

Die chemische Industrie auf dem Weg zur Klimaneutralität 2040

Maßnahmenmix aus Recycling und Dekarbonisierung der Rohstoffe als zielführende Lösung

IM AUFTRAG DES
FACHVERBANDES DER CHEMISCHEN INDUSTRIE

Dr. Andreas Windsperger
DI Bernhard Windsperger



**INSTITUT FÜR
INDUSTRIELLE
ÖKOLOGIE**

St. Pölten, im September 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Ziel	5
1.1	Hintergrund	5
1.2	Umfang und Ziel.....	6
1.3	Inhalte.....	6
2	Forciertes Recycling von chemischen Produkten.....	9
2.1	Recyclingpfade - Annahmen	10
2.2	Ergebnisse der Recyclingpfade	11
2.3	Resumee	14
3	Forciertes Recycling kombiniert mit alternativen Bereitstellungstechnologien	15
3.1	Recyclingpfad mit Wasserstoffroute	16
3.1.1	Technologiebeschreibung der Wasserstoff-Route mit CCU-Konzepten.....	16
3.1.2	Annahmen	19
3.1.3	Ergebnisse	20
3.2	Recycling mit Vergasungs-Route	23
3.2.1	Technologiebeschreibung	23
3.2.2	Annahmen	23
3.2.3	Ergebnisse	25
3.3	Recycling mit Ethanolroute	27
3.3.1	Technologiebeschreibung	27
3.3.2	Annahmen	27
3.3.3	Ergebnisse	28
3.4	Zusammenfassung und Vergleich der Dekarbonisierungsvarianten.....	31
3.4.1	Vergleich der Technologiepfade	31
3.4.2	Vergleich der Ergebnisse der Technologiepfade.....	35
3.4.3	Schlussfolgerungen	39
4	Vorschlag eines Technologie-Mix für die Umsetzung der Dekarbonisierung.....	40
4.1	Annahmen	40
4.2	Ergebnisse.....	41
4.3	Resumee	46
5	Literatur.....	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings mit fossiler Rohstoffbasis	9
Abbildung 2: Entwicklung der Anteile an Sekundärmaterialien an den gesamten Kunststoffabfällen	11
Abbildung 3: Spezifisches THG-Emissionsreduktionspotenzial bei Kunststoffrecycling	12
Abbildung 4: Veränderungen der THG-Emissionen durch erhöhtes Recycling nach Materialgruppen in dem jeweiligen Energiesystem	13
Abbildung 5: THG-Emissionen bei verstärktem Recycling von Kunststoffen gegenüber der fossilen Bereitstellung im jeweiligen Energiesystem	14
Abbildung 6: Produktionsmengen der betrachteten Pfade.....	15
Abbildung 7: Schema der Low Carbon Ammoniak-Synthese (DECHEMA 2017).....	17
Abbildung 8: Low Carbon Methanol Synthese (DECHEMA 2017).....	18
Abbildung 9: Olefine aus Methanol	19
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Wasserstoff und CO ₂	20
Abbildung 11: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit Wasserstoffroute...21	
Abbildung 12: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit Wasserstoffroute	22
Abbildung 13: Methanol über Biomasse-Vergasung (DECHEMA 2017)	23
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Vergasung von Biomasse.....	23
Abbildung 15: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit Vergasungs-Route	25
Abbildung 16: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit Vergasungs-Route.....	26
Abbildung 17: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Ethanol aus Biomasse.....	28
Abbildung 18: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit Ethanol-Route.....29	
Abbildung 19: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit Ethanol-Route.....	30
Abbildung 20: Vergleichende Gegenüberstellung des Rohstoffbedarfs in allen betrachteten Pfaden	35
Abbildung 21: Vergleichende Gegenüberstellung des Energiebedarfs in allen betrachteten Pfaden.....	36
Abbildung 22: Vergleich der THG-Emissionen aller betrachteten Pfade im konventionellen Energiesystem	37

Abbildung 23: Vergleich der THG-Emissionen aller betrachteten Pfade im erneuerbaren Energiesystem.....	38
Abbildung 24: Veränderung des Energiebedarfs für den vorgeschlagenen TechnologiemiX	41
Abbildung 25: Veränderung des Rohstoffbedarfs für den vorgeschlagenen TechnologiemiX	42
Abbildung 26: Veränderung der THG-Emissionen für den vorgeschlagenen TechnologiemiX	43
Abbildung 27: Veränderung der Investitionskosten für den TechnologiemiX	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifisches THG-Emissionsreduktionspotenzial bei Kunststoffrecycling	12
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Wasserstoffroute	32
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Vergasungsrout.....	33
Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Bio-Ethanolroute.....	34
Tabelle 5: Zusammensetzung des vorgeschlagenen Technologie-Mix für die Dekarbonisierung	40

Abkürzungsverzeichnis

THG	Treibhausgase
Emissionsintensität	Emission pro Energieeinheit, z.B. in t CO ₂ pro TJ
TWh	Terawattstunden
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalent, Bezugseinheit der THG-Emission

1 Hintergrund und Ziel

1.1 Hintergrund

Die chemische Industrie ist zu einem der Pfeiler unserer technisierten Gesellschaft, welche die Basis für Wohlstand und hoher Lebensqualität ist, geworden. Es bedurfte vieler Entwicklungen und Innovationen, um den hohen technischen Standard und die Qualität der Produkte, die wir heute im Alltag verwenden, zu erreichen. Die Prozesse der chemischen Industrie sind im Grundstoffbereich mit großem Energie- und Rohstoffeinsatz verbunden. Die chemische Industrie verwendet bis jetzt überwiegend fossile Rohstoffe (Rohöl und Erdgas), inklusive mineralischer und biogener Ressourcen insgesamt ca. 20 Mio. Tonnen, das entspricht etwa 12 % des gesamten Rohstoffeinsatzes in Österreich. Bei der Verarbeitung fallen Treibhausgas (THG)-Emissionen an, sie machen etwa 13 % der THG-Emissionen des österreichischen Industrie- und Energiesektors aus. Dieser Bereich ist für 43 % der THG-Emission von insgesamt 79 Mio. Tonnen im Jahr 2018 in Österreich verantwortlich. Wird der Energieinhalt der Produkte thermisch genutzt, führt der enthaltene fossile Kohlenstoff ebenfalls zu THG-Emissionen. Dies ist bei chemischen Produkten in der Regel erst am Ende der Nutzungsdauer der Fall, erfolgt bei Brenn- und Treibstoffen aber bereits im Rahmen der Nutzung. Bei den mit der Verarbeitung verbundenen Emissionen führte der Einsatz hocheffizienter KWK-Anlagen mit emissionsarmen Brennstoffen sowie die Forcierung der Abwärmenutzung in den letzten Jahren zu einer kontinuierlichen Entkopplung des Energieeinsatzes von der Produktionsleistung. Die verstärkte Verwendung von erneuerbaren Energieformen brachte eine zusätzliche Verringerung der CO₂-Intensität und stellt einen weiteren wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz dar.

Zur Vermeidung der THG-Emissionen aus dem fossilen Rohstoff ist durch die Vorgaben der Paris-Ziele eine zunehmende Dekarbonisierung - eine Abkehr von der Verwendung fossiler Rohstoffe – geboten. Um mögliche Wege zur Dekarbonisierung der chemischen Produktion zu untersuchen, hat der Fachverband der Chemischen Industrie Österreichs (FCIO) bereits 2018 das Institut für Industrielle Ökologie beauftragt, Wege hierfür in Anlehnung an eine europaweite DECHEMA-Studie¹, aber unter Verzicht auf Atomstrom, auszuarbeiten.

Dabei zeigte sich durch den Ausstieg aus der Verwendung des fossilen Rohstoffs bei einer weitgehenden Dekarbonisierung bis 2050 bei einer Neusynthese der chemischen Stoffe aus Wasserstoff und CO₂ oder Biomasse eine etwa Vervierfachung des Energiebedarfs gegenüber dem aktuellen Einsatz von Energieträgern in der chemischen und der petrochemischen Industrie. Davon müsste der Großteil als Strom aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden. Die benötigten 61 Terawattstunden (TWh) stellen 150 % des zusätzlichen Potenzials an erneuerbarem Strom in Österreich dar. Damit verbunden wäre aber auch eine deutliche Steigerung der Verluste, die sich bei den einzelnen Synthesewegen ergeben. Der weitgehende Erhalt der chemischen Strukturen erschien damit aus Sicht der Energieökonomie vorrangig. Dafür wären stoffliches Recycling der Materialien oder eine Zerlegung in Grundbausteine durch chemisches Recycling mit anschließender Neu-Synthese vielversprechende Optionen.

¹ Perspektiven der Dekarbonisierung für die chemische Industrie in Österreich (siehe Literaturverzeichnis)

1.2 Umfang und Ziel

In der vorliegenden Nachfolgearbeit wurden nun darauf aufbauend Möglichkeiten und Klimaschutzpotenziale eines forcierten Recyclings chemischer Produkte in Kombination mit erfolgversprechenden Wegen zur Dekarbonisierung der eingesetzten Rohstoffe für die restlichen und die nicht rezyklierbaren Anteile der Chemieprodukte untersucht. Als Ergebnis wird aus den unterschiedlichen Charakteristika der betrachteten Dekarbonisierungswege die aus heutiger Sicht aussichtsreichste Variante für eine alternative Bereitstellung der chemischen Produkte ohne fossile Rohstoffe entwickelt. Dabei werden für diese Kombination aus forciertem Recycling und dekarbonisierten Bereitstellungstechnologien für die Basischemikalien der chemischen Industrie die Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen, Energieeinsatz und Rohstoffbedarf dargestellt sowie der Investitionsaufwand für eine Umsetzung bis 2040 abgeschätzt.

Im Umfang der Betrachtung standen die chemischen Produkte in Österreich. Die Mengen der in Österreich verwendeten Gebrauchsgüter wurden aus Daten der Produktion in Verbindung mit Außenhandelsdaten der Statistik Austria zusammengestellt. Speziell für Kunststoffe erfolgte wegen ihrer Klimarelevanz aufgrund des derzeit fossilen Kohlenstoffgehalts und der mengenmäßigen Bedeutung für die chemische Industrie in Österreich ein Abgleich mit Abfalldaten und Angaben in Studien (UBA 2017a). Als Mengengrundlage wurden die Werte des Referenzjahres 2015 mit jährlichen Steigerungen von ca. 1 % auf 2040 hochgerechnet. Der Energie- und Rohstoffbedarf für die einzelnen Dekarbonisierungswege wurde analog zur *Dekarbonisierungsstudie* mit Faktoren der DECHEMA (2017) gerechnet. Die Berechnung der Klimabelastungen der Bereitstellungskette für die jeweiligen Materialien erfolgte mit lebenszyklusbasierten Emissionsfaktoren aus der Lebenszyklusanalyse-Datenbank „Ecoinvent“. Zusätzlich wurden etwaige bei der Entsorgung oder Verwertung anfallende Emissionen über die Kohlenstoffgehalte der Materialien errechnet und miteinbezogen.

Als zukünftige Perspektive diente ein weitgehend erneuerbares Energiesystem, das mit dem weiter entwickelten konventionellen, aber nur unvollständig dekarbonisierten Energiesystem hinsichtlich der THG-Emissionen verglichen wurde. Generell wurde in allen Anwendungsbereichen von weiteren Effizienzsteigerungen von 0,56 % pro Jahr und von verstärktem Stromeinsatz bei industriellen Anwendungen ausgegangen. Dies betraf den Einsatz von erneuerbarem Strom für die Dampfbereitstellung oder direkt für „Power to Heat“ Anwendungen anstelle von Kesselanlagen. Weiters wurden die Forcierung des Einsatzes von Brüdenkompression, das ist die Nutzung des gebildeten Dampfes für Heizzwecke durch Steigerung des Drucks, sowie der Einsatz von erneuerbarem Strom für Industrieöfen und Antriebe angenommen.

1.3 Inhalte

Der erste Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Vermeidung von CO₂-Emissionen durch Kunststoff-Recycling. Dabei wurde zwischen dem Verpackungsbereich und sonstigen Nicht-Verpackungsanwendungen sowie den Kunststoffarten (z.B. PET, Polyolefine) unterschieden. Darüber hinaus wurden auch weitere chemische Produkte wie Lösemittel, Farben und Lacke, Düngemittel, Chlor und Methanol mitberücksichtigt. Weitere wesentliche Perspektiven des

Recyclings, wie der Einsatz von Stoffresten von Baumwollbekleidung für die Faserherstellung sowie Verbesserungen bei der Nutzung schwefelhaltiger Abgase bei der Chemiefaserindustrie und die Reaktivierung von Aktivkohle, konnten in der gegenständlichen Arbeit noch nicht in quantitativer Form eingebunden werden. Eine erste qualitative Abschätzung zeigte aber, dass dadurch keine wesentlichen Veränderungen bei den Treibhausgasemissionen im Branchenkontext zu erwarten sind.

Für die Ausarbeitung von Möglichkeiten zur Abkehr von fossilen Rohstoffen konnte auf die Vorarbeiten der Dekarbonisierungs-Studie² zurückgegriffen werden. Zur Verringerung des fossilen Rohstoffeinsatzes bzw. Substitution der Rohstoffquellen wurden nachfolgend angegebene Technologiepfade betrachtet.

1. Verstärktes Recycling von Kunststoffen, sowohl über mechanisches Regranulieren als auch chemisches Recycling zu chemischen Grundstoffen
2. Bereitstellung von Grundchemikalien über die Wasserstoffroute:
 - a. Methanol- und Olefinproduktion aus der Reduktion von CO₂ mit Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser unter Einsatz von erneuerbarem Strom.
 - b. Ammoniak Herstellung unter Verwendung von Elektrolyse-Wasserstoff (anstelle von Methan)
3. Bereitstellung von Grundchemikalien über die Vergasung von forstlicher und agrarischer Biomasse zu Methanol und Olefinen
4. Bereitstellung von Grundchemikalien über Bio-Ethanol aus agrarischer und forstlicher Biomasse mit nachfolgender Dehydrierung zu Olefinen

Zusätzlich wurden Wege des verstärkten Stromeinsatzes bei industriellen Anwendungen im Zuge der Dekarbonisierungspfade einbezogen. Diese Wege zur Dekarbonisierung der Energiebereitstellung waren im Wesentlichen:

- Verwendung von erneuerbarem Strom für die Dampfbereitstellung oder direkt für „Power to Heat“ Anwendungen anstelle von Kesselanlagen
- Forcierung des Einsatzes von Brüdenkompression, der Nutzung des gebildeten Dampfs für Heizzwecke durch Steigerung des Drucks
- Einsatz von erneuerbarem Strom für Industrieöfen und Antriebe

Bei allen betrachteten Möglichkeiten wurden weitere Steigerungen der Energie- und Prozesseffizienz als Grundlage angenommen.

- Kontinuierliche Verbesserung der Effizienz
- Sanierung von Anlagen
- Einsatz von Best-Practise Technologien

Die Technologie-Pfade werden dabei in unterschiedlichen Energiesystemen, einem konventionellen sowie einem erneuerbaren Energiesystem, je nach Zeithorizont und bei den Dekarbonisierungswegen auch bei Erreichung vollständiger Klimaneutralität, betrachtet. Die Annahmen sind nachfolgend beschrieben:

² Windsperger 2018 (siehe Literaturverzeichnis)

1. Konventionelles Energiesystem

Hier wird vom aktuellen, konventionellen Energiesystem mit einer Mischung aus fossiler und erneuerbarer Energie entsprechend den Anteilen am Energieeinsatz nach der Energiebilanz Österreichs ausgegangen. Für die Entwicklung bis 2040 wird in den Szenarien eine Verringerung der Emissionsintensität³ der eingesetzten Energie von 40 % durch verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien angenommen. Für die chemische Industrie wird analog von unvollständiger Dekarbonisierung ausgegangen und mit der gleichen Reduktion der Emissionsintensität gerechnet.

2. Erneuerbares Energiesystem

Als zukünftige Perspektive werden zum Vergleich alle Pfade entsprechend den politischen Zielen bis 2040 mit einem weitgehend erneuerbaren Energiesystem gerechnet. Für den österreichischen Energiemix, der beispielsweise für den Recyclingaufwand Anwendung findet, wird bei erneuerbarer Ausrichtung von einem Absinken der Emissionsintensität (Emissionsfaktor) des Energieeinsatzes auf etwa 10 % ausgegangen. Eine Restemission verbleibt auch bei vollständigem Einsatz erneuerbarer Energieträger aus der Bereitstellung der Materialien für die Infrastrukturerichtung (Beton oder Stahl) und für Bringung und Transport zum Beispiel bei Biomasse (UBA-DE 2019).

3. Vollständige Klimaneutralität

Hier wird auch mit der Dekarbonisierung der Produktion der Materialien für die Infrastruktur der erneuerbaren Energieformen gerechnet. Bei dieser vollständigen Dekarbonisierung auch der Infrastruktur würde die THG-Emission aus der Bereitstellung und Verwendung von Energie auf Null sinken.

Bei der thermischen Verwertung von Materialien (z.B. Kunststoffen) wird CO₂ freigesetzt, das bei fossiler oder mineralischer Herkunft als THG-Emission zählt und damit Klimarelevanz aufweist. Ist das gebildete CO₂ aber biogener Herkunft oder wird es abgeschieden und die Emission daher vermieden, dann ist Klimaneutralität gegeben. Bei den Dekarbonisierungstechnologien wird im Sinne des Ziels vollständiger Klimaneutralität daher bei der Verwendung von CO₂ von der Herkunft aus biogenen Quellen oder aus Kreisläufen ausgegangen, das bei der thermischen Verwertung klimaneutral ist. Die Kreislaufführung von CO₂ durch Abscheidung aus Verbrennungsabgasen und nachfolgendem Einsatz in der chemischen Industrie wird in CCU-Konzepten (Carbon-Capture and Use) derzeit verfolgt. Sie stellen eine aktuelle Perspektive der Klimaneutralität für die Industrie und den Klimaschutz dar.

³ Emission pro Energieeinheit

2 Forciertes Recycling von chemischen Produkten

Die Betrachtung von zukünftigen Klimaschutzpotenzialen durch verstärkten Erhalt der chemischen Strukturen erfolgte über das Recycling von chemischen Produkten mit fossiler Rohstoffbasis. Dabei wurde der erwartete Umsetzungsgrad des Recyclings variiert und die daraus möglichen THG-Reduktionen gegenüber der fossilen Bereitstellung berechnet. Generell waren die Abfallmengen aus dem Jahr 2015 die Grundlage, die auch in den Recyclingpfaden konstant gehalten wurden. Beim Ausmaß des Recyclings wurde einerseits in Anwendungsbereiche (z.B. Verpackung), andererseits in die verschiedenen Materialien (z.B. PE, PET, Gummi) unterschieden. Die THG-Emissionen wurden getrennt nach Rein- (z.B. gewerbliche Abfälle) und Mischsortimenten (z.B. Restmüll, Leichtfraktion) für die Bereitstellung und die Verbrennung bzw. den Aufwand für das Recycling berechnet. Die Belastungen hinter der jeweiligen Bereitstellungskette chemischer Produkte konnten aus Lebenszyklusdatenbanken, Ökobilanzen und Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration - EPD) sowie Firmenberichten zusammengestellt werden. Diese enthalten die Aufwendungen des gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung bis zum fertigen Produkt. Die Verbrennungsemission wurde über den Kohlenstoffgehalt entsprechend der Zusammensetzung der Materialien ermittelt. Bei den Recyclingtechnologien wird von einer Kombination aus mechanischem Recycling durch Regranulieren sortenreiner Fraktionen und chemischem Recycling von gemischten Abfallsortimenten und niedrigen Qualitäten ausgegangen.

