Fraunhofer UMSICHT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK UMSICHT

BIOGENE REST- UND ABFALLSTOFFE FÜR DIE BASISCHEMIE IN NORDRHEIN-WESTFALEN

Bedarfe, Technologiepfade und Beitrag zur Klimaneutralität

Lena Bersch
Katharina Reh
Jan Möbius

Unter Mitwirkung von Tobias Rieger, Johannes Neidel und Andreas Apfelbacher (Institutsteil Sulzbach-Rosenberg) sowie Karlheinz Bretz, Christoph Glasner und Torsten Müller (UMSICHT, Oberhausen)

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT
Institutsteile Oberhausen und Sulzbach-Rosenberg.

Die vorliegenden Arbeiten erfolgten unter Finanzierung durch das Land Nordrhein-Westfalen – Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

SCI4CLIMATE.NRW

SULZBACH-ROSENBERG / OBERHAUSEN | NOVEMBER 2024

Inhalt

1 Betrachtungsgegenstand ……..…3

2 Mengenvergleich Biomasseverfügbarkeit und -bedarf ……5

3 Technologieübersicht ……9
3.1 Grundchemikalien aus fossilen Quellen ……..……9
3.2 Grundchemikalien aus biogenen Quellen ……..…..9
3.3 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf ……..……..……18

4 Beitrag zur Klimaneutralität und weitere Umweltauswirkungen …...20
4.1 Klimaneutralität ……...……..20
4.2 Weitere Umweltauswirkungen ……..……22

5 Literatur ……...24

1 Betrachtungsgegenstand

Die chemische Grundstoffindustrie ist nicht nur energieintensiv, sie benötigt auch große Mengen an Kohlenstoff für die Produktion von (Basis-) Chemikalien. Dieser Kohlenstoff stammt aktuell noch überwiegend aus fossilen Quellen. Bezogen auf die gesamte Chemieindustrie machen in Deutschland Raffinerieprodukte aktuell 74 % (166 TWh) der Rohstoffbasis aus, Erdgas für die Ammoniak- und Methanproduktion stellt weitere 20 % (45 TWh) und nur 5 % (11 TWh)[1] sind Biomasse (BM), hauptsächlich bestehend aus Fetten und Ölen für die Produktion von Spezialchemikalien [AgoraChemie-2023]. Ein Baustein zur Umstellung auf eine klimaneutrale Chemieindustrie bis 2045 ist die Umstellung von fossilen auf biogene Kohlenstoffquellen sicherzustellen [AgoraChemie-2023].

Da ein Großteil der chemischen Wertschöpfungsketten auf den sogenannten »Basischemikalien« aufbauen [VCI-2023], ist die Basischemie für die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe der zentrale Hebel. Für den Begriff »Basischemikalie« gibt es keine allgemeingültige Definition oder Chemikalienliste. Diese Betrachtung richtet sich nach Angaben des VCI [VCI-2023], welche 10 Chemikalien umfasst. Diese sind in Tabelle 1 mit ihren (vereinfachten) Wertschöpfungsketten [DECHEMA-2019] dargestellt[2].

Tabelle 1 Basischemikalien und ihre Wertschöpfungsketten

Chemikalie	Zwischenprodukte	Endprodukte
Ethylen	Polyethylen, Glykole, …	Polymere, Copolymere, Polyole
Propylen	Polypropylen, Acrylsäure, Acrylate, …	Polymere, Copolymere, Fasern, Schäume
Buten und Isomere	Maleinsäureanhydrid, Copolymere	1,4-Butandiol (BDO), N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP), Gummi
Methanol	Formaldehyde, Essigsäure, Dimethylether (DME), …	Leime, Harze, Polymere
Benzol, Toluol, Xylol (BTX)	Phenol, Cyclohexan, Styrol, PTA	Fasern, Garne, Polymere, Harze, Polystyrol, Polyethylenterephthalat (PET), Polybutylenterephthalat (PBT)
Ammoniak	Salpetersäure, Harnstoff, Ammoniumnitrat und -sulfat, …	Düngemittel, Harze, Sprengstoff
Natronlauge		Lösungsmittel, Reiniger, Seifen
Chlor	Polyol, Polyglycol, Vinylchlorid	Zellulose, Polycarbonate, Epoxidharze, Polyvinylchlorid (PVC), …

[1] Der massebezogene Anteil der BM am Rohstoffbedarf beträgt 13 %.

[2] Für eine detaillierte Darstellung der nachgelagerten Wertschöpfungsketten organischer Basischemikalien, siehe [Plastics Europe-2022]. Eine ansprechende Übersicht bietet auch das Schaubild in [AgoraChemie-2023], Seite 10.

Betrachtungsgegenstand

Da die Chemikalien Natronlauge und Chlor weder Kohlenstoff enthalten noch über BM hergestellt werden können, werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet. Von den organischen Basischemikalien wurden im Jahr 2019 in Deutschland ca. 14 Mio.t hergestellt [AgoraChemie-2023], davon ein Viertel (3,5 Mio. t) in NRW [Statistisches Landesamt-2024].

Die folgende Betrachtung berücksichtigt nur biogene Rest- und Abfallstoffe, die verkürzt als »Biomasse« (BM) bezeichnet werden sollen. Mit dieser Eingrenzung können Verteilungskonflikte und negative Umweltauswirkungen so gering wie möglich gehalten und das Prinzip der Kaskadennutzung gewahrt bleiben.

2 Mengenvergleich Biomasseverfügbarkeit und -bedarf

Die hier dargestellten Mengen und daraus abgeleiteten Vergleiche beziehen sich auf die Erhebungen des Biomassemonitors des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ), in dem 77 Rest- und Abfallströme erfasst sind. Abbildung 1 zeigt die Verfügbarkeit von biogenen Rest- und Abfallstoffen in Deutschland für das Jahr 2015 [DBFZ-2023][3].

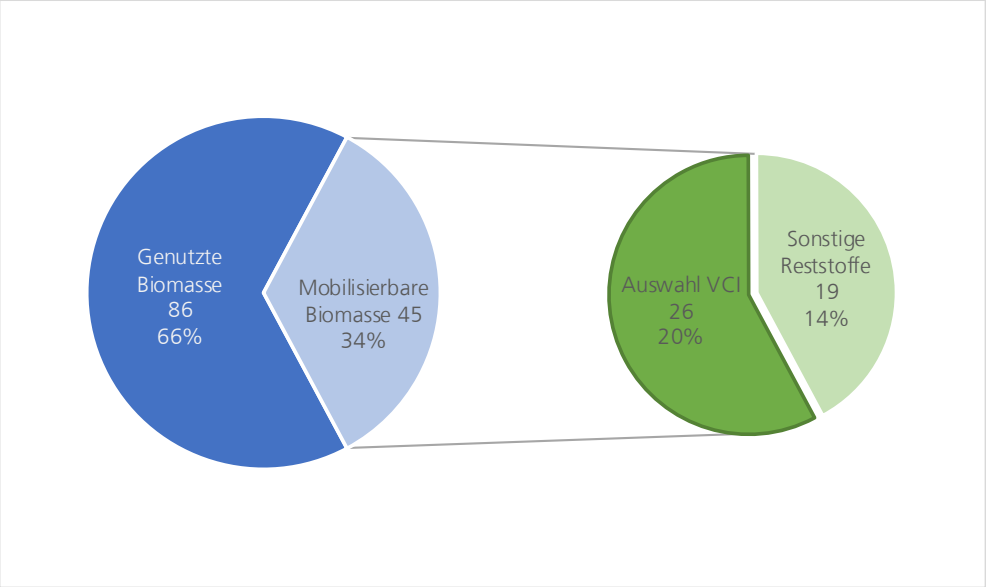


Abbildung 1 Maximales technisches BM-Potenzial in [Mio. tTM/a] in Deutschland nach genutzter und mobilisierbarer BM in 2015 [eigene Darstellung nach DBFZ-2015]

Das gesamte technische Biomassepotenzial (genutzte und mobilisierbare Biomasse) wird auf 131 Mio. t TM/a geschätzt, wovon zwei Drittel bereits entweder stofflich oder energetisch genutzt werden. Die verbleibenden 45 Mio. t TM/a lassen sich in lignocellulosehaltige, zucker- bzw. stärkehaltige, ölhaltige und sonstige Stoffe unterteilen. Je nach gewünschter Nutzung und Technologie sind die verschiedenen Typen von Biomasse unterschiedlich gut geeignet. Der VCI geht in seiner Strategie »Chemistry4-Climate« für eine klimaneutrale chemische Grundstoffindustrie im Jahre 2045 ausschließlich von der Nutzung der folgenden vier größten lignocellulosehaltigen Reststoffe aus: Waldrestholz (Nadel- und Laubbäume), Grüngut und Getreidestroh [VCI-2023]. Diese Auswahl ist in Abbildung 1 dunkelgrün dargestellt, das Potenzial beträgt für das Jahr 2015 26 Mio. t TM.

