

Teilbericht 1 | Februar 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 chemi-
schen Industrie“

*Alexander Scholz
Clemens Schneider
Mathieu Saurat
Svenja Theisen*

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Autorinnen und Autoren:

Alexander Scholz, Clemens Schneider,
Mathieu Saurat, Svenja Theisen

Alexander.Scholz@wupperinst.org
Clemens.Schneider@wupperinst.org

Bitte die Publikation folgendermaßen zitieren:

Scholz, A., Schneider, C., Saurat, M., Theisen, S. (2023): Das petrochemische System in Deutschland und Westeuropa. Regionale Analyse der Polymer-Produktion in Deutschland, den Niederlanden und Belgien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed – Green Feedstock for a Sustainable Chemistry. Wuppertal Institut.

Danksagung

Diese Publikation ist entstanden innerhalb des Forschungsprojekts „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry – Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie (GreenFeed)“. Das vom Wuppertal Institut geleitete Forschungsprojekt exploriert gemeinsam mit seinen Partnern, dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum, mögliche Pfade für eine Transformation der heutigen Petrochemie hin zu einem zirkulären und auf erneuerbaren Rohstoffen basierendem System. Die vorliegende Publikation wird laufend ergänzt durch weitere Ergebnisberichte. Die Herausgeber danken allen beteiligten Forschungsinstituten, dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger sowie den projektexternen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie für die konstruktive Zusammenarbeit im Gesamtprojekt.

Disclaimer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03EI5003A durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Projektlaufzeit: März 2022 – Februar 2025

Verbundpartner:

Wuppertal Institut (Koordination): Clemens Schneider, Alexander Scholz
Karlsruher Institut für Technologie: Prof. Dr. Dieter Stapf
Deutsches Biomasseforschungszentrum: Dr. Kathleen Meisel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
1 Hintergrund, Zielsetzung und Aufbau des Papiers	5
2 Das petrochemische System in und um Deutschland	7
2.1 Produktionsbilanz für Deutschland	9
2.2 Energie-, Feedstock- und Kohlenstoffbilanz für die Produktion chemischer Grundstoffe in Deutschland	10
2.3 Verflechtungen im Produktionssystem Deutschland	14
3 Petrochemisches Cluster Bayerisches Chemiedreieck	18
3.1 Charakterisierung des Clusters	18
3.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	20
3.3 Versorgung des Clusters	21
4 Petrochemisches Cluster BASF Ludwigshafen	25
4.1 Charakterisierung des Clusters	25
4.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	27
4.3 Versorgung des Clusters	30
5 Petrochemisches Cluster Rheinland	33
5.1 Charakterisierung des Clusters	33
5.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	35
5.3 Versorgung des Clusters	38
6 Petrochemisches Cluster Emscher-Lippe	41
6.1 Charakterisierung des Clusters	41
6.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	43
6.3 Versorgung des Clusters	45
7 Petrochemisches Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck	48
7.1 Charakterisierung des Clusters	48
7.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	50
7.3 Versorgung des Clusters	52
8 Petrochemisches Cluster Nordsee	55
8.1 Charakterisierung des Clusters	55
8.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	56
8.3 Versorgung des Clusters	58
9 Petrochemisches Cluster Rotterdam	61
9.1 Charakterisierung des Clusters	61
9.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	64
10 Petrochemisches Cluster Antwerpen	66
10.1 Charakterisierung des Clusters	66
10.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters	68
11 Literaturverzeichnis	71
12 Anhang	76

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Modellrechnung einer Primärenergiebilanz für die Produktion von chemischen Grundstoffen in Deutschland im Jahr 2018 [in TWh/a] -----	13
Tab. 2-2	Verflechtungsmatrix (ausgewählte Relationen auf der Ebene von NUTS 2) für die Binnenschifffahrt in Deutschland mit organischen chemischen Grundstoffen [transportierte Güter im Jahr 2018 in 1.000 Tonnen]-----	16
Tab. 2-3	Verflechtungsmatrix (ausgewählte Relationen auf der Ebene von NUTS 2) für den Eisenbahnverkehr in Deutschland mit organischen chemischen Grundstoffen [transportierte Güter im Jahr 2018 in 1.000 Tonnen]-----	17
Tab. 3-1	Empfang von relevanten Gütern des Regierungsbezirks Oberbayern im Eisenbahnverkehr nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr) -----	24
Tab. 4-1	Empfang von relevanten Gütern in den Binnenhäfen des Regierungsbezirks Rheinhessen-Pfalz nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr) -----	31
Tab. 4-2	Empfang von relevanten Gütern des Regierungsbezirks Rheinhessen-Pfalz per Bahn nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr) -----	32
Tab. 5-1	Empfang von relevanten Gütern in den Binnenhäfen des Regierungsbezirks Köln nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr) -----	40
Tab. 7-1	Empfang von relevanten Gütern in Sachsen-Anhalt im Eisenbahnverkehr nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr) -----	54
Tab. 8-1	Empfang von relevanten Gütern in den Seehäfen Bützfleth und Brunsbüttel im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr).-----	60
Tab. 12-1	Technologiekapazitäten im Cluster Bayerisches Chemiedreieck -----	76
Tab. 12-2	Technologiekapazitäten im Cluster BASF Ludwigshafen -----	77
Tab. 12-3	Technologiekapazitäten im Cluster Rheinland-----	78
Tab. 12-4	Technologiekapazitäten im Cluster Emscher-Lippe -----	79
Tab. 12-5	Technologiekapazitäten im Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck-----	80
Tab. 12-6	Technologiekapazitäten im Cluster Nordsee -----	81
Tab. 12-7	Technologiekapazitäten im Cluster Rotterdam -----	82
Tab. 12-8	Technologiekapazitäten im Cluster Antwerpen-----	83

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Überblick über alle relevanten Chemiestandorte und Erdölraffinerien in und um Deutschland, inklusive Produktionsvolumen an High-Value-Chemicals und Polymeren sowie infrastruktureller Verflechtungen. -----	7
Abb. 2-2	Sankey-Diagramm zur Polymerproduktion in Deutschland. Die Werte entsprechen modellierten Produktionsmengen im Jahr 2018. -----	10
Abb. 2-3	Modellierter Primärenergiebedarf der Produktion von chemischen Grundstoffen in Deutschland im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug). -----	12
Abb. 2-4	Kohlenstoffbilanz für das betrachtete Produktionssystem in Deutschland für das Jahr 2018. -----	14
Abb. 3-1	Geographische Verortung des Clusters Bayerisches Chemiedreieck und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	18
Abb. 3-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Bayerisches Chemiedreieck für das Jahr 2018. -----	20
Abb. 3-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Bayerisches Chemiedreieck. -----	21
Abb. 3-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Bayerischen Chemiedreiecks im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug) -----	23
Abb. 4-1	Geographische Verortung des Clusters BASF Ludwigshafen sowie infrastrukturelle Anbindung an andere Chemiestandorte und Raffinerien im Umland. -----	25
Abb. 4-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette am Standort BASF Ludwigshafen im Jahr 2018. -----	27
Abb. 4-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters BASF Ludwigshafen. -----	29
Abb. 4-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters BASF Ludwigshafen im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug). -----	30
Abb. 5-1	Geographische Verortung des Clusters Rheinland und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen.. -----	33
Abb. 5-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Rheinland für das Jahr 2018. -----	35
Abb. 5-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Rheinland. -----	37
Abb. 5-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Rheinland im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug). -----	39
Abb. 6-1	Geographische Verortung des Clusters Emscher-Lippe und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	41
Abb. 6-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Emscher-Lippe für das Jahr 2018. -----	43
Abb. 6-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Emscher-Lippe. -----	45
Abb. 6-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Emscher-Lippe im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug). -----	47
Abb. 7-1	Geographische Verortung des Clusters Mitteldeutsches Chemiedreieck und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	48
Abb. 7-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck für das Jahr 2018. -----	50
Abb. 7-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Mitteldeutschen Chemiedreiecks. -----	52
Abb. 7-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Mitteldeutschen Chemiedreiecks im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug). -----	53

Abb. 8-1	Geographische Verortung des Clusters Nordsee und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	55
Abb. 8-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Nordsee für das Jahr 2018.-----	56
Abb. 8-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Nordsee.-----	58
Abb. 8-4	Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Nordsee im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).-----	59
Abb. 9-1	Geographische Verortung des Clusters Rotterdam und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	61
Abb. 9-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Rotterdam für das Jahr 2018. -----	64
Abb. 9-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Rheinland. -----	65
Abb. 10-1	Geographische Verortung des Clusters Antwerpen und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. -----	66
Abb. 10-2	Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Antwerpen für das Jahr 2018.-----	68
Abb. 10-3	Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Antwerpen.-----	70

1 Hintergrund, Zielsetzung und Aufbau des Papiers

Die Herstellung petrochemischer Grundstoffe ist sowohl energetisch als auch stofflich in Deutschland für rund 20 % der Nachfrage nach Mineralölprodukten verantwortlich (BAFA, 2021). Das Gros fließt in die Produktion von Olefinen und Aromaten, welche als sogenannte Plattformchemikalien wiederum die Ausgangsbasis für die Herstellung von Polymeren und Kunststoffen darstellen. Letztgenannte sind von größter Relevanz für die Branche: Von den knapp 60 Milliarden Euro Umsatz, welche die deutsche petrochemische Industrie im Jahr 2021 generierte, entfiel gut die Hälfte auf das Marktsegment der Polymere (VCI, 2022). Daraus resultieren jedoch über die gesamte Wertschöpfungskette CO₂-Emissionen von rund 50 Millionen Tonnen jährlich (Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut 2020).

Eine Transformation der heutigen auf fossilen Rohstoffen basierenden petrochemischen Industrie hin zu einem auf erneuerbaren Rohstoffen basierenden zirkulären System kann somit einen bedeutenden Beitrag zu einer primärenergetisch effizienten und klimaneutralen Wirtschaftsweise leisten. Das vom Wuppertal Institut geleitete Forschungsprojekt GreenFeed exploriert gemeinsam mit den Verbundpartnern Karlsruher Institut für Technologie und Deutsches Biomasseforschungszentrum mögliche Pfade hin zu einem solchen System.

Vor diesem **Hintergrund** wird im vorliegenden Papier zunächst das **heutige System** der ökonomischen und stofflichen Synergiebeziehungen zwischen den Raffinerien und der chemischen Industrie analysiert. Im geografischen Fokus stehen dabei Deutschland und der ARRR¹-Raum als bedeutendste Chemie-Region innerhalb Europas sowie inhaltlich der sehr relevante Teilbereich der Polymer-Produktion. Die **Kerninhalte** des Papiers sind

- eine Charakterisierung des petrochemischen Metabolismus *in Deutschland*, einschließlich Produktions-, Energie-, Feedstock- und Kohlenstoffbilanz sowie Infrastruktur- und Transportverflechtungen innerhalb dieses Systems
- *regionale Vertiefungen* in Form von insgesamt acht Steckbriefen über alle petrochemischen Cluster in Deutschland sowie des Antwerpener und Rotterdamer Clusters.

Diese Analysen haben zum Ziel, dem Lesenden ein Verständnis für das eng verwobene petrochemische Produktionssystem in Deutschland und dem ARRR-Raum zu vermitteln und stellen gleichzeitig eine wesentliche Ausgangsbasis für nachfolgende Arbeitspakete im Projektverlauf dar. Inhaltlich ist das Papier folgendermaßen **aufgebaut**:

Zunächst wird das *petrochemische System in Deutschland sowie angrenzender Staaten* charakterisiert und mithilfe von Kartenmaterial illustriert. Auf dieser Basis wird auch die gewählte Regionalisierung in Clustern erläutert. Hierzu gehört ebenfalls eine Bilanzierung der petrochemischen Produktion in Deutschland einschließlich ihres Bedarfs und ihrer Versorgung mit Energie- und Rohstoffen. Anknüpfend an diese übergeordneten, auf nationaler Ebene durchgeführten Arbeiten folgen *acht regionale Vertiefungen in Form von Cluster-Steckbriefen*. Diese sind stets nach demselben Schema aufgebaut. Zunächst erfolgt eine qualitative Charakterisierung

¹ Antwerpen-Rotterdam-Rhein-Ruhr-Area

des jeweiligen Clusters anhand ökonomischer Kennzahlen und seiner Entwicklungsgeschichte. Darüber hinaus werden die ortsansässigen Unternehmen mit ihren jeweiligen Produktionsschwerpunkten und Ansätzen zur Nutzung von neuartigen Feedstocks beschrieben. Mithilfe von Kartendarstellungen wird die Zusammensetzung des Clusters sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen erläutert. Anschließend erfolgt eine Analyse des regionalen petrochemischen Produktionssystems auf Basis von Modellrechnungen, welche Produktionsvolumina und Prozessverflechtungen aufzeigen. Daran anknüpfend wird für die deutschen Standorte der Bedarf an Energie- und Rohstoffen für die Produktion bilanziert sowie Einblicke in die Versorgungsstrukturen innerhalb des Clusters gegeben. Abschließend werden im Anhang die Anlagenkapazitäten vor Ort für jedes Cluster aufgelistet.

Bei der Analyse kommen die folgenden **Methoden** und Tools zum Einsatz:

- *Desk Research* in Onlinemedien, wissenschaftlichen Publikationen und Internetauftritten von Unternehmen sowie Experten- und Stakeholderbefragung
- *Infrastrukturanalyse und Kartenerstellung* mithilfe von GIS-Daten
- *Datenbankauswertung* mit Wertschöpfungskettenanalyse mithilfe einer WI-internen Industriedatenbank
- *Modellrechnung* mithilfe des WI-internen Industriemodells „WISEE EDM-i“. Dieses Modell wird am Wuppertal Institut zur Erstellung von Szenarien eingesetzt und kommt auch im Projekt GreenFeed zu diesem Zweck in anderen Arbeitspaketen zur Anwendung. Mit dem Modell lässt sich ein kostenoptimiertes räumlich differenziertes Produktionssystem modellieren, wie es beispielsweise auch im Rahmen von operations research üblich ist. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde untersucht, mit welchem Einsatz an heute bestehenden Produktionsanlagen in Europa ein vorgegebenes Produkt-Portfolio am effizientesten erstellt werden kann. Dabei wurden neben Hafenterminals auch die Raffinerien als Feedstock-Lieferanten berücksichtigt und die verschiedenen Feedstocks mit heutigen Marktpreisen bewertet. Bei der Optimierung verteilt das Modell die Produktion simultan sowohl auf verschiedene Technologien als auch auf einzelne Standorte. Alle im Modell berücksichtigten Feedstocks, Plattform- und Zwischenprodukte können zwischen Standorten mit entsprechenden Transportkosten ausgetauscht werden, wobei Pipelines die Transportkosten sehr stark senken und damit den Austausch erleichtern. Im Hinblick auf die Validität der Ergebnisse gibt es Einschränkungen: Die Ergebnisse zeigen einen idealtypischen Zustand auf Basis eines synthetischen Jahres, der nicht vollständig einem Zustand entspricht, wie er sich aus statistisch verfügbaren Produktions- und Handelsdaten rekonstruieren lässt, diesem jedoch nahekommt. Des Weiteren können weder unternehmensinterne Netzwerke noch Polymer-Exporte nach außerhalb der EU27+3 abgebildet werden.
- *Prozessflussanalyse* mithilfe von Sankey-Diagrammen
- *Energie-, Feedstock- und Kohlenstoffbilanzierung* mithilfe von Modellrechnungen (WISEE EDM-i)

2 Das petrochemische System in und um Deutschland

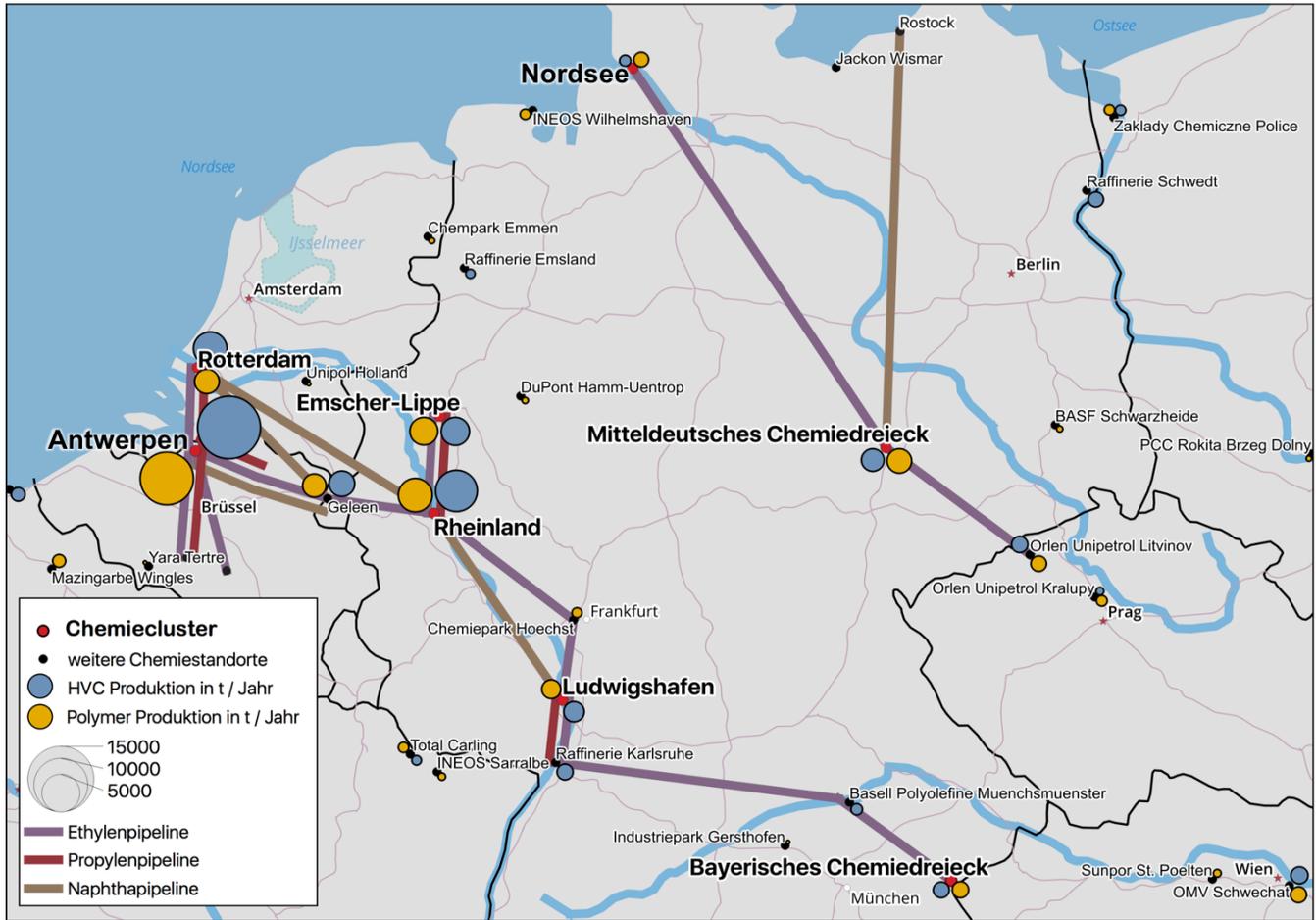


Abb. 2-1 Überblick über alle relevanten Chemiestandorte und Erdölraffinerien in und um Deutschland, inklusive Produktionsvolumen an High-Value-Chemicals und Polymeren sowie infrastruktureller Verflechtungen.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis eigener Modellrechnungen.

Die in Deutschland und Europa vorherrschende Produktionsstruktur der Petrochemie besteht aus einer Einbettung von Steamcrackern in Raffinerie-Komplexe, welche das aus Erdöl destillierte Naphtha und somit die Rohstoffbasis (Feedstock) für den Betrieb der Steamcracker bereitstellen. Letztere produzieren in erster Linie sogenannte High-Value-Chemicals (HVC), die wiederum als Ausgangsbasis für verschiedene Produktionsrouten bis hin zu Polymeren fungieren. Zu diesen auch als Plattformchemikalien bezeichneten HVC zählen die Olefine Ethylen, Propylen und Butadien sowie die Aromaten Toluol, Benzol und Xylol. In Abbildung 2-1 sind alle relevanten Petrochemie- und Raffineriestandorte in Deutschland und angrenzenden Staaten dargestellt. Schnell ist ersichtlich, dass die Produktion von HVC und deren Weiterverarbeitung zu Polymeren größtenteils in hochverdichteten Zentren stattfindet, die in einem System aus Pipelineinfrastruktur eng miteinander vernetzt sind. Die Regionen mit besonders hoher Konzentration an petrochemischer Produktion werden für die nachfolgenden Analysen zu insgesamt acht Clustern zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um:

- **Bayerisches Chemiedreieck:** Das Cluster besteht aus einer Ansammlung von Chemieunternehmen im südöstlichen Teil von Bayern, wovon insbesondere die Werke in den beiden Chemieparks Burghausen und Burgkirchen/Gendorf für die Petrochemie und damit die vorliegenden Arbeiten von Bedeutung sind. Abweichend von der offiziellen Charakterisierung des Bayerischen Chemiedreiecks sind die westlich und südlich von Burgkirchen gelegenen Standorte (u.a. in Waldkraiburg und Trostberg) nicht Teil des modellierten Produktionssystems, da diese keinen Fokus auf Polymere legen.
- **Ludwigshafen:** Mit einer Werksfläche von rund 10 km² gilt der Verbundstandort von BASF SE in Ludwigshafen, Rheinland-Pfalz, als größter zusammenhängender Chemiestandort weltweit. Die nahegelegene Mineralölraffinerie Oberrhein in Karlsruhe ist nicht Teil des modellierten Produktionssystems, deren Relevanz für das Cluster wird jedoch im Rahmen der Infrastrukturanalysen aufgearbeitet.
- **Rheinland:** Das Cluster Rheinland zeichnet sich durch eine sehr hohe Dichte von Chemieunternehmen aus, die südlich und nördlich von Köln am Rhein entlang gelegen sind und sich insbesondere in den Chemieparks Wesseling, Knapsack, Leverkusen und Dormagen aggregieren.
- **Emscher-Lippe:** Die Emscher-Lippe Region liegt im nördlichen Teil des Ruhrgebiets und wird dort von den beiden namensgebenden Flüssen eingerahmt. Mit einer sehr hohen Dichte an Industrieunternehmen handelt es sich um eine der wirtschaftlichen Kernzonen des Ruhrgebiets, die auch zu den wichtigsten Chemieregionen Deutschlands und Europas zählt. Abweichend von der offiziellen Charakterisierung der Emscher-Lippe Region zählen wir auch die Standorte in Uerdingen und Moers zum Cluster.
- **Mitteldeutsches Chemiedreieck:** Das Mitteldeutsche Chemiedreieck, oder auch Central European Chemical Network, ist ein regionales Netzwerk der chemischen Industrie in Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg. Es besteht aus den Chemieparks Zeitz, Böhlen, Leuna und Schkopau. Abweichend von der offiziellen Charakterisierung des Mitteldeutschen Chemiedreiecks sind die Standorte in Schwarzheide und Bitterfeld-Wolfen aufgrund ihrer Produktionsstruktur nicht Teil des Clusters.
- **Nordsee:** Das Cluster Nordsee setzt sich aus der Raffinerie Heide und den petrochemischen Standorten in Brunsbüttel und Stade zusammen, welche in den norddeutschen Bundesländern Niedersachsen und Schleswig-Holstein liegen. Streng genommen handelt es sich zwischen Heide/Brunsbüttel und Stade um zwei physisch und ökonomisch voneinander unabhängige Cluster, die für den Zweck der nachfolgenden Analysen jedoch zusammengefasst werden.
- **Rotterdam:** Das Cluster liegt im und um den Hafen von Rotterdam im Westen der Niederlande. Hierbei handelt es sich um den größten Seehafen und den zweitgrößten Chemiestandort in Europa, welcher als Teil der ARRA-Region eng mit der überregionalen Chemieindustrie vernetzt ist. Neben den Standorten im eigentlichen Hafengebiet wird aufgrund seiner engen Verflechtungen auch der von Shell im südlich gelegenen Moerdijk betriebene Chemicals Park zum Cluster Rotterdam gezählt.

- **Antwerpen:** Der Hafen von Antwerpen gilt als größter Chemiestandort in Europa und als zweitgrößter weltweit. Mit der Anbindung an den internationalen Seeverkehr und einem engmaschigen Pipelinesystem stellt das Cluster ein zentrales Drehkreuz für den Transport von Roh- und Grundstoffen innerhalb der ARRA-Region sowie der weiteren europäischen Petrochemie dar. Die im Umland von Antwerpen gelegenen Standorte in Geel, Meerhout, Beringen, Tessenderlo, Feluy und Jemeppe sind aufgrund ihrer Distanz nicht Teil des eigentlichen Clusters, werden aber im Rahmen der Infrastrukturanalysen in den regionalen Kontext eingebettet.

2.1 Produktionsbilanz für Deutschland

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 2-2 stellt die Polymerproduktion in Deutschland und die vorausgehende Verarbeitung der hierfür relevanten Vor- und Zwischenprodukte dar. Alle gezeigten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten basieren auf eigenen Modellrechnungen.

Etwa die Hälfte des für die Steamcracker benötigten Naphthas wird direkt importiert, die andere Hälfte wird in Raffinerien aus Rohöl destilliert. Neben Naphtha kommen jedoch auch weitere Raffinerieprodukte für die Herstellung von organischen Grundstoffen zum Einsatz. Hierzu zählen Schweröl, LPG und Gasöl für die Produktion von Olefinen, Reformate stellen eine wichtige Grundlage für die Aromatenproduktion. Sonstige Rohstoffe werden für die Bereitstellung von anorganischen Grundstoffen benötigt, allen voran Steinsalz für die Chlorproduktion sowie in geringerem Maße Erdgas und Stickstoff für Ammoniak. Insgesamt wird in Deutschland deutlich mehr Propylen, Benzol, Toluol, p-Xylol und Chlor hergestellt, als es für die nachfolgende Polymer-Produktion bedarf.

Die verschiedenen organischen und anorganischen Grundstoffe bilden die Ausgangsbasis für den gesamten Polymer-Metabolismus. Mengenmäßig am bedeutendsten ist die Produktion von Polyethylen verschiedener Dichte (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC). Neben diesen Massenprodukten wird jedoch eine ganze Reihe weiterer Polymere in Deutschland hergestellt, dazu zählen Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polycarbonat (PC), Polyethylenterephthalat (PET), expandiertes Polystyrol (EPS), Nylon 6, Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polybutadiene (PBR) und Polystyrol (PS).

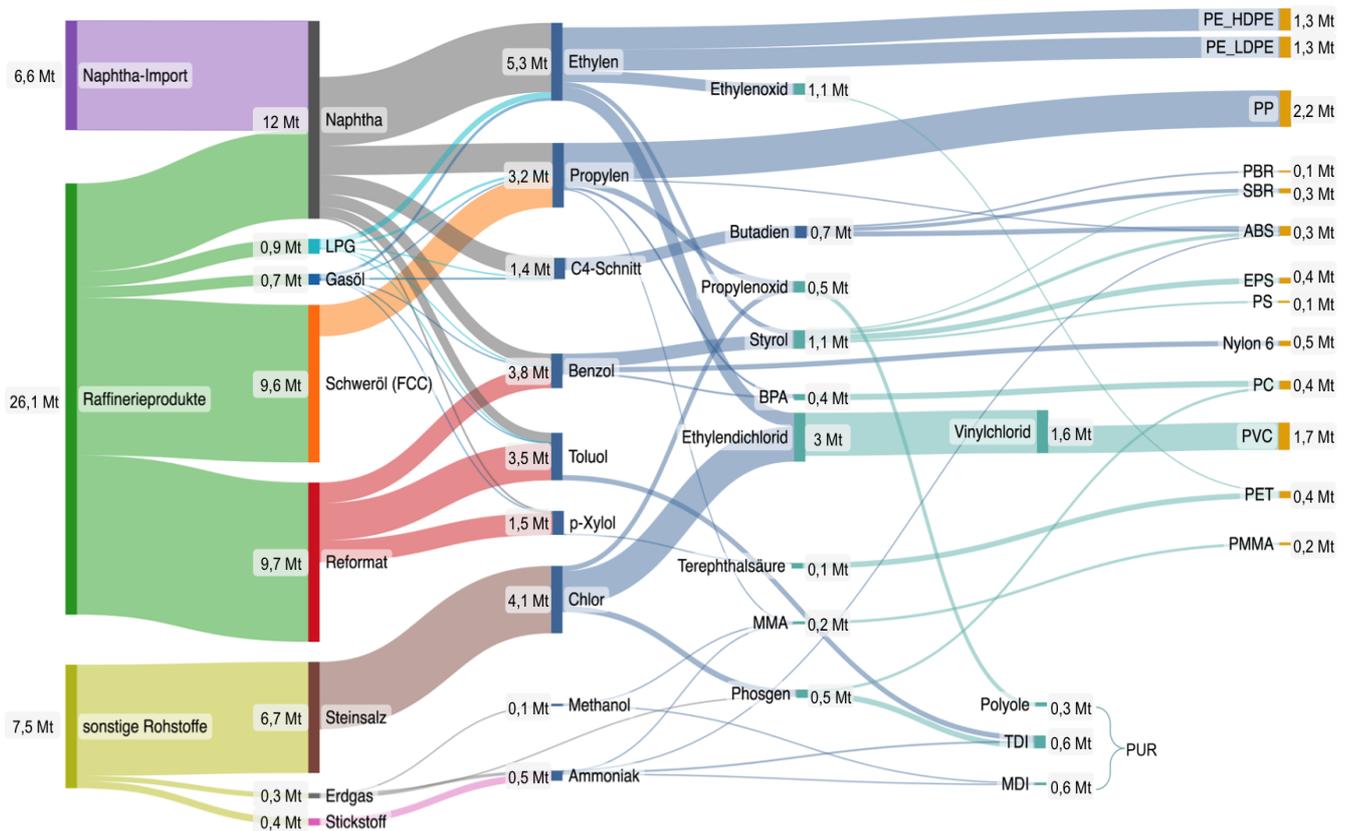


Abb. 2-2 Sankey-Diagramm zur Polymerproduktion in Deutschland. Die Werte entsprechen modellierten Produktionsmengen im Jahr 2018.

2.2 Energie-, Feedstock- und Kohlenstoffbilanz für die Produktion chemischer Grundstoffe in Deutschland

Die Primärenergie-Bilanz der Produktion von chemischen Grundstoffen wurde anhand von Modellrechnungen erstellt. Sie wird im folgenden Sankey-Diagramm für Deutschland insgesamt dargestellt und in der nachfolgenden Tabelle tiefer aufgeschlüsselt im Hinblick auf einzelne Technologien sowie der einzelnen untersuchten Cluster. Die Produktion in Deutschland ist demnach mit einem Primärenergiebedarf von 280 TWh an fossilen Energieträgern verbunden, wovon über 260 TWh bzw. 93% in den sechs untersuchten Clustern zu verorten sind (vgl. Tabelle 2-1). Ein bedeutender Teil des statistisch beobachteten Energiebedarfs kann in den Modellrechnungen nicht bottom-up anhand der Produktionskapazitäten und ihrer Auslastung erklärt werden und musste somit anhand von Kennzahlen auf einzelne Standorte bzw. Cluster allokiert werden. Insofern ist die Aufteilung auf die einzelnen Cluster sowie die übrigen Standorte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Dennoch vermag die Bilanzrechnung die überragende Bedeutung der sechs Cluster für den Energiebedarf der chemischen Grundstoffe zu verdeutlichen und kann damit den Fokus der Analyse rechtfertigen.

Über 70% des gesamten Primärenergiebedarfs ist so genannter stofflicher Bedarf, d.h. die Moleküle werden benötigt um die chemischen Produkte herzustellen. Im Folgenden verwenden wir hierfür auch den englischen Begriff „Feedstock“. Ein Teil des eingesetzten Feedstock wird in den Prozessen jedoch nicht in die Zielprodukte umgewandelt, es entstehen also energetisch nutzbare Bei-Produkte. Das Steam Cracking von Naphtha und LPG benötigt in Deutschland 180 TWh, wovon über die Hälfte alleine im Rheinland verbraucht werden. Ein

Anteil von 63 TWh steht nach dem Cracken wieder als Brennstoff zur Verfügung. Dies gilt jedoch nur brutto, denn in der deutschen Steam Cracker-Flotte wird gut die Hälfte davon wieder benötigt, um die Spaltöfen im Cracker zu betreiben. Meist wird hierfür der abdestillierte Leichtgas-Anteil der Steam Cracker-Produkte verwendet, der sich aus Methan und Wasserstoff zusammensetzt. Anders als gelegentlich dargestellt benötigt der Betrieb eines Naphtha-Steamm Crackers also kein Erdgas, sondern weist sogar einen Gas-Überschuss aus, der sich aus der Bei-Produktion speist. Das darüber hinaus entstehende Brennstoffaufkommen in Höhe von über 30 TWh wird in Dampfkesseln oder KWK-Anlagen genutzt. Deren Brennstoffbedarf liegt gemäß der Modellrechnung insgesamt bei 114 TWh, d.h. etwa ein Viertel kann durch die Beiprodukte gedeckt werden. Darüber hinaus wird (noch) Kohle eingesetzt. Regionaler Schwerpunkt hierfür ist Nordrhein-Westfalen. An einzelnen Standorten wird auch „überschüssiger“ Wasserstoff eingesetzt, also Wasserstoff aus der Beiproduktion von Chlor, der am jeweiligen Standort nicht stofflich genutzt werden kann. Der resultierende Brennstoffbedarf von KWK und Dampfkesseln wird in unserer Modellrechnung durch Erdgas gedeckt.² Erdgas wird darüber hinaus auch zum Betrieb sonstiger Industrieöfen eingesetzt. Am höchsten ist der Bedarf hier in der Produktionskette für PVC mit den Vorprodukten Ethylendichlorid (EDC) und Vinylchlorid-Monomer (VCM), die jeweils 3,7 und 3,5 TWh benötigen. Zuletzt ist auch noch der stoffliche Bedarf von Erdgas bedeutend: Alleine 14 TWh werden zur Erzeugung von Wasserstoff benötigt, wovon der Großteil auf die Ammoniakproduktion entfällt. Acetylen und Methanol kommen danach. Klarer regionaler Schwerpunkt der stofflichen Verwendung von Erdgas ist der Standort Ludwigshafen. Dieser weist mit knapp 30 TWh auch den höchsten Gesamt-Erdgasbedarf aller Cluster in Deutschland auf und vereinigt auf sich damit fast ein Drittel des gesamten Bedarfs der Grundstoffchemie in Deutschland (Stand 2018). Eine Unternehmensbefragung bei BASF hat ergeben, dass die Produktionsanlagen für Ammoniak und Acetylen wegen der angespannten Situation auf den Energiemärkten derzeit (Stand 2023) gedrosselt sind, sodass sich aktuell ein um 30% reduzierter Erdgasbedarf ergibt.