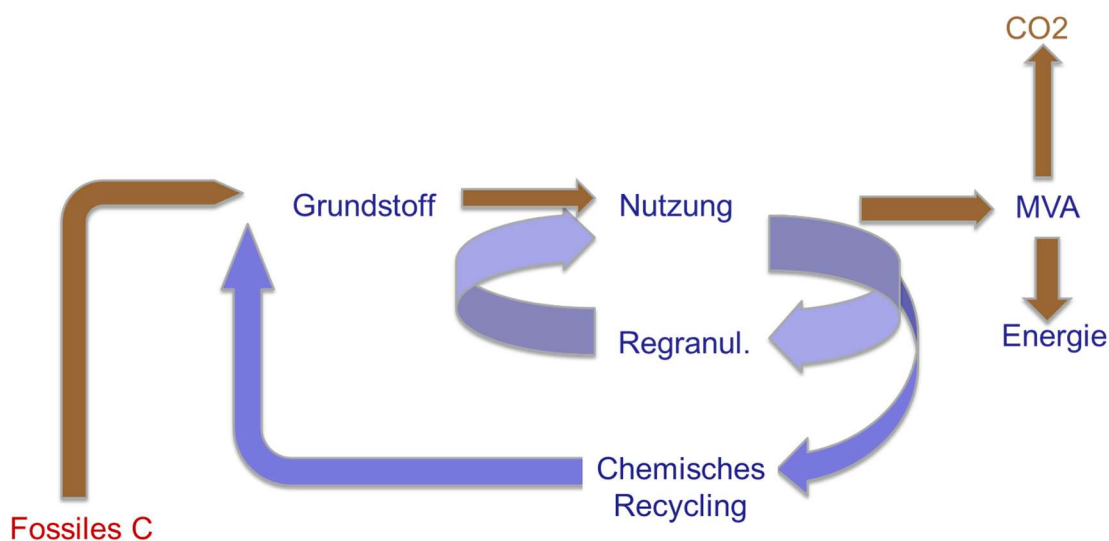


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings mit fossiler Rohstoffbasis

Das Ergebnis der Berechnungen wird als die, durch das Recycling verringerte Gesamtemission der Produktbereitstellung gegenüber der konventionellen, fossil-basierten Herstellung angegeben. Im Falle des Recyclings reduzieren sich die Bereitstellungsemission sowie die Emission aus der thermischen Verwertung der Kunststoffe im Energiesektor. Für die weiterhin thermisch verwerteten Materialmengen wird für die gewonnene Energie eine Gutschrift entsprechend dem Energiemix des Energiesystems von der Emission aus der thermischen Verwertung abgezogen.

In Bezugnahme auf die Klimaschutzziele wird in den Recyclingpfaden von einer zukünftig verstärkten Dekarbonisierung des Energiesystems ausgegangen.

2.1 Recyclingpfade - Annahmen

Nachfolgend werden die betrachteten Pfade näher beschrieben:

- Fossil (Referenz-Situation, vollständig fossil ohne Recycling):

In diesem Referenz-Pfad werden die Belastungen einer vollständig fossilen Bereitstellung unter der Annahme einer 100 %-igen thermischen Verwertung im aktuellen konventionellen Energiesystem berechnet.

- IST (aktueller Stand):

Der IST-Stand stellt die derzeitige Situation der Abfallbehandlung und der Recyclingquoten (Referenzjahr 2015) in Österreich dar. Hier wird bei den Recyclingquoten der Verpackungs- und Nicht-Verpackungsbereich sowie nach Material und Rein- oder Mischsortimenten unterschieden. Im Verpackungsbereich wird von 35 % bei Rein bzw. 20 % bei Mischsortimenten (für PET 45 % bzw. 35 %) und im Nicht-Verpackungsbereich von 20 % bzw. 10 % ausgegangen. Es wird der aktuelle konventionelle Energiemix angewendet.

- Pack-kons. (konservatives Verpackungs-Recycling im konventionellen Energiesystem):

In diesem Pfad werden gegenüber der Ist-Situation die Verpackungskunststoffe einem erhöhten Recycling zugeführt, wobei die Recyclingquoten für PET mit 80 % bzw. 55 % (Rein- und Mischsortimente) und 60 % bzw. 40 % für sonstige Verpackungsmaterialien konservativ angesetzt wurden. In diesem Szenario wird bis 2040 mit einer Reduktion der Emissionsintensität des konventionellen Energiesystems gerechnet, die mit 40 % ebenfalls konservativ angenommen wurde (siehe auch 1.3. „Konventionelles Energiesystem“).

- Pack-optim. (forciertes Verpackungs-Recycling mit erneuerbarem Energiesystem):

Dieser Pfad nimmt für die Verpackungskunststoffe optimistische Recyclingquoten an, die bei PET auf 95 % bzw. 80 % (Rein- bzw. Mischsortimente) und für die sonstigen Materialien wie Polyolefine auf 80 % bzw. 60 % gesteigert werden. Dieses Szenario stellt somit eine forcierte Recycling-Variante für Verpackungen dar. Entsprechend der angestrebten Forcierung von erneuerbaren Energieformen wird auch die Emissionsintensität des Energiesystems auf etwa 10 % reduziert (siehe auch 1.3. „Erneuerbares Energiesystem“).

- N-Pack-kons. (konservatives Nicht-Verpackungs-Recycling im konventionellen Energiesystem):

In diesem Pfad werden die Recyclingquoten für die Nicht-Verpackungskunststoffe für alle Materialien auf 40 % für Rein- und 20 % für Mischsortimente erhöht. In diesem Szenario wird wieder eine konservative Reduktion der Emissionsintensität des Energiesystems um 40 % angenommen, die kurz- bis mittelfristig umsetzbar erscheint.

- Gesamt-optim. (kombiniertes forciertes Recycling mit erneuerbarem Energiesystem):

Dieser Pfad setzt sowohl im Verpackungs- (siehe Szenario „Pack-optim.“) als auch im Nicht-Verpackungsbereich auf optimistische Recyclingquoten. Bei Nicht-Verpackungen werden 70 % bzw. 50 % (Rein- bzw. Mischsortimente) angenommen. Dieses Szenario stellt wiederum

eine optimistische Variante mit einem erneuerbaren Energiesystem dar. Daher wird auch in diesem Szenario die Emissionsintensität des Energiesystems auf etwa 10 % reduziert.

- 100% (Vision einer vollständigen Kreislaufwirtschaft mit erneuerbarem Energiesystem):

In diesem Pfad wird von einem visionären Recyclinganteil von 100 % sowohl im Verpackungs- als auch im Nicht-Verpackungsbereich ausgegangen, der eine optimale Kombination von stofflichem und chemischem Recycling sowie entsprechende Rahmenbedingungen der Sammlung und Sortierung erfordert. Dieses Szenario stellt damit eine sehr optimistische Variante dar, daher wird auch von einem erneuerbaren Energiesystem ausgegangen und die Emissionsintensität des Energiesystems auf etwa 10 % reduziert.

2.2 Ergebnisse der Recyclingpfade

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Recyclinganteile an den gesamten Kunststoffabfällen in den betrachteten Recyclingpfaden. Die rezyklierten Mengen steigen von etwa 150 kt in der IST-Situation auf etwa 220 kt in den konservativen Pfaden bis auf über 500 kt im gesamt optimierten Pfad. Je nach Recyclingpfad kann so auch eine deutliche Reduktion der Kunststoffabfälle, die aktuell noch thermisch verwertet werden, erzielt werden. Bei der optimistischen Betrachtung verringert sich dieser Anteil um über 50 Prozent, während bei der Annahme einer vollständigen Kreislaufwirtschaft (100%-Variante) Abfälle komplett vermieden werden könnten.

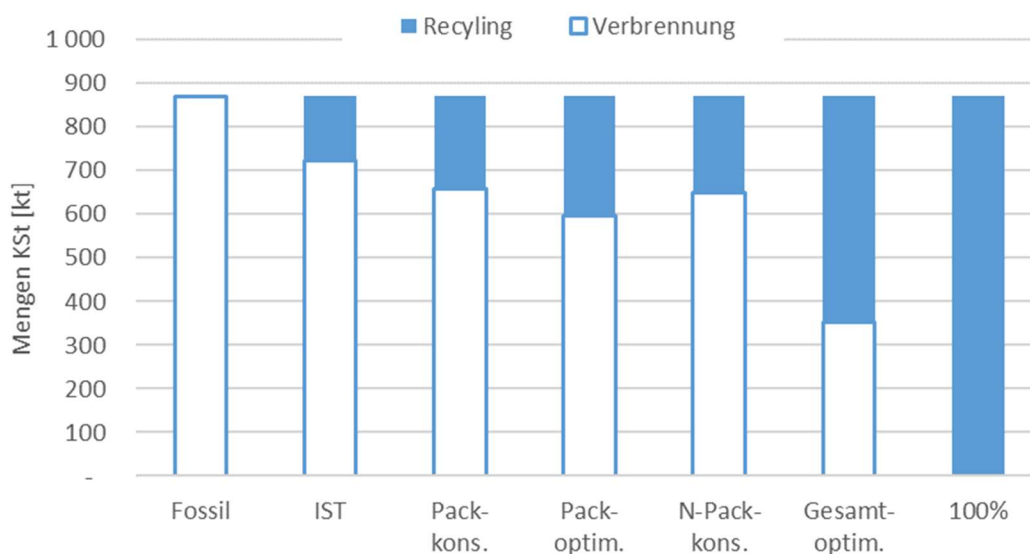


Abbildung 2: Entwicklung der Anteile des Recyclings an den gesamten Kunststoffabfällen

In Abbildung 3 ist das theoretische spezifische Treibhausgas(THG)-Einsparpotenzial durch das Recycling für einzelne Kunststoffe, das bei reinsortigen Abfällen vorhanden wäre, jeweils in kg CO₂eq pro kg Produkt angegeben. Die negativen Balken stellen die beim Recycling wegfallende Belastung der Bereitstellung und der thermischen Verwertung dar, die grauen positiven Balken demgegenüber den Aufwand des Recyclings. Bei allen ausgewiesenen Kunststoffen ist der Recyclingaufwand gegenüber Herstellung und thermischer Verwertung nur gering. Dabei sind die Einsparungen aus dem Wegfall der Primärbereitstellung und der thermischen Verwertung etwa gleich groß. Im Mittel würde einer THG-Emission von 1,3 kg CO₂eq pro kg Produkt durch das Recycling der Wegfall einer Emission aus Herstellung und Verwertung von 4,9 kg CO₂eq pro kg gegenüberstehen, was eine Einsparung von 3,6 kg CO₂eq/kg Kunststoff, das sind etwa 75 %, bedeutet.

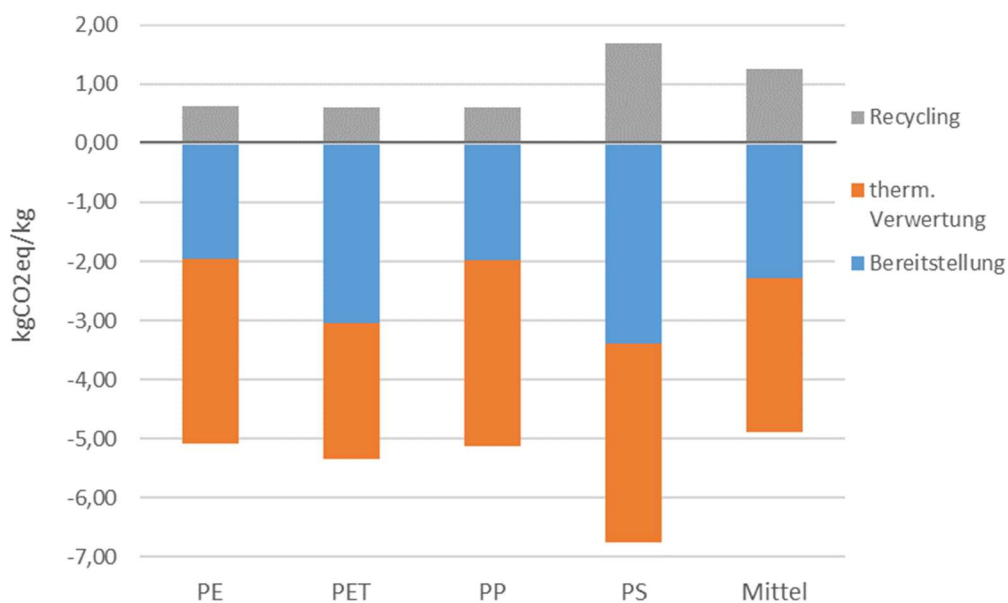


Abbildung 3: Spezifisches THG-Emissionsreduktionspotenzial beim Kunststoffrecycling

Legende:

PE... Polyethylen, PET...Polyethylenterephthalat, PP...Polypropylen, PS...Polystyrol, Misch... Gemischte Abfallsortimente

Tabelle 1: Spezifisches THG-Emissionsreduktionspotenzial beim Kunststoffrecycling

kg CO ₂ eq/kg Kunststoff	PE	PET	PP	PS	Mittel
Recycling	0,6	0,6	0,6	1,7	1,3
Bereitstellung	-1,9	-3,1	-2,0	-3,4	-2,3
therm. Verwertung	-3,1	-2,3	-3,1	-3,4	-2,6
Einsparung	-4,5	-4,7	-4,5	-5,1	-3,6

In den nachfolgenden Abbildungen sind zunächst die Veränderungen der THG-Emissionen bei den unterschiedlichen Recyclingvarianten dargestellt. Abbildung 4 zeigt die Anteile der Materialgruppen Kunststoffe, Gummi und Lösemittel und Abbildung 5 die Aufteilung innerhalb der Kunststoffe nach den wesentlichen Materialien. Weitere Materialgruppen wurden ebenfalls betrachtet, konnten wegen der geringen Mengen oder noch fehlender

Daten nicht quantifiziert werden. Jeder Variante liegt das jeweilige Energiesystem zugrunde (entsprechend den Annahmen in 2.1).

Das Referenzszenario der derzeitigen Situation (IST) liegt bei den THG-Emissionen in der Höhe von knapp 4,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}, bei denen der Anteil der Kunststoffe deutlich überwiegt. Diese Emissionen beinhalten sowohl die Bereitstellung als auch die Belastungen aus der energetischen Verwertung der Produkte. Der Vergleich mit dem rein fossilen Pfad („Fossil“, 5,1 Mio. Tonnen CO_{2eq}) zeigt, dass durch die aktuellen Recyclingquoten fast 0,7 Mio. Tonnen CO_{2eq} gegenüber der vollständig fossilen Bereitstellung eingespart werden konnten.

In den konservativen Recyclingpfaden „Pack-kons“ und „N-Pack-kons“ mit einer nur gemäßigten Steigerung der Recyclingquoten ist bereits in einem verbesserten konventionellen Energiesystem ein Rückgang der THG-Emissionen auf 3,6 Mio. Tonnen CO_{2eq} zu erkennen. In den optimierten Recycling-Pfaden („Pack-optim“) und speziell im Recyclingpfad „Gesamt-optim“ mit einem verstärkten Anstieg der Recyclingquoten und einem erneuerbaren Energiesystem sinken die THG-Emissionen auf 1,8 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Die Einsparung beträgt in diesem realistischen „Gesamt-optim“ Pfad gegenüber dem IST-Zustand etwa 2,6 Mio. Tonnen CO_{2eq}.

In einem visionären 100 %-Recyclingpfad könnten die THG-Emissionen auf nahezu Null reduziert werden. Allerdings stellt dieses Szenario aus derzeitiger Sicht eine enorme Herausforderung dar. Für derartig forcierte Recyclingquoten wären die Schaffung sowohl der logistischen Erfordernisse der Sammlung mit den zugrunde liegenden rechtlichen Rahmenbedingungen, als auch der technischen Infrastruktur für die Behandlung notwendig.

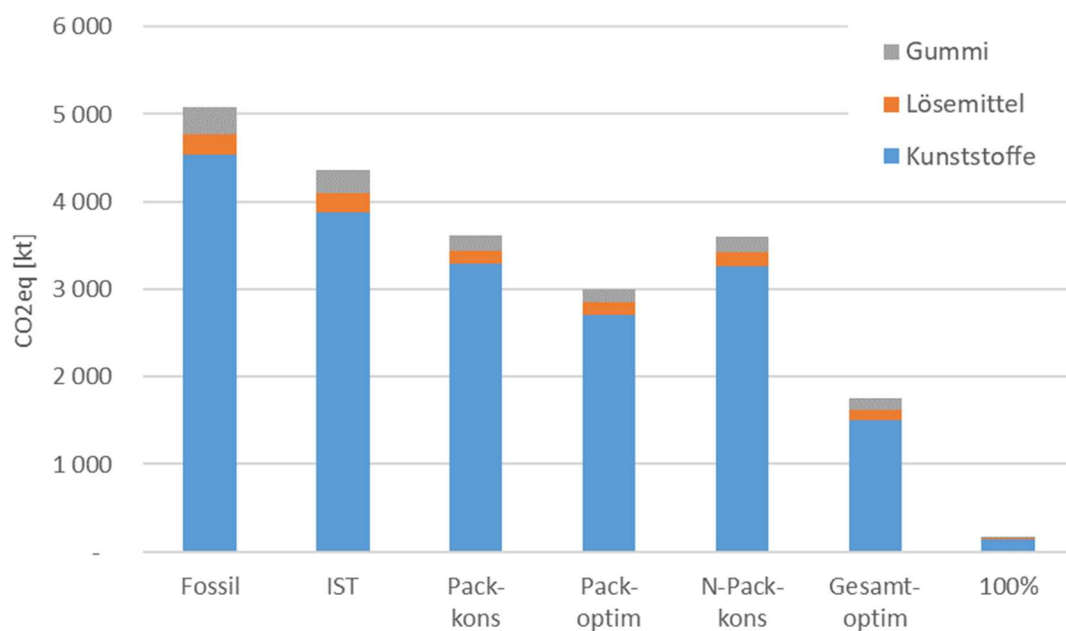


Abbildung 4: Veränderungen der THG-Emissionen durch erhöhtes Recycling nach Materialgruppen in dem jeweiligen Energiesystem

In der folgenden Abbildung sind die THG-Emissionen der einzelnen Recyclingpfade für die Kunststoffe nach Materialarten dargestellt. Jedem Pfad liegt wieder das jeweilige Energiesystem zugrunde (analog den Annahmen in 2.1). Generell ist aufgrund der Dominanz der Kunststoffe ein sehr ähnlicher Verlauf der THG-Emissionen zu der vorigen Abbildung zu erkennen. Bei der IST-Situation liegen die THG-Emissionen bei 3,9 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Der wesentliche Emissionsbeitrag kommt von Polyethylen, vor allem durch die hohen Mengenanteile, und den sonstigen Kunststoffen. Mit einem forcierten Recycling („Gesamt-optim“) ist eine Absenkung der Emission auf 1,5 Mio. Tonnen CO_{2eq}, entsprechend einer Reduktion gegenüber der IST-Situation um 2,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}, möglich. Diese Reduktion wird überwiegend durch Polyethylen und die sonstigen Kunststoffe bewirkt, die dann auch den wesentlichen Teil der Restemission ausmachen.

