

C4 Chemistry Climate

Wie die Transformation der Chemie gelingen kann

ABSCHLUSSBERICHT 2023 – KURZFASSUNG

Einführung	5
Rückblick auf die Roadmap Chemie 2050	9
Fortentwicklung der Roadmap im Projekt Chemistry4Climate	15
Die bei Chemistry4Climate betrachteten Szenarien	19
Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25

Management summary erstellt in Zusammenarbeit mit



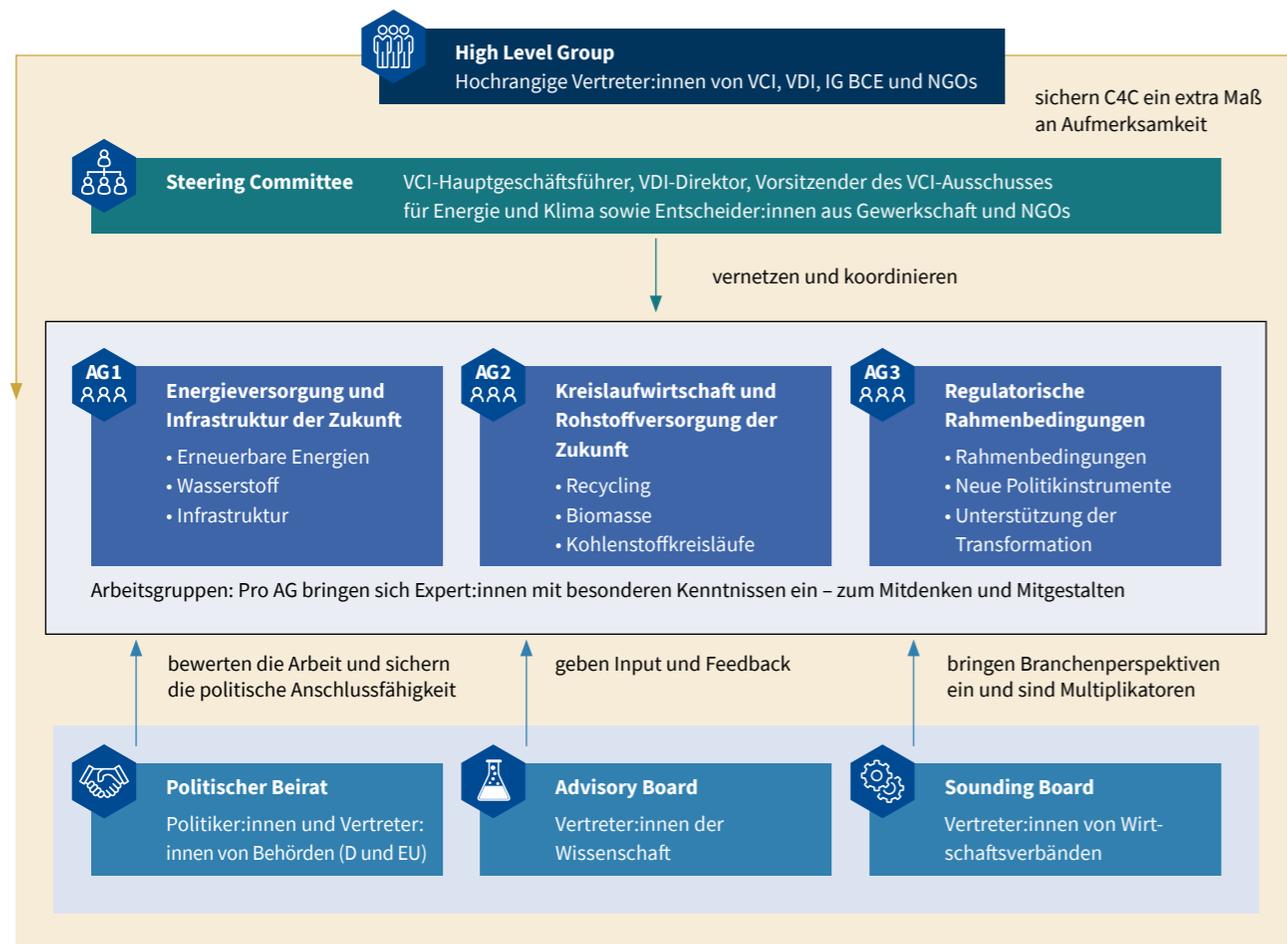


Einführung

Die Klimaschutzplattform Chemistry4Climate (C4C) hat in einem zwei Jahre andauernden Prozess (Mai 2021 bis April 2023) nach Wegen und Lösungen gesucht, wie die chemisch-pharmazeutische Industrie in Deutschland treibhausgasneutral werden kann. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) bzw. vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aus Mitteln des Klima- und Transformationsfonds gefördert. An dem Prozess haben sich rund 80 Stakeholder aus Industrie, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft beteiligt.

