

Energiewende in der Industrie

Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor

Branchensteckbrief der Grundstoffchemie

Bericht an:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

von:

Christian Achtelik, Navigant
Matthias Schimmel, Navigant
Jan-Martin Rhiemeier, Navigant

in Zusammenarbeit mit:

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft
BBG und Partner

Vorhaben: I C 4 – 80 14 38/42
Projektnummer: SISDE17915
14.06.2019

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Chemieindustrie	1
1.1 Übersicht über die Grundstoffchemie	2
1.2 Produktionsprozesse in der Grundstoffchemie	6
1.2.1 Dampfspaltung	6
1.2.2 Ammoniakherstellung	8
1.2.3 Chloralkali-Elektrolyse	10
1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende	13
2. Literaturverzeichnis	14

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BAT	Best available techniques
BVT	Beste verfügbare Techniken
BWS	Bruttowerschöpfung
CAGR	Jährliche Wachstumsrate (engl. compound annual growth rate)
CCU	Carbon Capture and Utilisation
Cl	Chlor
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CH ₄	Methan
EDC	Ethylendichlorid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EUTL	European Union Transaction Log
GJ	Gigajoule
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HVC	High value chemicals
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NACE	System zur Klassifizierung von Wirtschaftszweigen (frz. Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne)
NaCl	Natriumchlorid
NaOH	Natriumhydroxid
TWh	Terawattstunde

1. CHEMIEINDUSTRIE

In der deutschen Chemieindustrie werden wichtige Grundstoffe sowie eine große Bandbreite an Spezialchemikalien produziert. Die Größe der Industrie, aber genauso die Natur der Prozesse, macht die chemische Industrie zu einer hinsichtlich Energieverbräuchen und Emissionen zentralen Branche in Deutschland. Insbesondere in der Grundstoffchemie werden Molekülketten und Verbindungen mit großem Energieaufwand aufgebrochen, um Bausteine für weitere Prozesse zu gewinnen. Diese werden nicht nur in der Chemieindustrie weiterverarbeitet, sondern sind auch für viele industrielle Prozesse in anderen Branchen zentrale Einsatzstoffe. Tabelle 1-1³ gibt eine Übersicht über wichtige Kennzahlen der chemischen Industrie in Deutschland. Allein der Stromverbrauch entspricht in etwa 10 Prozent des jährlichen Stromverbrauchs in der Bundesrepublik.

Da die chemische Industrie eine große Bandbreite an Produkten herstellt, sind auch die eingesetzten Prozesse sehr heterogen. Um die wichtigsten Energieverbraucher abzubilden, die gleichzeitig auch die wichtigsten Grundstoffe herstellen, wurden drei Schlüsselprozesse der Grundstoffchemie zur weiteren Betrachtung im Rahmen dieses Projekts ausgewählt. In diesen spielen insbesondere die Elemente Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) eine herausragende Bedeutung. Kohlenstoff ist die Grundlage der organischen Chemie und wird heutzutage hauptsächlich aus den fossilen Rohstoffen Erdöl und -gas gewonnen. In Zukunft müssen im Rahmen der Energiewende dafür alternative Routen entwickelt werden. Wasserstoff spielt heutzutage in vielen industriellen Prozessen eine große Rolle. Im Rahmen der Energiewende wird erwartet, dass diese Rolle sich weiterentwickelt und auch im Transport- und Energiesektor mehr Wasserstoff eingesetzt wird. Der chemischen Industrie wird zumindest teilweise die Rolle des Produzenten dieses Wasserstoffes zufallen.

Um dieser Komplexität zu begegnen und die großen Herausforderungen der Branche abzubilden, werden die folgenden Prozesse der Grundstoffindustrie näher betrachtet: (1) Die Dampfspaltung (eng. *steam cracking*), (2) die Dampfreformierung (engl. *steam reforming*) als Teil der Ammoniakherstellung und (3) die Chlorelektrolyse. Dampfspaltung und -reformierung sind in zweierlei Hinsicht energieintensiv: Erstens benötigen sie für die Bereitstellung der hohen Prozesstemperaturen eine dauerhaft hohe Energiezufuhr. Diese Energie wird für die ersten beiden Prozesse heute im Wesentlichen über fossile Kohlenwasserstoffe bereitgestellt, welche gleichzeitig als Einsatzstoffe dienen, um daraus Zielprodukte des Prozesses zu gewinnen. Diese sind weitverbreitete Grundchemikalien für nachfolgende Prozesse und werden in großen Volumina hergestellt. Durch die hohe Energieintensität und die großen Volumina decken diese beiden Prozesse einen signifikanten Teil des Bedarfs an fossiler Energie und der direkten Emissionen der Chemiebranche ab. Die Chlorelektrolyse ist ein Prozess, der aufgrund seiner hohen Stromintensität mitbetrachtet wird. Trotz der Fokussierung auf diese drei Prozesse wird eingangs die gesamte Grundstoffchemie beschrieben,

Tabelle 1-1. Kennzahlen Chemiebranche (2015)³

Produktionsstandorte	>1600	
Arbeitsplätze	332.000	
Bruttowertschöpfung (BWS)	25 Mrd. €	
CAGR BWS (2008-2015)	2,2 %	
Jährliche Produktionsmengen	Siehe Tabelle 1-2	
Gesamtenergieverbrauch	171,2 TWh ¹	
Stromverbrauch	51,4 TWh ²	
Erdgasverbrauch	56,9 TWh	
Kohleverbrauch	11,3 TWh	
Erdöl	14,8 TWh	
Gesamtemissionen	26,4 Mio. t CO ₂	
Eigenproduktions- & KWK-Anteil	30 %	100 %



¹ WZ 20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen + WZ 21 21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen.

² Nur WZ 20. WZ 20 + WZ21: 53,5 TWh. Statistisches Bundesamt (DESTATIS) 2018.

³ Eurostat (2018b, 2018a); Destatis (2016, 2018); VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2016, 2017a).

da die statistischen Daten nur auf diesem Level verfügbar sind und die genannten Prozesse und ihre Eigenschaften für einen Großteil des Energiebedarfs sowie der Emissionen verantwortlich sind.

Tabelle 1-1 stellt wichtige Kennzahlen der Chemiebranche dar, teilweise inklusive der pharmazeutischen Industrie (z. B. Energiekennzahlen). Aus Gründen der Konsistenz und Datenverfügbarkeit wird über alle Branchen hinweg das Basisjahr 2015 gezeigt.

1.1 Übersicht über die Grundstoffchemie

Branche. Die Grundstoffchemie umfasst die Umwandlung von anorganischen und organischen Rohstoffen in Grundchemikalien, welche als Grundlage für weitere endproduktspezifische Verarbeitungsschritte genutzt werden (z. B. Polymere oder Spezialchemie).

Mit rund 36,2 Mrd. Euro Umsatz (Bruttoproduktionswert) im Jahr 2015 repräsentiert die deutsche Grundstoffchemie knapp ein Drittel (32 Prozent) des Umsatzes der deutschen Chemieindustrie und ist die Basis fast der gesamten Wertschöpfungskette dieser.⁴ Auf europäischer Ebene liegt der Anteil der Grundstoffchemie an der gesamten Chemieindustrie mit 39 Prozent (204,5 Mrd. Euro, 2015) leicht über dem deutschen Wert.⁵ Mit einem Anteil von in etwa 17 Prozent an der europäischen Grundstoffchemie ist Deutschland ein wichtiger Standort.

