Verbund. Zahlreiche nachgelagerte Produktionsketten verlieren ihre zentrale Rohstoffquelle, wodurch sich neue Abhängigkeiten, Kostenstrukturen und infrastrukturelle Anforderungen ergeben.

Gleichzeitig ist diese Entwicklung Teil eines globalen Strukturwandels der petrochemischen Industrie, der durch steigende Energiepreise, Überkapazitäten im Basischemikalienmarkt und zunehmende Klimainvestitionen geprägt ist.

Ziel der Studie

Die vorliegende Studie untersucht erstmals systematisch, **wie die stoffliche Versorgung des MDSV nach der Cracker-Schließung organisiert werden könnte**.

Dazu werden

- die bestehenden Stoffströme des Verbunds quantitativ erfasst,
- mögliche Transformationspfade analysiert und
- deren Energie-, Rohstoff- und Infrastrukturbedarfe vergleichend bewertet.

Die Studie versteht sich dabei **nicht als kurzfristiger Umsetzungsplan**, sondern als analytischer Orientierungsrahmen für Politik, Industrie und regionale Transformationsstrategien.

Drei mögliche Transformationspfade

Ausgehend von technologischer Reife, Skalierbarkeit und regionaler Anschlussfähigkeit wurden drei grundlegende Transformationspfade identifiziert:

Naphtha-basierte Plattformchemie

Dieser Pfad erhält die bestehende Cracker-Logik des Verbundes und ersetzt fossiles Naphtha durch alternative Feedstocks, etwa biobasierte oder CO_2-basierte Naphtha-Äquivalente. Der Naphtha-Pfad benötigt sehr große Mengen an nachhaltiger Biomasse bzw. Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Entsprechend hoch sind die infrastrukturellen Anforderungen. Gleichzeitig entsteht ein breites Produktspektrum, das nicht ausschließlich in der Chemieindustrie Verwendung findet. Naphtha-basierte Transformationspfade sind daher sektorübergreifend zu betrachten und beschränken sich nicht allein auf chemische Wertschöpfungsketten.

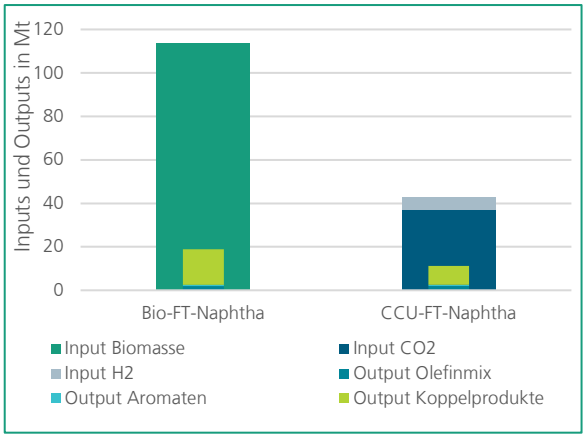


Abbildung i: Szenario A; Naphtha-Pfad, NTO+NTA kombiniert; ohne Energie- und Verluströme.

Methanol-basierte Plattformchemie

Hier werden zentrale Basischemikalien über Methanol-basierte Prozesse bereitgestellt. Ebenso ist das Ziel hier, die aktuellen Olefin- und Aromatenbedarfe möglichst umfassend abzudecken. Im Gegensatz zu den Naphtha-basierten Pfaden ist das Produktspektrum selektiver auf Olefine und Aromaten ausgerichtet und es fallen weniger Koppelprodukte an. Die Bedarfe an Energie und Rohstoffen sind dementsprechend deutlich geringer als für Naphtha-basierte Pfade, stellen jedoch trotzdem deutlich höhere Anforderungen an die regionalen Versorgungsinfrastrukturen als aktuell gegeben.

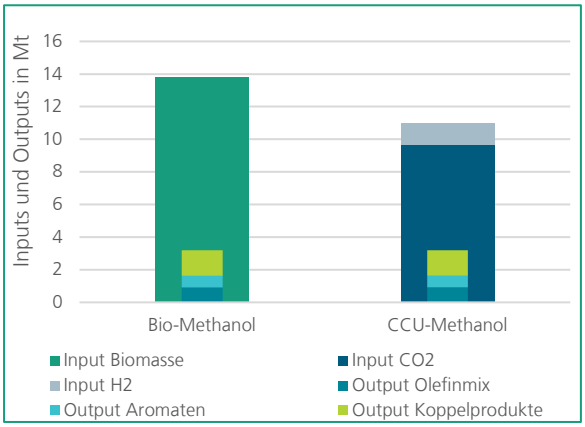


Abbildung ii: Szenario A; Methanol-Pfad, MTO+MTA kombiniert; ohne Energie- und Verluströme.

Selektive biotechnologische Chemie

Dieser Pfad deckt einzelne petrochemische Zwischenprodukte durch biotechnologische Produktionsrouten ab. Beispiele dafür sind Bio-Ethylen aus Bioethanol sowie Bio-Caprolactam für die PA6-Produktion. Ziel dieses Pfads ist eine selektive Transformation ausgewählter Wertschöpfungsrouten, die durch hochwertige Endprodukte (wie Nylon), günstige Versorgungsbedingungen und wettbewerbsfähige biotechnologische Prozessbedingungen gekennzeichnet sind. Die Bedarfe an Rohstoffen und Energie sind für diesen Pfad im Vergleich zu den plattformbasierten Pfaden deutlich geringer. Entsprechend sind auch die infrastrukturellen Anpassungsbedarfe überschaubar. Allerdings sind die Skalierbarkeit und Abdeckung der bestehenden Nachfrage beschränkt.

Zentrale Erkenntnisse

1. Der zukünftige Verbund muss Standortvorteile nutzen, um wettbewerbsfähig zu sein.

Eine vollständige Umstellung der Versorgung des MDSV auf nachhaltige Rohstoffe bei Erhalt der heutigen nachgelagerten Weiterverarbeitungsstrukturen ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen kaum realistisch. Kurzfristig sind Importe der wichtigsten Olefine und Aromaten in die Region mit bestehenden Infrastrukturen möglich, um nachgelagerte Produktionsstufen weiter zu versorgen. Ein Import von Zwischenprodukten wird die Wettbewerbsfähigkeit der ansässigen Unternehmen aufgrund der geringen Wertschöpfungstiefe und hohen Versorgungskosten bedingt durch die Binnenlage des MDSV jedoch verringern. Um eine langfristig erfolgreiche Transformation des MDSV zu erreichen, müssen regionale Wettbewerbsvorteile identifiziert und konsequent ausgenutzt werden. Dazu zählt insbesondere die Identifikation von nachhaltigen und kostengünstigen Rohstoff- und Energiequellen. Die Binnenlage des MDSV in einer agrar- und forstwirtschaftlich geprägten Region sollte als Chance verstanden werden.

2. Transformation erzeugt erhebliche Infrastrukturbedarfe.

Die Petrochemie ist durch hochgradig effiziente Versorgungs- und Verwertungsstrukturen gekennzeichnet. Petrochemische Rohstoffe werden in Chemieclustern aktuell fast vollständig stofflich oder energetisch verwertet. Nachhaltige Transformationspfade zeigen eine deutlich geringere energetische und stoffliche Nutzungseffizienz. Dementsprechend zeigen alle Transformationspfade erhebliche Bedarfe an infrastrukturellen Kapazitäten. Sei es für Versorgung mit Biomasse, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff oder erneuerbarer Energie. Der Aufbau substanzieller Versorgungsinfrastrukturen ist Grundvoraussetzung für einen langfristig erfolgreichen Transformationsprozess, da er die strategischen Standortvorteile oder -nachteile des MDSV bestimmen wird.

3. Die Transformation der Chemie gelingt nur im Verbund.

Die Analyse der Transformationspfade zeigt, dass eine nachhaltige Chemieindustrie nicht ohne Berücksichtigung des Energiesektors gelingen kann. Die bereits heute enge Verflechtung zwischen Energiesektor und Chemieindustrie wird durch eine nachhaltige Transformation noch intensiviert. Verbundeffekte auf Ebene von Werken und Anlagen sollten durch ökonomische und marktliche Verflechtungen ergänzt werden. Die möglichst vollständige und vor allem effiziente Verwertung von Koppelprodukten erfordert eine Erweiterung der traditionellen Märkte der Chemieindustrie. Der Verbundgedanke ist Teil der DNA der Chemieindustrie. Eine nachhaltig erfolgreiche Chemieindustrie im MDSV erfordert den Transfer dieses Gedankens auf sektoraler Ebene: Chemie als Teil eines Verbundes aus Agrar-, Forst-, Abfall- und Energiewirtschaft.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **5**

Abkürzungsverzeichnis **7**

Abbildungsverzeichnis **8**

Tabellenverzeichnis **10**

1 Vom integrierten Verbund zum Transformationsraum **11**

2 Der Mitteldeutsche Stoffverbund heute **13**

2.1 Böhlen und Schkopau 13
2.2 Leuna 15
2.3 Bitterfeld-Wolfen 17
2.4 Piesteritz 18
2.5 Zeitz 19

3 Diagnose des Strukturbruchs **22**

3.1 Auswirkungen auf die Produktionsstrukturen des MDSV 22
3.1.1 Stoffstrom-Dimension 22
3.1.2 Standort-Dimension 24
3.1.3 Verbund-Dimension 24
3.2 Entwicklung von Nachfrageszenarien 24

4 Szenarioanalyse Transformationspfade **27**

4.1 Pfadauswahl und Analyserahmen 27
4.2 Transformationspfad 1: Zentrale Naphtha-Plattform 27
4.2.1 Prozessbeschreibung NTO und NTA 28
4.2.2 Energie- und Stoffeinsatz je Tonne Produkt 30
4.2.3 Skalierung auf regionale Mengenszenarien 32
4.2.4 Systemische Einordnung und Integrationsfähigkeit 37
4.3 Transformationspfad 2: Zentrale Methanol-Plattform 38
4.3.1 Prozessbeschreibung MTO und MTA 38
4.3.2 Energie- und Stoffbedarf je Tonne Endprodukt 40
4.3.3 Skalierung auf regionale Mengenszenarien 40
4.3.4 Systemische Einordnung und Integrationsfähigkeit 43
4.4 Transformationspfad 3: Produktspezifische Substitution durch Biotechnologische Routen 44
4.4.1 Herstellung von Bio-Caprolactam und Bio-Polyamid-6 45
4.4.2 Bio-Ethylen aus Bio-Ethanol 48
4.5 Vergleich der Transformationspfade 53

5 Implikationen für einen MDSV 2035 ..... **59**

6 Annex **61**

6.1 Naphtha-Pfad 61
6.1.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-FT-Naphtha, CCU-FT-Naphtha, NTO und NTA 61
6.1.2 Szenarienvergleich der biobasierten- und CO_2-basierten Naphtha Routen 65

6.2 Methanol-Pfad 66
6.2.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-Methanol, e-Methanol, MTO und MTA 66
6.2.2 Szenarienvergleich der biobasierten- und CO_2-basierten Methanol-Routen 70
6.3 Biotechnologie-Pfad 72
6.3.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-Ethanol, Bio-Ethylen und Bio-PA6 . 72

Literaturverzeichnis 76

Abkürzungsverzeichnis

MEG	Monoethylenglykol
MPG	Monopropylenglykol, meist 1,2-Propandiol
BTX	Benzol, Toluol und Xylole
CCU	Carbon Capture and Utilization (Abscheidung und Nutzung von CO_2)
CO_2	Kohlenstoffdioxid
EDC	Ethylendichlorid (1,2-Dichlorethan)
FT	Fischer-Tropsch(-Synthese)
HDA	Hydrodealkylierung (z. B. Toluol → Benzol)
HVC	High Value Chemicals (hochwertige Chemikalien; Basischemikalien)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LDPE	Low Density Polyethylene (Niederdichte-Polyethylen)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas, Propan/Butan)
MDSV	Mitteldeutscher Stoffverbund
MTA	Methanol-to-Aromatics
MTO	Methanol-to-Olefins
NTA	Naphtha-to-Aromatics
NTO	Naphtha-to-Olefins
PA6	Polyamid 6
PBR	Polybutadiene Rubber (Polybutadien-Kautschuk)
PE	Polyethylen
PEM	Proton Exchange Membrane (Protonenaustauschmembran)
PET	Polyethylenterephthalat
PVC	Polyvinylchlorid
SBR	Styrene-Butadiene Rubber (Styrol-Butadien-Kautschuk)
TM	Trockenmasse
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
VC	Vinylchlorid

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptströme am Standort Böhlen, alle Mengen in kt/a. 14
Abbildung 2: Hauptströme am Standort Schkopau, alle Mengen in kt/a. 15
Abbildung 3: Hauptströme am Standort Leuna, alle Mengen in kt/a. Eigene Darstellung basierend auf (InfraLeuna-i) und eigene Erhebung. 16
Abbildung 4: Hauptströme am Standort Bitterfeld-Wolfen, alle Mengen in kt/a. 17
Abbildung 5: Hauptströme am Standort Piesteritz, alle Mengen in kt/a. 19
Abbildung 6: Hauptströme am Standort Zeitz, alle Mengen in kt/a. 20
Abbildung 7: Nachfrageszenarien im MDSV 2035 in kt/a. 26
Abbildung 8: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route Bio-FT-Naphtha (NTO und NTA kombiniert) in Szenario A. Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks. 35
Abbildung 9: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route CCU-FT-Naphtha (NTO und NTA kombiniert) in Szenario A. Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks. 35
Abbildung 10: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route Bio-Methanol (MTO und MTA kombiniert) in Szenario A. Die Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks. .. 42
Abbildung 11: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route CCU-Methanol (MTO und MTA kombiniert) in Szenario A. Die Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks. .. 42
Abbildung 12: Outputverteilung und relativer Energieeinsatz Bio-Methanol und Bio-FT-Naphtha; Mengenszenario B. 55
Abbildung 13: Energie- und Rohstoffbedarfe der Methanol-basierten Plattformpfade. 56
Abbildung 14: Spezifische Energie- und Rohstoffbedarfe der plattformbasierten Transformationspfade. 57
Abbildung 15: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-FT-Naphtha auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Reinikainen 2019). 61
Abbildung 16: Prozessdiagramm zur Erzeugung von CCU-FT-Naphtha auf Basis von abgeschiedenem Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Eigene Darstellung basierend auf (Delgado et al. 2023; Cuevas-Castillo et al. 2024; Meunier et al. 2020). 62
Abbildung 17: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Olefinen aus FT-Naphtha (NTO-Prozess). 63
Abbildung 18: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Aromaten aus FT-Naphtha (NTA-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Jiang et al. 2020). 64
Abbildung 19: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die Bio-FT-Naphtha Pfade (NTO und NTA kombiniert) in den Szenarien A bis C. 65
Abbildung 20: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die CCU-FT-Naphtha Pfade (NTO und NTA kombiniert) in den Szenarien A bis C. 65
Abbildung 21: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Methanol auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Gielen et al. 2021; Saygin und Gielen 2021). 66
Abbildung 22: Prozessdiagramm zur Erzeugung von e-Methanol auf Basis von abgeschiedenem Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Eigene Darstellung basierend auf (Meunier et al. 2020; Cuevas-Castillo et al. 2024). 67

Abbildung 23: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Olefinen aus Methanol (MTO-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Lu et al. 2016; Dr Mu Xin 2016; Chen et al. 2005). 68
Abbildung 24: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Aromaten aus Methanol (MTA-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Jiang et al. 2020; Jiang et al. 2021). 69
Abbildung 25: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die Bio-Methanol-Pfade (MTO und MTA kombiniert) in den Szenarien A bis C. 70
Abbildung 26: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die CCU-Methanol-Pfade (MTO und MTA kombiniert) in den Szenarien A bis C. 70
Abbildung 27: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethanol auf Basis von Zuckerrüben. Eigene Darstellung basierend auf (Vučurović et al. 2022). 72
Abbildung 28: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethanol auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Nitzsche et al. 2016). . 73
Abbildung 29: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethylen auf Basis von Bio-Ethanol. Eigene Darstellung basierend auf (Nitzsche et al. 2016). 74
Abbildung 30: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-PA6 auf C6-Zuckerbasis. Eigene Darstellung basierend auf (Moncada et al. 2018; Varghese und Grinstaff 2022). 75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschnitt relevanter Rohstoffe und Produkte des Crackers und deren Einfluss auf den MDSV; [1] Angaben entsprechen den maximal möglichen Kapazitäten und berücksichtigen keine Verringerung der Anlagenauslastung 22
Tabelle 2: Rohstoffbilanz zur Erzeugung einer Tonne FT-Naphtha über die biogene- oder die CO_2-basierte Route; [1] liegt in Qualität von Jet Fuel vor, [2] fällt bei Elektrolyseprozess zur Erzeugung des Wasserstoffs an 31
Tabelle 3: Rohstoffbilanz zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten im NTO- und NTA-Prozess normiert auf einen Rohstoffeinsatz von einer Tonne FT-Naphtha 32
Tabelle 4: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe entsprechend Szenarien A bis C im Naphtha-Pfad 33
Tabelle 5: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe entsprechend Szenarien A bis C im Methanol-Pfad 41
Tabelle 6: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe für Bio-PA6 im Biotechnologiepfad 46
Tabelle 7: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe für Bio-Ethylen im Biotechnologiepfad; Szenario A nicht aufgeführt, da keine regionale Ethylenproduktion erfordert wird 51
Tabelle 8: Vergleich des Rohstoff- und Energieeinsatzes der untersuchten Transformationspfade und Produktionsrouten am Beispiel Ethylen normiert auf eine Tonne Output; [1] keine Berücksichtigung energetischer Nutzung von Koppelprodukten; [2] Massenausbeute an Ethylen je Tonne Rohstoffeinsatz 54
Tabelle 9: Auswahl europäischer Projekte zur Erzeugung von nicht-fossilem Methanol 71
Tabelle 10: Versorgungsstrukturen MDSV Methanol-Pfad 71
Tabelle 11: Auswahl internationaler Projekte zum Bau von Produktionsanlagen für Bio-Ethylen im industriellen Maßstab 75
Tabelle 12: Auswahl aktueller und geplanter internationaler Projekte zur Produktion von Bio-Caprolactam und Bio-PA6 76

1 Vom integrierten Verbund zum Transformationsraum

Der Mitteldeutsche Stoffverbund (MDSV) zählt zu den bedeutenden integrierten Produktionsclustern der deutschen Chemieindustrie und stellt eine kritische Infrastruktur dar. Er umfasst die Standorte Leuna, Böhlen, Schkopau, Piesteritz, Bitterfeld-Wolfen und Zeitz, die über gemeinsame Stoffströme, Infrastrukturen und Abnehmer-Zuliefer-Beziehungen eng miteinander verflochten sind. Charakteristisch für den MDSV ist seine hohe stoffliche Integration: Basischemikalien, Zwischenprodukte und Endprodukte werden in räumlicher Nähe und entlang aufeinander abgestimmter Produktionsketten hergestellt, wobei petrochemische Prozesse eine zentrale Rolle spielen. Diese Verbundstruktur hat über Jahrzehnte hinweg Effizienzgewinne, Kostenvorteile und Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht. Gleichzeitig führt die starke wechselseitige Abhängigkeit der Anlagen dazu, dass ein Wegfall einzelner zentraler Produktionsstufen systemische Auswirkungen auf den gesamten Verbund entfalten kann.

Vor diesem Hintergrund hat die im Sommer 2025 vom Chemiekonzern Dow angekündigte Stilllegung des Steamcrackers in Böhlen, sowie von Teilen der Chlor-Alkali-Produktion in Schkopau eine besondere Tragweite (Dow Corporate 2025). Die Schließung der Upstream-Anlagen von Dow bringt erhebliche Lieferketten- und Verbundrisiken für den MDSV mit sich. So fungiert der Steamcracker bisher als zentrale Produktionseinheit, von der zahlreiche nachgelagerte Produktionsschritte abhängig sind. Die Ankündigung der Schließung hat daher zu breiter Aufmerksamkeit geführt und politische Reaktionen auf regionaler und nationaler Ebene ausgelöst. In mehreren Formaten, u. A. dem „Chemiegipfel Ostdeutschland", fordern politische Akteure verbesserte Rahmenbedingungen, Investitionsanreize und Übergangslösungen, um die Arbeitsplätze und Wertschöpfungsketten in der Region zu stabilisieren (Landesportal Sachsen-Anhalt 2025). Parallel dazu plädiert die Europäische Kommission für Initiativen wie eine „Critical Chemical Alliance", um wesentliche chemische Lieferketten in Europa nachhaltig zu sichern und Abhängigkeiten von Importen zu reduzieren (Reuters 2025). Trotz dieser Diskussionen bleiben konkrete technische und organisatorische Pläne zur Sicherstellung der stofflichen Versorgung nach dem Wegfall des Crackers bislang unklar.

Dabei stellt sich die grundlegende Frage, wie die stoffliche Versorgung in der Region der von der Cracker-Schließung betroffenen Anlagen künftig gesichert werden kann, welche neuen Abhängigkeiten dadurch entstehen und in welchem Umfang sich Ressourcen-, Energie- und Infrastrukturbedarfe verschieben. Insbesondere der Übergang zu erneuerbaren Energien, zu alternativen Kohlenstoffquellen (etwa biogenen Rohstoffen oder CO_2-basierten Pfaden) sowie der steigende Bedarf an Wasserstoff verändern die stofflich-energetische Logik des Verbundes grundlegend.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die mit dem geplanten Wegfall der Produktionsanlagen von Dow verbundenen systemischen Lieferketten- und Verbundrisiken zunächst transparent zu machen und quantitativ zu erfassen. Hierzu wird der Wegfall zentraler Stoffströme im MDSV detailliert untersucht und die Auswirkungen der Schließungen entlang der gesamten regionalen chemischen Wertschöpfungskette nachgezeichnet. Darauf aufbauend entwickelt die Studie einen Optionenraum möglicher Transformationspfade, die bis 2035 realisierbar sind. Diese setzen an unterschiedlichen Ansatzpunkten entlang der chemischen Wertschöpfungskette an. Sie umfassen Ansätze zu Änderungen im Upstream-Bereich, wie etwa der Substitution fossilen Naphthas durch

alternative Feedstocks bei grundsätzlich fortbestehender Cracker-Logik, über Midstream-orientierte Reorganisationspfade, beispielsweise die Etablierung einer methanolbasierten Plattformchemie, bis hin zu weiter Downstream ansetzenden Pfaden, bei denen alternative Prozessrouten zur Erzeugung chemischer Zwischen- und Endprodukte im Vordergrund stehen. Die Studie stellt eine wissenschaftlich-technische Bewertung potenzieller Transformationspfade zur mittelfristigen Gestaltung des MDSV dar, deren Ergebnisse als analytische Grundlage in strategischen Überlegungen politischer oder unternehmerischer Akteure einfließen können. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich die vorliegende Studie nicht als kurzfristiger Handlungs- oder Umsetzungsplan für den Verbundstandort versteht.

Es wird gezeigt, dass der Aufbau dieser Alternativen jeweils mit spezifischen Implikationen verbunden ist. Transformationspfade auf der Wertschöpfungsstufe von Basis- und Grundchemikalien nutzen bestehende Infrastrukturen und Produktionslogiken weitgehend weiter. Gleichzeitig erfordern sie häufig hohe Mengen an erneuerbaren Rohstoffen und Energieimporten. Weiter Downstream ansetzende Pfade eröffnen größere Freiheitsgrade in der Neugestaltung von Wertschöpfung. Jedoch sind diese mit erhöhtem Anpassungsbedarf bei Anlagen, Produkten und Märkten verbunden. Die vorliegende Studie zielt darauf ab, diese Optionen vergleichbar zu machen, indem sie systematisch deren Energie- und Stoffbedarfe, Flächenanforderungen, Skalierbarkeit sowie potenzielle Engpässe analysiert und gegenüberstellt. Im Ergebnis wird deutlich, dass die zukünftige Ausgestaltung des Mitteldeutschen Stoffverbunds zwangsläufig das Ergebnis von Abwägungsprozessen zwischen konkurrierenden Zielen sein wird, insbesondere zwischen Ressourceneffizienz, Infrastrukturkompatibilität und langfristiger Resilienz.

Die Studie reiht sich dabei in einer wachsenden Sammlung von Literatur zur Transformation der Chemieindustrie in Deutschland ein[1]. Neu ist die Erstellung eines regionalen Stoffstrommodells des MDSV, das die zentralen petrochemischen Stoffströme an den einzelnen Chemiestandorten systematisch erfasst und quantifiziert. Grundlage bilden frei zugängliche Datenquellen, die im Rahmen dieser Studie konsistent zusammengeführt und erstmals für eine systematische Analyse potenzieller Entwicklungspfade nach der Anlagenstilllegung ausgewertet wurden.

[1] Vgl.: Agora Industrie (2025), VCI (2019), VCI (2023), Wuppertal Institut (2023), DBFZ (2022), Agora Industrie (2019), PtX Lab Lausitz (2025), Fraunhofer IKTS (2024).

2 Der Mitteldeutsche Stoffverbund heute

Um die Bedeutung betroffener Stoffströme im MDSV präzise abbilden zu können, folgt zunächst eine Status-Quo Analyse des Chemieclusters. Dabei wird für die betrachteten Chemieparks Böhlen, Schkopau, Leuna, Bitterfeld-Wolfen, Piesteritz und Zeitz jeweils ein kurzer Standortüberblick inklusive einer Aufbereitung der relevanten Produktionsschwerpunkte und Stoffströme gegeben.

2.1 Böhlen und Schkopau

Böhlen – Fokus auf Grundstoffproduktion

Der Chemiepark Böhlen ist einer der zentralen Produktionsstandorte des mitteldeutschen Chemieclusters. Seit der Privatisierung im Jahr 1995 wird der Standort von der Dow Deutschland Anlagengesellschaft mbH betrieben. Auf einer Fläche von circa 320 Hektar sind drei Unternehmen mit insgesamt über 700 Beschäftigten ansässig. Der Standort verfügt über einen direkten Gleisanschluss und ist in das überregionale Pipeline-Netz eingebunden (Fraunhofer IKTS 2025; CeChemNet; IMG-a; Dow Deutschland-b).

Herzstück des Standorts ist der von Dow Chemical betriebene Steamcracker, eine Produktionsanlage, in dem jährlich circa 1600 kt Naphtha in eine Vielzahl petrochemischer Grundstoffe aufgespalten wird. Die jährliche Produktionskapazität beträgt (bei Vollauslastung) circa 565 kt Ethylen, 310 kt Propylen, 85 kt Butadien, 108 kt Iso-Butylen, 314 kt Pyrolysebenzin sowie circa 80 kt Benzol. Der für den Prozess benötigte fossile Feedstock Naphtha wird über eine direkte Pipelineverbindung aus der TotalEnergies Raffinerie in Leuna (circa 600 kt/a) sowie über eine weitere Pipeline vom Ölhafen Rostock bezogen (MDR 2025; MZ 2025b). Zentraler Abnehmer des Benzols ist die ebenfalls von Dow am Standort betriebene Anilinanlage. Hier werden Salpetersäure und Benzol zu Nitrobenzol und anschließend direkt zu Anilin verarbeitet. Dieses stellt die Grundlage zur Erzeugung von Polyurethanen dar und mündet damit in eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen (Dow Olefin Verbund GmbH 2024).

Der Standort Böhlen ist über zahlreiche Stoffströme (vgl. Abbildung 1) in den mitteldeutschen Chemieverbund integriert. So erfolgt der Naphtha-Bezug aus Leuna (TotalEnergies), während die im Cracker erzeugten Olefine (u.a. Ethylen, Propylen, Butadien, Iso-Butylen) über Pipelines an die benachbarten Standorte weitergeleitet werden. Das in Böhlen produzierte Ethylen wird sowohl in Schkopau als auch in Leuna zu Polyethylen sowie weiteren Polymeren und Spezialchemikalien weiterverarbeitet. Das Propylen dient in Schkopau als Rohstoff für Polypropylen, während ein Teil nach Leuna transportiert wird, wo es gemeinsam mit Benzol zur Herstellung von Phenol und Aceton dient. Das Butadien findet in Schkopau Verwendung in der Erzeugung von Synthese-Kautschuken. Der bei der Dampfreformierung entstehende Wasserstoff wird über das regionale Pipeline-Netz in den mitteldeutschen Chemieverbund eingespeist und findet in Produktionsprozessen anderer Chemieparks Anwendung (InfraLeuna-a).

Dow Chemicals hat die Stilllegung des Crackers bis zum Ende des Jahres 2027 angekündigt, sodass die Versorgung des MDSV mit Propylen und Butadien über Pipelines

gefährdet ist. Ethylen kann Dow Chemical für seine mitteldeutschen Anlagen voraussichtlich weiter über die Pipeline von Stade beziehen.

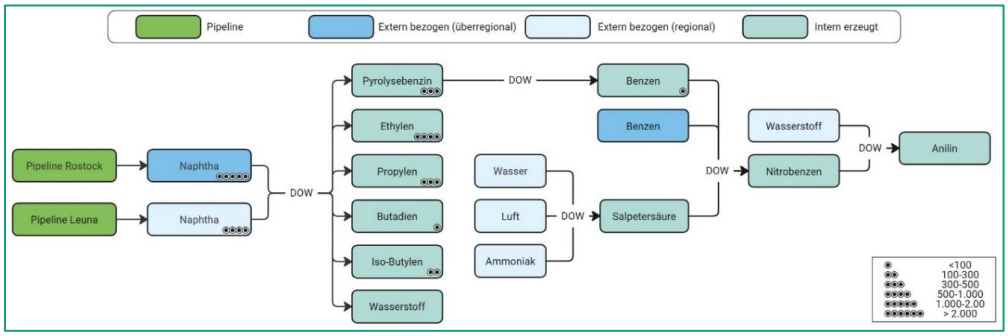


Abbildung 1: Hauptströme am Standort Böhlen, alle Mengen in kt/a.

Schkopau – Fokus auf Polymerproduktion

Im Chemiepark Schkopau sind auf 600 Hektar etwa 25 Unternehmen mit über 3.400 Beschäftigten ansässig. Der Standort verfügt über einen zweiseitigen Gleisanschluss und wird von einem Kohlekraftwerk mit Energie versorgt (Fraunhofer IKTS 2025; CeChemNet; IMG-a; Dow Deutschland-b). Die Hauptaktivitäten des Parks konzentrieren sich auf die Weiterverarbeitung von Olefinen zu Polymeren und Kunststoffen (vgl. Abbildung 2). Das aus Böhlen bezogene Ethylen wird von Dow zu Polyethylen (circa 320 kt/a) sowie speziellen Copolymeren verarbeitet. Propylen wird von Braskem Europe zu Polypropylen (circa 312 kt/a) umgesetzt und große Mengen Butadien dienen der Erzeugung von Synthesekautschuk (circa 600 kt/a) durch Synthos.[1]

Der Hersteller Equipolymers erzeugt am Standort Polyethylenterephthalat (PET, circa 300 kt/a) aus überregional bezogener Terephthalsäure und Ethylenglykol. Ein zentraler Prozess des Standorts Schkopau ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse ausgehend von Sole (aus Teutschenthal), wobei Chlor (circa 300 kt/a), Natronlauge (circa 285 kt/a) und Wasserstoff erzeugt werden. Das Chlor wird mit Ethylen aus Böhlen zu Ethylendichlorid und anschließend zu Vinylchlorid (circa 300 kt/a) umgesetzt, welches in Anlagen außerhalb der Region für die Polymerisation von Polyvinylchlorid (PVC) genutzt wird. Die entstehende Salzsäure wird in einem geschlossenen Kreislauf zurückgeführt und bei der Herstellung von Ethylendichlorid wiederverwendet. Die starke Verbundstruktur wird allerdings zunehmend destabilisiert. Die Styren-Anlage von Trinseo in Böhlen wurde bereits 2022 aufgrund von Unrentabilität stillgelegt, was zu Versorgungslücken bei den nachgelagerten Produktionsrouten führt. Trinseo erwägt daher die Schließung der Polystyren-Anlage in Schkopau. Zusätzlich wurde von Dow die Stilllegung der Chlor-Alkali- und Vinyl-Anlagen bis Ende 2027 angekündigt, was das Ende für den gesamten VC-Produktionsstrang in der Region bedeuten würde (Dow Deutschland-a; K-Online; Packaging Journal 2025; MZ 2025c; Equipolymers).

[1] Synthos stellt hier sowohl Polybutadien-Kautschuk (PBR) als auch Styren-Butadien-Kautschuk (SBR) her. Die verschiedenen Arten wurden im Text unter Synthesekautschuk zusammengefasst.

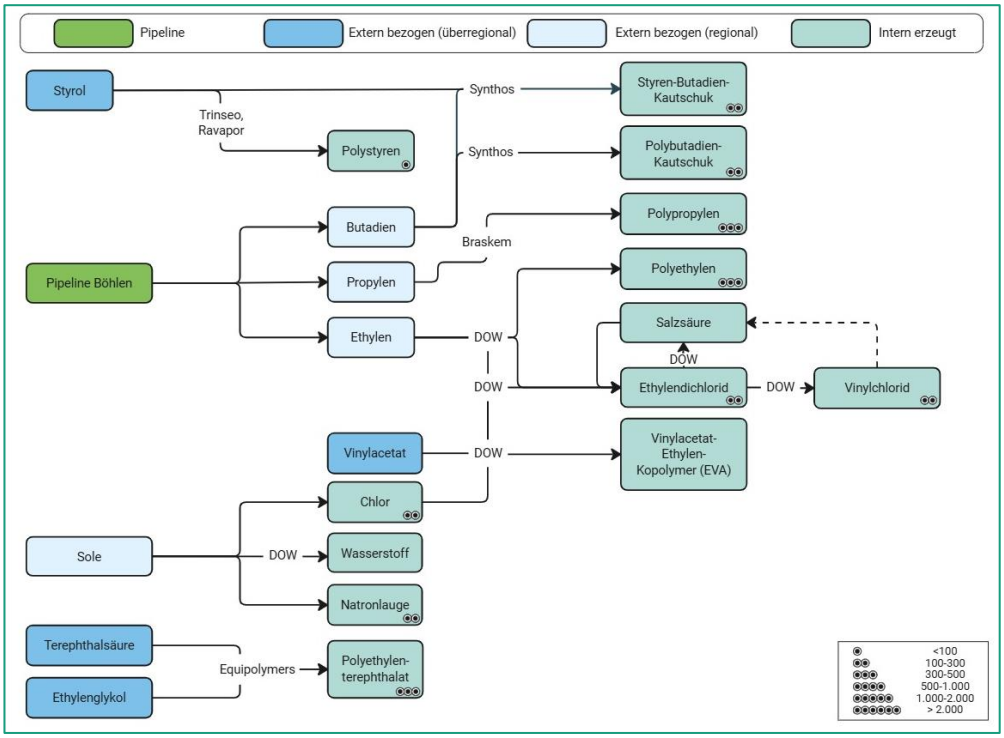


Abbildung 2: Hauptströme am Standort Schkopau, alle Mengen in kt/a.