Im Sankeydiagramm (Abbildung 2-3) sowie im unteren Teil der Tabelle 2-1 sind auch die Dampf- und Stromerzeugung ausgewiesen. Bei ersterer ist der Fremdbezug von Dampf enthalten (in der deutschen Energiebilanz der AG Energiebilanzen als „Fernwärme“ bilanziert), bei zweiterer handelt es sich ausschließlich um die Eigenerzeugung von Strom. Da der Gesamtstrombedarf der Grundstoffchemie in Deutschland bei etwa 46 TWh liegt, läge die Eigenerzeugungsquote demnach bei ca. 25% und die Fremdstrombezüge lägen entsprechend bei 35 TWh. Der gesamte Primärenergiebedarf in Deutschland erhöht sich unter Berücksichtigung dieser (in der Tabelle nicht dargestellten) Strombezüge auf jährlich knapp 320 TWh.

² In der Realität ist die Bandbreite der eingesetzten Produkte weit höher und umfasst weitere Bei- bzw. Restprodukte der Produktion, jedoch in geringeren Mengen.

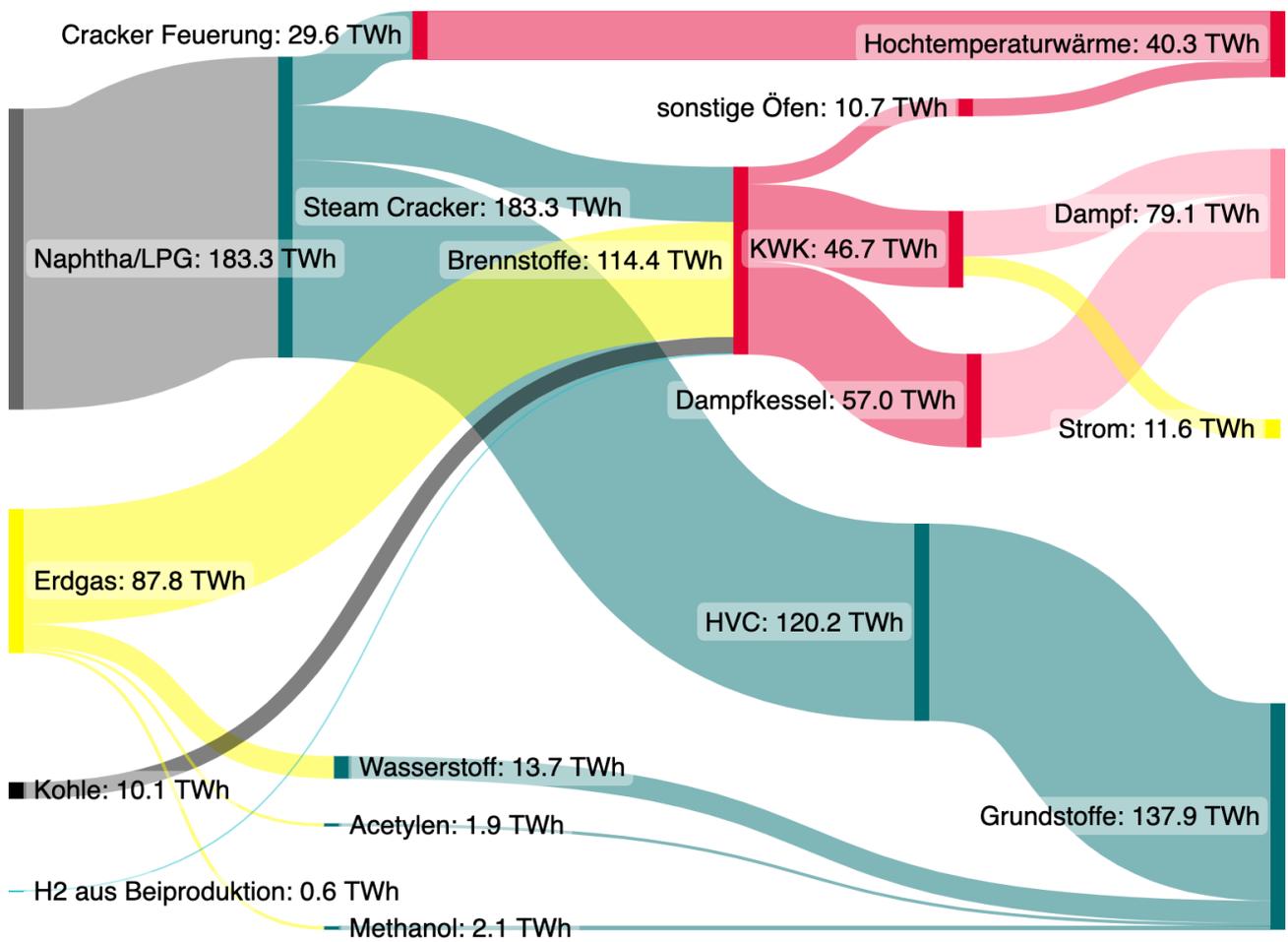


Abb. 2-3 Modellierter Primärenergiebedarf der Produktion von chemischen Grundstoffen in Deutschland im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Tab. 2-1 Modellrechnung einer Primärenergiebilanz für die Produktion von chemischen Grundstoffen in Deutschland im Jahr 2018 [in TWh/a]

	Rheinland	Emscher-Lippe	Ludwigs-hafen	Mitteldt. Chemie-Dreieck	Nordsee	Bayer. Chemie-Dreieck	Summe der Cluster	Deutschland insgesamt
Erdgasverbrauch stofflich	0,5	3,2	7,3	(-0,4)	3,1	(-0,3)	14,0	17,8
Wasserstoff	0,5	2,7	3,8	(-0,4)	3,1	(-0,3)	10,0	13,7
Acetylen		0,5	1,4				1,9	1,9
Methanol			2,1				2,1	2,1
Feedstock-Bedarf für Steam Cracking (v.a. Naphtha und LPG)	99,3	25,3	19,6	19,7	3,5	15,7	183,3	183,3
Brennstoffbedarf des Betriebs von Dampfkesseln	12,1	15,1	4,7	16,6	1,6	0,8	50,9	57,0
Brennstoffbedarf der KWK	10,3	3,9	17,1	1,8	4,0	1,8	38,8	46,7
Kohle	4,5	2,2					6,7	10,1
Wasserstoff aus Beiproduktion ¹⁾					0,4		0,4	0,6
Sonstige (Gas oder Cracker-Beiprodukte)	5,8	1,7	17,1	1,8	3,6	1,8	17,5	21,8
Brennstoffbedarf für Hoch-Temperaturwärme (Öfen)	18,2	6,7	4,9	4,4	0,9	3,5	38,5	40,3
Steam Cracking	15,8	4,0	3,6	3,1	0,6	2,5	29,6	29,6
EDC	1,0	0,9		0,4	0,4	0,5	3,2	3,7
VCM	0,3	0,4		0,3		0,2	1,3	1,5
Phthalsäureanhydrid		0,5	0,7				1,2	1,2
Ethylenoxid	0,2		0,3			0,2	0,8	0,9
Isopropanol		0,4					0,4	0,4
Industrieruß	0,3						0,3	0,3
Melamin			0,1				0,1	0,3
PET				0,5			0,5	0,5
sonstige	0,5	0,5	0,2	0,1		0,1	1,3	1,9
Brutto-Brennstoffaufkommen aus dem Steam Cracking²⁾	34,3	8,7	6,4	6,8	1,4	5,4	63,1	63,1
Netto-Primärenergiebedarf³⁾	106,1	45,4	47,2	35,6	11,3	16,4	262,0	281,3
Naphtha & LPG	99,3	25,3	19,6	19,7	3,5	15,7	183,3	183,3
Gas ⁴⁾	2,2	17,9	27,5	15,9	7,8	0,7	72,0	87,9
Kohle	4,5	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	10,1
Dampf- und Strombereitstellung								
Strom aus KWK	1,6	1,0	6,0	0,4	0,6	0,6	10,2	11,6
Dampf aus KWK	7,6	2,1	7,4	1,1	2,8	1,1	22,1	27,8
Dampf aus Dampfkesseln ⁵⁾	10,9	13,6	4,2	14,9	1,5	0,7	45,8	51,3

*) Nicht stofflich verwertbare Wasserstoffmengen ergeben sich an Standorten der Chlor-Alkali-Elektrolyse ohne eigenen stofflichen Wasserstoffbedarf und ohne Einbindung in ein Wasserstoff-Pipeline-Netz (z.B. in Stade). An

solchen Standorten wird der Wasserstoff in der Regel in Dampfkesseln oder einer KWK eingesetzt.

**) nicht stofflich verwertete Bei-Produkte, die mit dem Steam Cracker-Eigenbedarf und sonstigem Brutto-Brennstoffbedarf verrechnet werden.

***) Ohne Fremdbezüge von Elektrizität

****) Der Netto-Gasbedarf wurde als resultierender Primärenergiebedarf berechnet und drückt aus, in welchem Umfang die Standorte gasförmige Energieträger aus externen Quellen beziehen müssen. Durch die Eingliederung in Raffineriestandorte ist der tatsächliche Bedarf an den Standorten insgesamt höher. Insofern handelt es sich hier um den bilanziellen Bedarf der Produktion an chemischen Grundstoffen. Negativ ausgewiesene Erdgas-Bedarfe aufgrund von Wasserstoff-Überschüssen wurden beim Nettobedarf nicht als negativer Gasbedarf gewertet, da diese speziell im mitteldeutschen und im bayrischen Chemiedreieck an die angeschlossenen Raffinerien abgegeben werden dürften.

*****) Inkl. Dampf-Fremdbezug.

Abschließend ist in Abbildung 2-4 eine Kohlenstoffbilanz für das betrachtete Produktionssystem in Deutschland dargestellt. Die Werte wurde ermittelt durch Verrechnung der modellierten Produktionsmengen (siehe Abbildung 2-3) und der stöchiometrischen Kohlenstoffgehalte der spezifischen Chemikalien.

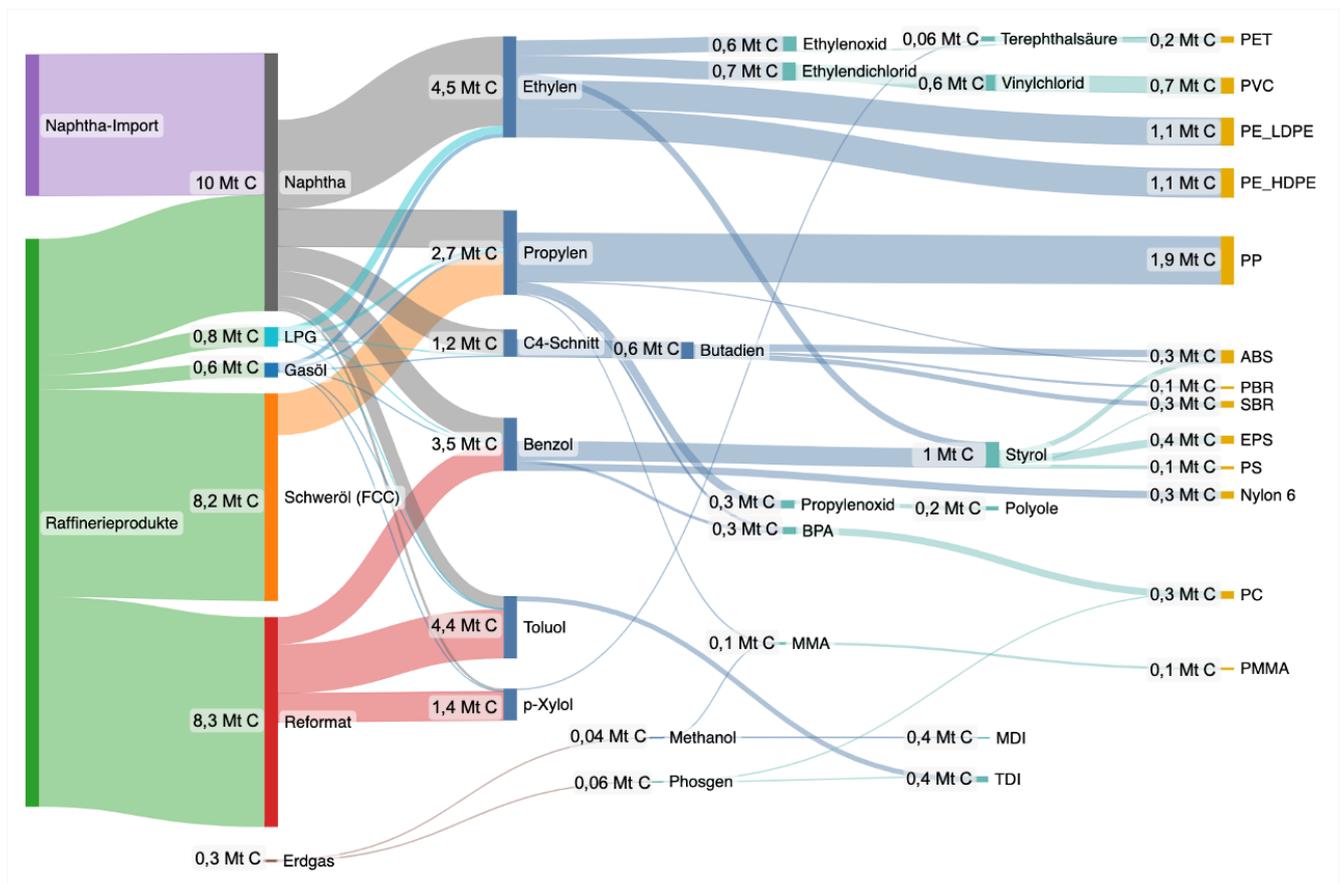


Abb. 2-4 Kohlenstoffbilanz für das betrachtete Produktionssystem in Deutschland für das Jahr 2018.

2.3 Verflechtungen im Produktionssystem Deutschland

Chemische Erzeugnisse werden in Deutschland über ein multimodales System unterschiedlicher Verkehrswege transportiert. Mengenmäßig am bedeutsamsten ist hierbei der LKW-Verkehr, gefolgt von Eisenbahn, Binnenschiff, Seeschiff und Pipelines (VCI, 2022). Allein über den Straßenverkehr werden pro Jahr 170 Mio. Tonnen chemischer Erzeugnisse aller Art mit dem LKW transportiert (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022). Die Bedeutung organischer Grundstoffe dürfte darunter begrenzt

sein, wenn auch der Transport flüssiger und gasförmiger Chemieprodukte in Wechselbehältern durchaus üblich geworden ist. Diese können vom LKW auch auf die Bahn verladen werden und umgekehrt. Für den regionalen und überregionalen Austausch mit Roh- und Grundstoffen wie Rohöl, Naphtha, Ethylen und Propylen zwischen den Raffinerien und den petrochemischen Clustern ist der Pipelinetransport von sehr hoher Bedeutung (siehe Abbildung 2-1).

Mit Ausnahme des Mitteldeutschen und Bayerischen Chemiedreiecks verfügen alle deutschen Petrochemie-Cluster über einen direkten Zugang zur Binnenschifffahrt mit eigenen Häfen. Die beiden folgenden Tabellen zeigen die Verkehrsverflechtungen zwischen den Regierungsbezirken beim Transport von Grundstoffen der organischen Chemie auf (sog. NUTS2-Ebene). Diese Palette an Grundstoffe umfasst die Plattformchemikalien zur Kunststoffproduktion (Olefine, Butadien, Aromaten) wie auch darauf aufbauende Zwischenprodukte. Wie Tabelle 2-3 aufzeigt, ist die Binnenschifffahrt vor allem für die direkt am Rhein liegenden Standorte des Rheinland-Clusters und für den Standort Ludwigshafen für den Austausch mit den Niederlanden (Rotterdam) und Belgien (Antwerpen) bedeutend, während für die anderen Cluster die Eisenbahn bei weitem wichtiger für ihre Lieferketten ist (s. Tabelle 2-3). Der Eisenbahn kommt vielfach eine wichtige Rolle auch im Nahverkehr zu (Verkehr innerhalb der NUTS2-Regionen). Im Regierungsbezirk Karlsruhe ist das Tanklager der BASF auf der Friesenheimer Insel verortet, welches gegenüber dem eigentlichen Produktionsstandort in Ludwigshafen einen Logistik-Hub mit verschiedenen Tanklagern darstellt. Insofern überraschen die für diesen Regierungsbezirk ausgewiesenen Transportmengen nicht. Daneben ist in diesem Regierungsbezirk aber auch die Raffinerie Karlsruhe beheimatet, die ebenfalls chemische Produkte (Propylen) herstellt.

Stade ist der einzige deutsche Petrochemie-Standort, der direkt über die Seeschifffahrt in bedeutendem Ausmaß in internationale Lieferketten eingebunden ist, während eine solche Einbindung in Brunsbüttel kaum gegeben ist (s. Steckbrief zum Cluster „Nordsee“).

Tab. 2-2 Verflechtungsmatrix (ausgewählte Relationen auf der Ebene von NUTS 2) für die Binnenschifffahrt in Deutschland mit organischen chemischen Grundstoffen [transportierte Güter im Jahr 2018 in 1.000 Tonnen]

Empfangsregion	Versandregion										
	RB Köln (Rheinland)	RB Düsseldorf (Rheinland, Emscher-Lippe)	RB Münster (Emscher-Lippe)	RB Rheinhessen-Pfalz (Ludwigshafen, Worms)	Schleswig-Holstein (Nordsee: Heide/ Brunsbüttel)	RB Lüneburg Nordsee: Stade)	RB Darmstadt (Frankfurt-Höchst)	RB Karlsruhe (BASF Ludwigshafen; Raffinerie Karlsruhe)	Niederlande	Belgien	Frankreich
RB Köln	95	41	20	4	0	0	5	1	157	51	3
RB Düsseldorf	128	34	58	0	0	0	0	0	168	27	0
RB Münster	17	207	53	14	0	0	5	1	371	94	0
RB Rheinhessen-Pfalz	57	79	10	1	0	13	0	9	718	391	0
Schleswig-Holstein	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
RB Lüneburg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB Darmstadt	13	0	0	6	0	0	52	24	289	62	1
RB Karlsruhe	13	0	8	1	0	0	0	1	45	25	0
Niederlande	448	55	231	69	0	0	1	58	NA	0	27
Belgien	474	55	87	90	0	0	5	61	0	NA	14
Frankreich	0	0	0	38	0	0	40	0	40	65	NA

Tab. 2-3 Verflechtungsmatrix (ausgewählte Relationen auf der Ebene von NUTS 2) für den Eisenbahnverkehr in Deutschland mit organischen chemischen Grundstoffen [transportierte Güter im Jahr 2018 in 1.000 Tonnen]

Empfangsregion	Versandregion													
	RB Köln (Rheinland)	RB Düsseldorf (Rheinland, Emscher-Lippe)	RB Münster (Emscher-Lippe)	RB Rheinhausen-Pfalz (Ludwigshafen, Worms)	Sachsen-Anhalt (Mitteldt. Chemiedreieck)	RB Oberbayern (Bayer. Chemiedreieck)	Schleswig-Holstein (Nordsee: Heide/Brunsbüttel)	RB Lüneburg (Nordsee: Stade)	RB Darmstadt (Frankfurt-Höchst)	RB Karlsruhe (BASF Ludwigshafen; Raffinerie Karlsruhe)	Hamburg	Mecklenburg- Vorpommern	Ausland	Insgesamt
RB Köln	167	161	2	6	13	17	24	7	16	16	0	0	31	526
RB Düsseldorf	158	263	17	38	26	6	246	1	16	0	0	0	148	1'002
RB Münster	25	371	23	60	52	13	9	12	23	30	0	0	280	954
RB Rheinhausen-Pfalz	25	73	1	64	44	19	0	0	14	39	0	0	180	563
Sachsen-Anhalt	22	119	11	59	1'179	101	14	58	30	236	34	63	408	2'764
RB Oberbayern	17	155	18	104	70	70	0	0	6	107	0	0	126	799
Schleswig-Holstein	13	103	31	6	3	2	4	0	2	1	1	0	45	221
RB Lüneburg	0	5	1	1	41	20	1	8	1	0	24	0	132	289
RB Darmstadt	0	7	0	11	4	15	0	0	8	0	0	0	50	112
RB Karlsruhe	0	27	5	39	0	0	0	0	0	0	1	0	10	86
Hamburg	0	0	16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	66
Mecklenburg-Vorpommern	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	1	41
Ausland	129	190	103	436	208	634	2	25	70	206	15	28	400	3'111
Insgesamt	573	1'740	306	863	1'736	956	302	266	199	742	219	112	2'132	12'447

3 Petrochemisches Cluster Bayerisches Chemiedreieck

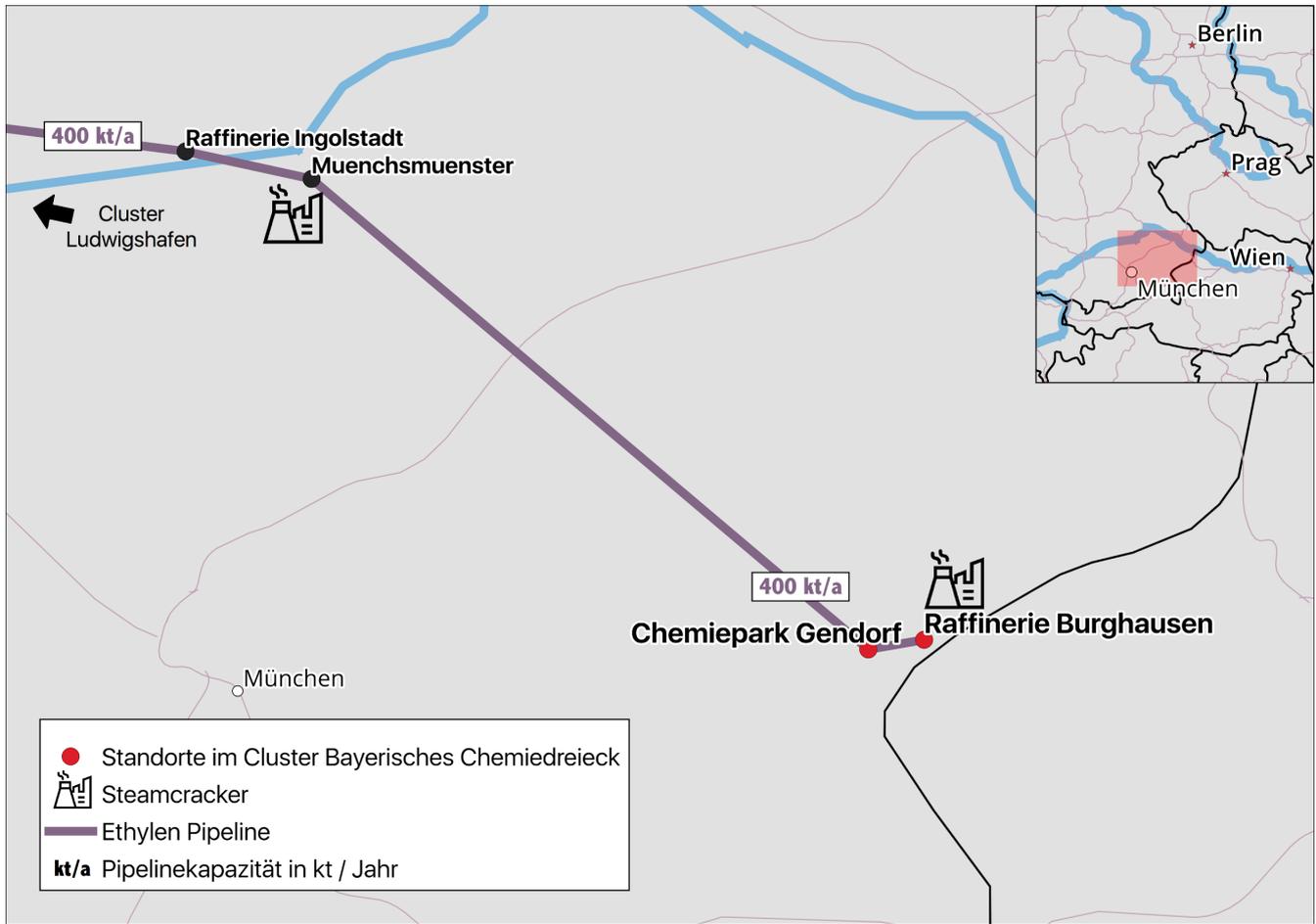


Abb. 3-1 Geographische Verortung des Clusters Bayerisches Chemiedreieck und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen.

Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

3.1 Charakterisierung des Clusters

Das Bayerische Chemiedreieck liegt im südöstlichen Teil von Bayern zwischen den Orten Aschau, Burghausen, Burgkirchen, Tittmoning, Töging, Trostberg und Waldkraiburg (ChemDelta Bavaria, o. J.-a). Die Lage an den beiden Flüssen Inn und Alz begründete im frühen 20. Jahrhundert die Standortwahl, als die Bayerischen Stickstoffwerke AG dort 1911 zunächst drei Wasserkraftwerke zur Produktion von Calciumcarbid und Kalkstickstoff errichtete. Mit der zunehmenden Ansiedlung von Unternehmen folgten weitere Wasserkraftwerke, mit deren Hilfe verschiedene Grundchemikalien und andere Industriegüter hergestellt werden konnten. Ab den 1960er Jahren gewann die Petrochemie zunehmend an Bedeutung. 1969 errichtete OMV in Burghausen die erste deutsche, rein petrochemische Raffinerie, wo auf Basis von über die Transalpine Pipeline bezogenes Rohöl Ethylen und Acetylen für nahegelegene Unternehmen wie Wacker und Hoechst produziert wurden.

Heute bilden 25 Einzelunternehmen mit insgesamt ca. 20.000 Beschäftigten das Bayerische Chemiedreieck, wovon insbesondere die Werke in den beiden Chemieparken Burghausen und Burgkirchen/Gendorf für die Petrochemie von Bedeutung

sind. Westlich und südlich von Burgkirchen befinden sich unter anderem in Waldkraiburg und Trostberg ebenfalls zum eigentlichen Chemiedreieck gehörende Standorte, diese haben jedoch keinen Fokus auf die Polymerproduktion. Die Einzelstandorte sind über den Austausch von Rohstoffen und Zwischenprodukten eng miteinander verbunden, hierzu gehört eine Vielzahl von direkten Pipelineverbindungen z.B. für Ethylen, Vinylchlorid, Wasserstoff und Erdgas zwischen den beiden Chemie-parks Burghausen und Burgkirchen/Gendorf (ChemDelta Bavaria, o. J.-b). Die Region ist jedoch auch im überregionalen Kontext infrastrukturell eingebettet. Wie in Abbildung 3-1 ersichtlich, ist das Cluster über eine Ethylenpipeline an benachbarte Chemiestandorte angeschlossen - wie das Polyolefine Werk in Münchsmünster und die Raffinerie in Ingolstadt - welche wiederum als Ethylen-Pipeline-Süd mit dem petrochemischen Cluster BASF Ludwigshafen verbunden sind.

Mit Blick auf die Polymerproduktion und für die weiteren Analysen sind im Bayerischen Chemiedreieck die folgenden Unternehmen von besonderer Relevanz:

- **OMV Deutschland AG:** Raffineriestandort mit jährlicher Verarbeitungskapazität von rund 3,8 Mio Tonnen Rohöl (OMV, o. J.), betreibt vor Ort ebenfalls einen Steamcracker mit jährlicher Produktionskapazität von 450.000 t Ethylen (Petrochemicals Europe, o. J.), wichtigster Lieferant von Ethylen, Propylen, Butadien im bayerischen Chemiedreieck. Beliefert vor Ort Borealis, Wacker Chemie, Clariant und Vinnolit, über die Ethylen-Pipeline-Süd jedoch auch den westdeutschen Markt
- **Borealis Polymere GmbH,** stellt insbesondere Polypropylen her
- **WACKER CHEMIE AG,** produziert Roh- und Grundstoffe wie Methanol, Ethylen, Essigsäure und Steinsalz
- Westlake **Vinnolit GmbH & Co. KG,** spezialisiert auf die PVC-Herstellung
- **Linde AG,** produziert insbesondere Acetylen und Wasserstoff
- **Clariant Produkte GmbH,** stellt verschiedene chemische Zwischenprodukte wie z.B. Ethylenoxid her
- **Dyneon GmbH,** produziert flourbasierte Monomere und Polymere

Wenngleich heute die Rohöl- bzw. naphthabasierte Produktion im Mittelpunkt steht, zeichnen sich bereits erste Strategien für neuartige Feedstocks im Bayerischen Chemiedreieck ab. So hat sich der OMV-Konzern das Ziel gesetzt, vermehrt auf nachhaltigere Polyolefine (d.h. einschließlich recycelten und biobasierten Lösungen) zu setzen. Von diesen sollen konzernweit bis 2025 350 kt/Jahr und bis 2030 rund 2.000 kt/Jahr produziert werden (OMV, 2021). Insbesondere mit Blick auf das chemische Recycling soll dabei mit Borealis zusammengearbeitet werden. Welcher Anteil davon auf den Standort Burghausen entfällt, konnte nicht ausfindig gemacht werden. Daneben ist der Steamcracker vor Ort zwischenzeitlich mit dem globalen Standard für recycelte und biobasierte Materialien ISCC PLUS zertifiziert und hat 2021 erstmals biobasiertes Ethylen produziert. Dieses soll zukünftig von Vinnolit bei der Erzeugung von PVC genutzt werden (OMV, 2022).

3.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

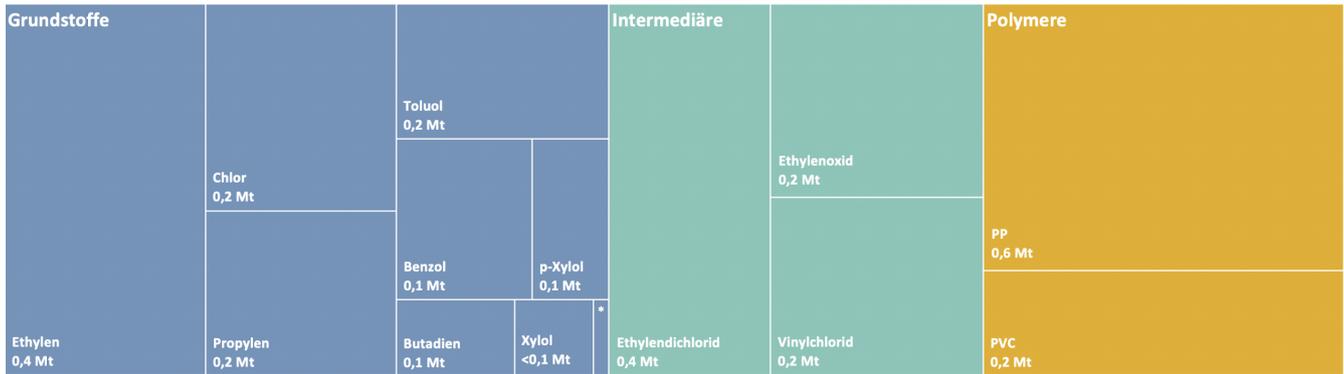


Abb. 3-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Bayerisches Chemiedreieck für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. *H₂ <0,1 Mt

Abbildung 3-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Bayerischen Chemiedreiecks überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen am Standort, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen.

Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe. Mengenmäßig am bedeutendsten ist hier Ethylen, doch auch Chlor und Propylen werden in relevanten Quantitäten produziert, gefolgt von verschiedenen Aromaten, insbesondere Toluol, Benzol und Paraxylool. Diese Kohlenwasserstoffe werden vor allem im Steamcracker der OMV Raffinerie hergestellt, welcher über eine jährliche Verarbeitungskapazität von rund 1.300 kt Naphtha (Wuppertal Institut, 2022) verfügt, doch Raffinerieprozesse spielen gerade bei der Aromatenbereitstellung ebenfalls eine wichtige Rolle. Aus diesen Grundstoffen werden eine Reihe von ethylenbasierten Intermediären produziert, namentlich Ethylendichlorid, Ethylenoxid und Vinylchlorid. Auf dieser Basis werden vor Ort schlussendlich die Polymere Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 3-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der Polymerproduktion im Bayerischen Chemiedreieck detaillierter auf. Auch hier basieren alle dargestellten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, dass nur knapp die Hälfte des am Standort produzierten Ethylens auch vor Ort weiterverarbeitet wird, was auf entsprechende Exporte über die vorhandene Pipelineinfrastruktur hinweist. Im Gegenzug besteht für die ermittelte Produktionsmenge an Polypropylen eine deutliche Unterversorgung mit Propylen, was wiederum auf entsprechende Importe hinweist. Neben Ethylen und Propy-

len wird keines der Crackerprodukte unmittelbar an den betrachteten Standorten für die Polymerproduktion genutzt, dies gilt auch für das vor Ort hergestellte Ethylenoxid.