Energiebilanz. Der Endenergieverbrauch der Chemieindustrie in Deutschland liegt bei rund 165 TWh/a, wovon rund 51 TWh/a elektrische Energie sind.⁶ Der Wärmebedarf der chemischen Industrie liegt bei etwa 90 TWh/a.⁷ Die Grundstoffchemie stellt mit 77 Prozent dieses Gesamtenergieverbrauchs den wichtigsten Transformationsbereich hin zu einer treibhausgasneutralen Energieversorgung der Chemieindustrie dar.⁸

Der Großteil der Primärenergieträger wird energetisch in den einzelnen Produktionsprozessen genutzt: Erdgas zu etwa 75 Prozent, Mineralölprodukte zu über 90 Prozent.⁹ Hervorzuheben ist der Verbrauch von Primärenergieträgern als Produktionsrohstoff (engl. *feedstock*). In der organischen Chemie werden große Mengen fossiler Rohstoffe genutzt. 14,8 Mio. Tonnen Naphtha (75 Prozent), 2,1 Mio. Tonnen Erdgas (11 Prozent) und 0,3 Mio. Tonnen Kohle (1 Prozent) wurden im Jahr 2015 eingesetzt. Der Anteil nachwachsender Rohstoffe beträgt 2,5 Mio. t (13 Prozent).¹⁰

Die spezifischen Anforderungen an Strom und Wärme werden teilweise durch Eigenproduktionsanlagen bedient. Statistische Daten zeigen für das Jahr 2015 eine Eigenerzeugung von 33 Prozent, bezogen auf den Verbrauch im Chemiesektor, bzw. 29 Prozent bezogen auf den gesamten Bezug inkl. der Eigenerzeugung.¹¹ Der Einsatz von KWK-Anlagen spielt laut Branchenexperten dabei eine entscheidende Rolle. Die Eigenerzeugung in der chemischen Industrie ist demnach fast ausschließlich durch KWK-Anlagen gewährleistet.

Im Folgenden wird zunächst die Grundstoffchemie beschrieben und daran anschließend die energie- und emissionsintensivsten Prozesse erläutert.

Zuordnung zu amtlicher Statistik. In der amtlichen Statistik umfasst die Grundstoffchemie vier verschiedene Unterkategorien bzw. 4-stellige Wirtschaftszweige (engl. 4-digit NACE code). Die NACE Codes 20.11, 20.13 und 20.15 sind der anorganischen Grundstoffchemie und der NACE Code 20.14

⁴ Grundstoffchemie gemäß VCI Abgrenzung: Anorganische Grundchemikalien (WZ 20.11, 20.13, 20.15) 12,4 Mrd. Euro Bruttoproduktionswerte 2015, Petrochemikalien und Derivate (20.14) 23,9 Mrd. Euro Bruttoproduktionswerte 2015, bezogen auf Chemische Industrie (WZ 20) 112,6 Mrd. Euro Umsatz 2015. Quelle: VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2016).

⁵ cefic - The European Chemical Industry Council (2016). Analog zu Zahlen für Deutschland wurden die Umsätze der Sparten „basic inorganic“ und „petrochemicals“ einbezogen.

⁶ VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2017b).

⁷ VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2017c).

⁸ Ecofys (2013).

⁹ Verband der Chemischen Industrie e.V. (2018).

¹⁰ VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2018).

¹¹ Destatis (2018).

der organischen Grundstoffchemie zugeordnet. Da in der folgenden Untersuchung Prozesse der anorganischen und organischen Grundstoffchemie analysiert werden, orientieren sich die gesammelten Daten an dieser Abgrenzung.

Geographische Aufteilung. Die Chemieindustrie produziert an über 1.600 Standorten in Deutschland. Chemieparcs und regionale Chemieverbände spielen dabei eine besondere Rolle und sind über die meisten Bundesländer verteilt. Auch die Grundstoffchemie ist somit stark verteilt, mit einigen regionalen Häufungen. Abbildung 1-1¹² gibt einen Überblick über wichtige Standorte von Chemieparcs und -verbänden. Aber auch außerhalb von Chemieparcs und -verbänden werden chemische Grundstoffe produziert.

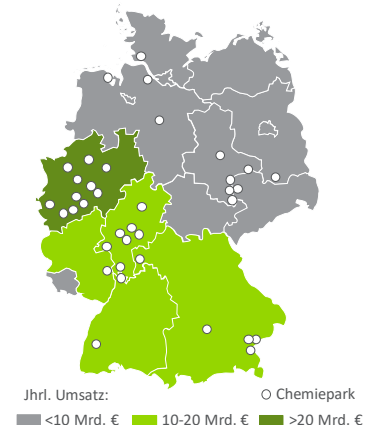


Abbildung 1-1.
Chemieparcs in
Deutschland, Stand 2016¹²

Nordrhein-Westfalen ist der bedeutendste Chemiestandort Deutschlands. Hier sind einerseits die meisten Chemieparcs angesiedelt und andererseits werden hier 26 Prozent¹³ des Umsatzes der deutschen Chemieindustrie erzielt. In den Prozessbeschreibungen weiter unten im Dokument finden sich weitere Details zu den Standorten der einzelnen betrachteten Prozesse.

Branchenstruktur. Die Chemieindustrie zeichnet sich durch eine sehr heterogene Branchenstruktur aus. Dies liegt vor allem an der großen Produktvielfalt. Wohingegen die organische Chemie auf dem Element Kohlenstoff basiert, umfasst die anorganische Industrie alle restlichen Elemente des Periodensystems. Aus wenigen Rohstoffen in der organischen Chemie entsteht nach dem Spaltprozess eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen (Zwischen-) Produkten.

Obwohl in der Chemieindustrie viele kleine und mittelständische Unternehmen aktiv sind, ist die Grundstoffchemie, und insbesondere die Großanlagen der im weiteren beschriebenen Prozesse, von großen Unternehmen dominiert.

Wertschöpfungskette. Ein Großteil der Chemieindustrie, und ganz besonders die Grundstoffchemie, liefert keine Produkte an Endverbraucher, sondern produziert Zwischenprodukte. Betrachtet man die komplette Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung (z. B. Erdöl- und Erdgasgewinnung) bis hin zum fertigen Endprodukt beim Verbraucher (z. B. einer Plastikflasche) befindet sich die Grundstoffchemie am Anfang (siehe Abbildung 1-2). Wichtige Grundchemikalien, wie z. B. Ethylen und Propylen, werden mittels thermischem oder katalytischem Cracken (engl. *crack* „spalten“) erzeugt, welches im Folgenden näher beleuchtet wird. Die vorgelagerten Schritte für die Produktion anorganischer Grundchemikalien (z. B. Chlor oder Ammoniak) sind ebenfalls energieintensiv und spielen eine bedeutende Rolle für die chemische Industrie in Deutschland.

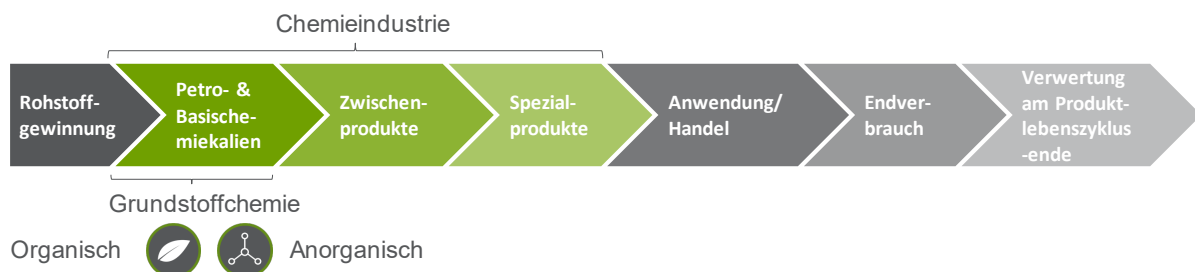


Abbildung 1-2. Vereinfachte Wertschöpfungskette der Chemieindustrie

Regulatorische Besonderheiten. Die chemische Industrie zählt für die Bereiche der Herstellung organischer und anorganischer Grundstoffe laut Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (nach Anlage 4

¹² VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2017a).