2.2 Leuna

Der Chemiepark Leuna ist der größte Chemiestandort im mitteldeutschen Chemieverbund. Er wurde 1916 gegründet und wird von der InfraLeuna GmbH betrieben. Auf einer Fläche von 1.300 Hektar sind über 100 Unternehmen mit mehr als 10.000 Beschäftigten ansässig. Der Standort verfügt über einen Gleisanschluss und wird von einem erdgasbetriebenen KWK-Kraftwerk mit Energie versorgt (Fraunhofer IKTS 2025; CeChemNet; IMG-a; InfraLeuna-b).

Das Herzstück des Chemieparks bildet die TotalEnergies Raffinerie Mitteldeutschland, die jährlich bis zu 12 Mt Rohöl verarbeitet. Dieses wird international bezogen und gelangt überwiegend über Rostock und Danzig nach Leuna. Die Raffinerie produziert Naphtha (ca. 600 kt/a), das vollständig über Pipelines nach Böhlen zum Steamcracker transportiert wird. Darüber hinaus werden Methanol (ca. 700 kt/a), Diesel, Heizöl, Flüssiggas und weitere Raffinerieprodukte hergestellt. Das Naphtha wird in Böhlen zu Olefinen aufgespalten, die teilweise zurück nach Leuna fließen und dort für Polymere und Spezialchemikalien genutzt werden. Mit einer Jahreskapazität von 700 kt/a Methanol ist TotalEnergies der größte Methanolproduzent in Europa (TotalEnergies; TotalEnergies 2021; InfraLeuna-c).

Linde betreibt am Standort eine der größten Gasproduktionsanlagen Deutschlands. Durch Luftzerlegung und Erdgasreformierung entstehen Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Synthesegas. Das auf fossiler Basis erzeugte Synthesegas bildet zusammen mit Sauerstoff die Grundlage der regionalen Methanolproduktion. Über ein Pipeline-Netz versorgt Linde die Standorte Bitterfeld, Piesteritz, Schkopau und Zeitz mit technischen Gasen. Eine große PEM-Elektrolyseanlage kann zusätzlich ca. 3 kt/a grünen Wasserstoff

erzeugen.[1] Eine im Bau befindliche Anlage soll ab Ende 2026 jährlich weitere 450 Tonnen liefern (InfraLeuna-d; IMG-b; Linde 2025). Bisher wird aus Böhlen per Pipeline Ethylen bezogen und von Dow zu Polyethylen niedriger Dichte (LDPE, ca. 110 kt/a) verarbeitet (InfraLeuna-e). Weitere Produkte sind beispielsweise Acrylate, Harze, Wachse oder spezielle Polymere auf Basis von Ethylen und Vinylacetat für die Kunststoff-, Farben- und Klebstoffindustrie (InfraLeuna-f).

DOMO Caproleuna GmbH betreibt eine vollständig integrierte Produktionskette von Benzol über Phenol, Cyclohexanon und Caprolactam bis zu Polyamid-6 (PA6, ca. 180 kt/a) und bildet damit die gesamte PA6-Wertschöpfung am Standort ab (InfraLeuna-g; InfraLeuna-h). Seit Beginn des Jahres 2026 unterliegen die deutschen Tochterunternehmen der DOMO Chemicals Gruppe infolge eines Insolvenzverfahrens einem Produktionsstopp (DOMO Chemicals). Sollte eine Wiederaufnahme nicht möglich sein, bedeutet dies für die lokale Raffinerie den Verlust eines wichtigen Abnehmers für die Benzol- und Propylenströme sowie einen weiteren Rückgang der regionalen Wertschöpfung im MDSV.

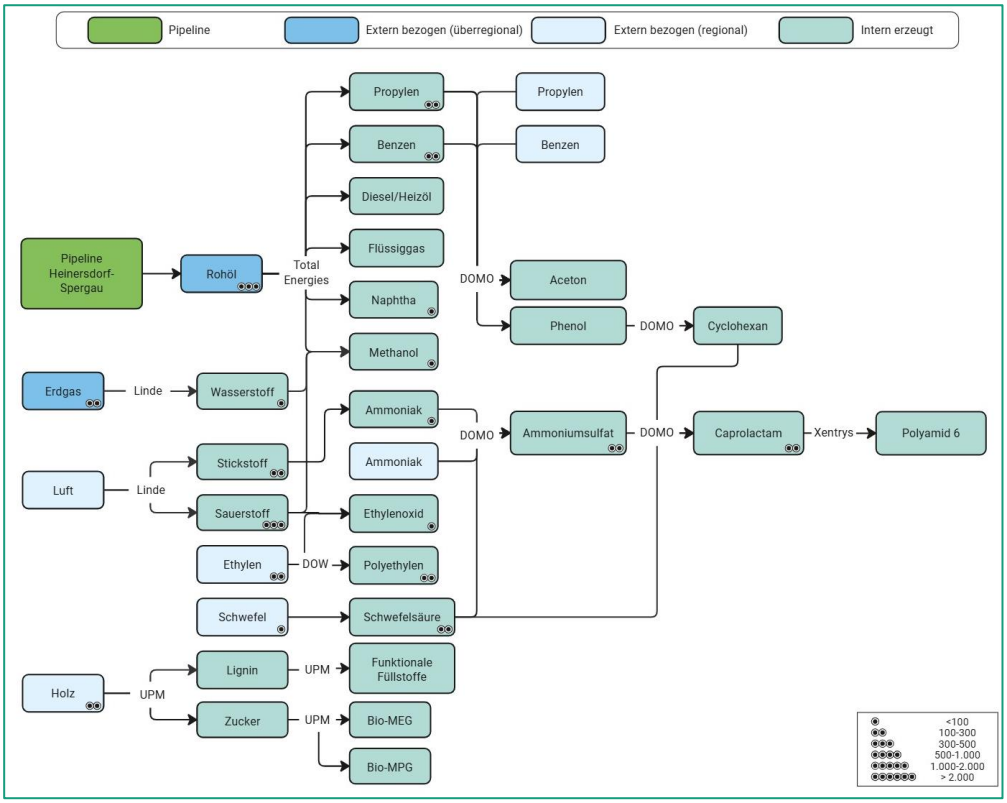


Abbildung 3: Hauptströme am Standort Leuna, alle Mengen in kt/a. Eigene Darstellung basierend auf (InfraLeuna-i) und eigene Erhebung.

UPM Biochemicals errichtet derzeit eine Bioraffinerie am Standort Leuna mit einer Gesamtkapazität von 220 kt/a, deren vollständige Inbetriebnahme im Jahr 2026 abgeschlossen sein soll. Über enzymatische Hydrolyse von Laubholz, gefolgt von chemischen

[1] Bei der Proton-Exchange-Membrane-(PEM)-Elektrolyse wird Wasser mithilfe elektrischer Energie in hochreinen Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten.

Konversionsstufen, entstehen Bio-Monoethylenglykol (Bio-MEG), Bio-Monopropylenglykol (Bio-MPG) und erneuerbare funktionale Füllstoffe (MZ 2025d; Wiley 2020; UPM Biochemicals). Ein weiteres Beispiel des Transformationsprozesses am Standort Leuna ist das Pilotprojekt »Leuna100«. Hierbei wird seit 2024 mit Hilfe eines neuen Katalysators grünes Methanol aus Kohlenstoffdioxid und grünem Wasserstoff in einer Pilotanlage produziert – ein Schritt hin zur marktreifen Herstellung nachhaltiger Treibstoffe für Schiff- und Luftfahrt (Leuna100; Chemie Technik 2024). Die wichtigsten Stoffströme am Standort Leuna sind in Abbildung 3 dargestellt.

Der Standort bietet eine vielfältige Produktionslandschaft und ist umfassend in den Mitteldeutschen Stoffverbund integriert. Die Raffinerie versorgt den Steamcracker in Böhlen mit Naphtha, der die Basischemikalien für zahlreiche Produkte wie PET, Polystyrol und Nylon liefert. Linde stellt über das regionale Pipeline-Netz die Versorgung der umliegenden Chemieparks mit technischen Gasen sicher. Leuna fungiert damit als zentraler Knotenpunkt im Verbund.

2.3 Bitterfeld-Wolfen

Der Chemiepark Bitterfeld-Wolfen ist mit über 130 Jahren Betriebsgeschichte der älteste Chemiestandort Deutschlands. Heute von der Chemiepark Bitterfeld-Wolfen GmbH betrieben, bietet er auf einer Fläche von 1.200 Hektar Platz für über 350 Unternehmen mit mehr als 11.000 Beschäftigten. Der Standort verfügt über einen Gleisanschluss und wird mit Wärme und Strom aus einer eigenen Müllverbrennungsanlage versorgt (Fraunhofer IKTS 2025; CeChemNet; IMG-a; Chemiepark Bitterfeld-Wolfen).

Mit einer ausgeprägten Chlorchemie liegt der Fokus am Standort auf anorganischen Erzeugnissen. Die zentrale Chlor-Alkali-Elektrolyseeinheit von Nobian verarbeitet Sole aus Bernburg zu jeweils ca. 100 kt/a Chlor und Natronlauge sowie zu ca. 3 kt/a grünem Wasserstoff (Nobian 2021). Das Chlor wird am Standort unter anderem zu Chlorwasserstoff, Salzsäure, Chlorbleiche oder Phosphorchloriden umgesetzt. Ergänzend prägen Spezial- und Feinchemie sowie Pharma- und Hightech-Industrie das Produktionsprofil.

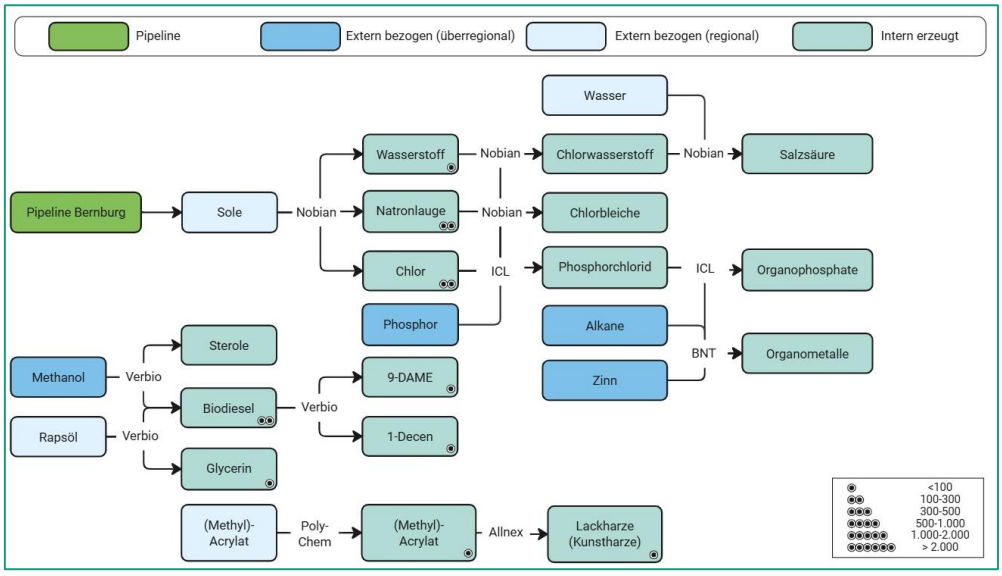


Abbildung 4: Hauptströme am Standort Bitterfeld-Wolfen, alle Mengen in kt/a.

Die Verbio Bitterfeld GmbH (Verbio) bildet das Zentrum der regionalen Biodieselproduktion. Die Anlage verfügt über eine Kapazität von ca. 150 kt/a und setzt hierfür vor allem Rapsöl unter Einsatz von Methanol zu Biodiesel um. Als Nebenprodukte entstehen Glycerin und Phytosterole (Verbio; MZ 2025a). Mit der für 2026 geplanten Ethenolyse-Anlage erweitert Verbio das Portfolio um biobasierte Chemikalien (ca. 60 kt/a). Hauptprodukte werden 9-Decenylmethylester und 1-Decen sein – beides zentrale Rohstoffe für eine nachhaltige Oleo- und Polymerchemie. Die wichtigsten Stoffströme sind in Abbildung 4 dargestellt.

Der Chemiepark Bitterfeld-Wolfen ist durch zahlreiche Stoffströme eng in den Mitteldeutschen Stoffverbund eingebunden. Die Chlor-Alkali-Elektrolyse bildet dabei die Basis: Chlor wird intern zu Zwischen- und Endprodukten weiterverarbeitet oder regional an andere Standorte verteilt, während grüner Wasserstoff in das regionale Pipeline-Netz eingespeist wird. Die Biodiesel-Produktion greift auf externe Rohstoffe zurück und liefert wiederum hochwertige biobasierte Chemikalien für den regionalen und überregionalen Markt. Die Kunstharzproduktion bezieht ihre Acrylat-Monomere zwar extern, schafft durch die Integration der Unternehmen Poly-Chem und Allnex zur Erzeugung von Kunstharzen jedoch eine lokal geschlossene Wertschöpfungskette. Vor diesem Hintergrund bezeichnet sich der Standort selbst als Pionier nachhaltiger Chemieproduktion. Nobian erzeugt seit 2021 grünen Wasserstoff und Verbio entwickelt mit der neuen Ethenolyse-Anlage ein Verfahren zur Herstellung erneuerbarer Chemierohstoffe.

2.4 Piesteritz

Der Agro-Chemie Park Piesteritz versteht sich als der erste und bislang einzige Agro-Chemie Park Deutschlands und wurde 2005 von der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH gegründet. Auf einer Fläche von 220 Hektar sind über 45 Unternehmen mit etwa 1.500 Beschäftigten ansässig. Der Standort verfügt über einen Gleisanschluss und nutzt die Abwärme aus der Dampfreformierung zur Energieversorgung (Fraunhofer IKTS 2025; IMG-a; SKW Piesteritz-a).

Der Chemiepark konzentriert sich auf stickstoffbasierte Produkte, insbesondere Ammoniak und seine Folgeprodukte wie Harnstoff und Melamin. Ergänzend sind am Standort eine kombinierte Biodieselanlage mit Ölmühle sowie eine CO_2-Verflüssigungsanlage angesiedelt (SKW Piesteritz-a).

Im Zentrum steht die Ammoniaksynthese der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, Deutschlands größtem Ammoniak-Produzenten. Erdgas wird hier durch Dampfreformierung zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgesetzt, der Wasserstoff anschließend über das Haber-Bosch-Verfahren zu Ammoniak verarbeitet. Die Produktionskapazität liegt bei ca. 1.170 kt Ammoniak pro Jahr. Ein Teil davon wird in Leuna von DOMO Caproleuna für die Caprolactamsynthese eingesetzt. Der Großteil des Ammoniaks wird direkt am Standort zu Harnstoff und Ammoniaksalzen verarbeitet, die in der Düngemittelindustrie Einsatz finden. Darüber hinaus dient Harnstoff als Grundlage für den Zusatzstoff AdBlue, der in modernen Dieselmotoren zur Abgasnachbehandlung eingesetzt wird. SKW Piesteritz zählt hierbei zu den größten Herstellern Deutschlands (IMG-c; SKW Piesteritz-b). Die bundesweit größte Melaminanlage mit einer Kapazität von ca. 90 kt/a wird von LAT Nitrogen Piesteritz GmbH betrieben. Hier wird Harnstoff in einem Hochdruck-Thermoverfahren zu Melamin umgesetzt – einem wichtigen Rohstoff für Harze,

Beschichtungen und Klebstoffe. Die Nebenprodukte Ammoniak und Kohlenstoffdioxid werden zur Weiterverwendung in das interne Produktionsnetz zurückgeführt und damit Stoffkreisläufe effizient genutzt (SKW Piesteritz-c; LAT Nitrogen).

Die LDC Wittenberg GmbH betreibt seit 2009 die weltweit größte kombinierte Biodieselanlage mit integrierter Ölmühle. Aus Raps werden Rapsöl, Lecithin und Rapsschrot gewonnen. Das Öl wird zu Biodiesel (ca. 200 kt/a) umgesetzt, wobei als Nebenprodukt Glycerin in pharmazeutischer Qualität entsteht. Rapsschrot wird als Futtermittel überwiegend regional vermarktet. Zudem betreibt Air Liquide eine CO_2-Verflüssigungsanlage mit einer Kapazität von ca. 55 kt/a, die das aus dem Ammoniakprozess gewonnene Kohlenstoffdioxid für industrielle Anwendungen bereitstellt (SKW Piesteritz-c; LUMITOS AG 2014). Die wichtigsten Stoffströme am Standort sind in Abbildung 5 dargestellt.

Der Standort Piesteritz vereint die Produktion stickstoffbasierter Grundchemikalien mit ergänzenden biobasierten und CO_2-basierten Prozessen. Da der Chemiepark Schwerpunkte im Bereich der biochemischen Produktion setzt, ist er insgesamt weniger eng in den Mitteldeutschen Stoffverbund eingebunden und erweitert dessen Portfolio um zentrale Produkte für regionale und überregionale Märkte. Dadurch trägt er zur Vielfalt und Stabilität der Chemieindustrie in der Region bei.

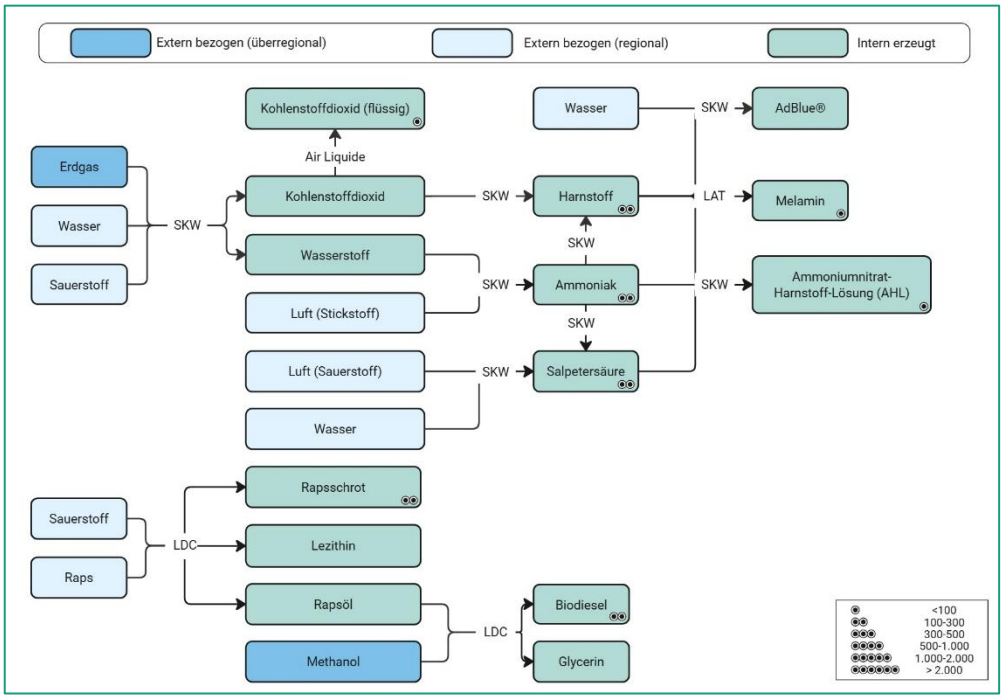


Abbildung 5: Hauptströme am Standort Piesteritz, alle Mengen in kt/a.

2.5 Zeitz

Der Chemie- und Industriepark Zeitz hat historische Wurzeln bis in die Jahre 1937/38. Er wurde in seiner heutigen Form jedoch im Jahr 1996 gegründet und wird seitdem von der Infra-Zeitz Servicegesellschaft mbH betrieben. Auf einer Fläche von 232 Hektar sind über 50 Unternehmen mit mehr als 1.000 Beschäftigten ansässig. Der Standort verfügt über einen Gleisanschluss und nutzt Abfallverbrennung, ein Blockheizkraftwerk und

Photovoltaikanlagen zur Energieversorgung (Fraunhofer IKTS 2025; CeChemNet; IMG-a; Industriepark Zeitz-a).

Der Chemiepark konzentriert sich auf die Verwertung biogener Rohstoffe und auf die Produktion von chemischen Grundstoffen, Spezialchemikalien sowie Schmier- und Klebstoffen (Industriepark Zeitz-a).

Die CropEnergies Bioethanol GmbH betreibt am Standort eine Bioethanol-Anlage mit einer Kapazität von 300 bis 400 kt/a Bioethanol und 60 kt/a hochreinem Neutralalkohol. Nebenprodukte sind ca. 100 kt Kohlenstoffdioxid in Lebensmittelqualität sowie über 300 kt/a Eiweißfuttermittel. Eine Schlüsselinnovation ist die derzeit im Bau befindliche Anlage zur Produktion von Bio-Ethylacetat (ca. 50 kt/a), deren Inbetriebnahme für Sommer 2026 geplant ist. Sie gilt als erste Anlage dieser Art in Europa und ersetzt einen Teil des bislang vorwiegend fossil basierten Lösungsmittels, das vor allem in Farben, Klebstoffen sowie in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie verwendet wird (CropEnergies).

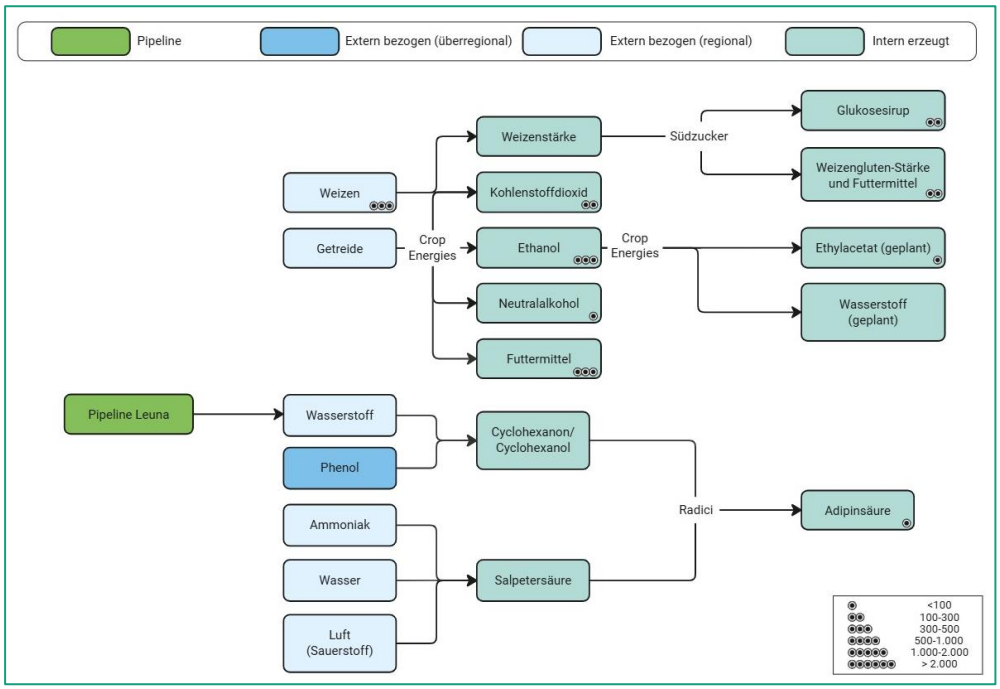


Abbildung 6: Hauptströme am Standort Zeitz, alle Mengen in kt/a.

Die Radici Chimica Deutschland GmbH betreibt eine moderne Adipinsäure-Anlage mit einer Kapazität von circa 80 kt/a. Die Produktion erfolgt in mehreren Stufen aus Phenol und Wasserstoff, wobei vor Ort hergestellte Salpetersäure als Oxidationsmittel eingesetzt wird. Durch diese vertikal integrierte Prozesskette sowie die Versorgung mit Wasserstoff über das regionale Pipeline-Netz deckt der Standort einen entscheidenden Teil der Wertschöpfungskette für Polyamid 6.6 und Polyurethanharze ab (Industriepark Zeitz-b; Radici). Weniger in den MDSV integriert sind die Haupterzeugnisse der Südzucker AG und Interstarch GmbH, welche die regionale Stärke- und Zuckerproduktion betreiben. Aus Zuckerrüben entstehen jährlich ca. 220 kt Saccharose, während aus Weizen Glukosesirup sowie Weizengluten, Stärke und Futtermittel produziert werden (Südzucker Group; AllStarch). Die wichtigsten Stoffströme sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Chemiestandort Zeitz ergänzt das regionale Portfolio durch seine klare Ausrichtung auf biobasierte und nachwachsende Rohstoffe. Mit seiner Mischung aus etablierten

Produktionslinien und neuen biobasierten Produkten trägt er zur Diversifizierung der mitteldeutschen Chemielandschaft bei. Insgesamt stärkt Zeitz damit die Innovationsfähigkeit und Zukunftsorientierung der Region.

3 Diagnose des Strukturbruchs

Mit der Stilllegung des Steamcrackers am Standort Böhlen verliert der Mitteldeutsche Stoffverbund seine zentrale Produktionsanlage für petrochemische Grundstoffe. Wie in Kapitel 2 dargestellt, bildet der Cracker bislang das stoffliche Rückgrat des Verbundes: Ausgehend von Naphtha als fossilem Feedstock werden dort große Mengen an Olefinen und Aromaten erzeugt, die über ein engmaschiges Pipeline-Netz an die Standorte Böhlen, Schkopau und Leuna sowie in geringerem Umfang an weitere Standorte weitergeleitet und dort in integrierten Wertschöpfungsketten verarbeitet werden. Die Stilllegung markiert daher keine isolierte Anlagenschließung, sondern einen tiefgreifenden Strukturbruch, der zentrale Stoffströme, Standorte und industrielle Produktionspfade gleichzeitig betrifft.

3.1 Auswirkungen auf die Produktionsstrukturen des MDSV

Die Veränderungen treffen eine Region, deren Chemieproduktion historisch durch integrierte Wertschöpfungsketten geprägt ist. Tabelle 1 fasst die durch Naphtha-Cracking erzeugten Produkte und ihre Bedeutung im regionalen Stoffverbund zusammen.

Tabelle 1: Ausschnitt relevanter Rohstoffe und Produkte des Crackers und deren Einfluss auf den MDSV; [1] Angaben entsprechen den maximal möglichen Kapazitäten und berücksichtigen keine Verringerung der Anlagenauslastung

Stoffstrom	Regionale Bedeutung	Crackerkapazität[1]	Regionale Auswirkung durch Verlust
Naphtha	Fossiler Feedstock für Produktion von Basischemikalien	1600 kt/a	Regionale Verarbeitung entfällt vollständig; fehlende Absatzwege für 600 kt Naphthaschnitt aus Raffinerie Leuna
Ethylen	Basischemikalie für Polyethylen, Ethylen-Dichlorid, Spezialchemie	565 kt/a	Wegbrechen der regionalen Basis des PE- und PVC-Pfades; starke Abhängigkeit der verarbeitenden Standorte Schkopau und Leuna
Propylen	Basischemikalie für Polypropylen, Cumol, Acrylate	310 kt/a	Unklare Versorgung der Polymerproduktion in Schkopau
Butadien	Basischemikalie für Synthesekautschuk, Elastomere	85 kt/a	Ersatz des Mengenbedarfs logistisch herausfordernd; Gefährdung der SBR- und PBR-Produktion in Schkopau
Benzol	Basischemikalie für Anilin, Phenol, Aromaten	80 kt/a	Gefährdung der Anilinanlage in Böhlen; hohe Importabhängigkeit

3.1.1 Stoffstrom-Dimension

Der quantitativ und strukturell wichtigste betroffene Stoffstrom ist Ethylen. Am Standort Böhlen wurden bislang bis zu ca. 565 kt/a Ethylen im Steamcracker erzeugt. Dieses Ethylen stellt die zentrale Rohstoffbasis für mehrere nachgelagerte Produktionsketten

dar: In Schkopau und Leuna wird Ethylen von Dow zur Herstellung von Polyethylen weiterverarbeitet, darüber hinaus werden am Standort Leuna weitere Spezialchemikalien hergestellt. Mit der Stilllegung des Crackers entfällt die regionale Ethylenproduktion vollständig. Zwar besteht über das überregionale Pipeline-Netz grundsätzlich die Möglichkeit, Ethylen aus anderen Dow-Standorten zu beziehen, allerdings liegt die vorgelagerte Wertschöpfung anschließend außerhalb des MDSV. Damit verliert die Region einen zentralen Bestandteil ihrer petrochemischen Basis, auch wenn einzelne Downstream-Anlagen weiter betrieben werden können.

Eng mit dem Ethylenpfad verknüpft ist der Stoffstrom Propylen, der bislang in Böhlen mit einer Kapazität von ca. 310 kt/a erzeugt wurde. Propylen spielt im MDSV eine Schlüsselrolle als Verbindungsglied mehrerer Wertschöpfungsketten. Ein wesentlicher Abnehmer ist der Standort Schkopau, an dem Braskem Europe Polypropylen herstellt. Darüber hinaus wird Propylen im Standortverbund Leuna für den Cumolprozess eingesetzt, in dem ausgehend von Benzol Phenol und Aceton hergestellt werden.[1] Diese Produkte bilden wiederum die stoffliche Basis für weitere Intermediate und Polymere, insbesondere für die Caprolactam- und Polyamid-6-Produktion. Mit dem Wegfall der Propylenproduktion in Böhlen entfällt die bisherige regionale Versorgung dieses Stoffstroms zu großen Teilen. Eine vollständige Substitution über andere Quellen ist aufgrund der hohen Mengenbedarfe und der begrenzten Pipeline-Anbindungen nur eingeschränkt möglich und stellt insbesondere für die polymer- und phenolbasierte Chemie in Schkopau und Leuna ein erhebliches Risiko dar.

Auch der Wegfall von Butadien wirkt sich unmittelbar auf spezifische Wertschöpfungsketten im MDSV aus. Butadien wurde bislang als Koppelprodukt im Steamcracker in Böhlen mit einer Kapazität von ca. 85 kt/a erzeugt. Genutzt wurde es vor allem für die Herstellung von Synthesekautschuk und Elastomeren u. a. durch Synthos am Standort Schkopau. Diese Prozesse sind stark auf eine kontinuierliche, großvolumige Versorgung angewiesen. Aufgrund fehlender regionaler Alternativen und der logistischen Herausforderungen eines überregionalen Bezugs ist der Butadienstrom nur sehr begrenzt substituierbar. Die Stilllegung des Crackers gefährdet hier unmittelbar die industrielle Basis einzelner Produktionslinien.

Neben den Olefinen ist insbesondere der Aromatenstrom Benzol von zentraler Bedeutung für den Verbund. In Böhlen wurden bislang ca. 80 kt/a Benzol erzeugt und direkt vor Ort weiterverarbeitet. Ein zentraler Abnehmer ist die von Dow betriebene Anilinanlage, in der Benzol zunächst zu Nitrobenzol und anschließend zu Anilin umgesetzt wird. Anilin bildet die Grundlage für die Herstellung von Polyurethan-Vorprodukten und mündet in eine Vielzahl industrieller Anwendungen. Darüber hinaus ist Benzol ein zentraler Einsatzstoff für den Standort Leuna. Dort betreibt die DOMO Caproleuna eine vollständig integrierte Produktionskette von Benzol bis hin zu Polyamid-6. Ein Teil des für den Cumolprozess benötigten Benzols stammt aus der Raffinerie selbst; zugleich ist jedoch unklar, wieviel Benzol bislang zusätzlich aus Böhlen bezogen wurde. Zusammen

[1] Die Anlagen von DOMO Caproleuna unterliegen seit Januar 2026 einem Produktionsstopp. Da zum Zeitpunkt der Studienerstellung keine belastbaren Aussagen zur Fortführung oder Anpassung des PA-6-Pfades vorliegen, erfolgt die Analyse der Stoffströme in Kapitel 3 und 4 auf Basis der Verhältnisse einer vollständig integrierten Phenol- und PA-6-Produktion.

mit der Insolvenz der DOMO Caproleuna, die Anfang des Jahres 2026 zu einem Produktionsstopp führte, besteht die Gefahr des Wegfalls der gesamten Phenol- und Caprolactamproduktion mit direkten Auswirkungen auf nachgelagerte Polymer- und Spezialchemikalienpfade.

3.1.2 Standort-Dimension

Die Standorte Böhlen und Schkopau sind aufgrund ihrer starken petrochemischen Prägung und der engen Kopplung an die Crackerprodukte besonders stark betroffen. Leuna weist zwar ein deutlich breiteres Produktspektrum auf und kann einzelne Stoffströme teilweise aus der Raffinerie beziehen, steht jedoch ebenfalls unter erheblichem Anpassungsdruck. Neben möglichen Engpässen bei aromaten- und olefinbasierten Wertschöpfungsketten entfällt dort kurzfristig die Abnahme von ca. 600 kt/a Naphtha aus der Raffinerie, was zusätzliche Herausforderungen für deren wirtschaftlichen Betrieb und einen langfristigen Transformationspfad mit sich bringt.

Demgegenüber sind die Standorte Bitterfeld-Wolfen, Piesteritz und Zeitz nur begrenzt direkt betroffen. Ihre Produktionsschwerpunkte liegen, wie in Kapitel 2 dargestellt, stärker in der Chlor- und anorganischen Chemie, der Stickstoffchemie sowie in biobasierten Prozessen. Zwar werden auch dort petrochemische Zwischenprodukte eingesetzt, z. B. Aromaten für Adipinsäure oder Spezialchemikalien, es gibt jedoch keine Hinweise darauf, dass diese bislang systematisch aus Böhlen bezogen wurden. Indirekte Effekte können dennoch auftreten, etwa durch steigende Kosten oder eingeschränkte Verfügbarkeiten einzelner Vorprodukte entlang der Lieferketten.