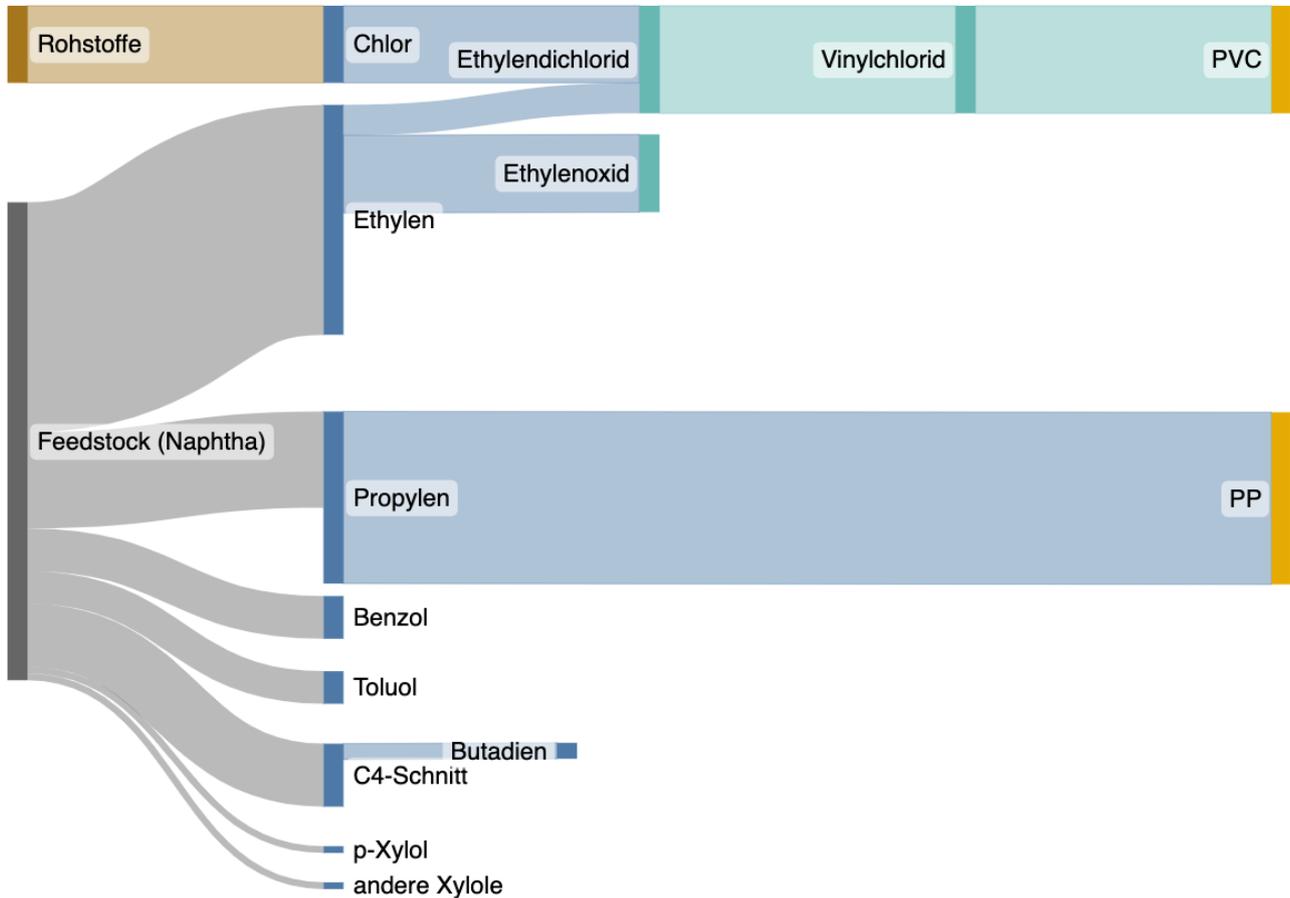


Abb. 3-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Bayerisches Chemiedreieck. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen.

3.3 Versorgung des Clusters

Das Bayerische Cluster gehört mit einem Primärenergiebedarf von 16 TWh gemeinsam mit dem Nordsee-Cluster zu den kleineren Clustern in Deutschland. Der hauptsächlichste Energiebedarf besteht im Feed des Crackers in Burghausen, der pro Jahr etwa 1,3 Mio. Tonnen beträgt. Etwa zwei Drittel (0,9 Mio.) hiervon könnte durch die örtliche Raffinerie gedeckt werden, falls auch Coker-Naphtha verwendet wird. Anders als andere Raffinerien verfügt der Standort Burghausen nicht über eine Anlage zum katalytischen Reforming. Sie kann deshalb kein Benzin herstellen, der gesamte Naphtha-Schnitt aus der atmosphärischen Destillation steht damit für das Steamcracking zur Verfügung, während an anderen Standorten bevorzugt nur das Leichtnaphtha zum Cracken verwendet wird. Darüber hinaus gehende Mengen müssen mit entsprechenden Kosten per Bahn bezogen werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb des Kunststoffclusters ist mit bestehender Infrastruktur und Anlagen-

park deshalb ein Weiterbetrieb der Raffinerie essentiell. Diese Abhängigkeit besteht in ähnlicher Weise noch im Emscher-Lippe-Cluster sowie am Cracker-Standort Münchsmünster.

Die chemische Industrie im Cluster weist einen Wasserstoff-Überschuss aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse auf, der teilweise von der Raffinerie absorbiert werden dürfte. Gemäß den Modellrechnungen für die Raffinerie könnte jedoch ein Überschuss verbleiben, der dann energetisch verwendet werden könnte. Neben einigen Wasserkraftwerken betreibt die Wacker-Chemie auch ein GuD-Kraftwerk am Standort Burghausen mit einer elektrischen Leistung von 180 MW. Aufgrund der aufkommenden Cracker-Beiprodukte und einer relativ wenig wärmeintensiven Weiterverarbeitung fällt der resultierende Erdgasbedarf mit insgesamt 0,7 TWh/a jedoch sehr gering aus und liegt damit zumindest in absoluten Zahlen niedriger als in allen anderen deutschen Clustern.

Daneben spielt bei der Versorgung des Clusters auch der Bezug von chemischen Grundstoffen (als Zwischenprodukt) über die Bahn eine relativ große Rolle (s. Tabelle 3-1), vermutlich handelt es sich hierbei teilweise um Propylen (s.o.). Das bayerische Chemiedreieck ist neben dem mitteldeutschen das einzige Cluster in Deutschland ohne eine Anbindung an die Binnenschifffahrt. Aufgrund der hier noch schwächeren überregionalen Pipeline-Infrastruktur ist das bayerische Dreieck in außergewöhnlichem Maße auf die Bahn als Massentransportmittel angewiesen.

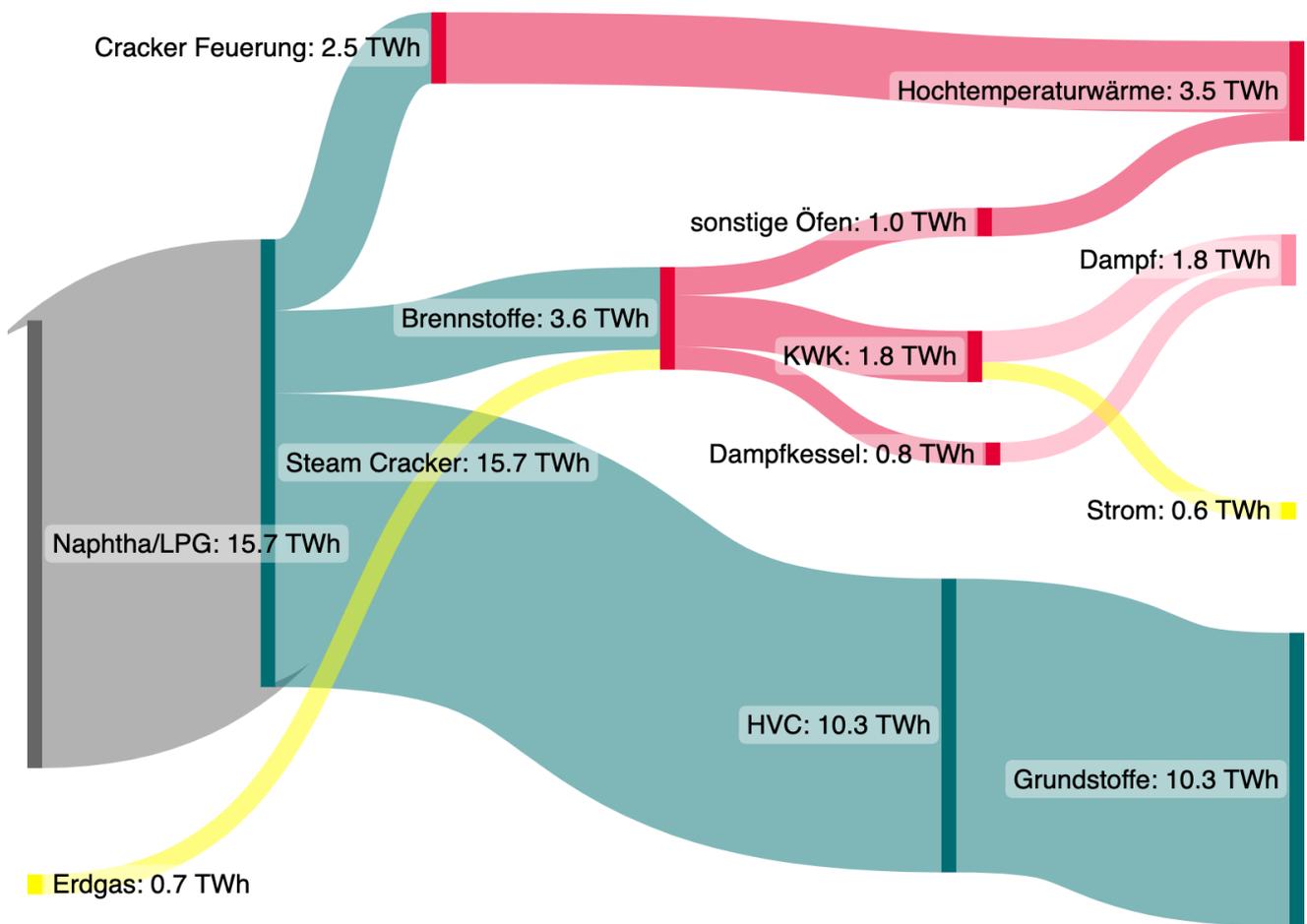


Abb. 3-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Bayerischen Chemiedreiecks im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug)

Tab. 3-1 Empfang von relevanten Gütern des Regierungsbezirks Oberbayern im Eisenbahnverkehr nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr)

	RB Oberbayern	RB Rheinhessen-Pfalz	RB Karlsruhe	RB Darmstadt	RB Köln	RB Düsseldorf	RB Münster	Sachsen-Anhalt	Ausland
Salz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flüssige Mineralölerzeugnisse	1.461	144	44	0	6	171	201	3	451
Gasförmige Mineralölerzeugnisse	119	13	0	0	122	6	2	1	21
Feste oder wachsartige Mineralölerzeugnisse	8	0	0	57	0	37	0	0	48
Chemische Grundstoffe, organisch	70	104	107	6	17	155	18	70	126

Quelle: GENESIS-online des Statistischen Bundesamtes (Statistik-Code 46131), eigene Auswertung.

4 Petrochemisches Cluster BASF Ludwigshafen

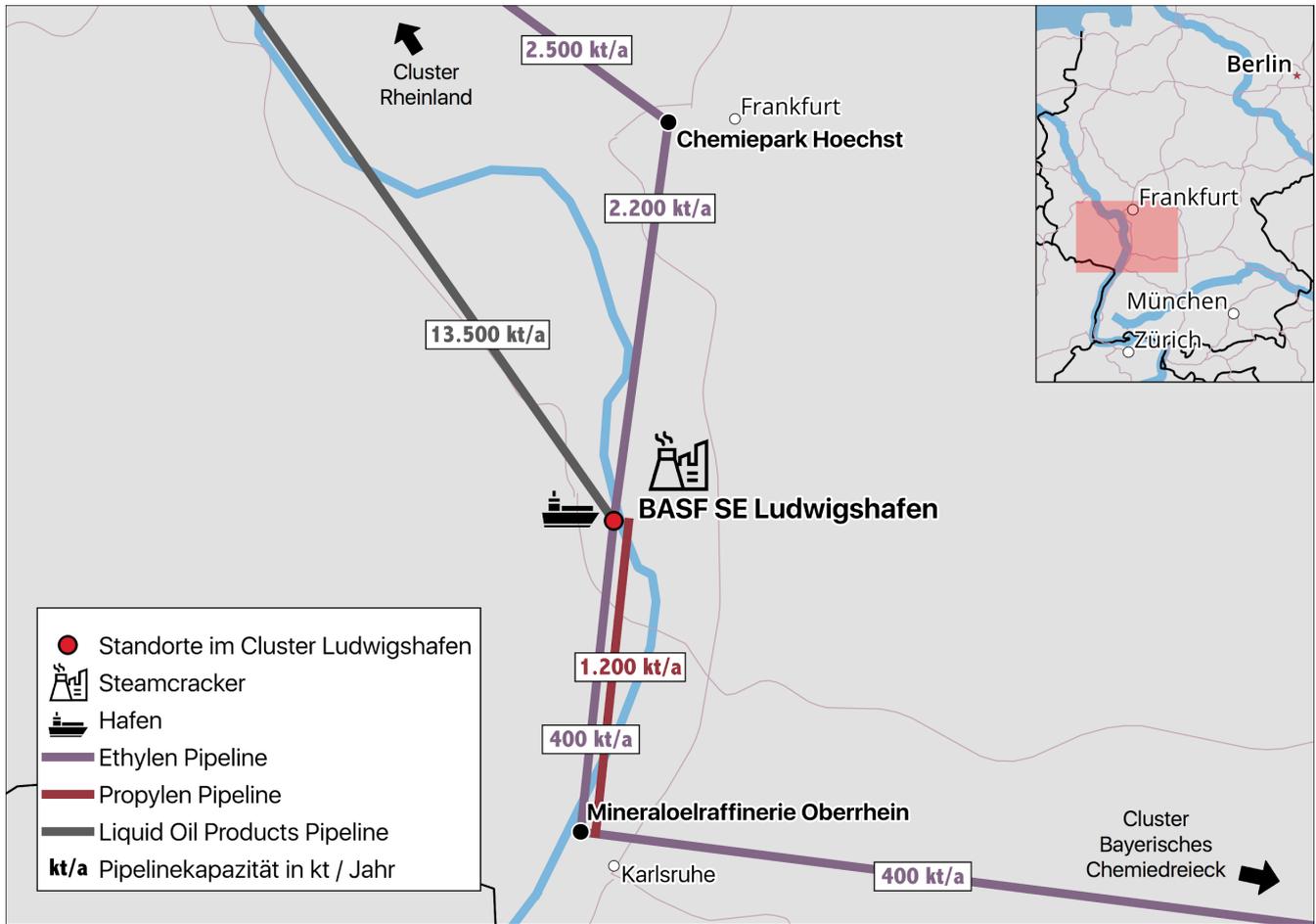


Abb. 4-1 Geographische Verortung des Clusters BASF Ludwigshafen sowie infrastrukturelle Anbindung an andere Chemiestandorte und Raffinerien im Umland.
Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

4.1 Charakterisierung des Clusters

Der Verbundstandort von BASF liegt im Norden von Ludwigshafen in Rheinland-Pfalz. 1865 als Badische Anilin- und Sodafabrik gegründet, wurde hier erstmalig das Verbundkonzept entwickelt (BASF SE, o.J.-a). Mit einer Werksfläche von rund 10km², die etwa 2.000 Gebäude und 200 Anlagen umfasst, gilt er heute als größter zusammenhängender Chemiestandort weltweit (BASF SE, o.J.-b). Vor Ort sind rund 38.000 Menschen beschäftigt und erwirtschaften einen Umsatz von rund 20 Milliarden Euro, die Treibhausgasemissionen am gesamten Standort Ludwigshafen belaufen sich auf rund 7,6 Millionen Tonnen CO₂eq (BASF SE, o.J.-c).

Das Produktportfolio am Standort ist sehr breit aufgestellt und umfasst neben verschiedenster (petro-)chemischer Basischemikalien, Zwischenprodukte, Katalysatoren, Monomere, Polymere und Produktlösungen für sämtliche Industriesparten auch Endanwendungen aus den Bereichen Ernährung, Pflege und Landwirtschaft (BASF SE, o.J.-d).

Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, ist der Verbundstandort BASF infrastrukturell eng mit anderen Chemiewerken, -Clustern und Raffinerien im weiteren Umland vernetzt. So verläuft aus den Niederlanden über das Rheinland eine Pipeline für ver-

schiedene Flüssigölprodukte, welche bis nach Ludwigshafen und von dort aus weiter zu ihrem Endpunkt, der Mineralö Raffinerie Oberrhein in Karlsruhe, verläuft. Aus nördlicher Richtung kommend besteht eine Ethylenverbindung zwischen BASF und dem Industriepark Höchst, die als Teil des nordwesteuropäischen Ethylenverbunds über das Rheinland bis nach Rotterdam reicht. Ab Ludwigshafen verläuft diese in südlicher Richtung als Ethylenpipeline-Süd (EPS) und verbindet so den Standort BASF und die nahe gelegene Raffinerie in Karlsruhe mit dem Industriepark Münchsmünster in Bayern. Von dort schließt diese weiter an die Ethylen-Pipeline Münchsmünster-Gendorf und somit das bayerische Chemiedreieck an. Darüber hinaus besteht noch eine dritte Verbindung, über welche das in der Raffinerie Karlsruhe via FCC-Prozess hergestellte Propylen an den benachbarten BASF-Standort in Ludwigshafen geliefert wird. Neben den beschriebenen Pipelines werden Roh- und Einsatzstoffe jedoch auch via Binnenschifffahrt angeliefert und abtransportiert, zudem besteht eine Schienenverbindung mit weiteren BASF Standorten in Antwerpen und Schwarzheide (BASF SE, o.J.-e). Hiervon nimmt die Binnenschifffahrt mit 40% den größten Anteil des Transportvolumen ein, gefolgt vom LKW- (32%) und dem Schienenverkehr (28%). Unmittelbar gegenüber von Ludwigshafen auf der anderen Rheinseite liegt das Tanklager der BASF auf der Friesenheimer Insel, das somit in Baden-Württemberg (Regierungsbezirk Karlsruhe) verortet ist.

Das Herzstück der Petrochemie vor Ort sind zwei mit Naphtha betriebene Steamcracker, welche 1965 und 1980 errichtet wurden und unabhängig voneinander laufen, so dass im Falle von Wartungen oder Reparaturen der Produktionsbetrieb stets aufrechterhalten bleibt. Allerdings experimentiert BASF am Standort bereits in verschiedenen Initiativen mit klimafreundlicheren Verfahren zur Kunststoffproduktion. So wird im 2018 gestarteten Pilotprojekt ChemCycling bereits mit Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen als Rohstoff im Steamcracker experimentiert, um so bei der Produktion von Ethylen und Propylen fossile Rohstoffe zu substituieren. Eine Initiative im Rahmen dieses Pilotprojekts stellt die Partnerschaft mit dem norwegischen Unternehmen Quantafuel dar. Hier sollen jährlich rund 16.000 t Pyrolyseöl aus gemischten Post-Consumer-Abfällen produziert und an BASF geliefert werden. Insgesamt sollen zukünftige Kooperationen mehr als 200.000 t ermöglichen, hierbei ist jedoch unklar, ob die gesamte Menge nach Ludwigshafen geliefert wird (BASF SE, 2019; Stark, 2021). Geht man davon aus, dass sämtliche Produktionskapazitäten der bestehenden Partnerschaften für Pyrolyseöl (etwa 33.000 t) an BASF Ludwigshafen geliefert werden, entspräche dies einer Substitution von knapp 2 % des gegenwärtigen Naphthaverbrauchs (etwa 2.000.000 t/a). Bezieht man geplante Anlagen mit ein (s.o.), könnte der Prozentsatz in Zukunft auf ca. 13 % steigen. Seit 2020 sind mit dem Zusatz Cycled™ im Handelsnamen erste kommerzielle Produkte auf Basis von chemisch recycelten Kunststoffen auf den Markt gebracht worden, hierzu gehören Pharmaboxen sowie Transport- und Lebensmittelverpackungen (Bechlarz, 2021; Menzel, 2021).

Auch erneuerbare Rohstoffe wie Bio-Naphtha oder Biomethan werden bereits in kleineren Mengen am Standort eingesetzt. Diese werden teilweise im Verbund mit den Erzeugnissen aus fossilen Rohstoffen vermischt, zum Teil gibt es aber auch bereits zu 100 % aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellte Produkte wie z.B. OPPA-NOL® B 12, welches nach dem Massenbilanzansatz BMBcert™ zertifiziert ist (BASF

SE, o.J.-f). Darüber hinaus ist ab dem Jahr 2023 die Errichtung eines elektrisch betriebenen Steamcracker-Ofens in Ludwigshafen geplant, der als Demonstrationsanlage in die bestehende Steamcracker-Konfiguration eingebunden wird. Diese soll eine jährliche Verarbeitungskapazität von 35.000 t Naphtha aufweisen (ca. 2 % der Gesamtkapazität im Cluster) und mit einer elektrischen Leistung von 6 MW über deutliche Effizienzvorteile gegenüber einem brennstoffbetriebenen Cracker verfügen (BASF SE, 2022).

4.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

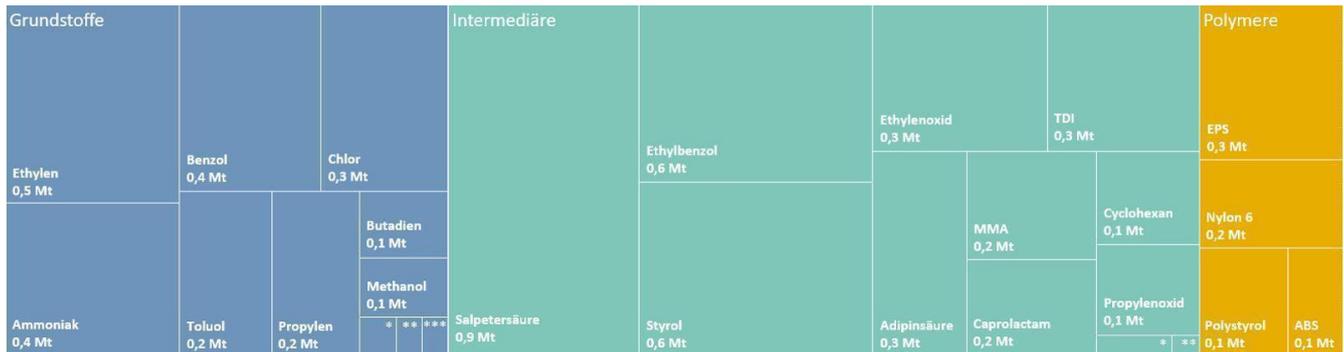


Abb. 4-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette am Standort BASF Ludwigshafen im Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.
 Grundstoffe: *H₂ <0,1 Mt, **Xylol <0,1 Mt, ***p-Xylol <0,1 Mt
 Intermediäre: *Ethylenglykol <0,1 Mt, **Formaldehyd <0,1 Mt

Abbildung 4-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung der hierfür relevanten Vor- und Zwischenprodukte am Standort Ludwigshafen überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen am Standort, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen. Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe. Hier sind vor allem Ethylen und Propylen aus der Gruppe der Olefine sowie die Aromaten Benzol, Xylol und Toluol von hoher Relevanz. Diese werden mithilfe der beiden Naphtha-Streamcracker vor Ort erzeugt, welche zusammen über eine jährliche Verarbeitungskapazität von rund 1,8 Mt Naphtha (Wuppertal Institut, 2022) verfügen und dabei knapp 0,8 Mt CO₂ (European Union, 2022) emittieren. Hierbei fallen auch Nebenprodukte wie C₄-Schnitt bzw. das daraus extrahierte Butadien an. Gerade Propylen wird jedoch auch in großen Mengen am nahegelegenen Raffineriestandort in Karlsruhe produziert, wo es mithilfe des FCC-Prozesses (Fluid Catalytic Cracking) hergestellt und via Pipeline nach Ludwigshafen geliefert wird. Da die Raffinerie jedoch nicht Teil des im Rahmen dieser Arbeit analysierten Clusters ist und die Propylenmengen nicht für die Polymerproduktion vor Ort benötigt werden, sind diese Produktionsvolumina hier nicht mit eingerechnet. Auch die Anorganika Chlor und Ammoniak stellen wichtige Bausteine dar, werden jedoch überwiegend für Prozesse jenseits der Polymerproduktion verwendet. Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für eine Vielzahl von Intermediären wie Ethylbenzol, Styrol, Ethylenoxid, Adipinsäure und Toluol-2,4-diisocyanat (TDI), aber auch Methylmethacrylat (MMA), Caprolactam, Cyclohexan, Butadien, Butylen und Ethylenglykol werden am Standort hergestellt. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich die Polymere expandiertes

Polystyrol (EPS), Nylon 6, Polystyrol und Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) produziert.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 4-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der Polymerproduktion am Standort Ludwigshafen detaillierter auf. Auch hier basieren alle dargestellten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, dass nur knapp 50 % des Propylens am Standort weiterverarbeitet wird. Berücksichtigt man, dass in der nahegelegenen Mineralölraffinerie Oberrhein in Karlsruhe zusätzlich etwa die vierfache Menge Propylen via FCC-Prozess produziert wird (hier nicht mit eingerechnet), weist dies auf erhebliche Überschüsse und somit Lieferungen an andere Standorte außerhalb des Clusters hin. Dies gilt in geringerem Maße auch für Ethylen und insbesondere Ethylenoxid, welche nicht vollständig für nachfolgende Prozesse benötigt werden. Benzol hingegen wird zum Teil von außerhalb bezogen, hinzu kommen Bedarfe an Cyclohexan und Aceton. Verschiedene Intermediäre werden am Standort nicht weiter zu Polymeren verarbeitet, dazu zählen insbesondere Adipinsäure und TDI.

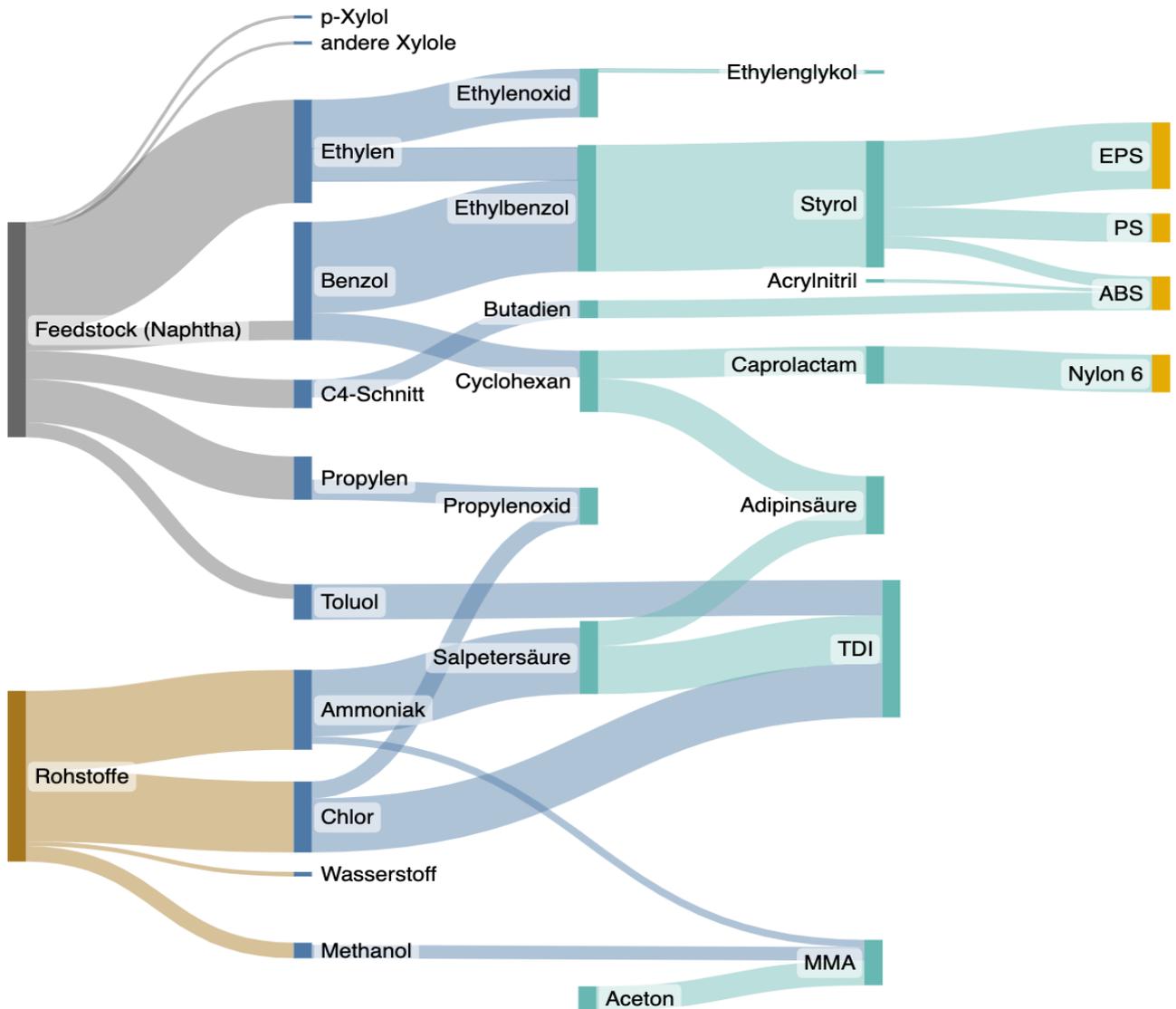


Abb. 4-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters BASF Ludwigshafen. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen. Die Produktion von MMA findet überwiegend im nahegelegenen Evonik-Standort Worms statt.

4.3 Versorgung des Clusters

Mit einem Primärenergiebedarf von 47 TWh nimmt der Standort gemäß unserer Modellrechnung die zweite Stelle in Deutschland hinter dem Rheinland-Cluster ein. Unsere Bilanzierung (siehe Abbildung 4-4) ergibt einen Cracker-Feedstock-Bedarf in Höhe von 20 TWh, während die rheinland-pfälzischen Energiebilanzen für die vergangenen Jahre einen stofflichen Einsatz von Naphtha in Höhe von 18 bis 23 TWh und von etwa 3 TWh für „andere Mineralprodukte“ ausweisen. Unter letzterem Posten könnten jedoch auch Benzol-Importe gefasst sein, der im Hinblick auf die in Abbildung 4-3 gezeigten Flüsse naheliegender wäre.

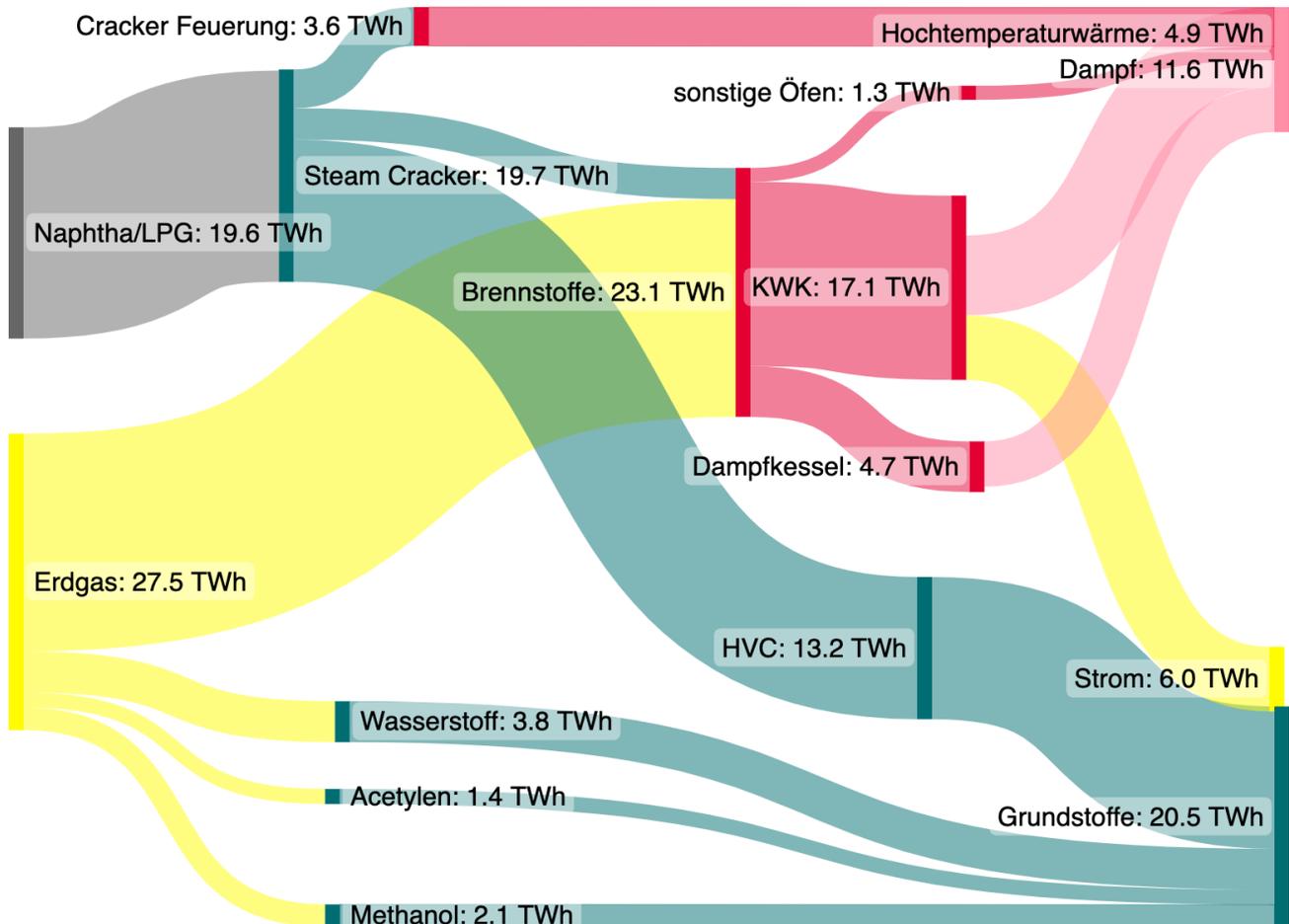


Abb. 4-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters BASF Ludwigshafen im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Während Naphtha überwiegend per Binnenschiff aus Rotterdam, zusätzlich auch via Mineralölproduktpipeline aus den Niederlanden und per Binnenschiff aus der Raffinerie Karlsruhe, bezogen werden kann, dürfte LPG ausschließlich per Binnenschiff bezogen werden. Wie Tabelle 4-1 zeigt, werden auch bedeutende Mengen an chemischen Grundstoffen aus den Niederlanden per Schiff bezogen – deutlich mehr als per Bahn (s. Tabelle 4-2), obwohl im Jahr 2018 eine ausgeprägte Phase von Niedrigwasser mit den entsprechenden Einschränkungen in der Rheinschifffahrt zu verzeichnen war. Dies verdeutlicht umso mehr die Bedeutung des Binnenschiffahrtszugangs für

den Standort.³ Um unabhängiger von Schwankungen des Rheinpegels zu werden sowie um sich auf länger andauernde Niedrigwasserphasen im Hinblick auf den Klimawandel einzustellen hat BASF die Beschaffung eines ersten besonders flach liegenden Flusstankschiffes angekündigt (BASF SE, 2021).