¹³ VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2017a).

Liste 1) zu den Branchen, die auf Antrag eine Reduzierung der EEG-Umlage nach der Besonderen Ausgleichsregelung (§§ 63 ff. EEG) erlangen kann. Voraussetzung ist ein Stromverbrauch von mehr als 1 GWh jährlich und eine Stromkostenintensität von mindestens 14 Prozent. Unternehmen, die eine reduzierte EEG-Umlage entrichten, müssen in den Kalenderjahren, in denen diese Reduzierung gilt, auch nur eine verringerte KWK-Umlage entrichten (§ 27 Abs. 1 KWKG). Für Eigenversorgungen, bei denen der Strom aus Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien stammt, verringert sich die EEG-Umlage daneben auf 40 Prozent der EEG-Umlage (§ 61 b EEG). Ob eine entsprechende Reduktion auch bei Eigenversorgungen mit Strom aus hocheffizienten KWK-Anlagen erfolgen kann, ist derzeit noch offen und Gegenstand von Gesprächen der Bundesregierung mit der Europäischen Kommission. Bei einer Mindestabnahmemenge von 10 GWh pro Jahr und Abnahmestelle und einer Mindestbenutzungszahl von 7.000 Stunden pro Jahr und Abnahmestelle kann zudem ein individuelles Netzentgelt vereinbart werden, dass bis zu 90 Prozent unter dem regulär zu entrichtenden Netzentgelt liegen kann. Schließlich können stromintensive Unternehmen der Grundstoffchemie von Entlastungen bei der Strom- und Energiesteuer profitieren (§§ 9b, 10 StromStG/§§ 54, 55 EnergieStG). Bestimmte energieintensive Prozesse und Verfahren, wie etwa die chemische Reduktion, sind gänzlich von der Strom- und Energiesteuer befreit (§ 9a StromStG/§ 51 EnergieStG).

Flexibilität. Einige chemische Prozesse bieten Flexibilitäten bezüglich des Stromeinsatzes. Insbesondere die Chloralkali-Elektrolyse bietet die Möglichkeit, zwischen Teil- und Vollastbetrieb zu wechseln (siehe Kapitel 1.2.3). Weitere Flexibilitätspotenziale ergeben sich in der Wertschöpfungskette durch die Verwendung von Ethylendichlorid (EDC), welches aus Chlor und Ethylen besteht. Es wird für die PVC-Produktion nachfolgend an die Chloralkali-Elektrolyse verwendet und kann gespeichert werden. Somit könnte die Chlorproduktion runtergefahren werden ohne die nachfolgenden Prozesse zu unterbrechen.

Eine weitere Flexibilitätsoption bietet die Wasserstoffelektrolyse. Dies ist ein strombasiertes Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff, welches in Deutschland allerdings noch nicht im großindustriellen Maßstab betrieben wird. Generell wird der Wasserstoff-Elektrolyse ein hohes Flexibilitätspotenzial zugesprochen, nicht nur durch die Betriebsweise der Elektrolyseure, sondern auch auf Grund der Speicherbarkeit des Wasserstoffs, z. B. im bestehenden Gasnetz.

Des Weiteren bietet die Luftzerlegung zur Gewinnung von Stickstoff, neben der Wasserstoffproduktion ein Teil der Ammoniaksynthese, weiteres Flexibilisierungspotenzial in der Grundstoffchemie, da der Prozess rein elektrisch betrieben und der Stickstoff gespeichert werden kann.^{14, 15, 16}

Kreislaufwirtschaft. In der deutschen Chemieindustrie spielt die Kreislaufwirtschaft bereits heute eine wichtige Rolle. Laut einer aktuellen Studie von Deloitte beziehen eine Mehrheit der Unternehmen der chemischen Industrie Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in das Design der Produkte ein und führen zu diesem Zweck Analysen über den Lebenszyklus durch.¹⁷ Auch stellen viele Unternehmen ihre Produkte nicht in isolierten Anlagen her. Wo immer möglich, sind Anlagen zu einem Verbund verknüpft. Denn bei einer chemischen Reaktion entstehen neben dem gewünschten Produkt oft weitere Stoffe oder Abwärme, die für andere Produktionsverfahren eingesetzt werden können. Dieser Effekt kommt besonders an großen Standorten und in den 37 Chemieparcs in Deutschland zum Tragen. Verbundmöglichkeiten und Synergien verbessern sowohl die wirtschaftliche als auch die ökologische Bilanz der Unternehmen, die dort produzieren. Stofflich nicht verwertbare Abfallprodukte werden der energetischen Verwertung zugeführt.

Die folgenden drei Kreisläufe für chemische Produkte werden schon heute angewandt: (1) Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, (2) die Wiederverwendung von chemiebasierten Produkten und (3) das mechanische Recycling. Der Anteil an erneuerbaren Rohstoffen am gesamten

¹⁴ Bündlinger u. a. (2018).

¹⁵ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

¹⁶ Schulte Beerbühl (2014).

¹⁷ Deloitte (2018).

Rohstoffeinsatz der Chemieindustrie in Deutschland betrug 2015 bereits 13 Prozent (oder 2,5 Mt).¹⁸ Jedoch stehen der weiteren Skalierung dieses Kreislaufs noch technologische Herausforderungen und der hohe Flächenbedarf für Biomasse entgegen. Der zweite Kreislauf, die Wiederverwendung von chemiebasierten Produkten, kommt insbesondere bei Kunststoffen zur Anwendung, wo die mehrfache Nutzung von PET-Flaschen, Polyethylen-Behältnissen oder Kunststofftüten verbreitet ist. Für Kunststoffverpackung liegt die mechanische Recyclingquote derzeit bei 40 Prozent.¹⁹

¹⁸ Deloitte (2018).

¹⁹ Elser/Ulbrich/Accenture (2017).

1.2 Produktionsprozesse in der Grundstoffchemie

Auswahl relevanter Prozesse. Aus Tabelle 1-2 geht hervor, dass bei den Produktionsprozessen der organischen Grundchemikalien das Cracken ein zentraler Prozess ist. Wie eingangs beschrieben basieren viele Produkte der Chemieindustrie aber auch des alltäglichen Lebens auf den *high value chemicals* (HVC) Ethylen, Propylen, Butene, Benzol und weitere. Im energieintensiven Crackerprozess werden langkettige Kohlenwasserstoffe gespalten, das Resultat ist ein Gemisch der kurzkettigeren HVCs mit variierender Zusammensetzung. Kapitel 1.2.1 geht näher auf diesen Prozess ein.

In der anorganischen Grundstoffchemie ist die Ammoniakherstellung ein emissionsintensiver Prozess, insbesondere durch die vorgelagerte Wasserstoffherstellung über den Prozess der Dampfreformierung (siehe Kapitel 1.2.2). Des Weiteren werden für einige chemische Grundprodukte verschiedene Verfahren der Elektrolyse eingesetzt. Im Gegensatz zum Cracken und zur Ammoniakherstellung, wird für die einzelnen Elektrolyseverfahren nur Strom benötigt und kaum direkte Emissionen freigesetzt. Der Prozess der Chloralkali-Elektrolyse wird in Kapitel 1.2.3 erläutert.

