



Blackbox Chemieindustrie

Die energieintensivste Industrie Deutschlands

Blackbox Chemieindustrie – Die energieintensivste Industrie Deutschlands

Oberschelp Consulting

Breitensteinstrasse 58

8037 Zürich

Schweiz

E-Mail: contact@oberschelp-consulting.ch

Auftraggeber:



Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)

Kaiserin-Augusta-Allee 5

10553 Berlin

Tel: 030 2 75 86 - 40

Fax: 030 2 75 86 - 440

E-Mail: bund@bund.net

V. i. S. d. P.: Petra Kirberger

Titelfoto: Hans Blossey/Alamy Stock Foto

August 2023

Lizenz: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



In der Broschüre werden sowohl die neutrale Schreibweise als auch das Gender-Sternchen (*) verwendet, um alle Geschlechter anzusprechen.

Die Studie von Oberschelp Consulting wurde vom BUND e.V. beauftragt und muss nicht in allen Punkten die Position des BUND e.V. wiedergeben. Sie ist als Diskussionspapier für eine gesellschaftliche Debatte gedacht.

VORWORT

Die Chemieindustrie stellt Ausgangsstoffe für nahezu alle Industrieerzeugnisse bereit. Ihre Zukunftsfähigkeit ist daher weltweit von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung und Lebensqualität.

Rund 350.000 verschiedene Chemikalien werden heute auf dem Weltmarkt hergestellt: Industriechemikalien, Kunststoffe, Pestizide, Chemikalien in Produkten, Arzneimittel. Welche Gefahren viele dieser Substanzen bergen, ist lange bekannt. Besonders problematisch sind langlebige Stoffe wie die „Ewigkeitschemikalien“ PFAS. Einmal in der Umwelt, reichern sie sich an und verteilen sich bis in die entlegensten Gebiete der Erde. Sie sind, wie die Beispiele Mikroplastik und FCKW belegen, auch ohne nachgewiesene toxische oder ökotoxische Wirkungen schädlich.

In Europa, aber auch international, diskutieren wir seit Jahrzehnten, wie wir die Risiken, die mit den schädlichen Eigenschaften von Chemikalien einhergehen, in den Griff bekommen. Deutschland ist im September 2023 Gastgeberland der Weltchemikalienkonferenz ICCM 5 in Bonn. Auf der Tagesordnung stehen Themen wie hochgefährliche Pestizide, persistente Arzneimittel in der Umwelt, PFAS, endokrine Disruptoren oder Schadstoffe in Produkten.

Was bei der Diskussion häufig übersehen wird: Neben der Art der Chemikalien, ist auch die schiere Menge eine enorme Belastung für den Planeten. Seit 1950 ist die Produktion von Chemikalien weltweit um das 50-Fache gestiegen. Bis 2050 ist sogar nochmals eine Verdreifachung prognostiziert. Damit potenzieren sich auch die Risiken. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass die Grenzen dessen, was unser Planet an menschengemachten Substanzen verkraften kann, bereits weit überschritten sind. Ein trauriges Beispiel dafür: In Teilen der Weltmeere finden Forscher*innen heute mehr Plastik als Biomasse in ihren Netzen. Die Belastung mit Plastik, PFAS und Co. gefährdet unser Ökosystem Erde und damit die Existenzgrundlage der Menschheit.

Aber nicht nur die Endprodukte chemischer Prozesse bedrohen die Umwelt. Auch die größtenteils fossilen Ausgangsstoffe der Chemieindustrie, also Erdöl und Erdgas, gefährden das Klima und die Artenvielfalt. Hinzu kommt, dass der Sektor mehr Energie als jeder andere Industriezweig verbraucht und verantwortlich ist für 18 Prozent der globalen CO₂-Emissionen. Damit hat die Chemiebranche einen entscheidenden Anteil an der Klimakrise.

Deutschland ist der mit Abstand führende Standort der europäischen Chemieindustrie und Sitz einiger der größten global agierenden Konzerne. Umso erstaunlicher ist es, dass in der Öffentlichkeit bislang weitgehend unbekannt ist, was hierzulande wo produziert wird und wie viele Ressourcen und Energie in diese Produkte fließen. Die vorliegende Studie bringt Licht ins Dunkel. Sie ist die erste eines Umweltverbandes, die den Status Quo der deutschen chemischen Industrie umfänglich beleuchtet: Energie- und Ressourcenverbrauch, Produktionsmengen und Art der Produkte, Standorte, Unternehmen.

Der BUND möchte diese Analyse als konstruktiven Beitrag zu einer dringend notwendigen gesamtgesellschaftlichen Debatte verstanden wissen. Die Chemie der Zukunft muss nachhaltig sein! Wir brauchen Chemikalien, die in der Umwelt leicht abgebaut werden können und möglichst wenig gefährliche Eigenschaften besitzen.

Mindestens genauso wichtig ist es, insgesamt weniger herzustellen. Der stetige Anstieg der Produktion und damit von Rohstoffnutzung, Warenverkehr und Abfällen überfordert die Regenerationsfähigkeit der Erde und führt in die ökologische Katastrophe. Wenn wir die Klimakrise und das Artensterben abmildern wollen, muss die Industrie – allen voran der Chemiesektor – ihren Ressourcenverbrauch senken. Ganz konkret heißt das: Wo immer möglich, sollte der Einsatz und damit auch die Produktion von Chemikalien überdacht werden.

Vor allem die Politik ist jetzt gefragt! Die chemische Verschmutzung und Ressourcenverschwendung ist die dritte große Krise unserer Zeit. Wie beim Klima- und Artenschutz brauchen wir auch hier einen rechtlich verbindlichen Rahmen und klare Ziele – national und international. Stoffpolitik, Ressourcen- und Klimaschutz sind eng miteinander verknüpft und müssen gemeinsam gedacht und umgesetzt werden.

Eine Transformation von solchen Dimensionen braucht aber auch die langfristige Zusammenarbeit von Regierungen, Wirtschaft und Zivilgesellschaft. Nur so können wir den Wandel ökologisch und sozial verträglich gestalten. Vorsorgeprinzip, Nachhaltigkeit und Suffizienz sollten dafür die zentralen Leitbilder sein.

Ulrike Kallee
Abteilungsleiterin Stoffe & TechnologienBund für Umwelt und Naturschutz Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie „Blackbox Chemieindustrie“ des BUND e.V. ist die erste Studie eines Umweltverbandes, die umfassend die Produkte sowie den Energie- und Ressourcenverbrauch der chemischen Industrie in Deutschland beleuchtet. Sie zeigt auf, welche Firmen wo in Deutschland welche Produkte in welchen Mengen produzieren. Dabei ordnet sie erstmals einzelnen Produkten und Mengen ihren Energie- und Ressourcenverbrauch zu. Neben dem Bericht enthält die Studie umfangreiche Tabellen zu Herstellern und Produktionskapazitäten nach Standorten. Die Studie bezieht sich exemplarisch auf das Jahr 2020.

In Deutschland sind rund 750 Chemieunternehmen tätig. Die heimische Chemieindustrie stellt vor allem Plastik her – insbesondere für Verpackungen, die Automobilindustrie, Textilien, den Bausektor und Elektrogeräte. Außerdem ist die Produktion von Düngemitteln von großer Bedeutung. Hinzu kommen Spezialchemikalien und Pharmazeutika (Abbildung 15). Die wichtigsten Unternehmen und ihre Produkte sind in Tabelle 2 und 3 gelistet. Neben bekannten und weniger bekannten Firmen, die Massenchemikalien und Plastik produzieren (BASF, Baskem, BP, Borealis, Dow, Indorama, Ineos, LyondellBasell, OMV, Sabic Europe etc.), identifiziert die Studie auch Hersteller von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), den sogenannten Ewigkeitschemikalien (3M/Dyneon, Allessa/WeylChem, Archroma, Solvay, Daikin Refrigerants, F-Select, Fluoron, Lanxess, Pharmapur und W. L. Gore).

Der direkte Energiebedarf der Chemieindustrie ist immens. Sie nutzt fossile Rohstoffe nicht nur zur Energieerzeugung (zum Beispiel Erdgas), sondern in noch größerem Umfang als Rohstoff für die Produkte selbst (vor allem Erdöl). 2020 verbrauchte die chemische Industrie – ohne vorgelagerte Verarbeitungsschritte wie etwa in Erdölraffinerien und ohne Energieverluste, die bei extern bezogener Energie anfallen – 383 Milliarden Kilowattstunden (1379 Petajoule) (Abbildung 3 und 17). Das entspricht mehr als der Hälfte des Strom- und Wärmeverbrauchs aller Privathaushalte in Deutschland. Lässt man die Rohstoffe außen vor und betrachtet lediglich den Endenergiebedarf, so ist die Chemieindustrie – mit rund einem Viertel des gesamten industriellen Endenergiebedarfs – der größte industrielle Energieverbraucher. Ihr Bedarf übersteigt damit sogar den der Zement und Eisen- und Stahlindustrie zusammen (zweit- und drittgrößten Verbraucher) (Abbildung 2). 2020 hatte die Chemieindustrie einen Endenergiebedarf von 159 Milliarden Kilowattstunden (574 Petajoule). Bemerkenswert

ist auch die Menge an Erdgas, die zum Einsatz kommt. Allein der direkte Erdgasverbrauch der Chemieindustrie beträgt 95 Milliarden Kilowattstunden (341 Petajoule). Damit könnte der Erdgasbedarf von rund 38 Prozent aller Privathaushalte in Deutschland gedeckt werden.

Über Pipelinesysteme (für Öl, Gas, Ethylen etc.) sind die deutschen Chemiestandorte stark vernetzt, auch mit dem Ausland (Kapitel 3 und 4). Deutschland exportiert mehr Chemikalien als es importiert, wobei die größten Handelspartner die Niederlande und Belgien sind (Abbildung 7). Aus diesen beiden Ländern werden sehr viele chemische Produkte importiert; gleichzeitig gehören sie zu den wichtigsten Abnehmern. Auch innerhalb einer Produktsorte (zum Beispiel Polypropylen [PP]) werden ähnlich große Mengen gleichzeitig importiert und exportiert. Dies liegt unter anderem daran, dass in Deutschland eher qualitativ hochwertige Produkte mit besonderen Eigenschaften produziert und exportiert werden, während günstigere Produkte tendenziell importiert werden (Abbildung 13). Die deutsche Chemieindustrie ist aber nicht nur Nettoexporteur, sondern stellt zudem wichtige Vorprodukte für andere Exportgüter (zum Beispiel Automobile) her.

Die Chemieindustrie ist stark von der Herstellung von Diesel und Benzin abhängig: Ihre wesentlichen Ausgangsstoffe werden zusammen mit den Treibstoffen in Erdölraffinerien hergestellt. Dabei können maximal 30 Prozent des Rohöls für chemische Produkte verwendet werden (Kapitel 5). Ein Verbot von Verbrennermotoren stellt die Industrie somit vor Herausforderungen.

Die Studie beschreibt Standorte, Verteilungsdichte, regionale Besonderheiten und Produkte der rund 2.000 registrierten chemischen und petrochemischen Anlagen in Deutschland (Kapitel 4). Ein besonderes Augenmerk liegt auf Erdölraffinerien und Steamcrackern (Kapitel 5). Es wird aufgezeigt, welche Chemikalien in welchen Mengen in Deutschland produziert und auch hierzulande verbraucht werden (Kapitel 6). Chemikalien, die in großen Mengen (über 2.000 Kilotonnen) produziert werden, sind insbesondere Ausgangsstoffe für die Plastikproduktion (zum Beispiel Ethylen, Propylen und Chlorgas für Kunststoffe wie Polyethylen [PE], Polypropylen [PP] und Polyvinylchlorid [PVC]) sowie für Düngemittel (Ammoniak, Harnstoff). Abbildung 13 bilanziert alle wichtigen chemischen Produkte (Basischemikalien, Zwischenprodukte und Endprodukte) in Deutschland (nach Import, Export und Produktion).

Den Energieverbrauch der chemischen Industrie wird erstmals auch nach Produkten aufgeschlüsselt (Kapitel 7). Abbildung 15 stellt die Endenergieverbräuche (das heißt ohne Rohstoffe) der wesentlichen chemischen Verfahren in Deutschland dar. Tabelle 4 zeigt die Top 15 des Brennstoffverbrauchs von Großfeuerungsanlagen: Den größten Brennstoffverbrauch hat die BASF in Ludwigshafen, gefolgt von BP Gelsenkirchen (mit Raffinerie) und dem Chempark Dormagen. Von den 107 Kraftwerken in Chemieparks werden 51 mit Erdgas, 19 mit Kohle, 12 mit Abfällen und 11 mit Öl betrieben.

Abbildung 16 macht drei Viertel des Endenergiebedarfs der chemischen Industrie in Deutschland transparent, aufgeschlüsselt nach Produkten. Die größten Verbräuche liegen – den Produktionsmengen entsprechend – bei Chemikalien für Plastik und Düngemittel und an Standorten, an denen Steamcracker (Ethylen, Propylen), Chloralkali-Elektrolyse (Chlor, Natriumhydroxid) oder das Haber-Bosch-Verfahren (Düngemittel) zum Einsatz kommen. Letztere produzieren die Grundstoffe für Plastik und Düngemittel. Die Studie schätzt den Primärenergiebedarf (das heißt Energie und Rohstoffe) für Chemikalien, die in Verpackungen verwendet werden, auf 77 Milliarden Kilowattstunden (277 Petajoule). Allein für die Produktion von Verpackungen ist demnach mehr Energie nötig, als das Land Slowenien insgesamt verbraucht.

Die Tabellen, die Teil dieser Studie und auf Anfrage verfügbar sind, enthalten:

- Basisdaten zu Chemieparks und Chemiestandorten in Deutschland
- Daten zu chemischen Anlagen für die wichtigsten Chemikalien in Deutschland (Kapazitäten nach Standorten)
- Daten zu den hergestellten Chemikaliengruppen nach Standorten in Deutschland
- Koordinaten der registrierten Chemieanlagen in Deutschland
- Basisdaten für Polygone von Chemiestandorten und Zuordnung zu Chemieparks
- Brennstoffverbräuche von Großfeuerungsanlagen nach Chemiestandorten in Deutschland
- Geschätzter Energieverbrauch der Herstellungsprozesse verschiedener Chemikalien in Deutschland
- Energiebedarfe für die Herstellung verschiedener Chemikalien (Raffinerien und chemische Anlagen ohne Rohstoffförderung und Transport)
- Daten zu den Abbildungen der Studie

INHALTSVERZEICHNIS

1. Überblick über die chemische Industrie in Deutschland	7
2. Produkte und Unternehmen	13
3. Importe, Exporte und Infrastruktur	16
4. Standorte, Kapazitäten und Produktionsmengen	22
5. Erdölraffinerien und Steamcracker im Fokus	27
6. Massenflüsse innerhalb Deutschlands	32
7. Energieflüsse, Luftschadstoffe und Dekarbonisierung	36
Methodikanhang	43
Abkürzungen	47
Quellenverzeichnis	49

1. Überblick über die chemische Industrie in Deutschland

Die chemische Industrie in Deutschland hat eine lange Tradition und viele der international etablierten Verfahren zur Herstellung von chemischen Produkten sind ursprünglich in Deutschland entwickelt worden. Auch heute spielt die chemische Industrie für den Wirtschaftsstandort Deutschland eine wesentliche Rolle, auch wenn die Produktion von chemischen Produkten in den letzten Jahrzehnten wesentlich internationaler geworden ist und Deutschland als Ursprungsland von chemischen Produkten relativ betrachtet an Bedeutung verliert.

Im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren zeichnet sich der Chemiesektor durch eine große Vielzahl an höchst unterschiedlichen Produkten aus. Beispiele dafür sind nahezu endlos und umfassen ganz unterschiedliche Bereiche unseres Lebens wie etwa unsere tägliche Lebensmittelversorgung (zum Beispiel Düngemittel und Pestizide), Kleidung (Kunstfasern), Gesundheitsversorgung (Pharmawirkstoffe), Mobilität (Autokatalysatoren), Wohnen (Dämmmaterialien und andere Baustoffe), Produktaufbewahrung (Verpackungsmaterialien), Papier (Bleichmittel) oder Pflegeprodukte (Kosmetika und Waschmittel). In ihrer Herstellung sind diese Produkte zum Großteil abhängig von der Versorgung mit fossilen Rohstoffen (Erdöl, Erdgas und Kohle). Die fossilen Rohstoffe werden auf unterschiedlichen Wegen im Chemiesektor verarbeitet, aber in vielen Fällen zuerst auf wiederverwendbare chemische „Grundbausteine“ wie Olefine oder Aromaten heruntergebrochen, und dann – abhängig von der gewünschten Funktionalität – durch chemische Verarbeitungsverfahren zu weiteren Zwischen- und schließlich Endprodukten umgewandelt (**Abbildung 1**).

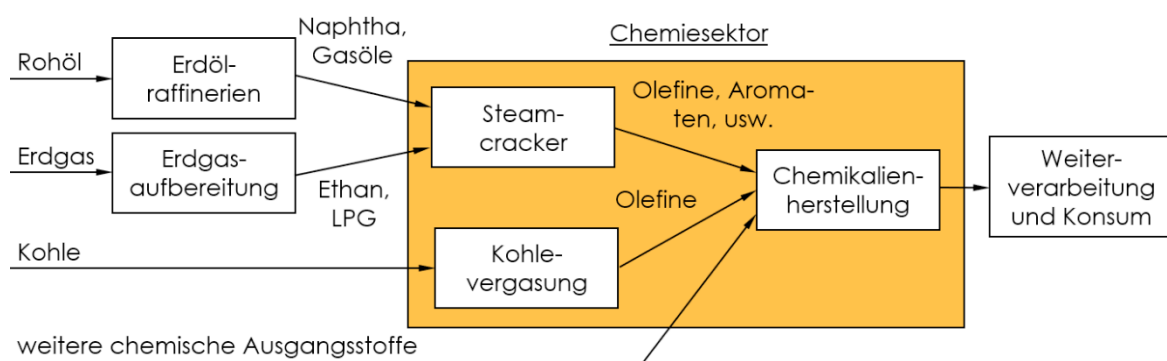


Abbildung 1: Schematische Darstellung typischer Verarbeitungswege von den Rohstoffen der chemischen Industrie zu den Konsumprodukten, die die Chemikalien enthalten

Von den Produkten der chemischen Industrie unterscheidet man grundsätzlich unterschiedliche Arten, wie etwa in großen Mengen produzierte Massenchemikalien (zum Beispiel viele Sorten von Verpackungskunststoffen), standardisierte und in geringeren Mengen produzierte Spezialchemikalien (zum Beispiel Vitamine als Nahrungsergänzungsmittel) und in sehr geringen Mengen produzierte Feinchemikalien mit besonderen Funktionalitäten (zum Beispiel besondere Effektlacke). In der Herstellung unterscheiden sich diese Arten von Chemikalien wesentlich, denn die erzielbaren Erlöse, und damit auch die einsetzbaren Herstellungsverfahren, sind von ganz unterschiedlicher Art.

Global betrachtet ist der Konkurrenzdruck bei der Herstellung von Massenchemikalien sehr hoch, sodass die Verfügbarkeit von Rohstoffen und Energie die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Produkte wesentlich beeinflusst, während für den Chemiesektor beispielsweise Lohnkosten von

geringerer Bedeutung sind. Da es verschiedene Prozessvarianten gibt, die zu denselben chemischen Grundbausteinen führen, können sich so durch die regionalen Gegebenheiten ganz unterschiedliche Tendenzen in den Produktionsverfahren entwickeln. In Deutschland sind diese Verfahren in erster Linie abhängig vom Erdöl, was auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen ist (**Tabelle 1**). Zum einen führt der Treibstoffverbrauch für den Waren- und Personenverkehr dazu, dass in Deutschland große Mengen an Erdöl raffiniert werden, wobei chemisch verwendbare Nebenprodukte anfallen. Zum anderen sind Alternativen, wie die Versorgung des Chemiesektors mit Nebenprodukten der Erdgasgewinnung, nicht in ausreichendem Umfang und zu ähnlich preiswerten Kosten möglich. Darüber hinaus lässt sich Erdöl auch relativ einfach lagern und transportieren, was zusätzlich die Handhabung und das Anlegen von strategischen Reserven zum Ausgleich von Verfügbarkeitschwankungen auf dem internationalen Markt erleichtert.

Tabelle 1: Die fossile Rohstoffbasis des Chemiesektors in verschiedenen Weltregionen

Region	Rohstoffbasis
Westeuropa	Erdöl, immer mehr Erdgas/LPG
Nordamerika	Erdgas, wenig Erdöl
Japan	Erdöl
China	Erdöl, Kohle, auch Erdgas
Mittlerer Osten	Erdgas

Die Situation ist in den Vereinigten Staaten beispielsweise völlig anders, weil durch die Verfügbarkeit von Frackinggasen zusätzlich in großen Mengen Ethan sowie Butan und Propan („Liquified Petroleum Gases“ [LPG]) zur Verfügung stehen, die dort ebenfalls in großem Umfang zu chemischen Grundstoffen verarbeitet werden und die Kostenstruktur der chemischen Industrie dort in den letzten 10 bis 15 Jahren wesentlich verbessert und gleichzeitig den Chemiesektor in Europa unter Druck gesetzt haben. Demgegenüber steht die Situation in China, wo bislang im Vergleich zum nationalen Bedarf geringe Mengen an eigenem Erdgas und Erdöl gefördert werden, wo aber dafür sehr günstig Kohle zur Verfügung steht. Viele Verfahren zur Umwandlung von Kohle in chemische Rohstoffe wurden aufgrund der ähnlich guten Verfügbarkeit von Kohle in Deutschland und des politischen Wunsches nach Unabhängigkeit von Rohstoffimporten vor etwa 100 Jahren in Deutschland entwickelt, aber dann aufgrund der guten Verfügbarkeit von Erdöl und des gleichzeitig vielfach sehr hohen Energiebedarfs bei der Verarbeitung sowie aufgrund der hohen Anlagenkosten nicht weiterverfolgt. Diese Verfahren haben in China im vergangenen Jahrzehnt (insbesondere ab etwa 2015) eine Renaissance erlebt und decken einen wesentlichen Anteil des chinesischen Bedarfs nach Basischemikalien. In weiterverarbeiteter Form gelangen diese kohlebasierten Chemikalien dann in den Endprodukten auch auf den deutschen Markt.