Im Vergleich zu den anderen deutschen Clustern sticht Ludwigshafen durch ihren hohen Gasbedarf heraus, weshalb der Standort während der gegenwärtigen Gaskrise häufig als besonders anfällig genannt wurde. Nach unseren Modellrechnungen liegt der Erdgasbedarf bei unter 30 TWh und damit unter dem in der Presse genannten Wert von 37 TWh.⁴ Auch mit den errechneten 28 TWh macht Ludwigshafen knapp ein Drittel des gesamten Bedarfs der Produktion von chemischen Grundstoffen aus. Ein bedeutender Teil hiervon ist bedingt durch stofflichen Bedarf. Neben Wasserstoff, der u.a. zur Herstellung von Ammoniak eingesetzt wird, sind Acetylen und Methanol hier die größten Senken. Mit 23 TWh ist jedoch der Einsatz in der KWK sogar noch bedeutender, und dies obwohl BASF keinen deutlich höheren Dampfbedarf ausweist als die anderen großen Cluster. Durch den Einsatz moderner GuD-Kraftwerke mit relativ hohen Stromkennzahlen produziert BASF jedoch deutlich mehr Strom als Betreiber anderer Chemieparcs in Deutschland – und dies mit deutlichem Abstand. Die Stromerzeugung in Ludwigshafen könnte sich gemäß unseren Berechnungen auf etwa die Hälfte der Erzeugung in Chemieparcs der Grundstoffchemie belaufen. Die größten Dampfabnehmer der KWK am Standort dürften die Produktionsanlagen für Acrylsäure und Styrol sein. Über die Strom- und Dampferzeugung hinaus wird Brennstoff auch für höhere Temperaturen in Öfen benötigt. Neben den bereits genannten Steam Crackern sind hier Styrol, Phthalsäureanhydrid und Ethylenoxid zu nennen.

Tab. 4-1 Empfang von relevanten Gütern in den Binnenhäfen des Regierungsbezirks Rheinhes-sen-Pfalz nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr)

	RB Rheinhessen-Pfalz (Ludwigshafen, Worms)	RB Karlsruhe (BASF Ludwigshafen; Raffinerie Karlsruhe)	RB Darmstadt (Frankfurt-Höchst)	RB Düsseldorf (Rheinland, Emscher-Lippe)	RB Köln (Rheinland)	RB Münster (Emscher-Lippe)	Belgien	Niederlande	Schweiz
Salz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,8	16,7
Flüssige Mineralölerzeugnisse	34,5	329,9	16,1	1,8	278,9	14,3	123,3	720,8	0,0
Gasförmige Mineralölerzeugnisse	2,1	65,0	0	7,0	55,3	6,9	145,5	15,8	0,0
Feste oder wachstartige Mineralölerzeugnisse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0
Chemische Grundstoffe, organisch	0,5	9,1	0,0	79,4	57,0	10,1	390,9	717,7	0,0

³ Wie bereits beschrieben, betreibt BASF ein Tanklager im Regierungsbezirk Karlsruhe. Letzterer weist jedoch im Hinblick auf den Empfang von chemischen Grundstoffen nur relativ kleine Mengen aus, insofern wurde hier auf eine Darstellung in den Tabellen verzichtet.

⁴ Unsere Berechnungen beziehen sich auf den unteren Heizwert. Die Modellrechnung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, insofern ist auch ein deutlich höherer Erdgasbedarf nicht ausgeschlossen. Daneben wäre es jedoch auch möglich, dass der Gasbedarf in der Presse mit dem Brennwert angegeben wurde und/oder dass es sich um einen Brutto-Methan-Bedarf handelt, der die Ausspeisung an Methan durch die Steam Cracker mit umfasst.

Tab. 4-2 Empfang von relevanten Gütern des Regierungsbezirks Rheinhessen-Pfalz per Bahn nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr)

	RB Rheinhessen-Pfalz (Ludwigshafen, Worms)	RB Karlsruhe (BASF Ludwigshafen; Raffinerie Karlsruhe)	RB Oberbayern (Bayer. Chemiedreieck)	RB Darmstadt (Frankfurt-Höchst)	RB Düsseldorf (Rheinland, Emscher- Lippe)	RB Köln (Rheinland)	RB Münster (Emscher-Lippe)	Sachsen-Anhalt (Mitteldt. Chemiedreieck)	Ausland
Salz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Flüssige Mineralölerzeugnisse	15,0	21,9	257,2	1,5	1,4	6,9	0,9	2,9	54,8
Gasförmige Mineralölerzeugnisse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Feste oder wachsartige Mineralölerzeugnisse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chemische Grundstoffe, organisch	64,3	39,2	19,2	13,7	73,1	25,0	0,7	44,1	179,6

5 Petrochemisches Cluster Rheinland

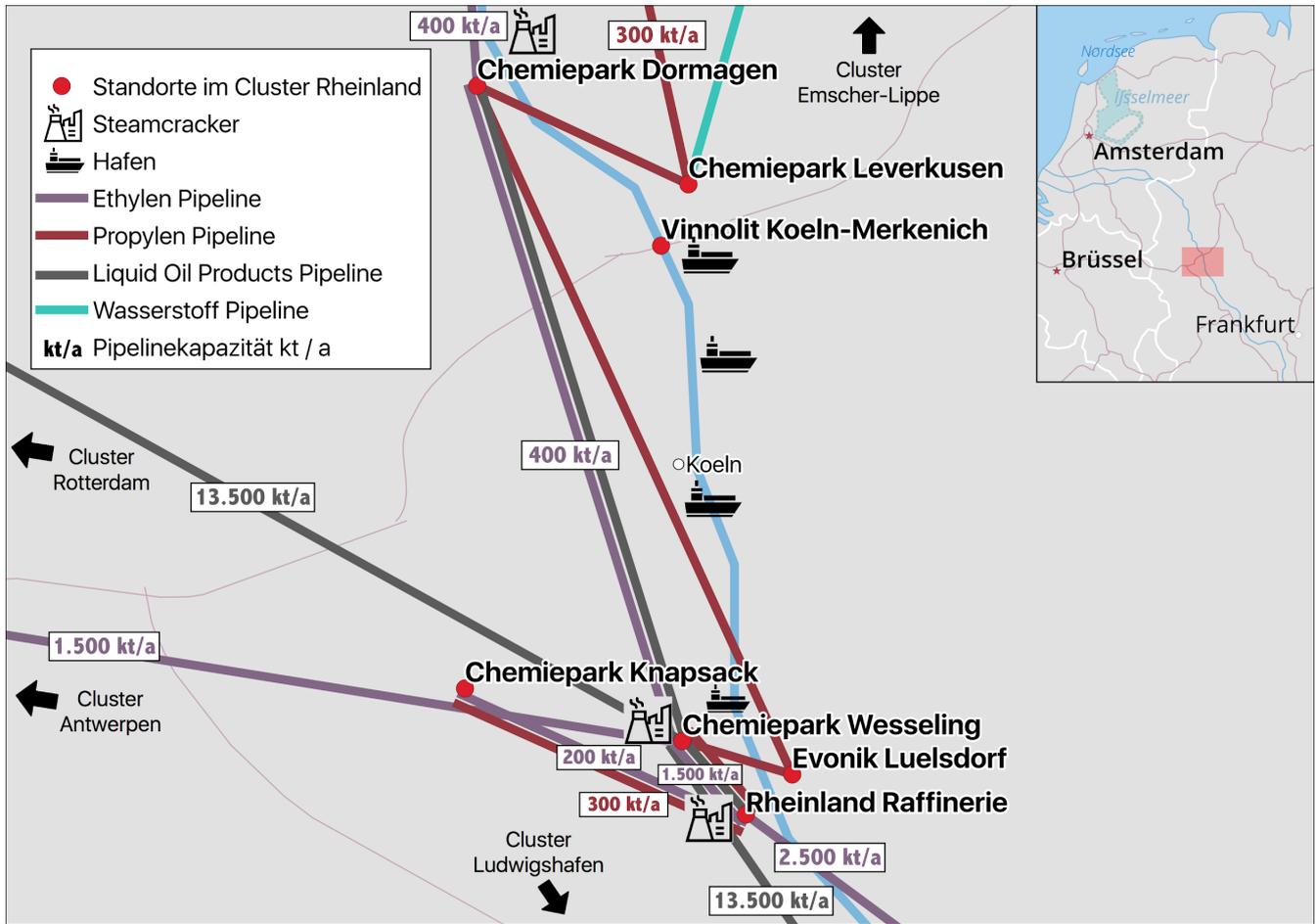


Abb. 5-1 Geographische Verortung des Clusters Rheinland und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

5.1 Charakterisierung des Clusters

Das im Rahmen der weiteren Analyse als „Rheinland“ bezeichnete Cluster besteht aus mehr als 250 Chemieunternehmen mit insgesamt etwa 80.000 Beschäftigten, die südlich und nördlich von Köln am Rhein entlang gelegen sind (Chemie Rheinland e.V., o. J.). Die Unternehmen im Cluster erwirtschafteten im Jahr 2015 ca. 30 Mrd. Euro Umsatz (ohne Pharmaindustrie), was 22% des deutschen Chemieumsatzes entspricht (ChemCologne e.V., 2016).

Die Geschichte der Chemie in der Region beginnt bereits im 18. Jahrhundert, als die ersten Duftstoff-Produzenten sich am Rhein ansiedelten (Chemie Rheinland e.V., o. J.). Mit zunehmender Industrialisierung und Nachfrage nach Soda, Gummi, Fasern und Farbstoffen im 19. Jahrhundert entstand sukzessive eine bedeutende Chemiebranche im Rheinland (ChemCologne e.V., 2016). Diese Entwicklung schritt zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit dem Aufkommen der Kohlechemie in den Kohleregionen entlang des Rheins fort, als Chemieunternehmen die Rohstoffe aus dem Kohlebergbau und den Nebenprodukten der Koksherstellung nutzen (Meijering & van Leeuwen, 2021). In den 1950er und 1960er Jahren wuchs die Region im Zuge des westdeutschen Wirtschaftswunders und wandelte sich zugleich von einer kohle- zu

einer erdölbasierten Chemie (Petrochemie), beides ermöglicht durch Standortvorteile der Verbundproduktion (Austausch von Roh- und Zwischenstoffen zwischen Unternehmen über Verbundleitungen). Diese Entwicklung mündete in den 1990er Jahren in die Entstehung von sogenannten Chemparks. Hier wurden Anlagen eines Verbundstandorts an andere Anlagenbetreiber verkauft, die sich dann in Chemparks organisierten. Zum anderen siedelten sich aber auch weitere Chemieunternehmen an diesen großen Standorten an, um von der vorhandenen Infrastruktur zu profitieren. Der Standortfaktor ist tatsächlich maßgebend in dieser Erfolgsgeschichte, denn das Rheinland bietet einen großen Absatzmarkt in unmittelbarer Reichweite (120 Millionen Menschen leben in einem Radius von 500 km) sowie den Fluss Rhein als Transportweg und Anbindung an die bedeutenden Chemiestandorte Rotterdam und Antwerpen.

Angesichts der Anzahl der verschiedenen Chemieunternehmen gibt es kein klares Produktportfolio des Rheinland-Clusters. Vielmehr wird eine breite Palette an chemischen Erzeugnissen, darunter Kunststoffe, Treibstoffe, Synthese-Fasern, pharmazeutische Produkte, Wasch- und Körperpflegemittel, Lacke und Farben oder auch Synthese-Kautschuk hergestellt. Die Grundstoffchemie bildet aber den Schwerpunkt des Clusters, was sich in seiner infrastrukturellen Anbindung widerspiegelt (siehe Abbildung 5-1). Die Verankerung des Rheinlands im überregionalen ARRRRA-Cluster (Antwerp-Rotterdam-Rhine-Ruhr-Area) lässt sich hier ebenfalls erkennen. Aus den großen Tankterminals des Rotterdamer Hafens kommend schließt sich die Rotterdam-Rhein-Pipeline an der deutsch-niederländischen Grenze in Venlo an die Rhein-Main-Pipeline an. Von dort verläuft diese bis in das Rheinland und weiter nach Süden in Richtung Ludwigshafen. Diese Pipeline besteht eigentlich aus zwei Leitungen: Eine für Rohöl (nicht auf der Karte angezeigt) und eine für verschiedene flüssige Produkte. Das Rohöl wird in den Shell Raffinerien im Energy and Chemicals Park Rheinland in Godorf und Wesseling verarbeitet, welche zusammengenommen über eine Rohölverarbeitungskapazität von ca. 18 Mt verfügen, und fließt von dort weiter nach Norden in das Ruhrgebiet (Shell Energy and Chemicals Park Rheinland, o. J.). Rohöl kann jedoch auch von dort über die aus Wilhelmshaven kommende Nord-West-Ölleitung (nicht auf der Karte angezeigt) befördert werden. Naphtha oder andere flüssige Kohlenwasserstoffe werden in der Produkt-Pipeline für die zahlreichen Steamcracker im Rheinland verpumpt. Diese befinden sich in Wesseling, wo Shell zwei Steamcracker mit einer Kapazität von insgesamt 310 kt Ethylen/a (Petrochemicals Europe, o. J.) und Lyondellbasell ebenfalls zwei Anlagen mit einer Kapazität von insgesamt 1040 kt Ethylen/a (Petrochemicals Europe, o. J.) betreiben. Zwei weitere Steamcracker werden von INEOS im Chemiepark Dormagen mit einer Gesamtkapazität von 1155 kt Ethylen/a (Petrochemicals Europe, o. J.) betrieben. Flüssige Treibstoffe wie z. B. Kerosin für den internationalen Flughafen in Frankfurt am Main werden ebenfalls in der Produkt-Pipeline verpumpt.

Die genannten Steamcracker produzieren u.a. Olefine, die durch die Ethylen- und Propylen-Pipelines sowohl zwischen den Chemparks um Köln als auch in das Ruhrgebiet im Norden und entlang des Rheins im Süden transportiert werden. Ethylen kann auch per Rohrleitung mit Antwerpen sowie dem Standort Chemelot in den Niederlanden ausgetauscht werden. Neben den beschriebenen Pipelines werden diese und andere Produkte auch via Binnenschifffahrt auf dem Rhein transportiert, mit

Be- und Entladeeinrichtungen in den Häfen Köln Godorf für das Rheinland sowie Duisburg als Eingangstor zum Ruhrgebiet und bis Rotterdam und Ludwigshafen.

An den Chemieparks und Unternehmensstandorten, die das Cluster ausmachen, wird bereits mit alternativen Feedstocks experimentiert. Ab 2023 erwartet Shell Pyrolyseöl für ihre Steamcracker in Wesseling (und Rotterdam) aus zwei mit der Partnerfirma Bluealp gegründeten Anlagen in den Niederlanden. Diese sind zunächst auf eine Verarbeitungskapazität von 30 t Kunststoffabfällen pro Jahr beschränkt (CHEMIE TECHNIK, o. J.). Am Chemiapark Dormagen produziert die Firma Covestro die notwendigen Vorprodukte für die Herstellung von Polyurethan: Toluol-2,4-diisocyanat (TDI) und Polyole. Für letztere kann mittlerweile Kohlendioxid als Edukt eingesetzt werden (bis 20 % CO₂-Anteil), was dieses Treibhausgas im Material bindet und den Einsatz von Erdöl reduziert. Covestro betreibt am Chemiapark Leverkusen eine Pilotanlage, um Polyurethan Weichschaum aus gebrauchten Matratzen chemisch zu rezyklieren, indem die Vorprodukte Polyol und TDA (als Vorstufe zu TDI) durch Chemolyse rückgewonnen werden (Covestro, 2021). Am selben Standort setzt Covestro teilweise bio-basiertes Phenol in die Herstellung von Polycarbonat ein (zunächst 1000 t seit 2020). Das Phenol wird vom Hersteller Borealis bereitgestellt, welches wiederum aus Kohlenwasserstoffen mit erneuerbarer Basis wie zum Beispiel Abfall- und Rückstandsöle und -fette von der Firma Neste hergestellt wird (Covestro, 2020). Nicht zuletzt bezieht Lyondellbasell biobasierten Kohlenwasserstoff (Öl aus Abfällen und Reststoffen) von Neste für ihren Steamcracker in Wesseling und produziert daraus (teilweise) biobasiertes Polyethylen und Polypropylen mit Zulassung für Lebensmittelverpackungen (Packaging Journal, 2019).

5.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

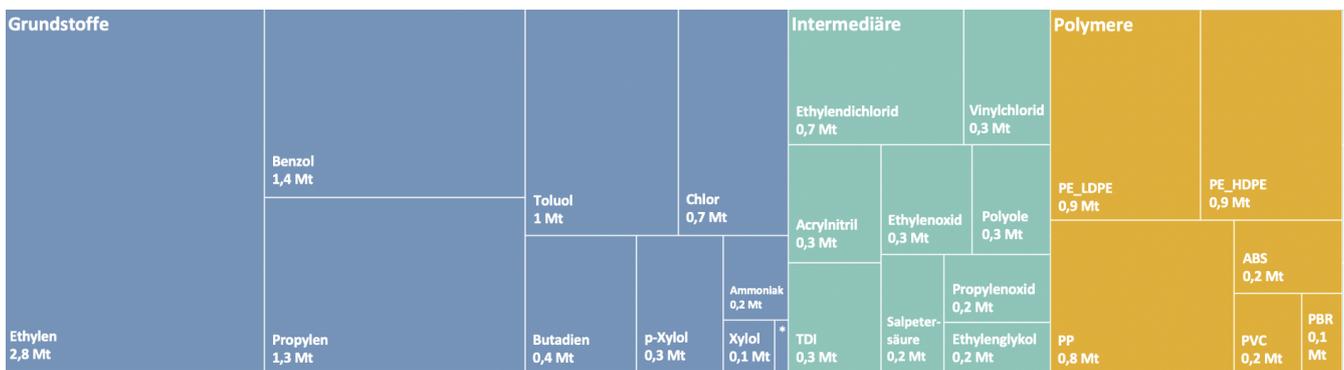


Abb. 5-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Rheinland für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Grundstoffe: *H₂ <0,1 Mt

Abbildung 5-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Rheinland Clusters überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen am Standort, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen.

Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe. Im Rheinland Cluster sind vor allem die

Olefine Ethylen, Propylen und Butadien sowie Aromaten wie Benzol und Toluol von sehr hoher Relevanz. Diese werden in erster Linie mithilfe der Naphtha-Steamercracker vor Ort erstellt, können aber auch per Pipeline importiert oder verschifft werden. Propylen wird auch im FCC-Prozess (Fluid Catalytic Cracking) an den Raffinerien erstellt. Auch die Anorganika Chlor und Ammoniak sind Bausteine der Grundstoffchemie und damit Bestandteil der Produktion im Cluster, jedoch nicht vorrangig für Prozesse der Polymerproduktion. Das Produkt der Chlor-Elektrolyse am Evonik Standort in Lüsseldorf stellt aber beispielsweise ein wichtiges Glied in der Vorkette des PVC-Herstellers Vinnolit, mit Anlagen in Köln-Merkenich und im Chemiepark Knapsack. Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für eine Vielzahl von Intermediären wie Ethylendichlorid, Butadien, Vinylchlorid, Acrylnitril, TDI, Polyole, Ethylenoxid, aber auch Salpetersäure, Propylenoxid und Ethylenglykol werden im Cluster hergestellt. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich die Polymere Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol, Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS), Polyvinylchlorid (PVC), und Butadien-Kautschuk (PBR) produziert. Weich- und Hart-Polyurethan-Schäume werden dezentral von der verarbeitenden Industrie durch Mischung der Vorprodukte TDI und Polyole erzeugt und sind nicht in der Treemap dargestellt.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 5-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der oben beschriebenen Polymerproduktion im Cluster Rheinland detaillierter auf. Auch hier basieren alle dargestellten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, wie integriert und vernetzt das Cluster erscheint. Lediglich Styrol wird vollständig von außerhalb bezogen und ein Teil der Salpetersäure. Andere Grundstoffe wie die Aromaten Xylol und Benzol und zu einem großen Teil Toluol werden außerhalb des Clusters weiterverkauft oder können (bis auf Benzol) auch zur gezielten Steuerung der Qualität des Benzinschnitts in den Raffinerien verwendet werden. Auch weitere Grundstoffe (wie Butylen, Ethylen, Propylen) und Intermediäre (wie Ethylenoxid, Ethylendichlorid, Vinylchlorid, Acrylnitril, Butadien) weisen Überschüsse auf.

5.3 Versorgung des Clusters

Mit einem Primärenergiebedarf⁵ von über 100 TWh ist das Rheinland-Cluster das mit Abstand größte in Deutschland vor Ludwigshafen und der Emscher-Lippe-Region. Der südliche Teil des Rheinland-Clusters ist stark integriert in die gleichnamige Shell Rheinland-Raffinerie, die den Bedarf des gesamten Clusters jedoch bei weitem nicht decken kann. Entsprechend Modellrechnungen des Wuppertal Instituts könnten jährlich etwa 1,3 Mio. Tonnen leichtes Naphtha und 0,6 Mio. Tonnen LPG durch die Raffinerie als Feedstock bereitgestellt werden. Dem steht ein Jahresbedarf der Steamcracker-Flotte von 8,1 Mio. Tonnen entgegen (entsprechend 99 TWh s. Abbildung 5-4), was etwa der Hälfte des gesamten deutschen Bedarfs entspricht. Die aktuellste NRW-Energiebilanz weist für das Jahr 2016 einen Import von etwa 6 Mio. Tonnen Rohbenzin und LPG aus. Unter der Annahme, dass die Gelsenkirchener Cracker durch die dortige Raffinerie selbst versorgt werden (s. Steckbrief „Emscher-Lippe“), erscheinen die Zahlen somit plausibel.

Darüber hinaus besteht ein stofflicher Bruttobedarf von Wasserstoff in Höhe von jährlich 1,6 TWh. Ein Teil kann zwar durch die Kuppelproduktion in der Chlor-Alkali-Elektrolyse gedeckt werden (0,9 TWh), insbesondere zur Herstellung von Ammoniak verbleibt aber darüber hinaus ein Restbedarf, der durch die Dampferformierung von Erdgas gedeckt werden muss. Der hiermit verbundene Netto-Erdgasbedarf beträgt nach unseren Modellrechnungen 0,5 TWh im Jahr.

Beim Wärmeenergiebedarf von Einzelprozessen stechen die Synthetisierung von Polybutadien-Kautschuk und die Butadien-Abtrennung mit einem Jahresdampfbedarf von 3,2 bzw. 0,9 TWh besonders heraus. Im Bereich des Energiebedarfs von Industrieöfen sind die Steamcracker mit 16 TWh sowie die Herstellung von Ethylendichlorid mit jährlich 1 TWh die größten Verbraucher. Durch die außerordentlich großen Steamcracker-Kapazitäten fallen jedoch relativ hohe Mengen an Kohlenwasserstoffen als Bei-Produkte an, die überwiegend energetisch zur Befuerung der Spaltöfen selbst und zur Dampferzeugung genutzt werden können. Am Standort Dormagen werden einige KWK-Einheiten von Ineos und dem Chemieparkbetreiber Currenta betrieben. Letzterer setzte im Jahr 2018 noch Kohle als Brennstoff ein. Die elektrische Leistung ist mit 300 MW jedoch relativ klein.⁶ Am Standort Wesseling betreibt auch LyondellBassel ein Kraftwerk, in dem in erster Linie Cracker-Beiprodukte verfeuert werden. Insofern fällt der zusätzliche Bedarf an Gas, der extern als Erd- oder Raffineriegas bezogen werden müsste, trotz der hohen Brutto-Energiebedarfe sehr gering aus.⁷ Das Rheinland-Cluster ist somit in hohem Maße abhängig von seiner Steamcracker-Flotte und der entsprechenden Versorgung mit Feedstock. Das Cluster ist stärker abhängig von externen Feedstock-Bezügen als alle anderen Cluster in Deutschland (bis auf Ludwigshafen), andererseits ist es durch die entsprechende Infrastruktur jedoch auch weniger abhängig vom (Weiter-)Betrieb örtlicher Raffinerien. Auch die Abhängigkeit von Erdgas als Energieträger ist bisher außerordentlich ge-

⁵ Bei der Berechnung des Energiebedarfs wurden nicht ausschließlich Kunststoff-Vorprodukte berücksichtigt, sondern auch weitere chemische Grundstoffe wie z.B. Kautschuk.

⁶ Darüber hinaus betreibt RWE eine Gas-GuD-Anlage mit 1 GW Feuerungswärmeleistung und 560 MW elektrischer Leistung in Dormagen, die teilweise auch Dampf für den Industriepark liefert. Diese Anlage wird jedoch nicht der chemischen Industrie zugerechnet.

⁷ Der Energiebedarf der Rheinland-Raffinerie ist hier nicht berücksichtigt.

ring. Sollten in Zukunft jedoch stärker HVC von anderen Standorten als Vorprodukte bezogen werden, ist dieser bisher bestehende Integrationsvorteil gefährdet.

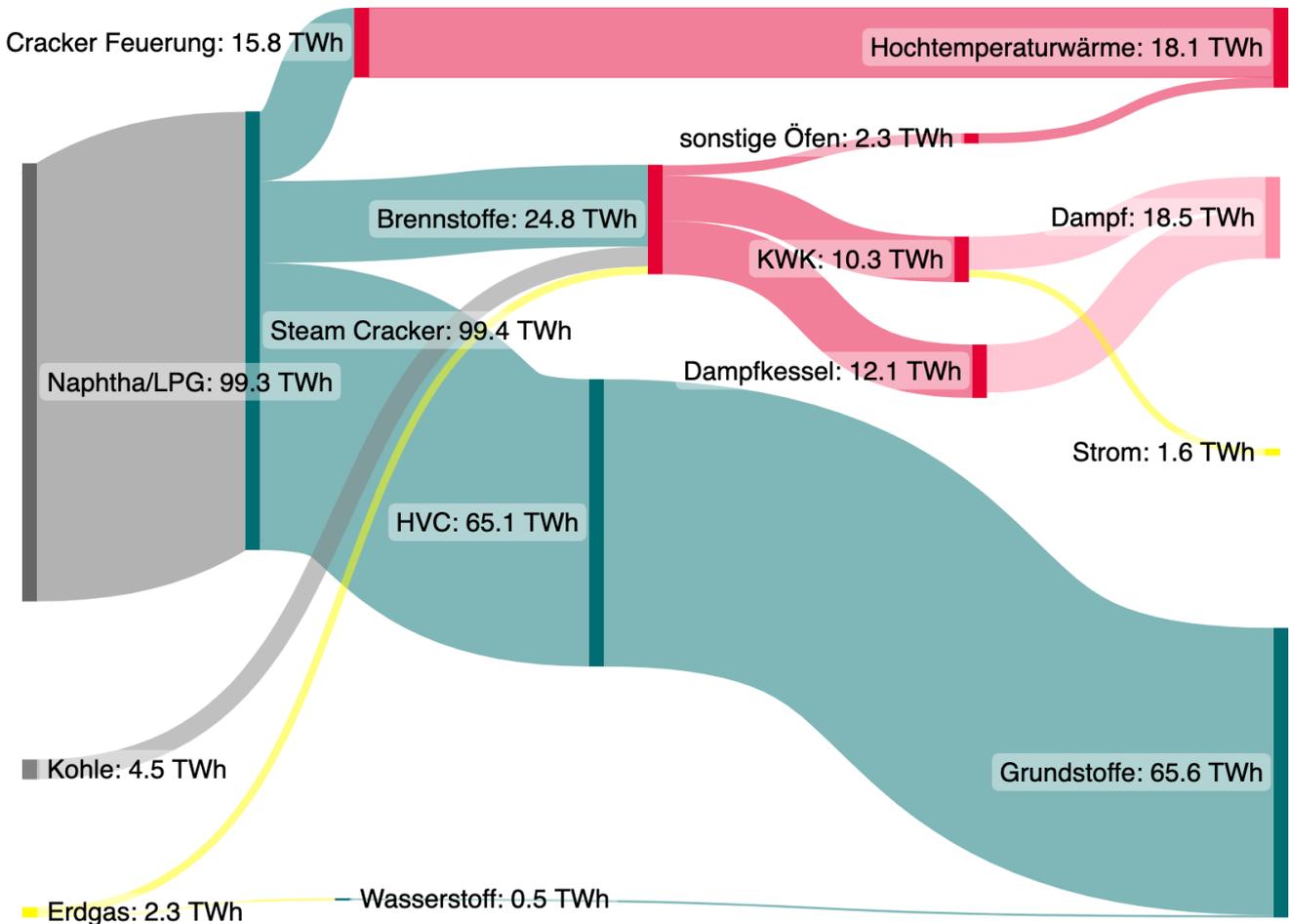


Abb. 5-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Rheinland im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Im Hinblick auf die Versorgungsinfrastrukturen nehmen die verschiedenen Pipelines eine überragende Stellung ein. Die oben genannten Feedstock-Mengen in Höhe von jährlich 6 Mio. Tonnen werden wahrscheinlich überwiegend als Leichtnaphtha über die Produktpipeline aus Rotterdam nach Wesseling und Köln/Dormagen importiert. Daneben spielt auch die Binnenschifffahrt eine Rolle, sowohl im Nahverkehr als auch für die Importe aus den Seehäfen der Niederlande und Belgiens (s. Tabelle 5-1). Neben flüssigen Mineralölerzeugnissen, bei denen es sich auch um Kraftstoffe handeln kann, ist vor allem Salz als Importgut aus den Niederlanden für die Binnenschifffahrt relevant. LPG als Teil der Güterkategorie „Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse“ spielte zwar im Jahr 2018 nur eine relativ kleine Rolle, die Import-Mengen dieser Kategorie sind allerdings bis zum Jahr 2021 um 40% angestiegen und spiegeln damit die zunehmende Bedeutung dieses Feedstock für das Rheinland wieder.⁸ Der Bezug von organischen chemischen Grundstoffen spielt dagegen keine große Rolle, was die Modellrechnungen bestätigt, die eine relativ starke Integration der Wertschöpfungsketten innerhalb des Clusters vermuten

⁸ INEOS hat im Jahr 2020 drei Flussschiffe für die Butan-Versorgung der Steam Cracker in Dormagen in Betrieb genommen.

lassen (s. Sankey-Diagramm oben). Aufgrund der immer längeren Niedrigwasser-Phasen auf dem Rhein, die im Jahr 2022 nicht nur die Schifffahrt auf dem Mittelrhein, sondern auch auf dem Niederrhein stark eingeschränkt hat, fordert die Industrie eine Vertiefung der Fahrrinne bis Dormagen um die Versorgung des Clusters langfristig zu sichern.

Tab. 5-1 Empfang von relevanten Gütern in den Binnenhäfen des Regierungsbezirks Köln nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr)

	Düsseldorf	Münster	Rheinhesse- Pfalz	Weser-Ems	Niederlande	Belgien
Salz	5	0	0	0	601	0
Flüssige Mineralölerzeugnisse	267	142	118	97	670	644
Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse	56	3	4	0	116	74
Feste oder wachsartige Mineralölerzeugnisse	0	0	1	0	69	1
Chemische Grundstoffe, organisch	41	20	4	15	157	51

Quelle: GENESIS-online des Statistischen Bundesamtes (Statistik-Code 46321), eigene Auswertung.

Die mit der Eisenbahn in das Rheinland transportierten Gütermengen für die petrochemische Industrie sind vergleichsweise unbedeutend und werden deshalb nicht aufgeführt.