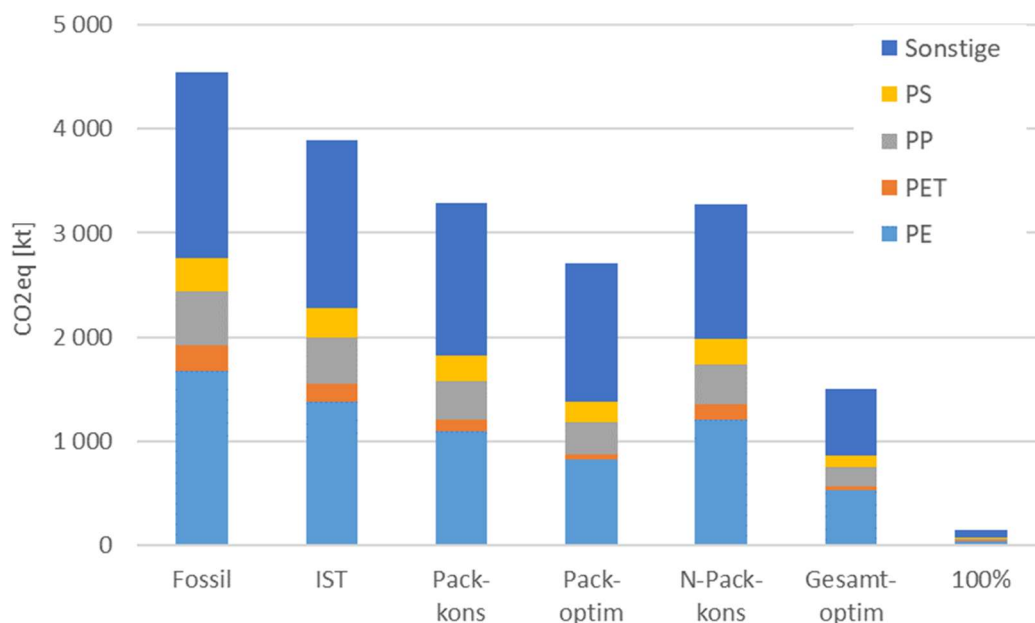


Abbildung 5: THG-Emissionen bei verstärktem Recycling von Kunststoffen gegenüber der fossilen Bereitstellung im jeweiligen Energiesystem

Legende: PE... Polyethylen, PET...Polyethylenterephthalat, PP...Polypropylen, PS...Polystyrol, Sonstig...weitere Kunststoffe wie Polyamid oder Polyvinylchlorid

2.3 Resumee

Die Ergebnisse der Recyclingpfade haben gezeigt, dass forciertes stoffliches Recycling von chemischen Produkten zu einer deutlichen Verringerung der Bereitstellungsemissionen führen würde. Dieser positive Effekt wird unter der Annahme eines entsprechend den politischen Klimazielen zukünftig zu erwartenden erneuerbaren Energiesystems noch weiter verstärkt.

Insgesamt zeigt sich verstärktes Recycling als ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion der THG-Emissionen. Da in der Praxis aber eine vollständige Kreislaufführung sämtlicher chemischer Produkte nur schwer erreichbar ist, kann durch Recycling alleine keine vollständige Dekarbonsierung der chemischen Produktion erreicht werden. Etwaige ausgeschleuste Mengen fossiler Herkunft würden in einer thermischen Verwertung auch weiterhin zu THG-Emissionen führen.

3 Forciertes Recycling kombiniert mit alternativen Bereitstellungstechnologien

Um eine weitgehende Dekarbonisierung der chemischen Produktion zu erreichen, bedarf es somit zusätzlicher, über das weitgehende Recycling hinausgehende Veränderungen bei der Herstellung chemischer Produkte. Derartige Möglichkeiten werden in diesem Kapitel anhand von Technologiepfaden zur alternativen Bereitstellung näher betrachtet und mit dem im vorigen Kapitel betrachteten verstärkten stofflichen Recycling (Recyclingpfad „Gesamt-optim.“) kombiniert. Bei allen Betrachtungen wird von einem Wachstum der österreichischen chemischen Produktion von etwa 1 % pro Jahr und einer kontinuierlichen weiteren Effizienzsteigerung von 0,56 % pro Jahr analog der DECHEMA-Studie (DECHEMA 2017) ausgegangen.

Die wesentlichen Produktbereiche mit den jeweiligen Mengen, die den einzelnen Szenarien zugrunde liegen, sind in nachfolgender Abbildung dargestellt. Dabei sind bei den Kunststoffen auch andere Polymere wie Gummi, aber auch Lösungsmittel sowie chemische Grundstoffe für Synthesen enthalten. Diese Gruppe macht mengenmäßig den größten Anteil aus und verändert sich durch die Recyclingquoten deutlich. In den weiteren Szenarien, die auf das forcierte Recycling aufsetzen, bleibt diese Mengenaufteilung konstant.

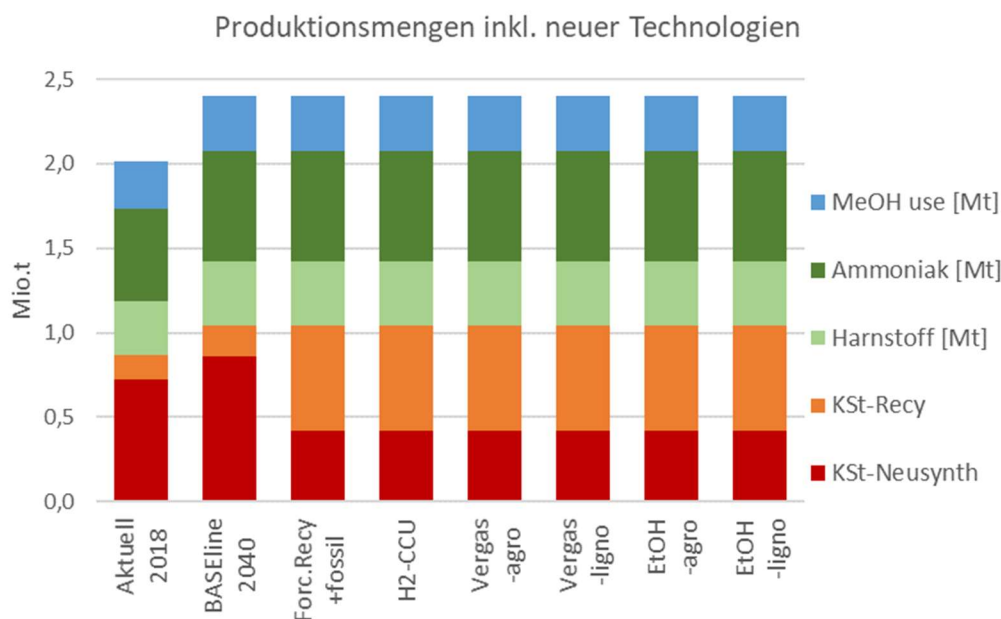


Abbildung 6: Produktionsmengen der betrachteten Pfade

Legende:

Kst-Neusynth	Kunststoffneusynthese
Kst-Recy	Kunststoffrecycling
MeOH-use	Methanol für direkte Anwendung
Forc.Recy+fossil	Forciertes Recycling mit fossiler Bereitstellung der nicht recycelten Mengen
H2-CCU	Wasserstoffpfad mit biogenem oder Kreislauf CO ₂ (s.a. 1.3.)
Vergas-agro	Vergasung von landwirtschaftlicher Biomasse
Vergas-ligno	Vergasung von lignocellulosischer Biomasse
EtOH-agro	Ethanolherstellung über landwirtschaftliche Biomasse
EtOH-ligno	Ethanolherstellung über lignocellulosische Biomasse

Die einzelnen Technologiepfade, die in den Analysen untersucht wurden, sind nachfolgend zusammengefasst, sie werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

Der Konventionelle Baseline-Pfad betrachtet die aktuelle Situation mit dem angegebenen Wachstum der chemischen Produktion bis 2040. („Baseline 2040“). In einigen Abbildungen ist zum Vergleich auch die derzeitige Situation ohne Wachstum als Referenz angeführt („Aktuell 2018“).

Der Recycling-Pfad („Forc.Recy+fossil“) geht von einem forcierten Einsatz von Recycling mit der thermischen Verwertung der nicht rezyklierten Anteile und der Bereitstellung dieser Mengen aus fossilen Quellen analog den bisherigen petrochemischen Prozessen aus (siehe Recycling-Pfad „Gesamt-optim.“). Die THG-Emission dieses Pfads wird zur Darstellung des Einflusses der Energieversorgung einmal mit konventionellem verbessertem Energiemix (Reduktion der Emissionsintensität um 40 %) und einmal mit einem weitgehend erneuerbaren Energiemix (Reduktion der Emissionsintensität auf 10 %) gerechnet.

Die Dekarbonisierungs-Pfade haben den Recyclingpfad „Gesamt-optim“ als Basis hinsichtlich des Materialkreislaufs. Sie betrachten aber die Bereitstellung der nicht stofflich rezyklierten Mengen an chemischen Grundstoffen über alternative Routen. Diese gehen über Wasserstoff und CO₂ sowie auch über Vergasung von Biomasse oder die Vergärung zu Bioethanol. Auch hier wird die bereits erwähnte Wachstumsrate von knapp 1 % pro Jahr mit kontinuierlicher weiterer Effizienzsteigerung angewendet. Die durch Neusynthese bereitzustellenden Mengen reduzieren sich dabei auf etwa 40 % der chemischen Grundstoffe und Kunststoffe und insgesamt auf 75 % aller chemischen Produkte. Für die Berechnung der THG-Emission wird auch bei diesen Pfaden sowohl konventionelles verbessertes als auch erneuerbares Energiemix verwendet und zusätzlich bei Klimaneutralität betrachtet (siehe Kap 1.3).

3.1 Recyclingpfad mit Wasserstoffroute

3.1.1 Technologiebeschreibung der Wasserstoff-Route mit CCU-Konzepten

Herstellung von Wasserstoff

Im konventionellen Prozess wird der Wasserstoff über das fossile Treibhausgas Methan bereitgestellt, wobei neben dem Wasserstoff der Reaktion entsprechend auch CO₂ entsteht, das häufig für andere chemische Prozesse (z.B. Harnstoff) als Grundstoff dient. Für diesen Dekarbonisierungsweg wird Wasserstoff durch elektrolytische Spaltung von Wasser erzeugt. Folgende Verfahren stehen zur Verfügung:

- Alkalische Elektrolyse mit wässriger Kalilauge unter 100°C, der spezifische Energieeinsatz beträgt 4,3 kWh/m³ Wasserstoff.
- Membranelektrolyse mit einer Protonen-leitenden Membran (Proton-Exchange-Membran (PEM)) bei unter 100°C, der spezifische Energieeinsatz beträgt 4,0 kWh/m³ Wasserstoff
- Wasserdampfelektrolyse mit einer Keramikmembran als Sauerstoffionenleiter bei unter 1000°C, damit ist eine deutliche Reduktion des spezifischen Energieeinsatzes auf 2,6 kWh/m³ Wasserstoff möglich.

Die Erzeugungskosten für Wasserstoff hängen maßgeblich von den Energiekosten ab und liegen bei den Elektrolyse-Verfahren etwa beim doppelten Wert der Dampfkonversion. Längerfristig wird bei steigenden Mengen und größeren Anlagen mit deutlichen Kostensenkungen gerechnet. Der Carbon Footprint der elektrolytischen Verfahren liegt bei Einsatz von Windstrom bei 0,6 t CO₂/t H₂ (das sind unter 5 % gegenüber konventionellem Stromeinsatz), ohne die Berücksichtigung des gebildeten Sauerstoffs.

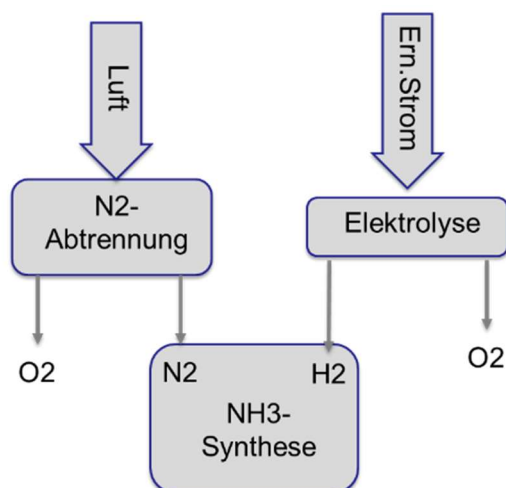
Die Methanpyrolyse - eine Spaltung von Erdgas in Wasserstoff und Kohlenstoff - wird wegen der weiterhin fossilen Basis hier nicht betrachtet. Die THG-Bilanz ist hingegen ausgeglichen, wenn Methan aus Biogas eingesetzt wird. Produktseitig kann sogar eine Senke resultieren, wenn das Kohlenstoffprodukt als Humusbildner in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann oder eine Deponierung als Feststoff erfolgen würde. Aus einer Tonne Wasserstoff aus der Methanpyrolyse entstehen ca. 3,3 Tonnen Kohlenstoff.

Ammoniak und Harnstoff über die Wasserstoff-Route

Die Herstellung von Ammoniak, einer der wesentlichen Industrieprozesse, wird weltweit in großtechnischen Anlagen nach dem Haber-Bosch Verfahren durchgeführt. Dabei wird der Wasserstoff in einer Erdgasreformierung erzeugt, der dann bei hohem Druck mit Stickstoff aus dem Prozessabgas zu Ammoniak umgesetzt wird. Der Prozess hat einen Energieüberschuss von netto ca. 4,3 GJ/t Ammoniak. Das bei der Reformierung entstehende CO₂ wird teilweise aus dem Abgas abgetrennt und für die Herstellung von Harnstoff und weiter zu Melaminharz verwendet.

Bei Umstellung der Düngerherstellung auf eine Low Carbon Ammoniak Route würde die Bereitstellung des Wasserstoffs über die Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom erfolgen und damit die CO₂-Emission aus der Erdgasreformierung vermeiden. Der Strombedarf dafür liegt bei über 11 MWh/t NH₃, es muss dabei auch noch der wegfallende Überschussdampf berücksichtigt werden.

Allerdings müsste für die nachfolgende Haber-Bosch Reaktion der Sauerstoff aus der Reaktionsluft abgetrennt werden, um den Stickstoff für die Ammoniaksynthese zu liefern, während beim konventionellen Verfahren der Stickstoff im Abgas des Reformers anfällt.



Der weitere Prozess mit der Reaktion bei etwa 200 bar erfolgt wie bisher.

Die daran angeschlossene Produktion von Harnstoff ist technisch sehr eng mit der Ammoniak-Herstellung verknüpft. Ammoniak und CO₂ werden mit hohem Druck und hoher Temperatur direkt in den Reaktor eingebracht, die getrennte Angabe von Energie- und Emissionsdaten für die Harnstoffproduktion ist daher schwierig.

Abbildung 7: Schema der Low Carbon Ammoniak-Synthese (DECHEMA 2017)

Die benötigte Menge an CO₂ - 0,7 t CO₂ pro t Harnstoff - wird konventionell aus dem Abgas des Reformers entnommen und muss beim Low Carbon Prozess anderswertig bereitgestellt werden.

Für die in Österreich jährlich hergestellte Menge an Ammoniak wird etwa ein Fünftel der Menge an Wasserstoff benötigt, für den sich über den Elektrolyseweg ein Strombedarf von über 5 TWh ergibt. Der zusätzliche Energiebedarf der Kompressoren führt zu einem Strombedarf von fast 7 TWh gesamt, dies entspricht fast dem dreifachen Wert des Energiebedarfs nach der konventionellen Route. Bei Einsatz von erneuerbarem Strom ergibt sich eine Emissionsreduktion von etwa 0,4 Mio.t CO₂, die sich durch das für den Harnstoff notwendige CO₂ noch deutlich verstärkt.

Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid im Rahmen von CCU-Konzepten

Methanol kann ein Schlüsselprodukt für eine zukünftige Dekarbonisierung werden. Es wird nachfolgend vor allem die Umsetzung zu Olefinen betrachtet, Methanol wird aber auch für die Herstellung von Bio-Treibstoffen verwendet. Die Herstellung erfolgt heute überwiegend über Reformierung von Erdgas. Das dabei gebildete Gas wird im Methanol-Konverter umgesetzt, nicht reagierte Anteile werden im Kreislauf geführt. Der Energiebedarf liegt bei 2,8 bis 3,3 MWh/t, wobei noch eine Dampfauskopplung von bis zu 0,5 MWh genutzt werden kann.

Dekarbonisierte Wege gehen von Wasserstoff aus einer Elektrolyse aus, der dann mit CO₂ oder CO zu Methanol reagiert. Abhängig vom Ausgangsprodukt muss das CO/Wasserstoff-Verhältnis mit Wasserdampf (Shift Reaktion) eingestellt werden. Der CO₂-Bedarf liegt bei 1,37 t /t Methanol. CO₂ kann aus Kraftwerks-Abgasen oder anderen industriellen Prozessen abgetrennt werden, CO könnte in Synergien mit der Stahlindustrie aus Abgasen des Hochofens kommen, die derzeit aber thermisch verwertet werden. Zukünftige Veränderungen in der Eisen- und Stahlherstellung würden hier aber große Potenziale bieten.

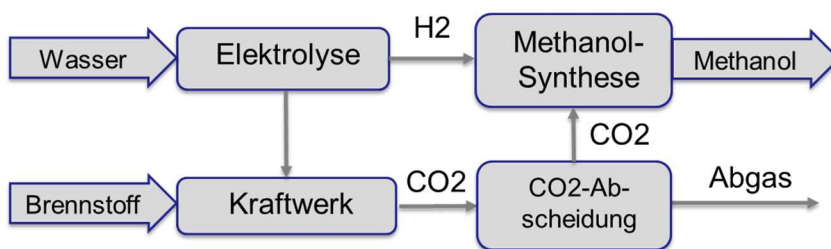


Abbildung 8: Low Carbon Methanol Synthese (DECHEMA 2017)

Der Energiebedarf des Low Carbon Verfahrens ist durch die Herstellung von Wasserstoff über die Elektrolyse bestimmt, dieser beträgt etwa 10 MWh Strom, der für eine Tonne Methanol notwendig ist. Zusätzliche Aufwendungen werden mit etwa 1,5 MWh/t abgeschätzt, wobei auch der fehlende Dampfüberschuss berücksichtigt ist. Der Energieaufwand liegt damit etwa beim dreifachen Wert der fossilen Herstellung. Je nach Herkunft des CO₂ (biogener Ursprung oder aus Kreisläufen) kann dies zu einem CO₂-neutralen Produkt führen.

Olefine aus Methanol

Olefine wie Ethylen oder Propylen stellen die wesentlichen Bausteine für die derzeitige chemische Produktion dar und sind auch wesentliche Grundstoffe für die Kunststoffproduktion. Die Herstellung erfolgt konventionell über Steam-Cracking von Naphtha bei über 750 °C. Der Energiebedarf dafür liegt bei 3,3 bis 4,6 MWh/t Produkte.

Die Dekarbonisierung der Herstellung chemischer Produkte basiert im Wesentlichen auf der Umkehrung der Verbrennungsreaktion. Aus Kohlenstoff oder Kohlenstoffoxiden (CO₂ oder CO) werden mit Wasserstoff Kohlenwasserstoffe aufgebaut. Während CO₂ grundsätzlich verfügbar ist, wobei allerdings die Konzentration und die Mengen der jeweiligen Quellen (Rauchgase, Deponiegas, Biogas, etc.) wesentlich sind, ist die Bereitstellung von Wasserstoff der energetisch bedeutende Schritt.

Die möglichen Verfahren zur Herstellung von Olefinen direkt aus Wasserstoff und CO₂ sind noch nicht in technischem Maßstab ausgeführt. Ein kommerziell verfügbarer Prozess geht von Methanol aus Wasserstoff aus, das danach zu Olefinen umgesetzt wird (MTO, Methanol to Olefins).