Da bei der Herstellung der Massenchemikalien die Rohstoff- und Energiepreise so wesentlich die gesamten Herstellungskosten des Produkts bestimmen, hat durch starke internationale Konkurrenz und hohe Rohstoff- und Energiepreise die Herstellung von Massenchemikalien in Deutschland in den letzten Jahren weitgehend stagniert oder sogar leicht abgenommen (zum Beispiel drei Prozent Rückgang in der Ethylenproduktion in Deutschland von 2000 bis 2020 [1]). Zudem hat man sich auch bei den Massenchemikalien in Deutschland mehr und mehr auf besondere Sorten, die im internationalen Vergleich höhere Preise erzielen können, spezialisiert. Demgegenüber steht eine deutliche Zunahme der Massenchemikalienimporte (zum Beispiel 130 Prozent Zuwachs in den Ethylenimporten nach Deutschland von 2000 bis 2020 [1]), was die stärkere Spezialisierung der chemischen Industrie in Deutschland klar unterstreicht. Trotzdem bleiben viele deutsche Unternehmen in der chemischen Industrie „rückwärts integriert“, was heißt, dass sie nicht nur einzelne Schritte in der Herstellungskette von chemischen Produkten selbst durchführen, sondern

im Wesentlichen einen großen Teil der Verarbeitungsschritte vom Rohstoff zum Endprodukt selbst durchführen, auch wenn vielleicht die energie- und rohstoffintensivsten Teilschritte im Ausland durchgeführt werden. Ein Beispiel für ein solches Unternehmen ist etwa die BASF, die nicht nur eine breite Palette an Spezialchemikalien herstellt, sondern darüber hinaus über Beteiligungen auch an der Rohstoffgewinnung (wie Erdöl und Erdgas) sowie den ersten Verarbeitungsschritten der Rohstoffe beteiligt ist. Die Massenchemikalien spielen so eine wesentliche Rolle in der Weiterverarbeitung und werden daher auch weiterhin teilweise in Deutschland produziert, um die Versorgung für komplexere chemische Produkte sicherzustellen.

Anhand der Investitionen der Chemieunternehmen in Deutschland in den vergangenen Jahren lässt sich jedoch klar ablesen, dass der Fokus in Deutschland mittlerweile mehr auf Spezial- und Feinchemikalien liegt [31], denn die Investitionen in Großanlagen haben sich in den letzten Jahren – abgesehen von den üblichen Modernisierungs- und Instandhaltungsarbeiten an bestehenden Anlagen – auf nur wenige Beispiele wie den Ersatz der Acetylenherstellung bei der BASF in Ludwigshafen (2019), die Erweiterung der Produktion von Methylendi(phenylisocyanat)e (MDI) bei Covestro in Brunsbüttel (2020) oder die Erweiterung der Cumol-Produktion von Ineos in Marl (2021) beschränkt.

Demgegenüber stehen viele Investitionen in chemische Anlagen mit spezielleren chemischen Produkten, wobei die deutschen Unternehmen hier nicht nur in Deutschland investieren, sondern mittlerweile auch stark auf eine Diversifizierung ihrer Produktionsstandorte setzen. Dies kann nicht nur Vorteile in Bezug auf die Nähe zum stark wachsenden Absatzmarkt in Asien haben, sondern auch die Abhängigkeit von den aktuellen geopolitischen Risiken und der unsicheren Rohstoff- und Energieversorgung in Europa reduzieren. Da aber statt der Spezialchemikalien oder Feinchemikalien im Allgemeinen eher die Massenchemikalien mit einem durchschnittlichen Mengenanteil von rund 90 Prozent den Gesamtenergiebedarf des Sektors dominieren [6], ist allein durch das Produktspektrum in näherer Zukunft nicht mit einer massiven Zunahme des Energieverbrauchs des Chemiesektors in Deutschland zu rechnen. Durch Produktionssteigerung, die Umstellung auf Wasserstoff und erneuerbare Energieträger kann es hingegen trotzdem zu einem starken Anstieg des Energieverbrauchs kommen (siehe **Kapitel 7**).

Dennoch zeigen statistische Erhebungen sehr deutlich, wie abhängig der Chemiesektor in Deutschland auch ohne Berücksichtigung der damit verbundenen Produktionsschritte im Ausland von der Energieversorgung ist (**Abbildung 2**). Der Endenergiebedarf von 574 Petajoule (PJ) (159 Terrawattstunden bzw. 159 Milliarden Kilowattstunden) der chemischen Industrie in Deutschland im Jahr 2020 umfasst dabei die direkten Energiebedarfe für die chemische Industrie, nicht aber Rohstoffe, vorgelagerte Verarbeitungsschritte wie etwa in Erdölraffinerien oder Energieverluste, die bei extern bezogener Energie (in Form von Wärme oder Strom) anfallen. Dieser Endenergiebedarf machte dabei rund ein Viertel des gesamten industriellen Endenergiebedarfs aus [68]. Damit hat der Chemiesektor in Deutschland den größten Endenergiebedarf aller Industriesektoren und übersteigt sogar den Bedarf des zweitgrößten (Verarbeitung nichtmetallischer Mineralien wie etwa Zement) und des drittgrößten industriellen Verbrauchers (Eisen und Stahl) zusammengenommen. Aufgrund dieser hohen Abhängigkeit ist es nachvollziehbar, dass die chemische Industrie in Deutschland von sehr hohen Energiepreisen wie etwa im Jahr 2022 in Deutschland besonders stark betroffen ist. Es wird versucht, diese Energiepreise an die Kundschaft weiterzugeben, und so sind von den chemischen Produzenten in Deutschland im Jahr 2022 teils erhebliche Preissteigerungen ihrer Produkte angekündigt worden.

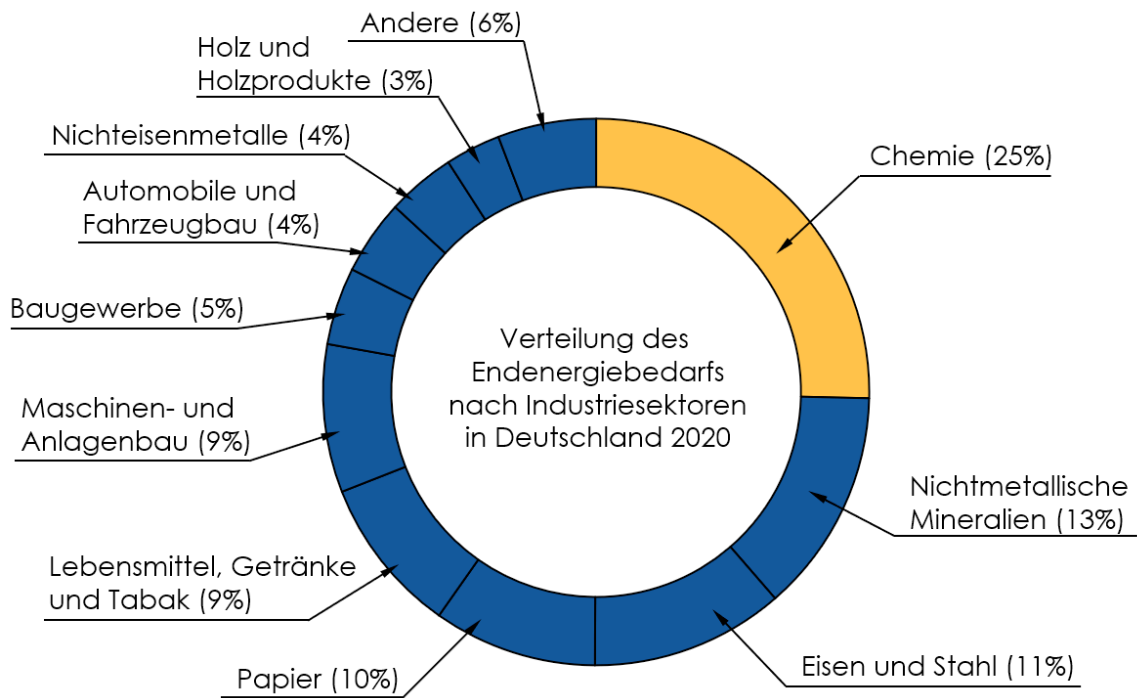


Abbildung 2: Endenergiebedarf der Industriesektoren in Deutschland im Jahr 2020 ohne Nutzung der Energieträger als Rohstoff (basierend auf Daten von Eurostat [68]). Der Chemiesektor umfasst alle Verfahren, die in erster Linie zur Herstellung von chemischen Produkten verwendet werden (zum Beispiel Steamcracking), nicht aber die vorgelagerte Verarbeitung wie zum Beispiel in Erdölraffinerien.

Dieser Effekt wird jedoch nicht nur durch die Energiepreise selbst angetrieben, sondern auch noch von der doppelten Abhängigkeit der chemischen Industrie von fossilen Rohstoffen verstärkt. Die Datenlage zeigt hier klar, dass der Chemiesektor in Deutschland noch stärker von fossilen Rohstoffen zur Erzeugung ihrer Produkte abhängig ist als für die Bereitstellung der notwendigen Energiemengen (**Abbildung 3**). In Summe sind diese Mengen sehr bedeutsam, denn der direkte Erdgasbedarf des Chemiesektors in Deutschland von 341 Petajoule (95 Terrawattstunden) im Jahr 2020 wäre beispielsweise ausreichend, um rund 38 Prozent des Erdgasbedarfs der deutschen Privathaushalte zu decken [68].

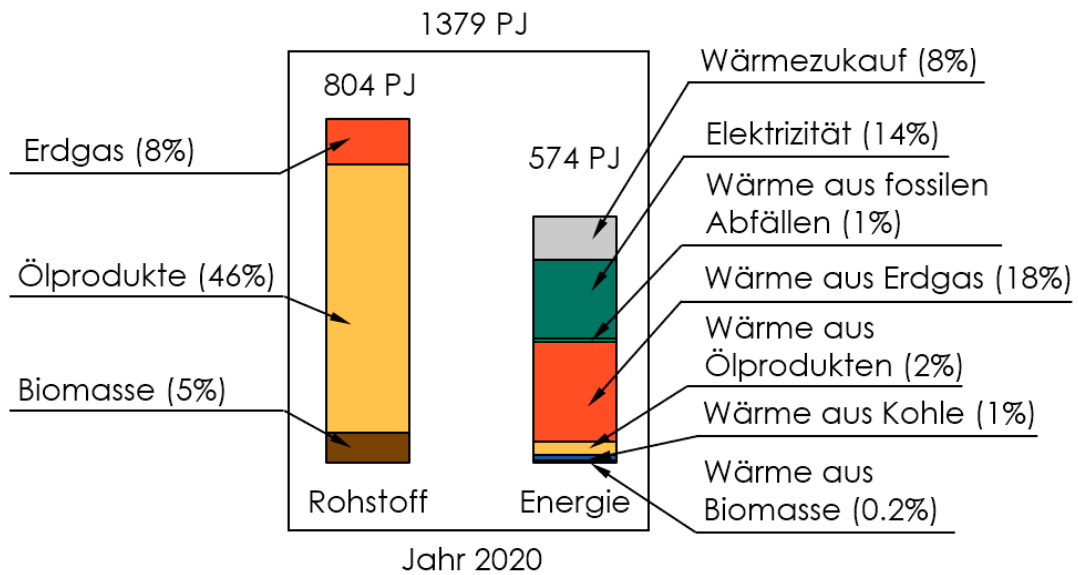


Abbildung 3: Direkter Energiebedarf des Chemiesektors in Deutschland im Jahr 2020 (basierend auf Daten von Eurostat [68], der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [81] und eigenen Berechnungen). Massenströme sind über den unteren Heizwert in Energieäquivalenten ausgedrückt worden, was ein ähnliches Bild wie in anderer Literatur [12] ergibt. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtmenge an direktem Energiebedarf von 1379 Petajoule pro Jahr (383 Terrawattstunden pro Jahr).

Zwar unterscheidet sich bei der Nutzung als Rohstoff oder als Energie die Art der Energieträger, denn als Rohstoff werden vor allem Erdölprodukte eingesetzt, während die Energiebereitstellung in erster Linie auf Erdgas basiert. Doch durch die starken Wechselwirkungen und die Kopplung der Preise auf dem Öl- und Gasmarkt betreffen Preis- und Verfügbarkeitsschwankungen letztlich beide Grundpfeiler der chemischen Industrie in Deutschland, und – aufgrund der weitreichenden Verwendung der chemischen Produkte in den anderen Sektoren – dann auch diese.

Als Reaktion auf hohe Energie- und Rohstoffpreise gab es im chemischen Sektor in Deutschland mehrere Arten von Maßnahmen, die umgesetzt worden sind. Zum einen sind das Effizienzmaßnahmen, die in einem gewissen Rahmen den Verbrauch von Rohstoffen und Energie reduzieren können, in Deutschland aber aufgrund der ohnehin schon höheren Preise standardmäßig umgesetzt werden und daher nur ein geringes Restpotenzial (etwa im Bereich von zwei bis drei Prozent für Erdgas [34]) aufweisen. Zudem kam es bei einer ganzen Anzahl von Produkten – auch bedingt durch die schwächere Nachfrage aufgrund höherer Preise – zeitweise zur Drosselung besonders energieintensiver Produktionsverfahren wie der Herstellung von Basischemikalien aus Naphtha in Steamcrackern [35]. Zudem sind Änderungen der eingesetzten Energieträger, zum Beispiel die Substitution von Erdgas durch Öl in der Strom- und Dampfproduktion des Chemiestandorts Schwarzheide, bei den zuständigen Behörden beantragt worden [33, 34]. Doch damit wäre auch eine wesentliche Steigerung der Belastung mit Luftschadstoffen verbunden gewesen: Denn Erdgas verursacht selbst in modernen Anlagen vergleichsweise moderate Emissionen bei gesundheitsschädlichen Schadstoffen wie Stickoxiden (NO_x), während der Einsatz von Öl zwar technisch möglich ist, aber mit zusätzlichem NO_x , wie auch mit mehr Schwefeloxid (SO_2)- und Feinstaub ($\text{PM}_{2.5}$)-Emissionen, einhergeht. Darüber hinaus ist die Emissionsintensität von Ölprodukten mit einem um 10 bis 30 Prozent höheren Wert für das klimaschädliche Kohlendioxid (CO_2) verbunden als die für Erdgas [36], und der Wirkungsgrad der

bestehenden erdgasoptimierten Anlagen dürfte durch die Verwendung von Ölprodukten zusätzlich zurückgehen. Es besteht also das Risiko, dass die Bevölkerung in mehrfacher Hinsicht durch die kritische Versorgungslage mit Energieträgern für die chemische Industrie belastet wird: Zum einen finanziell durch steigende Preise und hohe Inflation, und zum anderen durch zusätzliche Gesundheits- und Umweltschäden.

2. Produkte und Unternehmen

In Deutschland gibt es eine Vielzahl von Unternehmen, die chemische Produkte herstellen. Auch wenn teilweise die Abgrenzung zu anderen Industriesektoren nicht ganz eindeutig ist, so sind doch in Deutschland rund 750 Unternehmen mit Produktionsbetrieben in einer solchen Größenordnung ansässig, dass eine Registrierung beim Umweltbundesamt notwendig ist [43]. Diese Unternehmen weisen einen hohen Grad an Spezialisierung in Bezug auf ihre Produkte auf. In der Tendenz nimmt diese Spezialisierung weiter zu, weil sich dadurch die Marktposition in bestimmten Produktkategorien verbessern lässt. Ein Beispiel dafür ist etwa das Unternehmen Bayer aus Leverkusen, das über weite Teile seiner mehr als 150-jährigen Geschichte eine breite Palette an chemischen Produkten hergestellt hat, aber nach mehreren Umstrukturierungsmaßnahmen wie etwa der Auslagerung der Spezialchemikalienherstellung in das Unternehmen Lanxess und der Polymerherstellung in das Unternehmen Covestro sowie dem Zukauf des Agrochemikalienherstellers Monsanto und des Pharmaunternehmens Schering nur noch in den Bereichen Agrochemie und Pharmazeutika aktiv ist (**Tabelle 2**).

Ähnliche Umstrukturierungen ließen sich in den letzten Jahrzehnten auch bei anderen großen Chemieunternehmen in Deutschland beobachten, zum Beispiel bei der BASF, die zwar immer noch Styrol selbst herstellt, aber die Anlagen zur Herstellung von Folgeprodukten wie Styrol-Acrylnitril (SAN)-Co-Polymeren an Ineos verkauft hat. In der Folge werden die großen Verbundstandorte der chemischen Industrie, auf die in **Kapitel 4** detaillierter eingegangen wird, immer heterogener, während gleichzeitig auch die hergestellten Produkte und Produktgruppen in ihrer Komplexität weiter zunehmen. Demgegenüber steht der Trend zur Marktkonzentration, wodurch Kleinanlagen, die mit hohen Kosten behaftet sind, geschlossen werden, und nur noch die größeren Anlagen weiterbetrieben werden. Bei vielen chemischen Produkten gibt es in der Folge nur noch wenige Hersteller (**Tabelle 3**), denn Vorteile wie geringere Energiebedarfe oder Einsparungen bei der Vertriebsinfrastruktur lassen sich vor allem bei größerer Marktkonzentration realisieren.

Der hohe Energiebedarf ist wie bereits in **Kapitel 1** dargestellt eine Herausforderung für den Chemiestandort Deutschland, aber weitere Herausforderungen kommen hinzu. So sind in ähnlichem Umfang auch die hohen Treibhausgasemissionen des Sektors zu nennen, die zu hohen Kosten für die Emissionsminderung führen könnten, aber auch regulatorische Anforderungen auf Produktebene. Während beispielsweise Bisphenol A, heute in Deutschland noch von Covestro und Olin hergestellt, als endokriner Disruptor für massive Gesundheitsauswirkungen beim Menschen verantwortlich sein kann, gelangen auch andere chemische Produkte mit ihren schädlichen Eigenschaften in den Blick der Öffentlichkeit. Dazu gehören etwa Phthalate, die als Weichmacher zum Beispiel in Poly(vinyl chlorid) (PVC) eingesetzt werden, ebenfalls in vielen Fällen endokrine Disruptoren sind, und aus den PVC-Produkten ausdiffundieren können. Dies hat zu einer wesentlichen Umstellung der in Deutschland hergestellten Weichmachersorten geführt, wobei noch nicht bei allen Ersatzprodukten zweifelsfrei klar ist, ob sie gesundheitlich unbedenklich sind. Zudem ist aktuell auch die Herstellung von per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) unter kritischer Betrachtung, weil diese Substanzen zwar in ihren Produkten (wie Teflon-Beschichtungen von Pfannen) besonders haltbar sind, sich aber auch nach der Nutzung bei der Entsorgung nicht abbauen lassen und so über kurz oder lang als *Ewigkeitschemikalien* in die Umwelt und auch die Menschen gelangen. Weil in dem Blut fast jedes Menschen PFAS nachgewiesen wird, erwägt die Europäische Chemikalienagentur ECHA die Beschränkung von PFAS, was für die deutschen Hersteller (**Tabelle 3**), Importeure, Händler und Anwender Anpassungen an die sich ändernde Rechtslage notwendig machen könnte.

Tabelle 2: Beispiele deutscher Chemieunternehmen und eine Auswahl ihrer Schlüsselprodukte

Unternehmen/ Gruppe	Schlüsselprodukte
BASF	Chemikalien aus diversen Bereichen, zum Beispiel: 1,4-Butandiol (BDO), 2-Ethylhexanol (2-EH), Acetylen, Acrylsäurebutylester, Adipinsäure, Ameisensäure, Ammoniak (NH ₃), Caprolactam, Citral, Di(2-propylheptyl)phthalat (DPHP), Diisononyl cyclohexan-1,2-dicarboxylat (DINCH), Diisononylphthalat (DINP), Ethanolamine, Ethylenoxid (EO), expandierbares Polystyrol (EPS), Formaldehyd, Isononanol (INA), L-Menthol, Melamin, n-Butanol (NBA), Polyamide, Polyole, Polytetrahydrofuran (PolyTHF), Propylenglykol (PG), Toluol di-isocyanat (TDI), Vitamin E
Bayer	Agrochemikalien (zum Beispiel das Insektizid Imidacloprid, ein Neonicotinoid oder das Unkrautvernichtungsmittel Glyphosat) sowie verschreibungsfreie und -pflichtige Arzneimittel wie Aspirin oder das Verhütungsmittel Yasminelle
BP	Basischemikalien wie Benzol, Cumol, Cyclohexan, Ethylen, Methanol, n-Paraffine, o-Xylol, Propylen, p-Xylol, Toluol
Covestro	Polycarbonat(PC)- und Polyurethan(PU)-Polymere sowie Vorprodukte wie Anilin, Bisphenol A (BPA), Formaldehyd, Methylendi(phenylisocyanat)e (MDI), Polyole, Polyurethane (PUR), Toluol di-isocyanat (TDI)
Dow	Basischemikalien und Massenpolymere wie Benzol, Butadien, Ethylen, Glycerin, Methylendi(phenylisocyanat)e (MDI), Polyethylen (LDPE, HDPE), Propylen, Propylenoxid (PO), Toluol, Vinylchlorid (VCM)
Evonik	Spezialchemikalien und speziellere Polymere mit ihren Vorketten wie etwa Butadien, Diisononylphthalat (DINP), Isononanol (INA), Polyamide, Poly(methyl methacrylat) (PMMA), Superabsorber
Ineos	Polymere und ihre Vorketten wie Aceton, Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Ammoniak (NH ₃), Ethylen, Ethylenoxid (EO), Formaldehyd, Isopropanol (IPA), Phenol, Poly(vinylchlorid) (PVC), Polyethylen (LDPE, LLDPE), Propylen, Propylenoxid (PO), Styrol-Acrylnitril (SAN)
Lanxess	Spezialchemikalien inklusive Adipinsäure, Chloropren, Cresole, Eisenoxid-Pigmenten, Flusssäure (HF), Formaldehyd, Phthalsäureanhydrid, Polyamiden, Polybutylenterephthalat (PBT), Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)
LyondellBasell	Massenpolymere wie Polyethylen (LDPE, HDPE), Polypropylen (PP)
OMV/Borealis	Basischemikalien und einige Endprodukte wie Benzol, Butadien, Ethylen, Melamin, Polyethylen (HDPE), Propylen
Shell	Basischemikalien wie Benzol, Dimethylether (DME), Ethylen, Methanol (MeOH), o-Xylol (OX), Propylen, p-Xylol (PX), Toluol
SKW Piesteritz	Düngemittel und verwandte Chemikalien wie Ammoniak (NH ₃), Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL), Ammoniumsulfat-Harnstoff-Lösung (ASL), Harnstoff, Salpetersäure (HNO ₃)
Solvay	Anorganische Chemikalien wie Flusssäure (HF), Natriumcarbonat (Soda), Natriumhydrogencarbonat (Natron), Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂)
Wacker	Siliciumhaltige Chemikalien und ihre Vorketten, zum Beispiel Chlor (Cl ₂), Natriumhydroxid (NaOH), polykristallines Silicium, Silikone, Vinylacetat (VAM)
Westlake Chemical	Poly(vinylchlorid) (PVC) und zugehörige Chemikalien wie Chlor (Cl ₂), Epoxidharze, Ethylendichlorid (EDC), Natriumhydroxid (NaOH), Vinylchlorid (VCM)
Yara	Düngemittel Ammoniak (NH ₃), Ammoniumnitrat (AN), Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL), Harnstoff, Kalkammonsalpeter (KAS)