6 Petrochemisches Cluster Emscher-Lippe

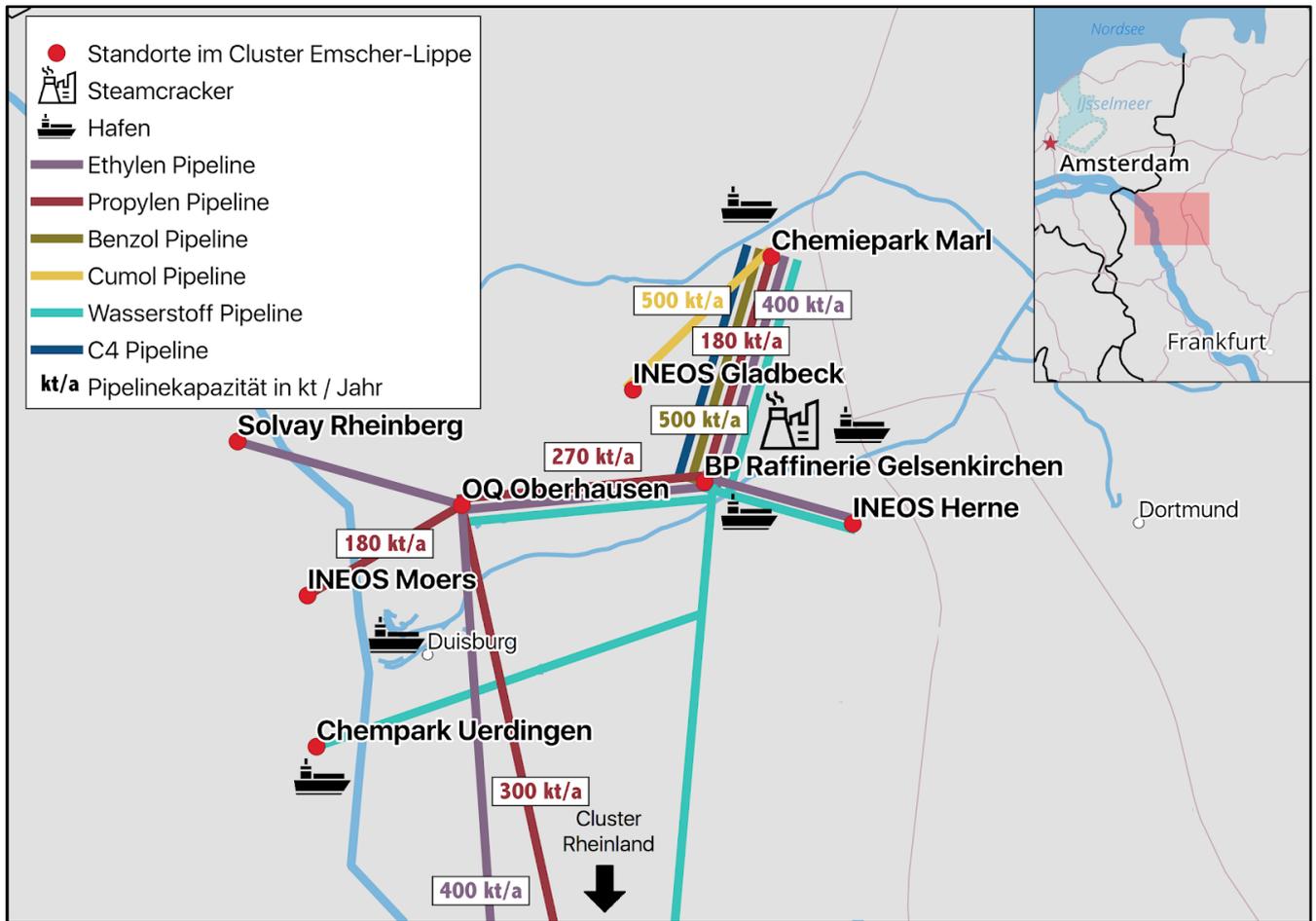


Abb. 6-1 Geographische Verortung des Clusters Emscher-Lippe und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

6.1 Charakterisierung des Clusters

Die Emscher-Lippe Region liegt im nördlichen Teil des Ruhrgebiets und wird dort von den beiden namensgebenden Flüssen eingerahmt. Mit Großstädten wie Gelsenkirchen, Bottrop und Oberhausen befinden sich hier wesentliche Teile der wirtschaftlichen Kernzone des Ruhrgebiets, welches mit knapp 300 angesiedelten Unternehmen alleine aus der chemischen Industrie zu den wichtigsten Chemieregionen Deutschlands und Europas zählt. Die Geschichte der Chemie an den Hängen der Ruhr begann schon Mitte des 19. Jahrhunderts, als lokal gegrabene Steinkohle für die Metallgewinnung in den Hochöfen verkocht und so die Holzkohle verdrängt wurde. Das hierbei entstehende Kokereigas diente zunächst als Energiequelle, doch nach und nach wurden weitere Verarbeitungsprozesse entwickelt, um aus dem Kokereigas chemische Zwischenprodukte wie Ammoniak, Teer und sogar Benzol (schon 1887 dank Albert Hüssener in Gelsenkirchen) zu gewinnen. Dadurch war die Kohlechemie im Ruhrgebiet geboren (Regiochemie, o. J.). Durch die Entwicklung neuer Verfahren konnten die an den jeweiligen Standorten verfügbaren Kohlesorten genutzt und so die Produktpalette stetig erweitert werden. Solche Standorte existieren noch heute unter ihrem modernen Namen wie zum Beispiel INEOS Phenol GmbH in Gladbeck

oder Ruhr Oel GmbH in Gelsenkirchen, die heute Erdöl raffinieren wo früher Benzin aus Verflüssigung und Hydrierung von Steinkohle produziert wurde. Die Transition von der Kohle- zur Petrochemie nach dem Zweiten Weltkrieg ließ das Portfolio weiter wachsen und mit Produkten wie Polyvinylchlorid, Polystyrol und Weichmachern entstand eine moderne Kunststoffindustrie.

Diese Transition ging aber auch mit einem tiefgreifenden Strukturwandel einher, als die spezifischen Standortvorteile des Ruhrgebiets (geographische Nähe von Lieferanten und Abnehmern von Produkten, wie Kohlelagerstätten, Kokereien, Hydrierwerke, Chemiewerke) zugunsten anderer Produktionsstätten in Deutschland und im Ausland einbrachen. Diese Entwicklung kostete viele Arbeitsplätze, dennoch gehörte die Petro- und Grundstoffchemie weiterhin fest zur industriellen Landschaft. Gleichzeitig gewann die Spezialchemie sowohl in den inzwischen entstandenen Chemie-parks als auch in den Bildungs- und Forschungseinrichtungen, die in den 60er und 70er Jahren im Ruhrgebiet gegründet wurden, zunehmend an Bedeutung.

Der in Abbildung 6-1 ersichtliche petrochemische Schwerpunkt des Clusters liegt in Gelsenkirchen, wo BP die Verbund-Raffinerie Gelsenkirchen-Scholven und Gelsenkirchen-Horst betreibt. Das benötigte Rohöl fließt aus dem Norden durch die aus Wilhelmshaven kommende NordWest-Ölleitung (nicht auf der Karte dargestellt). In Gelsenkirchen-Scholven stehen zwei Steamcracker mit einer Produktionskapazität von zusammen 1.073 kt Ethylen (Petrochemicals Europe, o. J.) und 600 kt Propylen pro Jahr. Diese Olefine können zu den anderen Chemie-parks per Pipeline transportiert werden, zusätzlich auch C₄-Schnitt sowie das Aromat Benzol nach Marl. Am Anschlusspunkt in Oberhausen kann auch ein Produktaustausch (Ethylen und Propylen) mit dem Cluster Rheinland im Süden stattfinden. Das Werk von Sabic Polyolefine GmbH in Gelsenkirchen-Scholven stellt vor Ort Polyethylen und Polypropylen her (SABIC, o. J.-a).

Im Chemiepark Marl ist der größte Produktionsstandort von Evonik untergebracht. Dort werden petrochemische Grundstoffe wie Benzol, Ethylen, Propylen, Methanol und Phenol zu Basis-, Fein- und Spezialchemikalien umgesetzt (Evonik, o. J.). Hier ist auch INEOS mit der Herstellung von Lösungsmitteln (INEOS Solvents, wie auch in Moers und Herne) und Cumol (INEOS Styrenics) aktiv. Letztere Produktion wird per Pipeline an INEOS Phenol in Gladbeck transportiert, wo Phenol und Aceton produziert werden (Ineos Phenol, o. J.). Der PVC Hersteller Vestolit ist ebenfalls vertreten, das benötigte Ethylen kann aus Gelsenkirchen per Pipeline bezogen werden, während die Erzeugung von Chlor lokal erfolgt. Der aus der Chlorproduktion entstehende Wasserstoff kann in das von AirLiquide betriebene Rhein-Ruhr-Pipelinennetzwerk eingespeist werden.

Der Chemiepark in Krefeld-Uerdingen ist der Produktionsstandort für eine lange Liste von Kunststoffen und Zwischenprodukten, Kautschukchemikalien sowie Grund- und Feinchemikalien (Currenta, o. J.). Der Solvay Rheinberg Standort ist historisch vor ca. 100 Jahren in der Nähe großer Vorkommen an Salz und Kalkstein gewachsen, die nach wie vor die Schlüsselrohstoffe für die Sodaproduktion sind. Am Standort werden aus diesen Rohstoffen auch Natriumbicarbonat und Chlor produziert, letzteres ist ein Vorläuferprodukt von PVC, das seit dem Verkauf des PVC-Geschäfts von Solvay an INEOS von dessen Tochter INOVYN hergestellt wird (Solvay, o. J.).

Am Standort von OQ Chemicals in Oberhausen werden hauptsächlich Oxo-Intermediäre, Oxo-Derivate und Polymere aus Olefinen hergestellt, die wiederum hauptsächlich per Pipeline entweder aus dem Steamcracker in Gelsenkirchen oder aus dem Cluster Rheinland kommen. Die Verankerung des Ruhrgebiets im überregionalen ARRRRA Cluster (Antwerp-Rotterdam-Rhine-Ruhr-Area) erfolgt über Pipelines sowie über den Fluss und die Häfen am Rhein und Wesel-Datteln-Kanal.

In Bezug auf die Kunststoffherstellung aus alternativen Rohstoffen entwickelt Sabic am Standort Gelsenkirchen-Scholven ihr TRUCIRCLE Portfolio. Dabei werden pflanzliche erneuerbare Rohstoffe der zweiten Generation genutzt, um u.a. Folien- und Plattenprodukte aus Polycarbonat herzustellen (SABIC, o. J.-b, o. J.-c).

6.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

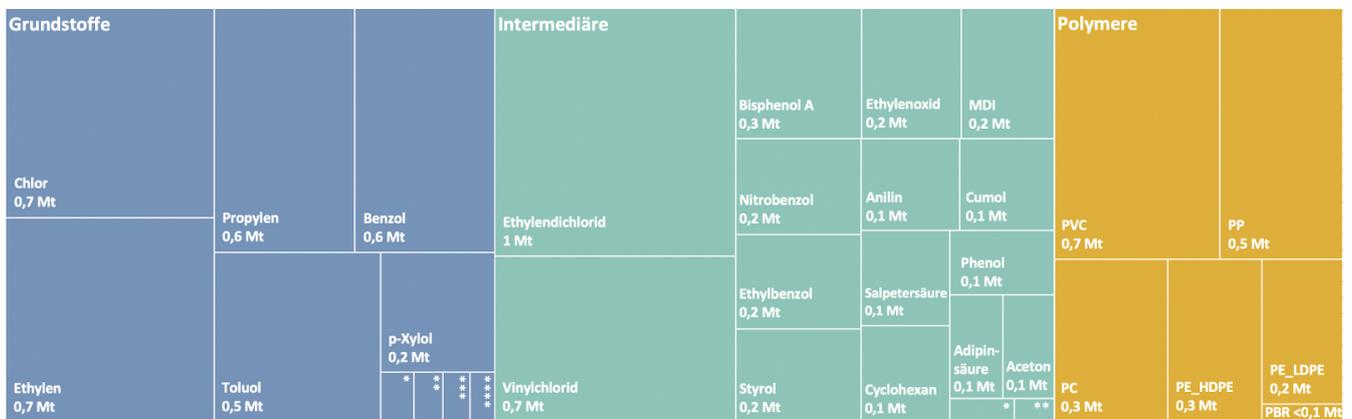


Abb. 6-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Emscher-Lippe für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Grundstoffe: *Methanol <0,1 Mt, **H2 <0,1 Mt, ***Butadien <0,1 Mt, ****Xylol <0,1 Mt. Intermediäre: *Formaldehyd <0,1 Mt, **Ethylenglykol <0,1 Mt

Abbildung 6-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Clusters Emscher-Lippe überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen.

Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe, letztere mit der in Abbildung 6-2 gezeigten umfangreichen Chlorproduktion vertreten. Teile dieses Chlors fließen über Vinylchlorid in die PVC-Produktion in Rheinberg (INOVYN) und Marl (Vinnolit). Die Chloralkali-Elektrolyse wird anhand unterschiedlicher Prozesse in den Chemieparken Krefeld-Uerdingen, Marl und Rheinberg durchgeführt. Die organischen Grundstoffe teilen sich in Olefine (Ethylen, Propylen), Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol) sowie C4-Schnitt und Methanol auf. Die Olefine und Aromaten werden in erster Linie mithilfe des Steamcrackers in Gelsenkirchen hergestellt, können aber auch per Pipeline oder Schiff mit dem gesamten ARRRRA-Cluster ausgetauscht werden. Propylen wird darüber hinaus auch im FCC-Prozess (Fluid Catalytic Cracking) in der Raffinerie in Gelsenkirchen produziert.

Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für eine Vielzahl von Intermediären wie Ethylendichlorid, Vinylchlorid, Bisphenol A, Ethylenoxid, Methylendiphenyliso-

cyanate (MDI), Ethylbenzol, Styrol, Nitrobenzol aber auch Salpetersäure, Anilin, Adipinsäure, und Cyclohexan werden im Cluster hergestellt. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich die Polymere Polyvinylchlorid (PVC), Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polycarbonat (PC) und eine begrenzte Menge an Polybutadien Rubber (PBR) produziert.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 6-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der Polymerproduktion im Cluster Emscher-Lippe detaillierter auf. Wie schon zuvor, basieren alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Das Diagramm verdeutlicht noch einmal, wie integriert bestimmte Polymer-Routen im Cluster sind (z. B. PVC, PP, PE, PC). Produzenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind vorhanden: Von Grundstoffen (Raffinerien, Steamcracker, Chlor-Elektrolyse) über Intermediäre zu Polymeren. Da nicht alle Schritte an einem Standort erfolgen, zeigt dies auch eine hohe Vernetzung der Chemieparks, die letztlich das Cluster ausmachen. Neben der oben beschriebenen PVC-Route ist die Herstellung von Polycarbonaten ein weiteres Beispiel für die Vernetzung innerhalb des Clusters: Propylen und Benzol fließen aus dem Steamcracker in Gelsenkirchen via Pipeline zum Chemiepark in Marl. Dort entsteht Cumol, welches per Pipeline nach Gladbeck geliefert wird, um daraus Phenol und Aceton herzustellen. Diese wiederum werden in Krefeld-Uerdingen zu Bisphenol-A und schlussendlich zusammen mit Chlor zu Polycarbonat verarbeitet. Nur wenige Grundstoffe wie die Aromaten Xylol und Toluol werden außerhalb des Clusters weiterverkauft, auch scheint kein Zwischenprodukt vollständig von außerhalb des Clusters bezogen zu werden.

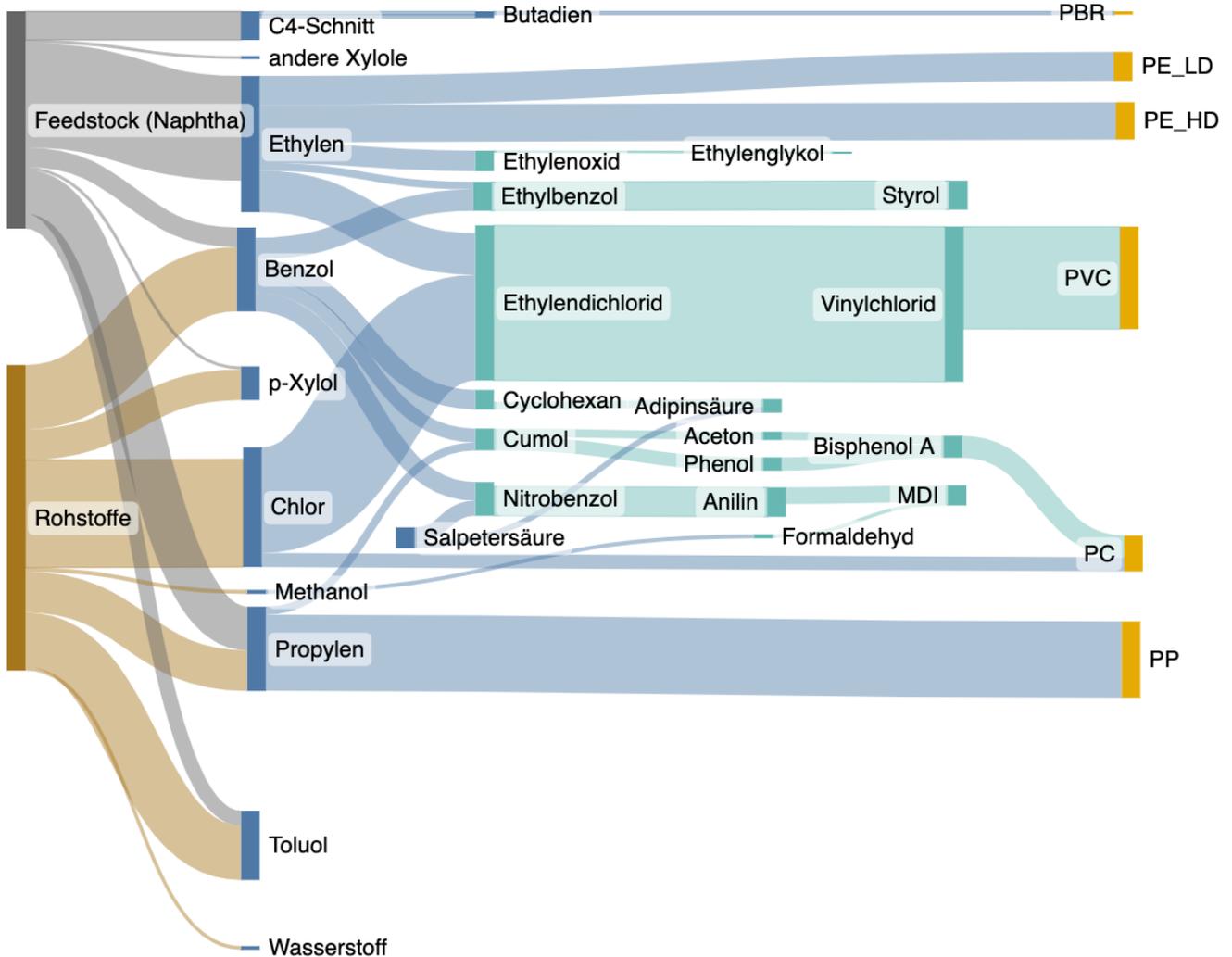


Abb. 6-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Emscher-Lippe. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen.)

6.3 Versorgung des Clusters

Gemäß unseren Modellrechnungen⁹ und wie in Abbildung 6-4 dargestellt, könnten die beiden Steamcracker am Standort Gelsenkirchen mit 2,1 Mio. Tonnen Feedstock (entsprechend etwa 25 TWh) im Jahr 2018 betrieben worden sein. Die BP-Raffinerie liefert nach unseren Rechnungen 1,1 Mio. leichtes Naphtha und 0,6 Mio. Tonnen LPG. Da einzelne Cracker-Linien auch Gasöl aus dem Hydrocracker-Rückstand verarbeiten können, könnte das Petrochemie-Cluster komplett über die lokale Raffinerie versorgt werden. Aufgrund der fehlenden Anbindung an eine Naphtha-Pipeline und einer nur schwachen Binnenschiffahrtsanbindung an einen Kanalhafen ist diese Selbstversorgung innerhalb des Unternehmens BP, das sowohl die Raffinerie als auch die beiden Steamcracker betreibt, ein wichtiges Kriterium für einen wirtschaft-

⁹ Bei der Berechnung des Energiebedarfs wurden nicht ausschließlich Kunststoff-Vorprodukte berücksichtigt, sondern auch weitere chemische Grundstoffe wie z.B. Kautschuk.

lichen Betrieb. Mit der vorhandenen Infrastruktur und den bestehenden Produktionsanlagen ist das Cluster jedoch auf einen Weiterbetrieb der örtlichen Raffinerie zwingend angewiesen.

Der Jahresbrutto-Wasserstoffbedarf der petrochemischen Industrie im Cluster beträgt nach unserer Modellrechnung 2,3 TWh, wovon 0,6 TWh durch die Beiproduktion aus der Acetylen- und Chlorherstellung gedeckt werden können.

Beim Wärmeenergiebedarf von Einzelprozessen stehen die Herstellung von Acrylsäure sowie die Synthetisierung von Polycarbonat und Polybutadien-Kautschuk mit einem Jahresbedarf von 2,5 TWh, 1,1 TWh und 0,7 TWh an der Spitze der dampfverbrauchenden Prozesse. Im Bereich des Energiebedarfs von Industrieöfen sind die Steamcracker mit 4 TWh sowie die Herstellung von Ethylendichlorid mit jährlich 0,9 TWh die größten Verbraucher. Am Standort Marl werden einige KWK-Einheiten von Evonik betrieben, gemäß vorliegender Informationen in der Summe mit einer elektrischen Leistung von etwa 500 MW. Dort wurde im Jahr 2018 auch noch Kohle als Brennstoff eingesetzt. Durch den insgesamt sehr hohen Dampfbedarf an den verschiedenen Standorten des Clusters ist der Netto-Erdgasbedarf mit 18 TWh jedoch relativ hoch. Das Cluster ist somit trotz der verbliebenen Kohle-KWK-Kapazitäten stark von diesem Energieträger abhängig. Dies umso mehr, als dass der tatsächliche Erdgasbedarf noch höher sein dürfte, denn es ist davon auszugehen, dass die Cracker-Beiprodukte am Standort Gelsenkirchen in erster Linie zur Deckung von Brennstoffbedarfen der Raffinerie eingesetzt werden. Somit stehen aber weniger Beiprodukte für die chemische Industrie an den verschiedenen anderen Standorten zur Verfügung als in der Bilanz angegeben.

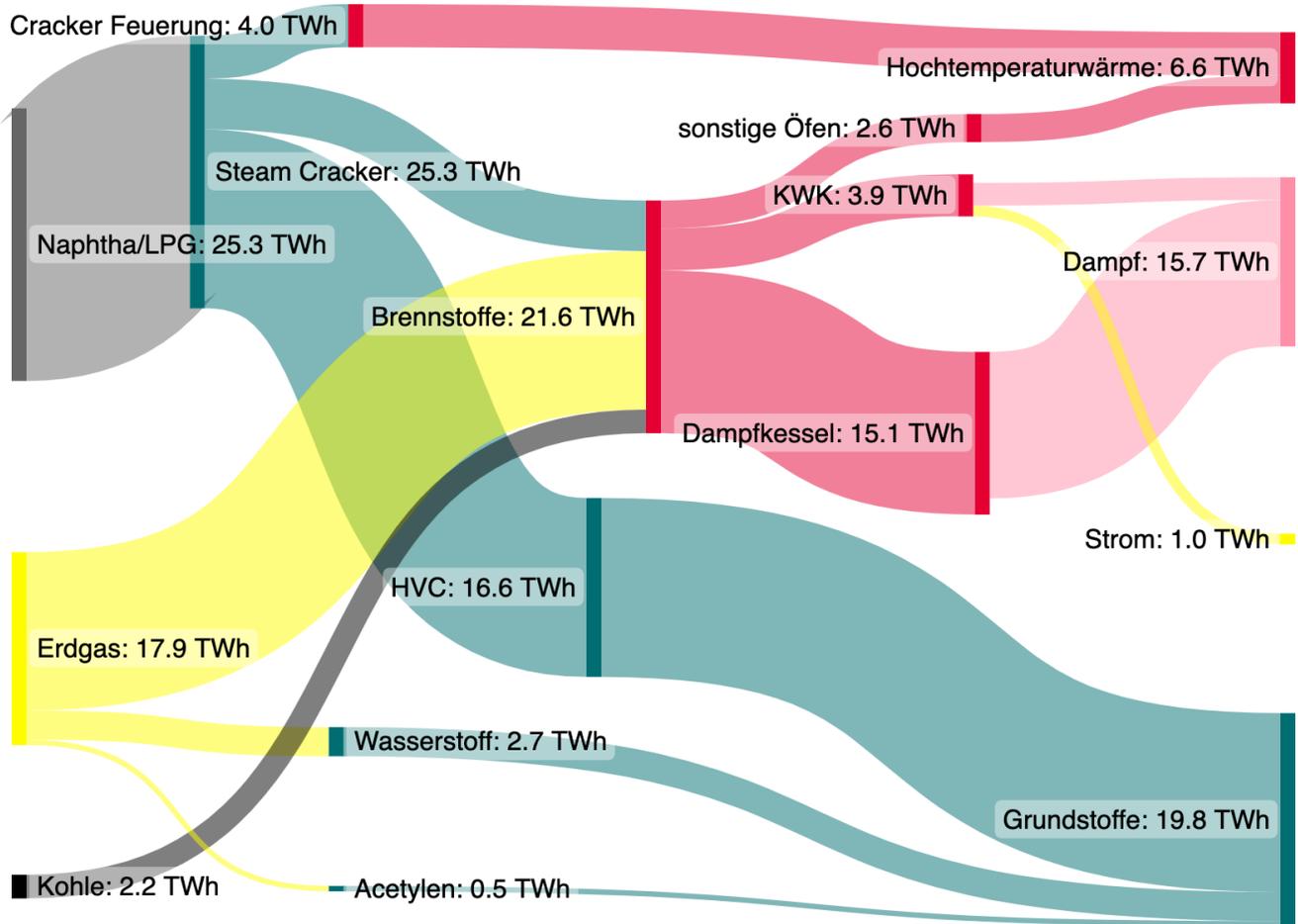


Abb. 6-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Emscher-Lippe im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Im Hinblick auf die Einbeziehung in überregionale Lieferketten lassen sich für das Cluster weniger eindeutige Aussagen machen als für die anderen Cluster. Dies liegt daran, dass sich das Cluster über zwei Regierungsbezirke erstreckt und es Überschneidungen mit dem Rheinland-Cluster gibt, da beide Cluster Standorte im Regierungsbezirk Düsseldorf aufweisen. Eindeutig jedoch sind die Bezüge des Regierungsbezirks Münster aus den Niederlanden über die Binnenschifffahrt. Darüber hinaus vermuten wir eine Verbindung des Standorts Uerdingen mit Brunsbüttel über die Bahn und das Unternehmensnetzwerk von Covestro (s. Nordsee-Cluster).

7 Petrochemisches Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck

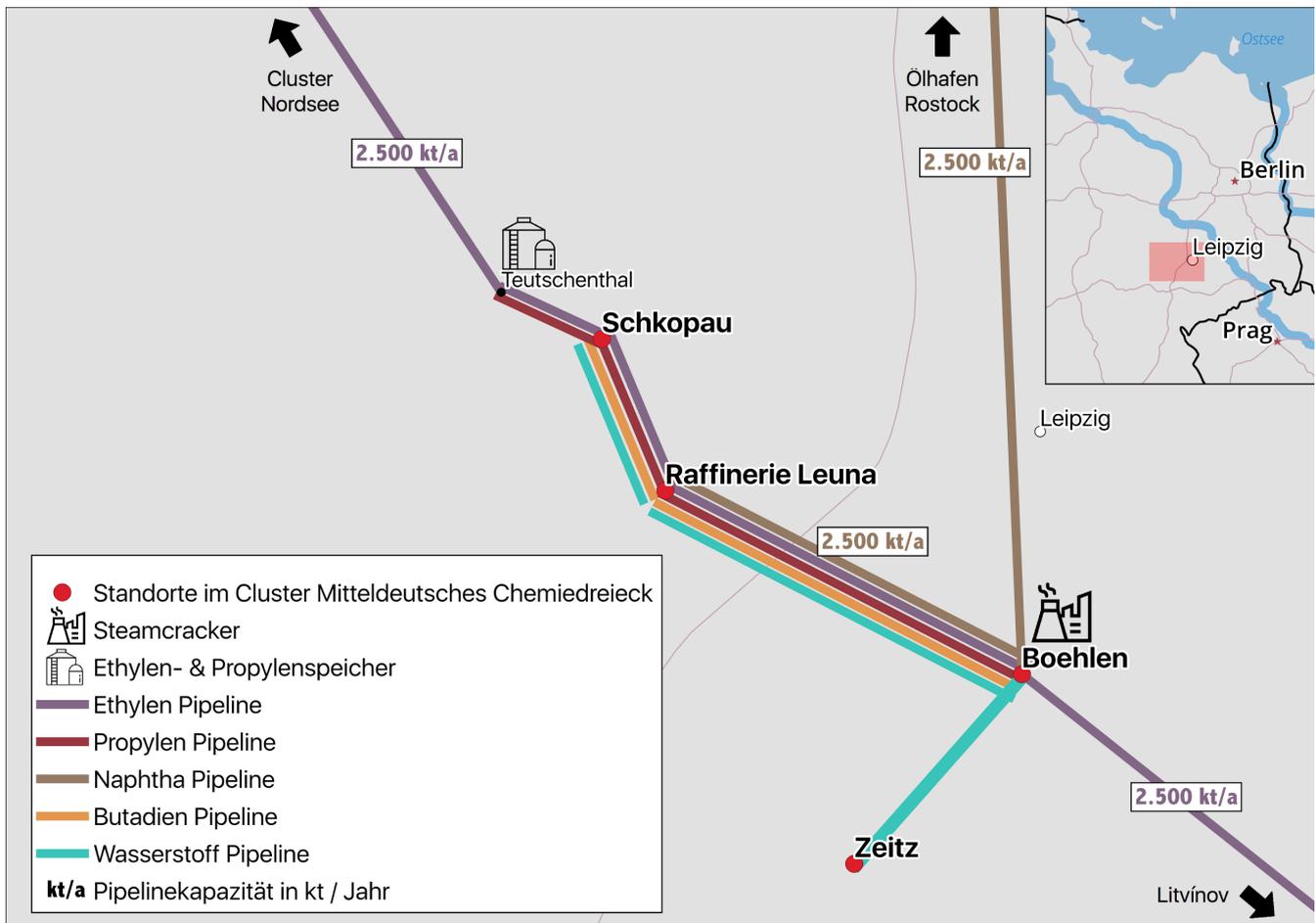


Abb. 7-1 Geographische Verortung des Clusters Mitteldeutsches Chemiedreieck und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen.

Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

7.1 Charakterisierung des Clusters

Das Mitteldeutsche Chemiedreieck, oder auch Central European Chemical Network (CeChemNet), ist ein regionales Netzwerk der chemischen Industrie in Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg. Es besteht offiziell aus den Chemieparks Zeitz, Böhlen, Leuna, Schkopau, Schwarzheide und Bitterfeld-Wolfen, die beiden letztgenannten werden aufgrund des Produktportfolios in der vorliegenden Analyse jedoch nicht näher untersucht. Zusammengenommen sind etwa 600 Unternehmen an den verschiedenen Standorten angesiedelt, beschäftigen rund 27.000 Arbeitskräfte und umfassen eine Gesamtfläche von 5.500 ha (CHEManager, 2011).

Historisch ist die Standortentwicklung eng mit den Braunkohlevorkommen in der Region verbunden, welche als Energie- und Kohlenstoffquelle die Produktion sicherstellen. Bis zum Ende des 2. Weltkriegs waren hier wesentliche Teile der deutschen Grundstoffchemie verortet, deren Standorte untereinander über Pipelines vernetzt waren und mit den Braunkohletagebauen über Transporttrassen einen engmaschigen Rohstoffverbund bildeten. Die in anderen Regionen bereits umgesetzte Transformation von der Kohle- zur Petrochemie wurde hier während der DDR nur teilwei-

se vollzogen, sodass die Standorte im Rahmen der Wiedervereinigung in den 1990er Jahren erhebliche Umstrukturierungen und Privatisierungen durchliefen. Wenn- gleich der Braunkohle aus energetischer Sicht weiterhin eine tragende Funktion zu- kommt, resultierte aus diesem Prozess ein petrochemischer Rohstoffverbund mit ei- ner Raffinerie in Leuna und einem Steamcracker in Böhlen. Heute verstehen sich die mitteldeutschen Chemieparcs als Knowledge Sites, welche gemeinsam mit den an- sässigen Fraunhofer-Instituten und der Synergien im Stoffverbund Innovationen an- streben.

Wie in Abbildung 7-1 ersichtlich, sind die Standorte auch infrastrukturell eng mitei- nander vernetzt - so bestehen Pipelineverbindungen für Ethylen, Propylen, Butadien und Wasserstoff innerhalb des Clusters, hinzu kommen Rohstoffspeicher im angren- zenden Teutschenthal sowie Anbindungen an benachbarte Chemieregionen und den Ölhafen Rostock. Diese Infrastrukturen ermöglichen die Herstellung zahlreicher Grundstoffchemikalien und Polymerprodukte an den verschiedenen Standorten im Cluster.

So werden im DOW Value Park in Böhlen auf 320 ha Fläche petrochemische Grund- stoffe wie Ethylen und Propylen sowie Intermediäre wie Acrylsäure, Anilin und Sty- rol produziert. Herzstück des Chemieparcs ist ein Steamcracker mit einer Produkti- onskapazität von 565.000 t Ethylen/Jahr, aus welchem auch die Werke in Schkopau und Leuna beliefert werden (Petrochemicals Europe, o. J.; Rempe, 2013). Wie Ab- bildung 7-1 zeigt, wird die Feedstockversorgung einerseits über eine dezidierte Naphtha-Pipeline bis zum Ölhafen Rostock sichergestellt, von wo aus der Rohstoff bislang vor allem aus Russland, aktuell wegen der kriegsbedingten Sanktionen je- doch zunehmend von alternativen Quellen wie Algerien, Katar und den USA bezogen wird (Ostsee-Zeitung, o. J.). Andererseits besteht eine Pipelineverbindung nach Leuna, wo Naphtha aus Rohöl destilliert wird. Die energetische Versorgung des Standorts wird über ein Braunkohlekraftwerk abgedeckt.

Im DOW Value Park in Schkopau werden auf 600 ha Fläche anorganische Grund- stoffchemikalien wie Chlor und Natronlauge, aber auch Polymerprodukte wie Vi- nylchlorid, Polyethylen und Polyethylenterephthalat hergestellt. Auch hier über- nimmt ein Braunkohlekraftwerk die energetische Versorgung (CeChemNet, o. J.). Ebenfalls am Standort angesiedelt ist das Fraunhofer Pilotanlagenzentrum für Po- lymer-synthese und -verarbeitung sowie das Unternehmen Trinseo, welches vor Ort Polystyrol herstellt. Der Chemiepark in Leuna beherbergt auf 1.300 ha Fläche die einzige Erdölraffinerie im Cluster und versorgt die Standorte mit Raffinerieproduk- ten, nutzt jedoch auch das Ethylen aus Böhlen zur Produktion von Intermediären und Polymeren (InfraLeuna, o. J.). Im Chemie- und Industriepark Zeitz werden ver- schiedene Stoffe der Grund- und Spezialchemie hergestellt - unter anderem Adipin- säure - der Standort beherbergt jedoch auch eine Bioraffinerie. Die Standorte in Schwarzheide und Bitterfeld-Wolfen sind aufgrund ihrer Produktschwerpunkte nicht Teil des gewählten Clusters und werden daher im Weiteren nicht näher be- leuchtet.

Braunkohle, Erdöl und Erdgas dominieren heute die Produktionsstrukturen im Mit- teldeutschen Chemiedreieck. Dennoch lassen sich verschiedene Initiativen für eine klimafreundlichere Energie- und Rohstoffbasis in der Region verzeichnen. So wird in Leuna derzeit von UPM eine Bioraffinerie gebaut, in der zukünftig Biochemikalien

wie Monoethylen- und Monopropylenglykole aus Laubholz hergestellt werden sollen (UPM Biochemicals, o. J.). Ferner soll dem Thema grüner Wasserstoff mit der aktuell größten im Bau befindlichen PEM-Elektrolyse sowie einer geplanten H₂-Pipeline zur Vernetzung der Wasserstoffspeicher in Bad Lauchstädt mit Leuna und dem niedersächsischen Salzgitter eine tragende Funktion zukommen (Landesportal Sachsen-Anhalt, 2022). Mit Blick auf chemisches Recycling ist in Leuna eine Pilotanlage geplant, das Unternehmen Equipolymers in Schkopau will zudem chemisches Recycling anteilig zur PET-Produktion einsetzen (Equipolymers, o. J.; RITTEC Umwelttechnik, 2022).