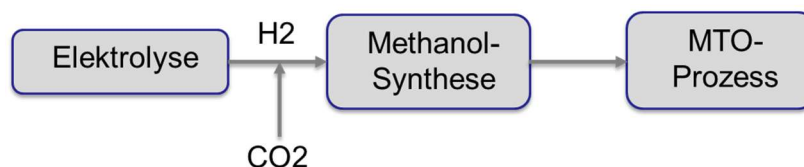


Abbildung 9: Olefine aus Methanol

Anlagen aus Fernost weisen für die Herstellung aus Methanol einen Energiebedarf von 1,4 MWh/t Olefin auf. Berücksichtigt man auch den Aufwand für das Methanol führt dies zu einem Energieaufwand von insgesamt 28 MWh/t, was fast den fünffachen Wert der konventionellen Route darstellt.

3.1.2 Annahmen

In Abbildung 10 ist der schematische Überblick für ein forciertes Recycling mit alternativer Bereitstellung über die Wasserstoffroute dargestellt.

Im Unterschied zur Steigerung des Energieeinsatzes hängt die THG-Emission der Low-Carbon Route von der Herkunft des CO₂ ab. Durch die Verwendung des CO₂ für das Methanol wird die Emission vorerst vermieden. Eine endgültige Senke liegt aber nur vor, wenn das Produkt am Ende des Lebenswegs nicht verbrannt wird, was selten der Fall ist. Erfolgt eine Verbrennung am Ende der Nutzungsphase liegt Klimarelevanz dann vor, wenn das CO₂ aus einer fossilen oder mineralischen Quelle stammt. Bei biogener Herkunft oder Nutzung des CO₂ aus einer thermischen Verwertung in einem geschlossenen Kreislauf wäre Klimaneutralität gegeben.

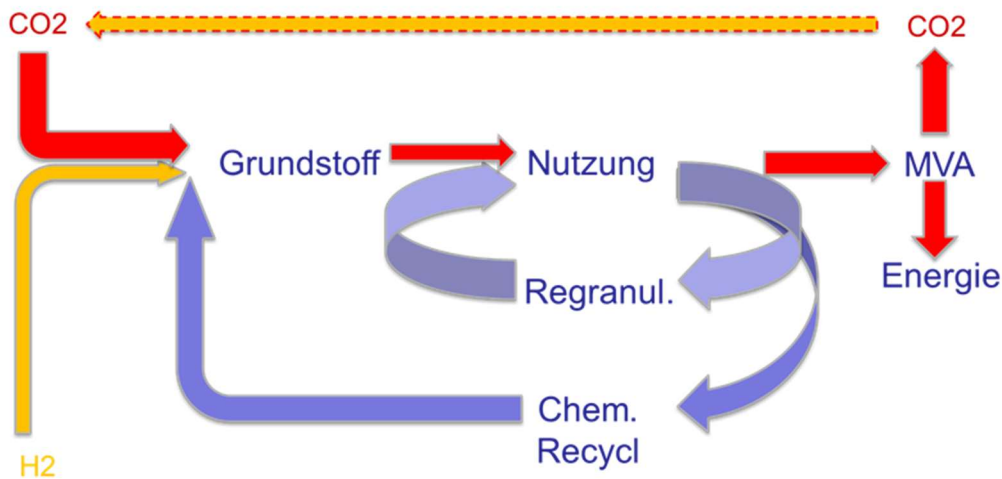


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Wasserstoff und CO₂

Bei der Wasserstoffroute werden zwei Pfade vergleichend dargestellt und die THG-Emissionen mit drei Energiesystem-Szenarien (konventionelles Energiemix von Österreich, erneuerbares Energiesystem und Klimaneutralität, siehe auch Kap 1.3) gerechnet:

- Forc.Recy+fossil (Forciertes Recycling mit ergänzender fossiler Bereitstellung):

Dieser Pfad setzt auf optimistische Recyclingquoten (siehe „Gesamt-optim“), wobei die nicht rezyklierten Mengen weiterhin über die konventionelle fossile Route hergestellt werden.

- H₂-CCU (Forciertes Recycling mit Wasserstoffroute und klimaneutralem CO₂)

Dieser Pfad setzt analog auf optimistisches Recycling (siehe „Gesamt-optim“), allerdings werden die nicht rezyklierten Mengen über die Wasserstoffroute hergestellt. Bei diesem Pfad wird eine Kreislaufführung des CO₂ ohne Klimarelevanz angenommen (Klimaneutralität durch biogenen oder Kreislauf-Kohlenstoff nach CCU-Konzepten).

3.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kombination aus verstärktem Recycling und alternativer Herstellung der nicht rezyklierten Mengen über Wasserstoff und CO₂ werden in den nachfolgenden Abbildungen hinsichtlich des Rohstoff- und des Energiebedarfs sowie der Auswirkungen auf die THG-Emissionen dargestellt. Die Darstellung erfolgt in Relation zur Baseline, welche die derzeitige Situation mit der aktuellen Recyclingquote und dem angenommenen Wachstum der Produktion bis 2040 extrapoliert.

Abbildung 11 zeigt beim Rohstoffbedarf mit nur 1 Mio. Tonnen den Vorteil eines verstärkten Recyclings gegenüber der Baseline mit 2,2 Mio. Tonnen bei den derzeitigen Recyclingquoten. Bei Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über Wasserstoff anstelle der fossilen Route liegt der Rohstoffbedarf bei 2,1 Mio. Tonnen, wobei es sich beim Rohstoff um CO₂ handelt, das aus Abgasen aus Kraftwerken oder Industrieanlagen abgetrennt und eingesetzt werden muss. Derartige Technologien sind wesentliche Bestandteile von CCU-Konzepten (CCU – Carbon Capture an Use), die am Standort Linz im Rahmen der Harnstoffproduktion bereits eingesetzt und für die Herstellung von hochwertigen Kunststoffen, Olefinen und Kraftstoffen in klimaneutraler Form als vielversprechende Perspektive für die Industrie derzeit verfolgt werden.

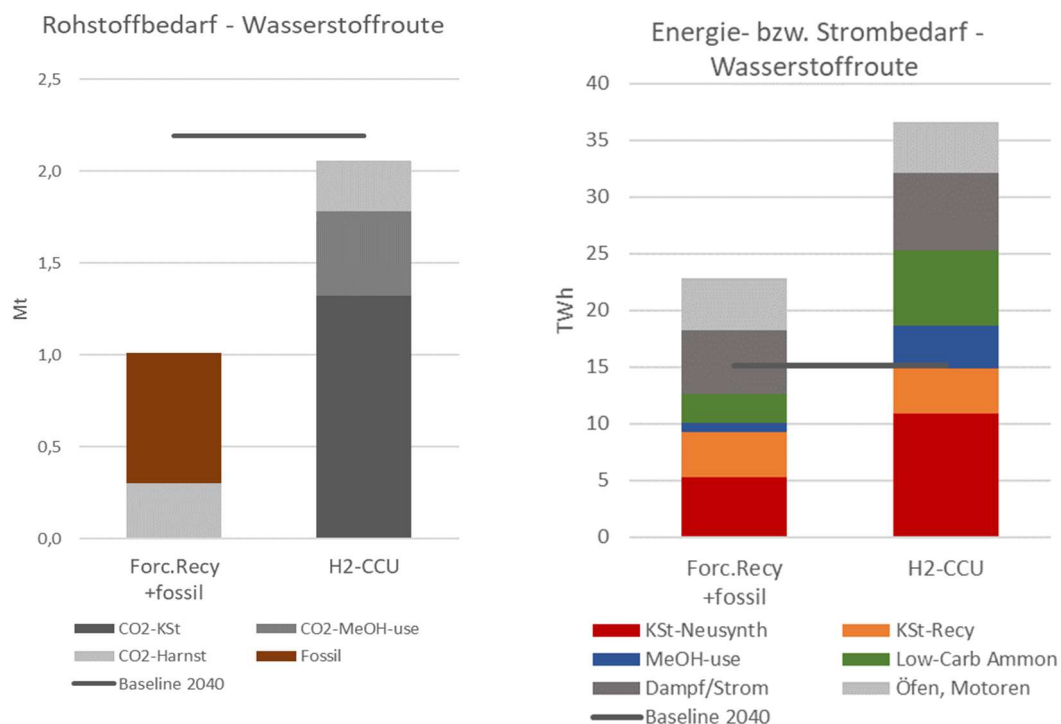


Abbildung 11: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit Wasserstoffroute

Legende:

CO ₂ -Kst	CO ₂ -Bedarf für die Kunststoffherstellung
CO ₂ Harnst	CO ₂ Bedarf für die Harnstoffherstellung
Fossil	Bedarf an fossilem Rohstoff
CO ₂ -MeOH-use	CO ₂ -Bedarf für die Methanolherstellung
Kst-Neusynth	Kunststoffneusynthese
Kst-Recy	Kunststoffrecycling
MeOH-use	Methanol für direkte Anwendung
Low-Carb Ammon	Ammoniakherstellung ohne Methan

Beim Energiebedarf zeigt die rechte Abbildung, dass im Vergleich zur „Baseline“ mit einem Energieeinsatz von 15 TWh der forcierte Recyclingpfad („Forc. Recy+fossil“, mit konventioneller Herstellung der nicht rezyklierten Mengen) durch die lebenszyklusorientierte Betrachtung mit 23 TWh über der Baseline liegt. Die Wasserstoffroute weist demgegenüber einen noch deutlich höheren Energiebedarf von 37 TWh auf. Dies ist auf den sehr energieintensiven Prozess der Wasserstoffherstellung, aber auch auf die höheren Verluste bei der Dampfbereitstellung über Strom zurückzuführen. Bei der Wasserstoffroute muss darüber hinaus der Energiebedarf weitgehend über Strom gedeckt werden.

Die Veränderungen der THG-Emissionen für forciertes Recycling mit Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die konventionelle bzw. die Wasserstoffroute sind in Abbildung 12 dargestellt.

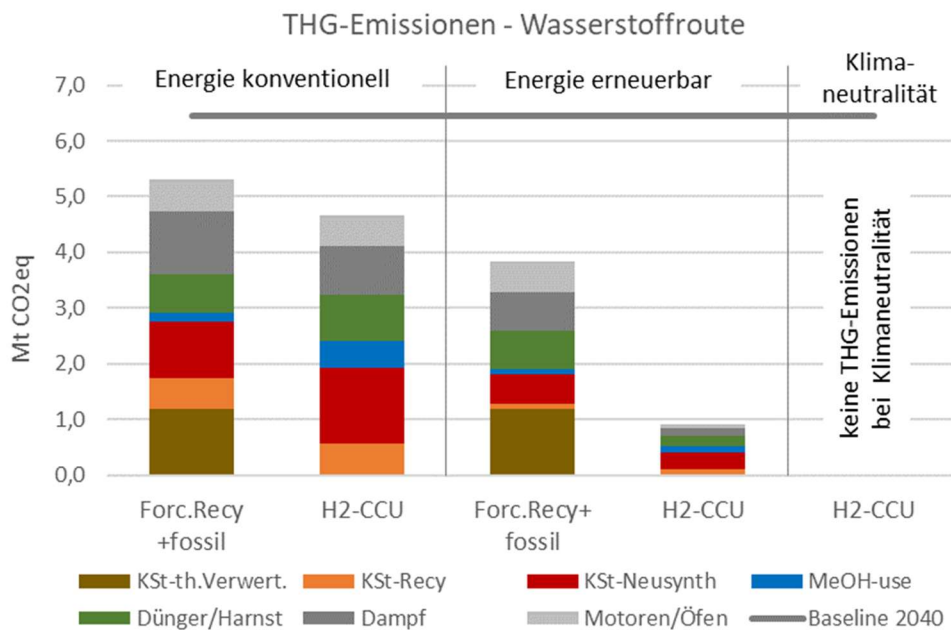


Abbildung 12: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit Wasserstoffroute

Legende:

- | | |
|-----------------|--|
| Dünger/Harnst | Düngemittel/Harnstoff |
| Kst th.Verwert. | Thermische Verwertung von Kunststoffen |
| Kst-Neusynth | Kunststoffneusynthese |
| Kst-Recy | Kunststoffrecycling |
| MeOH-use | Methanol für direkte Anwendung |

Die Emissionen der Baseline (6,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}) enthalten dabei dem Lebenszyklusgedanken entsprechend über die direkten Emissionen der Herstellung hinaus auch jene der thermischen Verwertung, hochgerechnet auf 2040. Im konventionellen Energiesystem würde durch das forcierte Recycling auch bei weiterhin fossiler Bereitstellung („Forc.Recy+fossil“) bereits eine Absenkung auf 5,3 Mio. Tonnen CO_{2eq} erzielt. Nach der Wasserstoffroute mit klimaneutralem CO₂ sinken die THG-Emissionen auf 4,7 Mio. Tonnen CO_{2eq}, da der Wegfall der Emissionen aus der thermischen Verwertung durch den höheren Strombedarf der Neusynthese – auch bei einem nicht vollständig erneuerbarem Energiesystem – und den Anstieg bei der Düngemittelherstellung nicht vollständig aufgewogen wird.

Bei Vergleich der Ergebnisse mit einem erneuerbaren Energiesystem zeigen sich generell deutliche Emissionsminderungen. Die konventionelle fossile Bereitstellung mit forciertem Recycling bringt durch verringerte Bereitstellungsemissionen bereits einen Rückgang auf etwa 3,8 Mio. Tonnen CO_{2eq}, obwohl die Emission der thermischen Verwertung durch den fossilen Kohlenstoff unverändert bleibt. Die größte Emissionsminderung bringt die Wasserstoffroute mit Einsatz von klimaneutralem oder Kreislauf CO₂ („H2-CCU“), mit einer Reduktion der Emission auf 0,9 Mio. Tonnen CO_{2eq} durch Reduktionen in allen Bereichen. Bei Erreichung vollständiger Klimaneutralität bei Energieversorgung und Infrastruktur sinkt die Emission der alternativen Route der Bereitstellung dann letztlich auf Null.

3.2 Recycling mit Vergasungs-Route

3.2.1 Technologiebeschreibung

Als Kohlenstoffquelle kann anstelle von CO₂ auch biogener Kohlenstoff verwendet werden, welcher aus dem Synthesegas in einem Vergasungsprozess erzeugt wird und dann in eine konventionelle Methanolsynthese eingebracht wird. Dafür kann eine Vielzahl von Biomassearten verwendet werden. Die Ausbeute aus forstlicher Biomasse ist dabei bis zu 2-fach höher als jene von Zucker oder Stärkefrüchten, wenn man den gleichen Heizwert als Basis nimmt. Bedingt durch den hohen Wassergehalt von Biomasse ist dabei die Vortrocknung bis zu einem Wassergehalt von 15 % wesentlich. Für die Vergasung mit oder ohne externe Wärmezufuhr kommen Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser oder Flugstromvergaser infrage. Zur Bildung des geeigneten Gasgemisches in der Vergasung ist ein definierter Sauerstoffgehalt günstig, wobei der bei der Elektrolyse von Wasser gebildete Sauerstoff eingesetzt werden kann. Für die Einstellung des Verhältnisses Wasserstoffs zu CO ist eine Wassergas-Shift Reaktion notwendig.

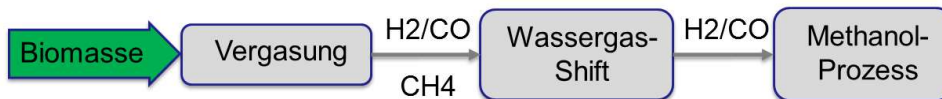


Abbildung 13: Methanol über Biomasse-Vergasung (DECHEMA 2017)

Die Ausbeute an Methanol liegt bei diesem Prozess bei etwa 60 %, es würden etwa 2,6 t trockenes Holz pro Tonne Methanol benötigt. Der Energiebedarf liegt wegen der höheren Aufwendungen in der Vorbehandlung und in der Gasreinigung um etwa 15 % höher als beim Vergleichsprozess mit Erdgas.

3.2.2 Annahmen

In Abbildung 14 ist der schematische Überblick für ein forciertes Recycling mit alternativer Bereitstellung über die Vergasung von Biomasse dargestellt. Aufgrund der biogenen Herkunft und des Kreislaufs des CO₂ wäre in diesem Fall CO₂-Neutralität bei der thermischen Verwertung der ausgeschleusten Mengen gegeben.

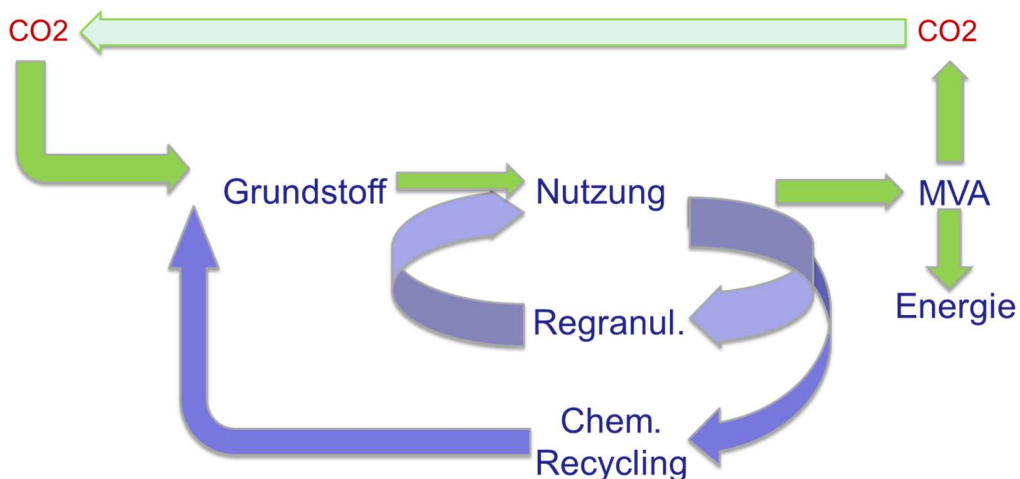


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Vergasung von Biomasse

In diesem Szenario würde Methanol für die Olefine und auch für den direkten Methanoleinsatz über die Vergasung hergestellt. Für die Düngemittelherstellung wird aber ergänzend die Wasserstoffroute angenommen.

Bei der Vergasungsrouten werden drei Pfade vergleichend dargestellt und die THG-Emissionen mit drei Energiesystem-Szenarien (konventionelles Energiemix von Österreich, erneuerbares Energiesystem und Klimaneutralität, siehe auch Kap 1.3) gerechnet:

- Forc.Recy+fossil (Forciertes Recycling mit ergänzender fossiler Bereitstellung):

Dieser Pfad basiert auf forcierten Recyclingquoten (siehe Kapitel „Verstärktes Recycling“ Szenario „Gesamt-optim“), wobei die nicht rezyklierten Mengen weiterhin über die konventionelle fossile Route hergestellt werden.

- Vergas-agro (Vergasung von landwirtschaftlicher Biomasse):

Dieser Pfad kombiniert forcierte Recyclingquoten (wie oben) mit der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Vergasung von landwirtschaftlicher Biomasse.

- Vergas-ligno (Vergasung von forstlicher Biomasse):

Dieser Pfad kombiniert forcierte Recyclingquoten (wie oben) mit der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Vergasung von lignozelluloseischer Biomasse.

3.2.3 Ergebnisse

Nachfolgende Abbildung zeigt den Rohstoff- und Energiebedarf der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Vergasung von Biomasse, getrennt nach agrarischen („Vergas-agro“) und forstlichen Rohstoffen („Vergas-ligno“). Gegenüber der Baseline und dem forcierten Recycling ist ein erheblicher Mehrbedarf an Rohstoffen gegenüber der Baseline (2,2 Mio. Tonnen) zu erkennen, bei dem aber vor allem der Wassergehalt der verwendeten Materialien zu berücksichtigen ist. Bei landwirtschaftlichen Rohstoffen entstände ein Bedarf von bis zu 6,8 Mio. Tonnen. Die Deckung aus forstlicher Biomasse würde einen Rohstoffaufwand von bis zu 5,3 Mio. Tonnen erfordern, dies entspricht etwa einem Drittel des gesamten Holzeinschlags in Österreich, bzw. in etwa dem 1,5-fachen des Frisch-Holzeinsatzes der Papierindustrie. Ein Mix aus agrarischer und forstlicher Bereitstellung könnte die Rohstoffsituation allerdings etwas entspannen. Eine maßvolle Nachfrage nach minderen Holzqualitäten könnte sich positiv auf die Preisentwicklung am Holzmarkt auswirken, andererseits brächte die verstärkte Nachfrage nach agrarischen Produkten eine Stimulierung der landwirtschaftlichen Produktion, wobei die ethischen Aspekte der Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu berücksichtigen sind.