Tabelle 3: Beispiele deutscher Hersteller wichtiger Chemikalien

Typ	Chemikalie	Unternehmen
Basis-chemikalien	Ethylen	BASF, BP, Dow, Ineos, Klesch, LyondellBasell, OMV, Shell
	Propylen	BASF, Bayernoil, BP, Dow, Gunvor, Holborn Europa, Ineos, Klesch, LyondellBasell, MiRO, OMV, PCK Schwedt, Shell, Total
	Butadien	BASF, Dow, Evonik, Ineos, LyondellBasell, OMV
	Benzol	Arsol, BASF, BP, Dow, Holborn Europa, Ineos, Klesch, OMV, PCK Schwedt, Shell, Total
	Toluol	Arsol, BASF, BP, Dow, Ineos, Klesch, PCK Schwedt, Shell
	Xylole	BP, Klesch, PCK Schwedt, Shell
Zwischenprodukte	Acrylnitril (ACN)	Ineos
	Ethylenglycol (EG)	BASF, Clariant, Ineos, Sasol
	Ethylenoxid (EO)	BASF, Clariant, Ineos, Sasol
	Methyl methacrylat	BASF, Röhm
	Vinylchlorid (VCM)	Dow, Inovyn, Vestolit, Vynova, Westlake Vinnolit
	Cumol	BP, Domo, Ineos
	Phenol (+ teilw. Aceton)	Domo, Ineos, Rütgers
	Bisphenol A (BPA)	Covestro, Olin
	Cyclohexan (CX)	BASF, BP, Holborn Europa
	Caprolactam	BASF, Domo
	Styrol (SM)	BASF, Styrolution, Trinseo
	Terephthalsäure (PTA)	PCK Schwedt
Chemische Endprodukte	Industrieruß	Deutsche Gasrußwerke, Orion Engineered Carbons
	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS)	Zum Beispiel 3M/Dyneon, Allessa/WeylChem, Archroma, Solvay, Daikin Refrigerants, F-Select, Fluoron, Lanxess, Pharmpur, W. L. Gore
	Polyethylen (LDPE)	Dow, Ineos, LyondellBasell
	Polyethylen (LLDPE)	Dow, Ineos
	Polyethylen (HDPE)	OMV/Borealis, LyondellBasell, Sabic
	Polypropylen (PP)	Braskem, LyondellBasell, Sabic
	Poly(vinyl chlorid) (PVC)	Inovyn, Vestolit, Vynova, Westlake Vinnolit
	Polycarbonate (PC)	Covestro, Trinseo
	Poly(methyl methacrylat) (PMMA)	Polycasa, Röhm
	Polystyrol (PS)	BASF, Trinseo
	Expandierbares Polystyrol (EPS)	BASF, Jackson, Ravapor
	Polyamide (PA)	ATT Polymers, BASF, Domo, DuPont, Evonik, Lanxess, PHP Fibers
	Poly(ethylen terephthalat) (PET)	Equipolymers, Indorama, Märkische Faser, Trevira
	Titandioxid (TiO ₂)	Kronos Titan, Venator
	Weichmacher	BASF, Celanese, Evonik, Ineos, Lanxess, Oxea/Oxxynova und andere

3. Importe, Exporte und Infrastruktur

Die chemische Industrie mit ihrer Vielzahl von voneinander abhängigen Produkten ist besonders stark an produktspezifische Infrastruktur mit hohen Investitionskosten gebunden, was die Entwicklungsmöglichkeiten und die Flexibilität der Unternehmen in Bezug auf Änderungen der Marktsituation wie angepasste Umweltgesetzgebung oder steigende Rohstoffpreise einschränkt. Dies umfasst nicht nur die Infrastruktur für den Sektor selbst, sondern auch die Rohstoffversorgung in den vorgelagerten Prozessschritten (wie der Rohölraffination) und auch die Infrastruktur für Nachfolgeprozesse zu der Kundschaft. Grundsätzlich sind die Transporte über mehrere Wege möglich. Dies umfasst besonders den Transport auf der Schiene, per Pipeline, per Schiff oder per LKW.

Der Warentransport von chemischen Produkten auf der Schiene ist dabei grundsätzlich sicher, zuverlässig und umweltfreundlich, aber Deutschland hat hier großen Nachholbedarf bei der Instandhaltung und dem Ausbau der überlasteten Infrastruktur, was nicht nur Passagiere der Deutschen Bahn zu spüren bekommen, sondern auch der Frachtverkehr der chemischen Industrie, der sich in vielen Fällen mit dem Passagierverkehr dieselbe Infrastruktur teilen muss. Ein Beispiel für diese Probleme ist der Güterverkehrskorridor Nr. 1 der Europäischen Union, der Genua in Italien über die Schweiz und Deutschland mit Rotterdam und Antwerpen per Schiene mit hoher Kapazität und weitgehender Entflechtung von Personen- und Frachtverkehr verbinden soll, wo aber der deutsche Ausbau speziell auf der Strecke Basel–Karlsruhe massiv verzögert ist und trotz der Planungen in den 1980er Jahren aktuell erst etwa 2040 fertig werden soll. Gerade bei dieser Hauptverkehrsachse handelt es sich für die chemische Industrie in Deutschland um kritische Infrastruktur, was durch den Schaden an den Bahngleisen und die daraus entstehenden Streckensperrungen bei Rastatt südlich von Karlsruhe im Jahr 2017 eindrücklich belegt worden ist. Da viele Teile der Bahntrassen außerhalb Deutschlands wie zum Beispiel in der Schweiz schon fertiggestellt worden sind, wird von den anderen beteiligten Ländern eine Umgehung Deutschlands über Frankreich erwogen, was das Risiko einer infrastrukturellen Benachteiligung von deutschen Chemieunternehmen insbesondere im Gebiet Karlsruhe–Mannheim/Ludwigshafen–Frankfurt am Main–Rheinland/Ruhrgebiet bedeutet. Gerade in diesem Gebiet sind eine Vielzahl an chemischen Betrieben angesiedelt.

Gerade die Verlässlichkeit der Infrastruktur ist für die chemische Industrie mit ihrem hohen Rohstoffdurchsatz von besonderer Bedeutung, und hier haben besonders Pipelines Vorteile gegenüber anderen infrastrukturellen Alternativen. Gleichzeitig können sie aber auch die Flexibilität im Transport einschränken, was in **Abbildung 4** deutlich wird. Dort sind die Rohölpipelines in Deutschland sowie die damit verbundenen Erdölraffinerien dargestellt. Innerhalb Deutschlands sind drei größere Rohölpipeline-Teilsysteme anzutreffen, die untereinander nicht verbunden sind [28], sowie eines ganz speziell für die Klesch-Raffinerie in Schleswig-Holstein. Jedes dieser Teilsysteme verfügt über Verbindungen zu Erdölimporthäfen, die mit ihrer speziellen Lager- und Umladeinfrastruktur speziell für den Bezug von Rohöl ausgestattet sind. Darüber hinaus sind der südliche Pipelineteil, der die Raffinerien in Bayern und Baden-Württemberg versorgt, und der nordöstliche Teil, der Raffinerien in Sachsen-Anhalt und Brandenburg versorgt, an das aus Russland kommende osteuropäische Pipelinenetz angeschlossen. Mit dem Wegfall russischer Erdölimporte müssen diese Raffinerien jetzt über die Häfen in Rostock, Danzig in Polen oder Triest in Italien versorgt werden. Der nordwestliche Teil, der per Schiff aus Rotterdam oder Wilhelmshaven versorgt wird, ist hingegen von osteuropäischer Transportinfrastruktur unabhängig.

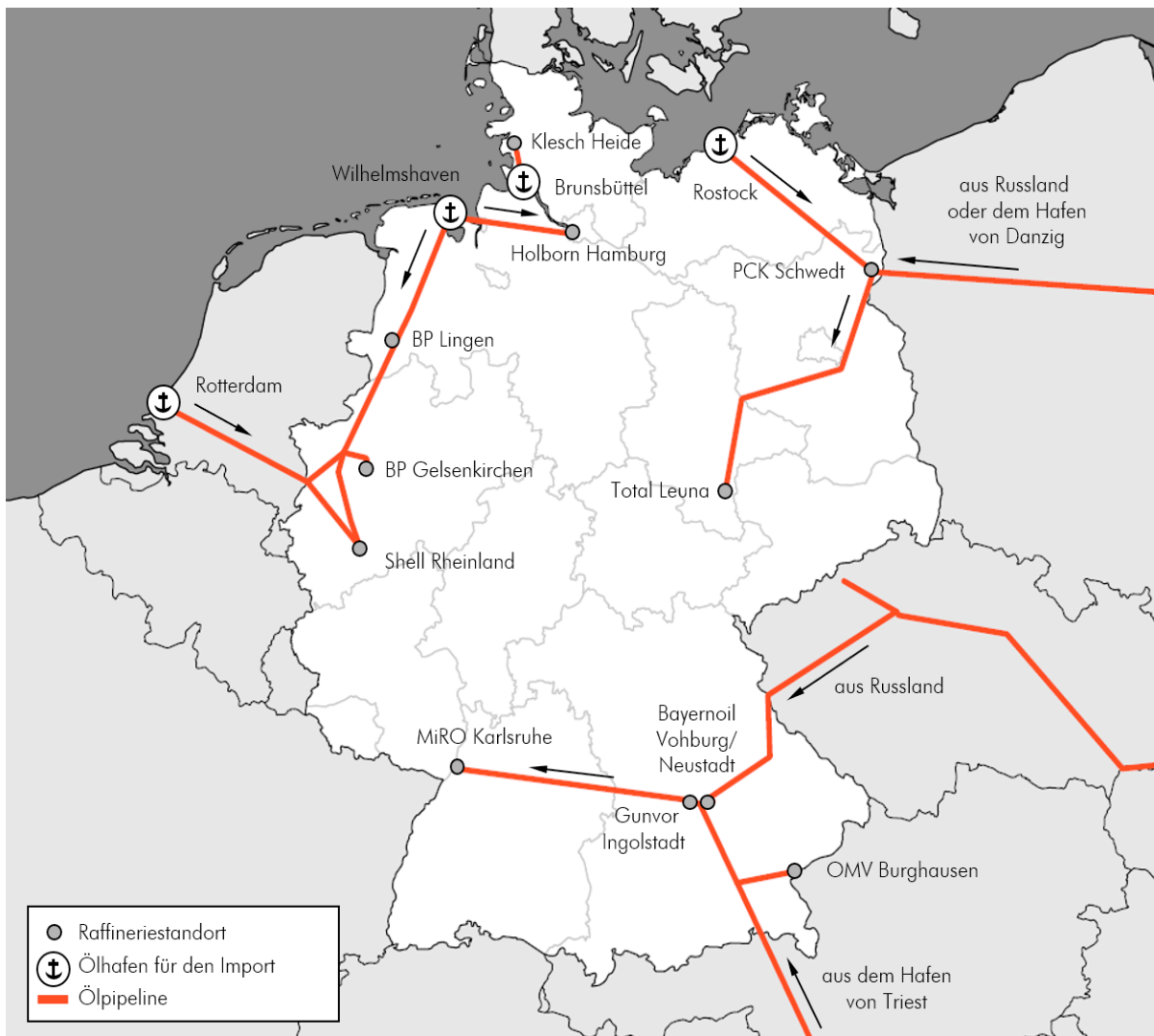


Abbildung 4: Versorgung der Raffinerien in Deutschland mit Rohöl per Pipeline (basierend auf Daten von [28, 80] und Informationsmaterial der Betreiber)

Eine ähnliche Dreiteilung der Infrastruktur lässt sich nicht nur beim Erdöl, sondern auch bei den Versorgungspipelines mit Erdgas beobachten (**Abbildung 5**). Diese hat für die chemische Industrie in Deutschland eine noch unmittelbarere Bedeutung, weil sie direkt das Erdgas als Energieträger konsumiert, anstatt wie im Fall von Erdöl die weiterverarbeiteten Zwischenprodukte zu beziehen. Die Gasinfrastruktur ist dabei wesentlich dichter und stärker integriert als die Infrastruktur für Rohöl, weil neben den Großverbrauchern in der chemischen Industrie noch viele weitere industrielle Kunden sowie auch viele Privathaushalte mit Erdgas versorgt werden müssen. Hier können drei Regionen „West/Südwest“, „Nordost“ und „Süd/Südost“ unterschieden werden [32], die aber anders als beim Erdöl untereinander verbunden sind und so bei Fehlmengen in einzelnen Regionen bis zu einem gewissen Grad für Ausgleich sorgen können. Die 2023 geplanten und im Schnellverfahren gebauten oder im Bau befindlichen Terminals für Flüssigerdgas („Liquefied Natural Gas“ [LNG]) sollen vor allem in die Regionen „West/Südwest“ und „Nordost“ einspeisen, um seit 2022 wegfallende Importerdgasmengen aus Russland zu ersetzen, aber ob eine spätere Umwandlung in Wasserstoff- oder Ammoniakterminals wie mittelfristig geplant möglich ist, wird aus technischen und ökonomischen Gründen zumindest stark angezweifelt [38]. Außerdem ist nicht klar, ob die hohen Importkapazitäten für teures LNG wirklich notwendig sind.

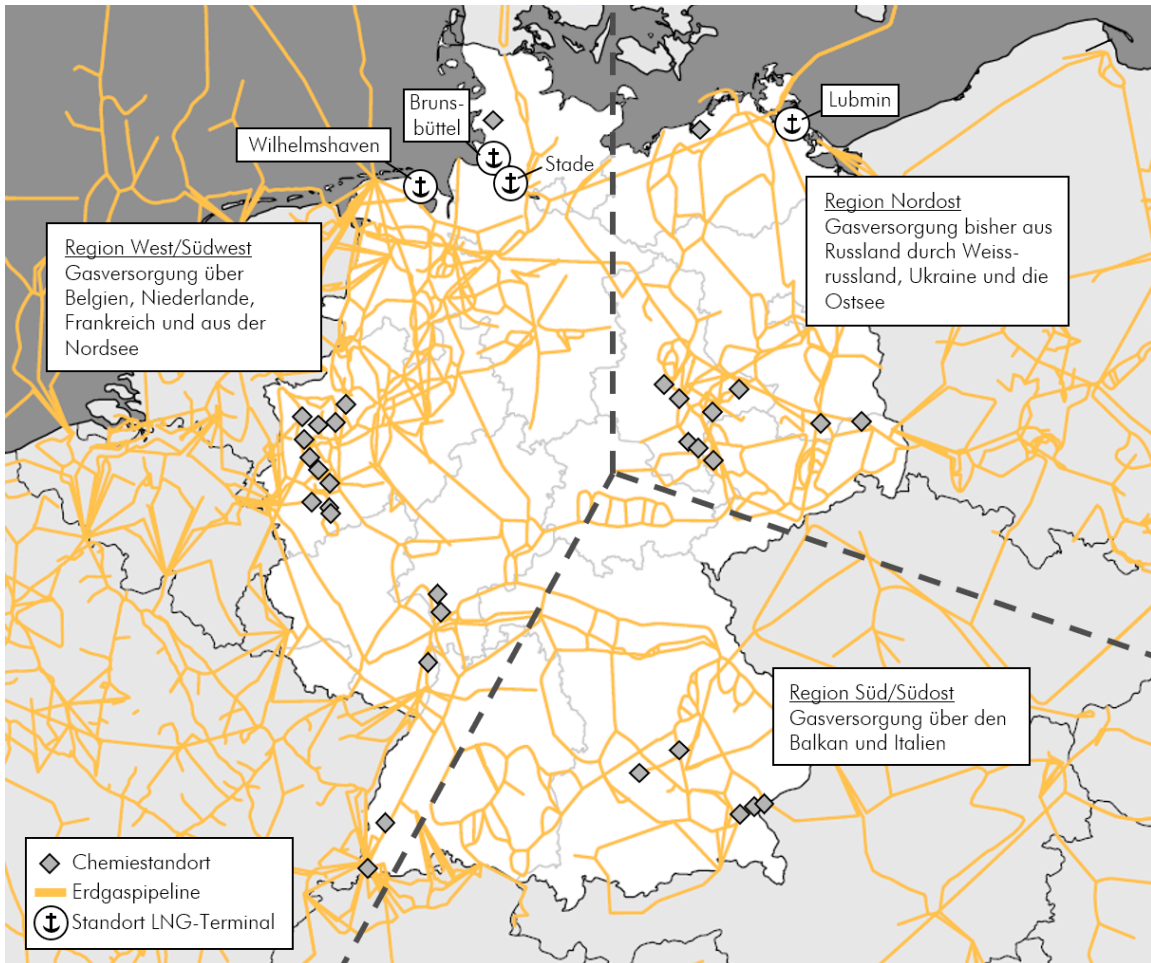


Abbildung 5: Netzwerk aus Erdgaspipelines in Deutschland und wesentliche Chemiestandorte (basierend auf Gasinfrastrukturdaten von [21, 32])

Weitere Pipelinenetze für die chemische Industrie in Deutschland existieren für spezielle Produkte, wo diese zwischen festen Start- und Endpunkten in größerer Menge transportiert werden müssen. Aus historischen Gründen ist dabei die Integration der Infrastruktur zwischen alten und neuen Bundesländern noch eingeschränkt. In **Abbildung 6** sind beispielhaft die Pipelines für den Ethylen-Transport [21] dargestellt, aber weitere Pipelines zum Beispiel für die Distribution von Wasserstoff im Rheinland und Ruhrgebiet oder im Raum Leuna, Schkopau, Böhlen und Bitterfeld existieren bereits ebenso wie zum Beispiel Produktpipelines für Flugzeugtreibstoffe von Raffinerien zu Flughäfen oder Pipelines für weitere technische Gase wie Sauerstoff oder Stickstoff [40]. Am Beispiel der Ethylen-Pipelines wird dabei deutlich, dass die Integration nicht an den deutschen Staatsgrenzen aufhört, sondern zum Beispiel bis nach Tschechien, nach Belgien oder in die Niederlande reicht, wo weitere chemische Betriebe an die bestehenden Netzwerke angeschlossen sind und so effizient und kostengünstig Produkte zwischen einzelnen Standorten transportieren können. Das betrifft nicht nur den Transport und Handel zwischen unterschiedlichen Unternehmen, sondern auch den unternehmensinternen Transport, zum Beispiel wenn Dow Chemicals im Rahmen des „Dow Olefinverbunds“ Ethylen aus dem Steamcracker in Böhlen einsetzen möchte, um in Schkopau Polyethylen herzustellen, oder um in Stade das Ethylen mit Chlor zu Ethylendichlorid zu verarbeiten, das dann weiter zu Poly(vinyl chlorid) (PVC) verarbeitet werden kann. Eine ähnliche Integration gibt es zwischen den zwei größten Standorten der BASF in Ludwigshafen und in Antwerpen in Belgien, oder zwischen den Standorten von Ineos bei Köln, in



Abbildung 6: Das Distributionsnetzwerk für Ethylen per Pipeline in Deutschland und den angrenzenden Nachbarländern (basierend auf Daten von [40, 80] und Betreiberangaben)

anderen Städten von Nordrhein-Westfalen und in Antwerpen. Die Verbindung zwischen bayerischen Ethylen-Produzenten und -verbrauchern und dem Ethylen-Netzwerk in Belgien, den Niederlanden und Westdeutschland existiert dabei als Ethylen-Pipeline Süd (EPS) erst seit 2012 und verbessert die Versorgungssicherheit mit Ethylen in Bayern erheblich.

Mit der Rheinschifffahrt existiert zudem eine weitere unabhängige und kostensparende Transportmöglichkeit von den einzelnen Chemiestandorten in West- und Südwestdeutschland bis zu den großen niederländischen und belgischen Im- und Exporthäfen. Infrastrukturell ist der Rhein damit für viele große Chemiestandorte in Deutschland von besonderer Bedeutung, aber spielt darüber hinaus auch eine wesentliche Rolle in der Versorgung mit Kühlwasser, Prozesswasser oder zur Entsorgung geklärter Industrieabwässer. Diese Abhängigkeit ist besonders von Bedeutung, wenn bedingt durch hohe sommerliche Temperaturen und ausbleibende Regenfälle der Wasserstand des Rheins niedrig ist. Dies kann dazu führen, dass die Frachtschiffe auf dem Rhein, die auch Güter der chemischen Industrie transportieren, nur teilbeladen unterwegs sein können, was die Kosten für diese Form des Transports deutlich erhöht und gleichzeitig die Transportkapazität einschränkt. Zudem können hohe Wassertemperaturen zur gesetzlichen Einschränkung der Wassernutzung zu Kühlzwecken oder bei der Einleitung führen. In extremen

Fällen führt dies zur Drosselung von Produktionsmengen bei chemischen Betrieben wie auch bei anderen großen Industriebetrieben. Sofern Kraftwerke ebenfalls davon betroffen sind, können die Auswirkungen auf die chemische Industrie damit nicht nur die eigenen Prozesse betreffen, sondern zusätzlich auch die Energiegestehungskosten.

Welch besondere Bedeutung die Integration des Chemiesektors in Deutschland mit denen in den Nachbarländern – besonders den Niederlanden und Belgien – hat, wird bei der Analyse der deutschen Im- und Exporte von Chemikalien (**Abbildung 7**) deutlich. Hier zeigt sich, dass es eine stärkere regionale Konzentration bei den Importen als bei Exporten gibt, wodurch weniger Länder Produkte zuliefern als am Ende Abnehmer da sind. Die Niederlande (28 Prozent) und Belgien (24 Prozent) sind für fast die Hälfte der deutschen Importe verantwortlich, während diese Länder zwar auch zu den Hauptabnehmern gehören (und einen Teil der Produkte dann weiterverkaufen), aber im Export mit Anteilen von 21 Prozent (Niederlande) und 14 Prozent (Belgien) deutlich weniger wichtig sind als für den Import [1]. Der deutsche Chemiesektor ist langfristig (**Abbildung 8**) Nettoexporteur, was nur durch die Energiekrise im Jahr 2022 einen wesentlichen Einbruch erlebt hat. Aber diese Betrachtungsweise allein würde die Relevanz des Chemiesektors für die deutsche Volkswirtschaft noch unterschätzen, weil die Produkte der deutschen Chemieindustrie auch für andere wichtige deutsche Exportgüter, wie speziell die Produktion von Automobilen, eingesetzt werden. Über diese komplexe wechselseitige Abhängigkeit zwischen dem Automobilsektor und dem Chemiesektor ist es auch zu verstehen, dass viele aktuelle Investitionspläne deutscher Chemieunternehmen im Bereich des Strukturwandels der Automobilbranche angesiedelt sind, indem zum Beispiel vermehrt Kapazitäten für Vorprodukte der Halbleiterindustrie ausgebaut werden [31].