7.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

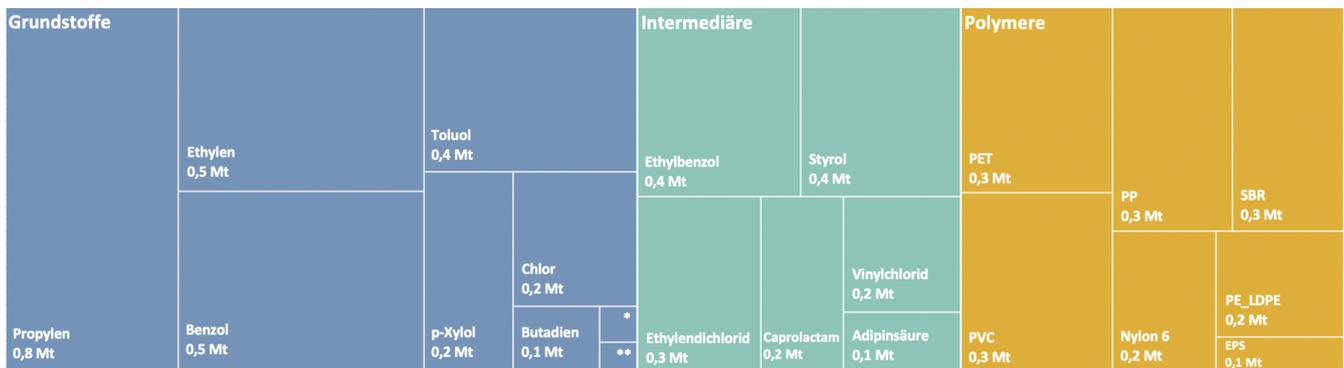


Abb. 7-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. *Xylol <0,1 Mt, **H₂ <0,1 Mt

Abbildung 7-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung hierfür relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Clusters Mitteldeutsches Chemiedreieck überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen am Standort, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen.

Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe. In den betrachteten Standorten des Mitteldeutschen Chemiedreiecks sind hier vor allem Propylen und Ethylen aus der Gruppe der Olefine sowie die Aromaten Benzol, Toluol und P-Xylol von hoher Relevanz. Diese werden zum einen mithilfe des Naphtha-Steamcrackers in Böhlen hergestellt, welcher über eine jährliche Verarbeitungskapazität von 1.600 kt Naphtha (Wuppertal Institut, 2022) verfügt und dabei rund 1,14 Mt CO₂ ausstößt (European Union, 2022). Zum anderen spielen aber auch Raffinerieprozesse wie Fluid Catalytic Cracking (FCC) sowie Destillations- und Extraktionsverfahren eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung. Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für die Produktion der Intermediäre Ethylbenzol, Styrol, Ethylendichlorid, Caprolactam, Vinylchlorid und Adipinsäure. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich eine große Bandbreite an Polymeren hergestellt, namentlich Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylchlorid (PVC), Polypropylen (PP), das Copolymer Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Polyethylen niedriger Dichte (PE_LDPE), Nylon 6 und expandiertes Polystyrol (EPS).

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 7-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der oben beschriebenen Polymerproduktion im Mitteldeutschen Chemiedreieck detaillierter auf. Auch hier basieren alle dargestellten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, dass große Mengen Olefine wie auch Aromaten am Standort nicht zu Polymeren weiterverarbeitet werden. Ethylen, welches als Basis für die Produktion von Polyethylen sowie über die Intermediäre Ethylbenzol und Ethylendichlorid in SBR, EPS und PVC fließt, wird nur zu etwa 50 % verarbeitet, Propylen nur zu etwa einem Drittel (zu PP). Die mengenmäßig bedeutsamen Aromaten Toluol und P-Xylol werden überhaupt nicht zu Polymeren weiterverarbeitet. Bedeutende Überschüsse ergeben sich zudem bei Styrol, welches nur zu geringen Mengen in die Produktion von SBR und EPS eingeht. Andererseits werden bestimmte Intermediäre offenbar von außen bezogen, hierzu zählen insbesondere Terephthalsäure, Cyclohexan und Ethylenglykol. Auch im Hinblick auf den Grundstoff Butadien ergibt sich durch die Kautschuk-Herstellung ein Importbedarf.¹⁰

¹⁰ Wir gehen für SBR von einer Rezeptur mit 23,5 % Styrol und 76,5 % Butadien aus. Bei einem höheren Anteil von Styrol wäre die Cluster-Bilanz ausgewogener.

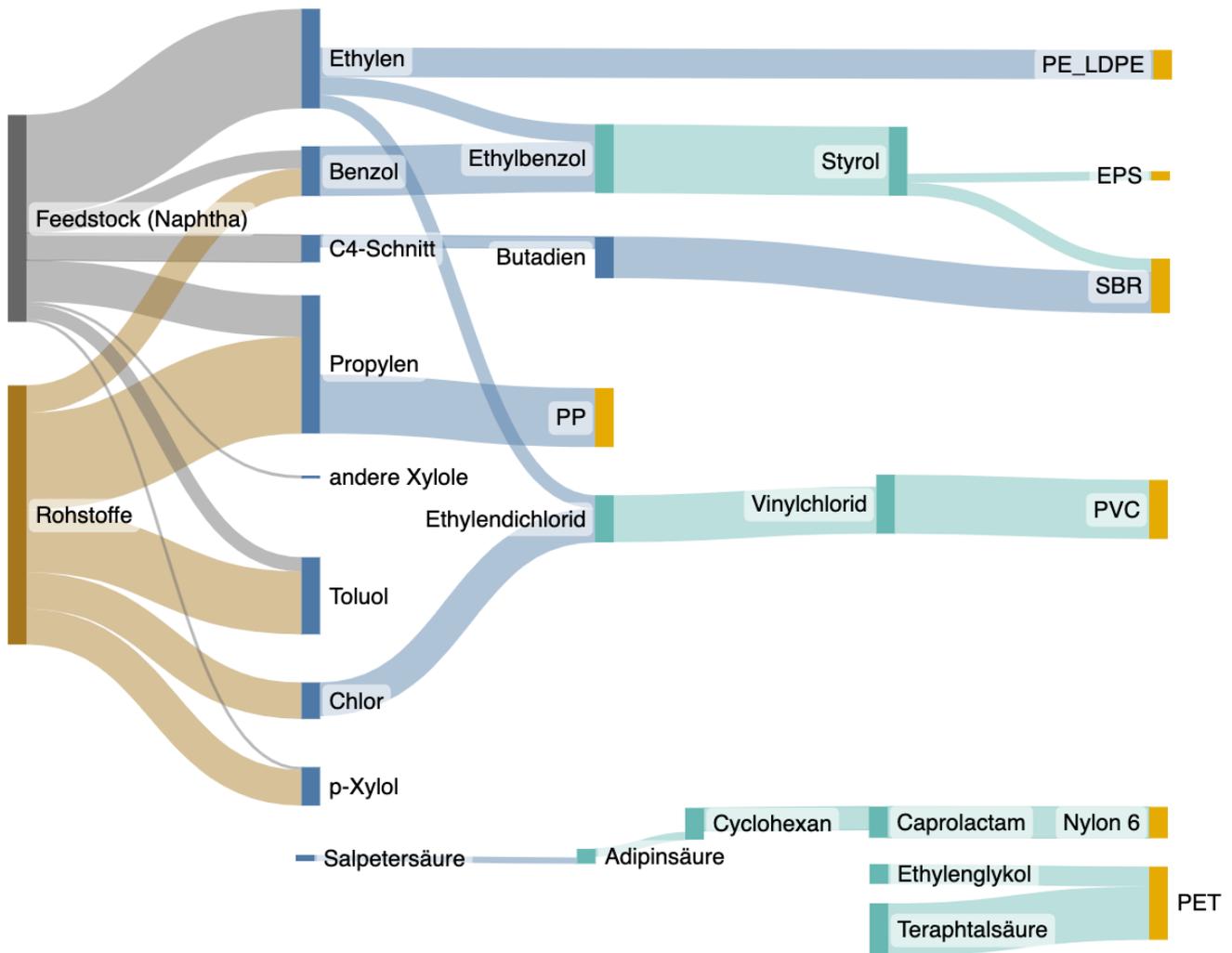


Abb. 7-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Mitteldeutschen Chemiedreiecks. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen.

7.3 Versorgung des Clusters

Mit einem Primärenergiebedarf von knapp 40 TWh liegt das Cluster knapp hinter Emscher-Lippe und Ludwigshafen. Etwas mehr als die Hälfte entfällt dabei auf Naphtha und LPG als Steamcracker-Feedstock. Die Raffinerie in Leuna kann gemäß unseren Modellrechnungen wiederum nur etwa die Hälfte hiervon decken – gemäß den Energiebilanzen von Sachsen-Anhalt (Lieferungen der Raffinerie) und Sachsen (Empfang des Crackers in Böhlen) lieferte sie im Jahr 2015 sogar lediglich maximal 6 TWh. Das Cluster ist somit auf den zusätzlichen Bezug von Naphtha über die Pipeline aus Rostock angewiesen. In ähnlicher Größenordnung wie Naphtha und LPG wird auch Erdgas eingesetzt, vor allem zur Dampferzeugung. 17 TWh werden direkt zur Dampferzeugung eingesetzt (tw. bei externen Dampferzeugern), 1,8 TWh noch einmal in KWK. Dem stehen große Dampfabnehmer gegenüber, an der Spitze steht hier die Synthetisierung von synthetischem Kautschuk (SBR) mit 1,9 TWh, dahinter

folgen Acrylsäure mit 0,9 TWh und Styrol mit 0,7 TWh. 1,2 TWh werden darüber hinaus in Öfen eingesetzt, wobei PET mit 0,5 TWh den größten Teil einnimmt. Aufgrund der umfangreichen Chlorproduktion in Bitterfeld benötigt die chemische Industrie gemäß unseren Modellrechnungen bilanziell kein Erdgas für den stofflichen Bedarf, sondern könnte sogar Wasserstoff abgeben. Auch die Raffinerie weist nach unseren Rechnungen keine nennenswerten Netto-Bezüge auf. Da Linde in Leuna jedoch Dampfreformierungsanlagen betreibt, liegt die Vermutung nahe, dass der Bedarf an Wasserstoff in unserer Modellrechnung unterschätzt wird.

Wie bereits oben beschrieben verfügt das Cluster über ein sehr gut ausgebautes Pipeline-Netz. Insofern überrascht der umfangreiche cluster-interne Eisenbahnverkehr mit organischen Grundstoffen (innerhalb Sachsen-Anhalts), der deutlich über dem Verkehr innerhalb der anderen Regionen liegt (s. Tabelle 2-3 im Einleitungskapitel). Neben dem relativ breiten Produktspektrum dürfte das auch auf unterschiedliche, historisch gewachsene Produktionsstätten zurückzuführen sein. Über den Fernverkehr per Bahn wird vor allem Salz bezogen. (s. Tabelle 7-1).

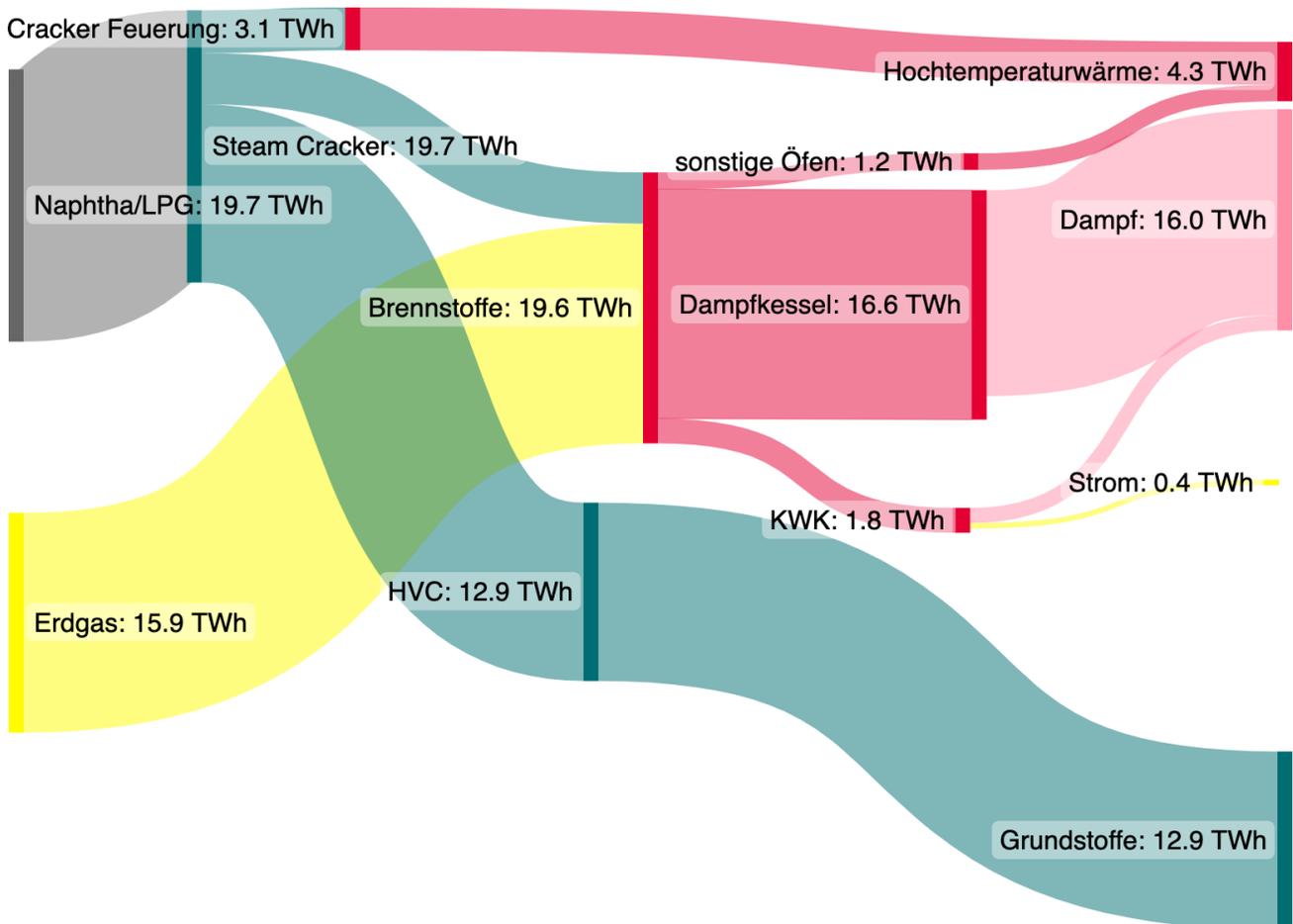


Abb. 7-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Mitteldeutschen Chemiedreiecks im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Tab. 7-1 Empfang von relevanten Gütern in Sachsen-Anhalt im Eisenbahnverkehr nach wichtigen Versandregionen im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr)¹¹

	Sachsen-Anhalt (Mitteldt. Chemiedreieck)	Mecklenburg- Vorpommern	RB Düsseldorf (Rheinland, Emscher-Lippe)	RB Karlsruhe (BASF Ludwigshafen, Raffinerie Karlsruhe)	RB Oberbayern (Bayer. Chemiedreieck)	Ausland
Salz	0	958	0	0	0	225
Flüssige Mineralölerzeugnisse	5.943	40	121	53	151	139
Gasförmige Mineralölerzeugnisse	3	1	2	17	23	8
Feste oder wachsartige Mineralölerzeugnisse	0	0	0	0	0	0
Chemische Grundstoffe, organisch	1.179	63	119	236	101	408

¹¹ Die Lieferungen relevanter Produkte in den Direktionsbezirk Leipzig mit dem Standort Böhlen sind insgesamt sehr klein und werden deshalb hier nicht ausgewiesen.

8 Petrochemisches Cluster Nordsee

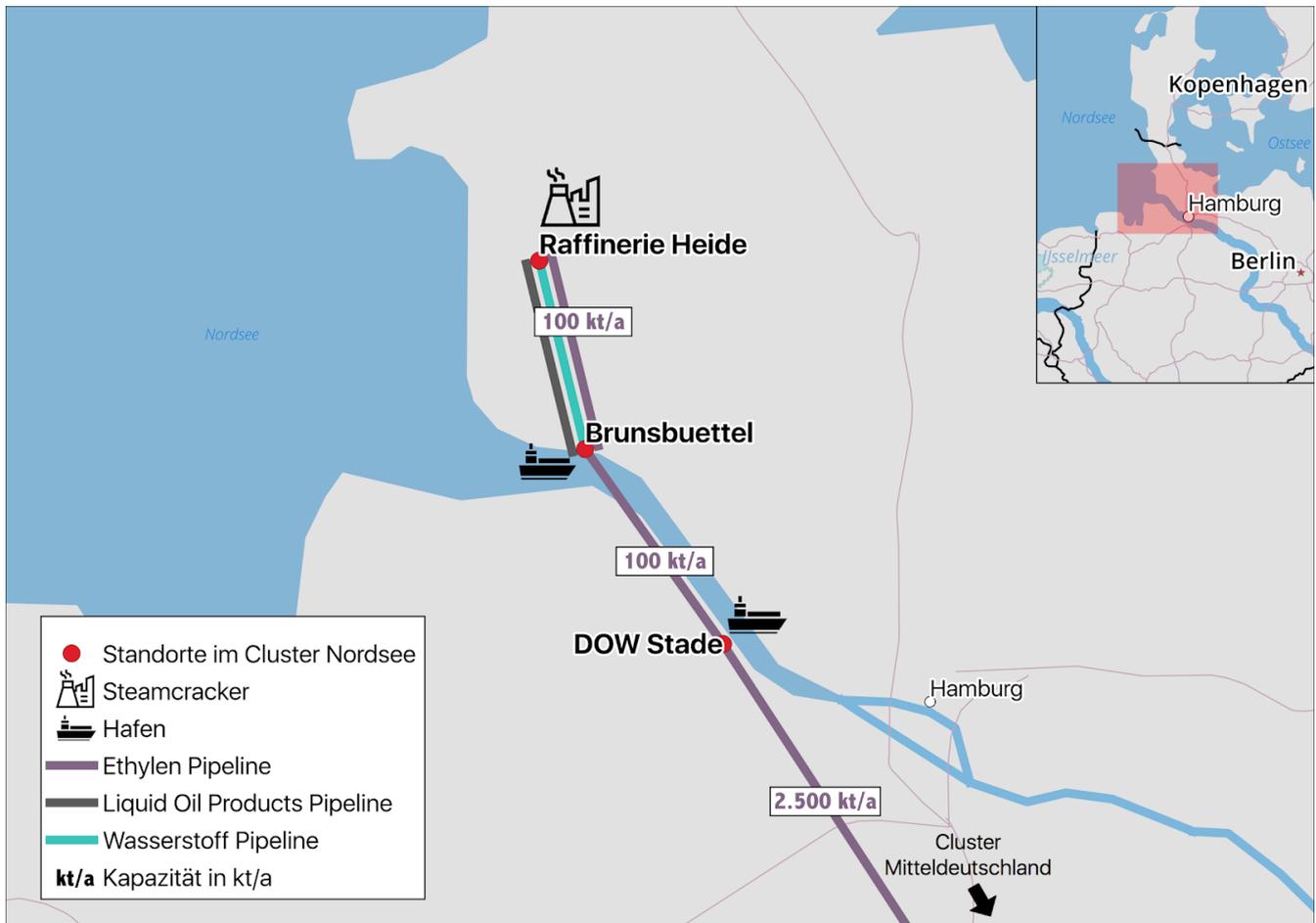


Abb. 8-1 Geographische Verortung des Clusters Nordsee und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

8.1 Charakterisierung des Clusters

Das Cluster Nordsee setzt sich aus der Raffinerie Heide und den petrochemischen Standorten in Brunsbüttel und Stade zusammen, welche in den norddeutschen Bundesländern Niedersachsen und Schleswig-Holstein liegen. Historisch gesehen ist das Cluster in erster Linie aufgrund der regionalen Rohstoffverfügbarkeit und der Transportmöglichkeiten entstanden, die sich durch die geografische Lage an der Nordsee ergibt. So wurde die Raffinerie Heide im Jahr 1940 wegen der lokalen Förderung von Erdöl in Schleswig-Holstein gegründet (Raffinerie Heide, o. J.-a). Die günstige logistische Anbindung an den Seeweg und die Binnenschifffahrt begünstigte daraufhin die Niederlassung von petrochemischen Unternehmen in Brunsbüttel und Stade (Metropolregion Hamburg, o. J.).

Heute verarbeitet die Raffinerie Heide in Hemmingstedt auf 134 ha Fläche mit 500 Mitarbeitenden etwa 4 Mio t Rohöl jährlich und stellt 450.000 t petrochemische Produkte her. 2021 wurde hier ein Umsatz von rund 2 Mrd € erzielt (Raffinerie Heide, o. J.-b). In der High-Conversion-Raffinerie wird Öl zunächst in einem Hydrocracker aufgespalten, bevor es vor Ort im Steamcracker mit einer Produktionskapazität von 110.000 t Ethylen pro Jahr weiterverarbeitet wird (Petrochemicals Europe, o. J.;

Raffinerie Heide, o. J.-c). Für ihren Betrieb benötigt die Raffinerie etwa 40 Megawatt Strom und 300 Megawatt Dampf, beides wird fast vollständig im eigenen Kraftwerk hergestellt (Carl, 2019). Das für die Produktion benötigte Rohöl wird über den Ölhafen und die Tanklager in Brunsbüttel per Pipeline nach Hemmingstedt angeliefert. Auch die Unternehmen im Chemcoast Park Brunsbüttel, der mit einer Fläche von 2.000 ha zu Deutschlands größten Chemieparks zählt, werden über den Ölhafen und die Raffinerie mit Rohstoffen versorgt (PROCESS, o. J.). Zu den 15 dort ansässigen Unternehmen zählen Covestro (MDI-Produktion), Sasol (Fettalkohole und anorganische Spezialchemikalien), Yara (Ammoniak- und Harnstoff) und Trinseo (Polycarbonat) (ChemCoast Park Brunsbüttel, o. J.). In Stade unterhält zudem DOW auf einer Fläche von 550 ha und mit 1.100 Mitarbeitenden einen der größten Industriebetriebe in Niedersachsen. In den 10 Anlagen werden hier jährlich 4 Mio t Grund- und Basischemikalien hergestellt. Wichtige Standortfaktoren für DOW sind die logistische Anbindung über den Seehafen und das Steinsalzvorkommen in der Region (DOW, o. J.).

Abbildung 8-1 zeigt die geografische Verortung der Cluster-Standorte und ihre infrastrukturellen Verbindungen. Wie zu erkennen ist, verläuft eine Ethylenpipeline von der Raffinerie Heide über den Chemcoast Park Brunsbüttel zum DOW Werk in Stade, von wo auch das DOW Werk in Schkopau und somit das mitteldeutsche Chemiedreieck mit dem Grundstoff versorgt wird. Zudem verläuft eine Wasserstoffpipeline zwischen Heide und Brunsbüttel. Die Hafeninfrastuktur vor Ort spielt eine besondere Rolle und ermöglicht eine Anbindung an das internationale Seewegenetz. Über zwei am Nord-Ostsee Kanal und einem an der Elbe gelegenen Häfen werden Chemieprodukte, Öl- und Gasladungen sowie Schüttgüter umgeschlagen.

8.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

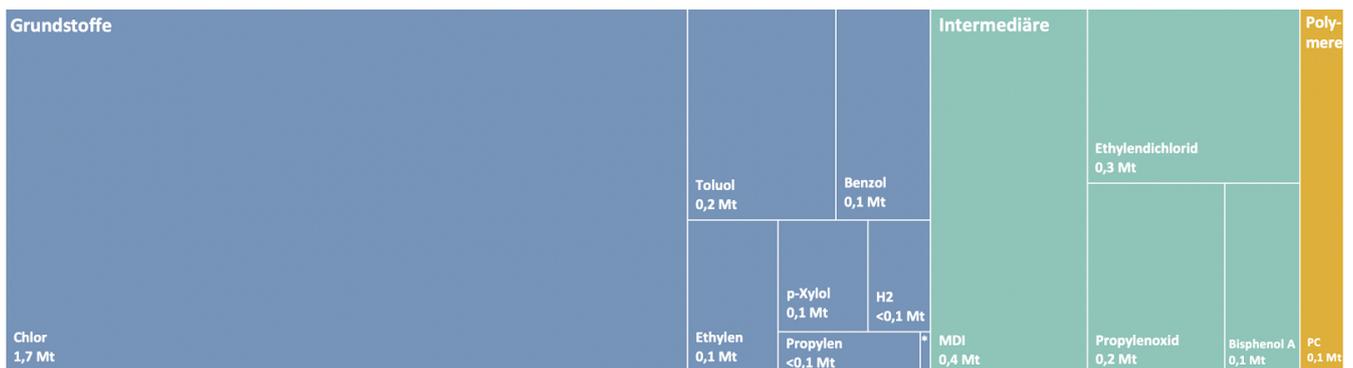


Abb. 8-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Nordsee für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.
*Xylol <0,1 Mt

Abbildung 8-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Nordseeclusters überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen.

Die Ausgangsbasis bildet zunächst eine Vielzahl organischer und anorganischer Grundstoffe. Mengenmäßig am bedeutendsten ist hier Chlor, mit einigem Abstand gefolgt von den Aromaten Toluol, Benzol, p-Xylol sowie den Olefinen Ethylen und Propylen. Butylen, Xylol und C₄-Schnitt spielen nur eine geringe Rolle. Die Olefine werden im Steamcracker der Raffinerie Heide hergestellt, welcher über eine jährliche Verarbeitungskapazität von 315 kt Naphtha verfügt. Destillationsverfahren in der Raffinerie spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von Aromaten. Aus den verschiedenen Grundstoffen wird eine Reihe von Intermediären produziert, insbesondere Ethylendichlorid und Methyldiphenylisocyanate (MDI), doch auch Propylenoxid und Bisphenol A spielen eine wichtige Rolle. Das von Covestro hergestellte MDI stellt ein wichtiges Exportgut dar. Hier hat das Unternehmen in den letzten Jahren die Toluol-2,4-diisocyanat (TDI) Anlagen auf MDI-Produktion umgestellt und deren Kapazität mit einer weiteren Anlage im Jahr 2020 verdoppelt (Covestro, o. J.). Damit ist Brunsbüttel einer der drei europaweit größten Produktionsstandorte für MDI. Gegenüber den Grundstoffen und Intermediären nimmt die schlussendliche Polymerproduktion im Cluster Nordsee eine untergeordnete Rolle ein, an den zugehörigen Standorten wird lediglich von dem Unternehmen Trinseo Polycarbonat (PC) hergestellt (KunststoffWeb, 2019).

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 8-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der Polymerproduktion im Nordseecluster detaillierter auf. Wie schon zuvor, basieren alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, dass nur knapp ein Viertel des am Standort produzierten Chlors innerhalb des Polymer-Metabolismus vor Ort weiterverarbeitet wird. Auch andere Grundstoffe wie Toluol und Propylen werden vor Ort nur anteilig zu Intermediären weiterverarbeitet und vermutlich exportiert oder in Prozessen außerhalb der Polymerproduktion eingesetzt. Dies gilt ebenso für andere Grundstoffe wie Benzol, Wasserstoff, Butylen, C₄-Schnitt, Xylol und p-Xylol. Einige Intermediäre müssen für die Produktion von außerhalb zugeliefert werden, dies trifft auf Anilin¹² und Formaldehyd (für MDI) am Standort Brunsbüttel sowie Phenol und Aceton (für Bisphenol A bzw. Polycarbonat) am Standort Stade zu. Auch werden einige Intermediäre am Standort nicht weiterverarbeitet, sondern als Zwischenprodukte veräußert. Als einziges Polymer im Cluster wird Polycarbonat hergestellt.

¹²Am Standort Brunsbüttel betreibt Covestro eine Anilin-Anlage, deren Kapazität jedoch nicht ausreicht, um die MDI-Anlage zu versorgen. Im Rahmen der Modellrechnung wurde die Anilin-Anlage zwar nicht ausgelastet, in der Realität dürften diese Kapazitäten jedoch ausgelastet werden und hierfür im Rahmen einer unternehmensinternen Lieferkette das Vorprodukt Nitrobenzol aus Krefeld-Uerdingen bezogen werden - daneben zusätzlich Anilin (s.u.).

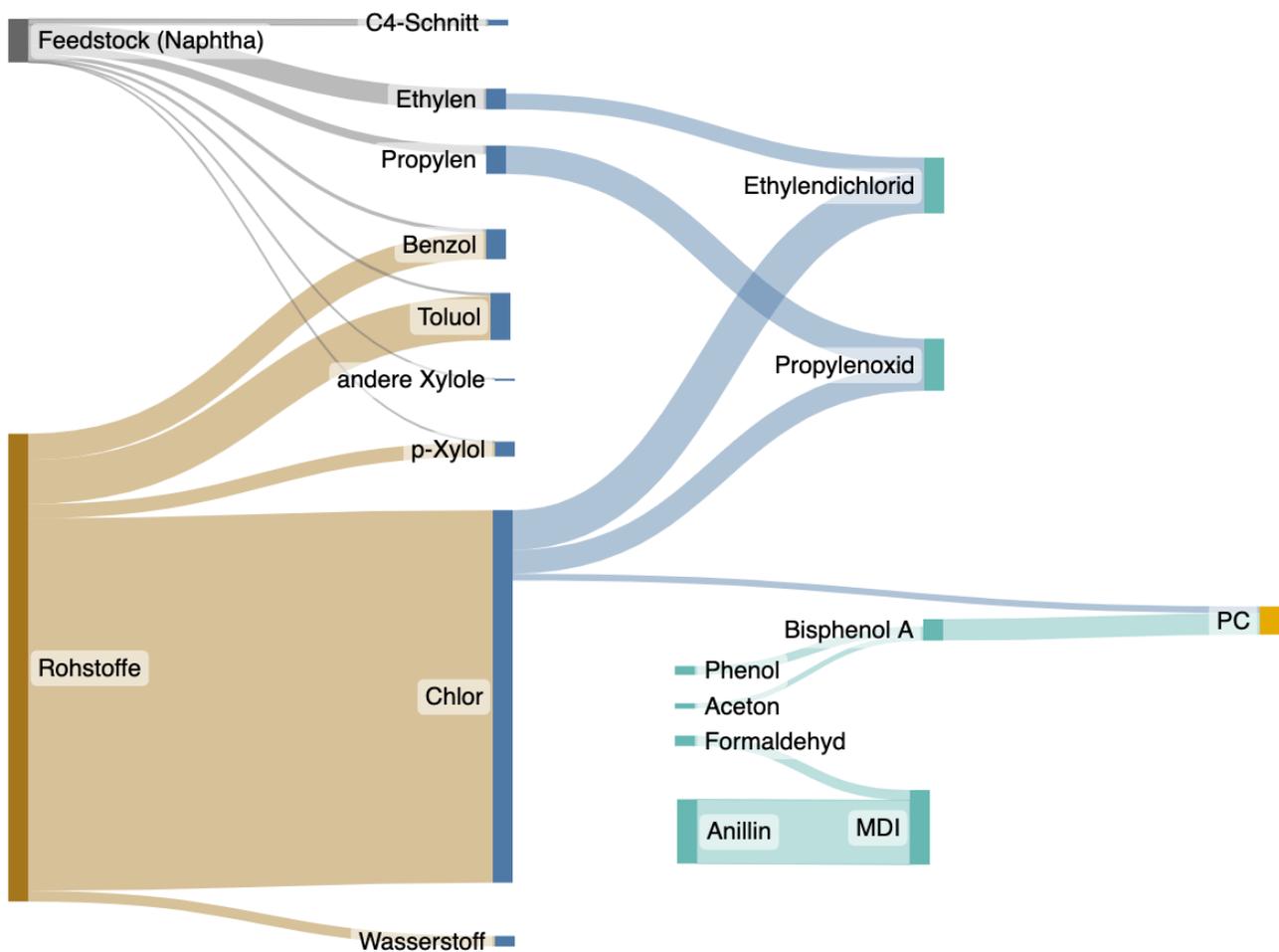


Abb. 8-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Nordsee. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen.

8.3 Versorgung des Clusters

Mit einem Primärenergieeinsatz von etwa 11 TWh handelt es sich beim Nordseecluster um das kleinste deutsche Petrochemie-Cluster. Entsprechend Modellrechnungen des Wuppertal Instituts könnten jährlich etwa 0,1 Mio. Tonnen LPG durch die örtliche Raffinerie in Heide als Feedstock für den dort angesiedelten Steamcracker bereitgestellt werden. Das in der Raffinerie verfügbare leichte Naphtha wird derzeit wohl nicht in der vorhandenen Isomerisations-Anlage zu Kraftstoff-Benzin weiterverarbeitet, sondern als Cracker-Feedstock eingesetzt. Da der Cracker in Heide flexibel mit unterschiedlichem Feedstock beschickt werden kann, könnte dort je nach Marktlage auch Ethan oder LPG eingesetzt werden, die über den Hafen Brunsbüttel vom Weltmarkt beziehbar sind. In unserer Modellrechnung gehen wir jedoch von einem Leicht-Naphtha-Einsatz in Höhe von 0,3 Mio. Tonnen aus, was auch konsistent mit der Ausweisung in der Energiebilanz des Bundeslandes Schleswig-Holstein ist.

Darüber hinaus besteht ein stofflicher Bruttobedarf von Wasserstoff in Höhe von jährlich 2,4 TWh. Ein Teil kann zwar durch die Kuppelproduktion in der Chlor-Alkali-Elektrolyse und Toluol-Produktion gedeckt werden (0,5 TWh), insbesondere

zur Herstellung von Ammoniak verbleibt aber darüber hinaus ein Restbedarf, der im speziellen Falle durch die partielle Oxidation von Erdgas gedeckt wird. Der hiermit verbundene bilanzielle Erdgasbedarf beträgt nach unseren Modellrechnungen 3,1 TWh im Jahr.

Beim Wärmeenergiebedarf von Einzelprozessen stechen die Herstellung von Propylenoxid und die Synthetisierung von Polycarbonat mit einem Jahresdampfbedarf von 0,9 bzw. 0,4 TWh besonders heraus. Im Bereich des Energiebedarfs von Industrieöfen sind die Steamcracker mit 0,6 TWh sowie die Herstellung von Ethylendichlorid mit jährlich 0,4 TWh die größten Verbraucher. An den Standorten Brunsbüttel und Stade werden KWK-Anlagen mit Gas betrieben, wobei in Stade auch 0,4 TWh Wasserstoff zur Feuerung eingesetzt werden, die als Beiprodukt aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse entstehen und wofür es am Standort keine stoffliche Verwendung gibt.