Im Hinblick auf die Transformationspfade für die Grundstoffchemie wird der Fokus der Analyse auf die Verfahren Cracken und die Ammoniakproduktion gelegt. Als dritter Prozess wird die Chlorelektrolyse als stromintensives und damit indirekt auch emissionsintensives Verfahren beleuchtet. Jedoch erfordert eine Transformation bei erneuerbarer Stromversorgung keine grundsätzliche Veränderung des Prozesses.

Tabelle 1-2. Übersicht der wichtigsten anorganischen und organischen Grundchemikalien und die jeweiligen Herstellungsverfahren²⁰

	Grundchemikalie	Chemische Formel	Produktionsmenge Deutschland (2015)	Verfahren
Anorganische Grundchemikalien	Chlor	Cl	3,87 Mio. t	Chlor-Alkali- oder Schmelzflusselektrolyse
	Natronlauge	NaOH	3,23 Mio. t	Chlor-Alkali oder Schmelzflusselektrolyse
	Schwefelsäure	H ₂ SO ₄	3,71 Mio. t	Doppelkontaktverfahren
	Ammoniak	NH ₃	2,88 Mio. t	Haber-Bosch Verfahren
	Sauerstoff	O ₂	6 580 Mio. m ³	Nebenprodukt oder Lindeverfahren
	Wasserstoff	H ₂	4 480 Mio. m ³	Dampfreformierung oder Elektrolyse
Organische Grundchemikalien	Ethylen	C ₂ H ₄	5,13 Mio. t	Thermisches oder katalytisches Cracken
	Propen	C ₃ H ₆	3,96 Mio. t	Thermisches Cracken oder Dehydrierung
	Butene	C ₄ H ₈	2,15 Mio. T	Thermisches Cracken oder Hydrierung
	Benzol	C ₆ H ₆	1,97 Mio. t	Thermisches oder katalytisches Cracken
	Methanol	CH ₄ O	0,94 Mio. t	Katalytisches Verfahren aus Synthesegas

1.2.1 Dampfspaltung

Prozess. Für wichtige Grundstoffe der organischen Chemie wie Ethylen und Propylen wird die so genannte Dampfspaltung (eng. steam cracking) genutzt, welches zu den thermischen Crackverfahren gehört. In diesem Verfahren wird durch thermisches Cracken die Umwandlung von langkettigen zu kurz-kettigen Kohlenwasserstoffen mit Hilfe von Wasserdampf erreicht. Der Wasserdampf wird den Kohlenwasserstoffen beigemischt. Diese Mischung wird in einem Crackofen auf etwa 750 °C – 900 °C erhitzt, um die Spaltung der Kohlenstoffketten zu erzwingen. Anschließend wird das Gemisch einer raschen Kühlung unterzogen, um die erneute Verbindung der Ketten zu unterbinden. Das

²⁰ Quelle der Produktionsmengen: VCI - Verband der chemischen Industrie e.V. (2016). Quelle gibt die Menge Ammoniak bereinigt auf N an (2,37 Mio. t.), dies wurde auf Ammoniak hochgerechnet.

Endprodukt besteht aus einer Vielzahl von einzelnen chemischen Stoffen und wird durch ein komplexes System in seine einzelnen Bestandteile aufgeteilt (fraktioniert). Zu den Hauptprodukten gehören Ethylen, Propylen und Wasserstoff, zu den Nebenprodukten Butene (auch Butylene) und Pyrolysebenzin.

Produktionsstandorte in Deutschland. Etwa 13 große Dampfspaltungsanlagen werden in Deutschland betrieben, mit den größten Konzentrationen im Raum Köln (5), in Gelsenkirchen (2) und in Ludwigshafen (2), teilweise in Raffinerien integriert.²¹ Große Anlagen produzieren jährlich rund 620.000 Tonnen Ethylen und 350.000 Tonnen Propylen.²² Diese Steamcracker verbrauchen jährlich in etwa 2 Mio. Tonnen Naphtha (Rohbenzin) als Rohstoff.

Technische Parameter. Abbildung 1-3 stellt den Dampfspaltungsprozess vereinfacht dar und illustriert die verschiedenen Temperaturniveaus entlang des Prozesses. Die Zeit im Spaltofen beträgt nur 0,2 – 0,4 Sekunden. Dies reicht aus, um die Spaltung einzuleiten. Wie bei den meisten Prozessen in der Chemieindustrie handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozess, sodass die Temperaturniveaus dauerhaft gehalten werden müssen. Der Effizienzgrad der Anlage wird maßgeblich durch die Rückgewinnung der Wärme bestimmt. Die Abgase des Prozesses werden zur Dampferzeugung, zur weiteren Wärmebereitstellung und zum Vorheizen der Kohlenwasserstoffe genutzt.

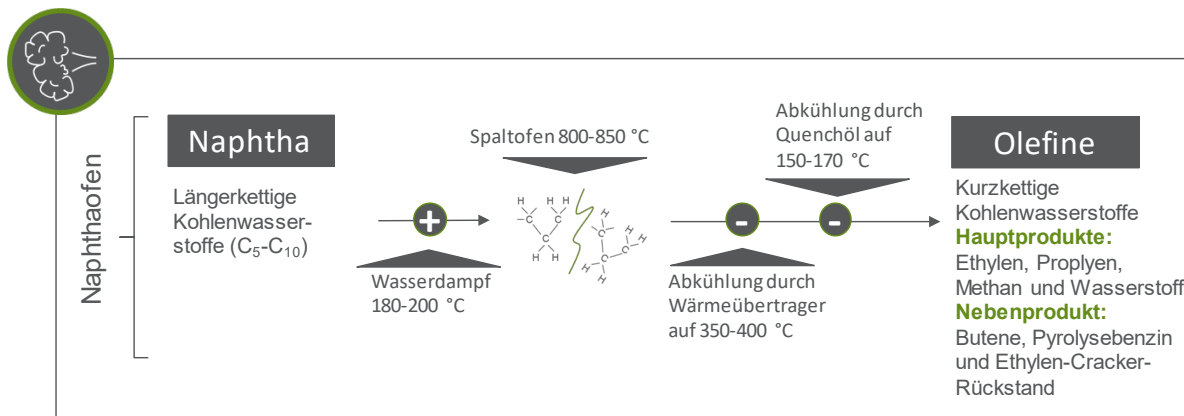


Abbildung 1-3. Vereinfachte Darstellung der Dampfspaltungsverfahren²³

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Für die Produktion von Ethylen ist vor allem der Rohstoff Naphtha (Rohbenzin) erforderlich, welcher in Raffinerien aus Rohöl gewonnen wird. Durch den kontinuierlichen Betrieb ist auch eine konstante Versorgung mit Rohstoffen und Energie notwendig. Einige der Zwischenprodukte werden auch zurück an die Raffinerien geleitet. Raffinerien und Cracker sind bezüglich der Rohstoffe und Zwischenprodukte folglich eng verwoben.

Brennstoffbedarf. Die naphthabasierte Dampfspaltung hat in europäischen OECD Ländern einen spezifischen Energieverbrauch von 12,2 GJ/t hochwertiges Produkt (*high value chemical* – HVC, ein Begriff der alle Crackerprodukte zusammenfasst).²⁴ Unter dem Einsatz von Best Practice Technologien kann der spezifische Energieverbrauch um etwa 0,2 GJ/t HVC gesenkt werden und erreicht 12 GJ/t HVC. In einer älteren Studie werden Werte zwischen 14 – 17 GJ/t HVC angegeben.²⁵

²¹ VCI - Verband der chemischen Industrie e. V. (2012).