Mengen auf Bundesländerebene sind nur für das theoretische BM-Potenzial verfügbar [DBFZ-2023], welches für die tatsächliche Nutzbarkeit wenig aussagekräftig ist.

[3] Aktuellere Daten sind nicht für alle Stoffe vollständig verfügbar. Die Prognosen für 2030 für ausgewählte Reststoffe des VCI [VCI 2023] unterscheiden sich aber nur geringfügig von den aktuellen Daten.

Mengenvergleich Biomasseverfügbarkeit und -bedarf

Die tatsächliche Verfüg- und Mobilisierbarkeit für die Chemieindustrie ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet:

- Die Schätzungen unterliegen Unsicherheiten [AgoraEnergiewende-2020][4] und teilweise hohen jahreszeitlichen Schwankungen [Brödner et al.-2023]. Insbesondere die zukünftige Verfügbarkeit von wald- und landwirtschaftlichen Nebenprodukten hängt von noch zu treffenden politischen Entscheidungen zur nachhaltigen Biomassebewirtschaftung ab [Brödner et al.-2023].
- Auch andere Grundstoffindustrien (z.B. Stahl, Zement, Papier) benötigen in der Zukunft mehr biogene Ressourcen für die Verringerung der Treibhausgasemissionen.
- Andererseits könnte die verfügbare Menge auch steigen, wenn aktuell energetisch genutzte BM zukünftig der stofflichen Nutzung zugeführt wird. Der Vorrang der stofflichen vor der energetischen Nutzung gehört zu den Leitprinzipien der Biomassestrategie des Bundes. Momentan vorranging energetisch genutzte (öl- und zuckerhaltige) BM sollte daher nicht völlig von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Das technische Potenzial beträgt hier aktuell (2015) 17 Mio. t TM [eigene Berechnung basierend auf den Daten des DBFZ-2023].

Der BM-Bedarf der chemischen Grundstoffindustrie ergibt sich aus den Produktionsmengen der acht Basischemikalien und sogenannter Biomasse (BM)-Konversionsfaktoren. Tabelle 2 zeigt diese Zahlen für Deutschland aktuell und prognostiziert für 2045 sowie für NRW aktuell.

Tabelle 2 Produktionsmengen Basischemikalien in Deutschland und NRW sowie BM-Konversionsfaktor

Chemikalie	Produktionsmenge D 2023* [kt/a]	Produktionsmenge D 2045* [kt/a]	Produktionsmenge NRW 2022** [kt/a]	BM-Konversionsfaktor*
Ethylen	4.969	4.384	1.430	0,15****
Propylen	3.480	3.070		0,24
Buten und Isomere	2.147	1.894	567	0,24
Methanol	1.523	1.344	160	0,78
Benzol	1.527	1.347	845	0,235
Toluol	571	504	373	0,235
Xylol	395	348	k.A.***	0,235
Ammoniak	3.111	2.744	k.A.***	0,235

* [VCI-2023]
** [Statistisches Landesamt NRW-2024]

[4] Ersichtlich an den teilweise erheblichen Unterschieden zwischen minimalem und maximalem Biomassepotenzial im Biomassemonitor [DBFZ-2023].

*** Unterliegt der Geheimhaltung
**** In Tabelle 13 [VCI-2023] ist für alle Olefine ein Konversionsfaktor von 0,24 ausgewiesen. Die Berechnungsgrundlagen in Anhang 7.6 zeigen aber ein zweistufiges Verfahren mit 3,8 kg Holz bzw. Stroh/ kg Ethanol und 1,7 kg Ethanol/ kg Ethylen, resultierend in einem Gesamtfaktor von 0,15.

Aus der Verrechnung der Produktionsmengen mit dem Konversionsmengen lässt sich, unter Annahme einer vollständigen Substitution von fossilen Rohstoffen durch BM, ein theoretischer BM-Bedarf ableiten. Dieser ist in Abbildung 2 abgetragen und der mobilisierbaren BM-Menge gegenübergestellt.

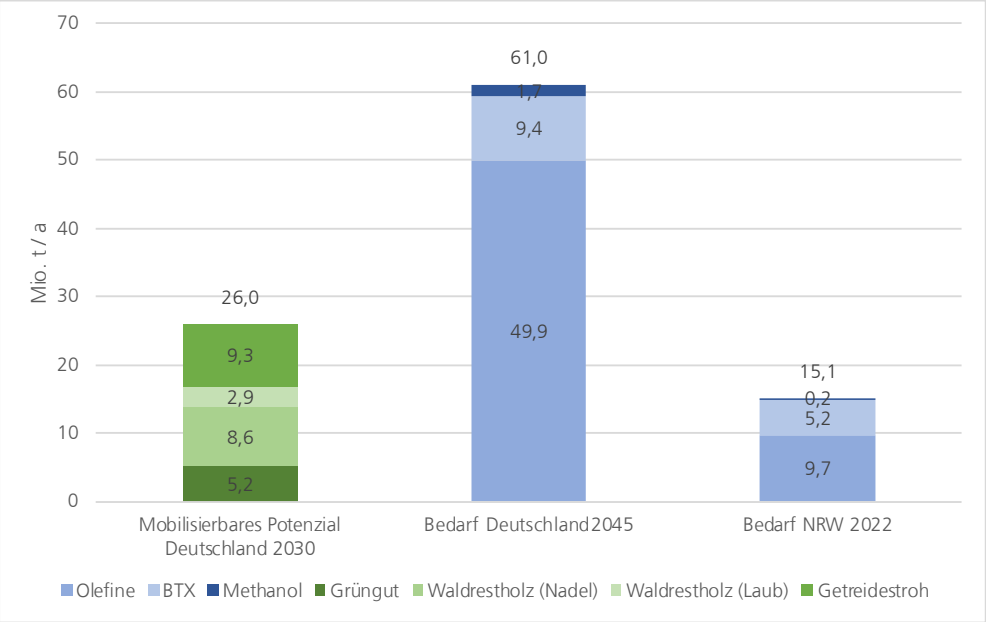


Abbildung 2 BM-Bedarf für Basischemikalien in Deutschland in NRW im Verhältnis zur verfügbaren BM

Abbildung 2 zeigt eine deutliche Bedarfslücke auf. Wenn die chemische Grundstoffindustrie in Deutschland ihre Produktion vollständig auf BM umstellen würde, würde sie mehr als doppelt so viel BM benötigen, wie als maximal mobilisierbar erwartet wird. Allein die Industrie in NRW würde mit 15,1 Mio. t jährlich mehr als die Hälfte der in Deutschland maximal noch mobilisierbaren, lignocellulosehaltigen biogenen Rest- und Abfallstoffe benötigen.

Bei der Interpretation dieses Vergleichs muss beachtet werden, dass es sich nur um eine grobe Schätzung handelt und aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit unterschiedliche Jahre miteinander verglichen werden. Dazu kommt noch die bereits beschriebenen Unsicherheiten und saisonalen Schwankungen bezüglich der Verfügbarkeit der BM.

Der Bedarf ist möglicherweise geringer, weil:

- Momentan eine Vielzahl an Stoffen bzw. Technologierouten erforscht werden, um komplexe chemische Produkte direkt aus BM herzustellen, ohne den Weg über die hier betrachteten Basischemikalien zu gehen [Kohlstedt-2022; Reich-2023]. Beispiele dafür sind Milchsäure, die zu Polymilchsäure (PLA)

weiterverarbeitet werden kann, Adipinsäure oder Biopolymere, welche direkt durch Fermentation von Abfällen erzeugt werden können wie Polyhydroxybuttersäure (PHB) oder Polyhydroxyalkanoat (PHA) [Cluster Kunststoffe und Chemie Brandenburg-2023].

Mengenvergleich Biomasseverfügbarkeit und -bedarf

- Ein Teil der Basischemikalien alternativ durch andere technische Innovationen wie dem chemischen Recycling von Kunststoffen hergestellt werden kann.

Selbst wenn in der Folge die tatsächliche Bedarfslücke daher geringer ausfallen sollte, so zeigt sich doch ein eklatantes Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage.

3 Technologieübersicht

3.1 Grundchemikalien aus fossilen Quellen

Tabelle 3 zeigt die herkömmlichen Technogien zur Erzeugung der acht Basischemikalien aus Erdöl und -gas sowie Kohle.