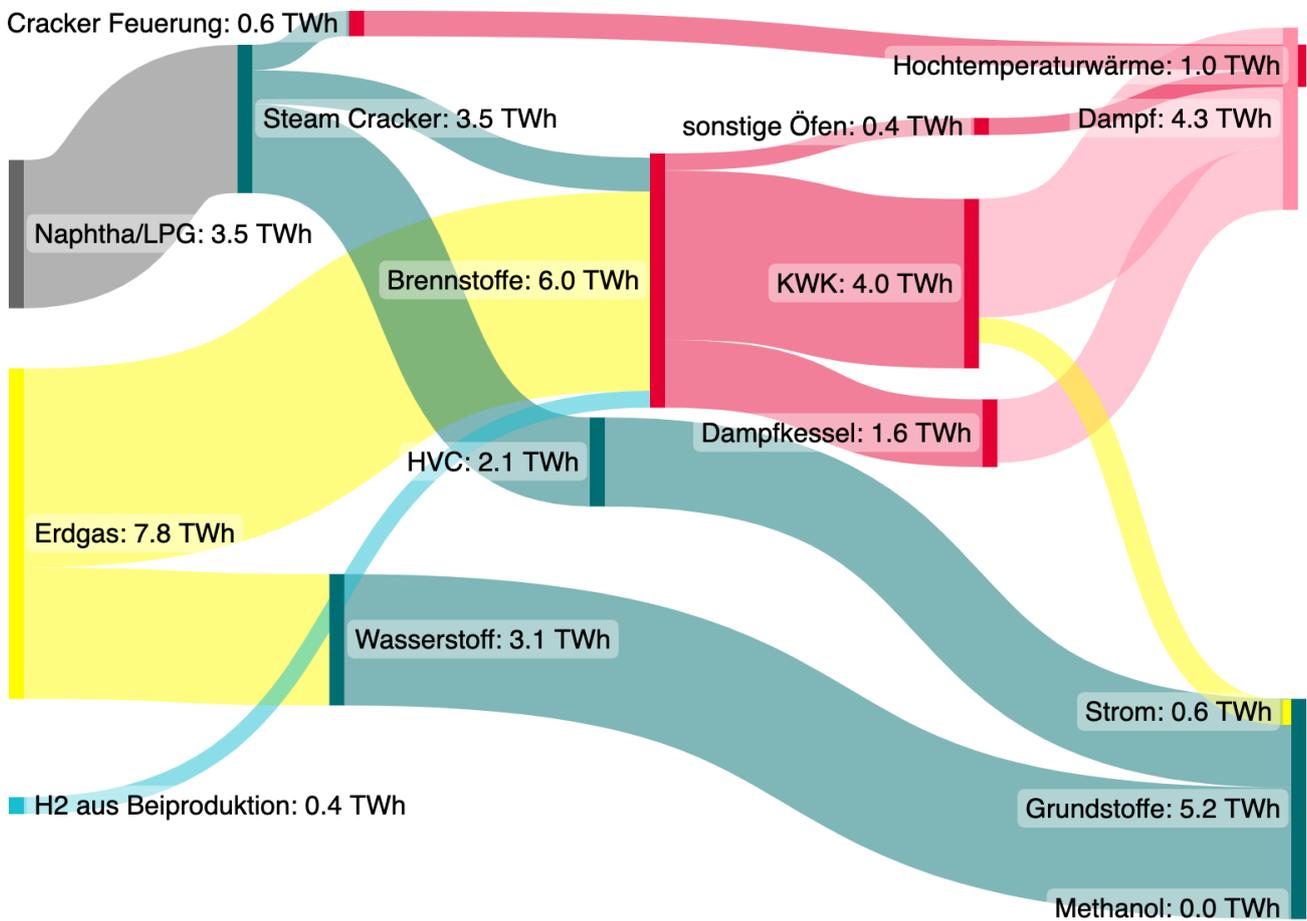


Abb. 8-4 Modellierter Primärenergiebedarf des Clusters Nordsee im Jahr 2018 (ohne externen Strombezug).

Wie die Tabelle zeigt, weist der Hafen Bützfleth (Stade) einen Empfang von 170.000 Tonnen chemischer Grundstoffe aus. Hierbei dürfte es sich in erster Linie um Propylen handeln, das über das unternehmensinterne Netzwerk von Dow aus dem niederländischen Hafen Terneuzen an den Standort Stade geliefert werden könnte. Auch die Polycarbonat-Vorprodukte Phenol und Aceton dürften über den Seeweg bezogen

werden, sie müssen zugekauft werden. Für die Versorgung des Standorts Brunsbüttel mit Chemie-Vorprodukten spielt die Seeschifffahrt dagegen keine Rolle. Trotz seiner See-Anbindung ist die Einbindung von Brunsbüttel in internationale Lieferketten für Polymere damit relativ schwach. Über die Bahn kommen dagegen 20.000 Tonnen chemischer Grundstoffe nach Schleswig-Holstein (d.h. Heide/Brunsbüttel), zur Hälfte aus dem Regierungsbezirk Düsseldorf. Bei Letzteren dürfte es sich um unternehmensinterne Transporte des MDI-Vorproduktes Anilin bzw. des Anilin-Vorproduktes Nitrobenzol durch Covestro von Krefeld-Uerdingen nach Brunsbüttel handeln. Der niedersächsische Regierungsbezirk Lüneburg, wo der Standort Stade beheimatet ist, bezog im Jahr 2018 290.000 Tonnen chemischer Grundstoffe mit der Bahn, 40.000 hiervon aus Sachsen-Anhalt (mit den dortigen Standorten Böhlen und Schkopau) - auch hierfür dürfte ein unternehmensinternes Netzwerk (Dow) maßgeblich sein.

Tab. 8-1 Empfang von relevanten Gütern in den Seehäfen Bützfleth und Brunsbüttel im Jahr 2018 (1.000 Tonnen pro Jahr).

	Bützfleth (Stade)	Brunsbüttel
Flüssige Mineralölerzeugnisse	-	124
Gasförmige Mineralölerzeugnisse	-	165
Feste oder wachsartige Mineralölerzeugnisse	-	17
Chemische Grundstoffe, organisch	174	4

9 Petrochemisches Cluster Rotterdam

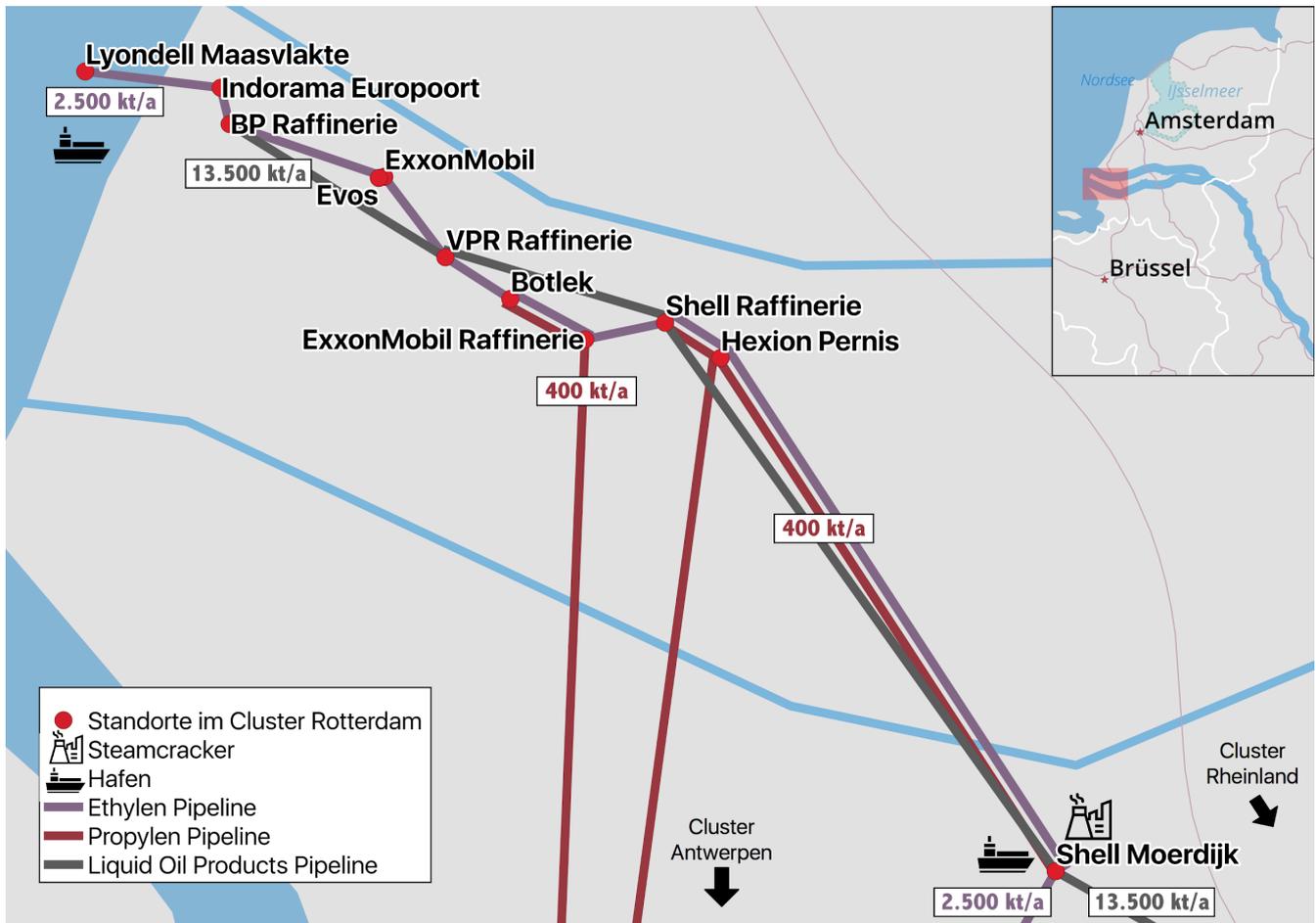


Abb. 9-1 Geographische Verortung des Clusters Rotterdam und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

9.1 Charakterisierung des Clusters

Das petrochemische Cluster Rotterdam liegt im und um den Hafen von Rotterdam in der Provinz Südholland im Westen der Niederlande. Das Hafengebiet ist aufgrund seiner Lage inmitten der großen europäischen Ballungs- und Industriezentren wie dem Ruhrgebiet, Paris und London als Distributionspunkt von hoher strategischer Bedeutung. Dieser geografische Vorteil sowie kontinuierliche Infrastrukturinvestitionen vor allem ab Mitte des 20. Jahrhunderts führten dazu, dass Rotterdam lange Zeit als der größte Seehafen der Welt galt. Einige der wichtigsten Erweiterungen in seiner Geschichte waren der um die 1960er Jahre vollzogene Bau des Europoorts, ein 3.700 Hektar großes Hafen- und Industriegebiet direkt an der Nordsee sowie der angrenzenden Maasvlakte, einer großflächigen künstlichen Insel, die als Tiefseehafen fungiert und ein Erdölterminal beherbergt. Mit dieser zusätzlichen Kapazität sowie dem parallel stattfindenden Übergang von der Kohle- zur Petrochemie siedelten sich zunehmend Öl- und Chemieunternehmen im Hafengebiet an. Ein erster Steamcracker wurde Ende der 1960er Jahre von Shell ergänzend zur bereits bestehenden Raffinerie errichtet, weitere Investitionen folgten. Anfang der siebziger Jahre wurde dann die Pipeline Rotterdam-Antwerpen fertiggestellt, welche die beiden se-

paraten Chemiecluster miteinander verband und eine effiziente Verteilung von flüssigen Massengütern ermöglichte.

Heute handelt es sich bei Rotterdam um den größten Seehafen und den zweitgrößten Chemiestandort in Europa. Auf einer Gesamtfläche von 12.700 ha sind hier unter anderem 45 Chemiewerke und vier Erdölraffinerien angesiedelt. Über ein internes Netz von insgesamt 1.500 km Pipelineverbindungen werden flüssige Rohstoffe wie Rohöl, Mineralöl- und Chemieprodukte sowie Industriegase an ihre Bestimmungsorte geliefert (Port of Rotterdam, o. J.-a). Die multimodale Natur der logistischen Infrastruktur mit dem Zugang zur offenen See, zum Rhein aber auch zu den Wasserstraßen in Richtung des europäischen Hinterlandes sowie Schienen- und Straßenverkehr als auch einem engmaschigen Pipelinennetz bietet eine kaum zu übertreffende Zugänglichkeit und stellt einen wichtigen Wettbewerbsvorteil für die angesiedelten Unternehmen dar. Als Teil des ARRA-Clusters (Antwerp-Rotterdam-Rhine-Ruhr-Area) ist Rotterdam eng mit der überregionalen Chemieindustrie in Antwerpen und im Rhein-Ruhr-Gebiet vernetzt. Wie in Abbildung 9-1 ersichtlich, sind die Standorte mit Pipelines verbunden, die einen Austausch von Rohstoffen wie Ethylen, Propylen und flüssigen Ölprodukten wie Naphtha ermöglichen.

Von den zahlreichen Unternehmen entlang der petrochemischen Wertschöpfungskette sind die folgenden Standorte für die Clusteranalysen von besonderer Relevanz:

- **BP Raffinerie:** Die 1967 in Betrieb genommene Europoort Raffinerie von BP kann rund 400.000 Barrel Rohöl pro Tag verarbeiten und stellt neben verschiedenen Kraftstoffen wesentliche Rohstoffe für die angrenzende petrochemische Industrie zur Verfügung (BP Nederland, o. J.).
- **ExxonMobil Raffinerie:** Die bereits seit 1960 bestehende Botlek Raffinerie wird von Esso betrieben und kann 180.000 Barrel Rohöl pro Tag verarbeiten. Die Raffinerie ist in einen Anlagenkomplex mit der benachbarten ExxonMobil Aromatenfabrik integriert, welche Rohstoffe aus der Raffinerie nutzt und Nebenstoffe zurückgibt (ExxonMobil, 2019a).
- **VPR Raffinerie:** Die seit 1993 bestehende Raffinerie wird heute von Vitol Processing Rotterdam (VPR) betrieben und umfasst eine Verarbeitungskapazität von 90.000 Barrel Rohöl pro Tag (VPR Energy, o. J.).
- **Shell Energy and Chemicals Park Rotterdam:** Der in Pernis gelegene Anlagenkomplex umfasst eine Raffinerie mit einer Verarbeitungskapazität von rund 400.000 Barrel Rohöl pro Tag, beherbergt jedoch auch eigene Chemiewerke zur Herstellung von Polyolen und Lösungsmitteln wie Aceton, Alkohole und Glykolether. Derzeit sind hier Anlagen zur Herstellung von Biokraftstoffen und Wasserstoff im Bau, außerdem sind Shell und ExxonMobil maßgeblich am CCS-Projekt "Porthos" beteiligt, welches CO₂ aus Raffinerien und Wasserstoffanlagen abscheiden und in geologischen Lagerstätten der Nordsee speichern soll (Port of Rotterdam, 2019).

- **Shell Chemicals Park Moerdijk:** Außerhalb von Rotterdam in Moerdijk gelegen aber aufgrund seiner engen Verflechtungen mit dem regionalen petrochemischen System Teil des vorliegenden Clusters werden hier Grundchemikalien wie Ethylen, Butadien, Propylen und Intermediäre wie Ethylenoxid, Ethylenglykole, Propylenoxid und Styrolmonomer aus Naphtha, Hydrowax, LPG und Gasöl hergestellt. Der Steamcracker verfügt über eine Ethylenkapazität von 900 kt / Jahr, was 22% der niederländischen Gesamtkapazität entspricht. Ein Großteil der benötigten Rohstoffe wird dabei über Pipelines und Schiffe von Shell Pernis angeliefert. Derzeit ist am Standort eine Wasserstoffanlage sowie ein CCU-Projekt in Planung, außerdem wird in eine Einheit zur Qualitätsverbesserung von aus Kunststoffabfällen hergestelltem Pyrolyseöl investiert (Oliveira & van Dril, 2021; Shell, 2022).
- **Botlek:** Eine Vielzahl an petrochemischen Unternehmen stellt hier ein breites Portfolio an Polymeren her. Dazu gehören Nouryon und Ducor (Polyolefine), Huntsman (Polyurethane), Shin-Etsu (PVC), Invista und Kemira (verschiedene Polymere), Lucite Rozenburg (PMMA) und Hexion (Harze).
- **ExxonMobil Chemical Aromatics Plant:** Wird seit 1963 betrieben und ist in engem Stoffverbund mit der ExxonMobil Raffinerie. Hier werden reine Aromaten wie Benzol, Orthoxylol, Paraxylol und Cyclohexan produziert, der Standort ist einer der größten Paraxylolhersteller der Welt (ExxonMobil, 2019b).
- **ExxonMobil Rotterdam Plasticizers & Intermediates Plant:** Beinhaltet eine Oxo-Alcohol Anlage in Europoort, sowie jeweils eine Phthalsäureanhydrid Anlage und eine Weichmacher Anlage in Botlek. Alle drei Standorte sind untereinander und mit der Raffinerie integriert, denn Oxo-Alkohole und Phthalsäureanhydrid sind Ausgangsstoffe für Weichmacher.
- **Hexion Pernis:** Hersteller von duroplastischen Harzen (betreibt ebenfalls einen Standort in Botlek).
- **Evos:** Betreibt Speicherinfrastruktur für Öl- und Chemieprodukte im Rotterdamer Hafen.
- **Indorama Europoort:** Betreibt eine Anlage zur Herstellung von Terephthalsäure, welche die PET-Standorte von Indorama in Europa mit Rohstoffen versorgt.
- **Lyondell Chemical Europoort:** Produzent verschiedener petrochemischer Grundstoffe und Intermediäre, per Pipeline mit Lyondell Massvlakte Standort verbunden.
- **Lyondell Maasvlakte:** Joint Venture zwischen Lyondell und Covestro, welches Propylenoxid und Styrol-Monomer herstellt.

Mit Blick auf neuartige Feedstocks siedeln sich jedoch auch zunehmend neue Player an. So will beispielsweise Xycle, ein Joint Venture von NoWit, Patpert Teknow Systems und Vopak, eine Anlage zum chemischen Recycling von 20.000 Tonnen Kunststoffabfall im Hafen von Rotterdam errichten. UPM plant derzeit den Bau einer eigenen Bioraffinerie im Hafengebiet, weitere Akteure wie Shell und Gidara Energy treiben ebenfalls Projekte mit Fokus auf Biokraftstoffen voran (Port of Rotterdam, o. J.-b).

9.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

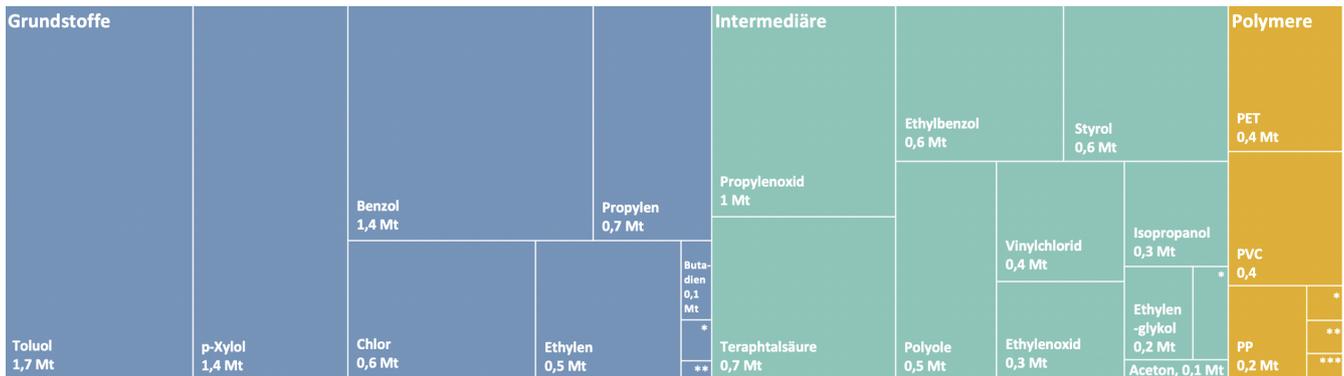


Abb. 9-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Rotterdam für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Grundstoffe: * H₂ <0,1 Mt,, **Xylol <0,1 Mt

Intermediäre: * Ethylendichlorid 0,1 Mt

Polymere: *PBR <0,1 Mt, **ABS <0,1 Mt, ***PMMA <0,1 Mt

Abbildung 9-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Clusters Rotterdam überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen im Cluster, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen. Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl insbesondere organischer Grundstoffe. Die Produktion der Aromaten Toluol, p-Xylol und Benzol dominiert hier deutlich, bedingt durch das große Aromatenwerk von ExxonMobil. Die Olefine Ethylen und Propylen stellen ebenfalls wichtige Bausteine für nachfolgende Produkte dar. Diese werden überwiegend im Steamcracker von Shell hergestellt, welcher eine Verarbeitungskapazität von rund 2.900 kt Naphtha/Jahr hat, Propylen wird jedoch auch via Fluid Catalytic Cracking (FCC) bereitgestellt. Auch Chlor wird in Rotterdam zu signifikanten Mengen produziert und dient unter anderem als Basis für die anschließende Vinylchlorid- bzw. PVC-Herstellung. Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für eine Vielzahl von Intermediären, insbesondere Propylenoxid, Terephthalsäure, Ethylbenzol, Styrol, Polyole, Vinylchlorid, Ethylenoxid, Isopropanol, und Ethylenglykol. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich verschiedene Polymere hergestellt, mengenmäßig bedeutsam vor allem Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylchlorid (PVC) und Polypropylen (PP) sowie in kleineren Quantitäten Polybutadien (PBR), Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) und Polymethylmethacrylat (PMMA).

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 9-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der Polymerproduktion im Cluster Rotterdam detaillierter auf. Wie schon zuvor, basieren alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Auffallend ist zunächst, wie gering der Anteil von Steamcracker-basierten Produkten im Vergleich zu anderen Clustern ist. Dies liegt zweifelsohne an der großen Anzahl von Raffineriebetrieben im Hafengebiet, welche die Rohstoffbasis für die umfangreiche Aromatenproduktion stellen. Sehr große Mengen dieser BTX werden jedoch nicht innerhalb des Polymersystems in Rotterdam weiterverarbeitet, sondern fließen in andere Bereiche wie den Kraftstoffsektor und den Weiterverkauf an externe Kunden. P-Xylol stellt im Cluster jedoch eine wichtige Grundlage für die Weiterverarbeitung zu Terephthalsäure und nachfolgend PET, Benzol wiederum für Styrol, welches jedoch im Cluster nicht zu Polystyrol weiterverarbeitet wird. Das mithilfe des von Shell betriebenen Steamcrackers (aber zusätzlich auch via FCC-Prozess) hergestellte Propylen fließt größtenteils in die Verarbeitung zu Propylenoxid und die anschließende Polyol-Produktion, hingegen nur zu geringen Teilen in die Herstellung von Polypropylen. Ethylen fließt etwa hälftig in die Ethylenoxid- bzw. Ethylenglykol- und anschließende PET-Herstellung sowie in die Produktion von Ethylbenzol bzw. nachfolgend Styrol.

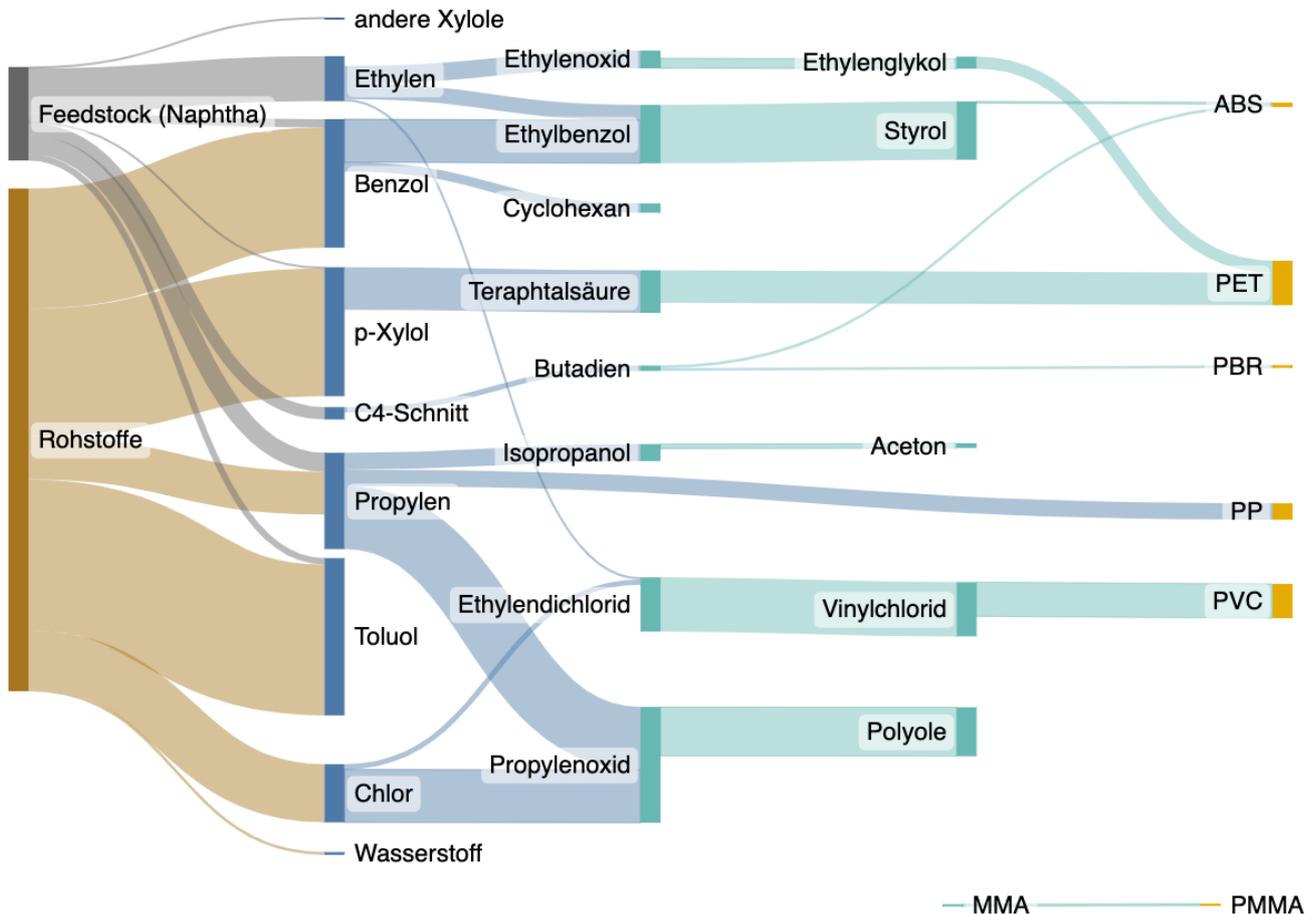


Abb. 9-3 Sankey-Diagramm zur Produktion innerhalb des Clusters Rheinland. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina und -Prozessketten basieren auf eigenen Modellergebnissen und sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Die Ausgangsbasis "Rohstoffe" ist hier als Sammelbegriff für Inputstoffe wie Rohöl, Erdgas, Biomasse, Salze etc. zu verstehen, die sich von dem Feedstock Naphtha abgrenzen.

10 Petrochemisches Cluster Antwerpen

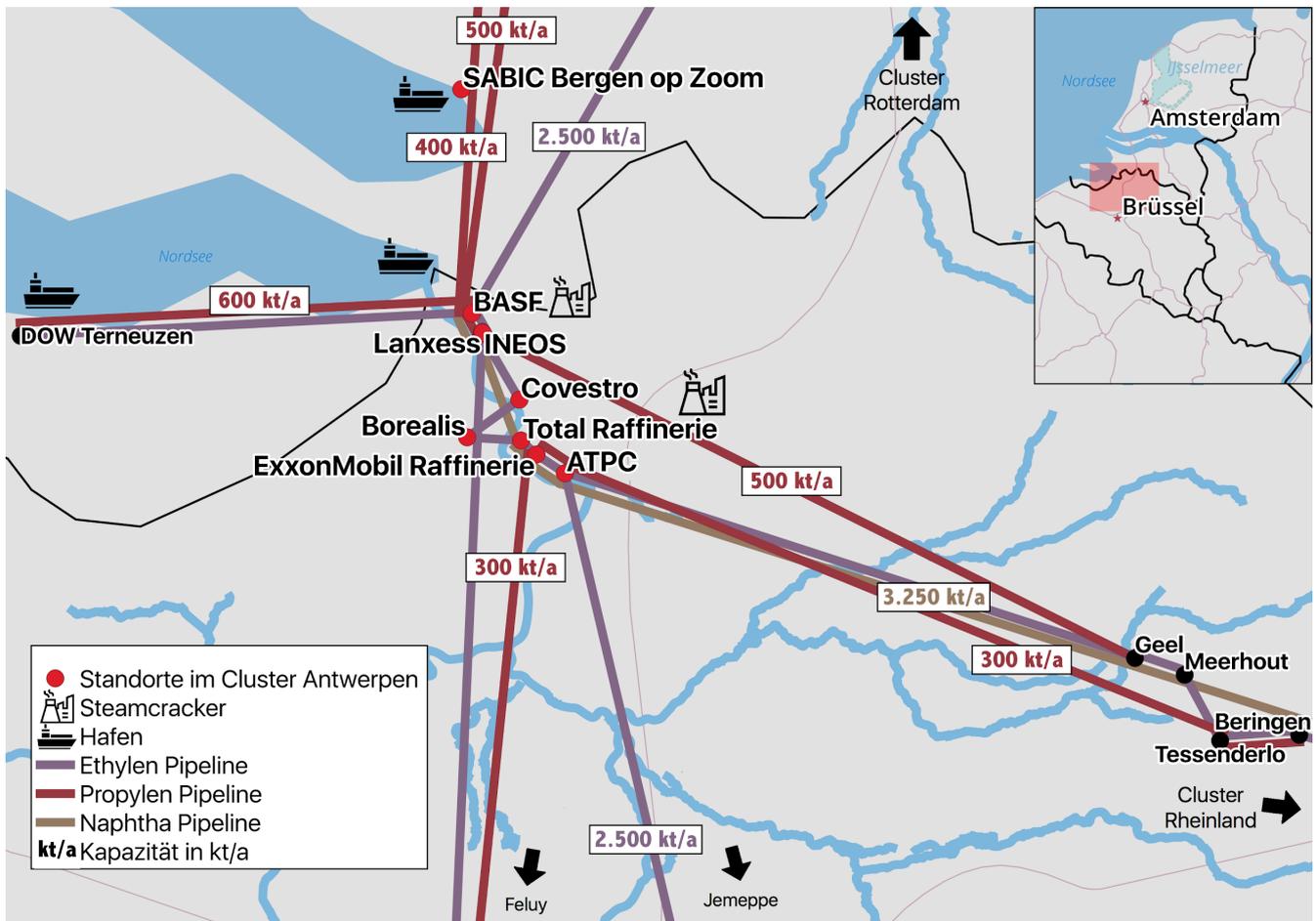


Abb. 10-1 Geographische Verortung des Clusters Antwerpen und der zugehörigen Standorte sowie seiner infrastrukturellen Vernetzung und Anbindung an andere Regionen. Quelle: Eigene Darstellung (Wuppertal Institut, 2022).

10.1 Charakterisierung des Clusters

Der Hafen von Antwerpen gilt als größter Chemiestandort in Europa und als zweitgrößter weltweit. Das gesamte Cluster zeichnet sich durch ein hohes Maß an Integration und Diversität über die gesamte chemische Wertschöpfungskette inklusive der zugehörigen Logistik aus. Neben der Anbindung an den internationalen Seeverkehr bildet ein engmaschiges Pipelinesystem von 1000 km Gesamtlänge im Hafen ein zentrales Drehkreuz für den Transport von Roh- und Grundstoffen der europäischen Petrochemie (Port of Antwerp, o. J.).

Historisch siedelten sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit dem Aufkommen der Kohlechemie zunehmend Chemieunternehmen an der Maas, am Brüssel-Schelde Kanal und an den Wasserstraßen bei Antwerpen an. Mit dem Übergang zur Petrochemie wurde im Jahr 1964 von Petrofina ein erster Steamcracker in Antwerpen errichtet, eine Raffinerie bestand bereits am Standort (Meijering & van Leeuwen, 2021). Heute ist Antwerpen der führende Polymer Hub in Europa. Wie in Abbildung 10-1 ersichtlich, sind sowohl die einzelnen Produktionsstandorte im Hafengebiet von Antwerpen als auch jene der umliegenden Peripherie über Ethylen-, Propylen- und Naphtha-Pipelines eng miteinander vernetzt. Doch auch überregional ist Antwerpen

als Teil des ARRA-Clusters infrastrukturell hervorragend angebunden. Hier ist vor allem die ARG Ethylen Pipeline zu nennen, welche Antwerpen mit den Chemieregionen Rotterdam, Chemelot, Rheinland und Ruhrgebiet verbindet, sowie eine Propylen Pipeline in den Hafen von Rotterdam (der ein eigenes petrochemisches Cluster darstellt).