Ein wesentlicher Teil des Stakeholderprozesses waren drei Facharbeitsgruppen (AGs), die sich mit den Themen Energieversorgung und Infrastruktur der Zukunft (AG 1), Kreislaufwirtschaft und Rohstoffversorgung der Zukunft (AG 2) und Regulatorische Rahmenbedingungen (AG 3) auseinandergesetzt haben. Angereichert wurde die Arbeit der AGs durch Kommentare und Vorschläge aus der Wissenschaft („Advisory Board“), von anderen (energieintensiven) Branchen („Sounding Board“) sowie aus dem politischen Raum („politischer Beirat“). Bei den genannten Boards waren ebenfalls verschiedene Stakeholder involviert. Die Governance des Projekts ist in unten stehender Grafik dargestellt:

Die Arbeitsgruppen und Beiräte haben ihre in Schlussfolgerungen und Empfehlungen mündenden Diskussionen jeweils aus Perspektive ihrer individuellen Mitglieder geführt. Basis waren dabei ein Rückblick auf die Roadmap Chemie 2050 sowie insbesondere Zwischen- und Endergebnisse einer Fact-Finding-Studie. Eine Vielzahl von Kommentaren und Hinweisen zu der Fact-Finding-Studie sowie „Stimmungsbilder“ aus den AG- und Board-Sitzungen sind bei der Definition von Szenarien als weiterer wesentlicher Bestandteil des Abschlussberichts von Chemistry4Climate „Wie die Transformation der Chemie gelingen kann“ eingeflossen.



Kernbotschaften Chemistry4Climate

- Angesichts der veränderten geopolitischen Rahmenbedingungen braucht es eine Industriestrategie zur Sicherung eines für die Resilienz des Standortes Deutschland erforderlichen Mindestmaßes an inländischer Grundstoffproduktion.
- Eine klimaneutrale Chemie 2045 benötigt gut 500 TWh Strom aus erneuerbaren Energien zu wettbewerbsfähigen Preisen. Deshalb braucht es neben dem enorm ambitionierten Ausbau der Erneuerbaren und der Infrastruktur auch einen Transformationsstrompreis von 4–6ct/kWh. Sagt nicht nur die Industrie, sondern eine breite Stakeholderschaft, die möchte, dass Transformation gelingt.
- Die chemische Industrie ist bereits heute der größte Nutzer von Wasserstoff und benötigt künftig in etwa die achtfache Menge; CO₂-arm und zu wettbewerbsfähigen Preisen. Ambitionierter Ausbau, diversifizierte Importstrategien, die bürokratiearme Förderung von grünem Wasserstoff und eine bessere Netzregulierung sind dafür die wesentlichen Erfolgsfaktoren.
- Durch umfassendes Recycling von Kunststoffen und die Nutzung nachhaltiger Biomasse kann der Strombedarf um bis zu 180 TWh gesenkt werden – das entspricht der gesamten Produktion aus Wind und Photovoltaik 2022. Auch der Wasserstoffbedarf könnte so halbiert und der Investitionsbedarf der Branche von 40 auf 25 Mrd. Euro deutlich reduziert werden.
- Um die größtmögliche Menge Kohlenstoff entlang der Wertschöpfungskette im Kreislauf zu führen, muss das mechanische Recycling durch chemisches Recycling ergänzt und komplementär eingesetzt werden. Hierfür muss das Kreislaufwirtschaftsrecht/ Abfallrecht entsprechend angepasst werden.
- Für Biomasse braucht es eine Nutzungshierarchie auf Basis einer Mehrfach- und Kaskadennutzung mit hoher Priorität für eine nachhaltige stoffliche Nutzung mit möglichst langlebiger Bindung des enthaltenen Kohlenstoffs. Konkret bedeutet das die Umlenkung gegenwärtig genutzter Biomasse, den Anbau flächenreduzierter Biomasse, eine stärkere Förderung des Waldumbaus sowie die Förderung der Potenziale der Bioökonomie.
- Keine Chemie ohne Kohlenstoff. CO₂ ist eine der wichtigsten Kohlenstoffquellen der Zukunft. CCU ist daher ein Kernelement der Transformationsstrategie der Chemie, ergänzt um CCS. Damit sie gelingen kann, braucht es eine Anerkennung von CCU im ETS.
- Zur effizienten Infrastrukturplanung (Strom, Wasserstoff, CO₂) sollten Planungsprozesse abgestimmt (Systementwicklungsplanung) und zur Begegnung von Nutzungskonkurrenzen (Biomasse, Wasserstoff) das Abstimmen von Transformationspfaden kartellrechtlich ermöglicht werden.
- Transformation kann nur im europäischen Kontext gelingen. Es braucht einen echten Recycling-Binnenmarkt, eine Vollendung des Strombinnenmarktes und einen mindestens europäischen Ansatz für Wasserstoff sowie einen – die Transformation begünstigenden – regulatorischen Rahmen.