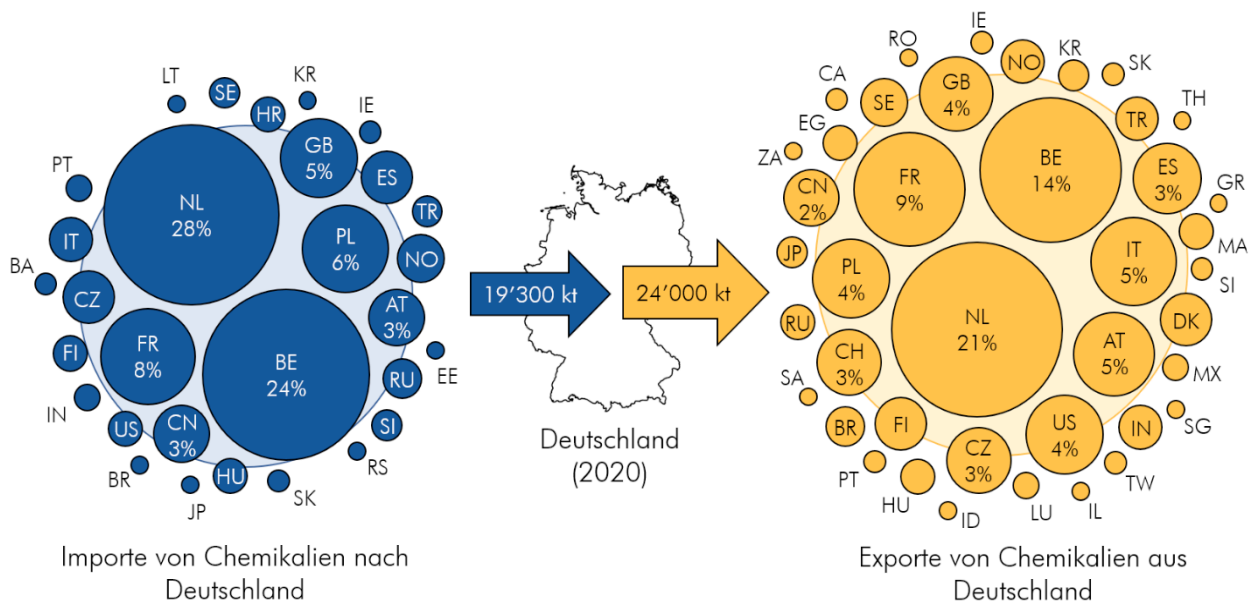


Abbildung 7: Mengenvergleich der deutschen Importe und Exporte von Chemikalien im Jahr 2020 nach Ursprungs- und Zielländern (Kreisfläche ist jeweils proportional zur Menge, Daten entnommen von Eurostat [1], sehr kleine Anteile sind nicht abgebildet)

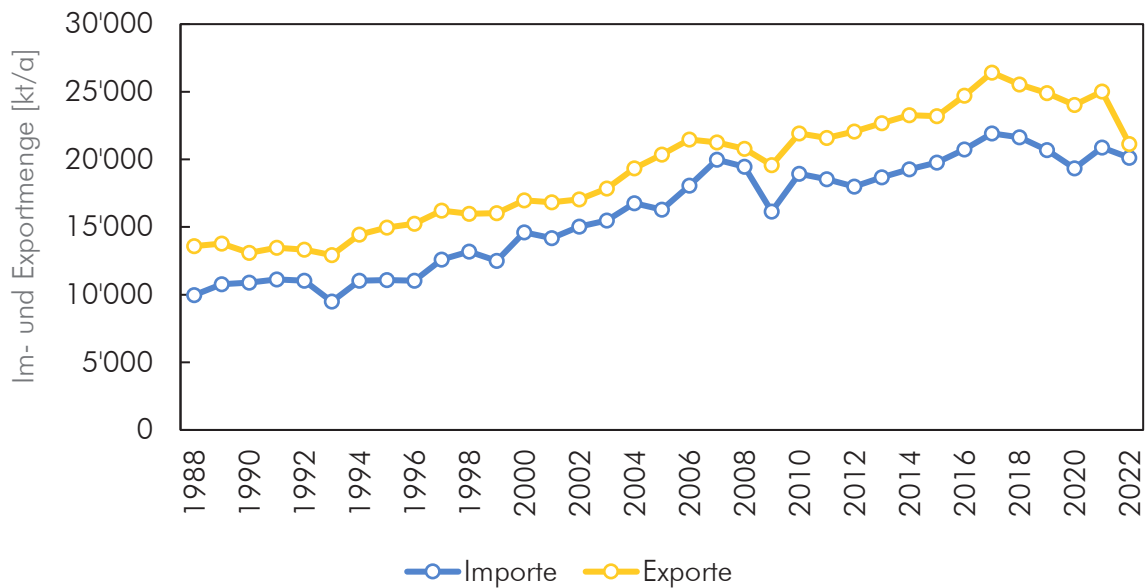


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der gesamten deutschen Importe und Exporte von Chemikalien zwischen 1988 und 2022 (Daten entnommen von Eurostat [1])

4. Standorte, Kapazitäten und Produktionsmengen

Die Standorte der chemischen Industrie in Deutschland haben sich historisch entwickelt. Aufgrund der besonderen infrastrukturellen Anforderungen gibt es eine starke Konzentration bei der Standortwahl, weil nur so auf vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden konnte. Außerdem sind die einzelnen Anlagen auch stofflich verbunden, weil Haupt- und Nebenprodukte des einen Prozesses für andere Prozesse als Ausgangsmaterial dienen. Dies vermeidet weitgehend unnötige Transport- und Lagerkosten zwischen weit verteilten Standorten und auch die Beseitigung von unerwünschten Nebenprodukten. Damit hat die Komplexität der chemischen Herstellungsketten zu sogenannten „Verbundstandorten“ geführt, die intern zwischen einzelnen Anlagen ein hohes Maß an Integration aufweisen. Besonders Zwischenprodukte der chemischen Industrie sind häufig an einzelnen Standorten konzentriert, während Endprodukte (wie zum Beispiel die Herstellung von Chemiefasern) vermehrt auch außerhalb von Verbundstandorten, dafür aber näher bei der Endkundschaft zu finden sind. Beispiele dafür sind in **Abbildung 9**, einer Repräsentation der regionalen Dichte der rund 2.000 registrierten chemischen und petrochemischen Anlagen in Deutschland, ersichtlich.

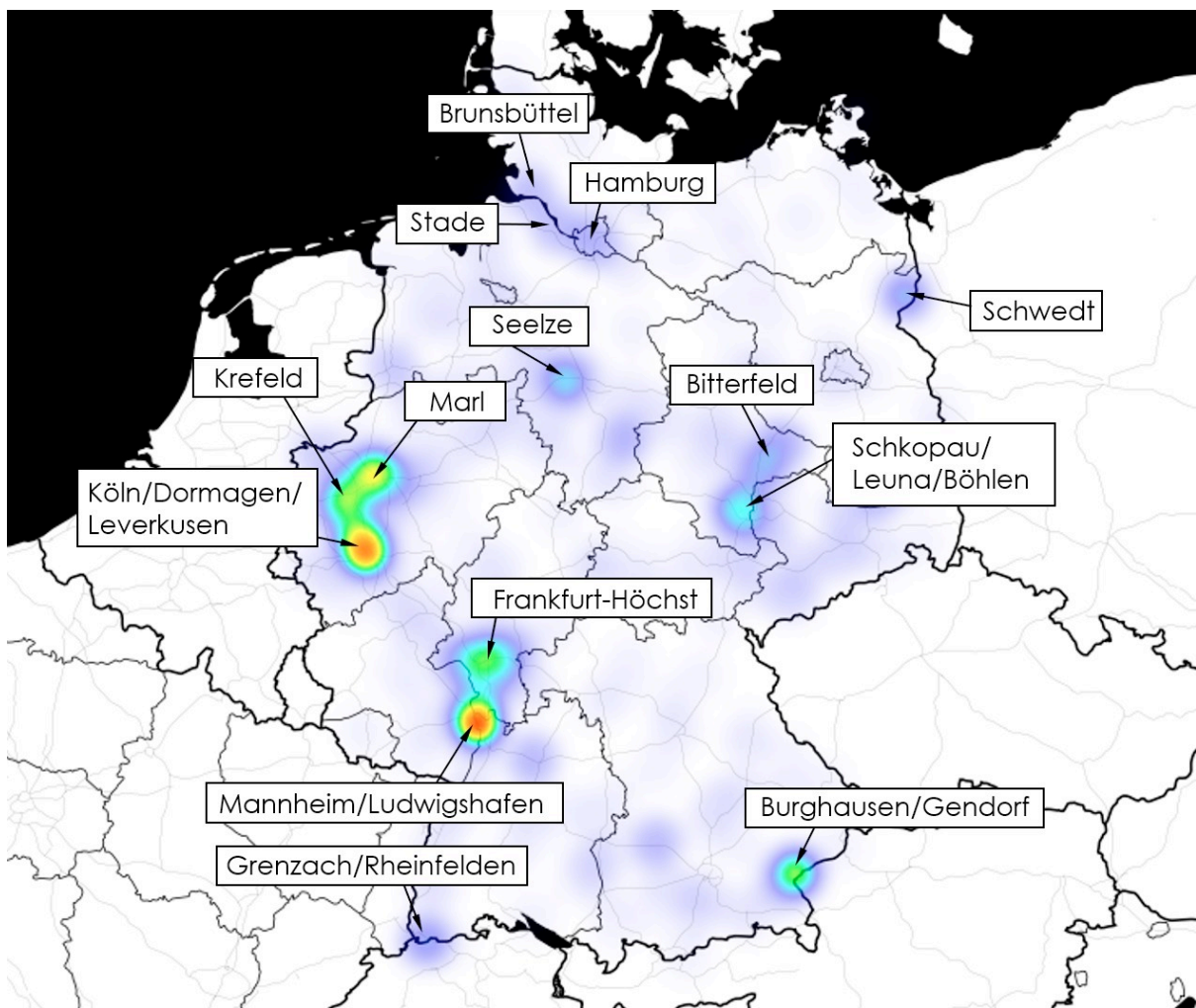


Abbildung 9: Verteilungsdichte von rund 2.000 registrierten chemischen und petrochemischen Anlagen in Deutschland (basierend auf Daten des Umweltbundesamtes [43], Basiskarte von [66])

Historisch wurden viele der Verbundstandorte von einem einzigen Unternehmen betrieben. Beispiele dafür sind etwa die Bayer-Standorte in Leverkusen, Dormagen und Krefeld-Uerdingen. Mit der Umstrukturierung des Geschäftsprofils von Unternehmen wie Bayer und der damit einhergehenden Ausgliederung von Spezialchemikalien (als Lanxess) und Massenchemikalien (als Covestro) sowie der Ausgliederung des Standortbetriebs (als Currenta) werden viele Standorte mittlerweile von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Unternehmen genutzt. Ausnahmen gibt es dennoch zum Beispiel im Fall der BASF in Ludwigshafen und Mannheim, wo die BASF ihren Hauptstandort hat und immer noch fast alle Betriebsbereiche des Standortes selbst übernimmt. Ausnahmen stellen dabei nur die Energieversorgung dar, wo zum Beispiel das 1997 gebaute Gas- und Dampfkraftwerk der BASF gehört, aber von RWE betrieben wird [41]. Weiterhin ist von der BASF die Produktion der Styrol-Folgeprodukte wie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), was zum Beispiel eines der Polymere zur Herstellung von Klemmbausteinen für Kinder darstellt, an Ineos verkauft worden, wodurch dieses Unternehmen ebenfalls am Standort Ludwigshafen produziert.

Die Konzentration von chemischen Betrieben orientiert sich in vielen Fällen an den Arten der verarbeiteten Chemikalien. Der Standort der BASF in Ludwigshafen ist dabei einer der komplexesten global und verarbeitet eine sehr breite Palette an chemischen Produkten, hat sich aber historisch aus der Stickstoffchemie (Düngemittelproduktion) entwickelt und weist auch heute noch viele Produkte und Prozesse auf, die mit Stickstoff in Verbindung stehen. Dies umfasst nicht nur Ammoniak, Harnstoff und Salpetersäure, die weiterhin wesentlich zur Düngemittelproduktion eingesetzt werden, sondern umfasst zusätzlich auch beispielsweise Ethanolamine (die zum Beispiel zur Reinigung von Gasen eingesetzt werden und in Zukunft bei der Abscheidung von Kohlendioxid aus Verbrennungsgasen im Rahmen von „Carbon Capture and Storage“ [CCS] wichtig werden könnten) und Polyamide, die als Polymer besonders gut an spezielle Anwendungen wie in der Automobilindustrie oder dem Maschinenbau angepasst werden können. Einige dieser Polyamide sind im Endkonsum unter den Handelsnamen Nylon oder Perlon als Chemiefasern für Textilien und andere Anwendungen wie Instrumentensaiten bekannt, auch wenn diese nur einen sehr kleinen Teil des Polyamid-Produktspektrums ausmachen.

Viele Arten von organischen Chemikalien wurden bei der BASF wie auch in ganz Deutschland in der Vergangenheit kohlebasiert hergestellt, was zur Ansiedlung von chemischen Betrieben in der Nähe der großen deutschen Kohlevorkommen (etwa in Mitteldeutschland oder im Rheinland und Ruhrgebiet) oder – aufgrund des extrem hohen Elektrizitätsbedarfs in der Verarbeitung von Kohle zum chemischen Zwischenprodukt Calciumcarbid – in der Nähe von preiswerten und verlässlichen Energiequellen wie etwa per Wasserkraft am Rhein oder an der Alz geführt hat.

Auch wenn die kohlebasierte Chemie in Deutschland mittlerweile weitgehend eingestellt ist und zum Beispiel die großen verbliebenen Anlagen zur Calciumcarbid-Produktion in Schkopau nach der Wende aufgrund hoher Kosten geschlossen worden sind, sind die zugehörigen Chemiestandorte weitgehend erhalten geblieben und haben vor allem die Vorketten auf erdölbasierte Verfahren umgestellt. Eine Ausnahme stellt hier die Alzchem Group in Bayern dar, die Carbid-basierte Nischenprodukte mit Kohle in Bayern herstellt und international vertreibt. Darüber hinaus werden auch bei den verbleibenden Kokereien in Deutschland neben Koks für die Metallindustrie chemische Nebenprodukte wie Benzol oder Naphthalin gewonnen.

Im Rheinland und Ruhrgebiet sowie in Mitteldeutschland ist die Umstellung auf erdölbasierte Verfahren hingegen vollzogen worden und so finden sich in diesen Regionen heute viele große Anlagen zur Produktion erdölbasierter Massenpolymere wie etwa verschiedenste Sorten von Polyethylen und Polypropylen. Diese beiden Arten von Polymeren stellen international und auch in

Deutschland die größten Produktionsmengen unter allen Polymeren dar [16, 19]. Sie sind einfach zu produzieren und besitzen ein weites Anwendungsspektrum, vor allem als Verpackungsmaterial. Große Anlagen zur Herstellung befinden sich beispielsweise in Oberhausen, Dormagen, Gelsenkirchen, Wesseling und Hürth-Knapsack in Nordrhein-Westfalen sowie in Schkopau in Sachsen-Anhalt, während andere Anlagen auch noch in Burghausen und Münchsmünster in Bayern und in Frankfurt am Main in Hessen zu finden sind [4]. Zu den Betreibern dieser Anlagen gehören beispielsweise die Unternehmen LyondellBasell, Braskem, Borealis, Sabic Europe, Ineos, Dow, Versalis und Celanese.

Neben den beiden Polymeren Polyethylen und Polypropylen ist in Deutschland mengenmäßig vor allem auch die Produktion von Poly(vinyl chlorid) (PVC) sehr relevant. Neben anderen Anwendungen wird es vor allem im Bausektor eingesetzt [19], wo es zum Beispiel der Herstellung von Rohren dient. Seine Herstellung basiert neben Ethylen als Rohstoff auch auf Chlor, was einerseits in der Verbrennung von PVC-Abfällen durch das Risiko der Entstehung giftiger Dioxine ein Problem darstellt, aber gleichzeitig die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen reduziert, weil Chlor in erster Linie bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse von Steinsalz (NaCl) gewonnen wird. Da Chlor (Cl_2) bei Umgebungsbedingungen gasförmig und zudem auch giftig ist, findet die Herstellung normalerweise direkt am Verwendungsort statt, damit es nicht transportiert werden muss. Deutschland besitzt eine ausgeprägte Chlorherstellungsindustrie, die nicht nur für PVC, sondern auch für viele andere chlorhaltige Chemikalien Chlor bereitstellt. Die Standorte sind dabei weiter verteilt und die Anlagenkapazitäten variieren stärker als bei Polyethylen und Polypropylen. Die größten Anlagen zur Herstellung von Chlor finden sich in Stade (Dow), Dormagen und Leverkusen (Covestro), Frankfurt (Nobian) und Marl (Vestolit) [45]. Nebenprodukt der Chlorherstellung ist Natriumhydroxid (NaOH), was infolge der großen Mengen an Chlorproduktion auch in großen Mengen in Deutschland anfällt und zum Beispiel als Natronlauge verwendet werden kann.

Ein weiteres Nebenprodukt petrochemischer Prozesse ist die Herstellung von Schwefel, der dann wieder zu Schwefelsäure verarbeitet werden kann. Die Schwefelsäure wird beispielsweise in der Metallindustrie beim Aufschluss von Mineralien verwendet. Elementarer Schwefel wird vor allem aus den schwefelhaltigen Verunreinigungen des Rohöls gewonnen, die entfernt werden müssen, damit Raffinerieprodukte wie Benzin oder Diesel die strikten EURO-6-Grenzwerte einhalten, weil sonst bei der Verbrennung im Straßenverkehr große Mengen von schädlichem Schwefeldioxid freigesetzt werden würden. Die größte Kapazität zur Herstellung von Schwefelsäure hat der Kupferproduzent Aurubis in Hamburg, aber auch die BASF in Ludwigshafen oder Venator in Duisburg betreiben Anlagen mit hohen Produktionsmengen [47].

Zu den Anlagen mit den größten Kapazitäten und Produktionsmengen gehören schließlich auch die Anlagen zur Herstellung von Ammoniak, was vor allem in Düngemitteln, aber wie zuvor bereits erwähnt auch in anderen stickstoffhaltigen Produkten wie etwa Sprengstoffen Anwendung findet. In der Vergangenheit gab es eine Vielzahl an kleineren Anlagen, aber mittlerweile konzentriert sich die Produktion von Ammoniak auf wenige Standorte, wobei in Ludwigshafen (BASF), Lutherstadt Wittenberg (SKW Piesteritz) und Dormagen (Ineos) Erdgas als Rohstoff eingesetzt wird, während am Standort Brunsbüttel (Yara) ursprünglich Schweröl aus der Erdölraffination verarbeitet wurde [47]. Weil diese Verfahrensvariante zu höheren prozessbezogenen CO_2 -Emissionen führt, wurde vor einigen Jahren ein Projekt umgesetzt, das auch einen Wechsel zwischen Schweröl und Erdgas ermöglicht [42].

Im Rahmen dieser Studie wurden neben den wesentlichen Kapazitäten für chemische Produkte in Deutschland auch dazugehörige Produktionsmengen erhoben (**Abbildung 10**). Dies beschränkt

sich vor allem auf Massenchemikalien und stößt bei Kleinanlagen und stark heterogenen Produktgruppen an klare Grenzen. Für die betrachteten Chemikalien kann man häufig eine hohe Auslastung der großen Anlagen um durchschnittlich 80 bis 90 Prozent beobachten, wobei spezialisiertere Chemikalien mit kleineren Kapazitäten und Produktionsmengen stärkere Schwankungen aufweisen können. Grundsätzlich sind Auslastungen, wie sie hier beobachtet werden, typisch für europäische Verhältnisse, weil der Markt einigermaßen stabil ist und man noch Pufferkapazitäten in den Anlagen vorsieht, aber auch weil durch regelmäßige Wartungsarbeiten und gelegentliche Störfälle eine Vollauslastung nicht erreicht wird. Zudem kann ein Betrieb an der Kapazitätsgrenze oder leicht darüber die Anlagenteile stark belasten und zu vorzeitiger Materialermüdung führen, was die Lebensdauer der Anlagen und auch die Leistung einzelner Bauteile einschränken würde.