Auf einer Fläche von 1.500 ha sind im Hafengebiet von Antwerpen zwei Erdölraffinerien, drei Steamcracker und rund 30 große Unternehmen aus dem Öl- und Chemiesektor angesiedelt, insbesondere (Flanders Investment & Trade, o. J.):

- **Lanxess:** Betreibt 4 Werke in Antwerpen, produziert unter anderem Caprolactam, Glasfasern, Kautschukchemikalien und Polyamid 6
- **INEOS:** Produziert in unterschiedlichen Werken Ethylendichlorid, Styrol, Polystyrol, Polypropylen und Polyethylen sowie biobasierte Olefine und Polyolefine
- **Borealis:** Produziert Polypropylen und ethylenbasierte Polymere sowie Spezialkunststoffe, betreibt zudem eine Dehydrierungseinheit zur Umwandlung von Propan in Propylen
- **Covestro:** Produziert insbesondere Polycarbonate und Zwischenprodukte für die Herstellung von Polyurethanen sowie Additive
- **ExxonMobil:** Betreibt eine Erdölraffinerie zur Herstellung verschiedener Kraftstoffe und Feedstocks auf Basis von über die Rotterdam-Antwerpen-Pipeline angeliefertem Rohöl.
- **Total:** Betreibt ebenfalls eine Erdölraffinerie sowie Anlagen der Petrochemie mit zwei Steamcrackern (Produktionskapazität 1,1 mio t Ethylen / Jahr), vor Ort werden Olefine, Aromaten und Polyethylen hergestellt (TotalEnergies, o. J.).
- **BASF:** Produziert vor Ort verschiedene Grund- und Zwischenstoffe, insbesondere Ethylenoxid, Propylenoxid, Caprolactam, MDI und Polyole, sowie Kunststoffgranulate, betreibt Europas größten Steamcracker und unterhält einen eigenen Hafen für die Anlieferung von Rohstoffen
- **ATPC:** Früherer Standort einer Bitumen Raffinerie (Hedvat & Balf, 2021), heute Betreiber von Terminals für Kohlenwasserstoff-Feedstocks sowie Zwischen- und Endprodukte der petrochemischen Industrie
- **Gunvor:** Betrieb früher eine eigene Erdölraffinerie, konzentriert sich heute auf Handling und Lagerung verschiedener Raffinerieprodukte
- **SABIC:** In Bergen op Zoom werden verschiedene Kunststoffgranulate hergestellt, der Standort unterhält einen eigenen Hafen für die Anlieferung von Rohstoffen. Wenngleich geografisch in den Niederlanden verortet, liegt der Standort doch im unmittelbaren Einzugsgebiet des Wirtschaftsraums Antwerpen und wird daher für die weiteren Analysen auch zum vorliegenden petrochemischen Cluster gezählt.

Viele weitere Unternehmen haben sich in angrenzenden Bereichen wie dem Handling, der Verpackung oder auch der Lagerung von Kunststoffgranulaten spezialisiert, wofür allein im Hafengebiet mehr als 1.300 Silos zur Verfügung stehen (Port of Antwerp, o. J.). Auch im Umland von Antwerpen befinden sich wichtige Player aus dem Öl- und Chemiesektor, welche aufgrund der räumlichen Entfernung nicht mehr zum Cluster im engeren Sinne gezählt, wegen ihrer Bedeutung für die Chemieregion als auch ihrer engen infrastrukturellen Verzahnung im Folgenden kurz charakterisiert werden. Im westlich des Hafens gelegenen Terneuzen unterhält DOW sein

zweitgrößtes Werk überhaupt, an dem mithilfe von drei Steamcrackern die gesamte Polymerwertschöpfungskette abgedeckt wird. Terneuzen gilt dabei als einer der größten Polyurethanstandorte weltweit. Im südöstlich von Antwerpen gelegenen Geel produziert INEOS Polypropylen und auch die früher zu BP gehörenden Aromaten- und Acetylwerke wurden 2020 übernommen. Damit ist INEOS Geel einer der bedeutsamsten Standorte zur Herstellung von reiner Terephthalsäure in Europa (Energy Industry Review, 2020; Ineos Aromatics, o. J.). Im benachbarten Meerhout betreibt ExxonMobil die größte LDPE-Produktion in Europa (ExxonMobil, o. J.), im nahegelegenen Tessenderlo stellt Vynova Ethylendichlorid und Vinylchloridmonomere als PVC-Bausteine her und in Beringen unterhält Borealis zwei Polypropylenanlagen. Im südlich gelegenen Jemeppe stellt INEOS insbesondere anorganische Grundstoffe her und verarbeitet diese mithilfe von Ethylen aus Antwerpen zu PVC, in Feluy betreibt Total eines der größten Kunststoffwerke in Europa und wandelt dort aus Antwerpen bezogene Olefine zu Polypropylen, Polyethylen und expandierbarem Polystyrol um.

10.2 Produktion und Verarbeitung innerhalb des Clusters

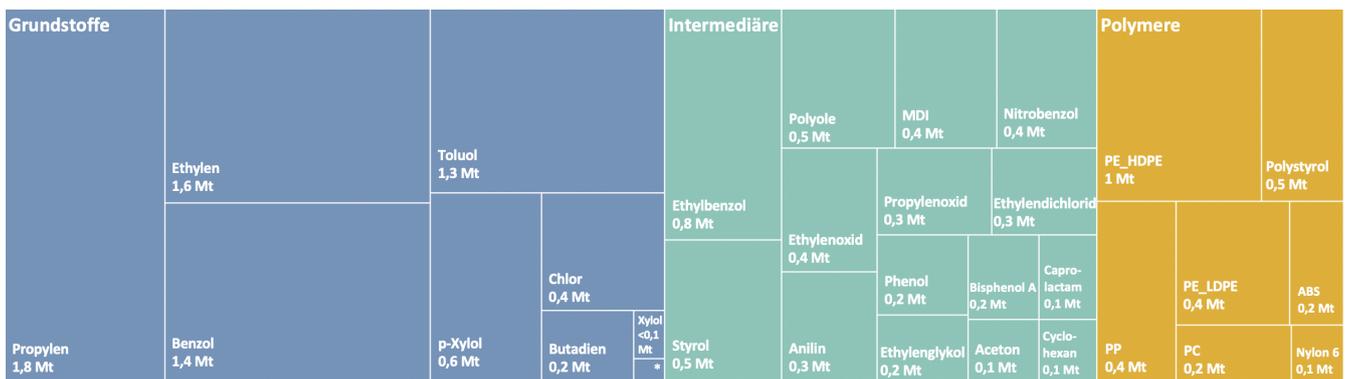


Abb. 10-2 Produktion relevanter Stoffe in der Polymer-Wertschöpfungskette im Cluster Antwerpen für das Jahr 2018. Alle hier dargestellten Produktionsvolumina basieren auf eigenen Modellierungsergebnissen und sind daher mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.
*H2 <0,1 Mt

Abbildung 10-2 stellt die Polymerproduktion und die vorausgehende Verarbeitung hierfür relevanter Vor- und Zwischenprodukte an den Standorten innerhalb des Clusters Antwerpen überblicksartig dar. Die Flächen der Rechtecke entsprechen jeweils den jährlichen Produktions- bzw. Verarbeitungsmengen im Cluster, welche aus eigenen Modellergebnissen hervorgehen. Die Ausgangsbasis für den Polymer-Metabolismus bildet zunächst eine Vielzahl insbesondere organischer Grundstoffe. Die Propylenproduktion dominiert an dieser Stelle, dicht gefolgt von Ethylen, Benzol und Toluol. Die Olefine werden einerseits mithilfe mehrerer Naphta-Steamcracker hergestellt, gerade für die Herstellung von Propylen ist aber auch Fluid Catalytic Cracking (FCC) von großer Bedeutung. Für die Bereitstellung der Aromaten kommen Destillations- und Extraktionsverfahren zum Einsatz. P-Xylol und Chlor werden an den Standorten ebenfalls in relevanten Mengen hergestellt, Butylen, Butadien, C4-Schnitt, Xylol und Wasserstoff spielen lediglich untergeordnete Rollen. Die verschiedenen Grundstoffe bilden die Basis für eine Vielzahl von Intermediären, insbesondere Ethylbenzol, Styrol, Polyole, MDI, Ethylenoxid und Nitrobenzol. Mithilfe dieser werden vor Ort schlussendlich eine große Bandbreite an Polymeren hergestellt, na-

mentlich Polyethylen hoher und niedriger Dichte (PE_HDPE bzw. PE_LDPE), Polystyrol (PS), Polypropylen (PP), Polycarbonat (PC), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Nylon 6.

Das nachfolgende Sankey-Diagramm in Abbildung 10-3 schlüsselt die Stoffflüsse und Verzweigungen der oben beschriebenen Polymerproduktion im Cluster Antwerpen detaillierter auf. Auch hier basieren alle dargestellten Produktionsvolumina, Flüsse und Prozessketten auf eigenen Modellergebnissen und sind indikativ zu werten. Ein Knotenpunkt ohne vorangehenden oder nur teilweise abdeckenden Fluss weist auf Produktbezüge von außerhalb des Clusters hin. Folgt hingegen auf einen Knotenpunkt kein (vollständiger) Fluss in einen Folgeprozess, so deutet dies auf Exporte hin. Diese können prinzipiell an andere Standorte geliefert, direkt an Kunden verkauft oder auch für Prozesse außerhalb des Polymersystems verwendet werden.

Das Sankey-Diagramm verdeutlicht noch einmal, wie umfassend und integriert das Polymersystem am größten Chemiestandort Europas ist. Auffallend ist zunächst, dass große Mengen Olefine wie auch Aromaten am Standort nicht zu Polymeren weiterverarbeitet, sondern an externe Kunden veräußert werden. Propylen, welches als Basis für die Produktion von Polypropylen sowie über die Intermediäre Propylenoxid und Phenol in die Herstellung von Polyolen und Polycarbonat fließt, wird zu weniger als 50 % im Cluster verarbeitet. Die resultierenden Überschüsse könnten über das bestehende Pipelinenetz an andere petrochemische Standorte, wie Rotterdam oder das Ruhrgebiet geliefert werden. Gleiches gilt für Toluol, p-Xylol, Butylen und Xylol, welche vor Ort - trotz zum Teil erheblicher Produktionsmengen - nicht für die Polymerherstellung genutzt werden. Ethylen hingegen wird zu geringen Teilen auch von außerhalb bezogen, um die nachfolgende Produktion verschiedener Intermediäre und Polymere sicherzustellen. Fast alle Zwischenprodukte werden unmittelbar vor Ort weiterverarbeitet, die wenigen Ausnahmen sind MDI, Ethylenglykol und Ethylendichlorid.

11 Literaturverzeichnis

- BASF SE. (o. J.-a). *Der Standort*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/locations/europe/german-sites/ludwigshafen/the-site.html>
- BASF SE. (o. J.-b). *BASF-Bericht 2021*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von https://bericht.basf.com/2021/de/_assets/downloads/entire-basf-gb21.pdf
- BASF SE. (o. J.-c). *Antworten der BASF zum CDP-Fragebogen Klimawandel 2022*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von https://www.basf.com/global/documents/en/investor-relations/sustainable-investments/sustainability-ratings-and-rankings/BASF-SE_CDP_Climate_Change_Questionnaire_2022.pdf
- BASF SE. (o. J.-d). *Produkte aus Ludwigshafen*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/locations/europe/german-sites/ludwigshafen/production/the-production-verbund/Produkte.html>
- BASF SE. (o. J.-e). *Transport & Logistik*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/locations/europe/german-sites/ludwigshafen/production/transport-and-logistics.html>
- BASF SE. (o. J.-f). *Biomassenbilanz-Verfahren*. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/biomass-balance/biomass-balance.html>
- BASF SE. (2019, 07. Oktober). *BASF invests in Quantafuel to jointly drive chemical recycling of mixed plastic waste*. Sustainability News. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2019/basf-invests-in-quantafuel.html>
- BASF SE. (2021, 21. Januar). *BASF stellt innovatives Tankschiff für Rhein-Niedrigwasser vor*. Presse & News. Abgerufen am 06. Dezember 2022 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/locations/europe/german-sites/ludwigshafen/the-site/news-and-media/news-releases/2021/01/p-21-110.html>
- BASF SE. (2022, 01. September). *BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces*. Business & Financial News. <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>
- Bechlarz, D. (2021, 05. November). *EPS-Verpackungen auf Basis chemisch recycelter Kunststoffabfälle*. PLASTVERARBEITER. <https://www.plastverarbeiter.de/roh-und-zusatzstoffe/eps-verpackungen-auf-basis-chemisch-recycelter-kunststoffabfaelle-795.html>
- BP Nederland. (o. J.). *Bp raffinaderij | Wie wij zijn | Home*. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.bp.com/nl_nl/netherlands/home/wie-wij-zijn/bp-raffinaderij.html
- Carl, S. (2019, Juli 13). *Ein Platz in der Nische*. ChemCoastPark Brunsbüttel. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.chemcoastpark.de/media/companies/180807_Zeitungsreihe_Raffinerie_Heide.pdf
- CeChemNet. (o. J.). *CeChemNet Partner*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.cechemnet.com/partner>
- CHEManager. (2011, August 30). *Mitteldeutsche Chemieparke als „Knowledge Sites“*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.chemanager-online.com/news/mitteldeutsche-chemieparke-als-knowledge-sites>
- ChemCoast Park Brunsbüttel. (o. J.). *Unternehmen | ChemCoast Park Brunsbüttel*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.chemcoastpark.de/de/unternehmen/>
- ChemCologne e.V. (2016). *Willkommen in Europas stärkster Chemie-Region*. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.chemcologne.de/fileadmin/user_upload/CCC/Dokumente/ChemCologne_Imagebrochure_2016.pdf

- ChemDelta Bavaria. (o. J.-a). *Die Standorte*. ChemDelta Bavaria. Abgerufen 11. November 2022, von <https://chemdelta-bavaria.de/chemdelta-bavaria/standorte/>
- ChemDelta Bavaria. (o. J.-b). *High Tech mit Tradition*. ChemDelta Bavaria. Abgerufen 11. November 2022, von <https://chemdelta-bavaria.de/chemdelta-bavaria/geschichte-der-region/>
- Chemie Rheinland e.V. (o. J.). *Die Chemie Region*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.chemierheinland.de/die-chemie-region>
- CHEMIE TECHNIK. (o. J.). *Shell investiert in chemisches Recycling von Kunststoffabfällen*. CHEMIE TECHNIK. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.chemietechnik.de/markt/shell-investiert-in-chemisches-recycling-von-kunststoffabfaellen-338.html>
- Covestro. (o. J.). *Neuer MDI-Betrieb startet Produktion*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.covestro.com/press/de/neuer-mdi-betrieb-startet-produktion/>
- Covestro. (2020, Oktober 20). *Covestro erhält erste Lieferung von zertifiziert erneuerbarem Phenol für Polycarbonate von Borealis*. Newsroom Covestro. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.covestro.com/press/de/covestro-erhaelt-erste-lieferung-von-zertifiziert-erneuerbarem-phenol-fuer-polycarbonate-von-borealis/>
- Covestro. (2021, März 25). *Closing the loop for polyurethane mattresses*. Newsroom Covestro. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.covestro.com/press/de/den-zyklus-fuer-polyurethan-matratzen-schliessen-trade/>
- Currenta. (o. J.). *CHEMPARK Krefeld-Uerdingen*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.chempark.de/de/chempark-krefeld-uerdingen.html>
- DOW. (o. J.). *Werk Stade: Zahlen, Daten und Fakten*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://de.dow.com/content/dam/corp/documents/location/903-029-03-stade-plant-numbers-dates-and-facts.pdf>
- Energy Industry Review. (2020, Juni 29). *BP to Sell Global Aromatics & Acetyls Business to INEOS*. Energy Industry Review. Abgerufen 11. November 2022, von <https://energyindustryreview.com/marketplace/bp-to-sell-global-aromatics-acetyls-business-to-ineos/>
- Equipolymers. (o. J.). *VIRIDIS 25*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.equipolymers.com/EN/Virdis?PageID=20>
- European Union. (2022). *EUROPA - Environment—Kyoto Protocol—European Union Transaction Log*. <https://ec.europa.eu/clima/ets/ExxonMobil>. (o. J.). *Meerhout polymers plant | ExxonMobil Benelux*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.exxonmobil.be/en-be/Company/Locations/Belgium/Meerhout-polymers-plant>
- Evonik. (o. J.). *Chemiepark Marl—Evonik Industries*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://corporate.evonik.com/de/unternehmen/standorte/europa/deutschland/marl>
- Evonik. (2019). *Die neue Formel C4*. Evonik Elements. Abgerufen 11. November 2022, von https://elements.evonik.com/wp-content/uploads/2018/06/EVMAG_Die-neue-C4-Formel_EN.pdf
- ExxonMobil. (2019a, Juli 21). *Rotterdam refinery | ExxonMobil Benelux*. ExxonMobil. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.exxonmobil.be:443/en-be/company/locations/netherlands/rotterdam-refinery>
- ExxonMobil. (2019b, Juli 21). *Rotterdam Aromatics Plant | ExxonMobil Benelux*. ExxonMobil. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.exxonmobil.be:443/en-be/company/locations/netherlands/rotterdam-aromatics-plant>
- Ineos Aromatics. (o. J.). *Sites | INEOS Aromatics*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.ineos.com/businesses/ineos-aromatics/sites/>
- Ineos Phenol. (o. J.). *INEOS @ Gladbeck*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.ineosphenol-gladbeck.de/unternehmen/infos>
- InfraLeuna. (o. J.). *Stoffverbund—Infraleuna*. Abgerufen 11. November 2022, von

- <https://www.infraleuna.de/standort-leuna/stoffverbund>
- Flanders Investment & Trade. (o. J.). *Petrochemie in Flandern*. Invest In Flanders. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.flandersinvestmentandtrade.com/invest/de/branchen/chemieindustrie/petrochemie>
- Hedvat, K., & Balf, S. (2021, Oktober 19). *VTTI to close Antwerp bitumen-producing refinery*. Argus Media. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.argusmedia.com/en/news/2265082-vtti-to-close-antwerp-bitumenproducing-refinery>
- KunststoffWeb. (2019, November 28). *Trinseo: PC-Erzeugung Stade wird nun doch neu strukturiert*. KunststoffWeb. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/trinseo_pc-erzeugung_stade_wird_nun_doch_neu_strukturiert_t243889
- Kraffahrt-Bundesamt. (2022). *Gütertransporte europäischer Fahrzeuge*. Abgerufen am 11. November 2022, von https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Kraftverkehr/VE6/ve6_2020.xlsx?__blob=publicationFile&v=9
- Landesportal Sachsen-Anhalt. (2022, Mai 5). *Wünsch: „Leuna wird zum Kraftzentrum einer zukunftsfähigen Wasserstoffwirtschaft“*. Landesportal Sachsen-Anhalt. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.sachsen-anhalt.de/bs/pressemitteilungen/?no_cache=1
- Meijering, J., & van Leeuwen, J. (2021). *The Dynamic Development of Organic Chemistry in North-West Europe*. Clingendael International Energy Programme (CIEP). Den Haag, 2021.
- Menzel, N. (2021, Dezember 15). *BASF nutzt recyceltes Styropor für Fisch-Transportbox*. PLAST-VERARBEITER. <https://www.plastverarbeiter.de/markt/basf-nutzt-recyceltes-styropor-fuer-fisch-transportbox-204.html>
- Metropolregion Hamburg. (o. J.). *Chemische-Industrie in der Metropolregion Hamburg*. Metropolregion Hamburg. Abgerufen 11. November 2022, von <https://metropolregion.hamburg.de/chemie/>
- Oliveira, C., & van Dril, T. (2021). *Decarbonisation options for Large Volume Organic Chemicals production, SABIC Geleen*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Abgerufen 11. November 2022, von https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2021-decarbonisation-options-for-large-volume-organic-chemicals-production-sabic-geleen_3718.pdf
- OMV. (o. J.). *Raffinerie Burghausen | OMV.de*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.omv.de/de-de/ueber-omv/omv-in-deutschland/raffinerie-burghausen>
- OMV. (2021). *Geschäftsbericht 2020*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://reports.omv.com/de/geschaeftsbericht/2020/serviceseiten/downloads/files/entire-omv-ar20.pdf>
- OMV. (2022, Mai 2). *OMV erhält ISCC PLUS-Zertifizierung für die Produktion von erneuerbaren Chemikalien in der Raffinerie Burghausen*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.omv.com/de/news/220502-omv-erhaelt-iscs-plus-zertifizierung-fuer-die-produktion-von-erneuerbaren-chemikalien-in-der-raffinerie-burghausen>
- Ostsee-Zeitung. (o. J.). *EU verhängt Einlaufverbot für russische Schiffe: So treffen die Sanktionen die Häfen in MV*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.ostsee-zeitung.de/mecklenburg-vorpommern/eu-verhaengt-einlaufverbot-fuer-russische-schiffe-so-treffen-die-sanktionen-die-haefen-in-mv-FVWTRGYUHJS2TYZFYCIFKWABXQ.html>
- Packaging Journal. (2019, Juni 21). *Kunststoff aus altem Öl und Reststoffen soll zu Lebensmittelverpackungen werden*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://packaging-journal.de/neste-und-lyondellbasell-entwckeln-biobasierte-kunststoffe-fuer-lebensmittelverpackungen/>
- Petrochemicals Europe. (o. J.). *Cracker Capacity—Petrochemicals Europe—Cracker Capacity*. *Petrochemicals Europe*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/petrochemicals-facts-and-figures/cracker-capacity/>
- Port of Antwerp. (o. J.). *Chemicals | Port of Antwerp-Bruges*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.portofantwerpbruges.com/en/business/industry/chemicals>

- Port of Rotterdam. (o. J.-a). *Welcome to the port of Rotterdam*. Port of Rotterdam. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.portofrotterdam.com/en>
- Port of Rotterdam. (o. J.-b). *Ongoing projects*. Port of Rotterdam. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/ongoing-projects>
- Port of Rotterdam. (2019, Dezember 2). *CCS-Projekt Porthos einen Schritt weiter*. Port of Rotterdam. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/ccs-projekt-porthos-einen-schritt-weiter>
- PROCESS. (o. J.). *Die 10 größten Chemiestandorte und -parks in Europa*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.process.vogel.de/die-10-groessten-chemiestandorte-und-parks-in-europa-gal-9004/?p=2>
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut. (2020). *Klimaneutrales Deutschland*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität
- Raffinerie Heide. (o. J.-a). *Facts und Historie*. Raffinerie Heide. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.heiderefinery.com/ueber-uns/facts-und-historie>
- Raffinerie Heide. (o. J.-b). *Über uns*. Raffinerie Heide. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.heiderefinery.com/ueber-uns>
- Raffinerie Heide. (o. J.-c). *Produktionsanlagen und Anlagenverfügbarkeit*. Raffinerie Heide. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.heiderefinery.com/produkte/produktionsanlagen-und-anlagenverfuegbarkeit>
- Regiochemie. (o. J.). *Historie: Am Anfang war die Kohle*. Regiochemie. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.regiochemie.de/chemieregion/historie>
- Rempe, U. (2013, August 25). *Der Cracker von Dow in Böhlen liefert Rohstoffe für die mitteldeutsche Kunststoff-Industrie*. aktiv. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.aktiv-online.de/news/der-cracker-von-dow-in-boehlen-liefert-rohstoffe-fuer-die-mitteldeutsche-kunststoff-industrie-122>
- RITTEC Umwelttechnik. (2022, April 26). *PET-Hersteller Equipolymers bewegt sich mit neuer Rittec-Technologie weiter in Richtung Circular Economy*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/rittec-umwelttechnik-gmbh-lneburg/PET-Hersteller-Equipolymers-bewegt-sich-mit-neuer-Rittec-Technologie-weiter-in-Richtung-Circular-Economy/boxid/110945>
- SABIC. (o. J.-a). *Gelsenkirchen—Standortprofil*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://sabic-gelsenkirchen.de/de/wir-uber-uns/standortprofil>
- SABIC. (o. J.-b). *SABIC Circular Economy | TRUCIRCLE™ Portfolio*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://ff.sabic.eu/de/sustainability/trucircle-portfolio>
- SABIC. (o. J.-c). *TRUCIRCLE™ Häufige Fragen & Antworten*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://ff.sabic.eu/de/sustainability/trucircle-portfolio/trucircle-faq>
- Shell. (2022, Juli 13). *Shell Chemicals Park Moerdijk accelerates transition to become net zero emissions and produce more sustainable chemicals*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.shell.com/business-customers/chemicals/media-releases/2022-media-releases/shell-chemicals-park-moerdijk-accelerates-transition-to-become-net-zero-emissions-and-more-sustainable-chemicals.html>
- Shell Energy and Chemicals Park Rheinland. (o. J.). *Shell Energy and Chemicals Park Rheinland | Shell DE | Shell in Deutschland | Offizielle Website*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.shell.de/ueber-uns/standorte/rheinland.html>
- Solvay. (o. J.). *Rheinberg*. Solvay Deutschland. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.solvay.de/standorte/rheinberg>
- Stark, A. (2021, 22. April). *BASF, Quantafuel und Remondis kündigen Zusammenarbeit bei chemischem Recycling von Kunststoffabfällen an*. PROCESS. <https://www.process.vogel.de/basf-quantafuel-und-remondis-kuendigen-zusammenarbeit-bei-chemischem-recycling-von-kunststoffabfaellen-an-a-1017871/?cft=rel>

- TotalEnergies. (o. J.). *Antwerp: TotalEnergies' largest integrated complex in Europe*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://totalenergies.com/energy-expertise/projects/refining-petrochemical-platform/antwerp-total-s-largest-integrated-complex-in-europe>
- UPM Biochemicals. (o. J.). *Bioraffinerie Leuna*. Bioraffinerie Leuna | UPM Biochemicals. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.upmbiochemicals.com/de/uber-upm-biochemicals/bioraffinerie-leuna/>
- VCI. (2022). *Chemiewirtschaft in Zahlen*. Verband der Chemischen Industrie e.V. Abgerufen am 13. Januar 2023, von <https://www.vci.de/langfassungen/langfassungen-pdf/transport-von-chemikalien-in-der-chemischen-industrie-statistik.pdf>
- Vestolit. (o. J.). *Europe—Marl – Vestolit.com*. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.vestolit.com/about-us-2/region-sites/europe-marl/>
- VPR Energy. (o. J.). *About us*. VPR Energy. Abgerufen 11. November 2022, von <https://www.vprenergy.com/>
- Wuppertal Institut. (2022). *Ergebnisse aus eigenem WISEE-edm-I-Modell*.

12 Anhang

Anmerkung: Produktionskapazitäten für Steamcracker-Produkte sind in den nachfolgenden Tabellen nicht dargestellt, da dieser Teil der Verarbeitungskapazität der Steamcracker sind. Mit * gekennzeichnete Produkte in den nachfolgenden Tabellen entstammen alternativen Technologien, in der Regel Extraktionsverfahren.

Tab. 12-1 Technologiekapazitäten im Cluster Bayerisches Chemiedreieck

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Steamcracker	1,3 Mt (Naphtha & LPG)	Atmosphärische Destillation	3,7 Mt Rohöl

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
Butadien	0,1 Mt	PP	0,6 Mt
Chlor	2,3 Mt	PVC	0,4 Mt
Ethylendichlorid	0,4 Mt	Vinylchlorid	0,3 Mt
Ethylenoxid	0,2 Mt		

Tab. 12-2 Technologiekapazitäten im Cluster BASF Ludwigshafen

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Steamcracker	1,8 Mt (Naphtha & LPG)

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
ABS	0,1 Mt	Formaldehyd	0,7 Mt
Adipinsäure	0,3 Mt	Methanol	<0,1 Mt
Ammoniak	0,9 Mt	MMA ¹³	0,3 Mt
Benzol*	0,3 Mt	Salpetersäure	1,0 Mt
Butadien	0,1 Mt	Nylon 6	0,2 Mt
Caprolactam	0,2 Mt	Polystyrol	0,1 Mt
Chlor	0,7 Mt	Propylen	0,4 Mt
Cyclohexan	0,1 Mt	Propylenoxid	0,1 Mt
Ethylbenzol	0,6 Mt	Styrol	0,6 Mt
Ethylen	0,6 Mt	TDI	0,3 Mt
Ethylenglykol	0,0 Mt	Toluol	0,1 Mt
Ethylenoxid	0,3 Mt		
EPS	0,3 Mt		

¹³ Die MMA-Produktion findet überwiegend in Worms statt. Die Verteilung der Anlagenkapazität zwischen den verschiedenen Standorten konnte im Rahmen der Analyse nicht abschließend geklärt werden.

Tab. 12-3 Technologiekapazitäten im Cluster Rheinland

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Atmosphärische Destillation	18 Mt Rohöl	Steamcracker	7,3 Mt (Naphtha & LPG)
Fluid Catalytic Cracking	1 Mt FCC feed (schweres Gasöl)		

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
ABS	0.2 Mt	Polyethylen HDPE	0.9 Mt
Acrylonitril	0.3 Mt	Polyethylen LDPE	0.8 Mt
Ammoniak	0.3 Mt	Polyethylen LLDPE	0.2 Mt
Benzol*	1.0 Mt	Polyole	0.3 Mt
Butadien	0.5 Mt	Polypropylen	0.8 Mt
Chlor	1.3 Mt	Polyvinylchlorid	0.4 Mt
Ethylendichlorid	0.7 Mt	Propylenoxide	0.2 Mt
Ethylenglykol	0.2 Mt	Salpetersäure	0.5 Mt
Ethylenoxid	0.3 Mt	TDI	0.3 Mt
o-xylol	0.1 Mt	Toluol*	0.4 Mt
p-xylol	0.1 Mt	Vinylchlorid Monomer	0.4 Mt
Polybutadien Gummi	0.1 Mt		

Tab. 12-4 Technologiekapazitäten im Cluster Emscher-Lippe

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Atmosphärische Destillation	12,8 Mt Rohöl	Steamcracker	3 Mt (Naphtha, LPG, Gasöl)
Fluid Catalytic Cracking	1,5 Mt FCC feed (schweres Gasöl)		

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
Aceton	0,4 Mt	Ethylenoxid	0,2 Mt
Adipinsäure	< 0,1 Mt	expandiertes Polystyrol EPS	0,1 Mt
Anilin	0,2 Mt	Formaldehyd	0,8 Mt
Benzol*	0,4 Mt	Phenol	0,7 Mt
Bisphenol A	0,3 Mt	Polyamid (Nylon)	0,3 Mt
Butadien	0,3 Mt	Polybutadien-Kautschuk	< 0,1 Mt
Chlor	0,7 Mt	Polycarbonat	0,3 Mt
Cumol	0,8 Mt	Polyethylen HDPE	0,4 Mt
Cyclohexan	0,1 Mt	Polyethylen LDPE	0,1 Mt
Ethylbenzol	0,2 Mt	Polyethylen LLDPE	0,4 Mt
Ethylendichlorid	1 Mt	Polypropylen	0,5 Mt
MDI	0,2 Mt	Polystyrol	0,2 Mt
Methanol	0,3 Mt	Polyvinylchlorid	0,8 Mt
Nitrobenzol	0,3 Mt	Salpetersäure	2 Mt
o-Xylol*	< 0,1 Mt	Styrolmonomer	0,2 Mt
p-Xylol*	0,2 Mt	Toluol	< 0,1 Mt
Ethylenglykol	< 0,1 Mt	Vinylchlorid-Monomer	0,7 Mt

Tab. 12-5 Technologiekapazitäten im Cluster Mitteldeutsches Chemiedreieck

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Steamcracker	1,6 Mt Naphtha	Atmosphärische Destillation	12 Mt Rohöl

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
Adipinsäure	0,1 Mt	PET	0,3 Mt
Benzol*	0,3 Mt	PE	0,2 Mt
Butadien	0,1 Mt	PP	0,3 Mt
Caprolactam	0,2 Mt	Propylen FCC	0,5 Mt
Chlor	0,3 Mt	PVC	0,3 Mt
Ethylbenzol	0,4 Mt	SBR	0,3 Mt
Ethylendichlorid	0,3 Mt	Styrol	0,4 Mt
EPS	0,1 Mt	Vinylchlorid	0,3 Mt
Nylon 6	0,2 Mt		

Tab. 12-6 Technologiekapazitäten im Cluster Nordsee

Technologie	Jahresverarbeitungs- kapazität in Mio. Tonnen	Technologie	Jahresverarbeitungs- kapazität in Mio. Tonnen
Atmosphärische Destillation	4,5 Mt Rohöl	Steamcracker	0,3 Mt (Naphtha & LPG)

Produkt	Jahresproduktions- kapazität	Produkt	Jahresproduktions- kapazität
Benzol*	0,1 Mt	Propylenoxid	0,6 Mt
Bisphenol A	0,1 Mt	MDI	0,4 Mt
Chlor	1,8 Mt	PMMA	0,1 Mt
Ethylendichlorid	0,3 Mt	Toluol*	0,1 Mt
Polycarbonat	0,1 Mt		

Tab. 12-7 Technologiekapazitäten im Cluster Rotterdam

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Steamcracker	2,9 Mt (Naphtha, LPG, Gas-öl)	Atmosphärische Destillation	58,1 Mt Rohöl

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
ABS	< 0,1 Mt	p-Xylol*	0,7 Mt
Aceton	0,1 Mt	PBR	< 0,1 Mt
Benzol*	1,3 Mt	PMMA	< 0,1 Mt
Butadien	0,1 Mt	PET	0,4 Mt
Chlor	0,6 Mt	Polyole	0,5 Mt
Ethylbenzol	0,6 Mt	Polypropylen	0,2 Mt
Ethylendichlorid	0,1 Mt	PVC	0,5 Mt
Ethylenglykol	0,2 Mt	Propylen FCC	0,5 Mt
Ethylenoxid	0,3 Mt	Propylenoxid	1,0 Mt
Formaldehyd	0,4 Mt	PTA	0,7 Mt
Isopropanol	0,3 Mt	Styrol	1,7 Mt
MDI	0,4 Mt	Vinylchlorid	1,6 Mt

Tab. 12-8 Technologiekapazitäten im Cluster Antwerpen

Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität	Technologie	Jahresverarbeitungs-kapazität
Steamcracker	4,6 Mt (Naphtha & LPG)	Atmosphärische Destillation	36,8 Mt Rohöl

Produkt	Jahresproduktions-kapazität	Produkt	Jahresproduktions-kapazität
ABS	0,2 Mt	Ethylenoxid	0,5 Mt
Aceton	0,7 Mt	MDI	0,5 Mt
Anilin	0,7 Mt	Nitrobenzol	0,7 Mt
Benzol*	0,7 Mt	Polyethylen_LDPE	0,4 Mt
Bisphenol A	0,2 Mt	Polyole	0,5 Mt
Butadien	0,3 Mt	Polypropylen	0,4 Mt
Caprolactam	0,7 Mt	Polystyrol	0,5 Mt
Chlor	0,6 Mt	Propylen FCC	1,2 Mt
Cyclohexan	0,1 Mt	Propylenoxid	0,3 Mt
Ethylbenzol	0,9 Mt	Styrol	0,5 Mt
Ethylendichlorid	0,3 Mt	Toluol*	0,1 Mt
Ethylenglykol	0,4 Mt		