²² BASF (2018).

²³ Eigene Darstellung.

²⁴ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

²⁵ Ren/Patel/Blok (2006).

Strombedarf. Für den eigentlichen Produktionsprozess wird kein Strom benötigt. Der Strombedarf von Anlagenteilen wie Pumpen, Beleuchtung, Steuerung und ähnlichem wird nicht gesondert erfasst, von Industrievertretern jedoch als vernachlässigbar eingestuft.

Emissionen. Steamcracker emittieren etwa 0,76 Tonnen CO₂ je Tonne HVC.²⁶ Unter der Annahme, dass etwa 11,5 Mt HVC in Deutschland jährlich produziert werden, resultieren jährliche Gesamtemissionen von 8,75 Mt CO₂.

1.2.2 Ammoniakherstellung

Prozess. Bei der Ammoniaksynthese reagieren Stickstoff und Wasserstoff in einem endothermen Verfahren zu Ammoniak (NH₃). Zur einfacheren Analyse wird die Ammoniaksynthese in zwei Prozesse aufgeteilt: (1) Die Wasserstoffherstellung, die zumeist durch den Prozess der Dampfreformierung erfolgt, sowie das (2) Haber-Bosch Verfahren, welches die eigentliche Ammoniaksynthese aus Wasserstoff und Stickstoff beinhaltet. Abbildung 1-4 stellt diese beiden Schritte schematisch dar und bildet auch einige Zwischenschritte ab.

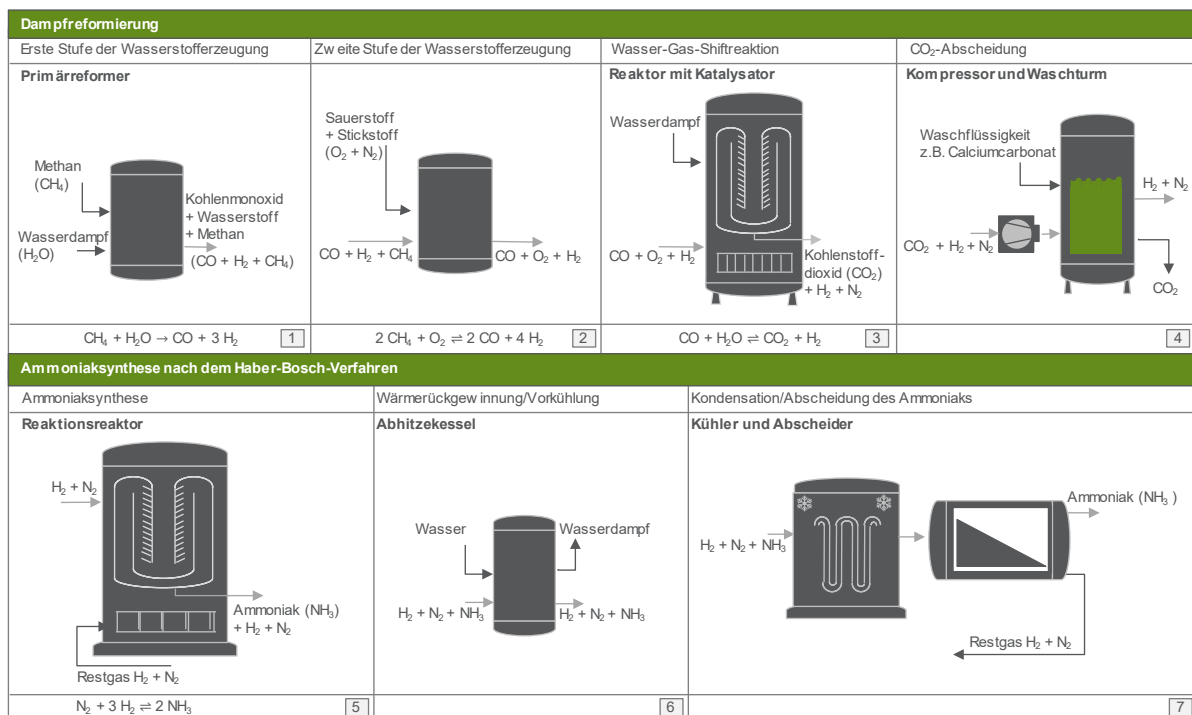


Abbildung 1-4. Schematische Darstellung der Ammoniakherstellung²⁷

1.2.2.1 Wasserstoffherstellung

Die deutsche Wasserstoffproduktion lag im Jahr 2015 bei 4,5 Mrd. m³ (siehe Tabelle 1-2). Die Ammoniakproduktion bezieht ungefähr die Hälfte des in Deutschland produzierten Wasserstoffs und ist mit über 80 Prozent des Wasserstoffverbrauchs in der Chemieindustrie die wichtigste Anwendung in diesem Wirtschaftszweig.²⁸

Das gängigste und unter aktuellen Randbedingungen meist ökonomischste Herstellungsverfahren, welches in etwa 99 Prozent der Wasserstoffproduktion in Deutschland ausmacht, ist das Verfahren der Dampfreformierung.²⁹ Wasserstoff kann jedoch auch durch Elektrolyse oder thermochemische

²⁶ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

²⁷ Eigene Darstellung.

²⁸ Fraile u. a. (2015).

²⁹ Navigant/Ecofys (2017).

Wasserspaltung hergestellt werden. Die Dampfreformierung nutzt für die Herstellung von Wasserstoff leichte Kohlenwasserstoffe (d. h. Erdgas, Flüssiggas oder Naphtha) und Wasserdampf. Hauptsächlich wird Erdgas als Ausgangsbasis genutzt, welches einen hohen Anteil an Methan (CH₄) besitzt. Andere Kohlenwasserstoffe spielen in der Praxis kaum eine Rolle.

Die Dampfreformierung ist ein endothermer Prozess und wird in vier Produktionsschritten durchgeführt. **Schritt 1:** Dem zuvor entschwefelten Kohlenwasserstoff wird Wasser (H₂O) in Form von Dampf beigemischt. Der Wasserdampf wird typischerweise durch Prozesswärme und Rauchgaswärme erzeugt. **Schritt 2:** Das Gemisch aus Kohlenwasserstoff und Dampf wird auf 700 – 900 °C erhitzt, dabei entstehen Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). **Schritt 3:** Im Anschluss wird dem Kohlenstoffmonoxid bei 250 – 300 °C wieder Wasserdampf zugebracht, welches in der sog. Shift-Reaktion mit dem Sauerstoffmolekül des Wasserdampfes zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) reagiert und somit die Wasserstoffausbeute erhöht. **Schritt 4:** Daraufhin erfolgt eine Reinigung des Gasmischs in dem entweder Wasserstoff abgetrennt oder CO entfernt wird, wobei in letzterem Fall noch CO₂ und eventuell Stickstoff in dem Gemisch verbleiben.^{30, 31} Abbildung 1-5 stellt diesen Prozess schematisch dar.