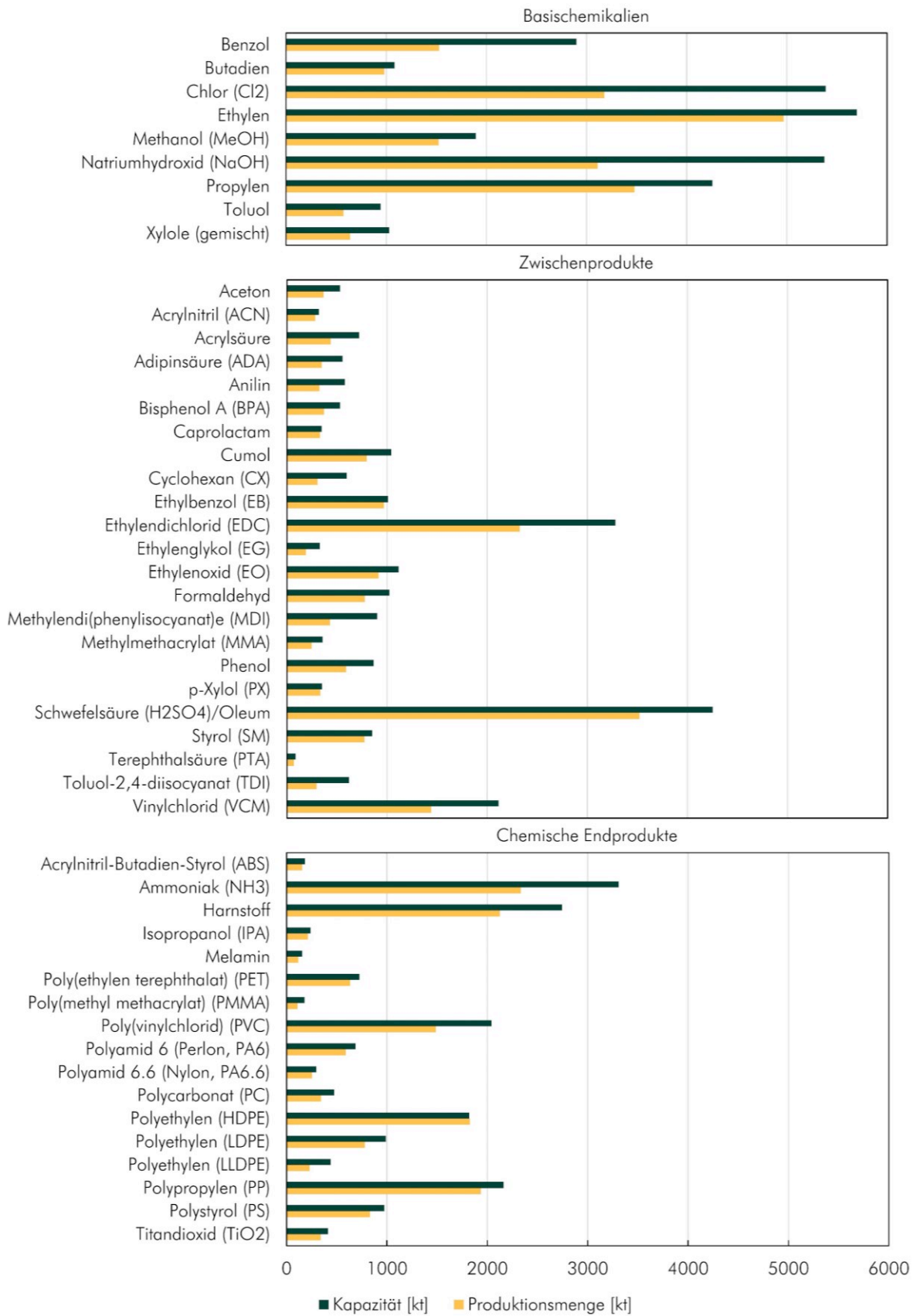


Abbildung 10: Produktionskapazitäten für wesentliche chemische (Zwischen-)Produkte in Deutschland im Jahr 2020 und die zugehörigen Produktionsmengen (basierend auf PRODCOM [1], Meti [4] und diversen anderen Datenquellen)

5. Erdölraffinerien und Steamcracker im Fokus

Von besonderer Bedeutung für die Herstellung von Chemikalien sind Erdölraffinerien und Steamcracker. Die Erdölraffinerien stellen dabei aus dem Rohöl, das aus der Ölförderung stammt, verschiedene Produkte her, wovon Treibstoffe wie Autobenzin, Diesel oder Kerosin für Flugzeuge den größten Teil ausmachen. Weitere Produkte können Chemikalien oder Ausgangsstoffe für die Herstellung von Chemikalien wie etwa das Stoffgemisch Naphtha (auch Rohbenzin genannt) sein (**Abbildung 1**). Naphtha ist der Hauptrohstoff der Steamcracker in Deutschland, die dieses Produkt mit hohem Energieeinsatz in Basischemikalien umwandeln können. In Deutschland werden aktuell an elf Standorten konventionelle Erdölraffinerien betrieben [27], die sich im Hinblick auf ihre Integration mit der chemischen Industrie in Deutschland stark unterscheiden (**Abbildung 11**).

In der Vergangenheit hat es in Deutschland in der Mitte des 20. Jahrhunderts einen Boom in der Gründung neuer Erdölraffinerien mit deutlichen Überkapazitäten gegeben [27], woraufhin in den 1980er Jahren Raffinerien mit zu niedrigem Anteil an hochwertigen Produkten und zu vielen Produkten mit geringem Wert (wie Schweröl) vielfach geschlossen wurden [63]. Danach kam es zu einer weitgehenden Stagnation in den gesamten deutschen Raffineriekapazitäten [27], auch wenn die Prozesse der Raffinerien immer weiter den Umweltstandards für die Produkte angepasst worden sind. Die Raffineriestandorte in Deutschland sind heute bis auf Ausnahmen [62] weitgehend stabil, aber die historische Entwicklung könnte sich wiederholen, wenn es aufgrund des weitgehenden Verbots von Verbrennungsmotoren in der Automobilindustrie keinen Bedarf mehr für Raffinerietreibstoffe geben sollte.

Die größten deutschen Raffineriekapazitäten finden sich in Nordrhein-Westfalen, in Süddeutschland bei München und Karlsruhe sowie im Berliner Umland [27] und korrelieren somit grob mit der Bevölkerungsdichte. Der Umsatzgrad des Rohöls zu Chemikalien fällt an den einzelnen Raffinerien sehr unterschiedlich aus, ist aber besonders hoch bei Shell im Rheinland im Süden Kölns, bei BP in Gelsenkirchen sowie der OMV in Burghausen. In all diesen drei Fällen sind die Absatzmärkte für die produzierten Chemikalien nah.

Andere Raffinerien wie Gunvor in Ingolstadt, Bayernoil in Vohburg oder die Holborn-Raffinerie in Hamburg weisen eine nur eine sehr niedrige Chemikalienkapazität auf, was heißt, dass diese zusätzliche Einnahmequelle im Fall einer geringeren Treibstoffnachfrage erst noch erschlossen werden müsste. Diese unterschiedlichen Produktausrichtungen der einzelnen Erdölraffinerien spiegeln sich auch deutlich in den jeweils eingesetzten Verfahren wider. Atmosphärische Destillation und Vakuumdestillation werden bei so gut wie allen Raffinerien als Standardverfahren und erste Auftrennschritte in der Verarbeitung des Rohöls eingesetzt und stellen normalerweise bereits die Triebkraft für einen Großteil des Energiebedarfs der Raffinerien dar [52].

Eine Ausnahme bei diesen Grundverarbeitungsschritten stellt die Raffinerie der OMV in Burghausen dar [61], denn dort setzt man keine Vakuumdestillation oder diverse andere Umwandlungs- oder Trennverfahren in der Raffinerie ein und speist stattdessen eine größere Menge der Zwischenprodukte in den integrierten Steamcracker ein, was auch bei der insgesamt kleineren Raffineriegröße zu einer vergleichsweise großen Chemikalienausbeute führt.

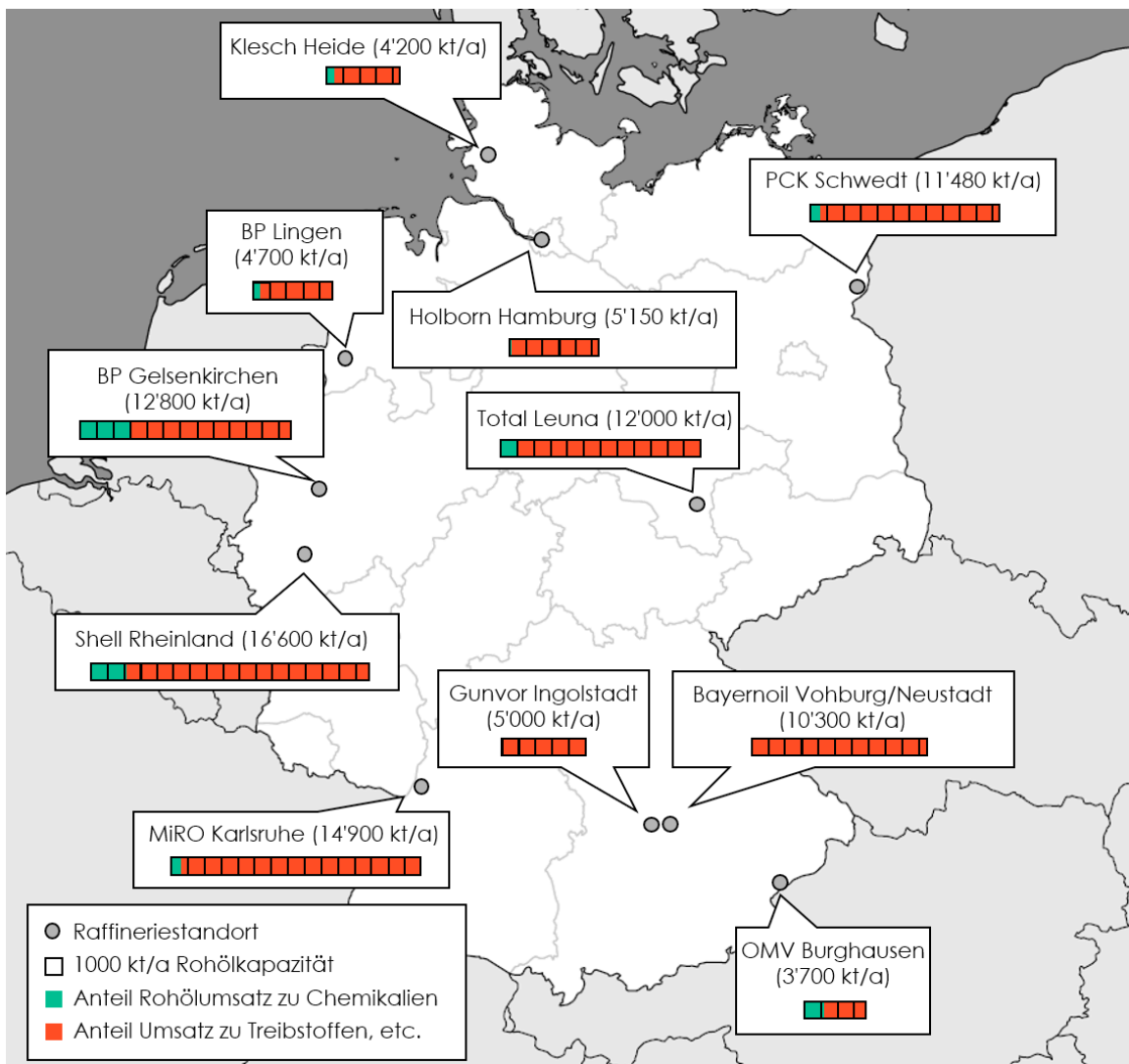


Abbildung 11: Konventionelle Erdölraffinerien in Deutschland im Jahr 2020, ihre Rohölkapazitäten und mögliche Umsetzung von Rohöl zu chemischen Produkten am jeweiligen Standort (basierend auf en2x [27] und Unternehmensangaben)

Hauptumwandlungsverfahren bei den Raffinerien ist das katalytische Cracken („Fluid Catalytic Cracking“ [FCC]) oder das Hydrocracken [27], die in jedem Fall optimiert auf die Dieselproduktion statt auf Benzin betrieben werden. Zur Verwertung von langkettigen und schweren Refinationsrückständen haben die Raffinerien in der Regel entweder eine Anlage zur Herstellung von Petrolkoks, der beispielsweise als günstiger Brennstoff in der Zementherstellung verwendet wird, von Kalzinat (als Elektrodenmaterial zur Elektrolyse) oder von Bitumen für den Straßenbau vorhanden [27].

Unter den Raffinerien sind vier mit einem Steamcracker integriert (Klesch, Heide; Shell, Rheinland; BP, Gelsenkirchen; OMV, Burghausen), während weitere deutsche Steamcracker an den Standorten von Ineos in Dormagen, LyondellBasell in Wesseling und Münchsmünster, der BASF in Ludwigshafen und Dow in Böhlen stehen [56] und dementsprechend ihre Rohstoffe von anderen Raffinerien beziehen müssen. Alle deutschen Steamcracker haben gemeinsam, dass sie einen wesentlichen Anteil von längerkettigen Kohlenwasserstoffen wie Naphtha oder Gasöl verarbeiten

und nur geringe Mengen von Ethan oder LPG (was stattdessen zum Beispiel in den USA sehr häufig ist) [56]. Daher ist die Produktausbeute für länger-kettige Moleküle wie Propylen im Verhältnis betrachtet hoch und steht der chemischen Industrie in größerem Umfang zur Verfügung. Als Brennstoff dieser Cracker werden in Deutschland in der Regel brennbare Abgase aus Raffinerieprozessen oder chemischen Prozessen verwendet, wobei zusätzlich Erdgas beigemischt werden kann [44].

Über den Betrieb von Steamcrackern hinaus ist auch eine weitergehende Produktion von Aromaten wie Benzol, Toluol oder Xylole sehr häufig bei Raffinerien in Deutschland anzutreffen [49]. Diese können zu vielfältigen Produkten der chemischen Industrie verarbeitet werden (wie etwa Polystyrol als Verpackungs- und Dämmmaterial oder Poly(ethylen terephthalat) [PET] für Getränkeflaschen und als Textilfasern), werden aber vor allem wegen der Grenzwerte in Treibstoffe abgeschieden und können so in ein verkäufliches Produkt umgewandelt werden. Die MiRO-Raffinerie in Karlsruhe stellt in diesem Fall aber zum Beispiel Benzol nicht direkt selbst her, sondern verkauft einen benzolhaltigen Produktstrom, den der jeweilige Käufer dann je nach Verwendungsabsicht aufarbeiten muss [55]. Der Standort der BASF in Ludwigshafen ist in der Nähe gelegen und besitzt eine große Anlage zur Aufarbeitung von Aromaten und wäre damit ein geeigneter Abnehmer [54].

Alle Raffinerien, die in Deutschland FCC verwenden, extrahieren aus dem Produktstrom der Anlagen zusätzliches Propylen [56], für das die Nachfrage in Deutschland im Chemiesektor hoch ist, während die OMV in Burghausen zwar kein FCC betreibt, dafür aber eine Metathese-Anlage [4], die in Zeiten ausreichend hoher Marktnachfrage nach Propylen mehr davon aus Ethylen und 2-Buten herstellen kann. In Gelsenkirchen wird neben der Extraktion von Propylen aus dem FCC noch einen C4-Schnitt (Moleküle mit vier Kohlenstoffatomen) abgetrennt, der als Zwischenprodukt zu Evonik nach Marl verkauft wird, wo damit diverse darauf beruhende Produkte wie etwa Weichmacher für die PVC-Industrie hergestellt werden können [57].

Eine Methanolproduktion aus Raffinerierückständen wird an drei Standorten betrieben (Shell Rheinland, Total Leuna und BP Gelsenkirchen) [13], wobei Methanol (mit seinen Verwendungsmöglichkeiten beispielsweise als Lösungsmittel oder als Frostschutzmittel) sehr günstig mit Erdgas herzustellen und damit auch auf dem Weltmarkt zu beziehen ist. Eine Weiterverarbeitung von Methanol zu Dimethylether (DME), der ebenfalls als Lösemittel wie auch als Treibstoff verwendet werden kann, wird von Shell im Rheinland betrieben [60]. Mehrere Standorte stellen aus Benzol Cyclohexan (ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Polyamiden) und BP sogar Cumol (ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Polycarbonaten und Epoxidharzen) her. Ausnahmslos alle konventionellen Raffinerien in Deutschland stellen Schwefel her, weil die Raffinerieprodukte ohnehin entschwefelt werden müssen, was dann für die Herstellung von Schwefelsäure (H_2SO_4) verwendet werden kann. Doch trotz dieser Herstellung von wichtigen Chemikalien wird nicht genug erzeugt, um den Bedarf der chemischen Industrie zu decken. So muss zum Beispiel rund die Hälfte des Naphthas als Rohstoff für die Steamcracker in Deutschland importiert werden [83].

Im Gesamtüberblick fällt die Integration der jeweiligen Raffinerien in den chemischen Sektor in Deutschland sehr unterschiedlich aus. In Deutschland sind beide Sektoren stark gekoppelt und stützen sich je nach aktueller Marktsituation gegenseitig, aber bei einer deutlichen Verschiebung dieses Verhältnisses sind die Auswirkungen besonders für wenig integrierte Raffinerien unklar. „Crude Oil to Chemicals“ (COTC) ist aktuell ein internationaler Trend [29, 30], bei dem sich Raffinerien aus der finanziellen Abhängigkeit von der Treibstoffproduktion lösen und von den profitableren Bedingungen im Chemiesektor profitieren möchten. Im internationalen Vergleich sind die höher integrierten deutschen Raffinerien im Bereich von 15 bis 30 Prozent vergleichsweise hoch in ihrer Umsetzung von Rohöl zu Chemikalien (**Abbildung 12**), erreichen aber bei weitem nicht die Anteile von modernen Raffinerien in China, die einen Umsatzgrad von 40 bis 50 Prozent erreichen können. Dort ist man technisch in dieser Hinsicht weiter, produziert dabei aber Massenchemikalien wie beispielsweise Xylole für die PET-Produktion, für die es in Deutschland keinen ähnlich großen Markt gäbe. Anlagen mit noch höheren Umsetzungsgraden (höher als 70 Prozent) befinden sich international in der Entwicklung.

In Deutschland laufen hingegen im Rahmen mehrerer aktueller Projekte die Vorbereitungen und Erprobungen für einen Wechsel der Wasserstoffproduktion bei Raffinerien, denn bisher wird immer

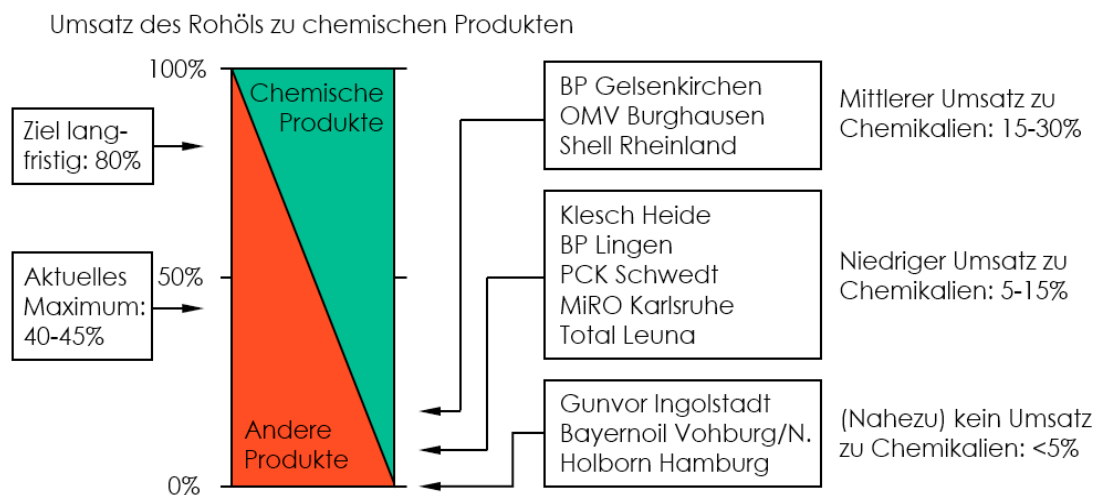


Abbildung 12: Einordnung der Umsetzung von Rohöl in chemische Zwischenprodukte an den Raffineriestandorten in Deutschland (basierend auf eigenen Berechnungen)

noch bei weitem der größte Anteil des Wasserstoffs entweder aus Erdgas oder aus Ölprodukten gewonnen. So ließe sich an den Erdölraffinerien möglicherweise das katalytische Reformieren zurückfahren, aber bislang sind die eingesetzten elektrolytischen Prozesse noch unbedeutend im Vergleich zu den Kapazitäten der bisherigen fossilen Wasserstoffproduktionsanlagen. Die Shell-Raffinerie Rheinland bei Köln betreibt hier mit einer elektrischen Leistung von zehn Megawatt bei einer Produktionsmenge von 1,3 Kilotonnen pro Jahr an Wasserstoff deutschlandweit aktuell die größte Elektrolyseanlage, die als Vorstufe zur großtechnischen Umsetzung dienen soll [58]. Eine solche Umstellung von Teilen der konventionellen Erdölraffination könnte zum Erschließen hochpreisiger Marktsegmente wie etwa bei nachhaltigeren Flugtreibstoffen („Sustainable Aviation Fuels“ [SAF]) beitragen, weil dort eine Abkehr von den fossilen Brennstoffen aufgrund ihrer Eigenschaften (Energiedichte und Verbrennungseigenschaften) schwierig ist. Shell Rheinland erprobt dieses Konzept für den Raffinerieteil in Wesseling und möchte dort im sogenannten „Shell

Energy and Chemicals Park Rheinland“ Vorreiter der Energiewende sein, während im anderen Teil der Raffinerie in Godorf weiter traditionell Erdöl raffiniert werden soll [59].

6. Massenflüsse innerhalb Deutschlands

Die größten Produktströme im chemischen Sektor in Deutschland fallen bei der Verarbeitung einer überschaubaren Anzahl an wesentlichen chemischen Produkten an. Wie in **Abbildung 13** zu sehen ist, sind das bei Produktionsmengen von mehr als 2.000 Kilotonnen pro Jahr vor allem:

- Ethylen und Propylen, die als Grundbausteine zahlloser anderer chemischer Produkte beim Steamcracken und im Fall von Propylen auch mit wesentlichen Produktionsanteilen beim FCC in Raffinerien hergestellt werden,
- Chlorgas (Cl_2) und Natriumhydroxid (NaOH), die bei der Elektrolyse von Steinsalz (NaCl) anfallen, wobei Chlorgas neben der Herstellung von Poly(vinyl chlorid) (PVC) für den Bausektor zur Herstellung einer breiten Palette an chlorhaltigen Chemikalien eingesetzt wird und Natriumhydroxid in der Papierherstellung, der Gewinnung von Aluminiumoxid und vielen anderen Prozessen verwendet wird,
- Ethylendichlorid (EDC) als Zwischenprodukt bei der Herstellung von PVC,
- Schwefelsäure (H_2SO_4) inklusive Oleum mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der Herstellung zum Beispiel von Metallen, Farbpigmenten oder Waschmitteln,
- Natriumcarbonat (Na_2CO_3), auch bekannt als Soda, für die Lebensmittelindustrie, als Flussmittel in der Glasherstellung oder in der Abwasserbehandlung,
- Ammoniak (NH_3) als zentraler Baustein stickstoffhaltiger Mineraldünger und vieler weiterer stickstoffhaltiger Chemikalien
- und Harnstoff als Stickstoffdünger und in geringerem Umfang auch als Vorprodukt einiger anderer Chemikalien wie etwa von Harnstoffharzen.

Diese chemischen Produkte haben weitgehend gemein, dass sie jeweils von zentraler Bedeutung für eine Vielzahl an chemischen Wertschöpfungsketten sind und darin auch häufig als Ausgangsstoff dienen. In ähnlicher Größenordnung wie diese Basischemikalien werden unter den hier untersuchten chemischen Produkten daher nur einzelne Folgeprodukte wie die Plastikart Polyethylen in den drei Varianten mit hoher Dichte („High Density Polyethylene“ [HDPE]), niedriger Dichte („Low Density Polyethylene“ [LDPE]) und linear mit niedriger Dichte („Linear Low Density Polyethylene“ [LLDPE]) sowie PVC und Polypropylen (PP) produziert. Auch Methanol (MeOH) ist mengenmäßig von ähnlicher Bedeutung in Deutschland und wird zum Beispiel als Lösemittel, Frostschutzmittel und in der Weiterverarbeitung zu Treibstoffen eingesetzt. Es wird aber im Vergleich zu den anderen hier genannten Produkten wesentlich seltener in Deutschland selbst produziert und stattdessen zu etwa 50 Prozent importiert.