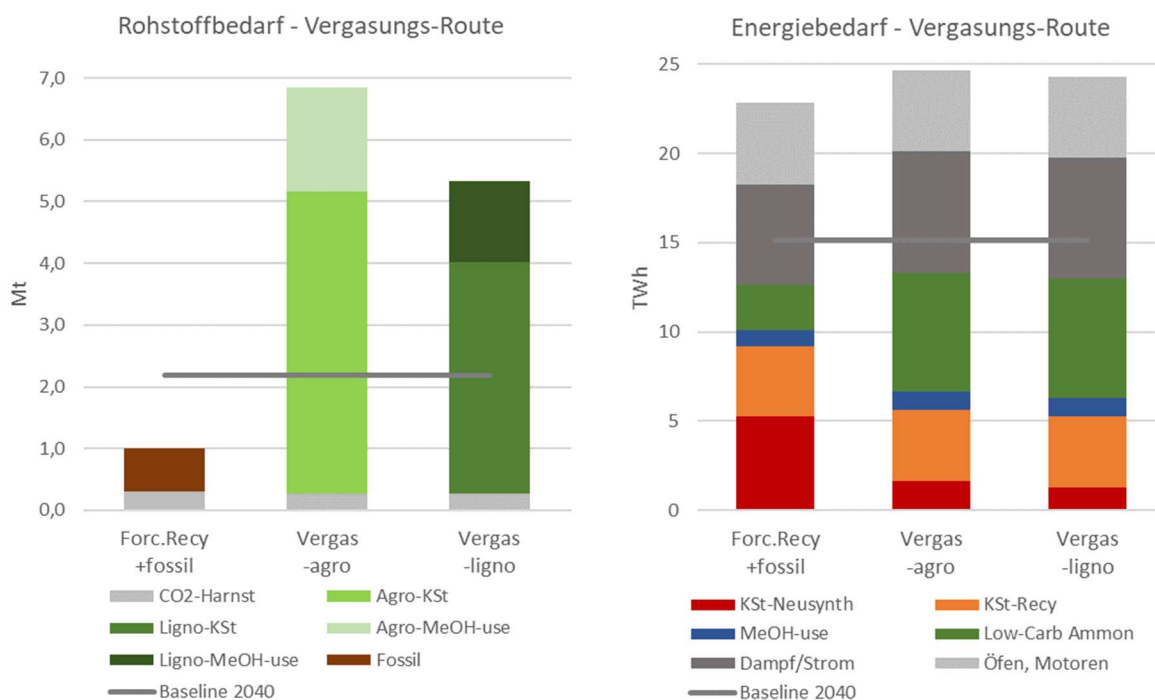


Abbildung 15: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit der Vergasungs-Route

Legende:

- | | |
|----------------|---|
| Fossil | Bedarf an fossilem Rohstoff |
| CO2-Kst | CO2-Bedarf für die Kunststoffherstellung |
| CO2 Harnst | CO2 Bedarf für die Harnstoffherstellung |
| Ligno Kst | Bedarf an Lignozellulose für die Kunststoffherstellung |
| Ligno-MeOH-use | Bedarf an Lignozellulose für die Methanolherstellung |
| CO2-MeOH-use | Bedarf an CO2 für die Methanolherstellung |
| Agro Kst | Bedarf an landwirtschaftlichen Rohstoffen für die Kunststoffherstellung |
| Agro MeOH-use | Bedarf an landwirtschaftlichen Rohstoffen für die Methanolherstellung |
| Kst-Neusynth | Kunststoffneusynthese |
| Kst-Recy | Kunststoffrecycling |
| MeOH-use | Methanol für direkte Anwendung |
| Low-Carb Ammon | Ammoniakherstellung ohne Methan |

Beim Energiebedarf zeigen sich die Vorteile der Biomassevergasung. Der Energiebedarf für die Neusynthese geht deutlich zurück und stellt vorwiegend thermischen Energiebedarf dar, von dem die Biomasse einen wesentlichen Teil mitbringt. Ein etwaiger Energieüberschuss kann auch für Auskopplung von Dampf und Strom genutzt werden, was hier nicht quantifiziert wurde. Insgesamt wird der höhere Strombedarf für die Düngemittelherstellung durch die Verringerung bei der Neusynthese nahezu ausgeglichen. Damit ergibt sich ein relativ ausgeglichenes Verhältnis zwischen den drei betrachteten Pfaden (um 24 TWh), die durch den Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung über dem hochgerechneten aktuellen Energieeinsatz (15,1 TWh) liegen.

Abbildung 16 stellt nun die Veränderungen bei den THG-Emissionen durch die Vergasung von Biomasse dar. Bereits im konventionellen Energiesystem zeigen sich mit 3,2 bzw. 3,1 Mio. Tonnen CO_{2eq} bei beiden Vergasungsvarianten („Vergas-agro“ und „Vergas-ligno“) deutlich niedrigere Emissionen gegenüber der „Baseline“ (6,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}) und dem forcierten Recycling mit konventioneller Bereitstellung („Forc.Recy+fossil“, 5,3 Mio. Tonnen CO_{2eq}). Maßgeblich dafür ist vor allem der Wegfall der Emissionen aus der thermischen Verwertung durch die CO₂-Neutralität des Rohstoffs, die durch die Steigerung bei der Düngemittelbereitstellung nicht aufgewogen wird. Die Verringerung der Emissionsintensität des Energiesystems leistet bei Dampf und Strom weitere positive Beiträge.

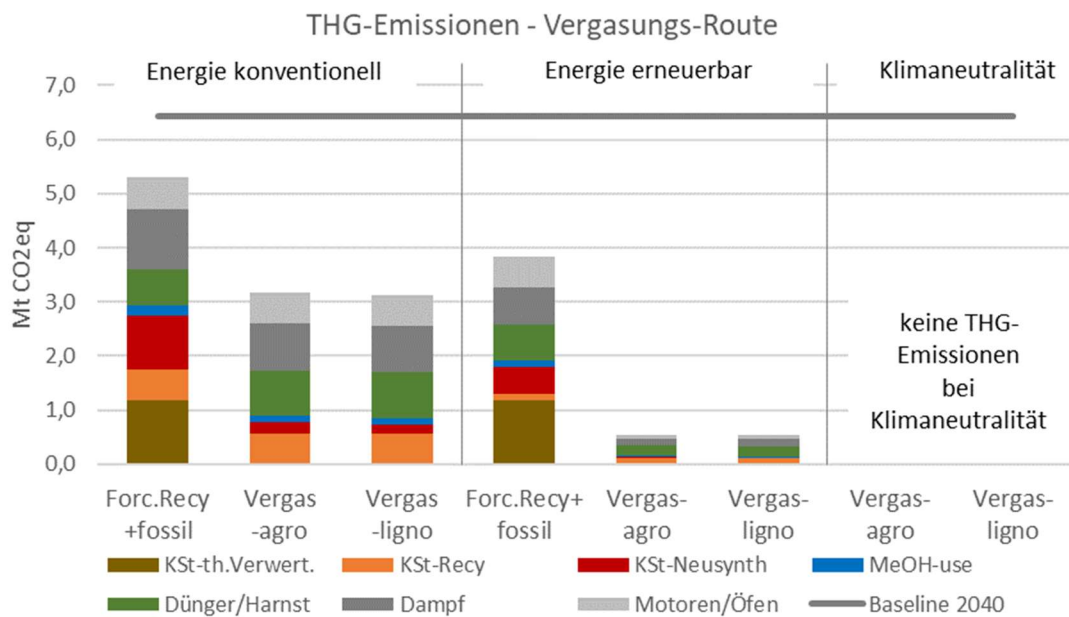


Abbildung 16: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit der Vergasungs-Route

Legende:

Fossil	Bedarf an fossilem Rohstoff
Kst-Neusynth	Kunststoffneusynthese
Kst-Recy	Kunststoffrecycling
Kst th.Verwert.	Thermische Verwertung von Kunststoffen
MeOH-use	Methanol für direkte Anwendung
Dünger/Harnst	Düngemittel/Harnstoff

Die THG-Einsparungen der Vergasung werden in einem erneuerbaren Energiesystem noch ausgeprägter. Recycling mit Bereitstellung nach der konventionellen Route bringt dann bereits einen Rückgang auf 3,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} durch die Einsparungen bei Neusynthese und Recycling, obwohl die Emission aus der thermischen Verwertung durch den fossilen Kohlenstoff unverändert bleibt. Die beiden Vergasungs-Pfade („Vergas-agro“ und „Vergas-ligno“) liegen durch den geringeren Stromaufwand und aufgrund der CO₂-Neutralität des Rohstoffs bei nur 0,5 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Bei Erreichung der Klimaneutralität bei Energieversorgung und Produktherstellung sinken die Emissionen der alternativen Routen der Bereitstellung dann letztlich auf Null.

3.3 Recycling mit Ethanolroute

3.3.1 Technologiebeschreibung

Im Rahmen einer Dekarbonisierung kommt Ethanol sowie auch Methanol für den Biodiesel vor allem als Treibstoffersatz oder Treibstoffbeimischung Bedeutung zu. Speziell bei Ethanol ist aber auch die Gewinnung von biobasiertem Ethylen durch katalytische Dehydrierung möglich. Auf diesem Weg wird bereits in Brasilien von der BRASKEM ausgehend von Ethanol aus Rohrzucker Bio-Polyethylen als drop-in Chemikalie für eine Bioökonomie hergestellt. Der Energiebedarf liegt dabei bei der Herstellung aus Zucker bei 25 GJ/t Ethanol unter Berücksichtigung der Gutschrift für die Nebenprodukte. Die Herstellung aus holzartiger Biomasse führt etwa zum doppelten Wert. Insgesamt ergibt sich damit ein Energiebedarf von 41 GJ/t Olefin, bei Holz analog etwa der doppelte Wert.

Durch den Rückgang des Zuckerkonsums bestünden freie Produktionskapazitäten, wobei allerdings die Verfügbarkeit von Flächen und der landwirtschaftlichen Strukturen zu klären wäre. In Österreich wird bereits seit 2008 Bioethanol überwiegend aus Getreide erzeugt. Mit der Produktion von derzeit etwa 200 000 t Ethanol könnte etwa ein Viertel der benötigten Menge an Ethylen für die Neusynthesen erzeugt werden. Derzeit werden aber etwa 40 % dieser Menge dem Treibstoff beigemischt, der Rest wird exportiert. Bei Ausweitung der Ethanol-Beimischung zum Benzin auf 10 % (E10) würde dann die gesamte aktuelle Ethanol-Produktion benötigt. Die Verwendung der produzierten Ethanolmenge hängt damit wesentlich von politischen Entscheidungen über die zukünftige Treibstoff-Beimischung ab.

Angesichts kritischer Sichtweisen zur Nahrungsmittelkonkurrenz, der Verwendung von Ackerland für Chemieprodukte oder Treibstoffe, wäre auch der Einsatz von forstlicher Biomasse möglich. Diese Technologie ist aber aufwändiger und keinesfalls so eingeführt wie die Vergärung landwirtschaftlicher Rohstoffe. In diesem Fall steigt die Einsatzmenge auf 10 t Biomasse pro Tonne Ethylen an. Hinsichtlich der THG-Emission ergäben sich durch die CO₂-Neutralität klare Vorteile bei einer thermischen Verwertung der Produkte nach der Nutzung.

3.3.2 Annahmen

In Abbildung 17 ist der schematische Überblick für ein forciertes Recycling mit alternativer Bereitstellung über Ethanol aus Biomasse dargestellt. Aufgrund der biogenen Herkunft und des Kreislaufs des CO₂ wäre auch in diesem Fall CO₂-Neutralität auch bei der thermischen Verwertung der ausgeschleusten Mengen gegeben.

In diesem Szenario könnten Olefine durch Dehydrierung des Ethanols hergestellt werden. Für die Herstellung der Düngemittel und des Methanols für den direkten Einsatz wird ergänzend die Wasserstoffroute angenommen.

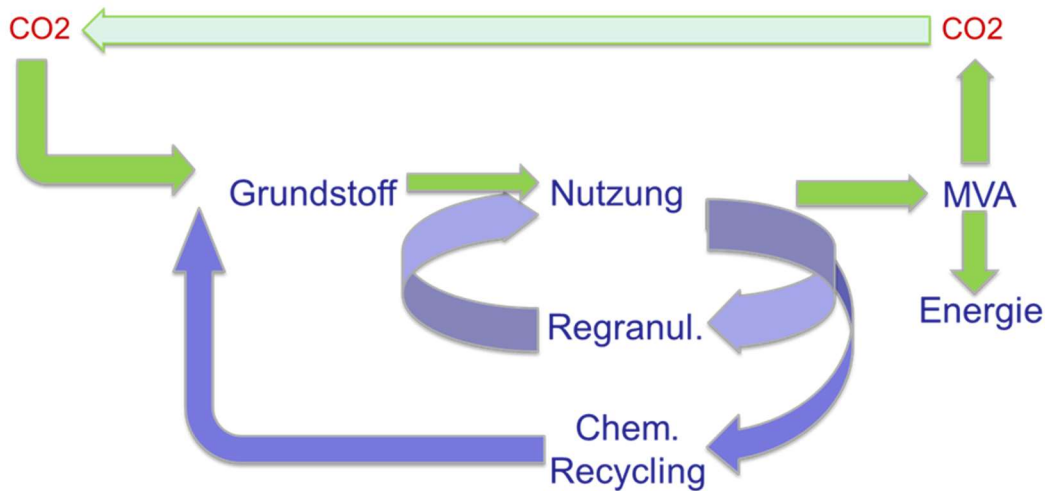


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines forcierten Recyclings und Herstellung über Ethanol aus Biomasse

Bei der Ethanolroute werden drei Pfade vergleichend dargestellt und die THG-Emissionen bei drei Energiesystem-Szenarien (konventionelles Energiemix von Österreich, erneuerbares Energiesystem und Klimaneutralität, siehe auch Kap 1.3) verglichen:

- Forc.Recy+fossil (Forciertes Recycling mit ergänzender fossiler Bereitstellung):

Dieser Pfad basiert auf forcierten Recyclingquoten (siehe Kapitel „Verstärktes Recycling“ Szenario „Gesamt-optim“), wobei die nicht rezyklierten Mengen weiterhin über die konventionelle fossile Route hergestellt werden.

- EtOH-agro (Grundkörper aus Ethanol aus landwirtschaftlicher Biomasse):

Dieser Pfad kombiniert forcierte Recyclingquoten (wie oben) mit der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Herstellung von Olefinen durch Dehydrierung von Ethanol aus landwirtschaftlicher Biomasse.

- EtOH-ligno (Grundkörper aus Ethanol aus forstlicher Biomasse):

Dieser Pfad kombiniert forcierte Recyclingquoten (wie oben) mit der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Herstellung von Olefinen durch Dehydrierung von Ethanol aus forstlicher Biomasse.

3.3.3 Ergebnisse

Nachfolgende Abbildung zeigt den Rohstoff- und Energiebedarf der Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen über die Herstellung von Ethanol aus Biomasse, getrennt nach agrarischen („EtOH-agro“) und forstlichen Rohstoffen („EtOH-ligno“). Hier zeigt sich gegenüber der „Baseline“ (2,2 Mio. Tonnen) ein deutlich erhöhter Bedarf an biogenen Rohstoffen, der einerseits stark von der Art der agrarischen Rohstoffe (stärke- oder

zuckerhaltig) und bei den forstlichen Rohstoffen wieder vom Wassergehalt beeinflusst wird. Bei einer Aufteilung von drei Viertel Getreide und einem Viertel Zuckerrübe ergibt sich insgesamt ein Bedarf von etwa 4,3 Mio. Tonnen. Bei der Ethanolherstellung aus lignozellulosischen Rohstoffen („EtOH-ligno“) liegt der Bedarf bei 4,8 Mio. Tonnen forstlicher Biomasse.

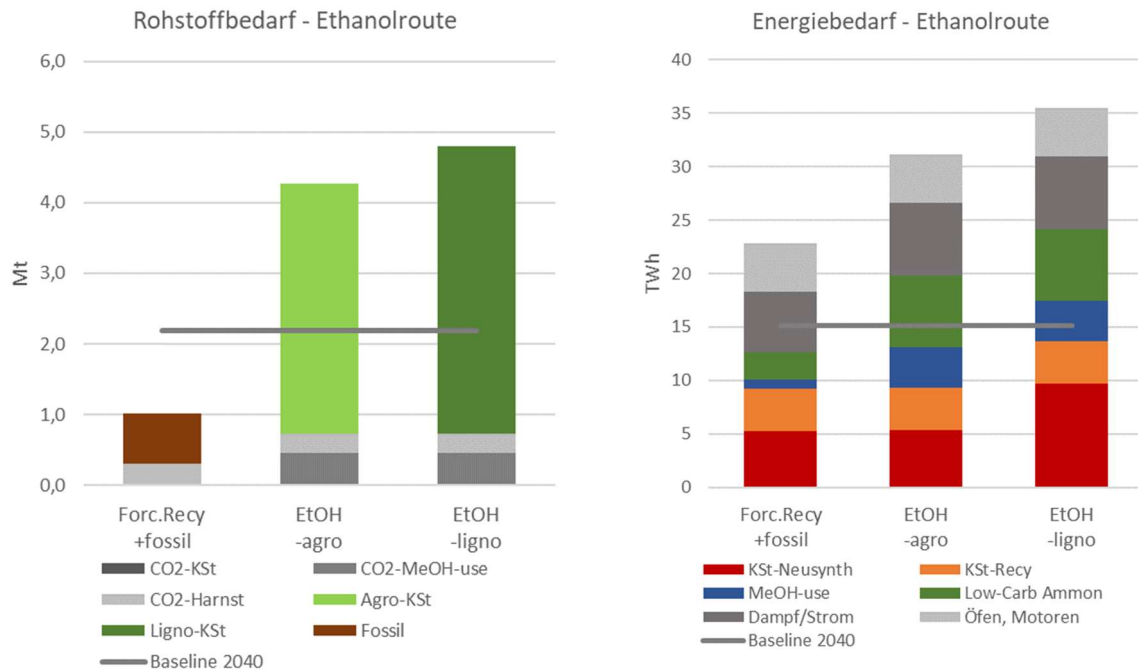


Abbildung 18: Rohstoff- und Energiebedarf in den Recyclingpfaden mit Ethanol-Route

Legende:

<i>Fossil</i>	<i>Bedarf an fossilem Rohstoff</i>
<i>CO2-Kst</i>	<i>CO2-Bedarf für die Kunststoffherstellung</i>
<i>CO2 Harnst</i>	<i>CO2 Bedarf für die Harnstoffherstellung</i>
<i>CO2-MeOH-use</i>	<i>Bedarf an CO2 für die Methanolherstellung</i>
<i>Ligno Kst</i>	<i>Bedarf an Lignozellulose für die Kunststoffherstellung</i>
<i>Agro Kst</i>	<i>Bedarf an landwirtschaftlichen Rohstoffen für die Kunststoffherstellung</i>
<i>Kst-Neusynth</i>	<i>Kunststoffneusynthese</i>
<i>Kst-Recy</i>	<i>Kunststoffrecycling</i>
<i>MeOH-use</i>	<i>Methanol für direkte Anwendung</i>
<i>Low-Carb Ammon</i>	<i>Ammoniakherstellung ohne Methan</i>

Der Energiebedarf für die Herstellung der Olefine liegt bei agrarischer Biomasse („EtOH-agro“) sehr ähnlich wie beim forcierten Recycling („Forc.Recy+fossil“). Durch den zusätzlichen Stromaufwand für die Bereitstellung der restlichen Produkte über die Wasserstoffroute ergibt sich insgesamt mit 31 TWh etwa der doppelte Wert der Baseline, der aber noch klar unter jenem der alleinigen Wasserstoffroute liegt. Bei lignozellulosischen Rohstoffen stellt nicht nur die Technologie mehr Herausforderung dar, es liegt auch der Energiebedarf mit knapp über 35 TWh bereits im Bereich der Wasserstoffroute. In beiden Ethanol-Pfaden liegt somit der Bedarf an Rohstoffen und Energie sowohl über dem Recyclingpfad mit konventioneller Bereitstellung als auch über dem Baseline-Wert.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Veränderungen der THG-Emission durch die Herstellung der nicht rezyklierten Mengen über Bioethanol. Beide Varianten weisen im konventionellen Energiesystem mit 4,0 bzw. 4,5 Mio. Tonnen CO_{2eq} niedrigere THG-Emissionen als das Recycling mit konventioneller Herstellung auf (5,3 Mio. Tonnen CO_{2eq}) und liegen auch klar unterhalb der Baseline (6,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}). Auch hier ist der Wegfall der Emissionen aus der thermischen Verwertung durch die Klimaneutralität wesentlich, der durch die zusätzlichen Belastungen aus den anderen Prozessen nicht aufgewogen wird. Der höhere Wert der forstlichen Biomasse („EtOH-ligno“) ist durch den höheren Aufwand der Bio-Ethanol Herstellung für die Kunststoffsynthese bedingt.