Rückblick auf die Roadmap Chemie 2050

Mit der Roadmap Chemie 2050 (im Folgenden auch „Roadmap“) legte der VCI 2019 erstmals eine Studie vor, die einen Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland beschrieb. Die Studie sollte eine Reihe sehr grundsätzlicher Fragen klären, die sich damals noch stellten. So wollte sich die chemische Industrie selbst, aber auch gegenüber Gesellschaft und Politik einen Überblick darüber verschaffen, ob Treibhausgasneutralität in der Chemie überhaupt möglich ist, welche Technologien und Infrastrukturen dafür verfügbar sein müssten, welche betriebswirtschaftlichen Implikationen eine derartige Transformation hätte und welche politischen, regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen dafür erforderlich wären.

Im Rahmen der Roadmap wurden alternative Verfahren untersucht, die für die Herstellung der wichtigsten Basischemikalien, die damals für rund zwei Drittel der Treibhausgasemissionen des Sektors verantwortlich waren. Analysiert wurden sowohl die Treibhausgasemissionen, die in der Produktion selbst entstehen, wie auch die Emissionen, die aus dem Bezug von Strom und Wärme (Dampf) herrühren. Als wichtiges Novum bezog die Roadmap erstmals auch den Kohlenstoffgehalt der chemischen Erzeugnisse als CO₂-Quelle mit ein. Die Studie bildete somit die Situation vollständiger ab, als es für die bis dahin übliche Klimastatistik der deutschen Chemie möglich war. Dadurch stieg der Anteil der Emissionen, die der Chemie zugerechnet werden, deutlich. Ein weiterer Unterschied zu anderen Transformationsstudien bestand darin, dass die Roadmap keine gesamtwirtschaftliche Perspektive, sondern die Perspektive betriebswirtschaftlicher Entscheider:innen einnahm.