Von den Herstellungsmengen folgen auf diese Massenprodukte einige etwas spezialisiertere Produkte, wie zum Beispiel Polyamide wie Nylon oder verschiedene Sorten von Polystyrol (wobei die expandierte Variante EPS auch unter dem Handelsnamen „Styropor“ bekannt ist und neben der Verpackungsindustrie im großen Maßstab im Bausektor zum Beispiel zur Isolation oder zum Schallschutz eingesetzt wird). Auch Polymere wie Poly(ethylen terephthalat) (PET), wie es für Getränkeflaschen und Kunstfasern gebraucht wird, oder Polyurethane (mit ihrer

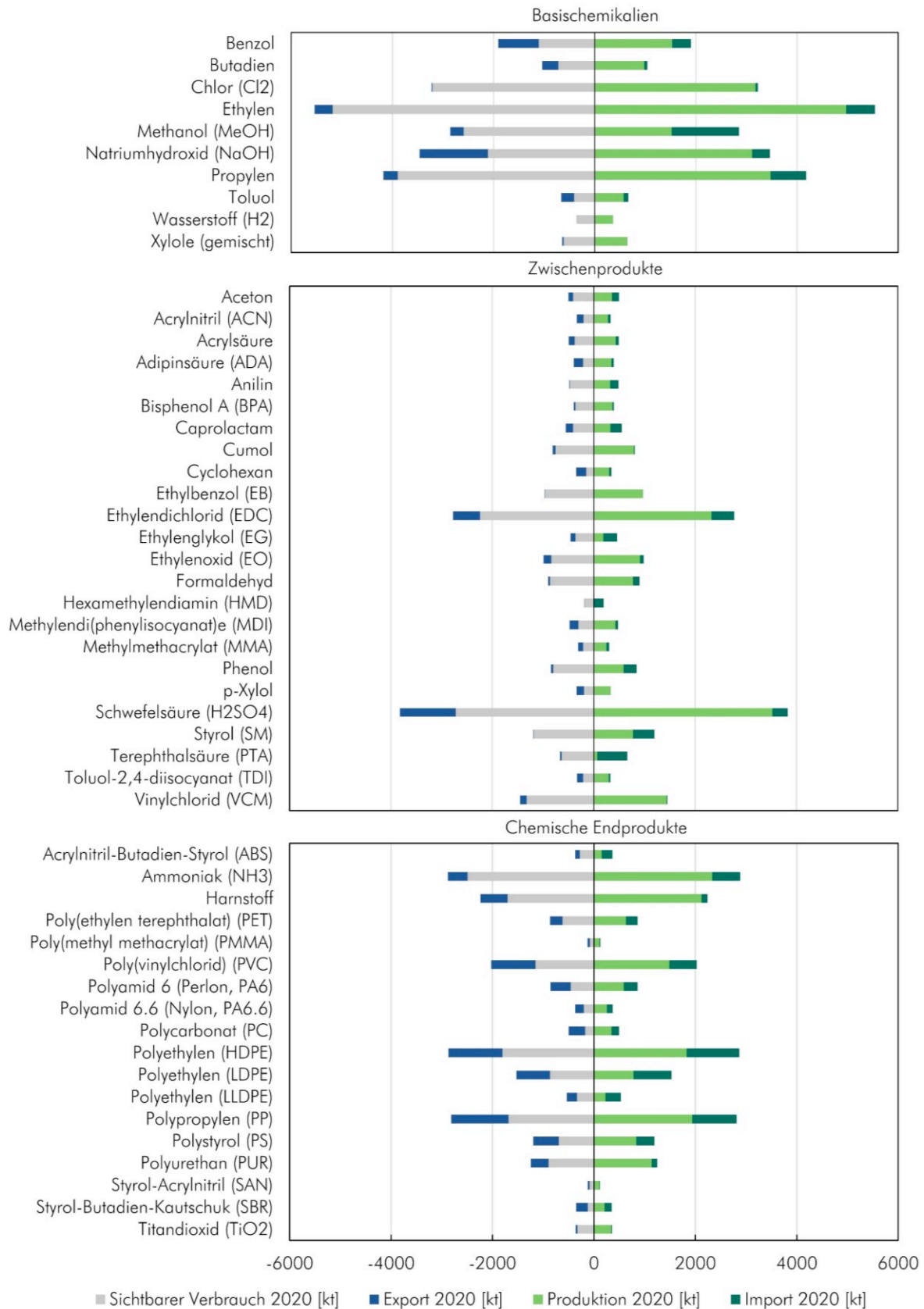


Abbildung 13: Bilanz wichtiger chemischer Produkte in Deutschland im Jahr 2020 (basierend auf PRODCOM [1], Meti [4] und eigenen Berechnungen). Der sichtbare Verbrauch umfasst den direkten Verbrauch und Lagerbestandsänderungen und ist als Differenz der anderen Größen (Produktion, Import, Export) berechnet worden.

Anwendung zum Beispiel für geschäumte Matratzen) werden in dieser Größenordnung um 1.000 Kilotonnen pro Jahr in Deutschland produziert.

Bei der Bewertung dieser Stoffströme ist zu bedenken, dass Produkte mit Mengen im Bereich um die 100 Kilotonnen pro Jahr in **Abbildung 13** und im direkten Vergleich zu einigen der zuvor genannten chemischen Produkte als mengenmäßig unbedeutend erscheinen, es sich aber im Vergleich zu typischen Spezialchemikalien (mit Mengen unter zehn Kilotonnen pro Jahr) oder Pharmawirkstoffen trotzdem um in großen Mengen produzierte Chemikalien handelt. Der Zusammenhang der mengenmäßig wichtigsten Endprodukte mit zu Basischemikalien und Zwischenprodukten wird dabei in vereinfachter Form in **Abbildung 14** dargestellt.

Im direkten Vergleich zwischen den Produkten fällt auf, dass einige Zwischenprodukte in größeren Mengen exportiert werden (zum Beispiel Natriumhydroxid), weil die inländische Nachfrage nach diesem Zwischenprodukt vermutlich nicht so hoch ist, während andere Endprodukte mit hohen Exportmengen vermutlich eher speziell auf die einzelnen Verwendungszwecke in anderen Ländern zugeschnitten sind. Teilweise gibt es auch bei derselben Produktsorte (wie etwa HDPE oder PP) ähnlich große Im- und Exporte. Das mag auf den ersten Blick verwunderlich erscheinen, liegt aber teilweise an der geringen Detailtiefe der Handelsdaten, weil auch in den einzelnen Produktkategorien üblicherweise große Unterschiede in den Qualitäten vorherrschen und Produkte mit sehr speziellen Eigenschaften nur von wenigen Herstellern hergestellt werden können. Ein Vergleich des finanziellen Wertes von deutschen Im- und Exporten chemischer Produkte legt nahe [1], dass in Deutschland systematisch günstigere Produktsorten importiert werden, während teurere (mit speziellerem Eigenschaftenspektrum) exportiert werden.

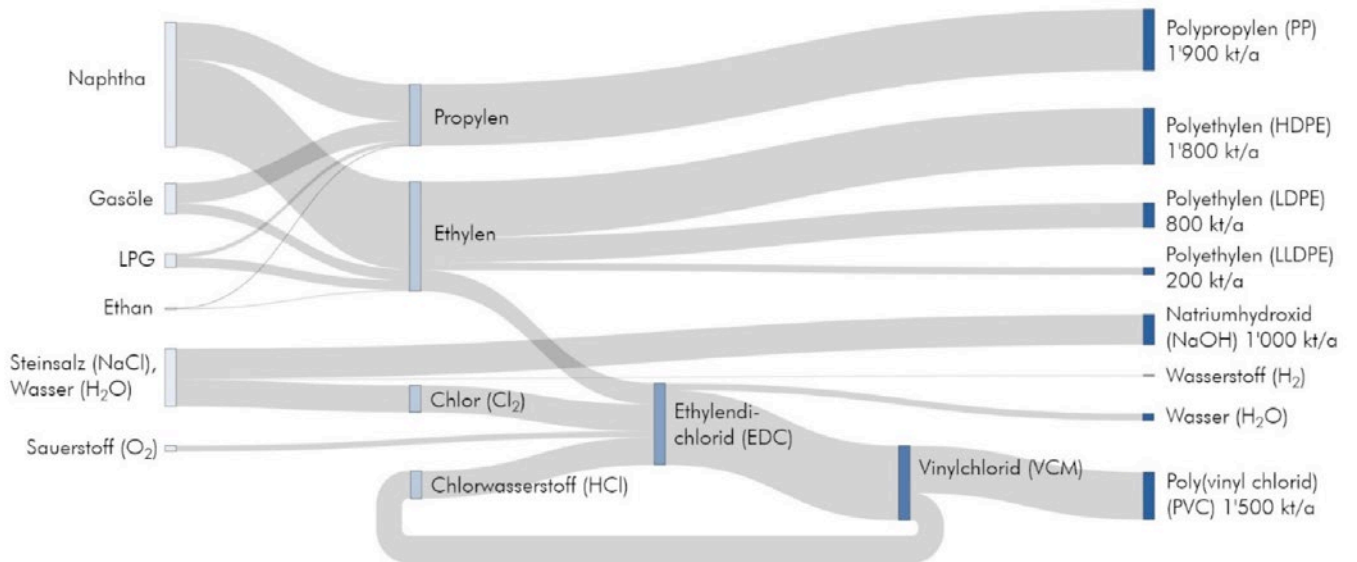


Abbildung 14: Stark vereinfachte Darstellung der Massenflüsse zur Herstellung der Polymere Polyethylen (HDPE, LDPE und LLDPE), Polypropylen (PP) und Poly(vinyl chlorid) (PVC) in Jahr 2020 in Deutschland. Im- und Exporte sowie geringfügige Verluste und einige Nebenprodukte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt worden. Die Breite der Verbindungen ist proportional zu den Massenströmen und es wird jeweils nur der Anteil gezeigt, der mindestens zur Produktion der hier gezeigten Endprodukte notwendig ist.

7. Energieflüsse, Luftschadstoffe und Dekarbonisierung

Der Energiebedarf in der chemischen Industrie wird in verschiedenen Formen und über verschiedene Energieträger gestellt. In **Abbildung 15** sind die geschätzten Energiebedarfe für wesentliche chemische Verfahrensschritte in Deutschland im Jahr 2020 unterteilt nach der jeweiligen Energieform (als Dampf, direkt als Brennstoff oder in Form von Elektrizität ohne Rohstoffe) aufgeführt.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass – ähnlich wie bei den Massenflüssen in Kapitel 5 – eine starke Konzentration der Energiebedarfe bei einzelnen Prozessen zu beobachten ist. Drei Prozesse stechen hier besonders hervor:

- das Steamcracken zur Herstellung von Olefinen wie Ethylen, Propylen und Butenen sowie Aromaten, das sich durch einen sehr hohen Gesamtbrennstoffbedarf auszeichnet,
- die gekoppelte Herstellung von Chlor und Natriumhydroxid (in einigen Fällen auch mit geringeren Mengen Wasserstoff) per stark strombedürftiger Elektrolyse
- und die Herstellung von Ammoniak per Dampfreformierung über das Haber-Bosch-Verfahren mit wiederum hohem Brennstoffbedarf und die Herstellung von Harnstoff als Folgeprodukt.

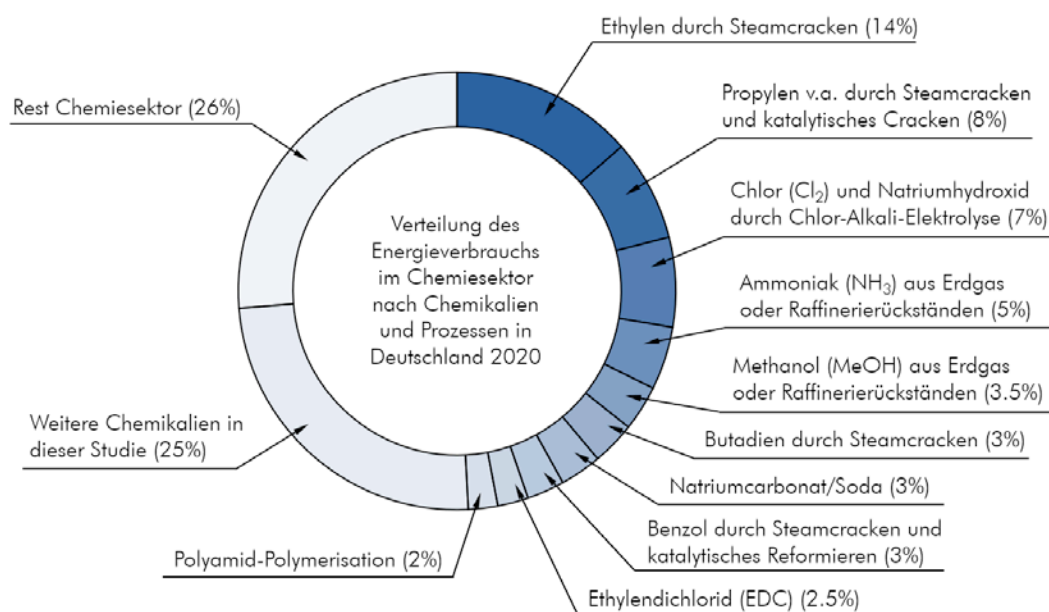


Abbildung 15: Anteil des Endenergieverbrauchs wesentlicher chemischer Verfahren in Deutschland im Vergleich zum Gesamtendenergieverbrauch des Sektors (basierend auf Daten der Europäischen Union [1] und eigenen Berechnungen (ohne Rohstoffe))

Der geschätzte Nettoendenergiebedarf dieser drei Verfahren zusammen liegt im Jahr 2020 bei über 220 Petajoule (61 Terrawattstunden), und übersteigt damit ein Drittel des Gesamtendenergiebedarfs, den Eurostat [68] für dasselbe Jahr für den gesamten Chemiesektor in Deutschland angibt. Damit ist eine starke Konzentration im Energiebedarf zu beobachten, was gleichzeitig bedeutet, dass eine Lösung aus der Abhängigkeit von bisherigen stark erdgasbasierten Energieversorgungsformen vor allem bei diesen Prozessen zu suchen ist. Verbesserungen bei

anderen Prozessen und Verfahren können in einigen Fällen noch einen wesentlichen Beitrag leisten, werden aber im Gesamtumfang dahinter zurückbleiben.

Mit Blick auf die großen Energieverbraucher im Chemiesektor in Deutschland ist es durch die starke Konzentration auf einige wesentliche Herstellungsprozesse auch plausibel, dass gleichzeitig eine starke örtliche Konzentration bei den Energieverbräuchen auf einzelne Chemiestandorte in Deutschland zu beobachten ist. Die Brennstoffverbräuche in Großfeuerungsanlagen an einzelnen Standorten sind in **Tabelle 4** zu finden und zeigen eindrücklich, wie einzelne Standorte, wie der der BASF in Ludwigshafen, die Brennstoffe ausschließlich zur Herstellung von chemischen Produkten einsetzen, während andere zudem einen wesentlichen Anteil der Brennstoffe auch für die Herstellung von Treibstoffen und anderen Raffinerieprodukten einsetzen, was in den öffentlichen Statistiken [44] nicht trennscharf von der Chemikalienproduktion abzugrenzen ist. Eine gewisse Hürde in der Interpretation dieser Zahlen ergibt sich daraus, dass an verschiedenen Standorten auch Strom ins öffentliche Netz eingespeist werden kann, Fernwärme an umliegende Gemeinden geliefert wird oder chemische Betriebe nur einen kleinen Teil der Energie nutzen.

Tabelle 4: Top 15 des Brennstoffverbrauchs von Großfeuerungsanlagen (mit einer Brennstoffleistung größer oder gleich 50 Megawatt) an deutschen Chemie- und Raffineriestandorten im Jahr 2020, sortiert nach Menge (basierend auf Daten von [44] und einer manuellen Zuordnung der Anlagen zu Standorten). Die Daten wurden, wo möglich, mit modellierten Daten von [83] verglichen und zeigen eine grundsätzlich gute Übereinstimmung. Die Brennstoffe sind überwiegend fossil und nur zu einem sehr geringen Teil erneuerbar.

Nr.	Bezeichnung des Standorts	Raffinerie-standort?	Brennstoffverbrauch Großfeuerungen
1	BASF Ludwigshafen	Nein	90 PJ (25 TWh)
2	BP Gelsenkirchen	Ja	69 PJ (19 TWh)
3	Chempark Dormagen	Nein	57 PJ (16 TWh)
4	PCK Raffinerie Schwedt (Oder)	Ja	36 PJ (10 TWh)
5	MiRO Mineraloelraffinerie Oberrhein Karlsruhe	Ja	33 PJ (9 TWh)
6	Industriegebiet Wesseling	Nein	32 PJ (9 TWh)
7	Shell Rheinland Raffinerie	Ja	31 PJ (9 TWh)
8	Chemiepark Knapsack	Nein	29 PJ (8 TWh)
9	Dow ValuePark Schkopau	Nein	28 PJ (8 TWh)
10	Industriegebiet Burghausen	Ja	28 PJ (8 TWh)
11	Chemiepark InfraLeuna	Ja	18 PJ (5 TWh)
12	Industriestandort Böhlen-Lippendorf	Nein	16 PJ (4 TWh)
13	Klesch Raffinerie Heide	Ja	15 PJ (4 TWh)
14	Polycasa Mainz (und viele andere Verbraucher)	Nein	14 PJ (4 TWh)
15	Dow ValuePark Stade	Nein	13 PJ (4 TWh)

Ein Beispiel stellt der Standort von Polycasa in Mainz dar, der zwar – basierend auf Satellitenbildern – an die Wärmeversorgung der Kraftwerke Mainz-Wiesbaden angeschlossen ist, aber nur einen geringen Teil der bereitgestellten Energie nutzen und damit auch nur einen kleinen Teil der verbrannten Energieträger verursachen dürfte.

An den anderen Standorten, die in **Tabelle 4** gelistet sind, wird hingegen in der Regel eine Raffinerie als weiterer großer Energieverbraucher oder mindestens eines der drei besonders

energieintensiven Verfahren (Steamcracken, Chlor-Alkali-Elektrolyse und Haber-Bosch-Verfahren) betrieben. Gleichzeitig handelt es sich bei den drei genannten Verfahren um Herstellungsprozesse für Massenprodukte, die zudem einer starken internationalen Konkurrenz ausgesetzt sind. Daher scheint es unwahrscheinlich, dass es noch großen Spielraum bei Effizienzmaßnahmen zur Einsparung mit Energie gibt. Dies deckt sich auch mit den Einschätzungen des Branchenverbandes der chemischen Industrie in Deutschland (VCI), der aktuell das Einsparpotenzial auf energetischer Seite bei gleicher Produktionsmenge als weitgehend ausgeschöpft sieht [34]. Und in der Tat hätten die Chemieunternehmen aufgrund der 2022 massiv angestiegenen Energiepreise auch größte finanzielle Anreize gehabt, um ihren Energieeinsatz besonders bei diesen drei Verfahren zu senken. Da diese Verfahren den Beginn der Herstellungsprozesse einer Vielzahl an chemischen Produkten darstellen, würden damit auch sehr viele chemische Endprodukte energetisch dekarbonisiert oder zumindest in ihren Treibhausgasemissionen wesentlich reduziert werden können (**Abbildung 16**).

Eine Variante könnte die weitgehende Elektrifizierung der chemischen Prozesse sein, die eine erhöhte Flexibilisierung der Energiequellen ermöglichen kann. Mit der Chlor-Alkali-Elektrolyse gibt es unter den besonders energieintensiven Prozessen bereits einen, der fast vollständig elektrisch mit Energie versorgt werden muss. Sollte bei den anderen Prozessen im Falle einer Umstellung auf einen elektrischen Prozess die gleiche Menge elektrischer wie zuvor thermischer Energie gebraucht werden, müssen jedoch zusätzlich die Wirkungsgrade in der Energiebereitstellung berücksichtigt werden, denn die Umwandlung von Energieträgern in Wärme läuft mit hoher Effizienz bei 80 bis 90 Prozent ab, während beispielsweise konventionelle Kraftwerke zur Bereitstellung von Strom eher Wirkungsgrade um 35 bis 40 Prozent aufweisen [46, 51]. In der Folge würden die direkten Endenergiebedarfe für chemische Produkte entlang ihrer Herstellungsketten (**Tabelle 5**) möglicherweise ähnlich bleiben, aber die Primärenergiebedarfe würden weiter ansteigen. Selbst die Endenergiebedarfe stellen dabei bezogen auf die Produkte bereits sehr große Energieverbräuche dar. Eine grobe Abschätzung basierend auf den Zahlen in **Tabelle 5** und **Abbildung 16** sowie von [47] und [1] liefern hier Endenergiebedarfe von mehr als 77 Petajoule (21,4 Terrawattstunden) im Jahr 2020 in Deutschland für Verpackungschemikalien und mehr als 26 Petajoule (7,3 Terrawattstunden) für Stickstoffdünger (Ammoniak [NH₃] und Harnstoff). Wenn für Verpackungschemikalien aus Deutschland die Primärenergiebedarfe inklusive der Rohstoffe berechnet werden, liegt der Wert für 2020 bei 277 Petajoule (77 Terrawattstunden).

Tabelle 5: Direkte Endenergiebedarfe für die Herstellung verschiedener chemischer Produkte (von der Raffinerie bis zur Chemikalie) und zugehörige Primärenergiebedarfe (einschließlich geschätzter Wirkungsgrade von 90% in der Wärmebereitstellung [51], 40% in der Strombereitstellung [51] und dem Rohstoffeinsatz basierend auf unteren Heizwerten [36]) in Deutschland im Jahr 2020. Details zur Berechnung finden sich im Anhang.