Unter Annahme eines erneuerbaren Energiesystems würden die THG-Emissionen im Recycling-Pfad („Forc.Recy+fossil“) auf 3,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} sinken. Bei den Bio-Ethanol Pfaden wäre diese Verringerung noch deutlicher und führt zu 0,7 Mio. Tonnen CO_{2eq} („EtOH-agro“) bzw. 0,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} („EtOH-ligno“), was massive THG-Einsparung darstellt. Bei Erreichung der Klimaneutralität bei Energieversorgung und Produktherstellung sinken die Emissionen der alternativen Routen der Bereitstellung dann letztlich auf Null.

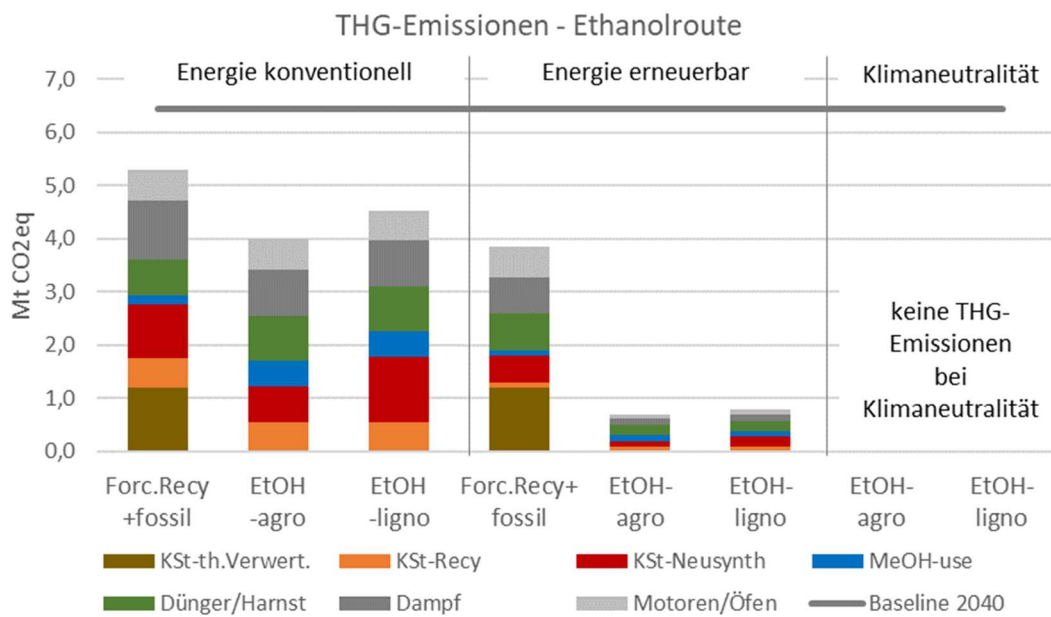


Abbildung 19: Entwicklung der THG-Emissionen in den Recyclingpfaden mit Ethanol-Route

Legende:

- | | |
|-----------------|--|
| Kst-Neusynth | Kunststoffneusynthese |
| Kst-Recy | Kunststoffrecycling |
| Kst th.Verwert. | Thermische Verwertung von Kunststoffen |
| MeOH-use | Methanol für direkte Anwendung |
| Dünger/Harnst | Düngemittel/Harnstoff |

3.4 Zusammenfassung und Vergleich der Dekarbonisierungsvarianten

Das Ziel dieser Arbeit war die Analyse von unterschiedlichen Möglichkeiten für eine möglichst vollständige Reduktion der THG-Emissionen hinter der Produktion chemischer Produkte in Österreich. Im ersten Teil der Arbeit („Verstärktes Recycling von chemischen Produkten“) hat sich gezeigt, dass verstärktes stoffliches Recycling durch Kombination von mechanischen und chemischen Verfahren zu deutlichen Reduktionen bei den THG-Emissionen führt. Ein vollständiges Recycling wäre nur bei Reinsortimenten vorstellbar, ist jedoch aufgrund der derzeitigen Abfallsysteme und auch der abnehmenden Qualität beim Einsatz von ausschließlich Sekundärmaterial aus derzeitiger Sicht nicht absehbar. Selbst für forcierte Recyclingquoten wären die Schaffung sowohl der logistischen Erfordernisse der Sammlung mit den zugrunde liegenden rechtlichen Rahmenbedingungen, als auch die technische Infrastruktur für die Behandlung zu klären.

Neben dem Recycling sind aber auch neue Technologien verfügbar, die für die chemische Produktion angewendet werden könnten, speziell um die fossilen Rohstoffe zu ersetzen. Diese Wege wurden im Rahmen einer Dekarbonisierungsstudie für die chemische Industrie in Österreich (Windesperger 2018) bereits betrachtet. Die Ergebnisse zeigten, dass eine vollständige Rohstoffsubstitution durch alternative Technologien zwar zu deutlichen THG-Einsparungen führen, jedoch der Rohstoff- und Energiebedarf sehr hoch ansteigen würde.

Im zweiten Teil dieser Arbeit („Forciertes Recycling kombiniert mit alternativen Bereitstellungstechnologien“) wurde der forcierte Recyclingpfad für etwa zwei Drittel der Kunststoffmengen inklusive Lösemittel und Gummi mit alternativen dekarbonisierten Bereitstellungstechnologien für die Herstellung der nicht rezyklierten Mengen kombiniert. Diese betreffen vor allem Möglichkeiten zur Substitution von fossilen Primärressourcen für die Bereitstellung der nicht rezyklierbaren Mengen. Dieses Kapitel widmet sich nun dem Vergleich der betrachteten alternativen Bereitstellungsvarianten.

3.4.1 Vergleich der Technologiepfade

Nachfolgend werden die Charakteristika der alternativen Technologiepfade noch einmal hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile zusammenfassend dargestellt:

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Wasserstoffroute

Wasserstoffroute		
Kriterium	Vorteil	Nachteil
	Relativ niedriger CO ₂ -Bedarf	Hoher Strombedarf für die Wasserstoff-Herstellung
	CCU mit geschlossenem Kreislauf möglich	An Standorte mit großem, konzentriertem CO ₂ -Ausstoß gebunden
	Keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion	
CO ₂ -Verfügbarkeit	Standorte mit CO ₂ -Potenzial: etwa Zementwerke oder Kraftwerke mit Emissionen zwischen 100 und 500 kt, Teil der Emission der Voest-Standorte in Linz oder Donawitz, bei Verwendung von CO ₂ aus der thermischen Kunststoffverwertung wäre ein neutraler CO ₂ -Kreislauf möglich, solche Ansätze werden derzeit im Rahmen von CCU Konzepten verfolgt.	
Stromverfügbarkeit	Strompotenzial: zukünftig wären 37 TWh an Strom notwendig, diese müssten aus den erneuerbaren Potenzialen von 30 TWh PV, 20 TWh Wind, 50 TWh Wasser mit abgedeckt werden (AIT 2019). Die überwiegende Ausrichtung auf erneuerbaren Strom ist hier die große Herausforderung.	
Fazit	CO ₂ scheint kaum limitierend, bei erneuerbarem Strom ist die Verfügbarkeit begrenzt – der gesamte Energieeinsatz würde sich von derzeit 36 TWh (14 TWh Einsatz von Energieträgern und 22 TWh nicht energetischer fossiler Rohstoffeinsatz in Produkten) auf 37 TWh nicht wesentlich erhöhen. Allerdings würde der Großteil als erneuerbarer Strom benötigt werden, dafür wären Kapazitäten etwa im Ausmaß von 23 Wasserkraftwerken der Größe Freudenu notwendig.	

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Vergasungsrouten

Vergasungsrouten		
Kriterium	Vorteil	Nachteil
	Niedriger Energiebedarf	Hoher Biomassebedarf, abhängig vom Wassergehalt des Rohstoffs
	CO ₂ -Neutralität	Bei agrarischer Biomasse Flächenkonkurrenz zu Nahrungsmitteln
	Speziell bei forstlichen Rohstoffen kann der Energieinhalt der Biomasse genutzt werden	
Verfügbarkeit forstlicher Biomasse	Die benötigte forstliche Biomasse würde bei alleiniger Bereitstellung etwa 5 Mio. Tonnen ausmachen. Damit läge der Bedarf deutlich über dem Holzeinsatz der Papierindustrie. Mit einem Holzeinsatz in der Höhe des Biomasse-Kraftwerks Simmering (200 kt/a) würde nur ein sehr kleiner Beitrag zur Dekarbonisierung möglich sein.	
Verfügbarkeit agrarischer Biomasse	Bei agrarischer Biomasse würden fast 7 Mio. Tonnen benötigt. Dieser Wert liegt deutlich über der gesamten Getreideproduktion in Österreich und ist damit unrealistisch hoch. Auch hinsichtlich der Nahrungsmittelkonkurrenz wäre die Verwertung agrarischer Reststoffe eine günstige Lösung. Diese Mengen liegen aber ungeachtet ihres Wassergehalts bei etwa 3 Mio. Tonnen (Papierreststoffe und Stroh), die derzeit bereits meist anderwertig genutzt werden.	
Energieverfügbarkeit	Der Energiebedarf der Methanol- und Olefinherstellung ist vergleichsweise gering. Der Bedarf an erneuerbarem Strom ist bei der Biomasse-Vergasung geringer, da ein wesentlicher Teil des Energieinhalts der Biomasse genutzt werden kann.	
Fazit	Die Biomasseverfügbarkeit stellt hier die Limitierung dar, sodass kaum die alleinige Umsetzung dieses Wegs anzunehmen ist.	

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Bio-Ethanolroute

Bio-Ethanolroute		
Kriterium	Vorteil	Nachteil
	Mittlerer Energiebedarf unter den Alternativen	Höherer Energiebedarf gegenüber derzeit
	CO ₂ -Neutralität	Bei agrarischer Biomasse Flächenkonkurrenz zu Nahrungsmitteln
	Erprobte Technologie bei stärke- und zuckerhaltigen Rohstoffen	
	Produktion von Futtermitteln als Koppelprodukte	
Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Rohstoffe	<p>Die Umsetzung von zucker- und stärkehaltigen Pflanzen zu Ethanol ist technisch erprobt. Die Verbindung mit der Rübenzuckerproduktion brächte den Vorteil der Speicherung des Zuckers für einen Ganzjahresbetrieb. Durch den niedrigen Zuckergehalt der Rübe wäre große Rohstoffmengen notwendig, die aber den rückläufigen Zuckerabsatz ausgleichen könnten. Von 2010 bis 2018 fiel die Zuckerproduktion um fast 150.000 Tonnen. Mit den verringerten Mengen der letzten Jahre könnten aber nur etwa 50.000 Tonnen Olefine hergestellt werden.</p> <p>Mit der Produktion von derzeit etwa 200 000 t Ethanol aus Getreide könnte fast ein Viertel der benötigten Menge an Ethylen für die Neusynthese der nicht rezyklierbaren Kunststoffmengen erzeugt werden. Die Verwendung der produzierten Ethanolmenge hängt aber wesentlich von politischen Entscheidungen über die zukünftige Treibstoff-Beimischung ab.</p>	
Verfügbarkeit forstlicher Rohstoffe	<p>Die Biomasseverfügbarkeit zeigt ähnliche Limitierung auf der Rohstoffseite wie die Vergasung. Die Vergärung lignozellulosischer Substrate ist technologisch wesentlich weniger erprobt als jene aus landwirtschaftlichen Rohstoffen.</p>	
Fazit	<p>Die Vergärung landwirtschaftlicher Rohstoffe ist nicht nur eine erprobte Technologie, sie wird auch in Österreich bereits durchgeführt. Mit der aktuellen Ethanol-Produktion wäre die dekarbonisierte Bereitstellung von fast einem Viertel der Grundstoffe für den Kunststoffbereich möglich. Hier liegt aber neben der Teller-Tank Diskussion auch eine Konkurrenz zur Treibstoffbeimischung vor.</p>	

3.4.2 Vergleich der Ergebnisse der Technologiepfade

In den Abbildungen 20 und 21 sind nun die Veränderungen bei Rohstoff- und Energiebedarf durch die jeweiligen Pfade gegenübergestellt. Beim Rohstoffbedarf liegen dabei sehr große Unterschiede vor, die technologiespezifisch sind und stark vom jeweiligen Pfad abhängen. Neben dem Recyclingpfad mit konventioneller Bereitstellung der nicht rezyklierbaren Mengen („Forc.Recy+fossil“) mit nur 1 Mio. Tonnen zeigt der Wasserstoff-Pfad mit insgesamt 2,1 Mio. Tonnen CO₂ die niedrigsten Werte. Dieser liegt damit sehr nahe der Baseline, dem auf 2040 hochgerechneten, vorwiegend fossilen Rohstoffeinsatz für die stoffliche Nutzung. Beim Wasserstoffpfad ist aber die Fixierung des CO₂ an Standorte mit großer Emission gebunden, dort wird auch der Wasserstoff benötigt. Die Biomasse-Varianten liegen hinsichtlich der benötigten Biomasse deutlich höher, wobei die Vergasungs-Varianten mit agrarischen Rohstoffen mit 6,8 Mio. Tonnen („Vergas agro“) bzw. mit lignozellulosischen Rohstoffen („Vergas-ligno“) mit 5,3 Mio. Tonnen die höchsten Werte aufweisen. Bei den Ethanolpfaden liegen die Werte des Rohstoffbedarfs etwas niedriger, sie hängen aber stark von der Art der agrarischen Rohstoffe ab. Bei der gewählten Aufteilung von zucker- zu stärkehaltigen Rohstoffen im Ausmaß von 1:3 werden bei „EtOH-agro“ 4,3, bei lignozellulosischen Rohstoffen („EtOH-ligno“) 4,8 Mio. Tonnen benötigt.

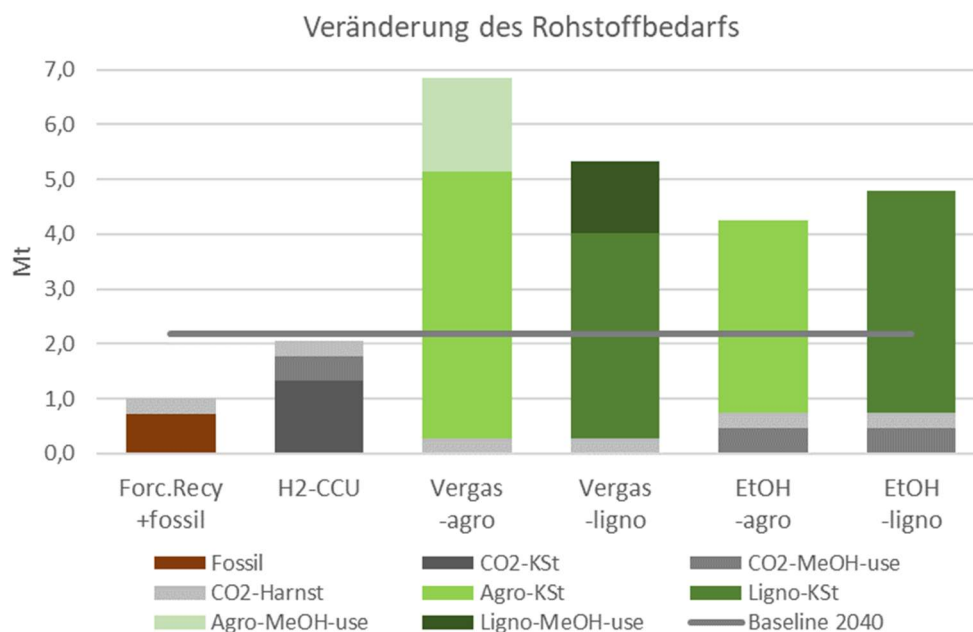


Abbildung 20: Vergleichende Gegenüberstellung des Rohstoffbedarfs in allen betrachteten Pfaden

Legende:

Fossil	Bedarf an fossilem Rohstoff
CO ₂ -Kst	CO ₂ -Bedarf für die Kunststoffherstellung
CO ₂ Harnst	CO ₂ Bedarf für die Harnstoffherstellung
Ligno Kst	Bedarf an Lignozellulose für die Kunststoffherstellung
Ligno-MeOH-use	Bedarf an Lignozellulose für die Methanolherstellung
CO ₂ -MeOH-use	Bedarf an CO ₂ für die Methanolherstellung
Agro Kst	Bedarf an landwirtschaftlichen Rohstoffen für die Kunststoffherstellung
Agro MeOH-use	Bedarf an landwirtschaftlichen Rohstoffen für die Methanolherstellung

Der Energiebedarf zeigt ein gegenläufiges Bild zum Rohstoffbedarf. Die Bereitstellung der chemischen Produkte über die Wasserstoffroute (H₂-CCU) ist mit 37 TWh deutlich energieintensiver als die „Baseline“ mit 15 TWh (2018 13 TWh) und auch der forcierte Recyclingpfad („Forc.Recy+fossil“, 23 TWh). Demgegenüber weisen die rohstoffintensiven Biomasserouten generell einen niedrigeren Energiebedarf auf. Die Vergasungspfade weisen dabei einen mit dem forcierten Recyclingpfad („Forc.Recy+fossil“) vergleichbaren Energieaufwand auf, während die Ethanolrouten um etwa 5 bis 10 TWh höher liegen. Durch die notwendige Synthese der chemischen Grundstoffe, die bei der fossilen Baseline bereits im Rohstoff vorhanden sind, liegen sämtliche Varianten beim Energiebedarf über dem Wert der „Baseline“.