3.1.3 Verbund-Dimension

Insgesamt führt der Wegfall der auf dem Steamcracker basierenden Stoffströme zu einer substanziellen Schwächung der integrierten Wertschöpfungsstruktur des MDSV. Neben dem Verlust von mehr als einer Millionen Tonnen regional erzeugter petrochemischer Grundstoffe sind auch erhebliche indirekte Effekte auf Logistik, Energieinfrastruktur, Dienstleistungen und Beschäftigung zu erwarten. Der Strukturbruch manifestiert sich dabei weniger in einzelnen Produktverlusten als im Wegfall einer bislang zentral koordinierten Verbundlogik. Der Steamcracker fungierte über Jahrzehnte hinweg als impliziter Systemkoordinator des MDSV. Er stellte zentrale Basischemikalien in festen Mengenrelationen bereit, stabilisierte stoffliche Abhängigkeiten zwischen Standorten und rahmte Investitions- sowie Betriebsentscheidungen entlang der Wertschöpfungsketten. Mit der Stilllegung dieser Anlage entfällt diese koordinierende Funktion abrupt. Künftige Entscheidungen über Art, Umfang und Zusammensetzung der Bereitstellung von Ethylen, Propylen und aromatischen Vorprodukten müssen nun erstmals bewusst getroffen werden. Dabei ist der bisherige Output des Steamcrackers nicht als Zielgröße der Transformation zu verstehen, sondern als historischer Referenzpunkt, dessen Funktionalität neu organisiert werden muss.

3.2 Entwicklung von Nachfrageszenarien

Die Bestimmung künftiger Mengenbedarfe erfolgt nicht aus dem Anspruch heraus, den bisherigen Cracker-Output zu reproduzieren. Vielmehr leiten sich die benötigten Mengen aus der Frage ab, welche nachgelagerten Wertschöpfungsstufen im MDSV erhalten, transformiert oder neu aufgebaut werden sollen. Die Bedarfe an Basischemikalien

sind somit Ergebnis unterschiedlicher industriepolitischer und unternehmerischer Zielbilder. Zur Strukturierung dieses Entscheidungsraums werden im Folgenden drei Szenarien unterschieden. Sie definieren plausible Spannweiten für die künftige Bereitstellung von Ethylen, Propylen und Benzol und dienen als stoffliche Referenzgrößen für die in Kapitel 4 untersuchten Transformationspfade.

Szenario A – Mindestabsicherung zentraler Stoffströme

Das Szenario A ist auf eine Mindestversorgung zentraler Basischemikalien zum Erhalt relevanter Stoffströme im MDSV ausgelegt. Es wird angenommen, dass eine Ethylenversorgung vollständig über Pipelines aus überregionalen Quellen realisiert werden kann.[1] Der Fokus liegt deshalb auf der regionalen Deckung des Propylenbedarfs für die Polypropylenproduktion sowie auf einer ergänzenden Benzolbereitstellung für nachgelagerte Anwendungen, insbesondere in der Anilin- und Phenolproduktion.

Szenario B – Erweiterte regionale Bereitstellung

Das Szenario B erweitert diesen Ansatz auf eine regional realisierbare Mindestversorgung von nachhaltigem Ethylen und Propylen. Neben der vollständigen Deckung des Propylenbedarfs für die Polypropylenproduktion werden auch die benötigten Mengen für die regionale Phenolerzeugung berücksichtigt. Darüber hinaus wird eine Ethylenproduktion in der Region angenommen, durch die die Rohstoffmengen für Polyethylen- und Kopolymeranwendungen vollumfänglich bereitgestellt werden. Die Benzol-produktion wird so dimensioniert, dass der Bedarf phenolbasierter Wertschöpfungsketten vollständig gedeckt werden kann. Insgesamt zielt dieses Szenario auf eine moderate Ausweitung der regionalen Wertschöpfung und eine teilweise Substitution fossiler Basischemikalien ab.

Szenario C – Maximale stoffliche Integration

Das Szenario C beschreibt eine weitgehende stoffliche Integration mit maximaler regionaler Wertschöpfung. Neben der vollständigen Deckung des regionalen Ethylen- und Propylenbedarfs für die direkte Umwandlung zu Polymeren werden zusätzliche Mengen zur Steigerung der regionalen Wertschöpfung bereitgestellt. Darunter fällt die Option einer nachhaltigen[2] Ethylendichlorid-/Vinylchloridproduktion unter der Annahme einer Wiederinbetriebnahme der Anlagenstrukturen in Schkopau. Weiterhin wird die Benzolproduktion entsprechend ausgeweitet, um sowohl bestehende als auch bislang importabhängige Anwendungen, beispielsweise zur Erzeugung von Phenolderivaten,

[1] Öffentlich zugängliche Informationen deuten darauf hin, dass Dow beabsichtigt, die Polyethylenanlagen in Schkopau und Leuna künftig über bestehende Pipelineverbindungen von anderen Dow-Standorten aus mit Ethylen zu versorgen. Vor diesem Hintergrund wird in Szenario A angenommen, dass zusätzliche im MDSV anfallende Ethylenbedarfe über diese Infrastruktur gedeckt werden können.

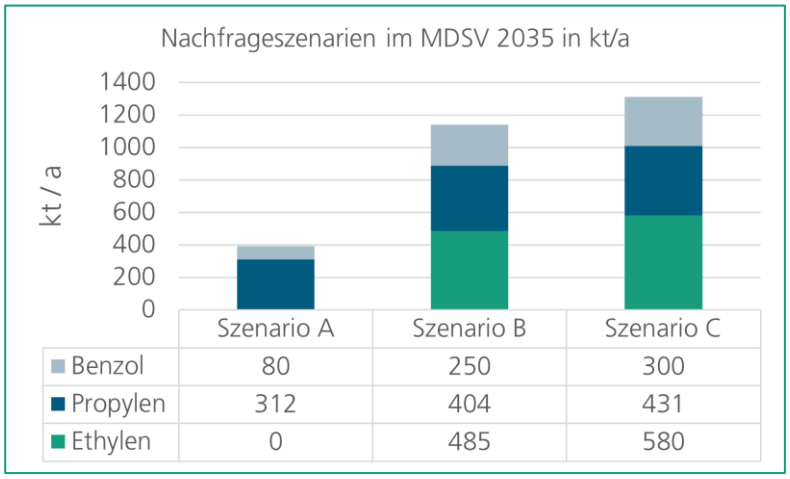
[2] Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff „nachhaltig" als Oberbegriff für Produkte aus nicht-fossilen Kohlenstoffquellen verwendet. Diese umfassen sowohl biogenen Kohlenstoff aus Biomasse als auch abgeschiedenen Kohlenstoff aus industriellen Punktquellen (CCU). Die Abscheidung des CO_2 (Carbon Capture) selbst ist nicht Bestandteil der Modellierung, berücksichtigt wird ausschließlich dessen stoffliche Nutzung. Sämtliche modellierten Prozessschritte basieren auf der Annahme einer Versorgung mit erneuerbarer Energie.

abzudecken. Dieses Szenario dient der Abschätzung des technisch und infrastrukturell maximal sinnvollen Ausbaus innerhalb der betrachteten Systemgrenzen.

Bedarfsspannen für Ethylen, Propylen und Benzol

Für Ethylen erreicht der zukünftige Bedarf von einer rein importgestützten Versorgung via Pipeline bis zu ca. 580 kt/a, sofern neben dem Erhalt der regionalen Polyethylenproduktion auch der Vinylchloridpfad in Schkopau wiederhergestellt werden soll. Für Propylen variieren die Bedarfe je nach angestrebter Wertschöpfungstiefe zwischen 312 kt/a (Erhalt der Polypropylenproduktion in Schkopau) und über 400 kt/a, wenn darüber hinaus auch die phenolbasierten Wertschöpfungsketten in der Region vollständig mit nachhaltigen Rohstoffen versorgt werden sollen.

Für Benzol liegt der Mindestbedarf bei 80 kt/a für die Aufrechterhaltung der Anilinproduktion in Böhlen. Je nach Umfang der Phenol- und Spezialchemikalienproduktion ergeben sich Bedarfe von bis zu 300 kt/a, die eine vollständige regionale Versorgung mit nachhaltig erzeugten Aromaten abbilden.



	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Benzol	80	250	300
Propylen	312	404	431
Ethylen	0	485	580

Abbildung 7: Nachfrageszenarien im MDSV 2035 in kt/a.

Die Szenarien sind nicht als Prognosen zu verstehen, sondern als strukturierte Vergleichsfälle. Anhand dieser werden die systemischen Konsequenzen unterschiedlicher Ausbaugrade der untersuchten Transformationspfade für den MDSV analysiert.

4 Szenarioanalyse Transformationspfade

4.1 Pfadauswahl und Analyserahmen

Das vorliegende Kapitel untersucht drei Transformationspfade, die die relevanten Stoffströme des MDSV künftig bereitstellen und gleichzeitig das Rückgrat einer nachhaltigen regionalen Chemieproduktion bilden könnten. Die Auswahl basiert auf einem Screening von Technologien mit hohem technologischem Reifegrad und absehbarer Skalierbarkeit sowie regionaler Adaptierbarkeit für eine zügige Umsetzung in einem MDSV 2035.

Die drei betrachteten Pfade umfassen:

(i) Nachhaltiges Fischer-Tropsch-(FT)-Naphtha für Naphtha-to-Olefins (NTO) und Naphtha-to-Aromatics (NTA)
(ii) Nachhaltiges Methanol für Methanol-to-Olefins (MTO) und -Aromatics (MTA)
(iii) Biotechnologische Substitutionsrouten am Beispiel von Polyethylen und Polyamid-6

Das Mengengerüst aus Kapitel 3.2 dient als Orientierungsrahmen für die beiden Plattformoptionen, nachfolgend Naphtha-Pfad und Methanol-Pfad genannt. Der biotechnologische Pfad unterscheidet sich strukturell von klassischen Drop-in-Routen und wird daher exemplarisch anhand von alternativen Prozessrouten zur Erzeugung von Polyethylen und Polyamid-6 bewertet.

Die Bewertung der Pfade erfolgte entlang von vier Kriterien:

- Potenzial zur Sicherung zentraler Wertschöpfungsketten im MDSV
- Technologische Reife und Skalierbarkeit der Verfahren bis 2035
- Regionale Integrierbarkeit, insbesondere hinsichtlich Biomassepotenzial, CO_2-Verfügbarkeit, Energie- und Anlageninfrastruktur sowie Pipelineanbindung
- Kompatibilität mit bestehenden Verarbeitungsstrukturen, einschließlich der Verwertbarkeit von Koppelprodukten.

Für jeden Pfad wird die technologische Grundlogik sowie der Energie- und Stoffbedarf pro Produktionseinheit beschrieben. Darüber hinaus erfolgt eine Skalierung auf die regionalen Bedarfsspannen zur Abschätzung künftiger Energie- und Ressourcenaufwände sowie eine Einordnung in die Systemarchitektur des MDSV.

4.2 Transformationspfad 1: Zentrale Naphtha-Plattform

Der naphthabasierte Transformationspfad beschreibt eine Substitution des fossilen Kohlenstoffträgers im Steamcracking durch erneuerbar bereitgestelltes Naphtha. Dabei bleibt das nachgelagerte Produktionsprinzip grundsätzlich unverändert. Ziel dieses Pfades ist es, die Herstellung zentraler petrochemischer Basischemikalien weiterhin über das etablierte Steamcracking-Verfahren zu ermöglichen, jedoch auf Grundlage eines nicht-fossilen Kohlenstoffinputs (Gholami et al. 2021; Wang et al. 2010). Die Transformationslogik orientiert sich damit an einer weitgehenden Beibehaltung bestehender Prozessketten bei gleichzeitiger Defossilisierung der Rohstoffbasis.

Naphtha fungiert hierbei als Plattformfeedstock, der aus unterschiedlichen erneuerbaren Kohlenstoffquellen für das Steamcracking bereitgestellt wird. Als Drop-in-Rohstoff übernimmt es prozesstechnisch die gleiche Rolle wie fossiles Naphtha. Es gibt verschiedene technische Routen zur Erzeugung von crackingfähigem Naphtha, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind. Eine umfangreiche, aktuelle Übersicht kann dem Report des nova-Institutes zu alternativem Naphtha entnommen werden (Tweddle et al. 2024). In der vorliegenden Studie wird zur besseren Vergleichbarkeit der Transformationspfade die Technologieoption des Fischer-Tropsch-(FT)-Naphtha aus Synthesegas untersucht. Insgesamt werden vier Prozessvarianten betrachtet: Bio-NTO, CCU-NTO, Bio-NTA und CCU-NTA. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Kohlenstoffquelle für die Naphthabereitstellung (biobasiert oder CCU-basiert) sowie des Produktschwerpunktes nach Aufbereitung (Olefine oder Aromaten). Sie folgen jedoch einem ähnlichen zweistufigen Grundkonzept.

In einem ersten Schritt wird erneuerbares FT-Naphtha erzeugt. Dieses kann entweder über Biomassevergasung mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese (Bio-FT-Naphtha) oder über Power-to-X (PtX)-Konzepte auf Basis von Kohlenstoffdioxid und grünem Wasserstoff (CCU-FT-Naphtha) hergestellt werden. In einem zweiten Schritt erfolgt die Erzeugung von Olefinen im konventionellen Steamcracking (Naphtha-to-Olefins, NTO) oder eine Verarbeitung zu aromatenreichen Fraktionen durch Reformierung (Naphtha-to-Aromatics, NTA) (Jiang et al. 2020). Die nachgelagerten Umwandlungsschritte von Naphtha zu Olefinen (Steamcracking) bzw. Aromaten (Reformierung) sind technologisch vollständig ausgereifte Kernprozesse der Petrochemie und im großtechnischen Maßstab weltweit und im MDSV etabliert. Die vorgelagerte Bereitstellung von erneuerbarem FT-Naphtha befindet sich dagegen in einem früheren Entwicklungsstadium. Biomassebasierte Vergasung mit nachgeschalteter FT-Synthese liegt überwiegend im Demonstrationsmaßstab (TRL 6-7), während CCU-basierte PtX-Routen derzeit im Pilot- bis Demonstrationsstadium angesiedelt sind (TRL 5-6).

4.2.1 Prozessbeschreibung NTO und NTA

Erzeugung von Naphtha durch Fischer-Tropsch-Synthese

Die Herstellung von Bio-FT-Naphtha erfolgt über eine Konversionsroute, in der biogene Rohstoffe zunächst zu Synthesegas umgesetzt und anschließend mittels Fischer-Tropsch-Synthese in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt werden. Durch geeignete Aufarbeitungsschritte wird aus dem entstehenden Produktspektrum der Naphtha-Siedeschnitt abgetrennt. Der prinzipielle Prozesspfad zur Herstellung von Bio-FT-Naphtha ist in Abbildung 15 im Annex schematisch dargestellt. Für die qualitative Betrachtung ist entscheidend, dass das resultierende Bio-FT-Naphtha hinsichtlich seiner stofflichen Eigenschaften grundsätzlich mit konventionellen Crackprozessen kompatibel ist.[1] Darüber hinaus kann Naphtha auch mittels eines CCU-basierten Power-to-X-Verfahrens hergestellt werden. Dabei werden abgeschiedenes CO_2 und erneuerbarer Wasserstoff

[1] Bio-FT-Naphtha kann über die Fischer-Tropsch-Synthese aus biogenem Synthesegas gewonnen werden, das aus der Vergasung fester Biomasse stammt. Die Produktverteilung folgt näherungsweise der Anderson-Schulz-Flory-Verteilung und umfasst ein Spektrum von leichten gasförmigen Kohlenwasserstoffen bis hin zu langkettigen Paraffinwachsen (Klerk 2007).

mittels der umgekehrten Wassergas-Shift-Reaktion zu Synthesegas umgewandelt und anschließend in einer Fischer-Tropsch-Syntheseanlage weiterverarbeitet. Das resultierende FT-Produktspektrum wird kondensiert und durch fraktionierte Destillation in Siedebereichsfraktionen getrennt. Dazu zählen u. a. eine Naphtha-Fraktion sowie Kerosin- und Dieselfraktionen (Delgado et al. 2023). Das CCU-FT-Naphtha[1] kann dann analog zum oben beschriebenen Bio-FT-Naphtha-Verfahren als Ausgangsmaterial für das nachgelagerte NTO-Verfahren (Steamcracken zu einem Olefingemisch) oder das NTA-Verfahren (katalytisches Reformieren zu BTX/C_9^+) verwendet werden.

Erzeugung von Olefinen und Aromaten durch NTO und NTA

Die Umwandlung von FT-Naphtha zu Olefinen wird als NTO-Prozess bezeichnet und erfolgt im konventionellen Steamcracking-Verfahren. Dabei wird der Feedstock bei hohen Temperaturen unter Zugabe von Wasserdampf thermisch gespalten. Der grundlegende Ablauf des Naphtha-Steamcrackings ist in Abbildung 17 im Annex dargestellt. Unter typischen Betriebsbedingungen entstehen dabei als Hauptprodukte Ethylen und Propylen sowie weitere Koppelprodukte wie C4-Kohlenwasserstoffe, Pyrolysebenzin und brennbare Gasfraktionen.[2] Für die nachfolgenden quantitativen Analysen wird vereinfachend ein Produktgemisch aus Ethylen, Propylen und Butadien angenommen, das als Olefinmix bezeichnet wird. Das Verhältnis der Komponenten wird dabei auf Basis typischer Ausbeuten des Steamcrackings von FT-basiertem Naphtha festgelegt.[3]

FT-Naphtha kann auch gezielt zur Erzeugung aromatischer Verbindungen eingesetzt werden. Bei diesem sogenannten Naphtha-to-Aromatics- (NTA) Prozess wird es primär durch katalytisches Reformieren in ein Produktspektrum aus Benzol, Toluol, Xylol (BTX) sowie C9+-Aromaten umgewandelt. Dabei wird das Naphtha unter Druck gesetzt, mit einem wasserstoffreichen Rückführungsgas vermischt, auf Reaktionstemperatur erhitzt und in einem Reformierungsreaktor zu einem aromatenreichen Reformat umgesetzt. Der Wasserstoff kann zurückgewonnen und wiederverwendet werden. Der flüssige Kohlenwasserstoffstrom wird durch Destillation stabilisiert, von nicht-aromatischen Bestandteilen befreit und in Benzol, Toluol, Xylol (BTX) sowie einen C9+-Aromatenschnitt fraktioniert (Jiang et al. 2020). Um die Benzolausbeute zu erhöhen, kann Toluol durch einen zusätzlichen Schritt – der Hydrodealkylierung (HDA) – umgewandelt werden. Das geht mit einem zusätzlichen Wasserstoff- und Wärmebedarf einher (Dani et al. 2025). Ausgehend von Biomassevergasung über Naphtha-Verarbeitung hin zur Benzolfraktionierung entstehen während des Prozesses neben den aromatischen Fraktionen

[1] In anderen Literaturstellen auch als PtX-Naphtha bezeichnet.

[2] Beim Steamcracking von FT-basiertem Naphtha entstehen unter typischen Betriebsbedingungen etwa 36–42 % Ethylen und 12–15 % Propylen. Zusätzlich fallen C4-Kohlenwasserstoffe einschließlich Butadien (10–12 %), Pyrolysebenzin (7–10 %) sowie brennbare Gasfraktionen (15–20 %) an. Die kombinierte Ausbeute an leichten Olefinen liegt damit bei rund 48–55 % bezogen auf den eingesetzten Feedstock (Ren et al. 2006; Wang et al. 2010; Gholami et al. 2021; Karaba et al. 2021).

[3] Für die weiteren Analysen wird ein vereinfachtes Produktverhältnis von Ethylen zu Propylen zu Butadien von etwa 2,9:1:0,8 angenommen. Der Begriff „Olefinmix" bezeichnet das Produktgemisch, das Ethylen, Propylen und Butadien enthält.

erhebliche Mengen an weiteren Koppel- und Nebenprodukten, darunter Kerosin, Diesel und LPG und Alkanfraktionen.

Insgesamt liefert der FT-Naphtha-Pfad basierend auf Biomassevergasung oder CCU ein breites Produktspektrum an Olefin- und Aromatenfraktionen sowie synthetischen Kraftstoffen wie Diesel, Kerosin und Pyrolysebenzin. Unter den gewählten Prozessbedingungen liegt die Biomasseeffizienz für den Olefinmix (Bio-NTO-Pfad) und den Aromatenmix (Bio-NTA-Pfad) zwischen einem und zwei Prozent. Die CCU-Routen weisen eine leicht erhöhte Rohstoffeffizienz zwischen sechs und sieben Prozent auf.[1] Die insgesamt niedrigen Masseeffizienzen sind auf den hohen Ressourcenbedarf zur Erzeugung des FT-Naphthas sowie die prozessbedingt geringe Ausbeute an Olefinen und Aromaten zurückzuführen. Durch eine Anpassung der Anlagenauslegung sowie eine integrierte NTO- und NTA-Produktion unter Ausnutzung von Restströmen ist eine Steigerung des Olefin- und Aromatenschnitts zu erwarten. Diese Prozessoptimierung wurde in der vorliegenden Studie nicht modelliert und stellt weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf dar. (nicht modelliert).

4.2.2 Energie- und Stoffeinsatz je Tonne Produkt

Die nachfolgenden Energie- und Stoffbilanzen werden entlang zweier Prozessstufen ausgewiesen. Die Erzeugung von Bio-FT-Naphtha umfasst die wesentlichen Prozessschritte der Biomassevergasung ausgehend von Trockenholz und anschließender Fischer-Tropsch-Synthese. Für die Bilanz von CCU-FT-Naphtha wird angenommen, dass die Fischer-Tropsch-Synthese basierend auf Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff abläuft. Weiterhin fließt in den Bilanzierungsrahmen die lokale Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse ein. Das Kohlenstoffdioxid wird als verfügbarer Rohstoff aus Punktquellen betrachtet, wodurch keine Ressourcen für Erzeugungs- oder Transportprozesse bilanziert werden. Das erzeugte FT-Naphtha weist unabhängig von der eingesetzten Rohstoffquelle die gleiche Produktqualität auf. Die Upstream-Prozessierung unterscheidet sich lediglich durch den Produktschwerpunkt in eine NTO- oder NTA-Route.

Bilanz Fischer-Tropsch-Naphtha

Für die Herstellung einer Tonne Bio-FT-Naphtha werden ca. 27,4 t Trockenholz benötigt (Reinikainen 2019). Der Wärme- und Strombedarf energieintensiver Prozessschritte wie Vergasung, Gasreinigung und FT-Synthese wird dabei unter regulären Bedingungen vollständig durch die energetische Nutzung von Koppelprodukten gedeckt, insbesondere durch feste Vergasungsrückstände sowie brennbare Gasnebenströme aus der Fischer-Tropsch-Synthese. Für den Destillationsschritt fällt ein zusätzlicher Wärmebedarf von 1 GJ/t Bio-FT-Naphtha an. Nach Fraktionierung umfasst der Produktschnitt 1 t Bio-FT-Naphtha, 0,53 t Diesel, 1,32 t Kerosin sowie 1,68 t Mitteldestillat (Gholami et al. 2021; Reinikainen 2019).

[1] Biomasseeffizienz entspricht hier dem Massenverhältnis von einer Tonne Produkt zur eingesetzten Biomasse; Rohstoffeffizienz entspricht hier dem Massenverhältnis von einer Tonne Produkt zur eingesetzten CO_2-Menge.

Bei der CCU-basierten Naphtha-Route werden für die Herstellung von 1 t CCU-FT-Naphtha ca. 8,92 t CO_2 und 1,44 t H_2 als Ausgangsstoffe benötigt. Die entsprechenden Produktionsprozesse erfordern 82.503 kWh Strom, einschließlich Elektrolyse und der umgekehrten Wassergas-Shift-Reaktion, wobei 9,80 t O_2 als Nebenprodukt entstehen. Die Downstream-FT-Synthese und Fraktionierung liefern dann das Naphtha zusammen mit den als Nebenprodukte anfallenden Destillatfraktionen. Im gleichen Maßstab ergeben 1 t Naphtha ca. 1,20 t Kerosin (Jet Fuel) und 0,67 t Diesel (Cuevas-Castillo et al. 2024; Delgado et al. 2023).

Tabelle 2: Rohstoffbilanz zur Erzeugung einer Tonne FT-Naphtha über die biogene- oder die CO_2-basierte Route; [1] liegt in Qualität von Jet Fuel vor, [2] fällt bei Elektrolyseprozess zur Erzeugung des Wasserstoffs an

	Bio-FT-Naphtha	**CCU-FT-Naphtha**
Input		
Trockenholz	27,4 t	-
Kohlenstoffdioxid	-	8,92 t
Wasserstoff	-	1,43 t
Output		
FT-Naphtha	1 t	1 t
Diesel	0,53 t	0,67 t
Kerosin	1,32 t	1,21 t[1]
Mitteldestillat	1,68 t	-
Sauerstoff	-	9,80 t[2]

Gesamtbilanz Bio-NTO und Bio-NTA

Für die Herstellung von einer Tonne Olefinmix über das NTO-Verfahren werden ca. 1,46 t Bio-FT-Naphtha entsprechend 40 t Trockenholz benötigt. Darüber hinaus ist für das Steamcracken eine zusätzliche Menge an Wasserdampf von ca. 0,4 t erforderlich. Der externe Energiebedarf beträgt etwa 1,76 MWh/t Olefinmix, wobei 70 % davon auf elektrische Energie entfallen. Normiert auf eine Tonne Ethylen ergibt sich ein Rohstoffeinsatz von 2,4 t Bio-FT-Naphtha entsprechend 66 t Holz.

Im NTA-Verfahren werden für die Herstellung von einer Tonne Aromatenmix[1] 1,55 t Bio-FT-Naphtha entsprechend 43 t Trockenholz benötigt. Zusätzlich werden geringe Mengen Wasserstoff und Methan als Einsatzstoffe für den HDA-Prozess benötigt. Der externe Energiebedarf beträgt etwa 2,9 MWh/t Aromatenmix, davon etwa 57 % elektrische Energie. Normiert auf die Produktion einer Tonne Benzol ergibt sich ein

[1] Aromatenmix bezeichnet hier eine Mischung aus verschiedenen Aromatenfraktionen mit einer Zusammensetzung von etwa 28,7 % Benzol, 45,8 % Xylol und 25,5 % C9+-Aromaten (Wang et al. 2010; Gholami et al. 2021; Karaba et al. 2021; Ren et al. 2006).

Rohstoffeinsatz von 5,5 t Bio-FT-Naphtha entsprechend 150 t Holz (Yalçın 2025; Jiang et al. 2020; Dani et al. 2025; Reinikainen 2019).

Gesamtbilanz CCU-NTO und CCU-NTA

Für die CCU-Naphtha-Route werden für eine Tonne Olefinmix ca. 13 t CO_2 und 2,1 t H_2 benötigt. Der externe Energiebedarf wird hauptsächlich durch die Elektrolyse zur Erzeugung des Wasserstoffs bestimmt und beträgt 120,4 MWh, wovon rund 97 % elektrischer Energiebedarf sind (Cuevas-Castillo et al. 2024; Delgado et al. 2023). Im NTA-Prozess werden für die Erzeugung einer Tonne Aromatenmix ca. 13,8 t CO_2 und 2,2 t H_2 sowie ein externer Energiebedarf von 128,9 MWh benötigt. Im NTA-Prozess werden für die Erzeugung einer Tonne Aromatenmix ca. 13,8 t CO_2 und 2,2 t H_2 sowie ein externer Energiebedarf von 128,9 MWh benötigt.

Tabelle 3: Rohstoffbilanz zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten im NTO- und NTA-Prozess normiert auf einen Rohstoffeinsatz von einer Tonne FT-Naphtha

	NTO	**NTA**
Input		
FT-Naphtha	1 t	1 t
Dampf	0,5 t	0,5 t
Output		
Ethylen	0,42 t	-
Propylen	0,15 t	-
Butadien	0,12 t	-
Benzol	-	0,18 t
Xylol	-	0,29 t
Alkanfraktion	-	0,18 t
Pyrolysegas	0,09 t	-
Schweröl/ Teer	0,05 t	-
LPG	-	0,04 t
Sonstige Aromatenfraktion	-	0,18 t

4.2.3 Skalierung auf regionale Mengenszenarien

Aufbauend auf den spezifischen Stoff- und Energiekennzahlen wird der Naphtha-Pfad im Folgenden auf den regionalen Bedarf des MDSV skaliert. Ziel der Szenarien ist es, die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Pfades zur Substitution fossiler Basischemikalien sowie die daraus resultierenden Stoffstromverschiebungen, Koppelprodukte und Ressourcenbedarfe systematisch zu untersuchen. Die Szenarien unterscheiden sich dabei ausschließlich in der Zielsetzung hinsichtlich der regional abzudeckenden Wertschöpfungstiefe: Von einer Mindestabsicherung zentraler Polymerrouten (Szenario A)

über eine teilweise Substitution weiterer fossiler Stoffströme (Szenario B) bis hin zu einem weitgehenden Ausbau mit zusätzlicher Integration nachgelagerter Wertschöpfung (Szenario C). Die zugrunde gelegte Prozessroute, Produktzusammensetzung sowie die spezifischen Stoff- und Energiekennzahlen bleiben über alle Szenarien hinweg konstant. Unterschiede ergeben sich ausschließlich aus der Skalierung der Zielprodukte und den daraus resultierenden Koppelprodukten. Tabelle 4 zeigt vergleichend den Rohstoffbedarf im Naphtha-Pfad über die Szenarien hinweg.

Tabelle 4: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe entsprechend Szenarien A bis C im Naphtha-Pfad

	Szenario A		**Szenario B**		**Szenario C**	
Route	**Bio-FT-Naphtha**	**CCU-FT-Naphtha**	**Bio-FT-Naphtha**	**CCU-FT-Naphtha**	**Bio-FT-Naphtha**	**CCU-FT-Naphtha**
Holzeinsatz	87,7 Mt	-	114 Mt	-	126 Mt	-
CO_2-Einsatz	-	28,6 Mt	-	37,0 Mt	-	41,2 Mt
H_2-Einsatz	-	4,6 Mt	-	5,9 Mt	-	6,6 Mt
Energieeinsatz	4.500 GWh	264.843 GWh	5.900 GWh	343.098 GWh	6.600 GWh	381.712 GWh
Ethylen Output	0,9 Mt	0,9 Mt	1,17 Mt	1,17 Mt	1,25 Mt	1,25 Mt
Propylen Output	0,3 Mt	0,3 Mt	0,40 Mt	0,40 Mt	0,43 Mt	0,43 Mt
Benzol Output	0,2 Mt	0,2 Mt	0,25 Mt	0,25 Mt	0,3 Mt	0,3 Mt

Szenario A – Mindestabsicherung

Szenario A bildet eine Mindestversorgung des MDSV ab, bei der der FT-Naphtha-Pfad gezielt so dimensioniert wird, dass zentrale bestehende Wertschöpfungsketten erhalten bleiben. Im Fokus steht dabei die vollständige Deckung des Propylenbedarfs für die Polypropylenproduktion in Schkopau sowie eine partielle Absicherung aromatenbasierter Kernpfade. Für dieses Mindestziel werden ca. 312 kt Propylen bereitgestellt. Die resultierende Olefinproduktion durch Steamcracking von FT-Naphtha entspricht einem Olefinmix von 1474 kt in der zugrunde gelegten Prozesskonfiguration. Die Ergebnisse zeigen eine starke Überproduktion von Ethylen, wodurch der Mindestbedarf zur Aufrechterhaltung der Polyethylenproduktion vollständig gedeckt werden kann. Der darüber hinaus anfallende Ethylenüberschuss in Höhe von 414 kt kann entweder exportiert oder alternativ für den Weiterbetrieb der EDC/VC-Anlagen in Schkopau genutzt werden. In diesem Fall verbleibt ein Exportüberschuss von 324 kt. Außerdem entstehen in diesem Szenario 258 kt an 1,3-Butadien als C4-Koppelprodukt an, die den Verlust durch die Beendigung der Dow-Aktivitäten vollständig kompensieren. Für die regionale Weiterverarbeitung zu Synthesekautschuk ist ein zusätzlicher Aufbereitungsschritt erforderlich. Der Prozess zur Olefinerzeugung erfordert einen Ressourceneinsatz von ca. 2150 kt FT-Naphtha und 2600 GWh Energie.

Ergänzend werden 192 kt Benzol als Zielgröße angesetzt, um die aromatenbasierten Kernpfade mindestens teilweise mit nachhaltig erzeugten Produkten abzusichern. Nach Reformierung des Bio-Naphthas und HDA werden in diesem Szenario insgesamt 675 kt an aromatischen Fraktionen (Benzol, Xylole, Biphenol, C9+-Aromaten) erhalten, wodurch der Benzolbedarf für die Phenolproduktion in Leuna vollständig gedeckt werden kann. Darüber hinaus entstehen große Mengen einer Xylol-Fraktion im Umfang von 307 kt, die für den Export zur Verfügung stehen und beispielsweise eine Grundlage für nachhaltig erzeugte Terephthalsäure als Monomer in Polyethylenterephthalat (PET) darstellen können. Für den Prozess der Aromatenerzeugung werden ca. 1050 kt an FT-Naphtha benötigt; der spezifische Energiebedarf liegt bei 1940 GWh.

Insgesamt ergibt sich im Szenario A ein Ressourcenbedarf von 87,7 Mt Trockenholz sowie 4538 GWh Energieeinsatz (davon ca. 2938 GWh Strom) oder alternativ 28,6 Mt Kohlenstoffdioxid und 4,6 Mt Wasserstoff sowie 264,8 TWh Energieeinsatz (inklusive Erzeugung des Wasserstoffs). Neben den chemischen Zielprodukten entstehen umfangreiche Koppelprodukte, überwiegend kraftstoffnahe Fraktionen. Im biobasierten Pfad sind dies etwa 5,1 Mt Kerosin, 2,6 Mt Diesel, 3,6 Mt Mitteldestillat (überwiegend Diesel-/Kerosinschnitt) sowie rund 0,05 Mt Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas, LPG) und weitere leichte und schwere Mischfraktionen. Insgesamt entstehen rund 14,2 Mt Koppelprodukte. Im CO_2-basierten Pfad sind dies etwa 3,9 Mt Kerosin (Jet Fuel), 2,1 Mt Diesel sowie rund 0,05 Mt Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas, LPG) und ebenso leichte und schwere Mischfraktionen (insgesamt 6,7 Mt an Koppelprodukten). Diese Ströme können wertsteigernd als nachhaltige Kraftstoffe (insbesondere Diesel, Kerosin) vermarktet oder einer regionalen Nutzung zur Energieerzeugung zugeführt werden (insbesondere Mitteldestillat, LPG, leichte Gase).

Sankey-Diagramme zur Visualisierung der Stoffströme im biobasierten und CO_2-basierten Pfad für Szenario A sind in Abbildung 8 und in Abbildung 9 dargestellt. Da sich die Szenarien ausschließlich durch eine lineare Skalierung der Stoffströme unterscheiden und die Struktur der Prozessketten unverändert bleibt, wird für die Szenarien B und C auf zusätzliche Sankey-Diagramme verzichtet. Dafür werden vergleichende Darstellungen der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die Bio- und CCU-Pfade in den Abbildungen Abbildung 19 und Abbildung 20 im Annex zur Verfügung gestellt.