Produkt	Endenergiebedarf Raffinerie und chem. Prozesse [GJ/t]	Primärenergiebedarf Rohstoffe und Energie [GJ/t]
Polyethylen (HDPE)	22	82
Polyethylen (LDPE)	20	80
Polyethylen (LLDPE)	21	85
Polypropylen (PP)	16	73
Poly(ethylen terephthalat) (PET)	41	99
Polystyrol (PS)	35	98
Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	44	105
Polyamid 6 (PA6)	40	113

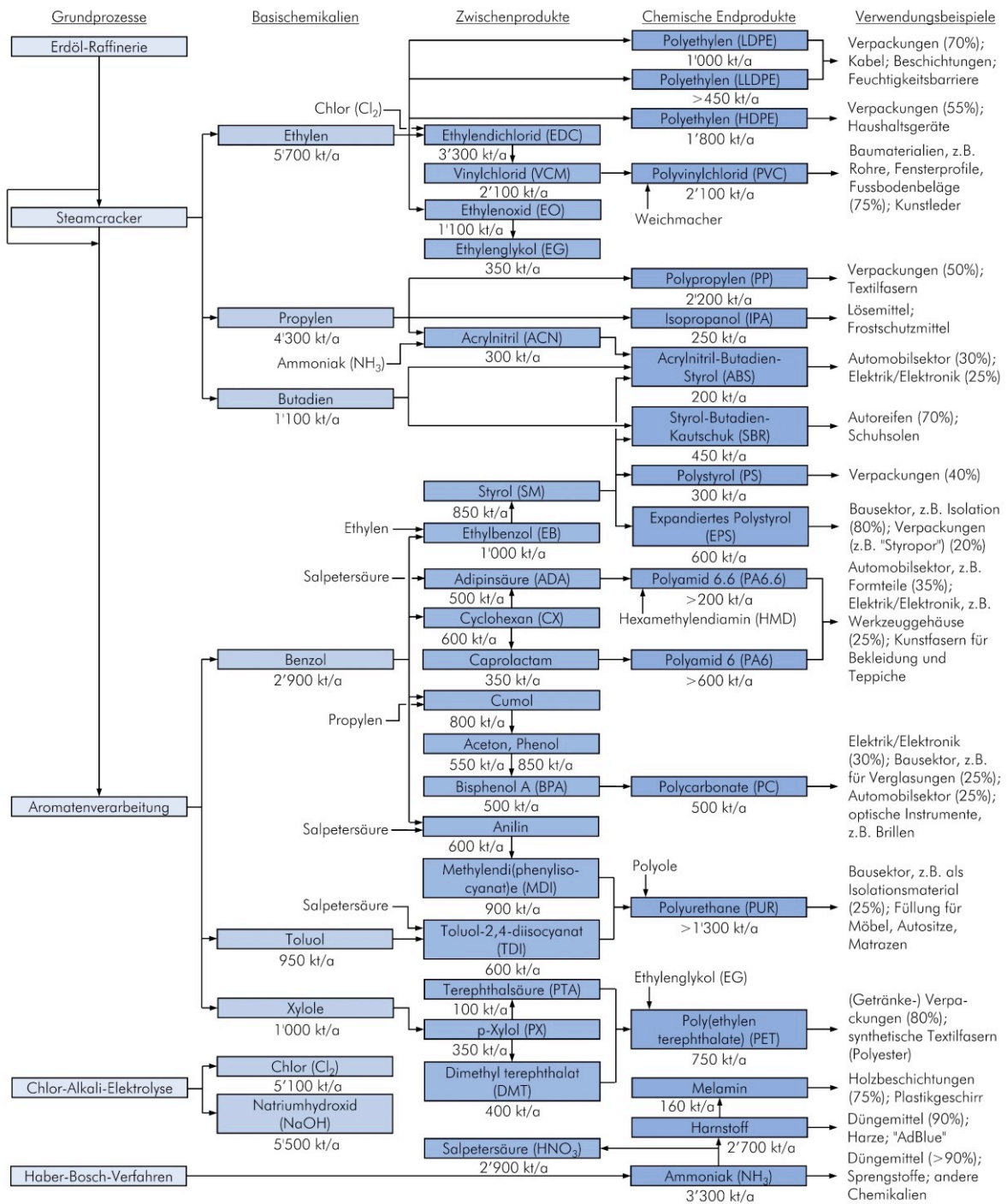


Abbildung 16: Die Verknüpfung von Grundprozessen der chemischen Industrie in Deutschland über Basischemikalien, Zwischenprodukte und chemische Endprodukte hin zur Verwendung der Chemikalien. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur einige Beispiele der Rohstoffe und Produkte gezeigt. Die Mengenangaben pro Chemikalie beziehen sich auf die gesamte Herstellungskapazität in Deutschland im Jahr 2020 und muss nicht zwangsweise ausgelastet oder wie dargestellt verknüpft sein. Daten zu Verwendungsbeispielen sind im Wesentlichen von [16] und Medienmitteilungen entnommen.

Zwar gibt es aktuell mehrere in der Umsetzung befindliche Projekte (zum Beispiel bei Solvay in Rheinberg), wo kohlebasierte Energiebereitstellung für die chemische Industrie durch Biomasse ersetzt wird [75], oder im Chemiapark Gendorf, wo ein neues Holzheizkraftwerk geplant ist [76]), doch im Rahmen solcher Projekte wird – trotz anders lautender Medienberichte – keine Klimaneutralität in der Energiebereitstellung erreicht, weil die Wachstumsprozesse für Biomasse in der Natur sehr komplex sind. Durch die Entnahme und Verbrennung von Holz aus dem Wald wird klimaschädliches Kohlendioxid freigesetzt, was in Deutschland erst wieder nach vielen Jahrzehnten oder Jahrhunderten in Form von Bäumen nachwächst und solange zur Klimaveränderung beitragen kann [11]. In der Folge kann die Biomassennutzung über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet ungefähr so schädlich für das Klima wie die Verbrennung von Erdgas sein [11]. Darüber hinaus setzt die Verbrennung von Biomasse auch größere Mengen an Feinstaub, Stickoxiden (NO_x) und Schwefeloxiden (SO_2) frei, die in ähnlichen Größenordnungen wie bei der Verbrennung von Kohle liegen [77] und die menschliche Gesundheit schädigen.

Eine Analyse der direkt an den Chemieparks vorhandenen Kraftwerke [66] zeigt, dass diese Kraftwerke aktuell noch weitgehend mit Erdgas betrieben werden (51 von 107 Anlagen) und es gibt nur wenige Anlagen, die Kohle (19 Anlagen), Abfälle (12 Anlagen) oder Öl (11 Anlagen) verbrennen. In fast allen Fällen werden diese Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung betrieben, sodass nicht nur Strom, sondern vor allem auch der hohe Wärmebedarf der chemischen Industrie gedeckt werden kann. Für die chemische Industrie hat diese Praxis große Vorteile, weil durch dieses Konzept die Brennstoffausnutzung besonders hoch ist. In der Vergangenheit ist dieses Konzept aber nach Untersuchungen der Bundesnetzagentur [8] auch immer wieder an Grenzen gestoßen, weil diese Kopplung von Strom- und Wärmeerzeugung dazu geführt hat, dass – in Situationen mit einem hohen Überschuss an erneuerbarem Strom im Netz und sogar negativen Strompreisen – solche Kraftwerke durch ihre Inflexibilität bei der benötigten Wärme weiterproduzieren mussten und daher erneuerbar produzierter Strom ungenutzt weggeregelt wurde.

Ohnehin ist die Versorgung des deutschen Chemiestandorts mit Wärme sehr komplex, weil unterschiedliche chemische Verfahren bei unterschiedlichen Temperaturen ablaufen müssen. Zum einen sind daher Wärmeverbraucher und Kühlbedarfe hochgradig integriert, um die unterschiedlichen Wärmemengen ideal zu nutzen und die Wärme wo immer möglich zurückzugewinnen. Zum anderen findet dadurch die zentrale Wärmeversorgung an den größeren Chemiestandorten mit Dampf über mehrere (üblicherweise drei oder mehr) Temperatur- und Druckniveaus statt, damit den Prozessen immer Wärme mit möglichst passender Temperatur zur Verfügung steht. Änderungen an diesen Wärmenetzwerken sind auch schwierig und können die Effizienz der Prozesse negativ beeinflussen. Auch um die Verluste im Wärmetransport gering zu halten und die Abhängigkeit von äußeren Faktoren zu verringern, haben fast alle größeren Chemiestandorte in Deutschland eine eigene Strom- und Dampferzeugung, die damit rund zwei Drittel der benötigten Prozessenergie des Sektors in Deutschland bereitstellt (**Abbildung 17**). Um in Zukunft zumindest einen Teil dieses Wärmebedarfs mit geringem fossilen Energieverbrauch zu decken, hat sich zum Beispiel die BASF mit MAN zusammengetan und plant den Bau großer Wärmepumpen an ihrem Standort in Ludwigshafen [78], die zumindest einen Teil des Dampfbedarfs auf niedrigem Niveau decken können, aber dafür Strom konsumieren.

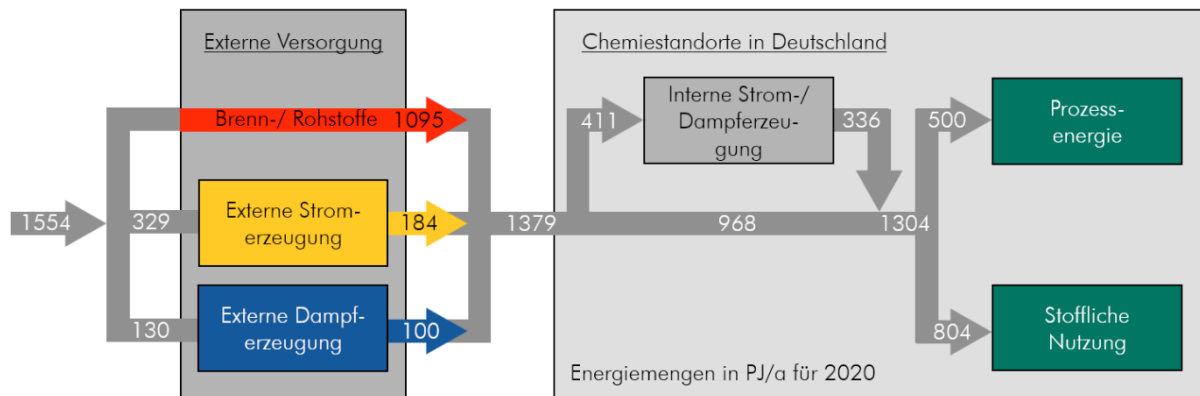


Abbildung 17: Die Versorgung der chemischen Industrie in Deutschland mit Energie und Energieträgern, wobei die Energieträger (zum Beispiel Erdöl oder Erdgas) zum Teil stofflich genutzt werden und Teil der chemischen Produkte werden. Basierend auf Daten von Eurostat [68], der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [81], der European Environment Agency [44] und eigenen Berechnungen. Für den Stromverkauf von Chemiestandorten ins öffentliche Stromnetz gibt es keine flächendeckenden Angaben. Daten für eingesetzte Energieträger sind in **Abbildung 3** zu finden.

Ein weiteres Konzept zur Elektrifizierung der chemischen Industrie neben den Wärmepumpen ist die elektrische Beheizung von Steamcrackern. Mehrere Konsortien arbeiten hier an einer technischen Lösung [73, 74] und bereits 2023 soll ein Probetrieb in Ludwigshafen aufgenommen werden. Weiterhin könnte auch elektrisch hergestellter Wasserstoff einen Beitrag leisten. Die gemeldete Nachfrage nach Wasserstoff ist hier in Deutschland – nicht nur durch die chemische Industrie – extrem hoch, übersteigt die Pläne der nationalen Wasserstoffstrategie bei weitem und könnte in dem Fall auch zu einem extremen Mehrbedarf an Elektrizität führen [7, 21].

Weitere Ansätze zur Verringerung der Abhängigkeit der chemischen Industrie von fossilen Rohstoffen existieren, zum Beispiel werden aktuell viele Investitionen in chemisches Recycling von Polymeren angekündigt (wie zum Beispiel bei Dow in Böhlen [79]), denn möglicherweise kann so ein Teil der bisher fossil gewonnenen Kohlenstoffatome wiederverwendet werden. Das könnte den fossilen Primärrohstoffbedarf senken, was aufgrund des hohen Anteils von fossilen Rohstoffen auch im Vergleich zum Energiebedarf ebenfalls für eine Dekarbonisierung dringend nötig wäre (**Abbildung 17** und **Tabelle 5**). Aber auch diese Recyclingtechnologien werden den Energiebedarf der chemischen Industrie weiter steigern. Es stellt sich also die Frage, wie dieser Bedarf gedeckt werden kann.

Um dies zu lösen, investieren Teile der deutschen Chemieunternehmen aktuell stark in Photovoltaik und vor allem in Windenergie in der Nordsee [70–72]. Doch das wird als Lösung nicht ausreichen, denn Elektrizität aus Photovoltaik steht vor allem tagsüber im Sommer zur Verfügung, während die Windenergie ihre größten Beiträge zur Stromerzeugung in Deutschland im Januar und Februar leistet, gelegentlich aber auch grundsätzlich sehr schwache Jahre haben kann. Zudem werden die nötigen Mengen erneuerbarer Energie nicht zeitnah zur Verfügung stehen. Die chemische Industrie braucht aus Sicherheitsgründen, aber auch aus technischen Gründen eine stabile und weitgehend konstante Stromversorgung. Diese Differenz lässt sich auch für die chemische Industrie vermutlich nur mit einer ganzen Reihe an Teillösungen finden und die funktionierende Mischung muss noch gefunden werden. Es wäre jedoch problematisch, wenn die

Industrie ankündigt, insbesondere energieintensive Prozessschritte ins Ausland zu verlagern, da geringere Umweltstandards und die Nutzung von noch klimaschädlicheren Rohstoffen wie Kohle das Gesamtproblem weiter verschärfen könnten.

Methodikanhang

Die Daten in dieser Studie wurden allgemein aus frei verfügbaren Quellen bezogen. Sie sind dabei teilweise nur sehr fragmentiert verfügbar und zudem von unterschiedlicher Qualität, zum Beispiel in Bezug auf Vollständigkeit, Aktualität oder auch Erhebungsmethodik. Beim Zusammenstellen der Daten wurde mit größtmöglicher Sorgfalt vorgegangen, doch die Schwierigkeiten in der Datensammlung müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Das Zieljahr für alle Daten ist das Jahr 2020.

Betriebsdaten pro chemische Anlage sind grundsätzlich nicht verfügbar, aber da nur Massenchemikalien betrachtet werden, wo im Betrieb typischerweise eine besonders hohe Anlagenauslastung beabsichtigt wird, kann mit hinreichender Qualität die Produktionsmenge durch die Gesamtproduktionsmenge und -kapazität geschätzt werden. Dieser Ansatz ist in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben [56].

Basisdaten zu Energieverbrauch, Handel und Produktion stammen vor allem von Eurostat [1, 68] und dem Statistischen Bundesamt [2], während andere Daten des VCI zwar existieren, aber aus rechtlichen Gründen leider nicht verwendbar sind [65]. In seltenen Fällen werden Lücken mit [69] ergänzt. Bei Mengenbilanzen werden Lagerbestandsänderungen grundsätzlich vernachlässigt (laut Eurostat bei Ölprodukten in Proportion betrachtet sehr niedrig: weniger als 0,1 Prozent der insgesamt in Deutschland im Jahr 2020 zur Verfügung stehenden Menge [68]). Daher wird davon ausgegangen, dass diese Annahme trotz des Fehlens besserer Daten keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Kapazitäten für die relevanten Anlagen sind aus einer Vielzahl an Pressemitteilungen, Zeitungsartikeln, behördlichen Genehmigungsunterlagen, Unternehmensberichten, Technologiebeschreibungen, BVT-Unterlagen [45–53], Länderübersichten [4] und diversen anderen Quellen entnommen, spiegeln aber nicht immer Daten für das Zieljahr 2020 wider. Wenn keine Daten für 2020 verfügbar sind, werden Daten für das nächstliegende Jahr verwendet. In wenigen Fällen sind Kapazitätsdaten für bekannte Anlagen nicht direkt verfügbar und werden dann über Folgeprodukte oder Vorprodukte und Stöchiometrien geschätzt. Sollte das ebenfalls nicht möglich sein, müssen die Anlagen unberücksichtigt bleiben. Ein Datenabgleich und teilweise auch eine Anpassung wurde mit den Daten hinter [83] durchgeführt, wofür wir den Autor*innen dieser Studie sehr herzlichen danken. Stöchiometrien sowie Produktzusammensetzungen wurden von Levi und Cullen [3] entnommen, aber teilweise bei Bedarf mit frei verfügbaren Daten weiter disaggregiert oder ergänzt. Für einige Arten von Anlagen wie zum Beispiel denen der Fluorchemie [23] liegen Daten vor, sind aber nicht in den Grafiken aufgeführt.

Typische Energiebedarfe für verschiedene Prozesse sind vor allem aus wissenschaftlichen Publikationen [15, 20] und BVT-Dokumenten [45–53] bekannt, repräsentieren aber nur „typische“ Verteilungen, die im Einzelfall deutlich abweichen können, weil gewisse Flexibilität in der Prozessausgestaltung wie auch bei den gewünschten Produkteigenschaften Einfluss darauf nehmen können. Beispielsweise ließe sich ein Kompressor mit Dampf über eine Dampfturbine, durch direkte Verbrennung mit einer Gasturbine oder über einen elektrischen Motor betreiben, wozu es auf der Ebene einzelner Anlagen keine spezifischen Informationen gibt. Daher sind Energiebedarfe pro Produkt und Energiequelle als Orientierungswert zu verstehen. Energiebedarfe entlang der Herstellungspfade sind durch Kombination der Energiebedarfe der einzelnen Teilschritte berechnet worden. Die benötigten Mengen an Vorprodukten entstammen dabei von [3, 52] oder wurden im

Fall von Datenlücken grob abgeschätzt. Die Herstellungspfade beginnen mit der Verarbeitung von Rohöl in Raffinerien oder der Herstellung von Chemikalien aus Erdgas und enthalten nicht die Gewinnung, den Transport oder die Aufarbeitung der Rohstoffe. Sie enden bei dem chemischen Endprodukt (wie zum Beispiel Polymergranulat) und beinhalten daher nicht die Weiterverarbeitung wie etwa die Herstellung von Verpackungen.

Standortdaten für registrierte Anlagen im petrochemischen Bereich (Raffinerien, Herstellung von chemischen Erzeugnissen) kommen vom Umweltbundesamt [43] und wurden teilweise modifiziert und neu klassifiziert. Das ist besonders relevant bei Anlagen, die mehr als einem Sektor zugeordnet werden könnten, wie zum Beispiel einigen Anlagen in der Rohstoffgewinnung. Letztlich ist die Zuordnung Einzelfallentscheidung.

Raffineriedaten (verbaute Prozesse, Kapazitäten) stammen unter anderem vom en2x [27], genauso wie Daten zu den Pipelines [28], wurden aber ergänzt mit öffentlichen Daten von einzelnen Betreibern und weiteren Datenquellen [80]. Chemieproduktionsdaten stammen wie Daten zu chemischen Anlagen aus vielen höchst unterschiedlichen Quellen. Crackerdaten kommen aus frei verfügbaren Quellen [56] und wurden mit Betreiberdaten zu eingesetzten Rohstoffen ergänzt.

Die Verteilung von Betriebsdaten auf Koppelprodukte wurde direkt aus der wissenschaftlichen Literatur übernommen und im Zweifelsfall über die Masse der Produkte verteilt. Alternativen existieren und können im Einzelfall größere Auswirkungen auf die Verteilung haben, so ist das methodische Vorgehen aber konsistent mit dem empfohlenen Vorgehen von PlasticsEurope für Steamcracker [64].

Produktions- und Handelsdaten [1] umfassen manchmal mehrere heterogene Produkte, zum Beispiel werden in solchen Statistiken mehrere Sorten von Isocyanaten zusammengefasst. Dann werden die Daten über bekannte Kapazitäten verteilt (sofern diese bekannt sind), aber Substanzen mit fehlenden Daten vernachlässigt. Also werden zum Beispiel die gesamten Isocyanatmengen auf TDI und MDI aufgeteilt, während Isophorondiisocyanat, Hexamethylendiisocyanat und andere mengenmäßig wenig relevante Isocyanate aufgrund von fehlenden Kapazitätsdaten nicht berücksichtigt werden können. Damit wird vermutlich die kumulierte MDI/TDI-Produktion leicht überschätzt und die Produktion anderer Isocyanate unterschätzt.

Auch in anderen Fällen stellt die fehlende Schärfe der statistischen Daten eine Hürde dar, wie zum Beispiel für Industrieruß. Industrieruß ist in den Produktions- und Handelsdaten Teil der Kohlenstoffe, ein Abgleich der Produktionsdaten mit aktuellen Kapazitätsdaten zeigt jedoch, dass die Gesamtproduktion an Kohlenstoffen deutlich über den Kapazitäten der Industrierußproduktion in Deutschland liegt. Daher werden vermutlich weitere Produkte in dieser Kategorie berücksichtigt, sodass die Produktions- und Handelsmenge von Industrieruß nicht ohne weiteres bestimmt werden kann. Um die Herstellung von Industrieruß in der Berechnung des Gesamtenergiebedarfs pro Chemikalie nicht vernachlässigen zu müssen, wird die Auslastung der bestehenden Industrierußanlagen mit 80 Prozent abgeschätzt und die anderen Kohlenstoffdaten werden proportional herunterskaliert. In Anbetracht der geplanten Kapazitätserweiterungen für Industrieruß und der mittleren Auslastung anderer chemischer Anlagen in Deutschland scheint dies ein plausibler Schätzwert zu sein, der aber nicht weiter validiert werden kann. Genauso wird mit weiteren unplausiblen statistischen Werten (Natriumcarbonat/Soda, Salpetersäure) verfahren.

Weitere Unschärfen sind in der Klassifikation von Produktions- und Handelsdaten von Polymeren möglich, da einzelne Produkte teilweise in mehreren Kategorien erfasst werden können (zum

Beispiel könnten Co-Polymere, die aus mehreren unterschiedlichen Monomeren bestehen, teilweise als Polymer eines beliebigen der Monomere erfasst sein). Eine detaillierte Analyse solcher Fälle ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich, aber ein grundsätzlicher Plausibilitätsabgleich wurde mit den Daten von [16, 65] durchgeführt und zeigte keine massiven Auffälligkeiten.

Produktmassen sind immer bezogen auf die Gesamtmasse (ohne Wasser oder Lösungsmittel), sofern dies aus den Rohdaten hervorgeht.

Im Fall von fehlenden Produktionsdaten in den Statistiken (üblicherweise, wenn es nur ein oder zwei Hersteller in Deutschland gibt, und ein direkter Rückschluss auf die Produktionsmengen einzelner Akteure möglich wäre) werden diese Produktionsdaten durch geeignete Abschätzungen angenähert (wie zum Beispiel über bekannte Daten von Vorprodukten oder Folgeprodukten, typische europaweite Auslastung der Anlagen und deutsche Kapazität). Das bestmögliche Vorgehen hängt vom Einzelfall ab.