Tabelle 3 Übersicht der herkömmlichen Erzeugung von Basischemikalien aus fossilen Quellen

Basis-chemkalie	Rohstoffe	Hauptroute	Alternative Prozesstechnologien
Olefine (Ethylen, Propylen, Buten)	Rohöl → Naphtha Erdgas → Synthesegas (Syngas) → Methanol	▪ Erdölraffination Steam Cracking	▪ Fluid Catalytic Cracking (FCC)[1] Methanolgewinnung → MtO
Methanol	Erdgas → Syngas Kohle → Syngas[2]	▪ Dampfreformierung ▪ Methanolsynthese Kohlevergasung	-
Aromaten (BTX)	Rohöl → Naphtha (→ Pyrolysebenzin bzw. Pygas) Kohle → Kokereibenzin	▪ Erdölraffination ▪ Steam Cracking ▪ Katalytisches Reforming	▪ Kohlevergasung → Methanol-gewinnung → MtA
Ammoniak	Erdgas → Syngas + N_2 aus der Luft	▪ Dampfreformierung ▪ Haber-Bosch-Verfahren	-

Olefine und Aromaten werden größtenteils aus Rohöl und dessen Erzeugnissen Naphtha und Pygas gewonnen [Plastics Europe-2022]. Ein geringer Anteil dieser Chemikalien wird aus Erdgas bzw. Kohle über Methanol-to-Olefines (MtO) bzw. Methanol-to-Aromatics (MtA) hergestellt [Europäische Union-2017]. Ammoniak und Methanol dagegen werden aus Erdgas gewonnen.

3.2 Grundchemikalien aus biogenen Quellen

In diesem Kapitel wird nur die stoffliche Nutzung der BM betrachtet. Technologiepfade, die bspw. der Herstellung von Biodiesel dienen, sind nicht berücksichtigt. Die stoffliche Kohlenstoffnutzung macht aktuell ca. 60% des Gesamtbedarfs an fossilen Ressourcen in der chemischen Industrie aus [AgoraChemie-2023].

Im Folgenden werden die wichtigsten Technologien kurz beschrieben. Diese werden, je nach eingesetzter BM und erwünschtem Produkt, mit verschiedenen vor- und nachgelagerten Prozessschritten kombiniert.

- **Pyrolyse** ist ein thermochemischer Prozess, bei dem unter Sauerstoffabschluss bei Temperaturen von üblicherweise 400-600 °C, seltener auch zwischen 300-900 °C Öl, Koks und Gas gewonnen wird. Das gewonnene Öl enthält neben

Olefinen und Aromaten üblicherweise über 400 weitere organische Verbindungen und im Vergleich zu Erdöl deutlich mehr Wasser und Sauerstoff [Rezaei-2014]. Neben der Art der BM und der Temperatur ist auch die Verweildauer im Reaktor entscheidend für die Menge und Qualität der Produkte.

- **Steam Cracking** ist ein Prozess, bei dem Kohlenwasserstoffe (üblicherweise Naphtha) unter Wasserdampfzufuhr und hohen Temperaturen (800 - 900 °C) zu kurzen, ungesättigten Molekülen (bspw. Olefinen) umgewandelt werden [Kansy et al.-2022]

- **Vergasung** ist ein thermochemischer Prozess, bei dem BM bei Temperaturen von 800 - 900 °C in ein Gasgemisch (Syngas) und eine feste Restfraktion überführt wird [Dossow et al.-2024]. Die Gaszusammensetzung ist abhängig von der Art der BM, Reaktortyp, Verweildauer und Temperatur [Gautam et al.-2020].

- **Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese)** ist ein thermokatalytischer Prozess, bei dem Syngas bei Temperaturen von 200 - 350°C und 10 - 40 bar zu langkettigen Kohlenwasserstoffen umgewandelt wird. Diese reichen von C1 (Methan) zu langkettigen Wachsen (21 und mehr C-Atome) [Kansy et al.-2022].

- **Fermentation** ist ein biochemischer Prozess, bei dem Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen komplexe Kohlenstoffverbindungen in Alkohole, Säuren und andere Verbindungen aufbrechen. Für die Fermentation lignocellulosehaltiger BM muss die darin enthaltene Cellulose und Hemicellulose zunächst mittels chemischer oder enzymatischer Hydrolyse in Zucker aufgespalten werden [Cürten & Spieß-2018].

- **Torrefizierung** ist ein thermochemischer Prozess, bei dem BM bei 200 bis 300° Celsius in einer geschlossenen Atmosphäre aus überhitztem Wasserdampf ohne Sauerstoff erhitzt wird, wodurch die flüchtigen Stoffe aus der BM ausgetrieben werden [Fraunhofer IGB-2023]. Das Verfahren ist für die Gewinnung von Basischemikalien von eher geringer Bedeutung, kann aber bspw. auch zur Methanolgewinnung eingesetzt werden [Fraunhofer IGB-2023].

- **Hydrothermale Verflüssigung** ähnelt der Pyrolyse [Gautam et al.-2020] und wandelt flüssige BM (bspw. Klärschlamm) mittels Katalysatoren, niedrigen Temperaturen (200 - 500°C) und hohem Druck (5 - 20 bar) in flüssigen Kraftstoff um [Gautam et al.-2020]. Diese Arten von BM müssten für andere thermochemische Prozesse wie Pyrolyse oder Vergasung zunächst unter hohem Energieaufwand getrocknet werden.

Tabelle 4 listet die Basischemikalien mit den dazugehörigen Prozessrouten, deren Technological Readiness Level (TRL)[5] sowie einer Auswahl an Forschungsinstituten und Unternehmen, die diese Prozesse (weiter-)entwickeln oder betreiben. Zudem werden die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (F&E-Bedarf) dargestellt, die in aktuellen Publikationen diskutiert werden.

[5] TRL 1 = Beobachtung des Funktionsprinzips; TRL 2 = Beschreibung von Anwendungsszenarien; TRL 3= Nachweis der Funktionsfähigkeit; TRL 4 = Versuchsaufbau Labor; in relevanter Einsatzumgebung: TRL 5 = Versuchsaufbau, TRL 6 = Prototyp; TRL 7 = Demonstrator im realen Einsatz; Qualifiziertes System: TRL 8 = Nachweis der Funktionstüchtigkeit, TRL 9 = Nachweis des erfolgreichen Einsatzes [BLE-2021]

In der darauffolgenden Abbildung 3 sind die Prozessrouten von der Art der BM zur Basischemikalie als Flussdiagramm dargestellt. Einige untergeordnete Prozessschritte (bspw. pH-Anpassung) sind dort nicht enthalten, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Überschneidungen zwischen fossilen und biobasierten Technologien sind rot hervorgehoben. Beispielsweise wird über einige Verfahrenswege Bio-Naphtha als Zwischenschritt erzeugt. Dies hat den Vorteil, dass – ggf. mit einigen Anpassungen – vorhandene Anlagen wie Steam Cracker für die biobasierte Chemikalienproduktion genutzt und so Investitionskosten gespart werden können [Umweltdialog-2024]

.

Tabelle 4 Übersicht der Technologien zur Erzeugung der 8 Basischemikalien aus BM (tabellarisch)

Basis-chemikalie	Technologie und Prozessschritte	Ausgangsstoff (Auswahl)	TRL, Anlagen und Unternehmen / Institutionen (Beispiele)	F&E-Bedarf	Kommentar
Olefine (Ethylen, Propylen, Buten)	**Pyrolyse + Steam Cracking** 1. Vorbehandlung: Zerkleinern, Trocknen, Pelletieren 2. Schnell- oder Flashpyrolyse 3. Pyrolyseöl → Hydrocracking → Bio-Naphtha 4. Steam Cracking 5. Aufbereitung durch Destillation, Adsorption und/oder Extraktion Alternativ: katalytische Pyrolyse** [Ke et al.-2022; Rezaei et al.-2014]	Holz/ Stroh Klärschlamm Gärreste Ölhaltige BM	7 Verschiedene Forschungsinstitute, bspw. Fraunhofer UMSICHT, Karlsruher Institut für Technologie [KIT]	BM-Auswahl, Optimierte Vorbehandlung [Ke et al.-2022], Verbesserung Verfahren, zur Produkt-aufbereitung (bspw. Extraktion), Katalysator-Optimierung [Rezaei-2014], Aufspaltung in leichtes und schweres Naphtha zur Maximierung der Olefinausbeute [Karaba et al.-2020]	▪ Je höher der Gehalt von Cellulose und Hemicellulose in der BM, desto höher die Olefinausbeute [Rezaei et al.-2014] ▪ Die Pyrolysekohle kann dem Vergasungsprozess zugeführt werden. ▪ Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023]
Olefine (Ethylen, Propylen, Buten), Fortsetzung	**Methanol to Olefins (MtO)** 1. Dehydratisierung → Dimethylether (DME) 2. DME + Methanol → MtO-Reaktor 3. Destillation/ Adsorption/ Absorption	Methanol	9 Lizensiert u.a. von Honeywell UOP Inc., kommerzielle Anlagen seit 2013 [DECHEMA-2019]	Reduzierung der Koksbildung (→ Deaktivierung des Katalysators)	▪ Konversionsfaktor 2,8 t Methanol / t Olefine [DECHEMA-2019] ▪ Die Olefinausbeute für die Route Syngas → Methanol → MtO ist ca. 3x höher als bei einer Route über Fischer-Tropsch-Synthese [Kansy et al.-2022] ▪ Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023]
	Vergasung + Fischer-Tropsch-Synthese 1. Vorbehandlung 2. Vergasung → Syngas*** 3. Gasreinigung 4. Fischer-Tropsch → Naphtha	Holzspäne, Sägemehl, Stroh, Getreidespelze [Gao et al.-2023]	5-7 Pilot- und Demonstrations-anlagen Fraunhofer IGB, KIT, …	BM-Auswahl, Katalysatoren, [Gao et al.-2023; KIT-2022], Selektivität [Yu et al.-2022], Elektrifizierung des Prozesses [Dossow et al.-2024]	▪ Prozesskette findet Anwendung in der Herstellung von Biodiesel und Flugbenzin, bspw. Thyssen Krupp Uhde und Partner, (BioTfuel [Daniel et al.-2024]), bioliq® [KIT-2022].