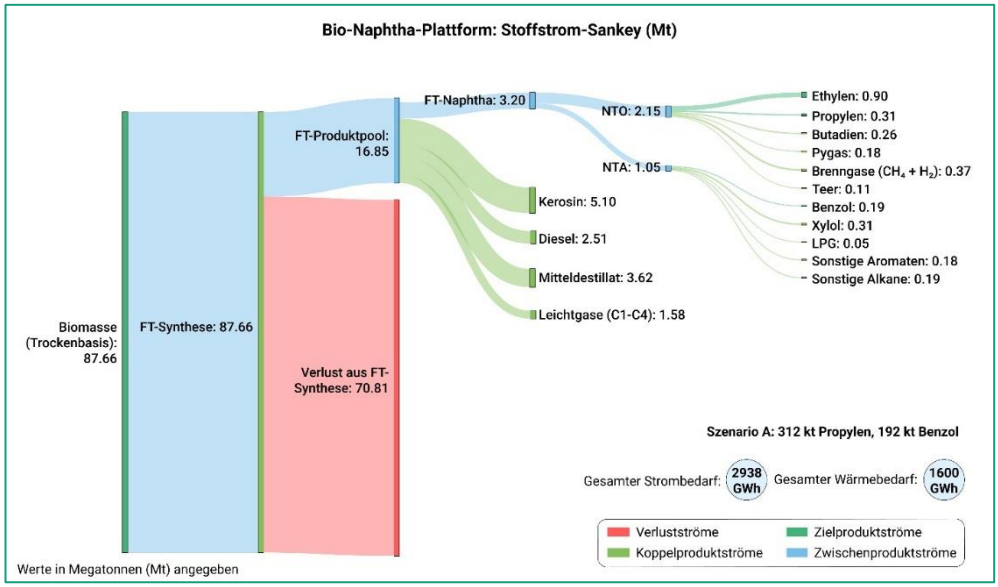


Abbildung 8: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route Bio-FT-Naphtha (NTO und NTA kombiniert) in Szenario A. Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks.

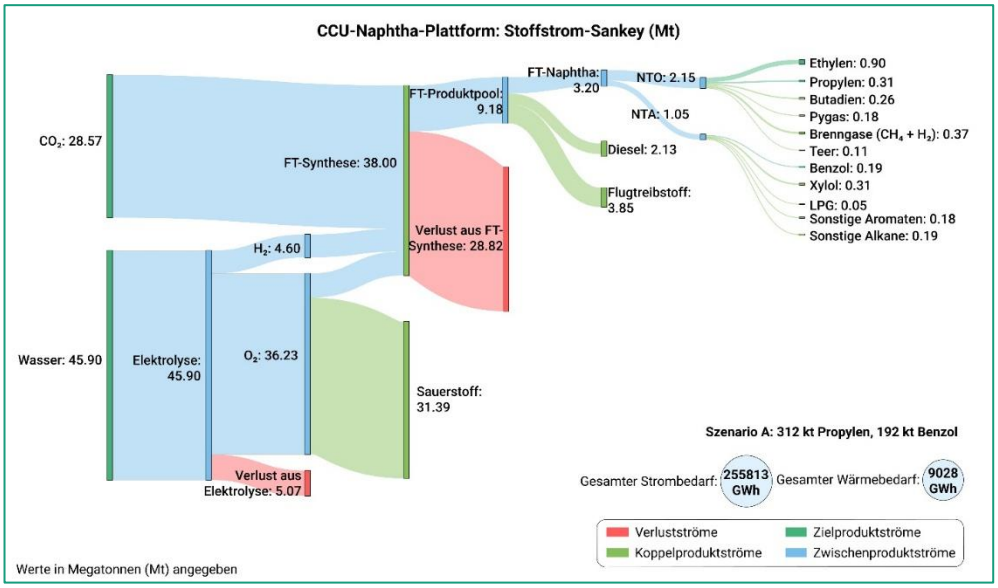


Abbildung 9: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route CCU-FT-Naphtha (NTO und NTA kombiniert) in Szenario A. Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks.

Szenario B – Erweiterte Bereitstellung

Im Szenario B werden die Bedarfe an Propylen, Ethylen und Benzol mindestens gedeckt, um regionale fossile Stoffströme durch biobasierte Produkte zu ersetzen. Gleichzeitig soll die Wertschöpfung erhalten und moderat gesteigert werden. Für dieses Szenario werden 404 kt Propylen und 490 kt Ethylen sowie 250 kt Benzol als Zielgrößen angesetzt. Im Ergebnis unterscheidet sich Szenario B nur geringfügig von Szenario A. Der Unterschied liegt insbesondere darin, dass die regional erforderlichen Benzolstoffströme nun vollständig nachhaltig substituiert werden können.

Es ergibt sich eine Olefinmix-Produktion von 1907 kt, durch die der regionale Bedarf an Propylen sowohl für die Polypropylen- als auch die Phenolproduktion vollständig gedeckt werden kann. Auch in Szenario B zeigt sich eine starke Ethylenüberproduktion. Der Überschuss in Höhe von ca. 760 kt kann entweder exportiert oder alternativ für den Weiterbetrieb der EDC/VC-Anlagen in Schkopau genutzt werden. Im letzteren Fall verbleibt ein Exportüberschuss von 670 kt. Als C4-Koppelprodukt fallen 357 kt 1,3-Butadien an, das einen vollständigen Ausgleich des Verlustes durch die Crackerabschaltung ermöglicht, sofern entsprechende Aufarbeitungskapazitäten verfügbar sind. Der Rohstoff- und Energieeinsatz für die Gewinnung von Olefinen liegt bei 2780 kt FT-Naphtha sowie 3360 GWh Strom und Wärme.

Der Benzolbedarf für die Anilinproduktion in Böhlen kann unter den gewählten Bedingungen vollständig gedeckt werden. Darüber hinaus ist die Phenolproduktion in Leuna ebenfalls komplett durch nachhaltig erzeugte Edukte (Propylen und Benzol) realisierbar. Weiterhin entstehen ca. 400 kt nachhaltige Xylol-Fraktion. Zur Erzeugung von 876 kt Aromatenmix im Szenario B sind 1370 kt FT-Naphtha und ein Energieeinsatz von 2520 GWh erforderlich.

Für eine Kombination beider Ansätze zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten aus Bio-FT-Naphtha ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf von 5890 GWh (davon ca. 3800 GWh grüner Strom) sowie ein Biomasseeinsatz von 113,5 Mt Trockenholz. Die Mengen an Koppelprodukten erhöhen sich auf 6,6 Mt Kerosin, 3,3 Mt Diesel sowie weitere 4,7 Mt Mitteldestillat (Gesamtmenge an Koppelprodukten 16,4 Mt). Die CCU-Routen erfordern einen Ressourceneinsatz von 37,0 Mt Kohlenstoffdioxid und 5,9 Mt Wasserstoff sowie 343 TWh Energie. Als Koppelprodukte werden unter anderem 5,0 Mt Kerosin (Jet Fuel) und 2,8 Mt Diesel erhalten, die Gesamtmenge beträgt 8,7 Mt.

Szenario C – Maximale Integration

Im Szenario C wird der Naphtha-Pfad im Maximalausbau ausgelegt. Neben der Mindestdeckung an Olefin- und Aromatenbedarfen für die Versorgung relevanter Stoffströme im MDSV mit nachhaltigen Chemikalien wird ein zusätzliches Ethylenvolumen für den Weiterbetrieb der EDC-Anlage in Schkopau integriert. Darüber hinaus wird eine zusätzliche Steigerung der Benzolkapazitäten betrachtet, um eine regionale und nachhaltige Produktion von bisher importiertem Phenol in Zeitz und Bitterfeld zu berücksichtigen. Fokus des Szenarios ist eine Umkehr von fossilen zu biobasierten Produkten und eine teilweise Substitution fossiler Importe durch nachhaltige Basischemikalien sowie eine Steigerung der Wertschöpfung.

Als Zielgrößen werden 431 kt Propylen, 580 kt Ethylen und 300 kt Benzol entsprechend einer Menge an Olefinmix von 2035 kt bzw. 1051 kt Aromatenmix angesetzt. Analog zu den Szenarien A und B weisen die Ergebnisse eine vollständige Deckung der Propylennachfrage bei gleichzeitig sehr hoher Überproduktion von Ethylen aus. Insgesamt resultiert dies in einem potenziellen Exportüberschuss von 667 kt Ethylen. Als C4-Koppelprodukt fallen 356 kt 1,3-Butadien an. Damit kann der Verlust der bisherigen Butadienproduktion durch die Crackerabschaltung weiterhin rechnerisch überkompensiert werden. Die tatsächliche regionale Nutzbarkeit hängt von der technischen Umsetzung und Skalierung der Aufarbeitung ab. Der Ressourcen- und Energieeinsatz liegt bei 2970 kt FT-Naphtha sowie 3590 GWh Strom und Wärme.

Die erzeugten Mengen an Benzol decken die Aufrechterhaltung der Anilinproduktion in Böhlen und die Substitution fossilen Rohstoffs für die Phenolerzeugung in Leuna ab. Außerdem besteht die Möglichkeit zur Steigerung der Phenolproduktion, um bisher extern bezogene, fossile Zwischenprodukte in Zeitz und Bitterfeld regional zu erzeugen. Weiterhin entstehen ca. 0,48 Mt Xylolen. Für die Aromatenproduktion werden 1640 kt FT-Naphtha bei einem spezifischen Energieeinsatz von 3030 GWh umgesetzt.

Der gesamte Ressourceneinsatz in diesem Szenario beträgt 126,3 Mt Trockenholz sowie 6620 GWh Energie (davon 4260 GWh Strom) für die biogene Route. Weiterhin fallen große Mengen an Koppelprodukten von insgesamt ca. 18,3 Mt an, darunter 7,5 Mt Kerosin, 3,8 Mt Diesel sowie weitere 5,0 Mt Mitteldestillat und 0,08 Mt LPG. In den CO_2-basierten Pfaden erhöht sich der Ressourcenbedarf auf 41,2 Mt Kohlenstoffdioxid und 6,6 Mt Wasserstoff sowie 382 TWh externe Energie. Es entstehen insgesamt 9,7 Mt an Koppelprodukten, davon 5,6 Mt Kerosin (Jet Fuel) und 3,1 Mt Diesel.

4.2.4 Systemische Einordnung und Integrationsfähigkeit

Der FT-Naphtha-Pfad kann die Cracker-Funktion im Stoffverbund grundsätzlich erhalten, setzt jedoch dessen langfristigen Weiterbetrieb voraus.

Sowohl Bio-FT-Naphtha als auch CCU-FT-Naphtha können als Naphtha-Ersatz im Steamcracker eingesetzt werden und ermöglichen damit die weitere Nutzung der bestehenden Olefin- und Aromateninfrastruktur des MDSV. Die Integrationsfähigkeit des Pfades ist jedoch vollständig an den Fortbestand der Crackerfunktion gebunden. Mit dem angekündigten Rückzug von Dow ist derzeit offen, ob bestehende Kapazitäten weiterbetrieben, von neuen Akteuren übernommen oder durch externe Anbindungen ersetzt werden können. Ohne eine stabile Betreiberstruktur und langfristige Investitionsentscheidungen verliert der FT-Naphtha-Pfad seine systemische Wirksamkeit im Verbund.

Die Wahl zwischen Bio-FT und CCU-FT verschiebt den zentralen Ressourcenengpass zwischen Biomasseverfügbarkeit und erneuerbarem Strom, Wasserstoff und CO_2.

Der Bio-FT-Pfad erfordert extrem hohe Biomassemengen von etwa 88 bis 126 Mt trockener Holzbiomasse pro Jahr und übersteigt damit deutlich die verfügbaren nationalen Potenziale. Der CCU-FT-Pfad vermeidet diese Biomasseabhängigkeit, verschiebt den Ressourcenbedarf jedoch in Richtung CO_2- und Wasserstoffbereitstellung sowie erneuerbarer Energie. In den Szenarien werden 28 bis 41 Mt CO_2 und 4,6 bis 6,6 Mt Wasserstoff pro Jahr benötigt, verbunden mit einem Energiebedarf von 265 bis 382 TWh[1]. Während der Bio-Pfad somit primär durch Biomasseverfügbarkeit begrenzt wird, hängt die Skalierbarkeit des CCU-Pfades vor allem von der Verfügbarkeit kostengünstigen erneuerbaren Stroms, von Elektrolysekapazitäten sowie von einer CO_2- und Wasserstoffinfrastruktur ab.

Die Bewertung des FT-Naphtha-Pfades hängt maßgeblich vom gewählten Bilanzierungsrahmen ab, da die FT-Synthese ein breites Produktspektrum erzeugt und nicht gezielt auf Olefine und Aromaten ausgerichtet ist.

Die FT-Synthese liefert ein breites Spektrum an Kohlenwasserstoffen mit einem Schwerpunkt auf Mitteldestillaten wie Kerosin und Diesel. Die Bereitstellung der in dieser Studie fokussierten Zielprodukte Ethylen, Propylen und Benzol ist daher mit der Entstehung großer Mengen weiterer Koppelprodukte verbunden (vgl. Abbildung 9). Wird die Bewertung ausschließlich auf diese chemischen Zielprodukte beschränkt, ist dieser Pfad rohstoff- und energieintensiv in Relation zum Zielprodukt. Werden hingegen auch die Koppelprodukte in die Systembilanz einbezogen, verändert sich die Bewertung der Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit deutlich. Weiterführende Ausführungen dazu folgen in Kapitel 4.5.

[1] Hiervon entfallen ca. 97 % auf den Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolysen. Würde Wasserstoff importiert werden, ließe sich der Strombedarf dementsprechend deutlich senken.

Benzol ist im FT-Naphtha-Pfad ein strukturell schwer bereitzustellender Zielstrom.

Die Crackung von FT-Naphtha liefert Aromaten nur mit begrenzter Selektivität. Benzol entsteht überwiegend als Nebenprodukt der Reformierung und Aromatenaufarbeitung und ist damit nicht gezielt steuerbar. Die Bereitstellung größerer Mengen ist mit zusätzlicher Prozesskomplexität, weiteren Aufarbeitungsschritten sowie zusätzlichen Energie- und Ressourcenaufwänden verbunden.

4.3 Transformationspfad 2: Zentrale Methanol-Plattform

Der methanolbasierte Transformationspfad stellt eine wesentliche Option für die Neuausrichtung des MDSV dar, da er die Erzeugung sowohl von Olefinen als auch von Aromaten auf einer gemeinsamen chemischen Plattform ermöglicht. Methanol fungiert hierbei als universelle Plattformchemikalie, die aus nicht-fossilen Kohlenstoffquellen hergestellt und anschließend katalytisch in zentrale petrochemische Basischemikalien überführt wird. Insgesamt werden vier Prozessvarianten betrachtet: Bio-MTO, CCU-MTO, Bio-MTA und CCU-MTA. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Rohstoffbasis für die Methanol-erzeugung sowie des nachgeschalteten Produktschwerpunkts, folgen jedoch einem identischen zweistufigen Grundkonzept.

In einem ersten Schritt wird Methanol entweder auf Basis biogener Rohstoffe oder durch die Nutzung von CO_2 und grünem Wasserstoff synthetisiert. In einem zweiten Schritt erfolgt die katalytische Umwandlung zu Olefinen (MTO) oder zu Aromaten (MTA). Der MTO-Prozess ist seit vielen Jahren großtechnisch etabliert – insbesondere in China, wo er zur Erzeugung leichter Olefine aus fossilem Methanol eingesetzt wird. Seit 2019 stellt MTO nach dem Kraftstoffsektor die zweitgrößte Methanolsenke weltweit dar; etwa ein Viertel der globalen Methanolproduktion wird inzwischen in MTO-Anlagen eingesetzt (Gielen et al. 2021). Der MTA-Prozess ist konzeptionell eng verwandt, jedoch auf die gezielte Bildung einer aromatenreichen Produktfraktion optimiert. Er befindet sich derzeit noch im Demonstrationsmaßstab mit einem technologischen Reifegrad von etwa TRL 7 und weist damit eine prinzipielle Eignung zur Substitution crackerbasierter Aromatenströme auf (Jiang et al. 2020).

4.3.1 Prozessbeschreibung MTO und MTA

Die Nachhaltigkeit des Methanolpfads wird maßgeblich durch die Herkunft des eingesetzten Methanols bestimmt. Für Bio-MTO und -MTA wird Methanol durch thermochemische Umwandlung von Biomasse hergestellt (vgl. Abbildung 21). Dabei werden Holzhackschnitzel oder biogene Reststoffe wie Altholz, landwirtschaftliche Nebenprodukte oder geeignete Abfallfraktionen vergast, um Synthesegas zu erzeugen. Nach Reinigung und Anpassung der Gaszusammensetzung wird dieses Synthesegas katalytisch zu Methanol umgesetzt. Das Bio-Methanol entspricht in chemischer Qualität und Reinheit vollständig dem konventionellen Produkt und kann als Drop-in-Rohstoff in nachgeschalteten MTO- oder MTA-Anlagen eingesetzt werden (Gielen et al. 2021; Saygin und Gielen 2021).

Die zweite Rohstoff-Route basiert auf der Nutzung von abgeschiedenem Kohlenstoffdioxid und grünem Wasserstoff und wird häufig als Power-to-Methanol oder CCU-Methanol bezeichnet. Dabei wird Kohlenstoffdioxid, das aus industriellen Punktquellen

oder aus der direkten Luftabscheidung stammen kann, mit grünem Wasserstoff katalytisch zu Methanol umgesetzt (vgl. Abbildung 22). Der eigentliche Syntheseschritt ist verfahrenstechnisch weitgehend identisch zur biogenen Route. Wird ausschließlich erneuerbarer Strom eingesetzt und das Kohlenstoffdioxid aus biogenen Punktquellen gewonnen, kann das sogenannte e-Methanol nahezu klimaneutral sein (Meunier et al. 2020; Cuevas-Castillo et al. 2024).

Die nachgelagerte Umwandlung von Methanol zu Olefinen oder Aromaten erfolgt in beiden Fällen über katalytische Prozesse auf Basis zeolithischer Katalysatoren. Chemisch wird Methanol dabei zunächst zu Dimethylether dehydratisiert, bevor es über ein komplexes Netzwerk aufeinanderfolgender Reaktionen zu einer Mischung aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen umgesetzt wird. Zu diesen Reaktionsschritten zählen unter anderem Oligomerisierung, Zyklisierung, Dehydrierung sowie Wasserstoff-Transferreaktionen. Die gezielte Einstellung der Prozessparameter und der eingesetzten Katalysatorsysteme bestimmt dabei maßgeblich, ob der Produktschwerpunkt auf leichten Olefinen oder Aromaten liegt (Li et al. 2021).

Im MTO-Prozess wird Methanol bei erhöhten Temperaturen und moderaten Drücken mit nahezu vollständigem Umsatz in eine olefinreiche Produktmischung überführt. Hauptprodukte sind Ethylen und Propylen zu etwa gleichen Anteilen, ergänzt durch eine C4-Fraktion aus Buten und Butadien (Zacharopoulou und Lemonidou 2018). Diese erzeugten Olefine weisen Drop-in-Qualität auf und können als direkte Substitute für fossile Olefine in der Polymer- und Spezialchemie eingesetzt werden. Die Massenausbeute an leichten Olefinen liegt in modernen MTO-Verfahren bei einer Größenordnung von ca. 40 %, da ein erheblicher Anteil der Masse an eingesetztem Methanol in Form von Prozesswasser abgeführt wird.[1]

Der MTA-Prozess folgt einem ähnlichen Reaktionsprinzip, ist jedoch auf die gezielte Bildung aromatischer Kohlenwasserstoffe optimiert. Durch höhere Reaktionstemperaturen und -drücke sowie angepasste Katalysatoren wird die Aromatisierung gegenüber der Olefinbildung bevorzugt. Die Hauptproduktfraktion besteht überwiegend aus Benzol, Toluol und Xylolen (BTX), wobei die genaue Zusammensetzung stark vom jeweiligen Katalysatorsystem abhängt. Typischerweise liegt ein Überschuss an Toluol und Xylolen vor, während der Benzolanteil vergleichsweise gering ausfällt. Bei einer benzoldominierten Nachfrage wird die BTX-Fraktion einem zusätzlichen Aufarbeitungsschritt unterzogen. Bei der Hydrodealkylierung (HDA) wird Toluol mit Wasserstoff zu Benzol umgesetzt, wodurch ein zusätzlicher Bedarf an Wasserstoff und Wärme entsteht (Dani et al. 2025; Yalçın 2025). Im Vergleich zum MTO-Prozess ist die Massenausbeute an Zielprodukten deutlich geringer. Literaturdaten weisen darauf hin, dass lediglich etwa 15 bis 20 % der eingesetzten Masse Methanol in BTX überführt werden (Jiang et al. 2020).

Neben den Hauptprodukten fallen in beiden Verfahren charakteristische Nebenströme an. Ebenso entsteht jeweils eine große Menge an Prozesswasser, welches aus der Dehydratisierung von Methanol resultiert. Außerdem werden leichte, gasförmige Fraktionen (C_1-C_4) gebildet, die einer energetischen Nutzung zugeführt werden können. Im

[1] Ergebnis eigener Berechnungen.

MTA-Prozess treten zusätzlich schwerere aromatische Fraktionen (C_9+) auf. Ein stoffliches Nutzungspotenzial ist zu prüfen und geht mit zusätzlichen Prozessschritten einher. Der im MTO-Prozess anfallende C_4-Schnitt kann nach Aufbereitung beispielsweise für die regionale Synthesekautschukproduktion weiter verwertet werden.

4.3.2 Energie- und Stoffbedarf je Tonne Endprodukt

Die verschiedenen Routen der methanolbasierten Plattform weisen deutliche Unterschiede in ihren spezifischen Energie- und Rohstoffbedarfen auf. Diese Unterschiede ergeben sich zum einen aus der vorgelagerten Bereitstellung des Methanols auf biogener oder CO_2-basierter Basis, zum anderen aus den unterschiedlichen stofflichen Ausbeuten der nachgelagerten Umwandlungsprozesse MTO und MTA.

Die Umwandlung von Methanol zu Olefinen ist deutlich effizienter in Bezug auf die Ausbeuten als die Umwandlung zu Aromaten. In modernen MTO-Verfahren werden aus ca. drei Tonnen Methanol etwa eine Tonne Olefinmix erzeugt, bestehend aus etwa gleichen Anteilen Ethylen und Propylen. Dies entspricht einer Massenausbeute von etwa 33 %. Zur Bereitstellung dieser Methanolmenge werden abhängig von der Rohstoffbasis ca. 6,0 t holzbasierte Trockenbiomasse oder etwa 4,2 t abgeschiedenes Kohlenstoffdioxid und 0,57 t Wasserstoff benötigt.[1]

Demgegenüber weist der MTA-Prozess eine deutlich geringere Massenausbeute auf. Aus rund 5,1 t Methanol wird in etwa eine Tonne eines Aromatenmixes erzeugt, bestehend aus Benzol, Toluol, Xylolen und schwereren Aromaten. Der initiale Benzolanteil liegt dabei bei unter zehn Prozent. Die Bereitstellung von Benzol erfolgt daher erst durch nachgelagerte Konversionsschritte, insbesondere durch HDA von Toluol. Insgesamt resultieren daraus ca. 0,29 t Benzol pro Tonne Aromatenmix. Für die Herstellung einer Tonne Benzol werden somit etwa 3,45 t Aromatenmix benötigt. Bezogen auf die vorgelagerte Methanolbereitstellung entspricht dies einem Rohstoffeinsatz von rund 35,9 t holzbasierter Biomasse oder 23,98 t Kohlenstoffdioxid und 3,25 t Wasserstoff pro Tonne Benzol.[2]

Für die Modellierung der Stoff- und Energieflüsse für nicht-fossiles Methanol wurde vorausgesetzt, dass Biomasse oder Kohlenstoffdioxid als Rohstoffquellen zur Verfügung stehen und damit keine zusätzlichen Ressourcenbedarfe zur Herstellung anfallen. In den CCU-Routen fließt eine lokale Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse in den Bilanzierungsrahmen ein.

4.3.3 Skalierung auf regionale Mengenszenarien

Die Skalierung der Methanolroute entspricht über alle Szenarien hinweg einem linearen Aufwuchs der zentralen Stoffströme, wobei sich die Relationen zwischen Einsatzstoffen, Zwischenprodukten und Endprodukten konstant verhalten. Mit zunehmenden

[1] Moderate Abschätzung; siehe auch National Renewable Energy Laboratory; Saygin und Gielen 2021.

[2] Die eigene Berechnung orientiert an der Modellierung von Jiang et al. 2020.

Produktvolumina entlang der Szenarien A bis C steigen sowohl der Bedarf an Biomasse (Holz) als auch der Bedarf an erneuerbarem Strom und Kohlenstoffdioxid signifikant an.

Tabelle 5: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe entsprechend Szenarien A bis C im Methanol-Pfad

	Szenario A		**Szenario B**		**Szenario C**	
Route	**Bio-Methanol**	**CCU-Methanol**	**Bio-Methanol**	**CCU-Methanol**	**Bio-Methanol**	**CCU-Methanol**
Holzeinsatz	10,6 Mt	-	13,8 Mt	-	15,9 Mt	-
CO_2-Einsatz	-	7,44 Mt	-	9,67 Mt	-	11,16 Mt
H_2-Einsatz	-	1,01 Mt	-	1,31 Mt	-	1,51 Mt
Energieeinsatz	1.625 GWh	57.345 GWh	2.112 GWh	74.512 GWh	2.427 GWh	85.943 GWh
Ethylen Output	0,3 Mt	0,3 Mt	0,40 Mt	0,40 Mt	0,43 Mt	0,43 Mt
Propylen Output	0,3 Mt	0,3 Mt	0,40 Mt	0,40 Mt	0,43 Mt	0,43 Mt
Benzol Output	0,2 Mt	0,2 Mt	0,25 Mt	0,25 Mt	0,3 Mt	0,3 Mt

Szenario A – Mindestabsicherung

Im Szenario A werden ca. 10,6 Mt Trockenholz oder alternativ 7,44 Mt Kohlenstoffdioxid und 1,01 Mt Wasserstoff eingesetzt um 5,32 Mt Methanol für die MTO- und MTA-Prozesse bereitzustellen. Daraus resultiert eine Olefinproduktion von rund 711 kt, aufgeteilt in jeweils 312 kt Ethylen und Propylen sowie 87 kt C4-Olefine. Damit kann die Polypropylenanlage in Schkopau vollständig versorgt werden. Mit dem zusätzlich anfallenden Ethylenstrom können bis zu 64 % der regionalen Polyethylenkapazität gedeckt werden. Die fehlenden 178 kt müssen in diesem Szenario weiterhin per Pipeline von anderen Dow-Standorten beschafft werden und sind fossilen Ursprungs. Der als Koppelprodukt anfallende C4-Strom deckt etwa 45 % des Verlustes durch die Crackerabschaltung. Für eine regionale Weiterverarbeitung müsste dieser in der Region zu 1,3-Butadien aufgearbeitet werden. Die technischen Voraussetzungen dafür sind am Standort Böhlen gegeben. Fehlende Mengen müssen beschafft werden, wobei die Machbarkeit einer kontinuierlichen Belieferung via Tankwagen oder einer Umrüstung bestehender Pipelinestrukturen zu prüfen ist. Der MTA-Prozess liefert in diesem Szenario rund 192 kt Benzol. Dadurch kann die Anilinproduktion in Böhlen abgesichert und außerdem ein Teil des in Leuna produzierten Phenols nachhaltig produziert werden. Der spezifische Energieeinsatz für die MTO- und MTA-Anlagen mit vollständig integrierter Methanol- und Wasserstofferzeugung liegt bei 1625 GWh für die biogene Route und 57 345 GWh bei Anwendung der CCU-Verfahren.

Sankey-Diagramme zur Visualisierung der Stoffströme im biobasierten und CO_2-basierten Methanolpfad für Szenario A sind in
Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Da sich die Szenarien ausschließlich durch eine lineare Skalierung der Stoffströme unterscheiden und die Struktur der Prozessketten unverändert bleibt, wird für die Szenarien B und C auf zusätzliche Sankey-Diagramme verzichtet. Dafür werden vergleichende Darstellungen der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die Bio- und CCU-Pfade in den Abbildungen Abbildung 25 und Abbildung 26 im Annex zur Verfügung gestellt.

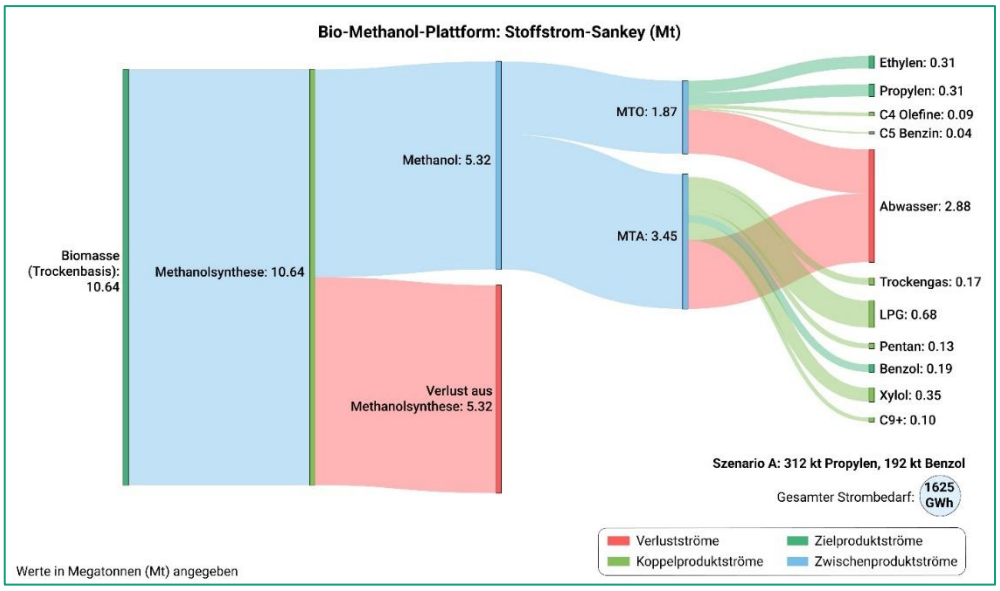


Abbildung 10: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route Bio-Methanol (MTO und MTA kombiniert) in Szenario A. Die Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks.

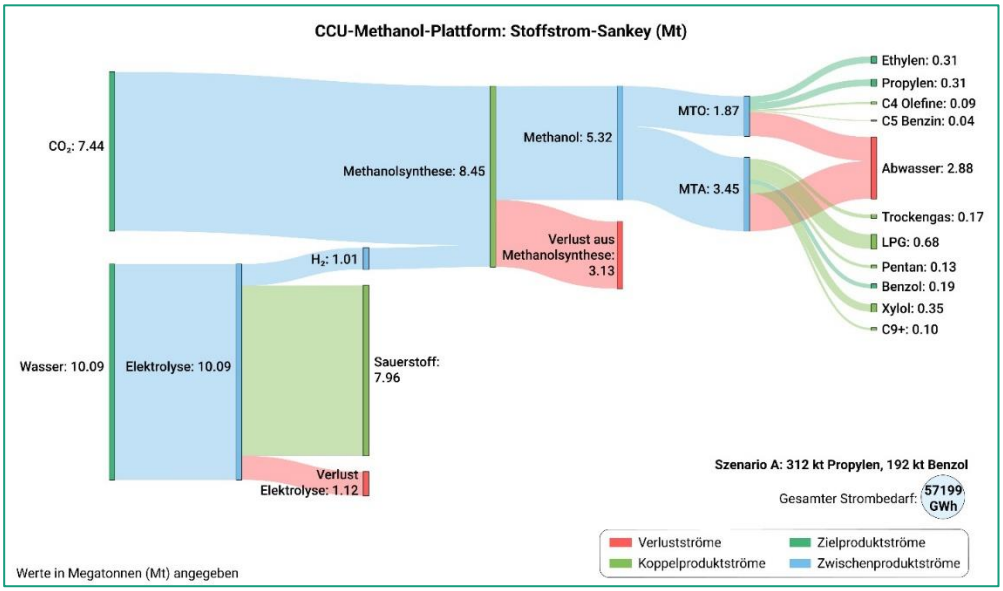


Abbildung 11: Sankey-Diagramm zur Stoffstromerhebung der Route CCU-Methanol (MTO und MTA kombiniert) in Szenario A. Die Verlustströme umfassen unter anderem Abwasser, Spül- und Abgase sowie Asche und Koks.

Szenario B – Erweiterte Bereitstellung

Im Szenario B steigt der Biomasseeinsatz auf rund 13,8 Mt, bei einer Methanolmenge von ca. 6,91 Mt. Das entspricht einer Menge von 9,67 Mt Kohlenstoffdioxid und 1,31 Mt Wasserstoff in den CCU-Pfaden. Die Olefinproduktion erhöht sich auf insgesamt 921 kt, aufgeteilt auf ca. 404 kt Ethylen und Propylen sowie 113 kt C4-Olefine. Damit wäre eine vollständig nachhaltige Herstellung von Polyethylen und Polypropylen in Schkopau und Leuna möglich. Wie auch in Szenario A kann der als Koppelprodukt anfallende C4-Schnitt für eine regionale Weiterverarbeitung genutzt werden. Es verbleibt ein Restbedarf, der durch Importe zu decken ist. Die durch MTA produzierte Zielgröße für Benzol steigt auf 250 kt und liefert damit die Grundlage für eine vollständige Abdeckung der Anilinproduktion in Böhlen sowie Substitution des für die Phenolproduktion in Leuna eingesetzten fossilen Benzols. Die Bio-Route weist einen Gesamtstrombedarf von rund 2112 GWh auf. In der CCU-Route werden inklusive der Produktion an Wasserstoff 74512 GWh an Energie benötigt.