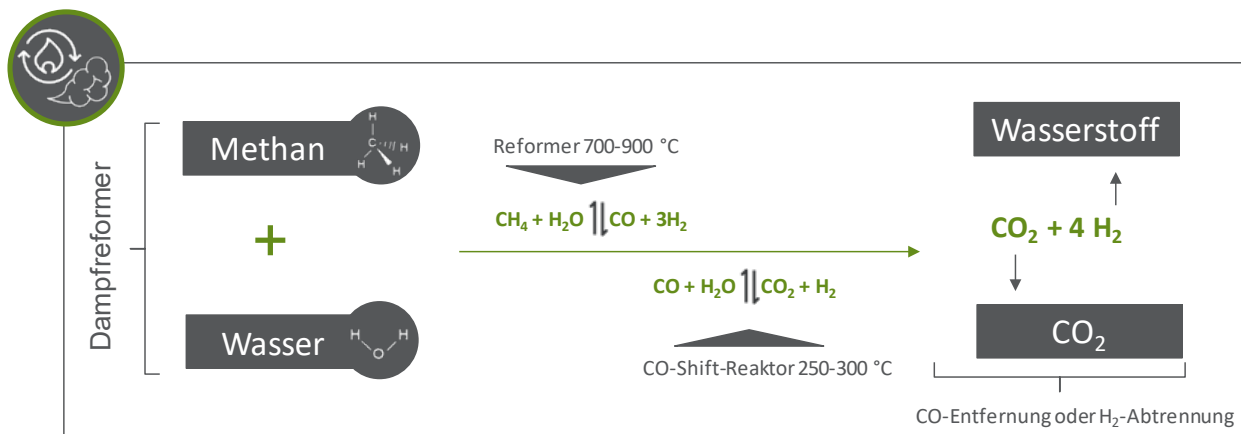


Abbildung 1-5. Prozessdarstellung der Dampfreformierung³²

1.2.2.2 Ammoniaksynthese

Der gewonnene Wasserstoff reagiert im Haber-Bosch Verfahren mit Luftstickstoff zu Ammoniak. Diese exotherme Reaktion erfordert hohe Drücke von 150 – 350 bar und Temperaturen zwischen 350 °C und 550 °C. Ein Eisenkatalysator ermöglicht den Ablauf zu diesen Bedingungen. Im kontinuierlich laufenden Verfahren wird durchgängig das Reaktionsprodukt entfernt. Dazu wird das Gasmisch über Wärmetauscher abgekühlt, sodass der Ammoniak kondensiert und über einen Druckabscheider abgetrennt werden kann. Noch nicht umgesetzte Bestandteile des Gasmischs werden wieder dem Reaktionsbehälter zugeführt. Die Gesamtanlage inklusive der Wasserstoffproduktion ist durch die exotherme Ammoniaksynthese ein Exporteur von Wärme.³³

Technische Parameter. Ammoniaksynthesenanlagen produzieren bis zu 3.300 Tonnen Ammoniak pro Tag.³⁴ Eine typische, große Dampfreformierungsanlage produziert ca. 50.000 Nm³ Wasserstoff³⁵ bei einem Reinheitsgrad von 99,9 Prozent. Bei einem Einsatz von 744 GJ Erdgas pro Stunde werden dabei 31 t Prozessdampf mit einer Temperatur von 390 °C und einem Druck von 40 bar abgeführt. Damit ergibt sich unter Abzug des abgeführten Dampfes ein spezifischer Energieverbrauch von

³⁰ Aicher (2004).

³¹ Forschungszentrum Jülich (2018).

³² Eigene Darstellung basierend auf (Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA, 2017) und (Aicher, 2004).

³³ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

³⁴ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

³⁵ Nm³ = Normkubikmeter unter Standarddruck p_n = 101 325 Pa = 1,01325 bar und Standardtemperatur T_n = 273,15 K = 0 °C.

12,85 GJ/1.000 Nm³ H₂. Die elektrische Leistung beläuft sich auf 850 kW.³⁶ Kleinere, modulare Anlagen zur Wasserstoffproduktion mit 150–12.000 Nm³/h sind ebenfalls in der Industrie vorhanden.

Produktionsstandorte Deutschland. In Deutschland werden sechs Ammoniakanlagen an vier Standorten betrieben, wobei an den Standorten Ludwigshafen und Wittenberg jeweils zwei Anlagen laufen. Insgesamt zehn Anlagen zur Dampfreformierung sind in Deutschland angesiedelt. Sie decken auch einen Großteil der Wasserstoffproduktion in Deutschland ab.

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Hauptrohstoff für die Ammoniakherstellung in Deutschland ist Erdgas, aus dem über die Dampfreformierung Wasserstoff gewonnen wird. Die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs mit Stickstoff zu Ammoniak geschieht in integrierten Anlagen, sodass Wasserstoff nur bedingt als Zwischenprodukt bezeichnet werden kann. Stick- und Sauerstoff werden über die Umgebungsluft zugeführt.

Brennstoffbedarf. Der Brenn- und Rohstoffbedarf zur Dampfreformierung wird von Erdgas dominiert. Oben genannte spezifische Verbräuche ermöglichen eine Abschätzung eines Verbrauchs von 66,7 PJ jährlich als Einsatz und Brennstoff. Spezifisch werden in europäischen OECD Ländern zurzeit 16,6 GJ/t Ammoniak benötigt, während Best Practice Technologien sogar 9 GJ/t Ammoniak erreichen können.³⁷

Strombedarf. Unter Verwendung oben genannter spezifischer Energieverbräuche pro Tonne Ammoniak und der Ammoniakproduktionsmenge in Deutschland verbrauchen Deutschlands Anlagen zur Dampfreformierung etwa 76 GWh Strom pro Jahr.

Emissionen. Die spezifischen CO₂-Emissionen der Ammoniakherstellung liegen bei 1,83 t CO₂/t NH₃.³⁸ Stöchiometrisch entstehen dabei 0,97 t CO₂/t NH₃ aus dem eingesetzten Erdgas in der Dampfreformierung. Im realen industriellen Prozess entstehen 1,33 t CO₂/t NH₃.³⁹ Im Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken (BVT, eng. best available techniques, BAT) der Europäischen Kommission für die Herstellung „Anorganischer Grundchemikalien: Ammoniak, Säuren und Düngemittel“ wird für die Dampfreformierung 1,15 bis 1,4 t CO₂/t NH₃ als Benchmark genannt.⁴⁰ Da alle sechs Ammoniak produzierenden Anlagen emissionshandelspflichtig sind, können deren direkte Emissionen (ohne Strom oder Dampfbezug) dem European Union Transaction Log (EUTL) entnommen werden.⁴¹ Für die Jahre 2013 bis 2017 ergibt sich dabei ein jährlicher Durchschnitt von 5,9 Mt CO₂, die in Deutschland durch die Ammoniakproduktion anfallen. Weitere 15 Wasserstoff- bzw. Synthesegasanlagen emittierten in Summe jährlich 1,8 Mt CO₂.

1.2.3 Chloralkali-Elektrolyse

Prozess. Die Chlorelektrolyse ist ein endothermer, strombasierter Prozess. Aus dem eingesetzten, in Wasser gelösten Natriumchlorid (NaCl) werden als Zielprodukte Chlor (Cl) und in Wasser gelöstes Natriumhydroxid (Natronlauge, NaOH) gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht dabei auch Wasserstoff. Drei Verfahren werden bzw. wurden in Deutschland genutzt: Das Diaphragma-, das Amalgam- und das Membranverfahren (siehe Abbildung 1-6).⁴² Das Amalgamverfahren wurde aufgrund seiner Umweltbelastung bis Dezember 2017 in Deutschland (und der EU) abgeschafft. Die größten Mengen stammen aus dem Membranverfahren, welches eine reinere Natronlauge hervorbringt.

Technische Parameter. Das Membranverfahren benötigt in etwa 2.600 kWh/t Cl₂ elektrische Energie. Neue Verfahren (Sauerstoff-Verzehrkatode), die noch keine weite Verbreitung gefunden

³⁶ Linde (2016).