* Olefine können auch direkt aus dem Pyrolyseöl gewonnen werden, ohne Umwandlung in Naphtha, dadurch ist aber die Extraktion deutlich aufwendiger.

** Bei der katalytischen Pyrolyse handelt es sich um die Integration von Pyrolyse und katalytischem Cracking in einem Prozess, bei dem Pyrolysegas im Wirbelstromreaktor gecrackt wird [Rezaei et al.-2014]. Dies vereinfacht und beschleunigt den Prozess, generiert aber i.d.R. gegenüber herkömmlichem Pyrolyseöl schlechtere Qualität.

Basis-chemikalie	Technologie und Prozessschritte	Ausgangsstoff (Auswahl)	TRL, Anlagen und Unternehmen / Institutionen (Beispiele)	F&E-Bedarf	Kommentar
	5. Steamcracker				▪ Je nach BM und Parameter in der Vergasung entsteht ein Verhältnis von Olefinen und Aromaten
*** Bei geringen Temperaturen in Verbindung mit Cracking oder bei hohen Temperaturen in Verbindung mit Katalysatoren [Gao et al.-2023]					
Olefine (Ethylen, Propylen, Buten), Fortsetzung	**Raffination + Steam Cracking** 1. Raffination → Biodiesel + Naphtha 2. Naphtha → Steam Cracking	Ölhaltige Reststoffe, Speiseöle, tierische Fette			▪ Bionaphtha ist ein Nebenprodukt bei der Raffination von Biodiesel und synthetischem Flugbenzin [Umweltdialog-2024]. Weltweit geschätzt 44 Anlagen, die dieses Nebenprodukt herstellen.
	Fermentation 1. Vorbehandlung 2. Lignocellulosehaltige BM: Organosolv 3. Hydrolyse (bei lignocellulosehaltiger: enzymatisch/chemisch) → C_5- und C_6-Zucker 4. pH-Anpassung 5. ABE-Fermentation → Ethanol, Butanol, Aceton 6. Dehydratisierung	BM allgemein, Holzschnitzel, Ernterückstände, Trester	6-7 Projekt »Lignocellulose-Bioraffinerie« des Fraunhofer IGB + CBP [DBFZ-2016] Thünen-Institut für Holzforschung und Agrartechnologie, Bayer und weitere (Pilotanlage, [DECHEMA-2014])	Produktabtrennverfahren während der ABE-Fermentation um vorzeitigen Abbruch der Fermentation zu verhindern [Kujawsja et al.-2015], Resistenz der Bakterien gegen Toxizität, bspw. durch genetische Modifikation [Kujawska et al.-2015]	▪ Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023] (nur für Ethylen) ▪ Die Effizienz der Produktion von ABE durch Fermentation ist aufgrund deren Toxizität gering [Kujawska et al.-2015]. ▪ Erfolgversprechendere Einsatzgebiete sind die Gewinnung von Essig-, Bernstein-, oder Milchsäure [AgoraChemie-2023], aromatischem Anilin [Kohlstedt-2022] oder sogar Biopolymeren (PHA, PHB) [Cluster Kunststoffe und Chemie Brandenburg-2023].
	Umesterung + Steam Cracking 1. Umesterung → Fettsäuremethylester 2. Hydrodeoxygenierung → Bioparaffine 3. Steam Cracking	Gebrauchte Speiseöle	4 [Sun et al.-2015]		▪ Die Olefinausbeute war deutlich höher als im Vergleichsversuch mit Steam Cracking von Bionaphtha [Sun et al.-2015].

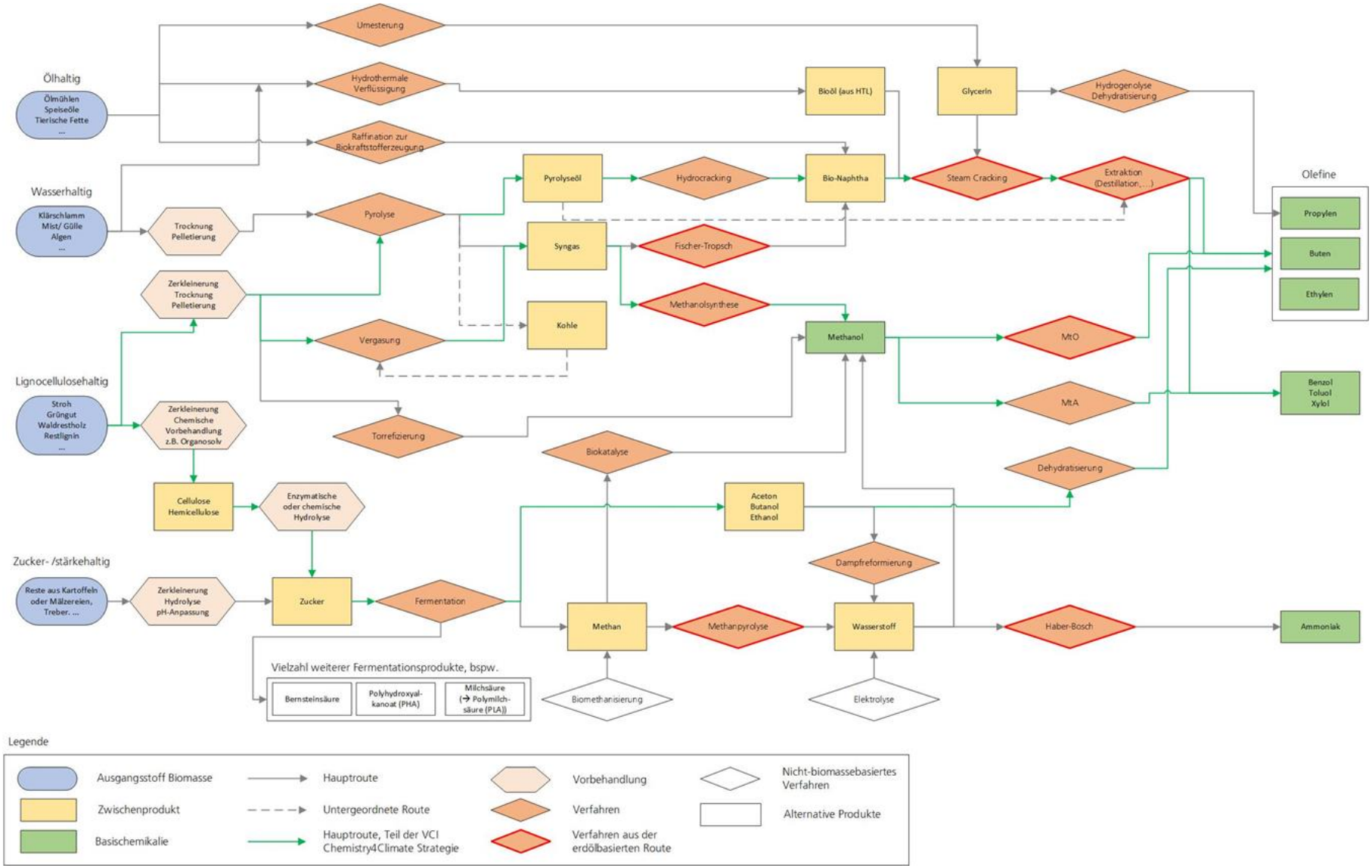
Basis-chemikalie	Technologie und Prozessschritte	Ausgangsstoff (Auswahl)	TRL, Anlagen und Unternehmen / Institutionen (Beispiele)	F&E-Bedarf	Kommentar
Propylen	**Umesterung + Hydrogenolyse** 1. Umesterung zu Glycerin 2. Hydrogenolyse (Propanol) 3. Dehydratisierung	Pflanzliche Fette und Öle (gebrauchte Speiseöle, Tierfette, freie Fettsäuren, …) + Methanol	9 bzw. 4 Schritt 1: Standardverfahren Laborversuche zur katalytischen Umwandlung von Glycerin [Yu et al.-2014, Sun et al.-2015]	Aufreinigung der Fette, alternative Katalysatoren, Abbau durch Enzyme (Fraunhofer IGB [Greenea - 2016])	▪ Bei der Biodieselproduktion entsteht ein Überschuss an Glycerin, welcher zur Propylen-Herstellung sinnvoll genutzt werden könnte [Yu et al.-2014]
Methanol	**Vergasung + Methanolsynthese** 1. Vorbehandlung: Zerkleinern, trocknen auf < 15% Wassergehalt [DECHEMA-2019] 2. Vergasung zu Syngas[Fehler! Textmarke nicht definiert.], Gasreinigung 3. Methanolsynthese	Lignocellulosehaltige BM, Gemischter Haushaltsabfall	9 Thyssenkrupp Industrial Solutions [Thyssen Krupp-2020], BASF	-	▪ Konversionsfaktor 2,56 t Holz / t Methanol [DECHEMA-2019] ▪ Ausbeute an Methanol bei lignocellulosehaltigen BM ca. 1,5 - 2 mal höher als bei zucker-/ stärkehaltigen [DECHEMA-2019] Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023]
	Torrefizierung 1. Trocknung (Heißdampf) 2. Torrefizierung → Gas + Biokohle 3. Destillation, Extraktion oder Elektrodialyse [Fraunhofer IGB-2023]	Holzschnitzel, Heu	7-8 Fraunhofer IGB + New Standard Oil (erster „großtechnischer Prototyp" in 2023, 150 kg/h [Fraunhofer IGB-2023]		
	Fermentation + Biokatalyse durch Bakterien 1. Vorbehandlung 2. Fermentation zu Biogas (Methan) 3. Gasreinigung 4. Umsetzung durch methanotrophe Bakterien	Verschiedene BM, auch lignocellulose-haltige	3-4 [Gautam et al.-2020], Pilotanlage Fermentation und katalytische Methanisierung [DBFZ-2022]	Vorbehandlung, insbesondere Aufbruch der Ligninstrukturen, Auswahl der Bakterienkulturen, Extraktionsverfahren [Gautam et al.-2020]	
Aromaten (BTX)	**Pyrolyse + Steam Cracking** *siehe Olefine*	Ligninhaltige BM (Holz, Stroh) Klärschlamm, …	3-4 *Siehe Olefine* BioBTX [BioBTX-2024], Thünen-Institut [Appelt et al.-	Reduktion der Koksbildung im Cracking Prozess [Rezaei-2014]	▪ Das Molekül Lignin enthält besonders viele aromatische Gruppen und ist daher für die Herstellung von Monoaromaten