Szenario C – Maximale Integration

Im Szenario C werden ca. 15,9 Mt Biomasse oder 11,16 Mt Kohlenstoffdioxid und 1,51 Mt Wasserstoff verarbeitet, um 7,97 Mt Methanol für die MTO- und MTA-Prozesse zu gewinnen. Die Olefinproduktion erreicht mit rund 982 kt ihren höchsten Wert und ermöglicht eine regionale Umkehr von fossilen zu biobasierten Produkten sowie eine teilweise Substitution bisheriger Importe. Das Szenario bietet die Option, den von der Anlagenschließung betroffenen regionalen Vinylchloridpfad wieder aufzunehmen und künftig einen nachhaltigen Rohstoff für die PVC-Produktion anzubieten. Eine technische Voraussetzung ist die Übernahme der entsprechenden Anlagen am Standort Schkopau. Auch in diesem Szenario wird eine zusätzliche überregionale Versorgung mit 1,3-Butadien für die Synthesekautschukproduktion in Schkopau benötigt. Durch verfahrenstechnische Optimierung von Prozessbedingungen des MTO-Verfahrens auf regionale Gegebenheiten kann die Ausbeute weiterhin gesteigert werden. Es ist zu prüfen, ob eine alleinige Versorgung des MDSV machbar ist.

4.3.4 Systemische Einordnung und Integrationsfähigkeit

Die Methanolplattform ermöglicht eine weitgehend drop-in-fähige Integration in bestehende Downstreamstrukturen, setzt jedoch eine sehr große und verlässliche Methanolbereitstellung voraus.

Die über MTO- und MTA-Prozesse erzeugten Olefine und aromatischen Produkte liegen grundsätzlich in Drop-in-Qualität vor, sodass große Teile der bestehenden Polymer- und Downstreaminfrastruktur weiter genutzt werden können. Dadurch lassen sich Transformationsrisiken reduzieren und eine vergleichsweise schnelle Integration ermöglichen. Gleichzeitig entsteht eine neue strukturelle Abhängigkeit in der Vorstufe: Der kontinuierliche Betrieb großskaliger Anlagen erfordert eine stabile Methanolversorgung. In den betrachteten Szenarien werden 2,9 bis 5,0 Mt/a Methanol eingesetzt, um etwa 624 bis 1160 kt/a Olefine bereitzustellen.

Die Bereitstellung von Benzol über MTA ist grundsätzlich möglich, bleibt jedoch selektivitätsbedingt begrenzt und mit zusätzlicher Prozesskomplexität verbunden.

Die Absicherung des Benzolbedarfs über MTA ist möglich, aber selektivitätsbedingt begrenzt und mit zusätzlichen Aufarbeitungsschritten der BTX-Fraktion verbunden. MTA erzeugt zunächst eine Produktmischung verschiedener aromatischer Fraktionen, in der Benzol nur einen relativ kleinen Anteil einnimmt. Erst durch einen zusätzlichen HDA-Schritt kann das Produkt in moderaten Mengen erhalten werden. Damit ist Benzol insgesamt als kritischer Zielstrom zu betrachten, der mit zusätzlicher Prozess-Komplexität, einer Vielzahl an Koppelprodukten, einem höherem Ressourcenbedarf sowie infrastrukturellen und anlagentechnischen Aufwand einhergeht. Damit ist die Eignung als breit skalierbare Aromaten-Ersatzroute bei jetzigem Entwicklungsstand als begrenzt zu betrachten.

Der zentrale Ressourcenengpass der Methanolplattform verschiebt sich je nach Produktionsroute zwischen Biomasseverfügbarkeit und erneuerbarem Strom sowie Wasserstoff.

Die Wahl der Produktionsroute für das Methanol selbst entscheidet, ob der Engpass in der Verfügbarkeit von Biomasse oder grünem Strom und Wasserstoff liegt. Für die Bio-Route liegen die Biomassebedarfe in den Szenarien bei 5,7 bis 10,1 Mt/a Trockenmasse bei einem Energiebedarf von 0,9 bis 1,6 TWh. Für die CCU-Route werden 4,0 bis 7,0 Mt/a Kohlenstoffdioxid eingesetzt, der Energiebedarf inklusive Wasserstoffproduktion liegt jedoch bei 33,6 bis 58,5 TWh. Daraus folgt: Bio-Methanol ist vor allem eine Frage nachhaltiger Biomassebeschaffung und Logistik, CCU-Methanol eine Frage von erneuerbarem Strom und Strompreisrisiken, Elektrolysekapazitäten sowie der Wasserstoffinfrastruktur.

4.4 Transformationspfad 3: Produktspezifische Substitution durch Biotechnologische Routen

Transformationspfad 3 bündelt chemisch-biotechnologische Routen, die nicht primär an der zentralen Rohstoffbereitstellung durch den Cracker ansetzen, sondern gezielt fossile Zwischen- und Endprodukte substituieren oder umgehen. Damit adressiert dieser Transformationspfad regionale Downstream-Wertschöpfungsketten, die in Kapitel 3 als in besonderem Maße betroffen identifiziert wurden, deren Fortführung jedoch nicht zwingend an eine regionale Crackerproduktion gekoppelt ist. Im Unterschied zu den Plattformpfaden (Bio-Naphtha, Methanol) liegt der Schwerpunkt hier nicht auf einer einheitlichen Plattformchemikalie, sondern auf einem Spektrum heterogener Prozessrouten und Produktsysteme.

Eine vollständige Erfassung aller biotechnologischen Optionen ist nicht Gegenstand dieser Studie. Es werden repräsentative Routen evaluiert. Dazu zählen

(i) biotechnologisch erzeugte Zwischenprodukte der Polyamid-6-Wertschöpfungskette am Beispiel der Caprolactamgewinnung sowie
(ii) ethanolbasierte Routen zur Bereitstellung von Bio-Ethylen als Schnittstelle zu olefinbasierten Produktsystemen.

Die Systemwirkung dieser Optionen wird anschließend im Hinblick auf Integrationsfähigkeit, potenzielle regionale Engpässe und Skalierbarkeit eingeordnet.

4.4.1 Herstellung von Bio-Caprolactam und Bio-Polyamid-6

Ein zentraler Anwendungsfall ist die Caprolactam- und Polyamid-6-Produktion am Standort Leuna. Bei dieser wird über mehrere Schritte Caprolactam aus Phenol erzeugt und anschließend durch Ringöffnungspolymerisation zu PA6 umgesetzt. Die Wertschöpfungskette weist eine direkte Abhängigkeit vom aromatischen Grundstoff Benzol auf und reagiert entsprechend sensibel auf Unterbrechungen der vorgelagerten Versorgung. In den zentralen FT-Naphtha- und Methanolpfaden wurde die Bereitstellung von Benzol prozessbedingt als besonders ressourcenintensiv identifiziert. Alternative biotechnologische Ansätze eröffnen die Möglichkeit, ausgewählte Zwischenprodukte wie Caprolactam aus biogenen Rohstoffen zu erzeugen und damit die Abhängigkeit von einzelnen fossilen Grundstoffen gezielt zu reduzieren.

4.4.1.1 Prozessbeschreibung

Alternative Routen zur Herstellung von biobasiertem Caprolactam und daraus abgeleitet PA6 basieren überwiegend auf der Nutzung von C6-Zuckern als biogene Kohlenstoffquelle. Diese werden fermentativ aus zucker- oder stärkehaltiger sowie lignocellulosischer Biomasse gewonnen und anschließend (chemisch-)biotechnologisch zu geeigneten Zwischenprodukten umgesetzt, aus denen Caprolactam synthetisiert werden kann. In der Literatur werden mehrere Optionen diskutiert, beispielsweise die Gewinnung von biogener Aminocapronsäure für die Zyklisierung zu Caprolactam. Untersucht wird außerdem der Weg über fermentativ erzeugte Muconsäure oder Adipinsäure, die chemisch zu Caprolactam umgesetzt werden können. Genomatica und Aquafil demonstrierten die Bio-PA6-Produktion im Tonnenmaßstab (Aquafil 2022). Darüber hinaus existieren Konzepte im frühen Forschungsstadium, die eine direkte, biotechnologische Produktion von Caprolactam durch optimierte Mikroorganismen fokussieren(Marjanovic 2021; Moon et al. 2025; Hackelöer und Kneißel 2012; Romero-Fernandez et al. 2022).

Ein gut untersuchtes Verfahren ist die Bio-Caprolactam-Synthese basierend auf Lävulinsäure. Diese Route wurde in der Literatur bereits mit quantifizierten Stoff- und Energiebilanzen beschrieben und daher als Referenz für die Analyse in der vorliegenden Studie ausgewählt (DBFZ 2025; Marjanovic 2021). Lävulinsäure wird durch saure Hydrolyse von Glukose oder Fruktose gewonnen und zunächst katalytisch zu Valerolacton umgesetzt. Schließlich wird das über mehrere Reaktionsschritte unter Einsatz von Ammoniak und Synthesegas in Caprolactam überführt. Eine schematische Darstellung des Prozessablaufs ist in Abbildung 30 im Annex dargestellt.

Bio-Caprolactam kann analog zu fossilen Routen zu Polyamid-6 polymerisiert werden. Obwohl das Zielprodukt Caprolactam chemisch identisch mit dem fossilen Monomer ist, unterscheidet sich die Bio-Prozessroute hinsichtlich der Nebenproduktbildung und Aufarbeitung. Für eine Integration in bestehende PA6-Produktionsanlagen ist daher eine Anpassung der Prozesskonfigurationen zu prüfen.

4.4.1.2 Berechnung Stoff- und Energiebilanz sowie Skalierung auf regionale Mengenszenarien

Für die Herstellung von Bio-Caprolactam über den Lävulinsäure-Weg werden ca. 3,28 t C6-Zucker sowie Hilfsstoffe in Form von 0,05 t Wasserstoff sowie 0,42 t Synthesegas pro Tonne Caprolactam benötigt (Moncada et al. 2018). Der anschließende Polymerisationsschritt zu PA6 verläuft mit einer Konversionsrate von etwa 90 Masse-%, sodass für die Produktion von einer Tonne PA6 rund 1,11 t Caprolactam eingesetzt werden müssen (Wang et al. 2025).

Insgesamt werden so 3,64 t Zucker zu einer Tonne PA6 verarbeitet, was einer Biomasseeffizienz von ca. 27 % entspricht (DBFZ 2025). Der spezifische Gesamtenergiebedarf beträgt 6,03 MWh/t Caprolactam bzw. 9,47 MWh/t PA6, wobei der Großteil auf zuzuführende Prozesswärme entfällt. Allein der Polymerisationsschritt erfordert rund 2,78 MWh/t PA6. Ein Wert, der mit petrochemisch basierten Prozessrouten vergleichbar ist (DBFZ 2025).

Während des Produktionsprozesses fallen verschiedene Koppelprodukte an, die entweder direkt in den Produktionsprozess integriert oder anderweitig verwertet werden können. Die bei der Zuckererzeugung verbleibenden Biomassereste lassen sich beispielsweise als Futtermittel oder zur Energiegewinnung nutzen. Durch die Verarbeitung von Holz entstehen zudem 0,4 t Lignin pro Tonne Zucker. Das kann neben der thermischen Verwertung auch für funktionale Füllstoffe oder andere stoffliche Anwendungen eingesetzt werden. Im-Lävulinsäure-Prozess fallen unter anderem Humine an, deren thermische Verwertung Teile des spezifischen Prozessenergiebedarfs decken kann. Dieses Szenario ist in der vorliegendne Studie nicht modelliert.

Unter der Annahme einer Weiterführung der regionalen PA6-Produktion in Leuna und einer Zielgröße von 180 kt Jahresproduktion ergibt sich ein Gesamtressourcenbedarf von 655kt Zucker sowie 1589 GWh Energie (davon 1504 GWh thermische Energie). Für die Zuckergewinnung aus Zuckerrüben werden zusätzlich etwa 400 GWh Energie benötigt (DBFZ 2025). Der damit verbundene Biomassebedarf beläuft sich auf 4128 kt Zuckerrüben, was etwa 15 % der prognostizierten deutschen Zuckerrübenernte im Jahr 2025/ 2026 entspricht (WVZ 2025). Erfolgt die Zuckergewinnung aus Holz, werden insgesamt 1638 kt Trockenholz sowie zusätzliche 2365 GWh Energie benötigt. Tabelle 6 zeigt den Rohstoffbedarf für die Bio-PA6-Route skaliert auf das angenommene Mengenszenario im MDSV.

Tabelle 6: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe für Bio-PA6 im Biotechnologiepfad

Route	1G-Route Zuckerrübe	2G-Route Trockenholz
Biomasseeinsatz	4128 kt/a	1638 kt/a
Energieeinsatz	1989 GWh	3955 GWh
Zucker Zwischenprodukt	655 kt/a	655 kt/a
Bio-Caprolactam Zwischenprodukt	200 kt/a	200 kt/a
Bio-PA6 Output	180 kt/a	180 kt/a

4.4.1.3 Systemische Einordnung

Ein biobasierter Caprolactam-Pfad kann die strukturelle Abhängigkeit der PA6-Wertschöpfungskette von der Benzolversorgung aus Böhlen reduzieren.

Die bestehende Caprolactam- und PA6-Produktion in Leuna ist strukturell von der Benzolversorgung aus Böhlen abhängig. In den vorangegangenen Transformationspfaden (Bio-Naphtha sowie Methanol/MTA) zeigte sich, dass die Bereitstellung von Benzol nur mit geringer Selektivität erfolgt und mit hohen Ressourcen- und Energieaufwänden verbunden ist. Benzol wurde damit als systemischer Engpass im MDSV identifiziert. Eine vollständige Substitution der Caprolactam-Produktion durch einen biobasierten Pfad würde den Benzolbedarf unter den gewählten Annahmen um rund 150 kt reduzieren und damit diesen Engpass abmildern.

Die Einführung von Bio-Caprolactam würde keine inkrementelle Umstellung darstellen, sondern eine strukturelle Neuorganisation der bestehenden Produktionsarchitektur erfordern.

Die zukünftige Ausgestaltung der PA6-Wertschöpfungskette in Leuna befindet sich durch die Veränderungen bei DOMO Caproleuna GmbH derzeit in einer Phase erhöhter struktureller Unsicherheit. Unabhängig von dieser Entwicklung ist der hier betrachtete Bio-Caprolactam-Pfad nicht direkt in die vorhandene (benzolbasierte) Kette integrierbar. Die regional etablierten petrochemischen Prozessstufen würden vollständig entfallen und durch neue Upstream-Strukturen ersetzt werden. Darüber hinaus ist das Bio-Caprolactam chemisch identisch mit fossilem Caprolactam. Durch die geänderte Prozessführung kann das Bio-Produkt ein abweichendes Qualitätsprofil aufweisen. Aufgrund dessen können angepasste Aufarbeitungsschritte oder eine Optimierung der bestehenden Anlagenkonfigurationen notwendig werden, um die für die Polymerisation zu PA6 erforderlichen Spezifikationen zu erreichen. Ein biobasierter Ersatz wäre somit keine inkrementelle Umstellung, sondern eine strukturelle Rekonfiguration der Produktionsarchitektur. Vor diesem Hintergrund ist der Pfad weniger als kurzfristige Anpassungsoption, sondern als perspektivischer Transformationsbaustein mit erheblichem Investitions- und Reorganisationsbedarf einzuordnen.

Der Bio-Caprolactam-Pfad ist technologisch noch nicht vollständig ausgereift, eröffnet jedoch eine industriepolitische Entwicklungsoption für den Standort.

Die zuckerbasierte Herstellung von Bio-Caprolactam befindet sich derzeit im Übergang zwischen Pilot- und Demonstrationsmaßstab (TRL 5–7). Der Pfad ist technologisch plausibel, jedoch zeitlich und infrastrukturell noch nicht voll ausgereift. Gleichzeitig eröffnet sich hier eine industriepolitische Handlungsperspektive: Eine gezielte Förderung von Forschungs- und Demonstrationsvorhaben könnte dazu beitragen, das technologische Reifestadium zeiteffizient auf industriellen Maßstab (TRL 8–9) zu heben. In Kombination mit Ansiedlungs- oder Erweiterungsperspektiven für Unternehmen ließe sich eine hochwertige, vertikal integrierte Wertschöpfung am Standort sichern beziehungsweise neu etablieren. Der PA6-Pfad ist damit weniger als kurzfristige Strukturstabilisierung, sondern als strategische Entwicklungsoption zu verstehen, die bei entsprechender

Unterstützung zur Diversifizierung und Weiterentwicklung des Stoffverbunds beitragen kann.

4.4.2 Bio-Ethylen aus Bio-Ethanol

Die ethanolbasierte Route zur Herstellung von Bio-Ethylen stellt einen alternativen Ansatz zur Bereitstellung von nachhaltigem Ethylen dar. Er kommt ohne zentrale Plattformchemikalien wie Naphtha oder Methanol aus. Ausgangspunkt ist die Umwandlung zuckerhaltiger Biomasse über das Zwischenprodukt Bio-Ethanol.

Der zweistufige Prozess ist ein chemisch-biotechnologischer Ansatz und umfasst die fermentative Herstellung von Ethanol sowie die anschließende katalytische Dehydratisierung zu Ethylen. Auf diese Weise kann Bio-Ethylen in Polymerqualität bereitgestellt werden, das chemisch identisch mit petrochemischem Ethylen ist und unmittelbar in bestehende Downstream-Prozesse im MDSV integriert werden kann.

4.4.2.1 Prozessbeschreibung Bio-Ethanol aus zuckerhaltiger oder lignozellulosischer Biomasse

Die Herstellung von Bio-Ethanol erfolgt durch mikrobiologische Fermentation von Zucker. In Abhängigkeit von der Herkunft und Aufbereitung der eingesetzten Biomasse, des technologischen Reifegrades und der Prozesskomplexität lassen sich mehrere Generationen der Bio-Ethanolproduktion unterscheiden.

Bio-Ethanol der ersten Generation (1G) wird aus zucker- oder stärkereichen Rohstoffen wie Getreide oder Zuckerrüben hergestellt, bei denen die fermentierbaren Zucker entweder direkt vorliegen oder über eine vergleichsweise einfache enzymatische Vorbehandlung bereitgestellt werden (Rastogi und Shrivastava 2018). Die anschließende Fermentation führt zur Bildung von Ethanol und Kohlenstoffdioxid. Nach der Gärung wird das ethanolhaltige Prozessgemisch durch mehrstufige Destillation und Rektifikation aufkonzentriert. Für die Verwendung in chemischen Prozessen ist eine Ethanolkonzentration von mindestens 95 Vol.-% erforderlich, die gegebenenfalls durch zusätzliche Entwässerungsschritte erreicht wird. Verbleibende biogene Rückstände können einer stofflichen oder energetischen Nutzung zugeführt werden. Der prinzipielle Prozessablauf basierend auf dem Rohstoff Zuckerrüben ist in Abbildung 27 im Annex dargestellt (Vučurović et al. 2022). Die Bio-Ethanolproduktion der ersten Generation ist industriell etabliert und weist einen technologischen Reifegrad von TRL 9 auf. In der Region nutzen die Anlagen von Nordzucker in Wanzleben-Börde (100 kt Bio-Ethanol/a) und Verbio in Zörbig (60 kt Bio-Ethanol/a) jeweils Zuckerrübenstoffe als Rohstoff, während Cargill in Barby (40 kt Bio-Ethanol/a) Getreide verwendet. Der größte Produzent der Region, CropEnergies in Zeitz (315 kt Bio-Ethanol/a), bedient sich beider Arten von Biomassen. Insgesamt sind etwa zwei Drittel der deutschen Produktionskapazitäten für Bio-Ethanol in Mitteldeutschland allokiert (BDBe; BioZ 2025; Cargill Deutschland).

Bio-Ethanol der zweiten Generation (2G) basiert auf lignocellulosehaltiger Biomasse wie Holz oder agrarischen Reststoffen. Aufgrund der komplexen Struktur dieser Rohstoffe ist eine intensive Vorbehandlung erforderlich (Mohsenzadeh et al. 2017). So erfolgt beispielsweise im Organosolv-Verfahren die Vorbehandlung verholzter Biomasse in einem Ethanol-Wasser-Gemisch unter sauren Bedingungen. Dadurch werden Cellulose und Hemicellulose für eine enzymatische Hydrolyse aufgeschlossen. Die freigesetzten

Zucker werden anschließend fermentiert und analog zu den zuvor beschriebenen 1G-Routen aufgearbeitet. Die Prozesse der zweiten Generation sind technologisch deutlich komplexer, ermöglichen jedoch die Nutzung von nicht-nahrungsmittelbasierten Rohstoffen.[1] Der technologische Reifegrad liegt derzeit bei TRL 7-8, da Anlagen im industriell relevanten Umfeld erprobt wurden, jedoch noch nicht flächendeckend kommerzialisiert sind. Der grundsätzliche Prozessablauf ist in Abbildung 28 im Annex wiedergegeben (Nitzsche et al. 2016; Rastogi und Shrivastava 2018).

Bio-Ethanol der dritten und vierten Generation auf Basis von Mikroalgen oder synthetisch-biologischen Konzepten befindet sich bislang im Forschungs- bzw. frühen Entwicklungsstadium (Devi et al. 2023). Aufgrund geringer technologischer Reifegrade und fehlender industrieller Skalierbarkeit (TRL ≤ 4) sind diese Optionen nicht Teil der Untersuchungen in der vorliegenden Studie.

4.4.2.2 Prozessbeschreibung Bio-Ethylen aus Bio-Ethanol

Die Herstellung von Bio-Ethylen erfolgt über eine katalytische Dehydratisierung, bei der Ethanol in der Gasphase unter Abspaltung von Wasser zu Ethylen umgesetzt wird. Der entstehende Reaktionsgasstrom wird anschließend aufbereitet, um Wasser, Kohlenstoffdioxid und weitere Begleitstoffe abzutrennen. Das so erhaltene Bio-Ethylen liegt in Drop-in-Qualität für die weitere Verarbeitung vor. Der prinzipielle Prozessablauf der Bio-Ethylenproduktion aus Bio-Ethanol ist in Abbildung 29 im Annex dargestellt (Nitzsche et al. 2016). Die zugrundeliegende Dehydratisierungstechnologie gilt als technisch ausgereift und wird bereits industriell eingesetzt. So wird von Braskem bereits seit 2010 eine Anlage zur Herstellung von Bio-PE aus Zuckerrohr-Ethanol mit einer Jahreskapazität von inzwischen 260 kt in Brasilien betrieben und vermarktet (Braskem 2024).

4.4.2.3 Berechnung Stoff- und Energiebilanz

Im Folgenden wird die zweistufige Herstellung von Bio-Ethylen aus zuckerhaltiger Biomasse stofflich und energetisch analysiert. Grundlage bilden die zwei zuvor beschriebenen Prozessketten, die sich hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffbasis unterscheiden, jedoch die Zwischenstufe Zucker als gemeinsame Referenzgröße nutzen. Die dargestellten Kennwerte beziehen sich auf 1G-Bio-Ethanol aus Zuckerrüben sowie 2G-Bio-Ethanol aus Trockenholz. Sie basieren auf einer einheitlichen Literaturquelle (DBFZ 2025) mit konsistent definierten Systemgrenzen und dienen als Referenz für die nachfolgende Szenarioanalyse.[2]

Im 1G-Pfad werden für die Produktion einer Tonne Zucker 6,3 t Zuckerrüben benötigt, was einer Biomasseeffizienz von etwa 16 % entspricht. Der spezifische Energiebedarf für die Zuckerherstellung beträgt 0,61 MWh/t Zucker. Für die anschließende Umwandlung

[1] Dazu zählen biogene Rohstoffe, die nicht in direkter Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln stehen, beispielsweise Holz und Holzreststoffe, Maisstroh, Industriepflanzen oder Pflanzenfasern.

[2] Die Berechnung des aggregierten Gesamtpfades in der Literaturquelle (DBFZ 2025) impliziert eine nahezu vollständige Umsetzung von Ethylen zu Polyethylen. Weiterhin wird für die Umwandlung Ethanol zu Ethylen eine Ausbeute von 95 %, entsprechend 1,74 t Ethanol pro Tonne Ethylen, angenommen (DECHEMA 2017). Diese Vereinfachungen dienen der Modellkonsistenz und stellen eine Näherung dar.

zu Ethylen werden 4,63 t Zucker pro Tonne Ethylen angenommen. Daraus ergibt sich ein Gesamtrohstoffbedarf von rund 29,2 t Zuckerrüben pro Tonne Ethylen. Die resultierende Gesamtbiomasse-Effizienz beträgt etwa 3,5 %. Der gesamte spezifische Energiebedarf für die Herstellung von Bio-Ethylen wird mit 9,62 MWh/t Ethylen ausgewiesen. Die bei der Zuckerrübenverarbeitung anfallenden Reststoffe wie Rübenschnitzel können zum großen Teil einer stofflichen Verwertung als Futtermittel zugeführt werden. Zusätzlich entstehen beim Dehydrierungsschritt des Ethanols etwa 1,7 t Kohlenstoffdioxid pro Tonne Ethylen, das in der Lebensmittelindustrie oder für CCU-Anwendungen genutzt werden kann.

Im 2G-Pfad werden für die Herstellung einer Tonne Zucker 2,50 t Holzbiomasse benötigt, woraus sich eine Biomasseeffizienz von 40 % für die Zuckerbereitstellung ergibt. Der Energiebedarf liegt hier bei ca. 3,61 MWh/t Zucker. Wie auch bei 1G-Ethanol kann von 4,63 t Zuckereinsatz je Tonne Ethylen ausgegangen werden, sodass sich ein Gesamtrohstoffbedarf von 11,6 t Holzbiomasse pro Tonne Ethylen ergibt. Die Biomasseeffizienz für den Gesamtprozess liegt bei etwa 8,6%; der spezifische Gesamtenergiebedarf beläuft sich auf 23,51 MWh/t Ethylen. Der deutlich höhere Energiebedarf holzbasierter Zucker- und Ethylenproduktion beruht hauptsächlich auf der aufwändigen Vorbehandlung der Biomasse. Hierfür ist ein hoher Bedarf an thermischer Energie zur Erzeugung großer Mengen Wasserdampfes erforderlich. Die energetische Effizienz dieses Pfades lässt sich durch die Koppelnutzung von Nebenprodukten und Reststoffen steigern. Beispielsweise kann das während der Holzverarbeitung anfallende Lignin zur Erzeugung von Prozessenergie genutzt werden. Wie auch im 1G-Pfad entstehen zudem hohe Mengen an Kohlenstoffdioxid, die nach Abscheidung einer stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

4.4.2.4 Skalierung auf regionale Mengenszenarien

Die lineare Skalierung der Rohstoff- und Energiebedarfe erfolgt in Anlehnung an die Versorgungsszenarien A bis C, die bereits in den Kapiteln zur zentralen Naphtha- und Methanolplattform zugrunde gelegt wurden. Betrachtet wird hier ausschließlich der Ethylenstoffstrom, der für die regionale Polymer- und Copolymerchemie sowie die Vinylchloridkette relevant ist.

Szenario A – Mindestabsicherung

Im Mindestversorgungsszenario A wird eine überregionale Versorgung mit Ethylen über Pipelineinfrastruktur angenommen. Eine zusätzliche regionale Produktion von Bio-Ethylen wird in diesem Szenario daher nicht berücksichtigt.

Szenario B – Erweiterte Bereitstellung

Im Szenario B wird eine regionale Zielgröße von bis zu 490 kt/a an Ethylen angenommen, die eine Versorgung der Polyethylen- sowie Copolymerproduktion mit Bio-Ethylen im MDSV ermöglicht. Insgesamt werden dafür etwa 853 kt an Bio-Ethanol bzw. 2,27 Mt Zucker benötigt. In der G1-Route resultiert ein Rohstoffbedarf von 14,30 Mt Zuckerrüben und der spezifische Gesamtenergiebedarf liegt bei 4710 GWh. Davon entfallen ca. 93 %, auf thermische Energie für den Fermentations- und Dehydrierungsschritt, was 4380 GWh entspricht. Alternativ kann die Erzeugung des Bio-Ethylens auf Basis von Holzbiomasse erfolgen, wofür rund 5,68 Mt Trockenholz benötigt werden.

Der Gesamtenergiebedarf liegt hier bei 11.520 GWh, wobei auch hier fast der gesamte Betrag auf den Einsatz von thermischer Energie entfällt. Im Gegensatz zur Umwandlung von Zuckerrüben wird beim Einsatz von Holzbiomasse etwa das sechsfache an Energie benötigt, um den Rohstoff zu fermentierbaren Zuckern aufzuspalten.[1]

Szenario C – Maximale Integration

Das Szenario C erweitert die Basisversorgung mit Polymerisationsprodukten um die Option, die Wertschöpfung im MDSV durch eine Wiederinbetriebnahme der Ethylendichlorid-/ Vinylchloridanlagen am Standort Schkopau zu erweitern. Die Zielgröße an benötigtem Bio-Ethylen steigt auf bis zu 580 kt/a an, wofür etwa 1009 kt Bio-Ethanol bzw. 2,69 Mt an Zucker benötigt werden. Dieser kann aus 16,9 Mt Zuckerrüben oder alternativ 6,71 Mt Trockenholz gewonnen werden. Der Gesamtenergiebedarf liegt bei 5580 GWh im Falle von Zuckerrübeninput. Bei Nutzung von Trockenholz als Rohstoff sind entsprechend 13.630 GWh an Energie aufzubringen.In beiden Szenarien entstehen Nebenprodukte von 0,9 bis 1,1 Mt Lignin sowie Rübenschnitzel und Vinasse (nicht modelliert) bzw. circa 816 bis 966 kt Kohlenstoffdioxid, die einer weiteren energetischen oder stofflichen Verwertung im MDSV zur Verfügung stehen. Tabelle 7 zeigt vergleichend den Rohstoffbedarf im Bio-Ethylen-Pfad entsprechend der Skalierung in den untersuchten Versorgungsszenarien.

Tabelle 7: Auf den MDSV skalierte Ressourcenbedarfe für Bio-Ethylen im Biotechnologiepfad; Szenario A nicht aufgeführt, da keine regionale Ethylenproduktion erfordert wird

Route	Szenario B		Szenario C	
	1G-Route Zuckerrübe	**2G-Route Trockenholz**	**1G-Route Zuckerrübe**	**2G-Route Trockenholz**
Biomasseeinsatz	14,30 Mt/a	5,68 Mt/a	16,91 Mt/a	6,71 Mt/a
Energieeinsatz	4710 GWh	11.520 GWh	5580 GWh	13.630 GWh
Zucker Zwischenprodukt	2,27 Mt/a	2,27 Mt/a	2,69 Mt/a	2,69 Mt/a
Bio-Ethanol Zwischenprodukt	853 kt/a	853 kt/a	1.009 kt/a	1.009 kt/a
Bio-Ethylen Output	490 kt/a	490 kt/a	580 kt/a	580 kt/a

4.4.2.5 Systemische Einordnung und Integrationsfähigkeit

Bio-Ethylen kann petrochemisches Ethylen direkt ersetzen, nicht jedoch eine integrierte Olefinplattform wie den Steamcracker.

Bio-Ethylen wirkt im MDSV nicht als Ersatz des Crackers, sondern als gezielte Substitution eines einzelnen Olefinbausteins für ausgewählte Downstream-Ketten. Da Bio-Ethylen chemisch identisch zu petrochemischem Ethylen ist, kann es in Polymerqualität

[1] Bei der Verarbeitung von Holzbiomasse kann das als Koppelprodukt anfallende Lignin thermisch zur Bereitstellung von Prozessenergie genutzt werden (Morales et al. 2021); hier nicht modelliert.

ohne Anlagenanpassung in bestehende die olefinbasierte Weiterverarbeitung integriert werden. Damit lassen sich insbesondere ethylenabhängige Wertschöpfungsstufen stabilisieren, auch wenn eine regionale Olefinproduktion entfällt. Gleichzeitig ersetzt die Route keine breit integrierte Olefinplattform, weil weder Propylen noch Aromaten bereitgestellt werden und damit nur ein Teil des Verbundsystems adressiert wird.

Eine Ausweitung von Bio-Ethylen im MDSV erfordert zusätzliche Biomasse oder eine Umlenkung bestehender Bio-Ethanol-Nutzungen und steht damit in direkter Nutzungskonkurrenz zu anderen Sektoren.

Neben primären Agrarrohstoffen weisen bislang anderweitig genutzte Nebenströme der Zuckerproduktion wie z. B. Zuckerrübenschnitzel Potenziale als neuartige Biomassebasis für eine regionale Bio-Ethanolproduktion im MDSV auf (Finkenstadt 2014). Der überwiegende Anteil des produzierten Bio-Ethanols wird jedoch weiterhin energetisch genutzt: 2024 entfielen 75,7 % auf die Kraftstoffbeimischung, während 11,8 % im Nahrungsmittel- und Getränkebereich und 12,8 % in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt wurden. Soll Bio-Ethanol künftig in größerem Umfang als Plattformchemikalie im MDSV fungieren, erfordert dies eine deutliche Ausweitung der Biomassebereitstellung und den Ausbau bereits bestehender Produktionskapazitäten. Hinzu kommt eine Verschiebung von Nutzungsanteilen gegenüber Kraftstoff-, Lebensmittel- und Futtermittelindustrien, wodurch Nutzungskonkurrenzen nicht ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig entsteht bei der Fermentation von Zuckern zu Ethanol stöchiometrisch reines CO_2. Das kann im Rahmen integrierter Bioraffineriekonzepte anderen Nutzungen wie z. B. in CCU-Anwendungen oder der Getränkeindustrie zugeführt werden und stellt somit einen systemischen Hebel zur teilweisen Kompensation höherer Produktionskosten nachgelagerter Intermediäre wie Bio-Ethylen dar (DBFZ 2025).

Die industrielle Skalierung von Bio-Ethylen wird global durch großskalige Bio-Ethanol-Produktionssysteme bestimmt, während regionale Potenziale im MDSV begrenzt sind.

Die globale Bio-Ethanolproduktion ist bereits heute stark konzentriert und weist eine deutlich andere Rohstoff- und Skalierungslogik auf als der europäische Kontext. Im Jahr 2024 wurden weltweit ca. 121 Mrd. Liter Bio-Ethanol (ca. 95 Mt) produziert, wobei über 80 % des Produktionsvolumens auf die USA und Brasilien entfielen, die überwiegend auf Mais beziehungsweise Zuckerrohr als Biomassebasis zurückgreifen. Drittgrößter Produzent war 2024 Indien (World Bioenergy Association 2025). Diese außereuropäischen Produktionssysteme sind durch großskalige, stark integrierte Agrar- und Bioraffineriestrukturen sowie niedrige Energiepreise gekennzeichnet und erlauben die Bereitstellung erheblicher Mengen an Bio-Ethanol. Dadurch wird deutlich, dass die industrielle Nutzung von Bio-Ethanol als chemische Plattform, und damit auch die Herstellung von Bio-Ethylen, international unter günstigeren Rahmenbedingungen erfolgt als es im MDSV möglich wäre.

Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen und eingeschränkter Flächenverfügbarkeit folgt für den mitteldeutschen Raum, dass eine substanzielle Skalierung von Bio-Ethylen nicht allein durch regionale Biomassepotenziale realisierbar ist, sondern entweder mit einer gezielten Umlenkung bestehender Bio-Ethanol-Verwendungen oder mit Importen aus außereuropäischen Produktionssystemen einhergehen müsste. Dies ist verbunden mit zusätzlichen Abhängigkeiten sowie Verlagerungen von Umwelt- und

Flächennutzungswirkungen. Weiterhin sind die Auswirkungen des kürzlich unterzeichneten Freihandelsabkommens zwischen der EU und den südamerikanischen MERCOSUR-Staaten auf die Agrarbranche derzeit noch nicht absehbar. Dies betrifft insbesondere deren Bereitstellung der nötigen Biomasse im MDSV für Bio-Ethanol.

Die Produktion von Bio-(Poly)Ethylen auf Basis von Bio-Ethanol ist weit entwickelt und wird beispielsweise in Brasilien bereits im industriellen Maßstab auf Basis von Zuckerrohr durchgeführt. Weitere internationale Projekte zur industriellen Produktion von Bio-Ethylen sind in Tabelle 11 im Annex zusammengefasst. Schätzungen sagen ein Wachstum der globalen Produktionsmenge von Bio-Polyethylen bis 2027 auf ca. 0,7 Mt voraus (DBFZ 2025). Damit stellt dieser Nutzungspfad weiterhin eine Option für die Ergänzung der Strukturen im MDSV dar.

4.5 Vergleich der Transformationspfade

Die drei betrachteten Transformationspfade unterscheiden sich grundlegend in ihrer Systemlogik, stofflichen Reichweite und Rohstoffeffizienz. Der Naphtha-Pfad zielt primär auf den Erhalt der bestehenden Verbundstruktur des MDSV ab. Er ersetzt fossiles Naphtha durch biogene oder CCU-basierte Varianten und ist strukturkonservativ. Damit weist er die höchste Systemkontinuität und die größte Kompatibilität mit bestehenden Anlagen auf. Der Methanol-Pfad verfolgt hingegen eine alternative Plattformlogik und umgeht die klassische Cracker-Funktion. Biotechnologische Routen verlassen die Plattformlogik bewusst. Sie setzen weiter Downstream an und substituieren fossile Zwischen- oder Endprodukte selektiv und funktional.

Welche Pfade sich für einen möglichen nachhaltigen Umbau des MDSV in welchem Umfang eignen, wird sich im Wesentlichen anhand der lokalen Standortbedingungen und ökonomischen Rahmenbedingungen (insbesondere der Rohstoffkosten) entscheiden. Eine komparative technische Analyse der untersuchten Pfade und der jeweils zugehörigen Technologien kann Aufschluss über eine Priorisierung der Optionen geben. Im Folgenden stehen daher insbesondere die jeweiligen Rohstoff- und Energieeffizienzen im Mittelpunkt der Betrachtung.

Tabelle 8 illustriert die unterschiedlichen stofflichen Effizienzen der Pfade. Methanol-basierte Pfade zeigen die höchsten Rohstoffeffizienzen, während die beiden biomasse-basierte Plattformpfade (Bio-NTO, Bio-MTO) die geringsten spezifischen Energiebedarfe aufweisen. Beide Biotechnologie-Pfade zeigen eine mittlere bis hohe Rohstoffeffizienz und benötigen vor allem große Mengen an thermischer Energie. Ein solcher produktspezifischer Vergleich hat jedoch nur begrenzte Aussagekraft, da bei den Plattformpfaden (FT-Naphtha und Methanol) breite Produktspektren mit unterschiedlichen Koppelprodukten entstehen. Die Bewertung der Ressourceneffizienz hängt also wesentlich davon ab, welche Systemgrenze zugrunde gelegt wird und wie diese Koppelprodukte verwertet werden.

Tabelle 8: Vergleich des Rohstoff- und Energieeinsatzes der untersuchten Transformationspfade und Produktionsrouten am Beispiel Ethylen normiert auf eine Tonne Output; [1] keine Berücksichtigung energetischer Nutzung von Koppelprodukten; [2] Massenausbeute an Ethylen je Tonne Rohstoffeinsatz

	Naphtha-Pfad		**Methanol-Pfad**		**Biotechnologie-Pfad [1]**	
Route	**Bio-NTO**	**CCU-NTO**	**Bio-MTO**	**CCU-MTO**	**1G-Route**	**2G-Route**
Rohstoffe	Holz	Kohlenstoffdioxid + Wasserstoff	Holz	Kohlenstoffdioxid + Wasserstoff	Zuckerrübe	Holz
Rohstoffeinsatz	66 t	21,2 t CO_2 + 3,4 t H_2	12 t	8,4 t CO_2 + 1,1 t H_2	29,1 t	11,6 t
Energieeinsatz, extern (inkl./exkl. Elektrolyse)	2,8 MWh	196,3 MWh / 14,6 MWh	2 MWh	64,7 MWh / 2,1 MWh	9,6 MWh	23,5 MWh
davon elektrisch (inkl. / exkl. Elektrolyse)	2,0 MWh	189,9 MWh / 8,7 MWh	2 MWh	64,7 MWh / 2,1 MWh	1,3 MWh	1,0 MWh
davon thermisch	0,8 MWh	6,4 MWh	-	-	8,3 MWh	22,5 MWh
Rohstoffeffizienz [2]	1,5 %	4,1 %	8,3 %	10,5 %	3,4 %	8,6 %
Ethylen Output	1 t	1 t	1 t	1 t	1 t	1 t

Abbildung 12 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Systemgrenzen und Effizienz am Beispiel der biomassebasierten Plattformpfade. Im Bio-Methanol-Pfad sind ca. 50 % der hergestellten Produkte Basischemikalien, die im existierenden Chemie-Cluster weiterverarbeitet werden. Im Bio-FT-Naphtha-Pfad beläuft sich dieser Anteil auf nur ca. 14%. Die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit eines der beiden Pfade kann daher nicht losgelöst von einem ganzheitlichen Verwertungs- bzw. Nutzungskonzept des anfallenden Produktspektrums durchgeführt werden. Liegt der Fokus auf der Produktion von Basischemikalien (High Value Chemicals, HVC), erscheint der Bio-Methanol-Pfad energetisch vorteilhafter als der Bio-FT-Pfad (1,3 MWh/t vs. 2,3 MWh/t für HVC). Wird das komplette Spektrum produzierter Kohlenwasserstoff-Verbindungen betrachtet, kehrt sich das Bild um und der Bio-FT-Naphtha-Pfad erscheint vorteilhafter (0,3 MWh/t vs. 0,7 MWh/t). Zu den anfallenden Koppelprodukten in diesem Pfad zählen etwa 6,6 Mt Kerosin und 3,3 Mt Diesel. Der Bio-FT-Naphtha-Pfad wird daher auch eher im Kontext nachhaltiger Raffineriekonzepte gesehen, bei denen die Verwertung des FT-Naphthas ein Beiprodukt ist. Dies ähnelt auch den Verwertungsstrukturen der meisten konventionellen Raffinerien.

Die Energieeffizienzen der Pfade sind wesentliche Treiber ihrer Wirtschaftlichkeit. In der praktischen Umsetzung muss implizit davon ausgegangen werden, dass die (externen)

Energieversorgungssysteme z. B. durch den Zubau von Wind- oder Solarparks skaliert werden können, um die Energiebedarfe zu decken.

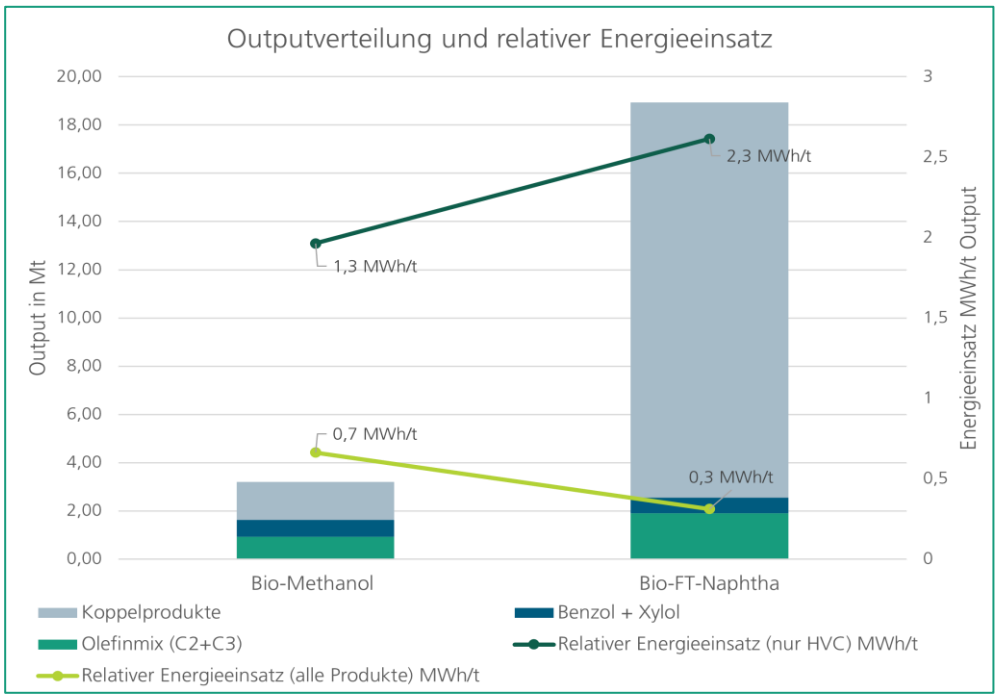


Abbildung 12: Outputverteilung und relativer Energieeinsatz Bio-Methanol und Bio-FT-Naphtha; Mengenszenario B.

In Bezug auf die Rohstoffversorgung in biobasierten Plattformpfaden ist jedoch mit Mengenbeschränkungen aufgrund limitierter Flächen- und Nutzungskonkurrenzen zu rechnen, die sich entweder in begrenzten regionalen Versorgungskapazitäten und/oder in steigenden Bezugskosten der benötigten Biomassen niederschlagen. CCU-basierte Plattformpfade weisen dahingegen den Vorteil auf, dass sie auf industrieller Ebene skalierbar sind und nicht an das natürliche Ökosystem gekoppelt sind.

Abbildung 13 zeigt die absoluten Energie- und Rohstoffbedarfe der Bio- und CCU-Methanol-Pfade. Da in beiden Fällen das gleiche Produktportfolio (2 Mt chemische Produkte und 1,6 Mt Koppelprodukte) erzeugt wird, sind die absoluten Energie- und Rohstoffbedarfe direkt vergleichbar. Der CCU-Pfad zeichnet sich durch eine höhere Rohstoffeffizienz (Reduktion der Rohstoffmenge um ca. 20 %) bei leicht höherem Elektrizitätsbedarf als der biogene Pfad aus, sofern davon ausgegangen wird, dass der benötigte Wasserstoff importiert und nicht per Elektrolyse vor Ort produziert wird.[1] Sind sowohl Kohlendioxid als auch Wasserstoff verfügbar, zeigen beide Pfade ähnliche techno-ökonomische Kennzahlen. Die Vorteilhaftigkeit beider Pfade hängt also im Wesentlichen von den Versorgungskosten und -kapazitäten der Basisrohstoffe ab. Im Falle der Implementierung des CCU-Methanol-Pfads müssten beispielsweise 1,3 Mt Wasserstoff (Brennwert 43 TWh) jährlich importiert werden. Zum Vergleich: Aktuell fließen jährlich ca. 1,6 Mt Naphtha-Importe in den MDSV (Brennwert ca. 21 TWh).

[1] Die Produktion der benötigten 1,3 Mt Wasserstoff erfordert ca. 72 TWh elektrischer Energie.

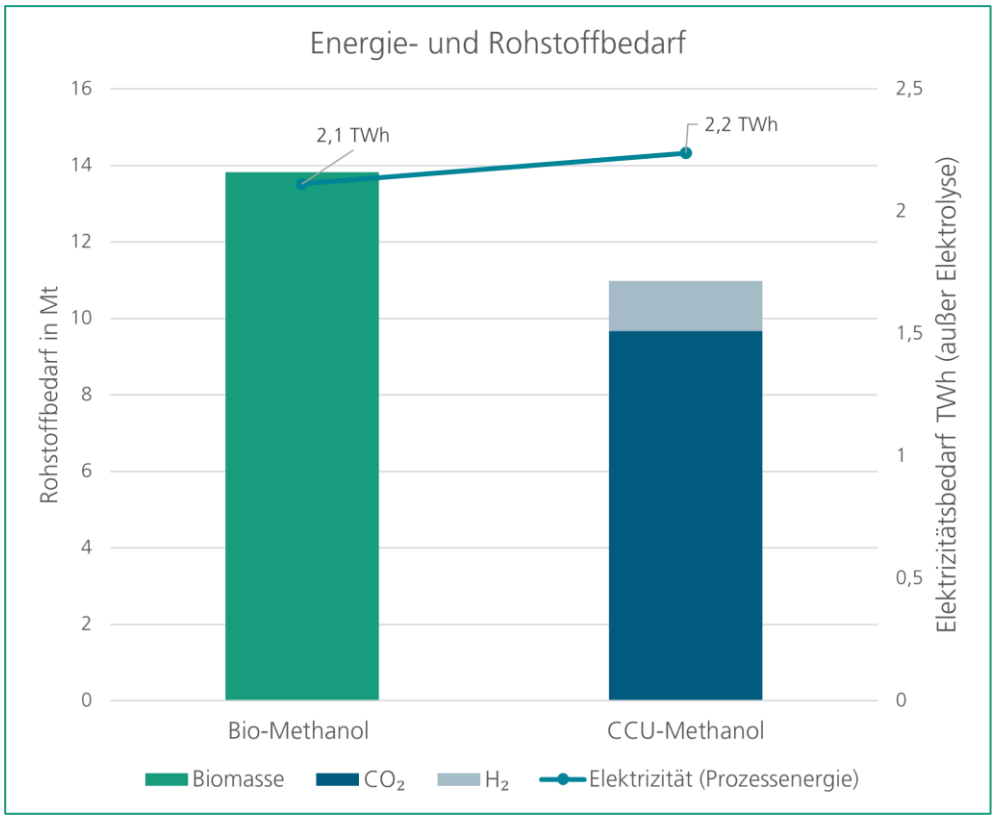


Abbildung 13: Energie- und Rohstoffbedarfe der Methanol-basierten Plattformpfade.

Unter Berücksichtigung der Energie- und Rohstoffeffizienzen der betrachteten Plattformpfade zeigen sich die jeweiligen relativen Vor- und Nachteile. Abbildung 14 zeigt die korrelierten Energie- und Rohstoffbedarfe der vier plattformbasierten Transformationspfade. Hinsichtlich des relativen Rohstoffbedarfs dominiert der CCU-Methanol-Pfad die anderen Pfade. Betrachtet man den relativen Energiebedarf, ist der Bio-FT-Naphtha-Pfad besonders vorteilhaft. Dies impliziert, dass eine Kombination beider Pfade eine effiziente technologische Option zur Versorgung des MDSV unter Berücksichtigung limitierter Biomasse- und Energieversorgungskapazitäten darstellen kann. -Es setzt jedoch voraus, dass das gesamte Produktspektrum einer Verwertung zugeführt werden kann. In realen Industriesystemen wie dem MDSV ist dies bislang nur eingeschränkt gegeben, da für einzelne Koppelprodukte noch keine entsprechenden Absatzmärkte, Infrastrukturen oder Nutzungspfade etabliert sind. So fallen beispielsweise im FT-Naphtha-Pfad größere Mengen an Kraftstofffraktionen an, für deren Nutzung bislang keine adäquate regionale Nachfrage- und Bereitstellungsstruktur besteht. Bestimmte Nebenströme wie leichte Gase können jedoch prozessintern energetisch genutzt werden und so den externen Energiebedarf teilweise reduzieren.

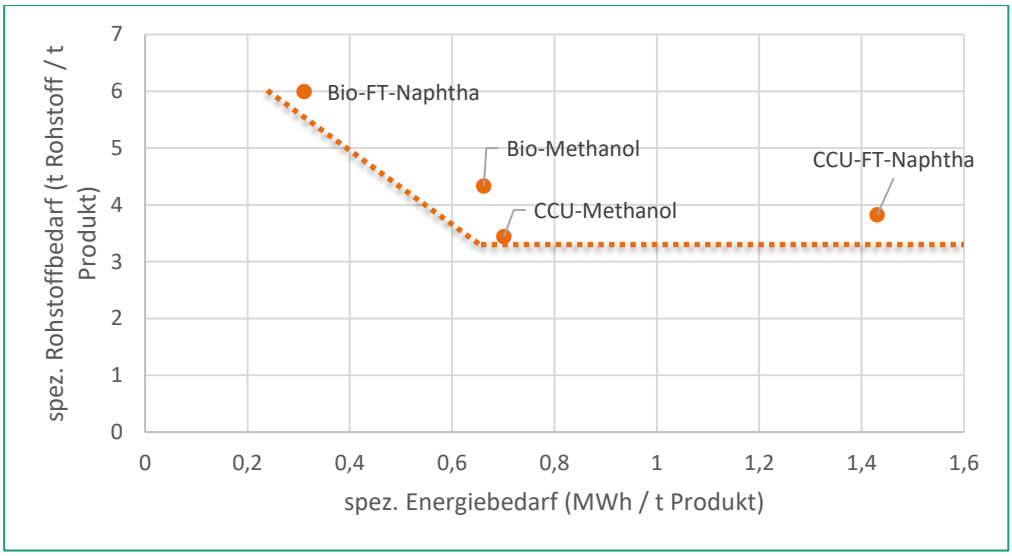


Abbildung 14: Spezifische Energie- und Rohstoffbedarfe der plattformbasierten Transformationspfade.

Das heißt, die tatsächliche Ressourceneffizienz hängt entscheidend von der Betrachtung der Transformationspfade als integrierte Multi-Output-Systeme ab. Während der Bio-FT-Naphtha-Pfad seine Stärke vor allem über die Koppelproduktion und Verwertung zusätzlicher Produktströme entfaltet, liegen die Vorteile methanolbasierter Routen in der direkten Bereitstellung hoher Anteile hochwertiger chemischer Plattformchemikalien. Die Wahl eines Technologiepfades ist daher maßgeblich von der ökonomischen Verwertbarkeit des gesamten Produktmixes abhängig. Insbesondere bei FT-Naphtha-basierten Routen müssen Verbundeffekte genutzt und Koppelprodukte sinnvoll in bestehende oder neue Absatzmärkte integriert werden, damit die potenziellen systemischen Effizienzvorteile tatsächlich realisiert werden können.

Biotechnologische Routen folgen dagegen einer anderen Logik: Sie setzen gezielt an einzelnen Wertschöpfungsstufen an und substituieren spezifische Zwischen- oder Endprodukte. Dadurch können sie einerseits spezielle biobasierte Rohstoffquellen wie Rübenhackschnitzel nutzen und andererseits hochwertige Chemikalien bereitstellen ohne den Umweg über großvolumige Chemikalienplattformen wie Methanol zu gehen. Die höhere Selektivität reduziert die Abhängigkeit von der Verwertung breiter Koppelproduktströme, begrenzt jedoch zugleich die Transformationsbreite im MDSV.

Neben Fragen der Ressourceneffizienz unterscheiden sich die Transformationspfade deutlich hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Rohstoff- und Energieversorgung, was einen wesentlichen Faktor für die Realisierbarkeit darstellt. CO_2-basierte Plattformpfade benötigen industrielle CO_2-Punktquellen und damit verbunden den Aufbau geeigneter Abscheide- und Transportsysteme. Gleichzeitig entsteht durch die Bereitstellung des Wasserstoffs ein erheblicher Zusatzbedarf an erneuerbarer Elektrizität. Die Realisierbarkeit CO_2-basierter Plattformpfade hängt damit weniger von der Mobilisierung stofflicher Rohstoffe als vielmehr von der Verfügbarkeit der Energie- und Wasserstoffinfrastrukturen ab. Biomassebasierte Pfade erfordern hingegen großskalige Beschaffungs- und Logistikstrukturen und stehen zugleich in Konkurrenz zu bestehenden stofflichen und energetischen Nutzungsoptionen der Biomassearten. Biotechnologische Substitutionsrouten weisen die Möglichkeit auf, eine stärkere Ausrichtung auf spezifische und regional verfügbare Inputströme vorzunehmen. Dazu zählen beispielsweise

zuckerhaltige Agrarrohstoffe, lignozellulosische Reststoffe oder andere biogene Nebenströme aus Landwirtschaft und Industrie. Diese differenzierten Feedstockstrukturen eröffnen potenziell dezentralere Versorgungs- und Produktionsstrukturen, bei denen einzelne Wertschöpfungsstufen näher an den jeweiligen Rohstoffquellen organisiert werden können. Gleichzeitig sind dadurch ihre Skalierungspotenziale begrenzt.

5 Implikationen für einen MDSV 2035

Der im MDSV beobachtete Strukturbruch ist nicht isoliert zu betrachten, sondern als Teil eines umfassenden globalen Anpassungsprozesses in der petrochemischen Industrie. Der Rückzug einzelner Unternehmen und die Stilllegung von Anlagen sind für die betroffenen Standorte, deren Belegschaft und regionalen Wertschöpfungsketten mit erheblichen sozialen und wirtschaftlichen Belastungen verbunden. Für viele Akteure vor Ort stellen diese Entwicklungen eine existenzielle Zäsur dar. Gleichzeitig spiegeln sie tiefgreifende Veränderungen der ökonomischen Rahmenbedingungen wider, denen sich die europäische Chemieindustrie insgesamt gegenübersieht. Schwache Nachfrage zentraler Abnehmer, globaler Wettbewerbsdruck durch Überkapazitäten, dauerhaft hohe Energiekosten sowie ein wachsender Investitionsbedarf in klimaneutrale Technologien treffen insbesondere kapitalintensive und margenschwache Upstream-Strukturen. Vor diesem Hintergrund sind Standortentscheidungen zunehmend Teil globaler Portfoliosteuerung und nur begrenzt auf regionaler Ebene beeinflussbar.

Die in der vorliegenden Studie betrachteten Transformationspfade sind daher nicht als abstrakter technischer Optionenraum zu verstehen, sondern als Antwortmöglichkeiten auf diese industrieökonomische Realität. Sie reflektieren verschiedene Einschätzungen darüber, welche Teile der chemischen Wertschöpfung unter den gegebenen Bedingungen langfristig in Europa und speziell im MDSV wettbewerbsfähig gehalten werden können. Zentralisierte Plattformpfade, etwa auf Basis von FT-Naphtha oder Methanol, zielen darauf ab, bestehende Verbundstrukturen weiterzuführen oder neu zu verankern. Sie knüpfen an die historisch gewachsenen Stärken des Standorts an, insbesondere an Skaleneffekte, integrierte Infrastrukturen, spezialisierte Arbeitskräfte und die Effizienzvorteile eng gekoppelter Wertschöpfungsketten. Als Binnenstandort ist der MDSV aufgrund längerer Transportwege zu Überseehäfen hinsichtlich der Versorgungskosten mit global gehandelten Basisrohstoffen gegenüber küstennahen Chemieclustern benachteiligt. Dies konnte in der Vergangenheit durch günstige Rohstoffkosten für fossile Rohstoffe aus Osteuropa teilweise ausgeglichen werden. Für die Versorgung mit nachhaltigen Basisrohstoffen insbesondere für Wasserstoff und CO_2 bleibt der strategische Lagenachteil des MDSV perspektivisch bestehen. Standortvorteile des MDSV bestehen auf Seite der Rohstoffversorgung vor allem im Bereich der regional verfügbaren Biomassepotenziale aus Agrar- und Forstwirtschaft. Weiterhin stehen die Abfallströme der mittel- und ostdeutschen Ballungszentren als potenzielle Basisrohstoffe zur Verfügung.

Gleichzeitig macht der aktuelle Strukturbruch sichtbar, dass stark zentralisierte Systeme mit erheblichen Risiken verbunden sind. Die Abhängigkeit von einzelnen Ankeranlagen erhöht die systemische Verwundbarkeit ganzer Regionen, wie das Beispiel der Cracker-Struktur im mitteldeutschen Chemiedreieck verdeutlicht. Fällt ein solcher Anker weg, entstehen Kaskadeneffekte, die weit über die betroffene Anlage hinausreichen. Diese Erfahrung ist für viele Akteure schmerzhaft, unterstreicht jedoch die Notwendigkeit, Effizienzgewinne künftig stärker gegen Resilienzanforderungen abzuwägen. Dezentrale biobasierte und biotechnologische Ansätze stellen zwar keine vollwertige Alternative zur großskaligen Grundchemie dar, eröffnen jedoch zusätzliche Handlungsspielräume. Durch höhere Selektivität, funktionale Substitution und in Teilen regionale Rohstoffkopplung können sie Abhängigkeiten reduzieren und neue regionale

Wertschöpfungsperspektiven eröffnen. Diese Pfade können tendenziell nur begrenzt skaliert werden. Sie bieten jedoch Vorteile in Bezug auf Flexibilität, Diversifikation und systemische Robustheit. In einer von Unsicherheit geprägten globalen Industrieumgebung gewinnt diese Form von Resilienz zunehmend an ökonomischer Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Transformation des MDSV weniger eine Frage der technologischen Machbarkeit als vielmehr eine Frage der industriepolitischen Gestaltung ist. Politik kann nur begrenzt Einzelentscheidungen von Unternehmen beeinflussen, wohl aber Rahmenbedingungen setzen, Investitionsrisiken mindern und die Koordination gemeinschaftlicher Infrastrukturen ermöglichen. Ein zukunftsfähiger MDSV 2035 wird voraussichtlich nicht durch die vollständige Bewahrung bestehender Strukturen gekennzeichnet sein, aber ebenso wenig durch deren ersatzlose Aufgabe. Vielmehr liegt die Chance des aktuellen Strukturbruchs darin, das Industriesystem gezielt neu auszubalancieren: mit selektiv fortgeführten oder neu aufgebauten Plattformen dort, wo Skalen- und Verbundeffekte ausgenutzt werden können, und mit ergänzenden dezentralen Wertschöpfungsansätzen dort, wo sie Resilienz schaffen und strukturelle Lücken schließen können. Transformation bedeutet in diesem Sinne nicht den Verlust industrieller Substanz, sondern die bewusste Neuausrichtung unter veränderten globalen Bedingungen.

6 Annex

6.1 Naphtha-Pfad

6.1.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-FT-Naphtha, CCU-FT-Naphtha, NTO und NTA

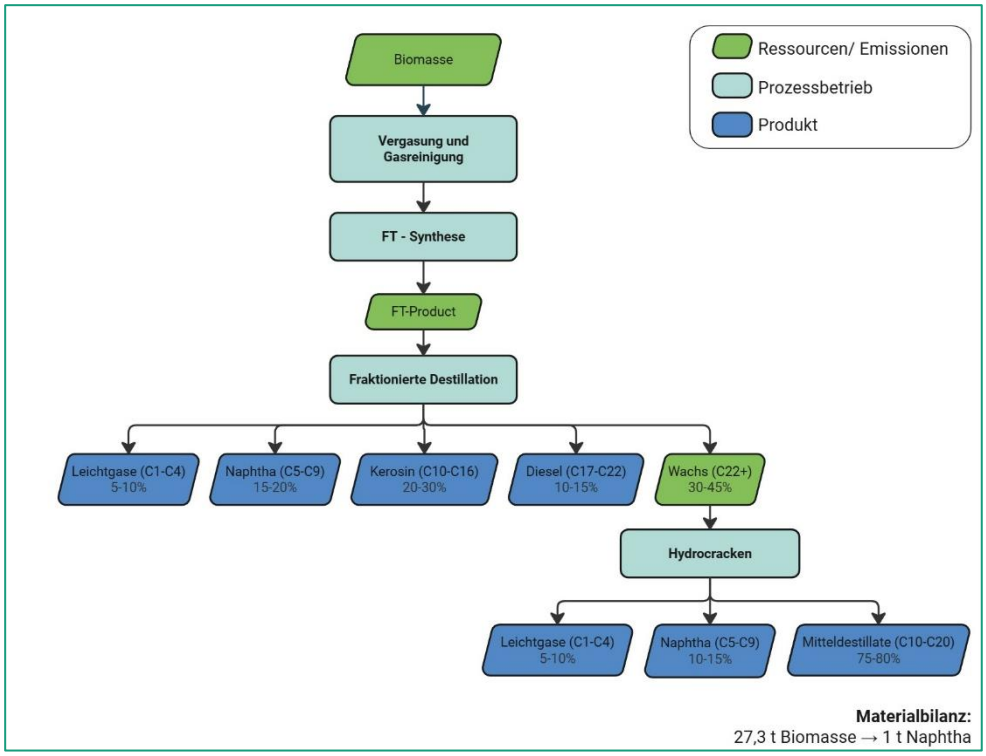


Abbildung 15: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-FT-Naphtha auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Reinikainen 2019).

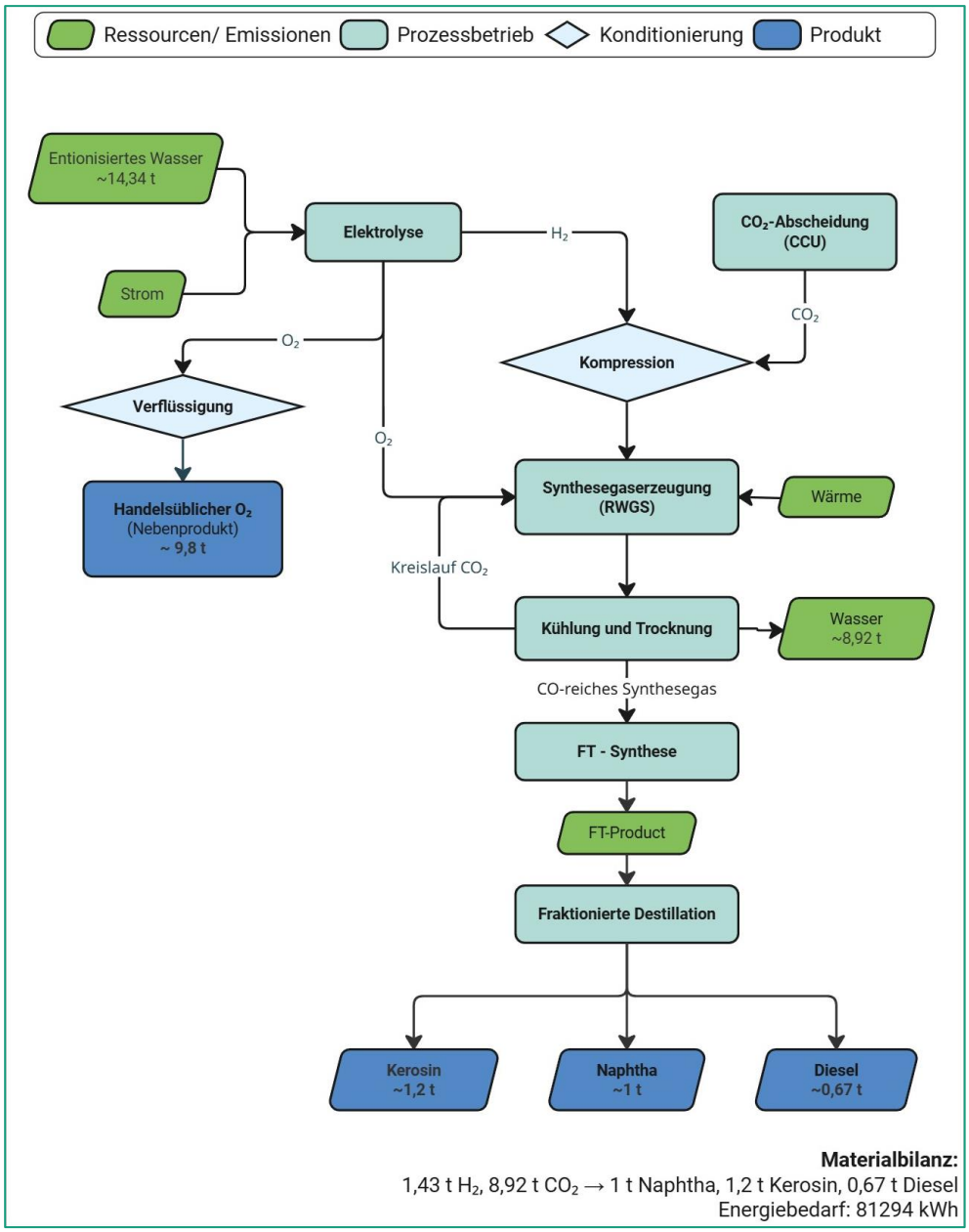


Abbildung 16: Prozessdiagramm zur Erzeugung von CCU-FT-Naphtha auf Basis von abgeschiedenem Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Eigene Darstellung basierend auf (Delgado et al. 2023; Cuevas-Castillo et al. 2024; Meunier et al. 2020).