³⁷ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

³⁸ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

³⁹ Bazzanella/Ausfelder/DECHEMA (2017).

⁴⁰ Umweltbundesamt (2007).

⁴¹ Europäische Kommission (2018).

⁴² Darstellung basierend auf Jörissen 2014.

haben, können den Verbrauch auf etwa 1.800 kWh/t Cl₂ senken.⁴³ Im Falle der Sauerstoff-Verzehrkatode kann jedoch kein Wasserstoff mehr als Nebenprodukt aus dem Prozess abgezweigt werden.

Produktionsstandorte Deutschland. An deutschen Chemiestandorten sind 18 Chloralkali-Elektrolyseanlagen aktiv. Diese weisen eine Gesamtkapazität von 5,2 Mt auf.⁴⁴ Ihre einzelne Größe ist jedoch stark unterschiedlich: Die größte Anlage mit einer Kapazität von 1,6 Mt steht in Stade, die kleinste mit 0,015 Mt in Leuna. Die meisten Anlagen haben eine Kapazität zwischen 0,2 und 0,3 Mt pro Jahr.⁴⁵

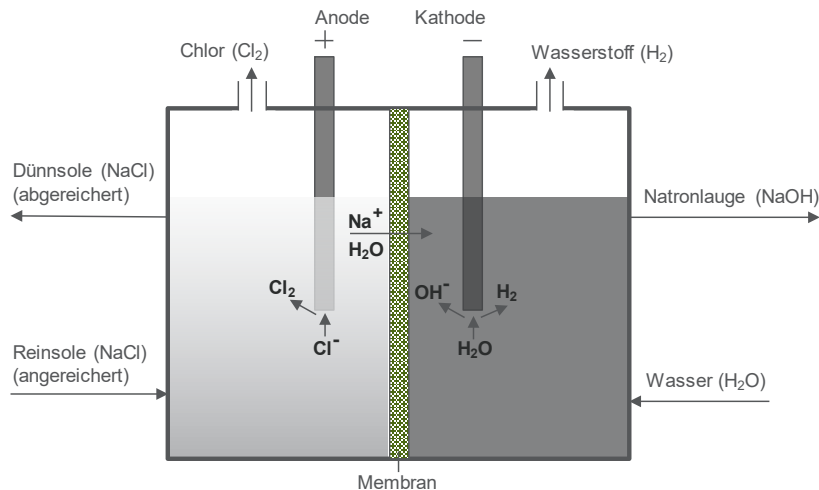


Abbildung 1-6. Chloralkali-Elektrolyse Membranverfahren⁴⁶

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Für die Chlorelektrolyse werden hauptsächlich Natriumchlorid und Wasser benötigt. Auf Stromverbrauch als zentraler Energielieferant wird unter „Strombedarf“ eingegangen.

Brennstoffbedarf. Es werden keine Brennstoffe benötigt.

Strombedarf. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Verbrauch von 2,6 MWh/t Cl₂ verbrauchen die deutschen Anlagen für ihre Produktion von 3,85 Mt Cl₂ etwa 10 TWh Strom im Jahr. Dies entspricht in etwa 20 Prozent des gesamten Stromverbrauchs der chemischen Industrie in Deutschland.⁴⁷

Der Strombedarf der Chloralkali-Elektrolyse bietet eine gewisse Flexibilität. Die Elektrolyseure des Membran- und Diaphragma-Verfahrens können zwischen Teil- und Volllast betrieben werden. Das technische Flexibilitätspotenzial ist dabei vorrangig abhängig von der Leistung der Elektrolyseure und von den Anforderungen der Folgeprozesse.⁴⁸ An einigen Standorten wird Chlor zur Zwischenspeicherung kondensiert und zum späteren Zeitpunkt für die Folgeprozesse erneut verdampft. Die Speicherkapazität wird jedoch aus sicherheitstechnischen Gründen als gering eingestuft, wodurch Flexibilitätspotenziale ebenfalls nur im geringen Maße gegeben sind und von der bestehenden Speichergröße abhängen. Unternehmen, die das Chloralkali-Membran-Verfahren anwenden, haben bereits erfolgreich Minutenreserve am Regelleistungsmarkt angeboten.

⁴³ Median des Energieverbrauchs in EU und EFTA, entnommen aus (Brinkmann u. a., 2014).

⁴⁴ Dies entspricht einer relativ geringen Auslastung von 74 %. Zahlen von eurochlor bestätigen, dass auf die Kapazitätsauslastung auf europäischer Ebene um die 80 % war im Jahr 2015, Quelle: Euro Chlor (2016).

⁴⁵ Euro Chlor (2017).

⁴⁶ Eigene Darstellung.

⁴⁷ Strombedarf in chemischer und petrochemischer Industrie im Jahr 2015 bei 192.877 TJ.

⁴⁸ Ausfelder/Seitz/Roon (2018).

Emissionen. Der CO₂-Ausstoß des stromintensiven Prozesses ist größtenteils durch den Stromsektor bestimmt.

1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende

Die Energiewende eröffnet für die Chemieindustrie Chancen, stellt diese aber ebenso vor zentrale Herausforderungen.

Es ergeben sich unter anderem technische und produktbasierte, gesellschaftliche und monetäre **Chancen**. Technisch können deutsche Anlagenbauer und -betreiber eine globale Technologieführerschaft erreichen, wenn Prozesse schon frühzeitig auf Technologien mit geringen THG-Emissionen umgestellt werden. Auf Basis einer solchen Technologieführerschaft können sich neue Chancen auf dem Weltmarkt ergeben. Gleichzeitig spielt der CO₂-Fußabdruck eines Produktes eine immer stärkere Rolle in Beschaffungsmaßnahmen und bei privatem Konsum. Chemische Produkte mit geringem CO₂-Fußabdruck können sich positiv auf den Absatz und das Image auswirken. Des Weiteren kann Flexibilität am Strommarkt als neues Produkt an Bedeutung gewinnen und zu neuen Geschäftsmodellen führen.

Eine Reduktion der CO₂-Emissionen geht einher mit einer Verringerung der verwendeten fossilen Energieträger. In der Chemieindustrie sind insbesondere Erdöl und Erdgas wichtige Inputs, welche fast vollständig importiert werden. Eine Reduzierung ihres Einsatzes würde zu einer größeren Unabhängigkeit von Importen aus oftmals instabilen Regionen der Welt führen und somit einen gesellschaftlichen Mehrwert schaffen.

Neben einer größeren Unabhängigkeit können sich auch Kostensenkungen ergeben. Werden weniger fossile Energieträger eingesetzt, spart dies die Importkosten. Die Preise dieser Energieträger sind zuletzt wieder kontinuierlich gestiegen, wodurch sich eventuelle Kosteneinsparungen noch vergrößern. Kurzfristig wird dies von höheren Kosten für den Einsatz von beispielsweise Strom kompensiert, langfristig werden jedoch geringere Stromkosten erwartet, wodurch die monetäre Bilanz wiederum positiv für die Chemiebranche ausfallen kann.

Dennoch sind die hohen Energiekosten in der kurzen Frist gleichzeitig eine zentrale **Herausforderung** für die Chemieindustrie. Auf der Kostenebene spielen neben kurzfristig steigenden Energiekosten auch die Investitionskosten eine wichtige Rolle. Gerade die Grundstoffchemie betreibt große Anlagen, welche die Basischemikalien in großen Mengen produzieren, um Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Der Ersatz solcher großer Anlagen erfordert hohe Investitionen. Gleichzeitig müssen Investitionszyklen und Anlagenlaufzeiten einbezogen werden. Auch das Risiko der technischen Entwicklung und Erprobung neuer Anlagen und Technologien ist eine nennenswerte Herausforderung.