Basis-chemikalie	Technologie und Prozessschritte	Ausgangsstoff (Auswahl)	TRL, Anlagen und Unternehmen / Institutionen (Beispiele)	F&E-Bedarf	Kommentar
			2021], Fraunhofer UMSICHT (TCR®-Verfahren)		von besonderem Interesse [Albert-2021]. ▪ Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023] ▪ Flash-Pyrolyse maximiert die Öl-Ausbeute, das Ölprodukt ist aber weniger einfach in die gewünschten Chemikalien zu trennen.
	• **Vergasung + Fischer-Tropsch-Synthese** *Siehe Olefine*	Lignocellulosehaltige BM	5-7	Elektrifizierung des Prozesses [Dossow et al.-2024]	▪ Geringe BTX-Ausbeute im Vergleich zu anderen Verfahren [Ke et al.-2022]
	Methanol to Aromatics (MtA): 1. Dehydratisierung → Dimethylether 2. Katalyt. Umwandlung → Olefine 3. Cyclisierung und Wasserstoffübertragung	Methanol	7 [DECHEMA-2019] Exon Mobile (Pilotanlagen)	Optimierung der Zeolith-Katalysatoren [Wang et al.-2023], Reaktordesign	▪ Großer Methanolbedarf (Konversionsfaktor 4,3 t Methanol / t BTX [DECHEMA-2019]) ▪ Teil der Chemistry4Climate-Strategie [VCI-2023]****
	Hydrothermale Verflüssigung 1. Vorbehandlung und Suspensionserstellung 2. Thermochemische Reaktion → Bioöl, Gase, Kohle, Abwasser 3. Hydrierung und Hydrodesoxygenierung des Bioöls 4. Steam Cracking 5. Aromatisierung	Flüssige BM, bspw. Klärschlamm, Altöl, Gärreste, kommunale Bioabfälle [DBFZ-2016]	4-6 DBFZ, Universität Leipzig, TU Dresden, Fraunhofer CBP [DBFZ-2016], Saubermacher Dienstleistungs AG	BM-Auswahl [Santner-2017], Zusammensetzung des Abwassers aus dem Prozess und dessen Nutzung [DBZF-2016], Stabilisierung der Katalysatoren [DBFZ-2016]	.

**** In der Chemstry4Climate Strategie des VCI ist der Ausgangsstoff Methanol nicht biomassebasiert, sondern wird über H_2 (Elektrolyse) und CO_2 hergestellt [VCI-2023].

Basis-chemikalie	Technologie und Prozessschritte	Ausgangsstoff (Auswahl)	TRL, Anlagen und Unternehmen / Institutionen (Beispiele)	F&E-Bedarf	Kommentar
	Fermentation + Methanpyrolyse 1. Zerkleinern 2. Fermentation zu Biogas 3. Dampfreformierung → Methan 4. Methanpyrolyse → H_2 + CO_2 5. Haber-Bosch-Verfahren	Gülle, Ernterückstände, Klärschlamm, …	6 BASF, KIT, ThyssenKrupp (Methanpyrolyse, Pilotanlagen)	Methanpyrolyse [DECHEMA-2019]	▪ Kostenparität wird aufgrund der hohen Produktionskosten bis 2050 nicht erreicht. VCI geht daher davon aus, dass Ammoniak anorganisch durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen wird [DECHEMA-2019]. ▪ Der entstehende feste Kohlenstoff kann bspw. in der Stahl- und Kohlefaserproduktion oder als Bodenverbesserer eingesetzt werden [ZukunftGas-2020] ▪ Energiebedarf für H_2-Produktion durch Methanpyrolyse deutlich geringer als bei Wasserelektrolyse, Koppelprodukt CO_2 [DECHEMA-2019])

Abbildung 3 Übersicht der Technologien zur Erzeugung der 8 Basischemikalien aus Biomasse (grafisch)



Aus Tabelle 4 und Abbildung 3 wird ersichtlich, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Biomassen und Prozessrouten eingesetzt werden können, um die hier betrachteten Basischemikalien zu erzeugen. Diese Übersicht muss allerdings im Kontext alternativer Erzeugungswege betrachtet werden. So ist bspw. eine Erzeugung von Wasserstoff für die Ammoniakproduktion aus BM zwar möglich, die deutlich günstigere und somit in Zukunft vermutlich dominantere Variante ist allerdings die Herstellung über Elektrolyse [DECHEMA-2019]. Andere Beispiele sind die Methanproduktion über Biomethanisierung [electrochaea-2024] und Methanolproduktion über Methanolsynthese, [VCI-2023] für die das nötige Kohlendioxid sowohl aus Biomasse(-vergasung) oder auch anderen Quellen wie CCU oder Direct Air Capture (DAC) stammen kann [VCI-2023].

3.3 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich besteht bei nahezu allen beschriebenen Technologierouten F&E-Bedarf. Dieser konzentriert im Wesentlichen auf die Auswahl der bestgeeigneten BM für die jeweilige Prozessroute [Gautam et al.-2020; Ke et al.-2022; Santner-2017] und deren optimaler Vorbehandlung [Geenea et al.-2016; Gautam et al.-2020] – insbesondere zur Nutzung möglichst aller Bestandteile inklusive des schwer zu verarbeitenden Lignins [DBFZ-2016; DECHEMA-2014]. Bei allen katalytischen Prozessen ist zudem die Auswahl der Katalysatoren bzw. die Vermeidung der Katalysatordeaktivierung durch Koksbildung ein wichtiger Forschungsgegenstand [DBFZ-2016; Razaei-2014; Wang et al.-2023].

Die einzige Technologieroute, für die TRL 9 für die gesamte Prozesskette erreicht wurde, ist die Methanolgewinnung über Vergasung und Methanolsynthese. Das TRL 9 ist seit 2013 ebenso für den nachgelagerten MtO-Prozess erreicht [Honeywell UOP Inc.-2019]. Bisher stammt das dafür eingesetzte Methanol allerdings noch aus den fossilen Rohstoffen Kohle und Erdgas [Honeywell UOP Inc.-2019].

Für die meisten weiteren Basischemikalien existiert mindestens eine Technologieroute, die TRL 7 oder 8 erreicht hat. Einzig für Ammoniak ist nur TRL 6 erreicht. Diese Route stellt allerdings einen Sonderfall dar: der VCI geht davon aus, dass die Kostenparität bis 2050 nicht erreicht wird, und Ammoniak somit in den nächsten Jahrzehnten nicht aus BM, sondern (ebenfalls ohne fossile Rohstoffe) durch Elektrolyse aus Wasser hergestellt wird [DECHEMA-2019].