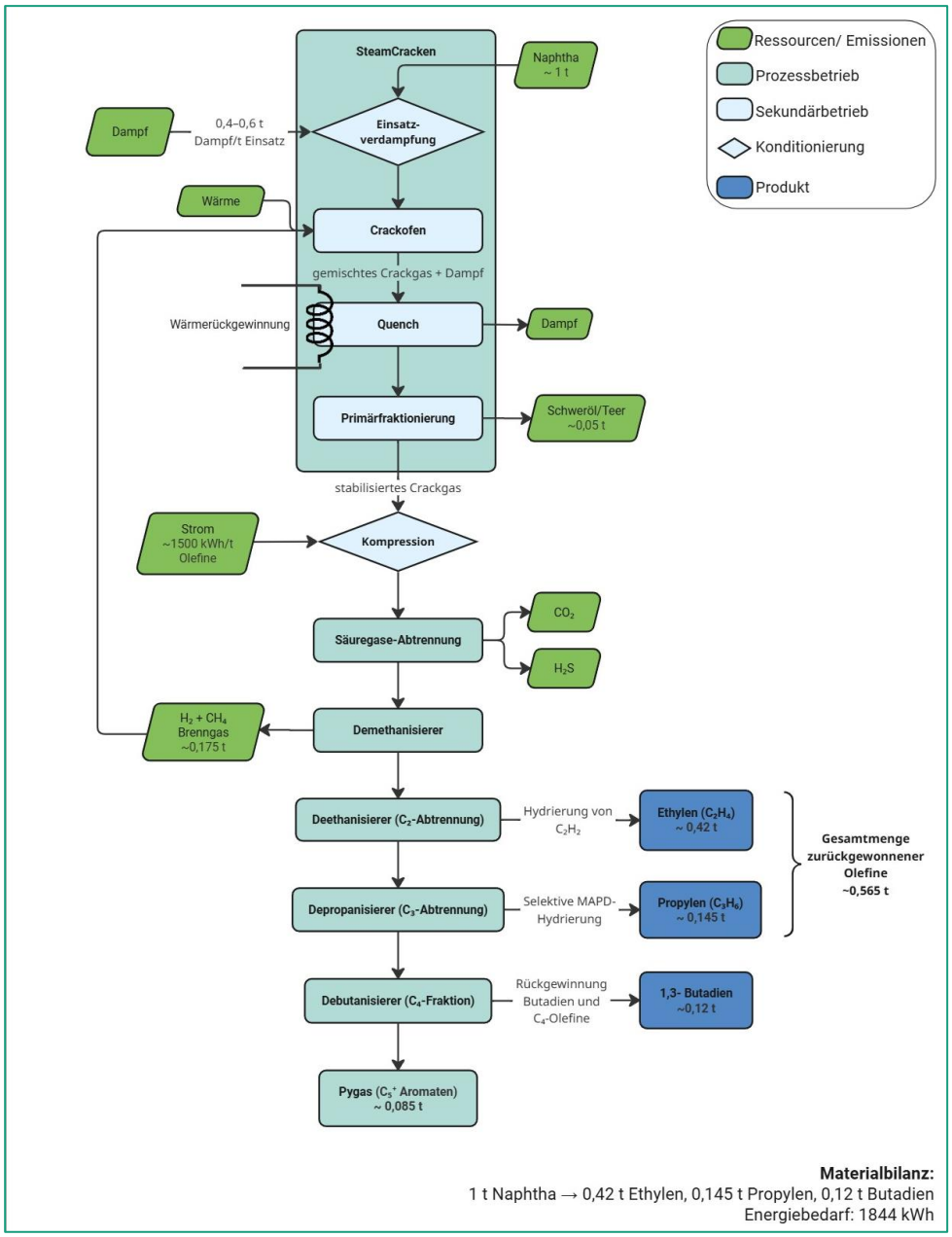


Abbildung 17: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Olefinen aus FT-Naphtha (NTO-Prozess).

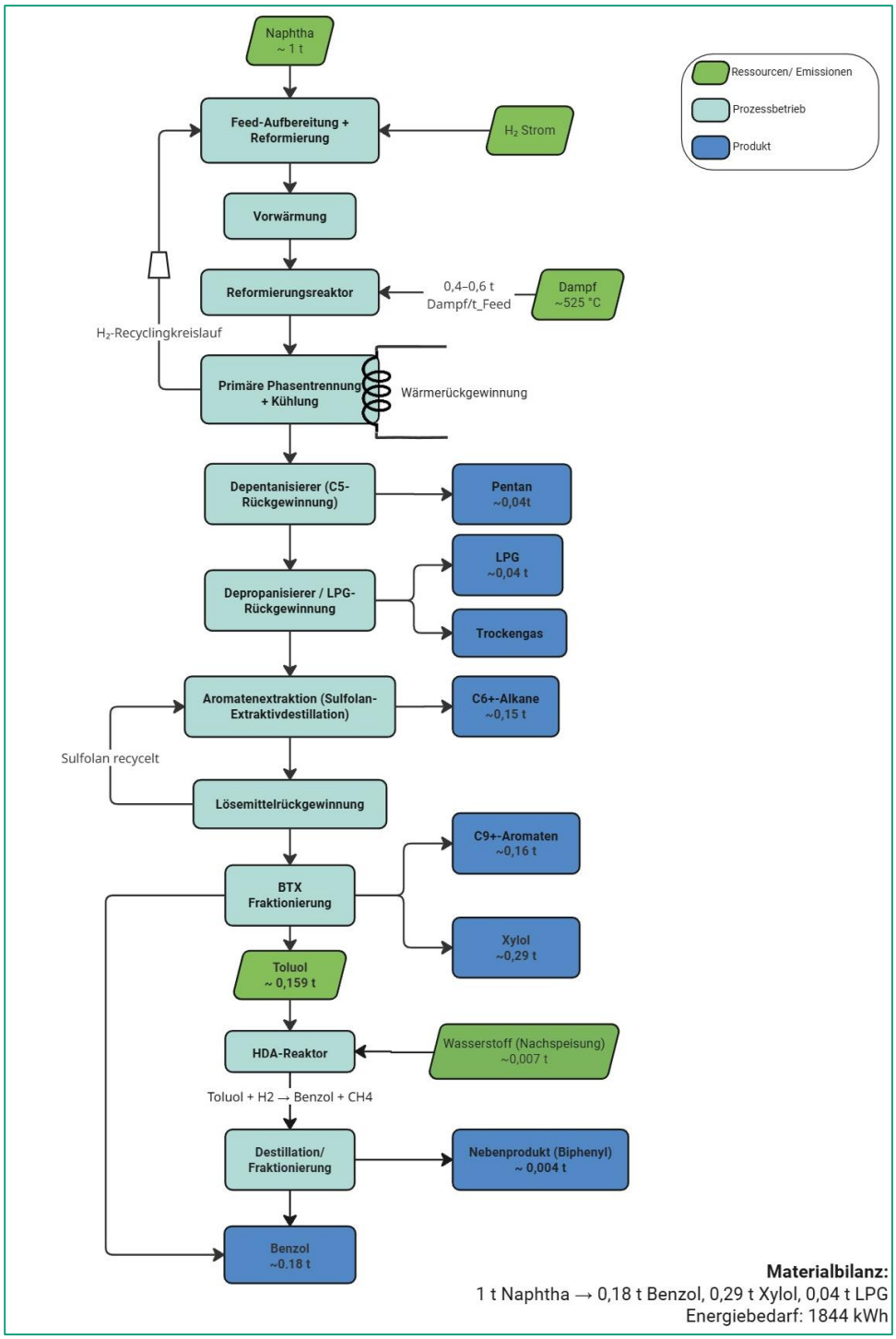


Abbildung 18: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Aromaten aus FT-Naphtha (NTA-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Jiang et al. 2020).

6.1.2 Szenarienvergleich der biobasierten- und CO_2-basierten Naphtha-Routen

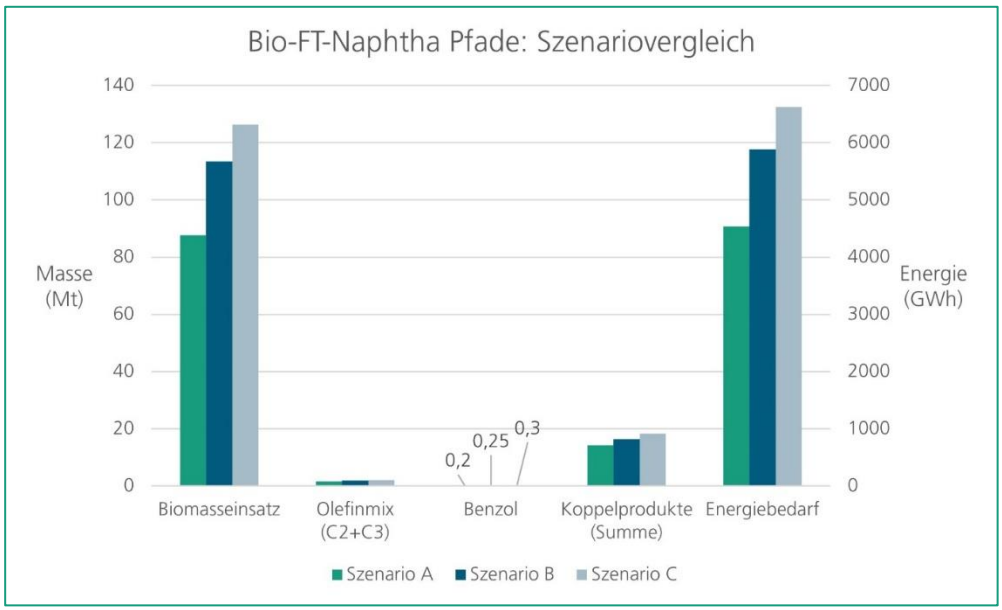


Abbildung 19: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die Bio-FT-Naphtha Pfade (NTO und NTA kombiniert) in den Szenarien A bis C.

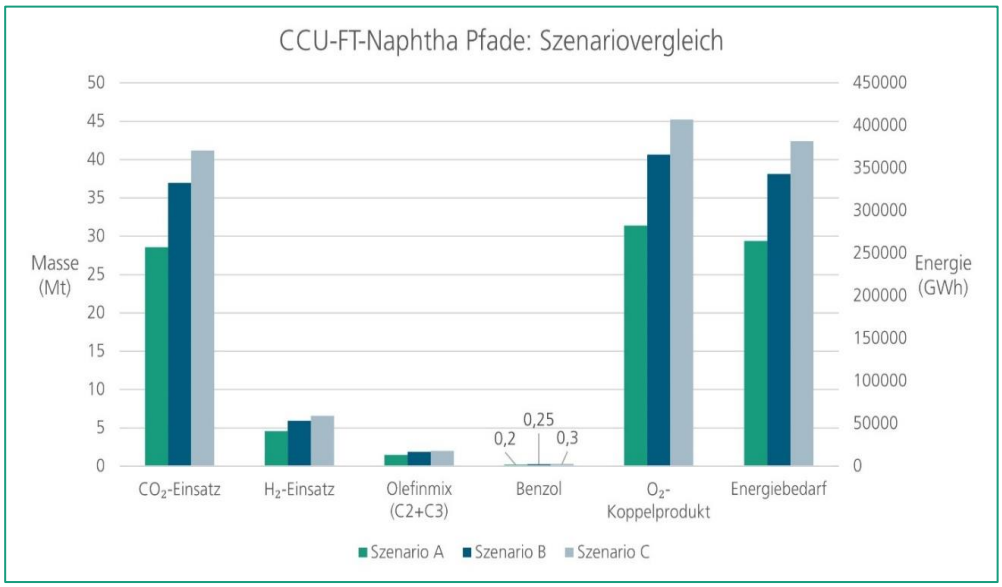


Abbildung 20: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Outputströme für die CCU-FT-Naphtha Pfade (NTO und NTA kombiniert) in den Szenarien A bis C.

6.2 Methanol-Pfad

6.2.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-Methanol, e-Methanol, MTO und MTA

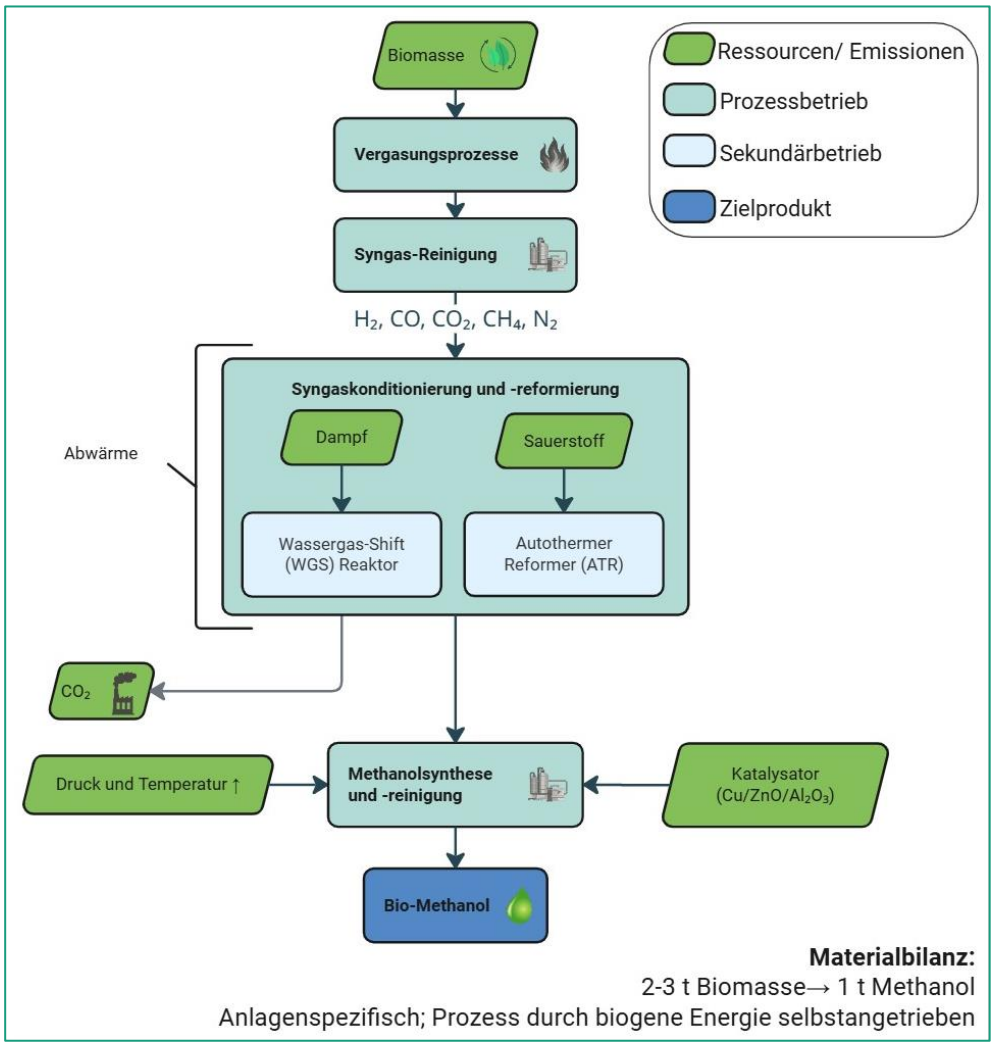


Abbildung 21: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Methanol auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Gielen et al. 2021; Saygin und Gielen 2021).

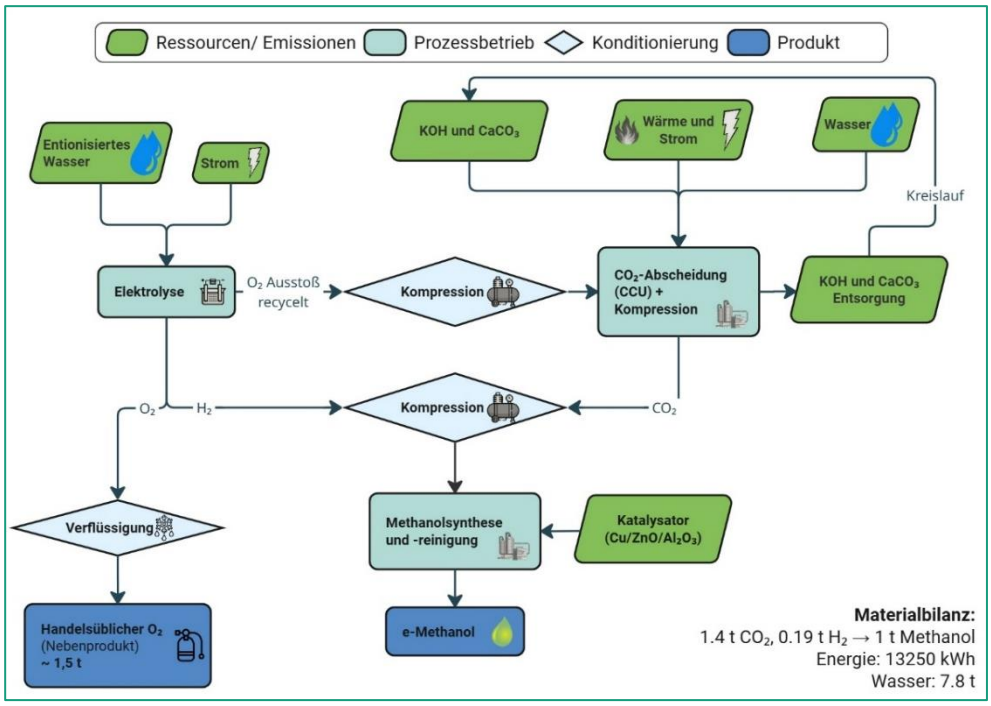


Abbildung 22: Prozessdiagramm zur Erzeugung von e-Methanol auf Basis von abgeschiedenem Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Eigene Darstellung basierend auf (Meunier et al. 2020; Cuevas-Castillo et al. 2024).

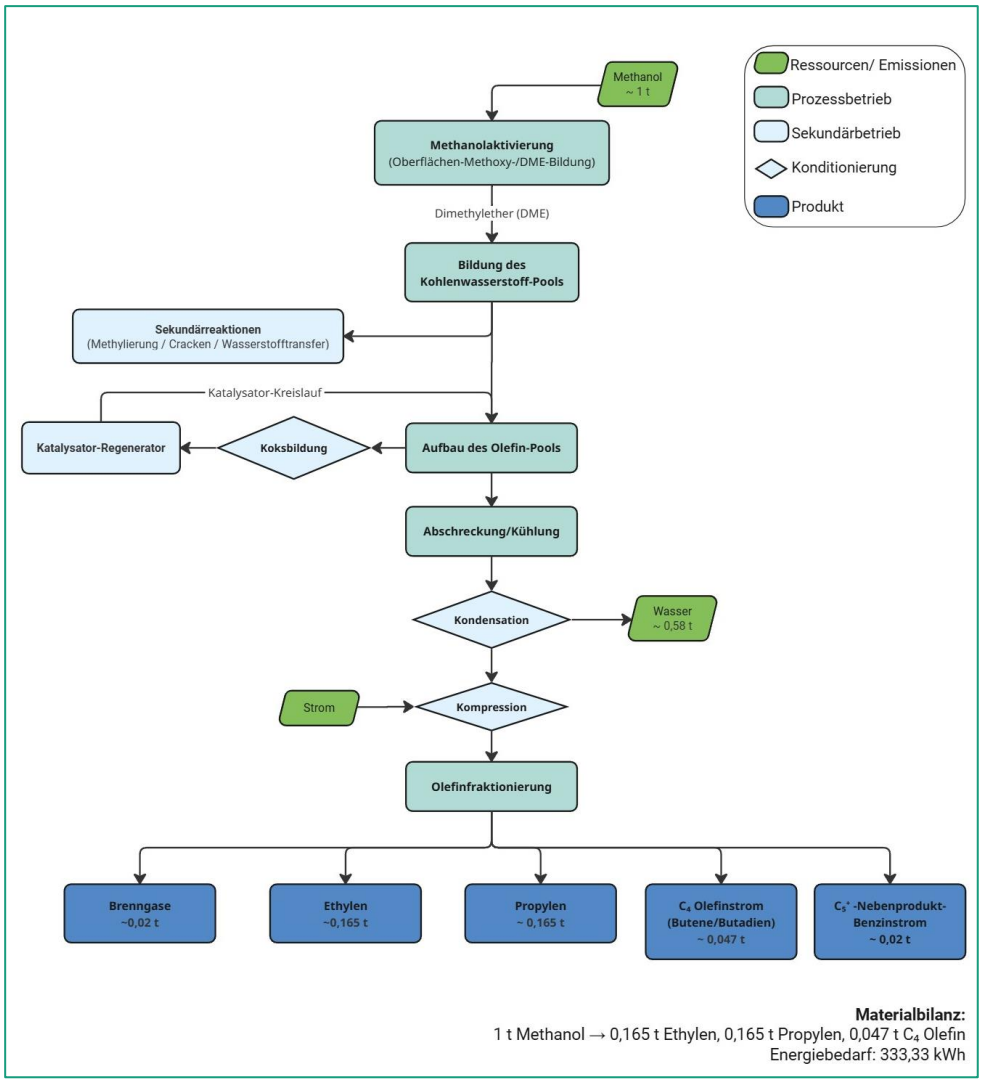


Abbildung 23: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Olefinen aus Methanol (MTO-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Lu et al. 2016; Dr Mu Xin 2016; Chen et al. 2005).

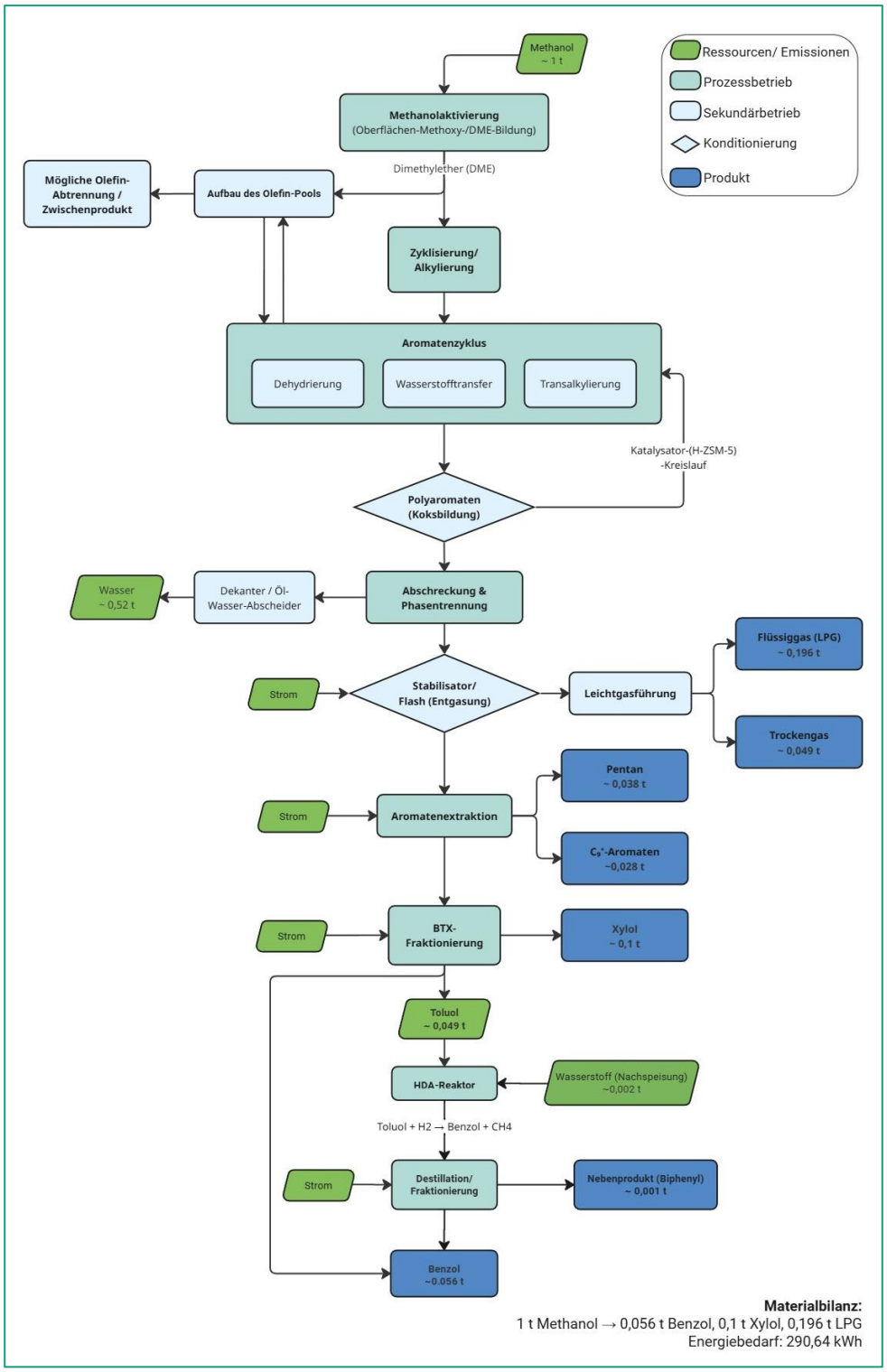


Abbildung 24: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Aromaten aus Methanol (MTA-Prozess). Eigene Darstellung basierend auf (Jiang et al. 2020; Jiang et al. 2021).

6.2.2 Szenarienvergleich der biobasierten- und CO_2-basierten Methanol-Routen

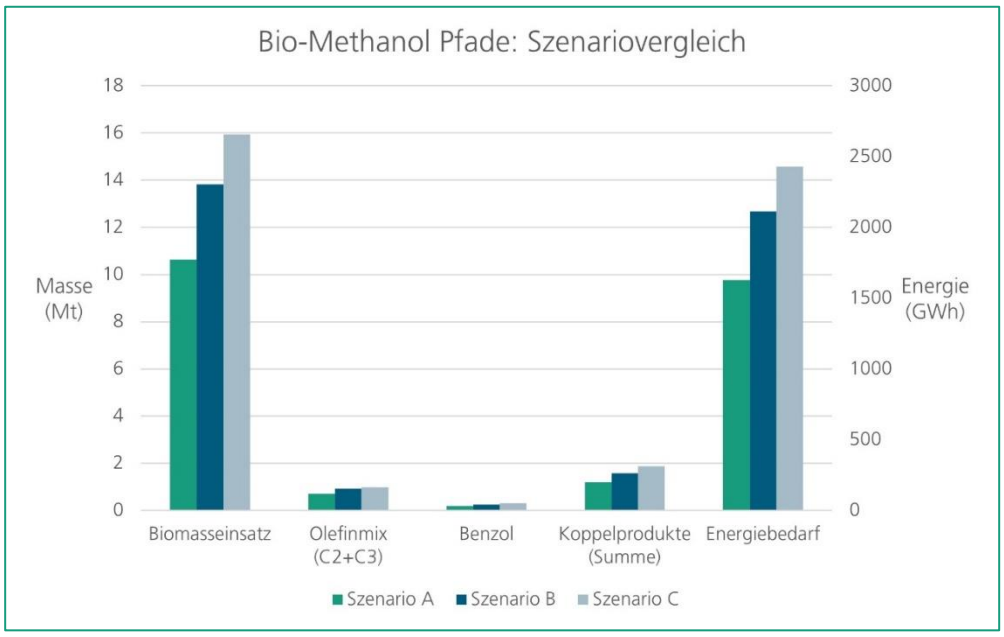


Abbildung 25: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Output-ströme für die Bio-Methanol-Pfade (MTO und MTA kombiniert) in den Szenarien A bis C.

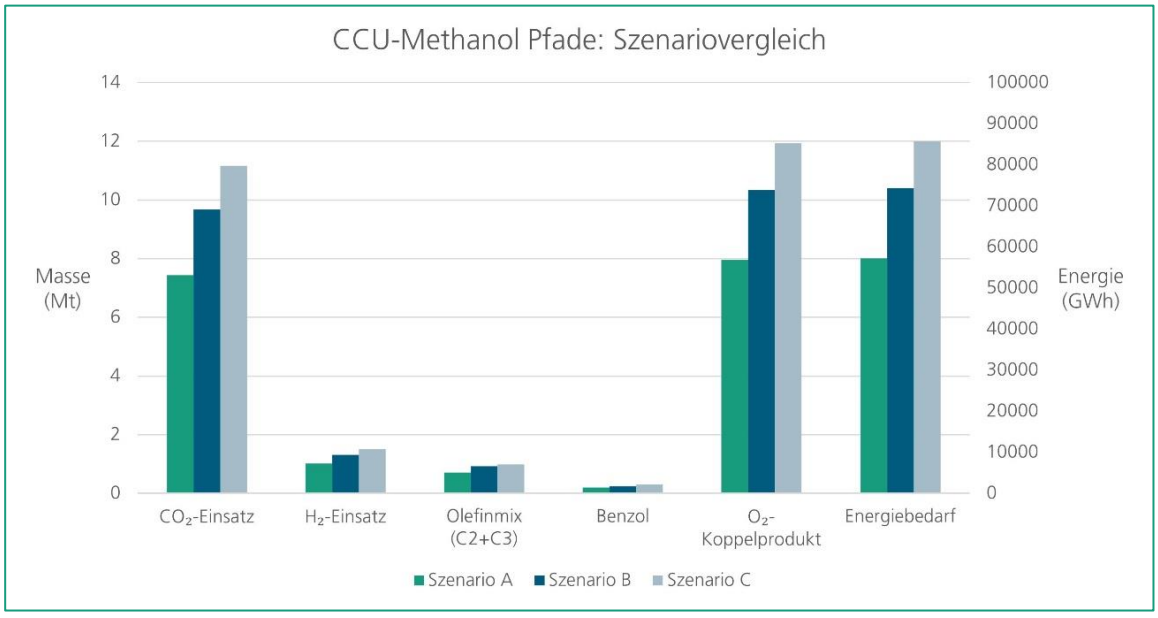


Abbildung 26: Vergleichende Darstellung der stofflichen und energetischen Input- und Output-ströme für die CCU-Methanol-Pfade (MTO und MTA kombiniert) in den Szenarien A bis C.

Tabelle 9: Auswahl europäischer Projekte zur Erzeugung von nicht-fossilem Methanol

Projekt, Organisation	Prozess-route	Stand-ort	Status 24/25	Quelle
Kassø, European Energy	e-Methanol	DK	Operativ	(European Energy 2025)
Zellstoffwerk Mönsterås, Södra	Bio-Methanol	SWE	Operativ	(Södra)
ICODOS	e-Methanol	DE	Operativ	(ICODOS)
Jangada, Hy2Gen	e-Methanol	DE	Planung	(HY2GEN)
DeltaNor – DeltaTorr, PerpetualNext	Bio-Methanol	NL	Planung	(Perpetual Next)
Leuna 100, C1 Green Chemicals AG	e-Methanol	DE	Forschungsprojekt	(Leuna100)
BeBOP, EU CORE	e-Methanol, Bio-Methanol	EU	Forschungsprojekt	(BeBOP)

Tabelle 10: Versorgungsstrukturen MDSV Methanol-Pfad

	Szenario A	Szenario B	Szenario C
Ethylenproduktion	312 kt	490 kt	580 kt
Propylenproduktion	312 kt	Überschuss 86,5 kt (121 %)	Überschuss 148,8 kt (135 %)
Deckung PE-Produktion	64 %	vollständig	vollständig inkl. EDC/VC
C4-Strom	87 kt (45 % Substitution)	137 kt (71 % Substitution)	162 kt (84 % Substitution)
Benzolproduktion (MTA)	192 kt	250 kt	300 kt
Deckung Anilin Böhlen	vollständig	vollständig	vollständig
Deckung Phenol Leuna	vollständig	vollständig	vollständig + Zeitz/Bitterfeld

6.3 Biotechnologie-Pfad

6.3.1 Prozessfließbilder der Prozesse Bio-Ethanol, Bio-Ethylen und Bio-PA6

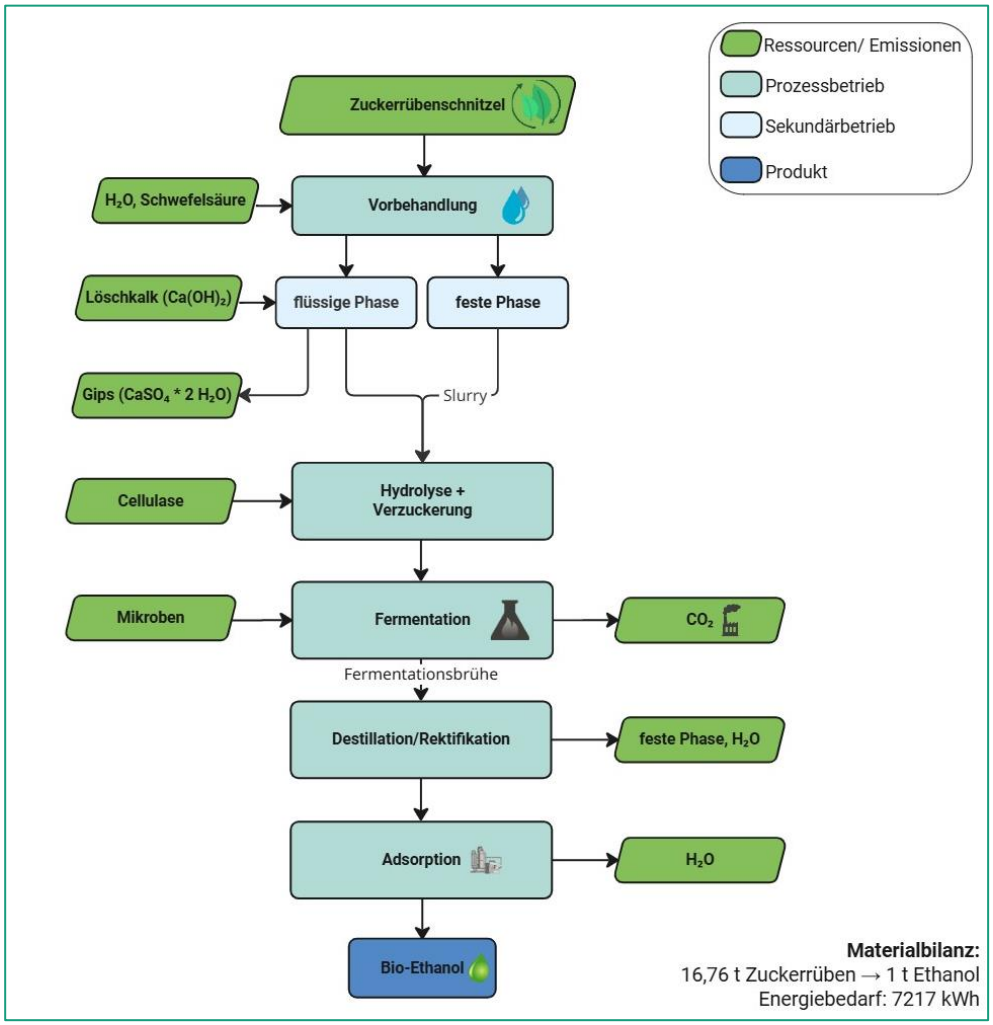


Abbildung 27: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethanol auf Basis von Zuckerrüben. Eigene Darstellung basierend auf (Vučurović et al. 2022).