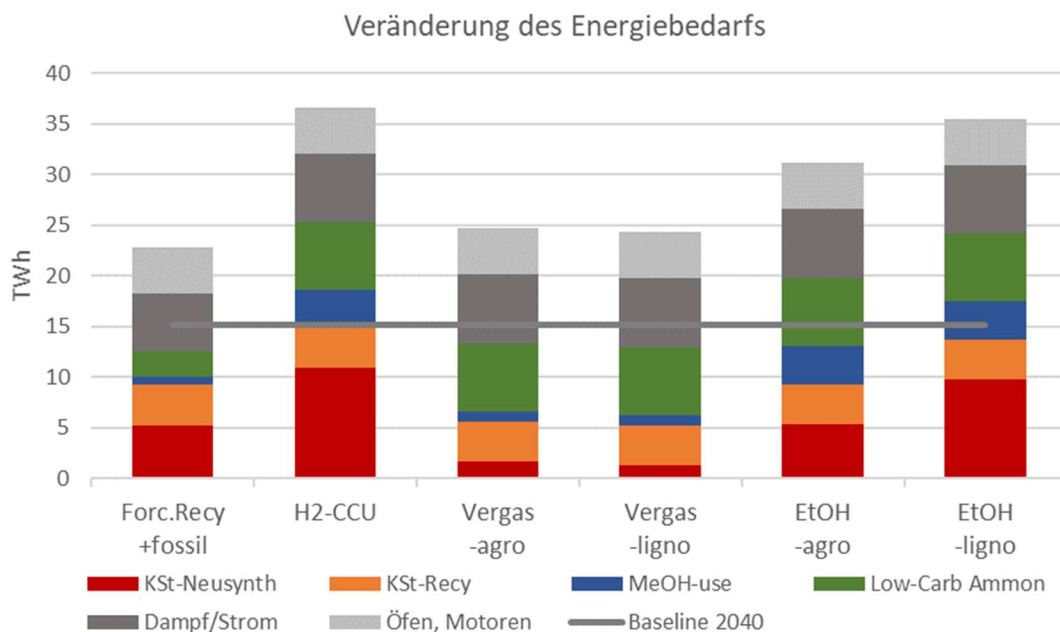


Abbildung 21: Vergleichende Gegenüberstellung des Energiebedarfs in allen betrachteten Pfaden
 Legende:

Kst-Neusynth Kunststoffneusynthese
 Kst-Recy Kunststoffrecycling
 MeOH-use Methanol für direkte Anwendung
 Low-Carb Ammon Ammoniakherstellung ohne Methan

In den Abbildungen 22 und 23 sind nun die THG-Emissionen der einzelnen Pfade gegenübergestellt. Dabei werden in der ersten Abbildung die Emissionen mit einem konventionellen Energiesystem und in der zweiten Abbildung mit einem erneuerbaren Energiemix gerechnet. Damit soll der Einfluss der alternativen Technologien sowie des Recyclings einerseits und andererseits des erneuerbaren Energiesystems dargestellt werden. Bei Erreichung von Klimaneutralität bei Energieversorgung und Produktherstellung sinken die Emissionen der alternativen Routen der Bereitstellung dann letztlich auf Null.

Alle alternativen Pfade weisen auch im konventionellen Energiesystem durchwegs niedrigere THG-Emissionen gegenüber der „Baseline“ (6,4 Mio. Tonnen CO_{2eq}) auf. Bei Bereitstellung der nicht rezyklierbaren Mengen über die Wasserstoffroute („H₂-CCU“) mit biogenem oder im Kreislauf befindlichen CO₂ (z.B. aus der thermischen Verwertung von Kunststoffen) liegen durch den Wegfall der THG-Emissionen aus der Verwertung die THG-Emissionen bei 4,7 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Bei den Biomasserouten sind durch die Klimaneutralität und dem damit verbundenem Wegfall der Emissionen aus der thermischen Verwertung durchwegs niedrigere Werte zu sehen. Die Vergasung von Biomasse („Vergas-agro“ bzw. „Vergas-ligno“) weist mit 3,2 bzw. 3,1 Mio. Tonnen CO_{2eq} durch den niedrigeren Energie- bzw. Strombedarf die geringsten Emissionen auf. Die Ethanolpfade liegen zwischen den beiden anderen alternativen Bereitstellungs-Routen (4,0 bzw. 4,5 Mio. Tonnen CO_{2eq}). Bei allen Verfahren mit CO₂-neutralen Rohstoffen bringt der Wegfall der Emissionen aus der thermischen Verwertung wesentliche Vorteile.

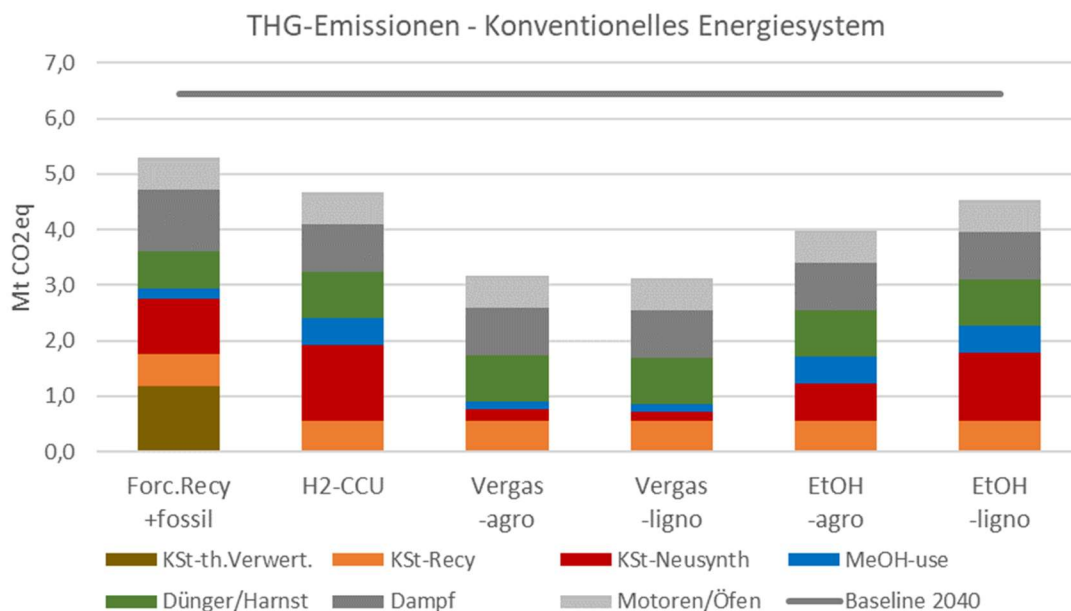


Abbildung 22: Vergleich der THG-Emissionen aller betrachteten Pfade im konventionellen Energiesystem

Legende:

Kst-th.Verwert.

Thermische Verwertung von Kunststoffen

Kst-Neusynth

Kunststoffneusynthese

Kst-Recy

Kunststoffrecycling

MeOH-use

Methanol für direkte Anwendung

Dünger/Harnst

Düngemittel und Harnstoff

Im Vergleich dazu sinken die THG-Emissionen unter der Annahme eines erneuerbaren Energiesystems in allen alternativen Technologiepfaden bei Verwendung eines klimaneutralen Rohstoffes (biogenes oder Kreislauf CO₂ oder Biomasse) auf unter 1 Mio. Tonnen CO₂eq (Abbildung 23). Im Recyclingpfad mit konventioneller Bereitstellung der nicht rezyklierten Mengen („Forc.Recy+fossil“) kommt es ebenfalls zu einer Reduktion, die Emissionen bleiben aber auf einem höheren Niveau (3,8 Mio. Tonnen CO₂eq). Die Biomasserouten zeigen mit 0,5 bis 0,8 Mio. Tonnen CO₂eq die niedrigsten Werte, aber auch die Wasserstoffroute mit klimaneutralem CO₂ (biogenes oder Kreislauf CO₂ im Rahmen von CCU-Konzepten) bleibt im erneuerbaren Energiesystem knapp unter 1 Mio. Tonnen CO₂eq.

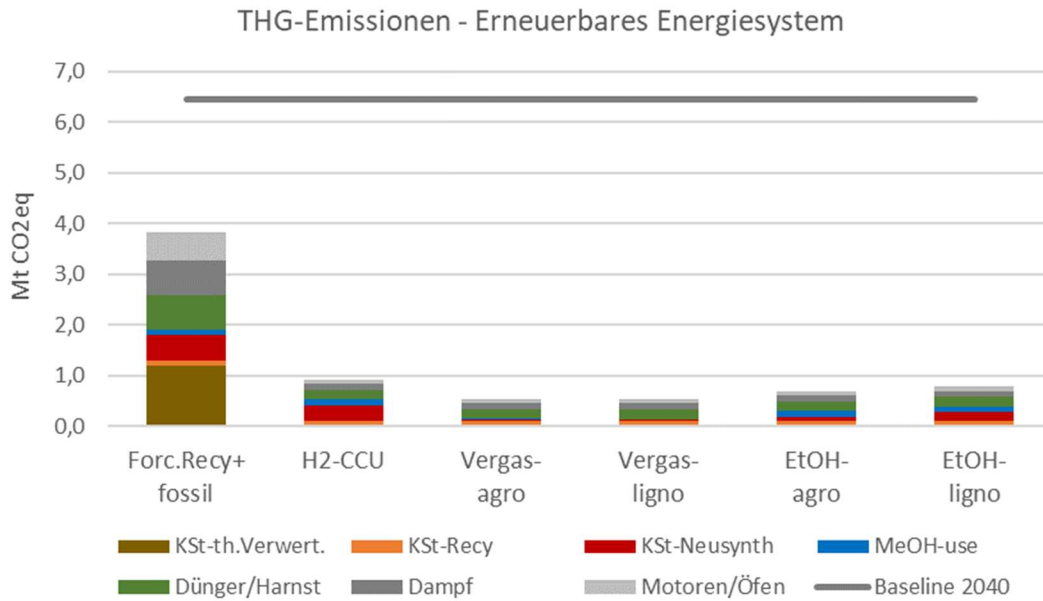


Abbildung 23: Vergleich der THG-Emissionen aller betrachteten Pfade im erneuerbaren Energiesystem

Legende:

<i>Kst-th.Verwert.</i>	<i>Thermische Verwertung von Kunststoffen</i>
<i>Kst-Neusynth</i>	<i>Kunststoffneusynthese</i>
<i>Kst-Recy</i>	<i>Kunststoffrecycling</i>
<i>MeOH-use</i>	<i>Methanol für direkte Anwendung</i>
<i>Dünger/Harnst</i>	<i>Düngemittel und Harnstoff</i>

3.4.3 Schlussfolgerungen

Generell zeigt sich beim Rohstoffbedarf vor allem bei forciertem Recycling ergänzt mit noch fossiler Bereitstellung der chemischen Grundstoffe der niedrigste Wert. Die Wasserstoffroute bringt hier die niedrigsten Werte der alternativen Pfade, sie liegt im Bereich der Baseline. Bei den alternativen Biomasse-Pfaden ergibt sich ein deutlich erhöhter Rohstoffbedarf gegenüber der fossilen Bereitstellung, die aber in Richtung einer Bioökonomie positiv gesehen werden kann.

Beim Energiebedarf wirkt sich der höhere Aufwand der Neusynthese der chemischen Grundstoffe gegenüber dem Einsatz fossiler Rohstoffe negativ aus. Hier liegen alle Varianten über der Baseline. Bei den THG-Emissionen führt der reduzierte Emissionsfaktor auch beim konventionellen Strom-Mix sowohl bei forciertem Recycling als auch bei den anderen alternativen Routen bereits zu verringerten Emissionen gegenüber der Baseline. Ein weitgehend erneuerbares Energiesystem führt letztlich zur Absenkung der THG-Emissionen bei klimaneutralem CO₂ auf unter 1 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Bei vollständiger Klimaneutralität der Energieversorgung und der Produktherstellung würden dann die THG-Emissionen bei allen alternativen Pfaden auf Null sinken.

4 Vorschlag eines Technologie-Mix für die Umsetzung der Dekarbonisierung

4.1 Annahmen

Abschließend wurde versucht, unter Kombination der einzelnen Technologien einen aussichtsreichen Weg zu entwickeln, der als Anhaltspunkt für eine praktische Umsetzung der Dekarbonisierung in Kombination mit forciertem, stofflichem Recycling dienen kann. Unter Berücksichtigung der Potenziale und der Verfügbarkeiten der Rohstoffe wurde folgende Aufteilung als erfolversprechender Mix der einzelnen Technologiepfade angenommen:

- Recycling für 60 % der Kunststoffmenge, das entspricht 25 % der Gesamtmenge der chemischen Produkte
- Wasserstoffroute für die Hälfte der neu herzustellenden Kunststoffe, das sind 20 % der Kunststoffmenge und für den Großteil der anderen Chemieprodukte, insgesamt 60 % der Gesamtmenge der chemischen Produkte
- Vergasung von forstlicher Biomasse für 10 % der Kunststoffmenge und wegen zusätzlicher Bereitstellung von Methanol für 10 % der gesamten chemischen Produktmenge
- Bioethanolroute aus vorzugsweise stärkehaltigen Pflanzen für 10 % der Kunststoffmenge, dies entspricht 5 % der Gesamtmenge der chemischen Produkte.

Tabelle 5: Zusammensetzung des vorgeschlagenen Technologie-Mix für die Dekarbonisierung

Dekarbonisierungs-Routen	Chemieprodukte	davon Kunststoffe, Gummi, Lösemittel
Recycling	25%	60%
H ₂ -Route	60%	20%
Vergasungsrouten	10%	10%
Ethanolroute	5%	10%
Gesamt	100%	100%

Die Ergebnisse dieses Technologie-Mix werden nachfolgend in Abbildungen zusammengefasst. Sie zeigen die Veränderungen der nachfolgenden Szenarien gegenüber der Baseline, der Hochrechnung der IST-Situation auf das Jahr 2040. Für die Berechnung der THG-Emission wird hier bei den einzelnen Varianten von einem erneuerbaren Energiesystem ausgegangen (Reduktion der Emissionsintensität auf 10%, siehe Kap. 1.3). Auf die Auswirkung einer vollständigen Klimaneutralität wird in den Abbildungen hingewiesen.

Forc.Recy+fossil: forciertes Recycling mit weiterhin konventioneller fossiler Bereitstellung der chemischen Produkte.

Decarb-Variante (vorgeschlagenes Technologiemitx): forciertes Recycling mit Bereitstellung der Kunststoffe und der anderen chemischen Produkte mit dem oben beschriebenen Technologie-Mix.

Decarb+Re-use (vorgeschlagener Technologiemix mit Re-use): Zusätzliche Forcierung von Re-Use-Konzepten zur Verringerung der Mengen für Recycling und die Neusynthese von Kunststoffen. Re-Use-Konzepte umfassen Mehrweg-Lösungen sowie die Verlängerung von Nutzungszeiträumen von Produkten. Für diese erste Abschätzung wurde ein Re-use Anteil von etwa 20 % an den rezyklierten und neu bereitzustellenden Kunststoffmengen angenommen.

4.2 Ergebnisse

Die **Veränderung des Energiebedarfs** zeigt gegenüber der Baseline von 15 TWh (2018 13 TWh), die nur den Energieträgereinsatz angibt, durch die lebenszyklusorientierte Betrachtung, einen Anstieg bei der Recycling-Variante auf 23 TWh und bei der Dekarbonisierung auf 32 TWh. Verstärkter Re-use würde hier nur eine geringfügige Absenkung auf knapp unter 30 TWh bringen. Diese Werte liegen deutlich über der Baseline, da diese nur den energetischen Einsatz der vorwiegend fossilen Ressourcen beinhaltet.

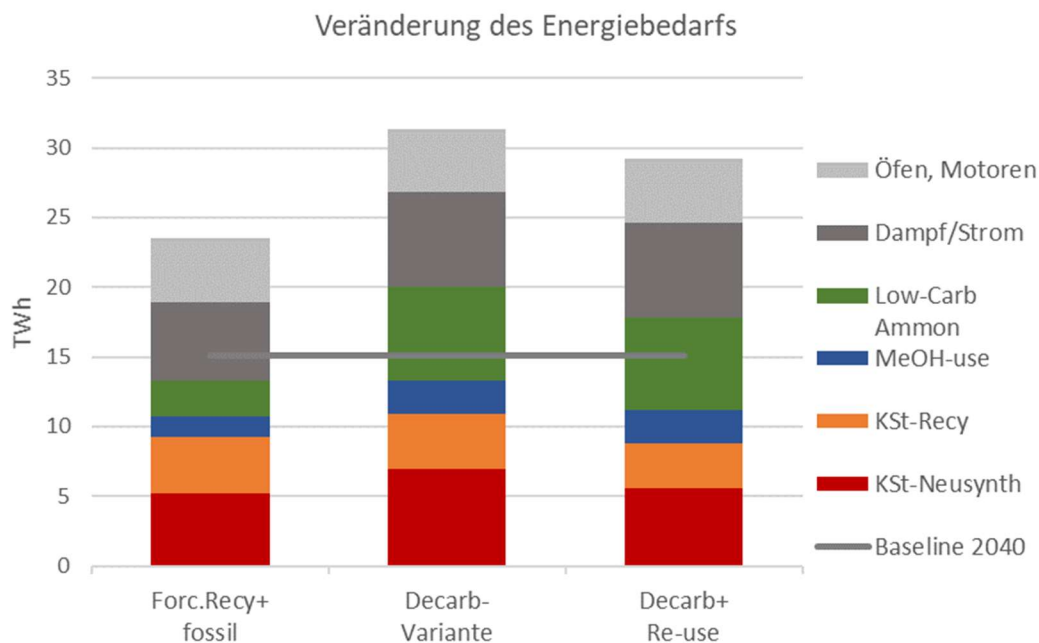


Abbildung 24: Veränderung des Energiebedarfs für den vorgeschlagenen Technologiemix

Legende:

Kst-Neusynth

Kst-Recy

MeOH-use

Low Carb Ammon

Kunststoffneusynthese

Kunststoffrecycling

Methanol für direkte Anwendung

Ammoniakherstellung ohne Methan

Eine deutliche Veränderung ergibt sich beim **Rohstoffbedarf**. Das forcierte Recycling („Forc.Recy+fossil“) allein brächte hier eine Absenkung auf unter den halben Wert der Baseline, da durch die Verringerung der bereitzustellenden Mengen der fossile Rohstoffeinsatz von etwa 2,2 Mio. Tonnen auf etwa 0,7 Mio. Tonnen sinken würde. Allerdings verbliebe weiterhin die Ausrichtung auf den fossilen Rohstoff. Der dabei nur geringe CO₂-Bedarf ergibt sich aus der Harnstoff-Produktion.

Die Dekarbonisierung würde zu einer verstärkten Verwendung von CO₂ als Rohstoff für chemische Produkte (CCU-Anwendungen) führen, was einen positiven Klimaeffekt mit sich bringt, da damit weniger CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Der Umstieg auf die Dekarbonisierungs-Variante („Decarb-Variante“) zeigt beim CO₂-Bedarf einen Wert von 1 Mio. Tonnen, für dessen Bereitstellung allerdings geeignete Standorte gefunden werden müssen. Obwohl der Anteil der Produkte aus den biogenen Rohstoffen über Vergasung und Ethanolroute gering ist, liegt der Rohstoffbedarf mit insgesamt 2,5 Mio. Tonnen, etwa zwei Drittel davon forstliche Biomasse, doch deutlich höher als beim CO₂. Forcierter Re-use („Decarb+Re-use“) würde eine Reduktion auf etwa 2,1 Mio. Tonnen Biomasse realistisch machen. Der Biomasseanteil wirkt sich andererseits positiv auf den Energiebedarf aus, der nun gegenüber der alleinigen Wasserstoffroute auf knapp über 30 TWh (siehe vorige Abbildung 24) gesenkt werden konnte.