Viele der aufgezeigten Technologierouten beinhalten Zwischenprodukte und Prozesse, welche in der fossilen Chemieindustrie etabliert sind (bspw. Steam Cracking, Fischer-Tropsch-Synthese, Methanolsynthese, diverse Extraktionsverfahren). Dies hat den Vorteil, dass bestenfalls bestehende Anlagen genutzt werden und somit Investitionskosten gespart werden können [Umweltdialog-2024]. Allerdings haben die eingesetzten Zwischenprodukte (bspw. Bio-Naphtha vs. erdölbasiertes Naphtha) in der Regel unterschiedliche Zusammensetzungen, so dass Prozessbedingungen / Anlagen entsprechend angepasst werden müssen.

Die Herstellung von Basischemikalien durch BM ist in der Regel noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig mit der fossilen Route. Ein wesentlicher Teil der Forschung nimmt dieses Problem in den Blick, bspw. indem Prozessketten vereinfacht (Pyrolyse + Steam Cracking zu katalytischer Pyrolyse [Gao et al-2023]), Vorbehandlungsschritte umgangen oder die Nutzungsdauer von Katalysatoren erhöht werden. Ein weiterer Ansatz in der Forschung ist es, die bereits entwickelten Verfahren nachhaltiger zu machen, indem bspw. der Betrieb elektrifiziert wird [Dossow et al.-2024].

Generell hatte die Technologieentwicklung zur Erzeugung von Chemikalien aus BM in der Forschung bisher einen geringeren Stellenwert als die Erzeugung von Kraftstoffen [vergleiche bspw. KIT-2022; Thyssen Krupp-2020; Umweltdialog-2024], auch weil diese

technisch einfacher zu realisieren ist. Dennoch hat das Interesse an biomassebasierten chemischen Erzeugnissen in der Industrie in den letzten Jahren stark zugenommen, was sich auch in der steigenden Zahl der Publikationen widerspiegelt.

4 Beitrag zur Klimaneutralität und weitere Umweltauswirkungen

4.1 Klimaneutralität

In diesem Abschnitt wird untersucht, für welche Basischemikalien bei Umstellung von fossilen Einsatzstoffen auf BM die größte Hebelwirkung hinsichtlich Klimaneutralität zu erwarten ist[6].

Dazu wurden zunächst die Treibhausgas-(THG)-Emissionen der acht Basischemikalien verglichen. Die Emissionen werden in der sog. Wirkungskategorie »IPCC 2021: global warming potential (GWP100)« ausgedrückt. Dabei wurde lediglich der Anteil betrachtet, der am Ende der Nutzungsdauer (End of Life, EoL) der Chemikalie durch Verbrennung frei wird. Das GWP EoL eines biogenen Stoffes ist gleich der eingespeicherten Kohlenstoffmenge und somit neutral, solange die EoL-Emissionen vollständig in Form von CO_2 vorliegen.

Tabelle 5 zeigt das GWP EoL spezifisch sowie kumuliert für NRW basierend auf den Produktionsmengen der Chemikalien.

Tabelle 5 GWP EoL der acht Basischemikalien aus fossilen Rohstoffen

Chemikalie	Produktionsmenge D 2023[1] [kt/a]	Produktionsmenge D 2045[1] [kt/a]	BM-Konversionsfaktor[1]
Ethylen	4.969	4.384	0,15[4]
Propylen	3.480	3.070	0,24
Buten und Isomere	2.147	1.894	0,24
Methanol	1.523	1.344	0,78
Benzol	1.527	1.347	0,235
Toluol	571	504	0,235
Xylol	395	348	0,235
Ammoniak	3.111	2.744	0,235

Hieraus wird ersichtlich, dass das GWP EoL pro kg der Basischemikalien relativ ähnlich ist. Einzige Ausnahme stellen Methanol und Ammoniak dar, die nur ein bzw. kein

[6] Andere Quellen für Wasser- oder Kohlenstoff werden in diesem Vergleich nicht berücksichtigt. Beispielsweise ist die Ammoniaksynthese über Biomasse eher unwahrscheinlich, da der notwendige Wasserstoff kostengünstiger durch Wasserelektrolyse gewonnen werden kann [DECHEMA-2019]. Für Kohlenstoff zur Methanolerzeugung ist die Gewinnung aus industriellen CO_2-Punktquellen mittels CCU - Technologien oder aus der Luft mittels DAC denkbar [VCI-2023]. Auch hier bestehen im Vergleich zu fossilen Quellen Potenziale zur Emissionsreduzierung [Badger et al.-2024].

Kohlenstoffatom pro Molekül enthalten. Dieses Ergebnis liefert keinen klaren Hinweis, welche der Basischemikalien aufgrund ihrer Klimawirkung prioritär aus BM erzeugt werden sollten. Daher wurde dieses Ergebnis mit den Produktionsmengen in NRW verrechnet. Hierbei wird deutlich, dass die Produktion von fossilbasiertem Ethylen und Propylen (4,5 Mio. t/a) sowie Benzol (2,9 Mio. t/a) durch die Höhe der Produktionsmengen in NRW die größte Klimawirkung hat. Eine Umstellung der Produktion dieser Stoffe hätte somit die größte Hebelwirkung.

Für die Beurteilung der möglichen Reduktion der Klimawirkung bei Umstellung von fossilen auf biogene Quellen spielen jedoch neben der THG-Emission am EoL auch die Emissionen des Produktionsprozesses der Chemikalien eine entscheidende Rolle. Sollte das GWP des biogenbasierten Produktionsprozesses höher sein als des fossilbasierten, würden möglichweise die Emissionseinsparungen im Bereich EoL aufgewogen oder übertroffen. Um diesen Aspekt zu beurteilen, wurde vergleichende Ökobilanzen (Life Cycle Assessments, LCA) analysiert. Wichtig war dabei, dass diese

- sich auf die in Kapitel 3 gezeigten Prozesstechnologien beziehen
- und entweder von Abfall- und Reststoffen als Ausgangsmaterial ausgehen
- oder, im Fall von Anbau-BM als Ausgangsstoff, die Emissionen des Anbaus getrennt von der Emission des Produktionsprozesses der Chemikalie ausgewiesen werden.

Die Recherche zeigte, dass bisher nur wenige Untersuchungen veröffentlicht wurden, die den genannten Anforderungen entsprechen. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse einer Veröffentlichung.

Tabelle 6 GWP der BTX-Produktion in [kg CO2-Äq. / kg Produkt]*

Produktionsweg/ Prozessschritt	Rohstoff-kultivierung/ -extraktion und -aufbereitung**	Produktions-prozess	EoL	Gesamt
Biogen: Umesterung und Flashpyrolyse von Sojaöl	2,4	0,5	0	2,9
Fossil: Rohölraffinerie	1,4	0,4	3,4	5,2

* Eigene Berechnung basierend auf [Zuiderveen et al.-2024]
** Bis einschließlich Produktionsschritt Cracking.

Es wird deutlich, dass die Gewinnung aus biogenen Quellen höhere Prozessemissionen verursacht (0,5 gegenüber 0,4 kg CO_2-Äq. /kg Produkt), diese aber im Vergleich zu den Einsparungen im Bereich EoL nicht ins Gewicht fallen. Bedeutsamer sind die hohen Emissionen im Bereich Rohstoffkultivierung und -aufbereitung, bedingt durch den nötigen Anbau und die Verarbeitung der Sojapflanzen. Diese fallen allerdings wesentlich geringer aus, wenn als Inputmaterial ein Rest- oder Abfallstoff verwendet wird. Tabelle 7 zeigt diesen Effekt sehr deutlich.

Tabelle 7 GWP des Prozessschrittes Rohstoffkultivierung, -extraktion und -aufbereitung für Rohöl und verschiedene biogene Inputstoffe bei der Herstellung von Benzol

Rohstoff	Art des Rohstoffs	GWP [kg CO_2-Äq. / kg]	Relative Einsparungen gegenüber Referenz
Rohölextraktion und Transport	Fossiler Rohstoff	0,42*	Referenz
Bagasse (Zuckerrohr)	Rest- und Abfallstoff	0,05**	- 88 %
Sägemehl	Rest- und Abfallstoff	0,13**	- 69 %
Weidenholz	Rest- und Abfallstoff	0,23**	- 45 %
Sojabohnen	Anbaubiomasse	1,17**	+ 178 %

* Plastics Europe-2013
** Zuiderveen et al.-2024b

Auch in allen weiteren identifizierten Studien wurden geringere Gesamtemission bei der Herstellung von Basischemikalien aus biogenen Rest- und Abfallstoffen beschrieben [Jiang et al.-2020; Lin et al.-2015; Niziolek et al.-2016].