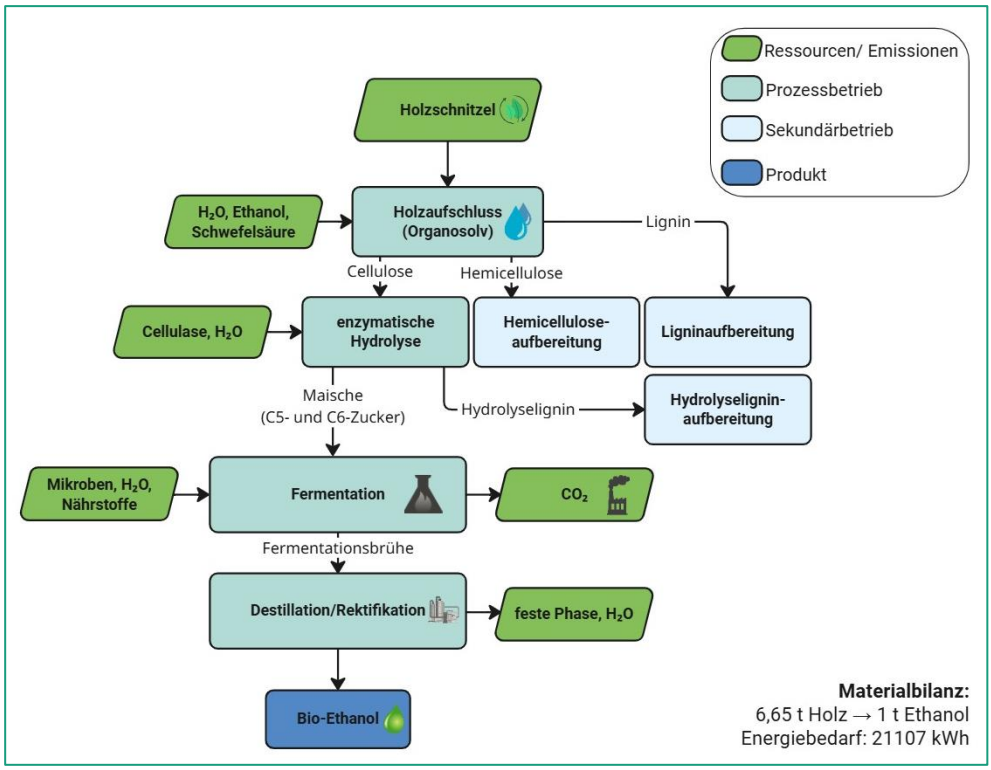


Abbildung 28: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethanol auf Basis von Trockenholz. Eigene Darstellung basierend auf (Nitzsche et al. 2016).

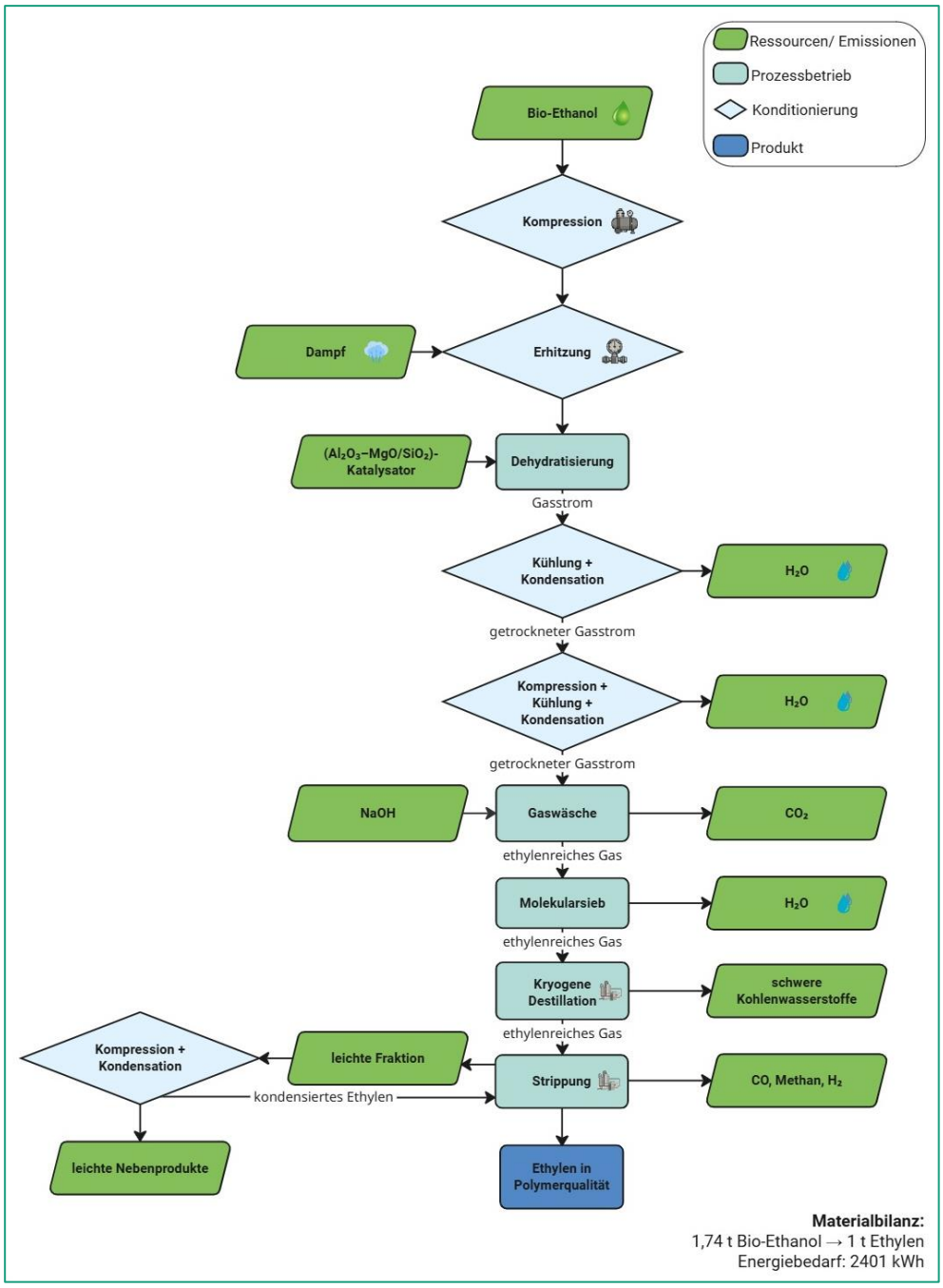


Abbildung 29: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-Ethylen auf Basis von Bio-Ethanol. Eigene Darstellung basierend auf (Nitzsche et al. 2016).

Tabelle 11: Auswahl internationaler Projekte zum Bau von Produktionsanlagen für Bio-Ethylen im industriellen Maßstab

Unternehmen	Standort	Produktions-kapazität in kt/a	Status	Quelle
Next Wave Energy Partners, LP	Houston, USA	400	Investitionsentscheidung ausstehend	(Advanced Biofuels Association 2023)
Braskem Siam Company Limited	Map Ta Phut, Thailand	200	Produktionsstart geplant 2028	(SCG Chemicals 2025)
Syclus BV	Geleen, Niederlande	100	Produktionsstart geplant 2026	(Syclus 2023)

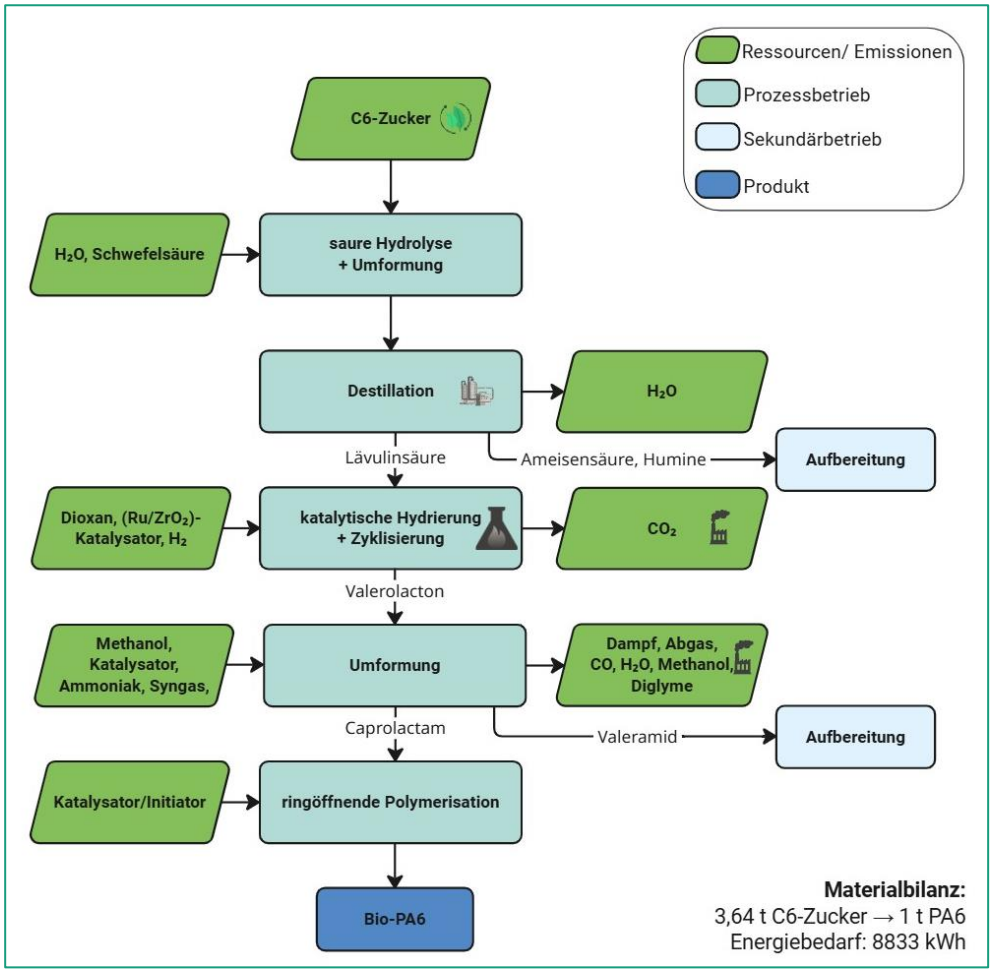


Abbildung 30: Prozessdiagramm zur Erzeugung von Bio-PA6 auf C6-Zuckerbasis. Eigene Darstellung basierend auf (Moncada et al. 2018; Varghese und Grinstaff 2022).

Tabelle 12: Auswahl aktueller und geplanter internationaler Projekte zur Produktion von Bio-Caprolactam und Bio-PA6

Unternehmen	Standort	Ziel	Status	Quelle
Aquafil S.p.A. (IT), Genomatice, Inc. (USA)	Ljubljana, Slowenien	biomasse-basiertes PA6	prä-kommerzielle Produktion seit 2022	(Aquafil 2022)
UBE Corporation Europe S.A.U. (ES)	Castellon, Spanien	CO_2-neutrales Caprolactam	kommerzielle Produktion seit 2024	(UBE Corporation Europe 2024)
Genomatica, Inc. (USA), Sojitz Corporation (JP)	noch nicht festgelegt	biomasse-basiertes PA6	Kooperationsvereinbarung 2025	(Geno 2023)

Literaturverzeichnis

Advanced Biofuels Association (2023): WCF 2023: Next Wave Promotes Bio-based Ethylene Production. Online verfügbar unter https://advancedbiofuelsassociation.com/wcf-2023-next-wave-promotes-bio-based-ethylene-production/, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

AllStarch (Hg.): Unternehmen: Interstarch. Online verfügbar unter https://allstarch.de/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Aquafil (2022): The "Effective" Project: Producing Bio-Based Nylon. Online verfügbar unter https://www.aquafil.com/magazine/the-effective-project-producing-bio-based-nylon/, zuletzt geprüft am 06.03.2026.

BDBe: Hersteller. Bioethanolwerke in Deutschland. Hg. v. BDBe Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.bdbe.de/bioethanol/hersteller, zuletzt geprüft am 12.03.2026.

BioZ (2025): Stoffstrom Bioethanol. Online verfügbar unter https://www.bio-z.de/wp-content/uploads/2024/05/250310_BioZ_Feedstock-Liste_Bioethanol.pdf, zuletzt geprüft am 12.03.2026.

Braskem (2024): Braskem expands its biopolymer production by 30% following an investment of US$ 87 million. Online verfügbar unter https://www.braskem.com/usa/news-detail/braskem-expands-its-biopolymer-production-by-30-following-an-investment-of-us-87-million, zuletzt geprüft am 06.03.2026.

Cargill Deutschland: Standorte in Deutschland - Barby. Online verfügbar unter https://www.cargill.de/de/standort-barby?language=de, zuletzt geprüft am 12.03.2026.

CeChemNet: Partner. Hg. v. Central European Chemical Network. Online verfügbar unter https://www.cechemnet.com/partner, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Chemie Technik (2024): Pilotprojekt „Leuna100" liefert erstes Methanol. Online verfügbar unter https://www.chemietechnik.de/branche-markt/pilotprojekt-leuna100-liefert-erstes-methanol/1968941, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Chemiepark Bitterfeld-Wolfen. Der Chemiepark. Online verfügbar unter https://www.chemiepark.de/der-chemiepark, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Chen, John Q.; Bozzano, Andrea; Glover, Bryan; Fuglerud, Terje; Kvisle, Steinar (2005): Recent advancements in ethylene and propylene production using the UOP/Hydro MTO process. In: *Catalysis Today* 106 (1-4), S. 103–107. DOI: 10.1016/j.cattod.2005.07.178.

CropEnergies. CE Biobased Chemicals GmbH, Elsteraue (D). Online verfügbar unter https://www.cropenergies.com/de/unternehmen/standorte/elsteraue, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

CropEnergies. CropEnergies Bioethanol GmbH, Zeitz (D). Online verfügbar unter https://www.cropenergies.com/de/unternehmen/standorte/zeitz, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Cuevas-Castillo, Gabriela A.; Michailos, Stavros; Akram, Muhammad; Hughes, Kevin; Ingham, Derek; Pourkashanian, Mohamed (2024): Techno economic and life cycle

assessment of olefin production through CO2 hydrogenation within the power-to-X concept. In: *Journal of Cleaner Production* 469, S. 143143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143143.

Dani, Salsabilla; Atqiyani, Addila Arrofa'hiya Tri; Isna, Aline Arunnisa; Berliana, Yurieka; Maulana, Varel Rahmad (2025): Process Intensification of Hydrodealkylation (HDA) for Benzene Production through Heat Integration and Gas Recycle Optimization. In: *J. Chem. Eng. Res. Prog.* 2 (2), S. 184–192. DOI: 10.9767/jcerp.20416.

DBFZ (2025): Marktrelevante Biopolymere. Technologie, Ökonomie & Nachhaltigkeit im Fokus. Unter Mitarbeit von Kathleen Meisel, Lilli Röder, Niels Dögnitz, Inga Katharina Götz und Karl-Friedrich Cyffka. Hg. v. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum.

DECHEMA (2017): Low carbon energy and Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Unter Mitarbeit von Alexis Michael Bazzanella und Florian Ausfelder. Hg. v. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Online verfügbar unter https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf.

Delgado, Hernan E.; Cappello, Vincenzo; Zang, Guiyan; Sun, Pingping; Ng, Clarence; Vyawahare, Pradeep et al. (2023): Techno-economic analysis and life cycle analysis of e-fuel production using nuclear energy. In: *Journal of CO2 Utilization* 72, S. 102481. DOI: 10.1016/j.jcou.2023.102481.

DOMO Chemicals (Hg.): DOMO Chemicals Deutschland: Anlagen gehen in Notbetrieb. Online verfügbar unter https://www.domochemicals.com/de/media/news/domo-chemicals-deutschland-anlagen-gehen-notbetrieb, zuletzt geprüft am 12.02.2026.

Dow Corporate (2025): Dow will shut down three upstream European assets in response to structural challenges in the region | Dow Investor Relations. Online verfügbar unter https://investors.dow.com/en/news/news-details/2025/Dow-will-shut-down-three-upstream-European-assets-in-response-to-structural-challenges-in-the-region/default.aspx, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

Dow Deutschland-a: Dow schließt in Europa drei Upstream-Anlagen aufgrund struktureller Herausforderungen in der Region. Online verfügbar unter https://de.dow.com/de-de/presse/pressemeldungen/dow-schreibt-in-europa-drei-upstream-anlagen.html, zuletzt geprüft am 12.01.2026.

Dow Deutschland-b: ValuePark. Online verfügbar unter https://de.dow.com/de-de/standorte/mitteldeutschland/valuepark.html, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Dow Olefin Verbund GmbH (Hg.) (2024): Kurzbeschreibung der Anlage - Anilinanlage (903-046-03). Online verfügbar unter https://de.dow.com/content/dam/corp/documents/location/903-046-03-bohlen-incineration-plants-emission-data.pdf, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Dr Mu Xin (2016): China Methanol to Olefin (MTO) Technology & Industrialization Progress. Online verfügbar unter https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-WMC-Xin-Final-Oct16.pdf, zuletzt aktualisiert am 01.10.2016, zuletzt geprüft am 08.06.2025.

Equipolymers: Capacity and Facilities. Online verfügbar unter https://www.equipolymers.com/en/CapacityFacilities?PageID=11, zuletzt geprüft am 02.03.2026.

European Energy (2025): Kassø. E-methanol: A game changer for decarbonising heavy transport and industry. Online verfügbar unter https://europeanenergy.com/wp-content/uploads/2025/02/e-methanol-a-game-changer-for-decarbonising-heavy-transport-and-industry-2.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2025.

Finkenstadt, Victoria L. (2014): A Review on the Complete Utilization of the Sugarbeet. In: *Sugar Tech* 16 (4), S. 339–346. DOI: 10.1007/s12355-013-0285-y.

Fraunhofer IKTS (2025): Chemieindustrie in Ostdeutschland - Perspektiven für eine klimaneutrale Zukunft. Strategien für Infrastruktur und Beschäftigung in der regionalen und industriellen Transformation. Unter Mitarbeit von Lisa Plümer, Thomas Kirschstein, Marianne Wagner-Meige, Patrick Wagner, Andrea Weiße und Christian Klöppelt. Hg. v. Fraunhofer IKTS.

Geno (2023): Geno's nylon. Online verfügbar unter https://www.genomatica.com/nylon/, zuletzt aktualisiert am 18.04.2023, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

Gholami, Zahra; Gholami, Fatemeh; Tišler, Zdeněk; Vakili, Mohammadtaghi (2021): A Review on the Production of Light Olefins Using Steam Cracking of Hydrocarbons. In: *Energies* 14 (23), S. 8190. DOI: 10.3390/en14238190.

Gielen, Dolf; Dolan, Greg; Kang, Seungwoo; Boshell, Francisco; Goeppert, Alain; Prakash, Surya G. et al. (2021): Innovation outlook. Renewable methanol. Unter Mitarbeit von Paul Durrant. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Online verfügbar unter https://methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf.

Hackelöer, Kristina; Kneißel, Bernhard (2012): Verfahren zur Herstellung von Caprolactam am 10.04.2012. Anmeldenr: 102012006946. Veröffentlichungsnr.: DE102012006946A1.

HY2GEN (Hg.): Projekte: Jangada. Online verfügbar unter https://www.hy2gen.com/de/jangada, zuletzt geprüft am 21.08.2025.

ICODOS (Hg.): Revolutionary e-methanol production technology. Online verfügbar unter https://icodos.com/, zuletzt geprüft am 21.08.2025.

IMG-a: Chemieindustrie. Chemieparks und Stoffverbund. Hg. v. IMG Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter https://www.investieren-in-sachsen-anhalt.de/chemie/chemiepark-konzept-und-chemischer-stoffverbund-in-sachsen-anhalt, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

IMG-b: Chemiestandort Leuna. Hg. v. IMG Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter https://www.zukunftsorte-sachsen-anhalt.de/chemiestandort-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

IMG-c: Agro-Chemie Park Piesteritz. Hg. v. IMG Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter https://www.zukunftsorte-sachsen-anhalt.de/agro-chemie-park-piesteritz, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Industriepark Zeitz-a (Hg.): Chemie- und Industriepark Zeitz. Online verfügbar unter https://www.industriepark-zeitz.de/chemiepark/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Industriepark Zeitz-b (Hg.): Industriebetriebe - Radici Chimica Deutschland GmbH. Online verfügbar unter https://www.industriepark-zeitz.de/unternehmen/industriebetriebe/radici-chimica-deutschland-gmbh/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-a (Hg.): Stoffverbund. Regionaler Stoffverbund. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/stoffverbund, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-b (Hg.): Chemie-standort Leuna. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/chemiestandort-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-c (Hg.): Firmendetails: TotalEnergies Raffinerie Mitteldeutschland GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/totalenergies-raffinerie-mitteldeutschland-gmbh, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-d (Hg.): Firmendetails: Linde GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/linde-gmbh-werksgruppe-technische-gase-gasezentrum-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-e (Hg.): Firmendetails: Dow Olefinverbund GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/dow-olefinverbund-gmbh-werk-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-f (Hg.): Firmendetails: Innospec Leuna GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/innospec-leuna-gmbh, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-g (Hg.): Firmendetails: DOMO Caproleuna GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/domo-caproleuna-gmbh, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-h (Hg.): Firmendetails: Xentrys Leuna GmbH. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/firmen-am-standort-details/xentrys-leuna-gmbh, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

InfraLeuna-i (Hg.): Stoffverbund. Leuna Haupterzeugnislinien. Online verfügbar unter https://www.infraleuna.de/stoffverbund, zuletzt geprüft am 12.01.2026.

Jiang, Jianrong; Feng, Xiao; Yang, Minbo; Wang, Yufei (2020): Comparative technoeconomic analysis and life cycle assessment of aromatics production from methanol and naphtha. In: *Journal of Cleaner Production* 277, S. 123525. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123525.

Jiang, Jianrong; Zhang, Dan; Feng, Xiao; Yang, Minbo; Wang, Yufei (2021): Process Design and Analysis of Aromatics Production from Coal via Methanol with a High Yield. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 60 (15), S. 5574–5587. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c00421.

Karaba, Adam; Rozhon, Jakub; Patera, Jan; Hájek, Jiří; Zámostný, Petr (2021): Fischer-Tropsch Wax from Renewable Resources as an Excellent Feedstock for the Steam-Cracking Process. In: *Chem Eng & Technol* 44 (2), S. 329–338. DOI: 10.1002/ceat.202000400.

K-Online: Trinseo: US-Konzern schließt die Styrol-Produktion in Böhlen. Online verfügbar unter https://www.k-online.de/de/Media_News/News/Archiv_Branchen-News/Trinseo_US-Konzern_schlie%C3%9Ft_die_Styrol-Produktion_in_B%C3%B6hlen, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Landesportal Sachsen-Anhalt (2025): Minister Sven Schulze: „Jetzt gemeinsam die Formel für die Chemie der Zukunft finden, um die wirtschaftliche Stabilität Ostdeutschlands zu sichern". Online verfügbar unter https://mwl.sachsen-anhalt.de/news-detail/minister-sven-schulze-jetzt-gemeinsam-die-formel-fuer-die-chemie-der-zukunft-

finden-um-die-wirtschaftliche-stabilitaet-ostdeutschlands-zu-sichern, zuletzt aktualisiert am 27.06.2024, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

LAT Nitrogen (Hg.): Standort: Piesteritz. Online verfügbar unter https://www.lat-nitrogen.com/de/de/company/locations/piesteritz-germany-15, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Leuna100 (Hg.): Das Projekt Leuna100. Online verfügbar unter https://www.leuna100.de/de, zuletzt geprüft am 20.08.2025.

Li, Teng; Shoinkhorova, Tuiana; Gascon, Jorge; Ruiz-Martínez, Javier (2021): Aromatics Production via Methanol-Mediated Transformation Routes. In: *ACS Catalysis* 11 (13), S. 7780–7819. DOI: 10.1021/acscatal.1c01422.

Linde (2025): Wasserstoff für Sachsen-Anhalt: Linde erhält Förderbescheid über 4,3 Mio. Euro. Online verfügbar unter https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/foerderbescheid-gruener-wasserstoff-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Lu, Bona; Luo, Hao; Li, Hua; Wang, Wei; Ye, Mao; Liu, Zhongmin; Li, Jinghai (2016): Speeding up CFD simulation of fluidized bed reactor for MTO by coupling CRE model. In: *Chemical Engineering Science* 143, S. 341–350. DOI: 10.1016/j.ces.2016.01.010.

LUMITOS AG (Hg.) (2014): Air Liquide nimmt neue Produktionsstätte für Kohlendioxid in Sachsen-Anhalt in Betrieb. Online verfügbar unter https://www.chemie.de/news/147324/air-liquide-nimmt-neue-produktionsstaette-fuer-kohlendioxid-in-sachsen-anhalt-in-betrieb.html, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Marjanovic, Antonija (2021): Enzyme engineering for sustainable production of caprolactam. Dissertation. University of Groningen. Online verfügbar unter https://research.rug.nl/en/publications/enzyme-engineering-for-sustainable-production-of-caprolactam/, zuletzt geprüft am 06.12.2025.

MDR (2025): Der Dow-Rückzug und die Folgen für die Raffinerie TotalEnergies in Leuna. Online verfügbar unter https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/halle/saalekreis/leuna-total-energies-dow-rueckzug-folgen-chemie-industrie-104.html, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Meunier, Nicolas; Chauvy, Remi; Mouhoubi, Seloua; Thomas, Diane; Weireld, Guy de (2020): Alternative production of methanol from industrial CO2. In: *Renewable Energy* 146, S. 1192–1203. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.010.

Mohsenzadeh, Abas; Zamani, Akram; Taherzadeh, Mohammad J. (2017): Bioethylene Production from Ethanol: A Review and Techno-economical Evaluation. In: *ChemBioEng Reviews* 4 (2), S. 75–91. DOI: 10.1002/cben.201600025.

Moncada, Jonathan; Gursel, Iris Vural; Worrell, Ernst; Ramírez, Andrea (2018): Production of 1,3-butadiene and ε -caprolactam from C6 sugars: Techno-economic analysis. In: *Biofuels Bioprod Bioref* 12 (4), S. 600–623. DOI: 10.1002/bbb.1876.

Moon, Hyunjin; Chamas, Ali; Beckham, Gregg Tyler (2025): Synthesis of Caprolactam from Muconic Acid and other Bio-Derived Substrates am 2025. Veröffentlichungsnr.: US 2026/0042738 A1.

Morales, Marjorie; Arvesen, Anders; Cherubini, Francesco (2021): Integrated process simulation for bioethanol production: Effects of varying lignocellulosic feedstocks on

technical performance. In: *Bioresource technology* 328, S. 124833. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.124833.

MZ (2025a): Ausbau in Greppin: Kleine Fettblocker aus Raps - Verbio investiert 30 Millionen. Online verfügbar unter https://www.mz.de/lokal/bitterfeld/ausbau-in-greppin-kleine-fettblocker-aus-raps-verbio-investiert-30-millionen-1540483, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

MZ (2025b): Dow-Schließungen: Wieso das Aus für den Cracker die Raffinerie in Leuna vor große Probleme stellt. Online verfügbar unter https://www.mz.de/lokal/merseburg/dow-schliessungen-wieso-das-aus-fur-den-cracker-die-raffinerie-in-leuna-vor-grosse-probleme-stellt-4094820, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

MZ (2025c): Entscheidung gefallen: Dow schließt große Chemieanlagen in Schkopau und Böhlen. Online verfügbar unter https://www.mz.de/lokal/merseburg/dow-chemieanlagen-schkopau-boehlen-schliessung-4078971, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

MZ (2025d): UPM nennt Starttermin für Bioraffinerie in Leuna. Online verfügbar unter https://www.mz.de/lokal/merseburg/upm-nennt-starttermin-fur-bioraffinerie-in-leuna-4089558, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

National Renewable Energy Laboratory: Methanol from Biomass. Hg. v. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter https://docs.nrel.gov/docs/legosti/old/5570r2.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2025.

Nitzsche, Roy; Budzinski, Maik; Gröngröft, Arne (2016): Techno-economic assessment of a wood-based biorefinery concept for the production of polymer-grade ethylene, organosolv lignin and fuel. In: *Bioresource technology* 200, S. 928–939. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.11.008.

Nobian (2021): Nobian liefert als erstes Unternehmen in Deutschland grünen Wasserstoff aus Chlor-Alkali-Elektrolyse. Online verfügbar unter https://www.nobian.com/de-de/aktuelles/nobian-liefert-als-erstes-unternehmen-in-deutschland-grunen-wasserstoff-aus-chlor-alkali-elektrolyse, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Packaging Journal (2025): Trinseo erwägt Schließung der Polystyrol-Produktion in Schkopau. Online verfügbar unter https://packaging-journal.de/trinseo-erwaegt-schliessung-der-polystyrol-produktion-in-schkopau/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Perpetual Next: DeltaTorr / DeltaNor. Online verfügbar unter https://perpetual-next.com/en/divisions/locations/deltatorrdeltanor/, zuletzt geprüft am 16.12.2025.

Radici (Hg.): Firmengeschichte. Online verfügbar unter https://www.radicigroup.com/de/corporate/chemikalien/firmengeschichte, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Rastogi, M.; Shrivastava, S. (2018): Current Methodologies and Advances in Bio-ethanol Production. In: *JBB* 1 (1). DOI: 10.31031/JBB.2018.01.000505.

Reinikainen, Matti (2019): High quality (bio) fuels and chemicals via Fischer-Tropsch synthesis. VTT. Online verfügbar unter https://www.comsynproject.eu/app/uploads/2019/06/REINIKAINEN_VTT.pdf.

Ren, Tao; Patel, Martin; Blok, Kornelis (2006): Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. In: *Energy* 31 (4), S. 425–451. DOI: 10.1016/j.energy.2005.04.001.

Reuters (2025): EU to set up Critical Chemical Alliance to secure supply chains. Online verfügbar unter https://www.reuters.com/sustainability/boards-policy-regulation/eu-set-up-critical-chemical-alliance-secure-supply-chains-2025-07-08/, zuletzt aktualisiert am 08.07.2025, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

Romero-Fernandez, Maria; Heckmann, Christian M.; Paradisi, Francesca (2022): Biocatalytic Production of a Nylon 6 Precursor from Caprolactone in Continuous Flow. In: *ChemSusChem* 15 (16), e202200811. DOI: 10.1002/cssc.202200811.

Saygin, Deger; Gielen, Dolf (2021): Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector. In: *Energies* 14 (13), S. 3772. DOI: 10.3390/en14133772.

SCG Chemicals (2025): Braskem Siam, JV of SCGC and Braskem, Partners with Mitr Phol Bio Fuel to Accelerate Agricultural Ethanol Supply for Asia's First Bio-Ethylene Production. Online verfügbar unter https://www.scgchemicals.com/en/articles/news/1742531056, zuletzt aktualisiert am 13.03.2026.

SKW Piesteritz-a (Hg.): Agro-Chemie Park Piesteritz. Online verfügbar unter https://www.skwp.de/unternehmen/agro-chemie-park-piesteritz/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

SKW Piesteritz-b (Hg.): Umwelterklärung 2025. Online verfügbar unter https://www.skwp.de/fileadmin/content/05_mediacenter/broschueren/umwelterklaerung/2025_Umwelterklaerung_SKWP.pdf, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

SKW Piesteritz-c (Hg.): Liste der Unternehmen. Online verfügbar unter https://www.skwp.de/unternehmen/agro-chemie-park-piesteritz/liste-der-unternehmen/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Sudzucker Group (Hg.): Werk Zeitz. Online verfügbar unter https://www.suedzucker-group.com/de/unternehmen/standorte/zuckerfabriken-deutschland/zeitz, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Syclus (2023): Syclus choses Axens to provide Atol® technology for Europe's first ethanol-based renewable ethylene production plant. Online verfügbar unter https://www.syclus.nl/files/PRESSRELEASE20230703-1.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

TotalEnergies (Hg.): Standorte: TotalEnergies Raffinerie Mitteldeutschland GmbH. Online verfügbar unter https://totalenergies.de/ueber-uns/standorte/raffinerie-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

TotalEnergies (2021): TotalEnergies, Sunfire und Fraunhofer geben den Startschuss für grünes Methanol in Leuna. Online verfügbar unter https://totalenergies.de/totalenergies-sunfire-und-fraunhofer-geben-den-startschuss-fuer-gruenes-methanol-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Tweddle, Gillian; Krause, Lars; Ruiz, Pauline; Raschka, Achim; Özgen, Aylin; Hark, Nicolas; Carus, Michael (2024): Alternative Naphtha. Replacing Fossil-Based Feedstocks in Refineries and Naphtha Crackers: Technologies and Market, Status and Outlook. Hg. v. nova-Institut.

UBE Corporation Europe (2024): UBE starts producing and selling sustainable caprolactam in its plant in Castellón (Spain) - UBE Corporation Europe. Online verfügbar unter https://ube.es/ube-starts-producing-and-selling-sustainable-caprolactam-in-its-plant-in-castellon-spain/, zuletzt aktualisiert am 19.04.2024, zuletzt geprüft am 13.03.2026.

UPM Biochemicals (Hg.): Bioraffinerie-Leuna. Online verfügbar unter https://www.upm-biochemicals.com/de/uber-upm-biochemicals/bioraffinerie-leuna/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Varghese, Maria; Grinstaff, Mark W. (2022): Beyond nylon 6: polyamides via ring opening polymerization of designer lactam monomers for biomedical applications. In: *Chemical Society reviews* 51 (19), S. 8258–8275. DOI: 10.1039/D1CS00930C.

Verbio (Hg.): Produktions-standort Bitterfeld (Sachsen-Anhalt). Online verfügbar unter https://www.verbio.de/unternehmen/standorte/produktionsstandort-bitterfeld/, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

Vučurović, Damjan; Bajić, Bojana; Vučurović, Vesna; Jevtić-Mučibabić, Rada; Dodić, Siniša (2022): Bioethanol Production from Spent Sugar Beet Pulp—Process Modeling and Cost Analysis. In: *Fermentation* 8 (3), S. 114. DOI: 10.3390/fermentation8030114.

Wang, Feng; Xu, Yuanyuan; Ren, Jie; Li, Yongwang (2010): Experimental investigation and modeling of steam cracking of Fischer–Tropsch naphtha for light olefins. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49 (1), S. 51–58. DOI: 10.1016/j.cep.2009.11.005.

Wiley (2020): UPM investiert in industrielle Bioraffinerie am Chemiestandort Leuna. Online verfügbar unter https://processtechnology.wiley.com/de/nachrichten/upm-investiert-in-industrielle-bioraffinerie-am-chemiestandort-leuna, zuletzt geprüft am 26.11.2025.

World Bioenergy Association (2025): Global Bioenergy Statistics report 2025. Online verfügbar unter https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf, zuletzt geprüft am 06.01.2026.

WVZ (2025): Zweite Ernte- und Erzeugungsschätzung 2025. Hg. v. Wirtschaftliche Vereinigung Zucker. Online verfügbar unter https://www.zuckerverbaende.de/presse/presse-archiv/zweite-ernte-und-erzeugungsschaetzung-2025/, zuletzt geprüft am 02.03.2026.

Yalçın, Ali (2025): The Techno-Economic Analysis and Description of the Hydrodealkylation Process for Benzene Production From Toluene. In: *International Journal of Energy Research* 2025 (1), Artikel 2393398. DOI: 10.1155/er/2393398.

Zacharopoulou, Vasiliki; Lemonidou, Angeliki (2018): Olefins from Biomass Intermediates: A Review. In: *Catalysts* 8 (1), S. 2. DOI: 10.3390/catal8010002.