Eine besondere Herausforderung für die Chemieindustrie ist der hohe Einsatz fossiler Inputs, welche als Kohlenstofflieferanten für die petrochemischen Prozesse benötigt werden. Eine Umstellung dieser Infrastruktur auf Wiederverwertung von Abfallmaterialien, die Weiterverwendung von kohlenstoffhaltigen Abgasströmen und/oder den Einsatz biogener Einsatzstoffe erfordert weitere Investitionen, insbesondere auch außerhalb der Chemieindustrie. Ebenso erfordern Maßnahmen, wie der verstärkte Einsatz von Strom für z. B. die Wasserstoffelektrolyse, Investitionen in den Ausbau von (erneuerbarer) Energieerzeugung und Stromnetze. Eine Anwendung von carbon capture and use (CCU) Prozessen, also der Weiterverwendung von abgespaltenen CO₂ Emissionen, in größerem Ausmaß erfordert Investitionen in eine Kohlenstoff(-dioxid) Infrastruktur für kostengünstige Lieferketten.

Gesellschaftlich müssen solche Veränderungen mitgetragen werden. Insbesondere die Akzeptanz für den stärkeren Ausbau der erneuerbaren Energie und Netze und die Verwendung biogenen Materials in der Industrie, als Konkurrenz zu möglichen Nahrungsmitteln, muss erreicht werden.

Sollte beispielsweise Wasserstoff nicht inländisch produziert, sondern importiert werden, könnten neue geopolitische Abhängigkeiten neue Herausforderungen ergeben.

2. LITERATURVERZEICHNIS

- Aicher, Thomas* (2004): Wasserstoffgewinnung aus Erdgas: Anlagenentwicklung und Systemtechnik, <http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2004/th2004_03_02.pdf> [Zugriff 2018-07-11]
- Ausfelder, Florian/Seitz, Antje/Roon, Serafin von* (2018): Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik Potenziale Hemnisse, <https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/news/662EB9A945A57D6EE0539A695E86C80B/live/document/Buch_FLEXIBILITAETSOPTIONEN_aktualisiert.pdf> [Zugriff 2018-06-13]
- BASF* (2018): Das Herz des Verbunds: Die Steamcracker der BASF, <<https://www.basf.com/de/de/company/about-us/sites/ludwigshafen/production/the-production-verbund/Steamcracker.html>> [Zugriff 2018-08-20]
- Bazzanella, Alexis Michael/Ausfelder, Florian/DECHEMA* (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry
- Brinkmann, Thomas u. a.* (2014): Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control), Luxembourg: Publications Office, 2014
- Bündlinger, Thomas u. a.* (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, <https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf> [Zugriff 2018-08-20]
- cecic - The European Chemical Industry Council* (2016): Facts and figures 2016 of the European chemical industry, <<http://www.cecic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/FactsandFigures2016.pdf>>
- Deloitte* (2018): Chemie 4.0: Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch, <<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-deloitte-studie-chemie-4-punkt-0-langfassung.pdf>> [Zugriff 2018-08-20]
- Destatis* (2016): Wirtschaftsbereiche - Energie - Tabellen 2016, <<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Verwendung/Tabellen/TabellenIndustriebranchen.html>> [Zugriff 2018-07-17]
- (2018): Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden: Tabelle 1: Strombilanz, <www.destatis.de>
- Ecofys* (2013): European chemistry for growth: Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future
- Elser, Bernd/Ulbrich, Michael/Accenture* (2017): Wege in die Kreislaufwirtschaft, <<https://www.chemanager-online.com/themen/strategie/wege-die-kreislaufwirtschaft>> [Zugriff 2018-08-20]
- Euro Chlor* (2016): December 2015 Chlorine Production, <<http://www.eurochlor.org/communications-corner/press-releases/chlorine-production-figures/december-2015-chlorine-production.aspx>>
- (2017): Chlorine Industry Review 2016-2017: 2017 - the year of 17 succes, <<http://fr.zone-secure.net/13451/398525/>> [Zugriff 2018-07-11]
- Europäische Kommission* (2018): European Union Transaction log, <<http://ec.europa.eu/environment/ets/allocationComplianceMgt.do>>
- Eurostat* (2018a): Komplette Energiebilanzen: jährliche Daten, <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_110a&lang=de> [Zugriff 2018-07-13]
- (2018b): Produktion in der Industrie: jährliche Daten, <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=sts_inpr_a&lang=de> [Zugriff 2018-07-13]
- Forschungszentrum Jülich* (2018): Reformierung von Erdgas, <http://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Forschung/BGE/Brennstoffzellenseiten/Reformierung/Reformierung%20von%20Erdgas/_node.html;jsessionid=8E854C73F5275A7C96A9CB015BBBC4B6> [Zugriff 2018-08-20]
- Fraille, Daniel u. a.* (2015): Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas, <http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/project_results_and_deliverables/D%201.2.%20Overview%20of%20the%20market%20segmenatation%20for%20hydrogen%20across%20potential%20customer%20groups%20based%20on%20key%20application%20areas.pdf> [Zugriff 2018-07-11]
- Linde* (2016): Hydrogen, <<https://www.linde-engineering.com/de/legacy/attachment?files=tcm:NB20-4258,tcm:B20-4258,tcm:20-4258>> [Zugriff 2018-08-20]
- Navigant/Ecofys* (2017): Green Hydrogen: Can low-cost renewable electricity bring us closer to a carbon neutral fuel?
- Ren, Tao/Patel, Martin/Blok, Kornelis* (2006): Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes, in: Energy 31 (2006), S. 425–451, <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.04.001#>>
- Schulte Beerbühl, Simon* (2014): Herstellung von Ammoniak unter Berücksichtigung fluktuierender Elektrizitätspreise, Göttingen, Niedersachs: Cuvillier, E, 2014
- Umweltbundesamt* (2007): Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung Anorganischer Grundchemikalien: Ammoniak, Säuren und Düngemittel: Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_anorganische-grundchemikalien-ammoniak-saeuren-duengemittel_vv.pdf> [Zugriff 2018-08-20]
- VCI - Verband der chemischen Industrie e.V.* (2012): Factbook 05: Die Formel der Ressourceneffizienz, <<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/media-weitere-downloads/dokumente/2012-06-12-vci-factbook-05-01-gesamt-pdf.pdf>>
- (2016): Chemiewirtschaft in Zahlen 2016, Frankfurt am Main, <<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2016.pdf>> [Zugriff 2018-08-20]
- (2017a): Chemiewirtschaft in Zahlen 2017, <<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf>> [Zugriff 2018-07-11]
- (2017b): VCI-Position zur Sektorenkopplung in der Energieversorgung, <<https://www.vci.de/langfassungen/langfassungen-pdf/2017-10-20-vci-position-sektorenkopplung-in-der-energieversorgung.pdf>> [Zugriff 2018-08-20]
- (2017c): Wirtschaftlichkeit von Power-to-X/Sektorkopplung, Berlin

- (2018): Rohstoffbasis der chemischen Industrie: Daten und Fakten, <<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-der-chemischen-industrie.pdf>> [Zugriff 2018-07-11]
- Verband der Chemischen Industrie e. V. (2018): Div. Interviews und Austausch zu Prozessen, Energieverbräuchen und Emissionen in der Chemieindustrie