Die Berechnung Systemgrenzen der Endenergie- und Primärenergieberechnung der chemischen Prozesse aus **Tabelle 5** ist in **Abbildung 18** dargestellt. Die Endenergie stellt dabei die Energiemenge dar, die den Anlagen der chemischen Industrie (Raffinerien, Cracker, andere chemische Anlagen) von außen zum Beispiel in Form von Strom, Dampf oder Brennstoffen zugeführt wird. Die Primärenergie inklusive Rohstoffe umfasst zusätzlich die Verluste der Strom- und Dampferzeugung und die Rohstoffe (wie Erdöl oder Erdgas), die in den chemischen Endprodukten enthalten sind. Ähnliche Daten finden sich auf europäischer Ebene bei PlasticsEurope [82], doch die Zahlen dort weichen vor allem wegen anderer Herstellungsprozesse und regionaler Bedingungen teilweise von den Zahlen hier ab.

Daten zu den in Deutschland betriebenen Kraftwerken werden von [66] verwendet, was wiederum auf Daten der Bundesnetzagentur und des Umweltbundesamtes basiert. Bundesnetzagentur und Umweltbundesamt haben dankenswerterweise einer Verwendung ihrer Daten schriftlich zugestimmt. Weiterhin hat auch en2x [27, 28] freundlicherweise die Verwendung ihrer Daten gestattet.

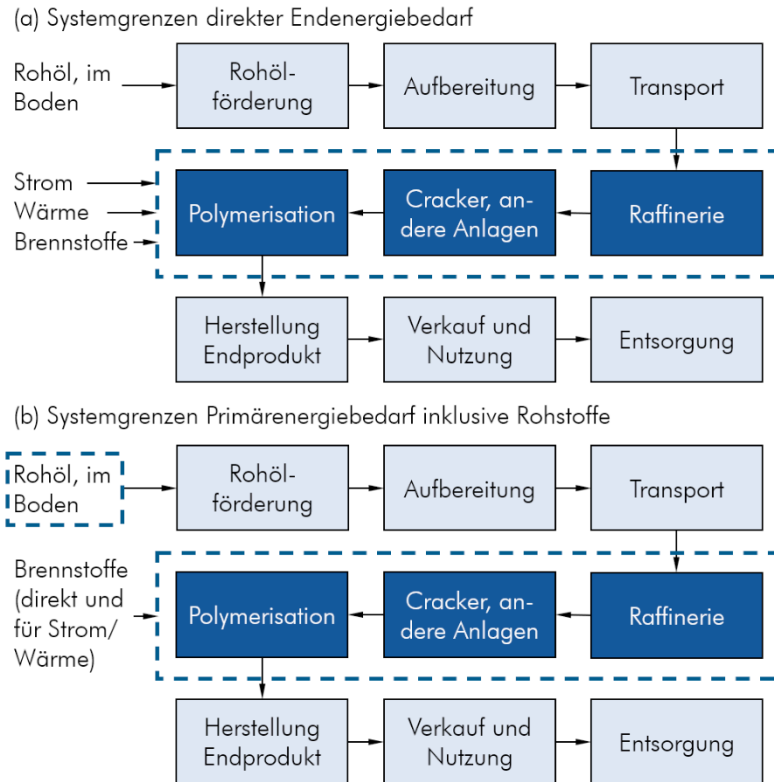


Abbildung 18: Visuelle Darstellung der Systemgrenzen in **Tabelle 5** für den direkten Endenergiebedarf (a) von Raffinerien und chemischen Prozessen, und den Primärenergiebedarf inklusive Rohstoffe (b), der zusätzlich zum Endenergiebedarf die Wirkungsgrade von Strom- und Wärmeerzeugung sowie die eingesetzten Rohstoffe der chemischen Industrie (z.B. Rohöl) umfasst.

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
2-EH	2-Ethylhexanol
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACN	Acrylnitril
AHL	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
AN	Ammoniumnitrat
ASL	Ammoniumsulfat-Harnstoff-Lösung
BDO	1,4-Butandiol
BPA	Bisphenol A
Cl ₂	Chlor
CO ₂	Kohlendioxid
COTC	Crude Oil to Chemicals (englisch) – Herstellung von Chemikalien aus Rohöl
CX	Cyclohexan
DINCH	Diisononyl cyclohexan-1,2-dicarboxylat
DINP	Diisononylphthalat
DME	Dimethylether
DPHP	Di(2-propylheptyl) phthalat
EB	Ethylbenzol
EDC	Ethylendichlorid
EG	Ethylenglycol
EO	Ethylenoxid
EPS	Expandierbares/ expandiertes Polystyrol
EPS	Ethylen-Pipeline Süd
EU	Europäische Union
FCC	Fluid Catalytic Cracking (englisch)
GJ/t	Gigajoule pro Tonne (ein Gigajoule = 277,77 Kilowattstunden)
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HCl	Chlorwasserstoff, Salzsäure
HDPE	High Density Polyethylene (englisch)
HF	Flusssäure/Fluorwasserstoff
HNO ₃	Salpetersäure
INA	Isononanol
IPA	Isopropanol
KAS	Kalkammonsalpeter
kWh	Kilowattstunden (eine Milliarde Kilowattstunden = eine Terrawattstunde)
LDPE	Low Density Polyethylene (englisch)
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene (englisch)
LNG	Liquefied Natural Gas (englisch) – Flüssigerdgas
LPG	Liquified Petroleum Gases (englisch) – Flüssiggas

MDI	Methylendi(phenylisocyanat)e
MeOH	Methanol
MMA	Methylmethacrylat
Na ₂ CO ₃	Natriumcarbonat (Soda)
NaCl	Natriumchlorid, Steinsalz
NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat (Natron)
NaOH	Natriumhydroxid
NBA	n-Butanol
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
OX	o-Xylol
PA	Polyamide
PA6	Polyamid 6, Perlon
PA6.6	Polyamid 6.6, Nylon
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PET	Poly(ethylen terephthalat)
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PG	Propylenglycol
PJ	Petajoule (ein Petajoule gleich 0,2777 Terrawattstunden)
PM _{2.5}	Particulate Matter (englisch) – Feinstaub mit einem Durchmesser kleiner als 2.5 µm
PMMA	Poly(methyl methacrylat)
PO	Propylenoxid
PolyTHF	Polytetrahydrofuran
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTA	Purified Terephthalic Acid (englisch) – Terephthalsäure
PUR	Polyurethan
PVC	Poly(vinyl chlorid)
PX	p-Xylol
SAF	Sustainable Aviation Fuel (englisch) – Nachhaltiger Flugzeugtreibstoff
SAN	Styrol-Acrylnitril
SBR	Styrene Butadiene Rubber (englisch) – Styrol-Butadien-Kautschuk
SM	Styrene Monomer (englisch) – Styrol
SO ₂	Schwefeldioxid
TDI	Toluol-2,4-diisocyanat
THF	Tetrahydrofuran
TiO ₂	Titandioxid
TWh	Terrawattstunden (eine Terrawattstunde = eine Milliarde Kilowattstunden)
VAM	Vinyl Acetate Monomer (englisch) – Vinylacetat
VCI	Verband Chemischer Industrie
VCM	Vinyl Chloride Monomer (englisch) – Vinylchlorid

Quellenverzeichnis

- [1] Eurostat (2022). Prodcom-Datenbank. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/database> (Datenzugriff Herbst/Winter 2022)
- [2] Statistisches Bundesamt (2022). GENESIS-Online Datenbank. https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html (Datenzugriff Herbst/Winter 2022)
- [3] Levi and Cullen (2018). Mapping Global Flows of Chemicals: From Fossil Fuel Feedstocks to Chemical Products. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 4, 1725–1734. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.7b04573>
- [4] Meti (2019). Zukünftige Angebots- und Nachfragetrends für petrochemische Produkte in der Welt (auf Japanisch). https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/ (Zugriff im Herbst 2022)
- [5] Lapinski, Metro, Pujadó, Moser. (2014). Catalytic Reforming in Petroleum Processing. In: *Handbook of Petroleum Processing*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-05545-9_1-1. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-14529-7_1
- [6] International Energy Agency (2018). The Future of Petrochemicals - Towards more sustainable plastics and fertilisers. Paris, Cedex. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>
- [7] FNB Gas (2021). Ergebnisse der Bedarfsmeldungen für Wasserstoff im Rahmen der Marktabfrage Wasserstoff Erzeugung und Bedarf (WEB) für den Szenariorahmen NEP Gas 2022-2032. https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/2021_09_21_FNB-Gas-Begleitdokument-Marktabfrage-WEB-Karten.pdf
- [8] Bundesnetzagentur (2021). Bericht über die Mindesterzeugung 2021. Bonn. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Mindesterzeugung/artikel.html>
- [9] Ecofys (2009). Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012 - Sector report for the chemical industry. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/bm_study-chemicals_en.pdf
- [10] Benner, van Lieshout, Croezen (2012). Identifying breakthrough technologies for the production of basic chemicals - A long term view on the sustainable production of ammonia, olefins and aromatics in the European region. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_finalreport_1329899563.pdf
- [11] Cherubini, Peters, Berntsen, Strommann, Hertwich (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *Bioenergy*, Volume3, Issue5, October 2011, Pages 413-426. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x>
- [12] Markert (2015). Abschlussbericht der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein- Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren (Enquetekommission II). Landtag Nordrhein-Westfalen, 16. Wahlperiode, Drucksache 16/8500. <https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD16-8500.pdf>

- [13] Fleiter, Schломann, Eichhammer (2013). Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Karlsruhe.
<https://www.bookshop.fraunhofer.de/buch/Energieverbrauch-und-CO2-Emissionen-industrieller-Prozesstechnologien-Einsparpotenziale-Hemmnisse-und-Instrumente/239044>
- [14] Voß (2013). Ressourceneffizienz als Herausforderung für die Grundstoffchemie in Deutschland. Bremen. https://www.boeckler.de/pdf_fof/91484.pdf
- [15] Saygin, Patel, Tam, Gielen (2009). Chemical and Petrochemical Sector - Potential of best practice technology and other measures for improving energy efficiency. IEA Information Paper. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21589328>
- [16] Conversio (2022). Kurzfassung der Conversio Studie - Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. https://www.gkv.de/assets/uploads/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1.pdf
- [17] Neelis, Patel, Bach, Blok (2005). Analysis of energy use and carbon losses in the chemical and refinery industries. Utrecht, Niederlande. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261907000189>
- [18] International Energy Agency (2021). Oil 2021 - Analysis and forecast to 2026. Paris, Cedex. <https://www.iea.org/reports/oil-2021>
- [19] PlasticsEurope (2021). Plastics - the facts 2021. Brüssel, Belgien. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- [20] Saygin, Patel, Worrell, Tam, Gielen (2011). Potential of best practice technology to improve energy efficiency in the global chemical and petrochemical sector. Energy 36 (2011) 5779-5790. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211003446>
- [21] FNB Gas (2021). Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032 - Szenariorahmen. Berlin. <https://fnb-gas.de/netzentwicklungspl%C3%A4ne/netzentwicklungsplan-2022/>
- [22] Fuel Cells and Hydrogen Observatory FCHO (2022). Chapter 2 - 2022 Hydrogen Supply Capacity and Demand. <https://www.fchobservatory.eu/sites/default/files/reports/Chapter%20%20-%20FCHO%20Market%20-%202022%20Final.pdf>
- [23] Eurofluor (2019). EUROFLUOR HF - A snapshot of the fluorine industry. 4th edition. Brüssel, Belgien. <https://www.eurofluor.org/publications-and-recommendations/>
- [24] Joerss et al. (2022). Beyond the Tip of the Iceberg: Suspect Screening Reveals Point Source-Specific Patterns of Emerging and Novel Per- and Polyfluoroalkyl Substances in German and Chinese Rivers. Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 5456–5465. <https://pubs.acs.org/10.1021/acs.est.1c07987>
- [25] Roads2Hy (2007). Hydrogen infrastructure atlas - Part II: Industrial surplus hydrogen and markets and production. www.roads2hy.com
- [26] Industrieverband Agrar (2020). Wichtige Zahlen 2019-2020 - Düngemittel: Produktion, Markt, Landwirtschaft. Frankfurt am Main. <https://www.iva.de/publikationen/wichtige-zahlen-2019-2020>
- [27] en2x (vormals Mineralölwirtschaftsverband MWV) (2021). Jahresbericht 2021. Berlin. <https://en2x.de/>

- [28] en2x (vormals Mineralölwirtschaftsverband MWV) (2021). Mineralölversorgung mit Pipelines. Berlin. <https://en2x.de/>
- [29] IHS Markit (2019). Crude Oil-to-Chemicals (COTC) - A look inside our technology & economic analyses from the 2019 – 2014 Process and Economics Program (PEP). <https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0519/COTCBrochurePEP.pdf>
- [30] Mathonniere (2019). Corrected: INSIGHT: Crude oil to chemicals (COTC), a refiner's new mantra. ICIS. <https://www.icis.com/explore/resources/news/2019/03/01/10325916/insight-crude-oil-to-chemicals-cotc-a-refiners-new-mantra/>
- [31] Bug (2020). Selected Investments in the Chemical Industry in Germany. Germany Trade and Invest. <https://www.gtai.de/resource/blob/590290/cf03573f9412c6c3f209209fc62d811a/Investments-Chemical-Industry-Dec2020.pdf>
- [32] Diettrich, Pluta, Medjroubi (2021). SciGRID_gas IGGIELGN (1.1.2) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4767098>
- [33] Süddeutsche Zeitung (2022). Energie sparen: Wie große Unternehmen sich vorbereiten. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/energie-schwarzheide-energie-sparen-wie-grosse-unternehmen-sich-vorbereiten-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-220803-99-254567>
- [34] Handelsblatt (2022). "Wir geben aktuell noch mal alles" - Industrie sieht nicht mehr viel Einsparpotenzial bei Gas. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/erdgas-versorgung-wir-geben-aktuell-noch-mal-alles-industrie-sieht-nicht-mehr-viel-einsparpotenzial-bei-gas/28520672.html>
- [35] KunststoffWeb (2022). Versalis: Cracker in Dunkerque wieder in Betrieb. https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/versalis_cracker_in_dunkerque_wieder_in_betrieb_t250508
- [36] IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2, Energy. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- [37] Ineos (2019). INEOS, Europe's largest petrochemicals company, announces Antwerp as the location for its new ground breaking 3 billion Euro petrochemical investment. <https://www.ineos.com/news/ineos-group/ineos-announces-antwerp-as-the-location-for-new-petrochemical-investment/>
- [38] Riemer, Schreiner, Wachsmuth (2022). Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia Analysis of Technical Feasibility under Economic Considerations. Karlsruhe. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2022/presseinfo-25-lng-terminals-wasserstoff-ammoniak.html>
- [39] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (2018). Umweltministerium fordert wassereinleitende Unternehmen auf, die Nutzung von Flusswasser zur Kühlung zu drosseln. https://mkuem.rlp.de/de/pressemitteilungen/detail/news/News/detail/umweltministerium-fordert-wassereinleitende-unternehmen-auf-die-nutzung-von-flusswasser-zur-kuehlung/?no_cache=1
- [40] Germany Trade and Invest (2020). Chemical Parks & Pipelines in Germany. <https://www.gtai.de/en/invest/industries/industrial-production/chemicals-materials/chemical-parks-in-germany>

- [41] RWE (undatiert). Ludwigshafen CCGT plant. <https://www.rwe.com/en/the-group/countries-and-locations/ludwigshafen-ccgt-plant>
- [42] Yara (2015). Yara Brunsbüttel wins the IFA Green Leaf Award. <https://www.yara.com/news-and-media/news/archive/2015/yara-brunsbuttel-wins-the-ifa-green-leaf-award/>
- [43] Umweltbundesamt (2021). Anlagenliste EU-Registry mit IE-RL-Genehmigungen und Ausnahmen gemäß Art. 15(4) IE-RL für das Berichtsjahr 2020 inkl. Erläuterungen zu den verwendeten Spalten. <https://www.thru.de/thrude/downloads/>
- [44] European Environment Agency (2022). Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006. Industrial Reporting database, May 2022. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/industrial-reporting-under-the-industrial-6>
- [45] Brinkmann, Giner Santonja, Schorcht, Roudier, Delgado Sancho (2014). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. ISBN 978-92-79-40945-5. Sevilla, Spanien. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/production-chlor-alkali-0>
- [46] European Commission (2009). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/energy-efficiency>
- [47] European Commission (2007). Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/large-volume-inorganic-chemicals-ammonia-acids-and-fertilisers>
- [48] European Commission (2007). Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Solids and Others industry. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/large-volume-inorganic-chemicals-solids-and-others-industry>
- [49] Falcke, Holbrook, Clenahan, Lopez Carretero, Sanalan, Brinkmann, Roth, Zerger, Roudier, Delgado Sancho (2017). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/production-large-volume-organic-chemicals-0>
- [50] European Commission (2006). Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Organic Fine Chemicals. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/manufacture-organic-fine-chemicals>
- [51] European Commission (2007). Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/production-polymers>
- [52] Barthe, Chaugny, Roudier, Delgado Sancho (2015). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/refining-mineral-oil-and-gas-0>
- [53] Lecomte, Ferrería de la Fuente, Neuwahl, Canova, Pinasseau, Jankov, Brinkmann, Roudier, Delgado Sancho (2017). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/large-combustion-plants-0>

- [54] ThyssenKrupp Industrial Solutions (2015). World Market Leader in Aromatics Extraction. https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products___services/chemical_plants___processes/tkis_aromatics.pdf
- [55] MiRO (2022). Rohölverarbeitung - Stufe für Stufe zum Qualitätsprodukt. <https://www.miro-ka.de/de/produkte-prozesse.htm>
- [56] Müller, Schiessl, Volk, Schltmann (2021). Assessment of site-specific greenhouse gas emissions of chemical producers: Case studies of propylene and toluene diisocyanate. *Journal of Cleaner Production*, Volume 317, 1 October 2021, 128086. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621023040>
- [57] Evonik (2015). Evonik opens new plants with innovative technology in Marl, Germany. <https://corporate.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/evonik-opens-new-plants-with-innovative-technology-in-marl-germany-106412.html>
- [58] Reuters (2021). Shell opens 10 MW hydrogen electrolyser at Wesseling site of German refinery. <https://www.reuters.com/business/energy/shell-opens-10-mw-hydrogen-electrolyser-wesseling-site-german-refinery-2021-07-02/>
- [59] Shell (2021). Shell to build one of Europe's biggest biofuels facilities. <https://www.shell.com/media/news-and-media-releases/2021/shell-to-build-one-of-europes-biggest-biofuels-facilities.html>
- [60] N.N (2009). Process design course DME. NTNU; Norwegen. https://folk.ntnu.no/skoge/diplom/prosjekt09/dme-project/ProcessDesignCourse_DME_Autumn%202009.pdf#page=7
- [61] OMV (2016). OMV Deutschland - Burghausen – Raffinerie mit Zukunft. <https://www.omv.de/services/downloads/00/omv.de/1522141187364/raffineriebrosch-re.pdf>
- [62] A Barrell Full (2015). Bayernoil Ingolstadt Refinery. <http://abarrellfull.wikidot.com/bayernoil-ingolstadt-refinery>
- [63] Kaiser (2010). Raffineriesterben - Deutsche Spritfabriken vor dem Aus. <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/a-709416.html>
- [64] PlasticsEurope (2017). PlasticsEurope recommendation on Steam Cracker allocation. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/PlasticsEurope_recommendation_on_Steam_Cracker_allocation_Juillet_2018.pdf
- [65] VCI (2022). Chemiewirtschaft in Zahlen. <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>
- [66] Open Power System Data (2020). Data Package Conventional power plants. Version 2020-10-01. https://doi.org/10.25832/conventional_power_plants/2020-10-01
- [67] Stamen Design (2022). <https://stamen.com/>
- [68] Eurostat (2022). Energy Balances. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances> (Datenzugriff Herbst/Winter 2022)
- [69] UN (2022). UN Comtrade-Datenbank. <https://comtrade.un.org/> (Datenzugriff Herbst/Winter 2022)

- [70] BASF (2021). BASF completes purchase of 49.5% of the offshore wind farm Hollandse Kust Zuid from Vattenfall. <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2021/09/p-21-297.html>
- [71] Reuters (2021). RWE and BASF plan \$4.9 bln wind power project. <https://www.reuters.com/business/energy/rwe-basf-plan-49-bln-wind-power-project-2021-05-21/>
- [72] Ørsted/BASF (2021). Ørsted and BASF sign a 25-year offshore wind power purchase agreement in Germany. <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2021/11/p-21-369.html>
- [73] BASF/SABIC/Linde (2022). BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces. <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>
- [74] Dow/Shell (2020). Dow and Shell team up to develop electric cracking technology. <https://www.shell.com/business-customers/chemicals/media-releases/2020-media-releases/dow-and-shell-team-up-to-develop-electric-cracking-technology.html>
- [75] Solvay (2021). Part of the Solvay One Planet strategic roadmap, the Rheinberg plant's coal exit will establish a new global sustainability reference for soda ash production worldwide. <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-to-phase-out-coal-energy-use-in-rheinberg-soda-ash-plant>
- [76] Chemietechnik (2022). Infraserb Gendorf und E.on errichten Biomasse-Heizkraftwerk. <https://www.chemietechnik.de/service-standorte/infraserb-gendorf-und-eon-errichten-biomasse-heizkraftwerk-662.html>
- [77] European Environment Agency (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report No 13/2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- [78] BASF/MAN Energy Solutions (2022). BASF und MAN Energy Solutions vereinbaren Zusammenarbeit für den Bau einer der weltgrößten Wärmepumpen in Ludwigshafen. <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2022/07/p-22-278.html>
- [79] Dow (2022). Dow und Mura Technology planen Bau Europas größter Anlage für chemisches Recycling am sächsischen Dow-Standort in Böhlen. <https://de.dow.com/de-de/presse/pressemeldungen/dow-und-mura-technology-planen-bau-europas-groebter-anlage-fur-chemisches-recycling.html>
- [80] ecspp (2010). An Overview of the Pipeline Networks of Europe. <https://chemicalparks.eu/europe/pipeline-networks>
- [81] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2023). Statistik Nachwachsende Rohstoffe. <https://www.fnr.de/fileadmin/Statistik/2023.pdf>
- [82] PlasticsEurope (2019). Eco-profiles program and methodology –PlasticsEurope – V3.0. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/>
- [83] Scholz, Schneider, Saurat, Theisen (2023). Das petrochemische System in Deutschland und Westeuropa: regionale Analyse der Polymer-Produktion in Deutschland, den Niederlanden und Belgien - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "Green Feedstock for a Sustainable Chemistry - Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der

chemischen Industrie". Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal, Deutschland.
<https://doi.org/10.48506/opus-8146>