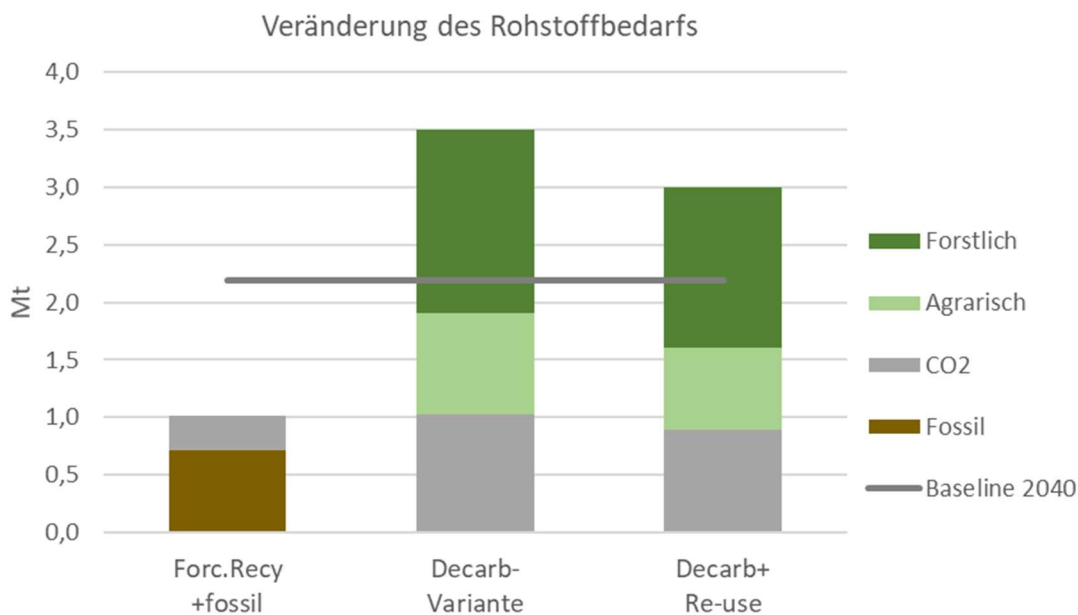


Abbildung 25: Veränderung des Rohstoffbedarfs für den vorgeschlagenen Technologiemix

Deutlich positive Veränderungen gegenüber der Baseline bringt die **THG-Emission** der einzelnen Varianten, die hier mit der aktuellen Situation verglichen werden. Diese zeigt eine aktuellen Gesamtemission („Aktuell 2018“) von 6,2 Mio. Tonnen CO_{2eq}, die etwa zu einem Drittel durch die thermische Verwertung der chemischen Produkte verursacht wird. Die Bereitstellung der Kunststoffe (Neusynthese plus Recycling) ist ebenfalls für fast ein Drittel der Emissionen verantwortlich. Bereits mit forciertem Recycling („Forc.Recy+fossil“) könnte unter der Annahme eines weitgehend erneuerbaren Energiesystems auch bei noch fossiler Ausrichtung des Rohstoffs inklusive der thermischen Verwertung schon eine Reduktion der Emissionen der gesamten Bereitstellungskette auf etwa 3,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} erreicht werden. Die größten Beiträge zur Emissionsreduktion bringen die verringerte Emissionsintensität sowie die verringerten Mengen der Produktherstellung und der thermischen Verwertung.

Mit der vorgeschlagenen Dekarbonisierungsvariante („Decarb-Variante“) würde die Gesamtemission in einem erneuerbaren Energiesystem und CO₂ aus biogenen Quellen oder industriellen Kreisläufen auf 0,8 Mio. Tonnen CO_{2eq} gesenkt werden, wobei der Wegfall der Verwertungsemission den größten Beitrag aufweist. Die Forcierung von Re-use Konzepten („Decarb+Re-use“) bringt hier nur mehr eine geringe weitere Reduktion auf 0,7 Mio. Tonnen CO_{2eq}. Die Umsetzung vollständiger Klimaneutralität inklusive der Energiebereitstellungskette, des Transports und der Herstellung von Infrastruktur würde die THG-Emissionen der Dekarbonisierungsvarianten letztlich auf Null senken.

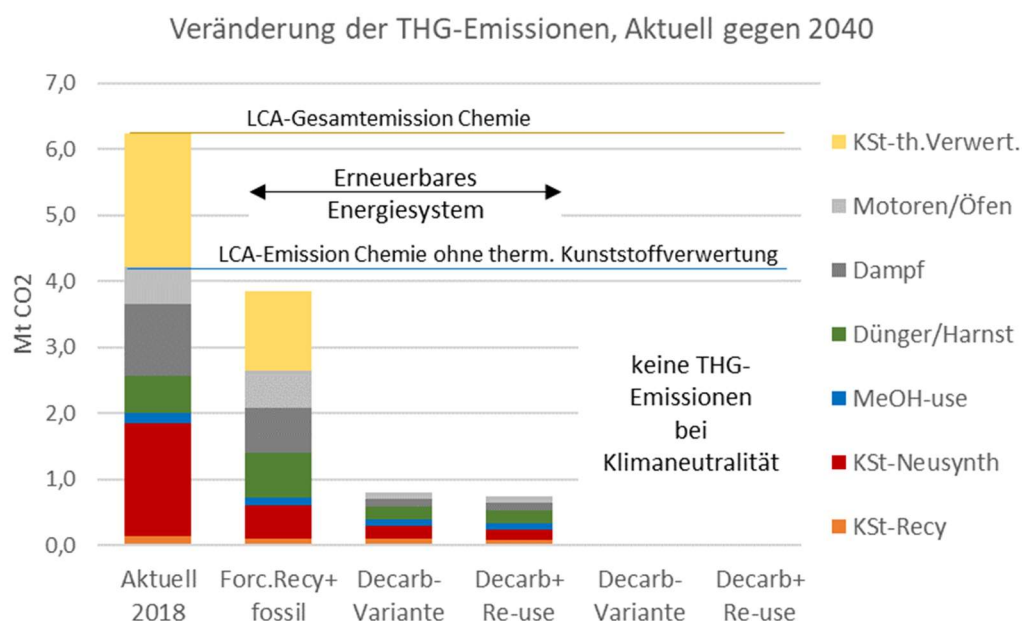


Abbildung 26: Veränderung der THG-Emissionen für den vorgeschlagenen Technologiemix

Legende:

Kst-th.Verwert.

Kst-Neusynth

Kst-Recy

MeOH-use

Dünger/Harnst

Thermische Verwertung von Kunststoffen

Kunststoffneusynthese

Kunststoffrecycling

Methanol für direkte Anwendung

Düngemittel und Harnstoff

Für eine **Abschätzung des Investitionsbedarfs der chemischen Industrie** werden die sich aus den einzelnen Szenarien ergebenden jährlichen Investitionen den Baseline-Investitionen, die aus der *Dekarbonisierungsstudie* übernommen wurden, gegenübergestellt. Der Investitionsbedarf der Wasserstoffroute wurde im Wesentlichen aus der DECHEMA-Studie umgelegt, jener des Recyclings und der Ethanolroute aus bestehenden Anlagen abgeschätzt und jener der Biomasseroute aus Investitionsangaben der wissenschaftlichen Literatur hochgerechnet.

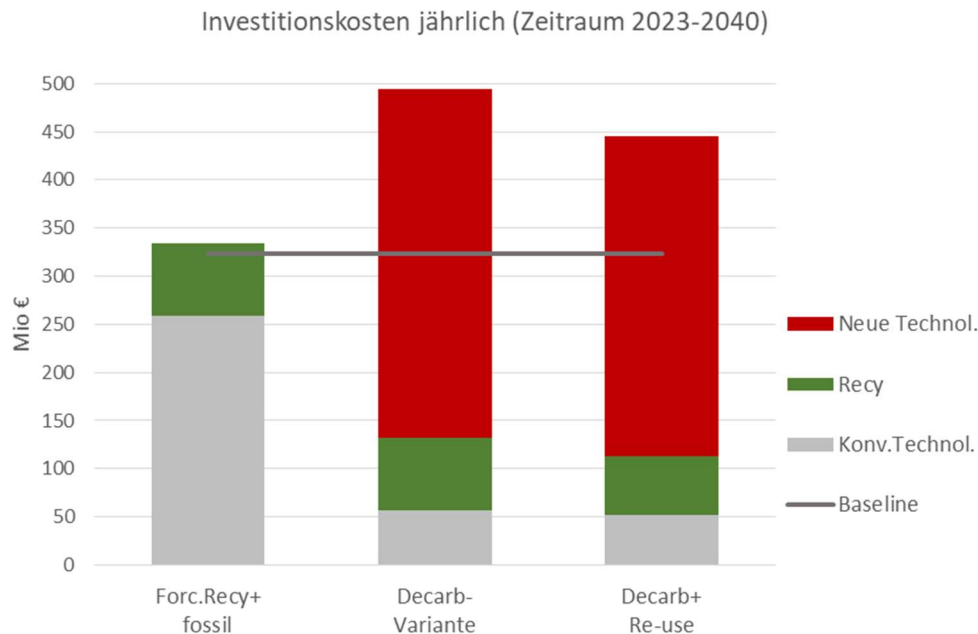


Abbildung 27: Veränderung der Investitionskosten für den vorgeschlagenen Technologiemix

Legende:

Neue Technol.

Alternative Bereitstellungstechnologien

Recy

Recycling von chemischen Produkten

Konv. Technol.

Konventionelle Bereitstellungstechnologien

Es zeigen sich für das forcierte Recycling unter Beibehaltung der fossilen Bereitstellung („Forc.Recy+fossil“) mit etwa 330 Mio. Euro jährlich etwa gleich hohe Kosten wie die Baseline (323 Mio. Euro), da die jährlichen Kosten des zusätzlichen Recyclings von etwa 75 Mio. Euro die Einsparungen bei den konventionellen Technologien durch die Reduktion der bereitzustellenden Mengen in etwa aufwiegen. Für die Dekarbonisierungs-Variante („Decarb-Variante“) steigen die Investitionen über die Baseline auf nahezu 500 Mio. Euro jährlich an, wobei zu beachten ist, dass diese nicht linear anfallen, sondern hohe Investitionskosten in einzelnen Jahren erforderlich sind. Sie gliedern sich einerseits in etwa 360 Mio. Euro im Jahresschnitt für die neuen Technologien, die trotz weitgehender Dekarbonisierung der chemischen Produkte etwa in Höhe der „Intermediate-Variante“ der damaligen *Dekarbonisierungsstudie* liegen. Hinzu kommen die Kosten des forcierten Recyclings und die stark gesunkenen Kosten für die konventionellen Technologien, was zu den obigen Gesamtkosten führt. Bis 2040 (beginnend ab 2023) führt dies zu einer Gesamtinvestition in der Höhe von 8,4 Mrd. Euro, die um knapp 2,3 Mrd. Euro über der Baseline (konventionelle Investitionen im Zeitraum 2021 bis 2040) liegt. Die Re-use Option („Decarb+Re-use“) würde die Kosten auf 450 Mio. Euro jährlich reduzieren. Bei allen Investitionsangaben muss auf die teilweise großen Unsicherheiten durch die

unterschiedlichen Datenquellen und auch die unterschiedliche und damit unvollständige Einbeziehung von Kosten für den Aufbau industrieller Infrastruktur in den einzelnen Quellen hingewiesen werden, sodass die Angaben nur als grobe Abschätzung zu sehen sind.

Bei den Produktionskosten ist speziell im Zeitraum der Implementierung mit einer Steigerung zu rechnen. Die erwarteten Endkosten der dekarbonisierten Produktion werden maßgeblich von den Kosten der erneuerbaren Energieformen abhängen, da die Umstellung eine Verlagerung von den Rohstoff- auf die Energiekosten bringt. Entscheidend für das Gelingen der Dekarbonisierung wird es daher sein, dass ausreichend erneuerbare Energie zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung steht, ansonsten würden die höheren Produktionskosten die exportorientierte chemische Industrie am internationalen Markt eklatant benachteiligen.

Zusätzlich zu den Investitionen der chemischen Industrie werden zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität auch Investitionskosten für den Ausbau von erneuerbarer Energie anfallen. Diese Kosten werden laut einer aktuellen Studie „Österreichs Energie“ der Energieagentur (2020) im Auftrag von mit etwa 1 Milliarde Euro pro zusätzlicher TWh geschätzt.

4.3 Resumee

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass durch forciertes Recycling die Menge an primär herzustellenden chemischen Grundstoffen und damit auch der Rohstoff- bzw. Energiebedarf gegenüber der *Dekarbonisierungsstudie* aus dem Jahr 2018 deutlich gesenkt werden können. Damals wurden die Möglichkeiten der Abkehr von fossilen Rohstoffen noch ohne die Potenziale des Recyclings betrachtet, da sie nach den EU-Vorgaben nicht als Dekarbonisierungsmaßnahmen gelten.

Mit der gegenständlichen Arbeit wird nun ein technisch machbarer Ansatz verfolgt, in welchem Recycling breite Anwendung findet und mit Dekarbonisierungswegen kombiniert wird. Generell kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, dass eine Kombination aus stofflichem bzw. chemischem Recycling mit alternativen Bereitstellungstechnologien vielversprechende Perspektiven für eine erfolgreiche Dekarbonisierung bietet. Nach dem vorgeschlagenen Technologie-Mix würde ein wesentlicher Teil der Dekarbonisierung auf die Wasserstoffroute mit Verwendung von biogenem CO₂ oder Kreislauf CO₂ (abgeschiedenes CO₂ im Rahmen von CCU-Konzepten) in der Höhe von etwa 1 Mio. Tonnen entfallen. Der andere Teil würde über Biomasse gedeckt. Davon wären 1,6 Mio. Tonnen forstliche Biomasse für die Vergasungsrouten, was etwa 10 Prozent des aktuellen Holzeinschlags in Österreich entspricht, vorgesehen. Sie wären angesichts steigender Schadholzmengen auch eine Chance für die Waldbewirtschaftung. Für die Ethanolroute wäre agrarische Biomasse im Ausmaß von 0,9 Mio. Tonnen nötig, bei der überwiegend von Getreide ausgegangen wird, die aber auch Impulse für die Zuckerindustrie liefern könnte. Letztlich hängt die Verfügbarkeit des Bio-Ethanol, der derzeit in Österreich aus Getreide hergestellt wird, aber von politischen Entscheidungen über die Beimischung von Ethanol zu Treibstoffen ab.

Bei der vorgeschlagenen Technologie-Kombination steigt der direkte Energieeinsatz deutlich über den Wert der Baseline hinaus an. Der Großteil der Energie muss als Strom aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden, was eine wesentliche Herausforderung darstellt. Für den vorgeschlagenen Technologie-Mix zur Umsetzung der Dekarbonisierung müsste der bisherige vorwiegend fossile Energieeinsatz von 15 TWh überwiegend aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden und zusätzlich würde Strom von 16 TWh (etwa 16 Flusskraftwerken der Größe von Freudenaus) benötigt.

Die THG-Emissionen würden mit der vorgeschlagenen Kombination von Dekarbonisierungsrouten bei Bereitstellung von erneuerbarer Energie auf unter 0,8 Mio. Tonnen CO_{2eq}, bei zusätzlichen Re-use Maßnahmen sogar auf 0,7 Mio. Tonnen CO_{2eq} deutlich reduziert. Bei Erreichung der Klimaneutralität in den Bereichen Energieversorgung, Treibstoffe und Produktherstellung sinken die Emissionen der dekarbonisierten Bereitstellung dann letztlich auf Null.

Die dafür notwendigen Investitionen würden 8,4 Mrd. Euro betragen, dies liegt um etwa 2,3 Mrd. Euro über der Baseline. Damit unterschreitet man aber trotz vollständiger Dekarbonisierung der chemischen Produktion deutlich die Investitionskosten der Maximal-Variante der damaligen *Dekarbonisierungsstudie* von 20 Mrd. Euro, wobei eine weitere Reduktion durch Re-use Konzepte möglich wäre. Nicht enthalten sind allerdings die Kosten für den Ausbau der erneuerbaren Energieformen im Energiebereich, der für die Versorgung mit den notwendigen Mengen an Strom und Wärme notwendig ist.

Um die Klimaneutralität des Chemiesektors erreichen zu können, müssten folgende zentralen Voraussetzungen gegeben sein:

- Die Anerkennung von Recycling mit Verzicht auf ergänzende fossile Bereitstellung als Dekarbonisierungsmaßnahme durch die EU.

Weiters wären folgende Rahmenbedingungen notwendig:

- Anerkennung des Beitrags von Kunststoffprodukten zu Energieeinsparung und Klimaschutz in den relevanten Anwendungsbereichen
- Vermeidung von unsachgemäßer Entsorgung und von Littering durch Ausbau der Kunststoffsammlung hin zu einer einheitlichen Sammlung aller Kunststoffe (Gesamtkunststoffsammlung)
- Etablierung sortenreiner Sortiersysteme für hochqualitative Recyclingkreisläufe
- Anerkennung des chemischen Recyclings als gleichwertige Recyclingtechnologie im Sinne der Abfallhierarchie
- Bereitstellung ausreichender Mengen erneuerbarer Energie (insbesondere Strom) zu wettbewerbsfähigen Preisen
- Bereitstellung ausreichender Mengen an nachhaltiger Biomasse unter Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen mit anderen Sektoren wie Industrie, Lebensmittel, Raumwärme oder Verkehr
- Forcierung von Forschung und Entwicklung zu alternativen Bereitstellungstechnologien für chemische Produkte, insbesondere der Wasserstoff/CCU-Route und der Biomasse-Vergasung
- Investitionsförderungen bei der Errichtung der Produktionsanlagen mit alternativen Technologien zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit im industriellen Maßstab
- Eine regulatorische Unterstützung auf nationaler und europäischer Ebene ist bei der Anrechnung von alternativen Bereitstellungstechnologien notwendig, z.B. CCU im Emissionshandel.

5 Literatur

- 1/ AIT - R. Geyer, S. Knöttner, C. Diendorfer und G. Drexler-Schmid 2019. IndustRIES – Energieinfrastruktur für 100% Erneuerbare Energie in der Industrie. Klima- und Energiefonds. Wien
- 2/ Brandt B. und H. Pilz 2011. Auswirkungen von Kunststoffverpackungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Europa, Denkstatt GmbH im Auftrag von Plastics Europe
- 3/ DECHEMA 2017. „Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industry“ im Auftrag des CEFIC
- 4/ Ecoinvent. Life Cycle Inventory Database. <https://www.ecoinvent.org/>
- 5/ Energieagentur 2020. Von der Coronakrise zur klimaneutralen Stromzukunft, download unter:
https://oesterreichsenergie.at/files/Positionspapiere%20und%20FactSheets/Positionspapiere%20und%20FactSheets%202020/Wirtschaftsimpulse%20E-Wirtschaft_Endbericht.pdf
- 6/ ICCA 2009. Innovations for Greenhous Gas Reduction – a life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by chemical industry. 7/ International Council of Chemical Associations
- 7/ UBA 2017. Klimaschutzbericht 2017. Umweltbundesamt Wien
- 8/ UBA 2017a. Kunststoffabfälle in Österreich – Aufkommen und Behandlung, Referenzjahr 2015. Umweltbundesamt Wien
- 9/ UBA-DE 2019. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Climate Change 37/2019. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- 10/ Veigl A. 2015. Energiezukunft Österreich, im Auftrag von GLOBAL 2000, Greenpeace und WWF
- 11/ Windsperger A. und B. Windsperger 2017. Klimabelastungen hinter dem Konsum in Österreich, im Auftrag der SUNPOR GmbH
- 12/ Windsperger A. und B. Windsperger 2018. Perspektiven der Decarbonisierung für die chemische Industrie in Österreich. Fachverband der chemischen Industrie.