Zusammenfassend zeigt sich, dass für NRW aufgrund der hohen jährlichen Produktionsmengen die Umstellung auf biogene Rest- und Abfallstoffe als Einsatzstoff für die Produktion von Ethylen, Propylen und Benzol die größte Klimawirkung hätte. Die bisher veröffentlichten LCA zeigen sowohl ein geringeres GWP für die produzierten Chemikalien als auch für den Produktionsprozess selbst. Jedoch fehlen für den Großteil der in Kapitel 3.2 vorgestellten Technologien/ Einsatzstoffe derzeit noch LCA-Studien.

4.2 Weitere Umweltauswirkungen

Wenn Anbau-BM eingesetzt wird, geht mit dem Anbau, der Ernte und der Verarbeitung der BM ein hoher Land- und Wasserverbrauch, Organikeinträge in die Umwelt (Eutrophierung) und weitere negative Folgen einher, die verglichen mit der Nutzung fossiler Rohstoffe deutlich höher ausfallen können [u.a. Zuiderveen et al.-2024a].

Im Falle von Rest- und Abfallstoffen werden diese Umweltlasten dem ursprünglichen Produkt zugeordnet. Daher sind die Umweltlasten beim Einsatz dieser Stoffe, wie auch beim GWP, im Vergleich zur Anbau-BM deutlich geringer. Es wurde eine LCA-Studie identifiziert, die sich beim Ersatz fossiler Rohstoffe auf biogene Reststoffe (Bagasse aus Zuckerrohr) konzentriert [Jiang et al.-2020], die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Sonstige Umwelteffekte der Methanolgewinnung [Jiang et al.-2020]

Wirkungskategorie / Einsatzstoff	Bagasse	Kohle	Erdgas
Versauerungspotenzial [kg SO_2-Äg.]	$8{,}48 \times 10^{-3}$	$1{,}99 \times 10^{-2}$	$7{,}51 \times 10^{1}$
Süßwasser-Ökotoxizitätspotenzial [kg DCB-Äq.]	$1{,}10 \times 10^{-1}$	$4{,}97 \times 10^{-2}$	$2{,}09 \times 10^{-2}$
Marines aquatisches Ökotoxizitätspotenzial [kg DCB-Äq.]	$5{,}06 \times 10^{2}$	$8{,}63 \times 10^{2}$	$2{,}71 \times 10^{2}$
Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial [kg DCB-Äq.]	5.17×10^{-3}	$3{,}41 \times 10^{-2}$	$1{,}03 \times 10^{-2}$
Humantoxizitätspotenzial [kg DCB-Äq.]	$3{,}70 \times 10^{-1}$	$1{,}46 \times 10^{0}$	$4{,}50 \times 10^{-1}$
Eutrophierungspotenzial [kg Phosphat-Äg.]	$1{,}48 \times 10^{-3}$	$1{,}81 \times 10^{-3}$	$6{,}29 \times 10^{-4}$
Ozonabbaupotenzial [kg R11*-Äq.]	$3{,}54 \times 10^{-13}$	$2{,}28 \times 10^{-11}$	$7{,}52 \times 10^{-13}$
Photochemisches Ozonbildungspotenzial [kg Ethen-Äq.]	$5{,}05 \times 10^{-4}$	$1{,}97 \times 10^{-3}$	$6{,}27 \times 10^{-4}$
Abiotisches Erschöpfungspotenzial (fossil) [MJ]	$1{,}77 \times 10^{1}$	$13{,}6 \times 10^{2}$	$7{,}37 \times 10^{1}$

* Trichlorfluormethan

Der Vergleich zeigt exemplarisch, dass die Produktion von Methanol aus Bagasse in den meisten untersuchten Umwelteffekten positiv abschneidet und insbesondere ein geringeres Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sowie abiotisches Erschöpfungspotenzial aufweist als fossile Rohstoffe. Im Vergleich zu fossilen Rohstoffen fällt einzig die Süßwasser-Ökotoxizität höher aus. Im Vergleich zu Erdgas als Rohstoff sind zusätzlich das Eutrophierungspotenzial und die marine aquatische Ökotoxizität höher.

5 Literatur

AgoraChemie-2023 Münnich, P.; Somers, J.; Metz, J.; Tillmann, U.; Oliveira, C., (2023): Chemie im Wandel. Die Drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten. Agora Industrie IMPULS. Online unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-02_IND_Climate _Positive_Chemistry_DE/A-EW_299_Chemie_im_Wandel_DE_WEB.pdf [24.10.24].

AgoraEnergiewende-2020 Joas, F.; Witecka, W.; Lenck, T.; Peter, F.; Seiler, F., Samadi, S.; Schneider, C.; Holtz, G.; Kobiela, G.; Lechtenböhmer, S.; Dinges, K.; Steinbacher, K.; Schröder, J.; Sach, T.; Schimmel, M.; Kliem, C.; Altrock, M.; Lehnert, W.; Finke, J.; Yilmaz, Y. (2020): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Agora Energiewende und Wuppertal Institut, Berlin.

Albert-2021 Albert, J. (2021): Aromatische Verbindungen aus dem nachwachsenden Rohstoff Lignin. Online unter: https://www.chemie.uni-hamburg.de/fachbereich/news-fb/2021/20210208-psp-elemente [27.10.24].

Appelt et al.-2021 Appelt, J.; Fortmann, I.; Radtke, S.; Windt, M. (2021): Verbundvorhaben: Entwicklung eines kombinierten Verfahrens zur Veredelung von Pyrolyseöl mit biogenen Alkoholen und Wasserstoff. Abschlussbericht. Online unter: https://www.thuenen.de/media/institute/hf/Projekte/Proj_Meier/Schlussbericht_Upgrading_Fkz._22012013_05_2021.pdf. [27.10.24]

Badger et al.-2024 Badger, N.; Boylu, R.; Ilojianya, V.; Erguvan, M.; Amini, S. (2024): Life Cycle Assessment for Methanol Production from Industrial CO2 sources and Direct Air Capture. Energy Advances 3 (2024), 2311-2327.

BLE-2021 Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (2021): Merkblatt Technologiereifegrad. Online unter: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/Innovationen/Merkblatt-Technologiereifegrade.html [27.10.24].

BioBTX-2024 BioBTX (2024): Transforming plastic waste and biomass into building blocks for green chemistry. Online unter: https://biobtx.com/technology/ [27.10.24].

Böck-2023 Böck, H. (2023): Methanol – ein Baustein der Energiewende. Kllimareporter° 14.10.2023. Online unter: https://www.klimareporter.de/technik/methanol-ein-baustein-der-energiewende [27.10.2024].

Brödner et al.-2023 Brödner, R.; Cyffka, K.; Fais, A.; Günther, S.; Kalcher, J.; Kazmin, S.; Naegeli de Torres, F.; Radtke, K.; Selig, M.; Sittaro, F.; Thrän, D.; Wilske, B. (2023): Biomassepotenziale aus Abfällen und Reststoffen (Version 1) - Hintergrundpapier Stand und Perspektiven der DBFZ Ressourcendatenbank und der aktuellen Datenlage (12/2023). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10404436

Cürten & Spieß-2018 Cürten, C., Spieß, A.C. (2018): Enzyme zum Abbau von Biomasse. In: Jaeger, KE., Liese, A., Syldatk, C. (Hrsg.) Einführung in die Enzymtechnologie. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57619-9_15

Cluster Kunststoffe und Chemie Cluster Kunststoffe und Chemie Brandenburg (2023): Meilenstein auf dem Weg zur industriellen PHA-Produktion. Pressemitteilung 28.06.23. Online unter: https://kunststoffe-chemie-

Brandenburg-2023	brandenburg.de/de/news/meilenstein-auf-dem-weg-zur-industriellen-pha-produktion [28.10.24].
DBFZ-2016	Deutsches Biomasseforschungsfentrum gemeinnützige GmbH (2016): FOCUS ON Hydrothermale Prozesse – Veredlung wasserreicher, biogener Stoffströme
DBFZ-2022	Deutsches Biomasseforschungsfentrum gemeinnützige GmbH (2022): Presseinformationen – Pilotanlage für erneuerbares Methan. Online unter: https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/pilotanlage [28.10.24].
DBFZ-2023	Deutsches Biomasseforschungsfentrum gemeinnützige GmbH (2023): DBFZ Ressourcendatenbank: DE Biomassemonitor. Online unter: https://datalab.dbfz.de/resdb/potentials?lang=de. Last access: 27.10.2024.
DECHEMA-2019	Geres, R.; Kohn, A.; Lenz, S. C.; Ausfelder, F.; Bazzanella, A.; Möller, A., (2019): Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.
Dossow et al.-2024	Dossow, Marcel; Klüh, Daniel; Umeki, Kentaro; Gaderer, Matthias; Spliethoff, Hartmut; Fendt, Sebastian, 2024. Electrification of gasification-based biomass-to-X processes – a critical review and in-depth assessment. Energy & Environmental Science 17 (2024) 925-973.
Electrochaea-2024	Company Homepage. How the Technology Works. Online unter: https://www.electrochaea.com/technology/ [29.10.24].
Europäische Union-2017	Falcke, H.; Holbrook, S.; Clenahan, I.; Carretero, A.; Sanalan, T.; Brinkmann, T.; Roth, J.; Zerger, B.; Roudier, S.; Delgado Sancho, L., (2017): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 28882 EN; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-76589-6, doi:10.2760/77304, JRC109279.
Fraunhofer IGB-2023	Fraunhofer IGB (2023): Presseinformationen. Grünes Gold: Torrefizierte Biomasse ersetzt Kohle und Öl – Nachhaltige Alternative zu fossilen Rohstoffen. Online unter: https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2023/gruenes-gold-torrefizierte-biomasse-ersetzt-kohle-und-oel.html [27.10.24].
Fraunhofer IGB-2024	Fraunhofer IGB (2024): Verzuckerung von Lignocellulose. Online unter: https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/industrielle-biotechnologie/bioprozessentwicklung/aufbereitung-von-nachwachsenden-rohstoffen-und-abfallstoffen/verwertung-von-lignocellulose.html [27.10.24].
Gao et al.-2023	Gao, Y.; Wang, M.; Raheem, A.; Wang, F.; Wei, J.; Xu, D.; Song, X.; Bao, W.; Huang, A.i; Zhang, Shu; Zhang, H. (2023): Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters. ACS omega 8(2023), 31620-31631.
Gautam et al.-2020	Gautam, P.; Neha; U., S. N.; Dubey, S. K. (2020): Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective. Fuel 273 (2020) 1177-83. 10.1016/j.fuel.2020.117783.
Greenea-2016	Greenea (2016): European waste-based biodiesel and glycerine markets. Online unter: https://www.greenea.com/wp-content/uploads/2016/09/Greenea-Presentation-July-2016.pdf [27.10.24].

Honeywell UOP Inc.-2019	Honeywell UOP Inc. (2019): UOP Advanced Methanol to Olefins (MTO) Process Datasheet - Selective propylene and ethylene production. Online unter: uop-advanced-methanol-to-olefins-process-datasheet.pdf (honeywell.com) [27.10.24].
Jiang et al.-2020	Jiang, J.; Feng, X.; Yang, M.; Wang, Y., (2020): Comparative technoeconomic analysis and life cycle assessment of aromatics production from methanol and naphtha. In: Journal of Cleaner Production (277) 123525. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123525
Kansy et al.-2022	Kansy, M.; Neuner, P.; Bajohr, S.; Rauch, R.; Kolb, T. (2022): Vergleich verschiedener Ansätze zur nachhaltigen Olefinproduktion nach dem MtO- und FT-Verfahren. Chemie Ingenieur Technik 95 (2023) 1476–1481. DOI 10.1002/cite.202200032.
Ke et al.-2022	Ke, L.; Wu, Q.; Zhou, N.; Xiong, J.; Yang, Q.; Zhang, L.; Wang, Y.; Dai, L.; Zou, R.; Liu, Y.; Ruan, R.; Wang, Y. (2022): Lignocellulosic biomass pyrolysis for aromatics hydrocarbons production: Pre- and in-process enhancement methods. Renewable and Sustainable Energie Reviews 165 (2022) 112607. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112607.
KIT-2022	Karlsruher Institut für Technologie (2022): Der bioliq®-Prozess – Endprodukte. Online unter: https://www.bioliq.de/57.php [27.10.24].
Kohlstedt-2022	Kohlstedt, M.; Weimer, A.; Weiland, F.; Stolzenberger, J.; Selzer, M.; Sanz, M.; Kramps, L.; Wittmann, C. (2022): Biobased PET from lignin using an engineered cis, cis-muconate-producing Pseudomonas putida strain with superior robustness, energy and redox properties. Metabolic Engineering 72 (2022), 337–352.
Kujawsja et al.-2015	Kujawska, A.; Kujawski, J.; Bryjak, M.; Kujawski, W. (2015): ABE fermentation products recovery methods—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 48 (2015), 648–661.
Lin et al.-2015	Lin, Z., Nikolakis, V., Ierapetritou, M. (2015): Life cycle assessment of biobased p-xylene production. Ind. Eng. Chem. Res. 54 (8), 2366e2378.
Naegeli de Torres et al.-2023	Naegeli de Torres, F.; Brödner, R.; Cyffka, K.-F.; Fais, A.; Kalcher, J.; Kazmin, S.; Meyer, R.; Radke, K.-S.; Richter, F.; Selig, M.; Wilske, B.; Thrän, D. (2023): DBFZ Resource Database: DE-Biomass Monitor. Biomass Potentials and Utilization of Biogenic Wastes and Residues in Germany 2010-2020 [Data set]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10370137.
Niziolek et al.-2015	Niziolek, A.M., Onel, O., Guzman, Y.A., Floudas, C.A. (2016): Biomass-based production of benzene, toluene, and xylenes via methanol: process synthesis and deterministic global optimization. Energy Fuels 30 (6), 4970e4998.
Plastics Europe-2013	Plastics Europe (2013): Benzene, Toluene, and Xylenes (Aromatics, BTX) – Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers. Brussels, Belgium. Online unter: https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/ [27.10.24].
Plastics Europe-2022	Plastics Europe (2022): Eco-profiles set: Eco-profiles for determining environmental impacts of plastics. Online unter: https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/ Last Access: 27.10.2024.
Reich-2023	Reich, M. (2023). Lignin – Reststoff mit Potenzial. Bioökonomie. Online unter: https://biooekonomie.de/themen/dossiers/lignin-reststoff-mit-potenzial#dossier-page-1 [28.10.24].
Santner et al.-2017	Santner, C. (2017): Hydrothermale Co-Verflüssigung biogener Reststoffe – Masterarbeit. Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben. Online unter:

	https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/2426572/AC15040266n01.pdf. [29.10.24].
Statistisches Landesamt NRW-2024	Statistisches Landesamt NRW (2024): Landesdatenbank Tabelle 42131-03i. Vierteljährliche Produktionserh. im Verarb. Gewerbe. Online unter: https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online#astructure
Sun et al.-2015	Sun, D.; Yamada, Y.; Sato, S. (2015): Efficient production of propylene in the catalytic conversion of glycerol. Applied Catalysis B: Environmental 174-175 (2015), 13-20. 10.1016/j.apcatb.2015.02.022.
ThyssenKrupp-2020	ThyssenKrupp Industrial Solutions (2020): Uhde entrained-flow gasification – End-to-end solutions for all feedstocks and applications. Online unter: https://www.thyssenkrupp-uhde.com/en/products-and-technologies/hydrogen-and-gas-technologies/gasification. [27.10.24].
Prognos AG-2014	Wirtschaftsstandort NRW 2030 – Aktivieren, Stärken, Ausbauen. Online unter: https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/150126_prognos_studie_wirtschaftsstandort_nrw_2030.pdf
Rezaei et al.-2014	Rezaei, P.; Shafaghat, H.; Daud, W. (2014): Production of green aromatics and olefins by catalytic cracking of oxygenate compounds derived from biomass pyrolysis: A review. Applied Catalysis A: General 469 (2014) 490-511. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.09.036.
Umweltdialog-2024	Umweltdialog (2024): Alternatives Naphtha: Der Schritt zur Defossilisierung der Chemieindustrie. 22.07.2024. Online unter: https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/produktion/2024/Alternatives-Naphtha-Der-Schritt-zur-Defossilisierung-der-Chemieindustrie.php [27.10.24].
VCI-2023	Verband der Chemischen Industrie e.V. (2023): Chemistry 4 Climate: Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht. Online unter: https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf. [30.05.2024].
Wang et al.-2023	Wang, N.; Wang, H.; Xiong, H.; Song, W.; Qian, W. (2023): Methanol-to-Aromatics Compounds (MTA) Process, In Mortier, Jacques (Hrsg.), Industrial Arene Chemistry: Markets, Technologies, Sustainable Processes and Cases Studies of Aromatic Commodities. DOI:10.1002/9783527827992.
Yu et al.-2014	Yu, Lei; Yuan, Jing; Zhang, Qi; Liu, Yong-Mei; He, He-Yong; Fan, Kang-Nian; Cao, Yong (2014): Propylene from renewable resources: catalytic conversion of glycerol into propylene. ChemSusChem 7 (2014), 743–747. DOI 10.1002/cssc.201301041.
Zukunft Gas-2020	Zukunft Gas (2020): Faktenblatt Methanpyrolyse. Online unter: https://gas.info/fileadmin/Public/PDF-Download/Factsheet-Pyrolyse.pdf [27.10.24].
Zuiderveen et al.-2024	Zuiderveen, E.; Caldeira, C.; Vries, T.; Schenk, N.; Huijbregts, M.; Sala, S., (2024): Evaluating the Environmental Sustainability of Alternative Ways to Produce Benzene, Toluene, and Xylene. In: ACS sustainable chemistry & engineering (13), S. 5092-5104.