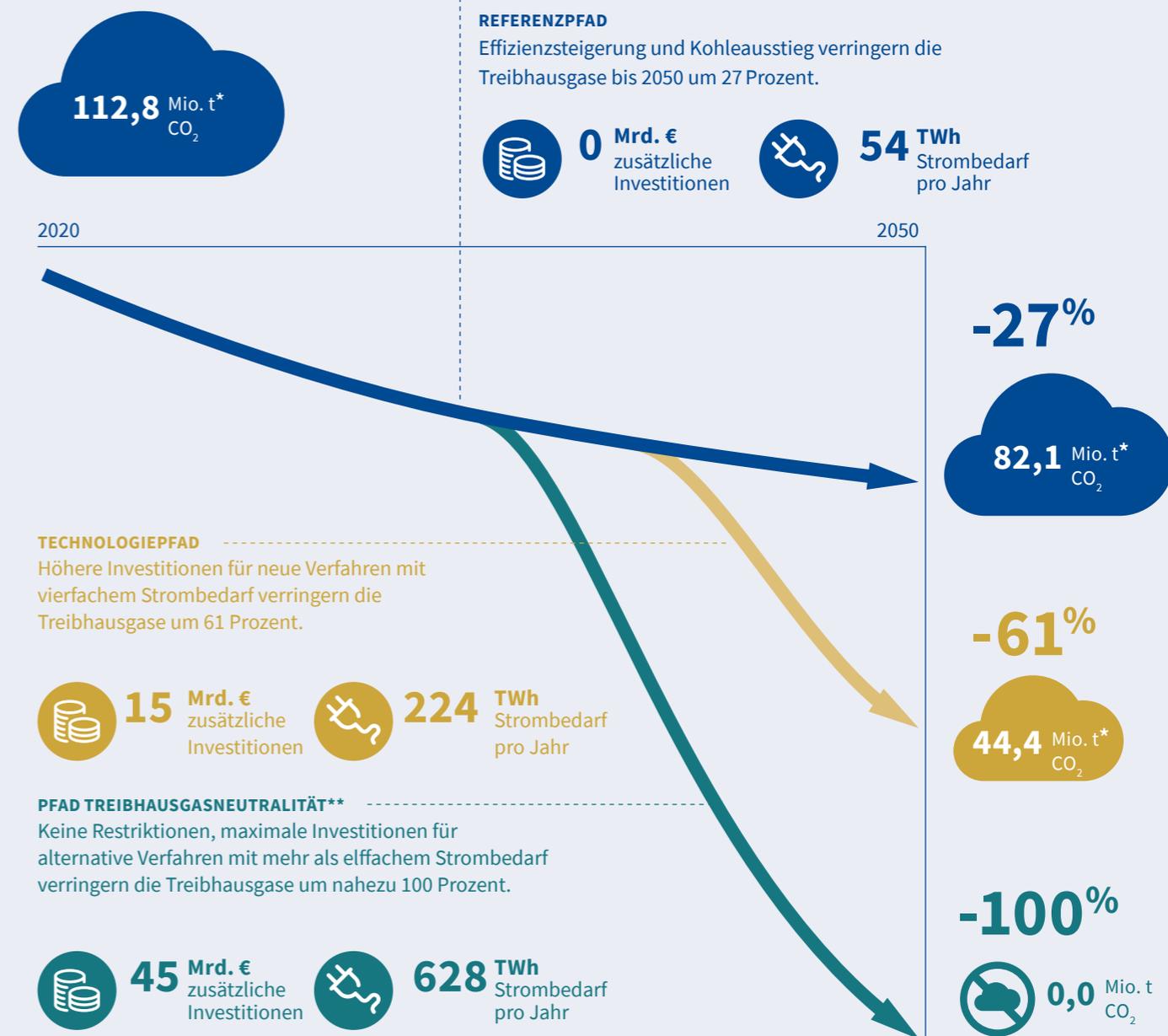
Die Expertenanalyse zeigte, dass die Chemie ihre Treibhausgasemissionen auch in Zukunft weiter senken können würde. Von drei untersuchten Pfaden führte dabei einer zum Ziel der Treibhausgasneutralität 2050. Zwei weitere ergaben Residualemissionen von 44 bzw. 82 Mio. Tonnen CO₂ (2050). Die Pfade stellten also unterschiedliche Ambitionsniveaus dar.

Die Ergebnisse in Kurzform

Treibhausgasemissionen aus Prozessen, Energiebedarf und Produkten*

Annahme Stromkosten:
4 Cent/kWh inklusive Abgaben und Steuern

** Es bleiben geringe Restemissionen, die durch weitere Technologien reduziert werden müssen und nicht Gegenstand der Studie waren.



Im Referenzpfad optimiert die Branche ihren damaligen Anlagenpark weiter und bezieht immer CO₂-ärmeren Strom. Ohne zusätzliche Investitionen und bei 54 TWh jährlichem Strombedarf wird so der CO₂-Ausstoß der Branche zwischen 2020 und 2050 um 27 Prozent von 112,8 Mio. auf 82,1 Mio. Tonnen CO₂ gesenkt. Die Branche profitiert bezüglich der Treibhausgasemissionen in diesem Pfad auch von der Umsetzung des Kohleausstiegs in Deutschland. Insgesamt zeigten die Ergebnisse des Referenzpfads, dass sich die Klimabilanz der deutschen Chemie durch Effizienzmaßnahmen in den Anlagen und den Kohleausstieg bereits bis 2030 deutlich verbessern würde. Nach 2030 hingegen sinkt das Emissionsniveau aber nur noch langsam, das Minderungspotenzial durch die weitere Optimierung konventioneller Prozesse wäre dann nahezu ausgereizt.

Im Technologiepfad fällt die Treibhausgasreduzierung ab 2030 deutlich stärker aus, weil darin stark in neue Prozesstechnologien in der Basischemie investiert wird. Technologien werden dann eingeführt, wenn sie gegenüber der etablierten fossilen Technologie konkurrenzfähig sind. Bei insgesamt 15 Mrd. € zusätzlichen Investitionen und 224 TWh jährlichem Strombedarf im Zieljahr 2050 (dies entspricht in etwa der gesamten Menge Stroms aus erneuerbaren Energien, die 2018 in Deutschland produziert wurde, beziehungsweise dem Stromverbrauch der gesamten deutschen Industrie zur Zeit der Erstellung der Studie) wird der CO₂-Ausstoß der Branche in diesem Pfad zwischen 2020 und 2050 um 61 Prozent von 112,8 Mio. auf 44,4 Mio. Tonnen CO₂ gesenkt. So können energiebedingte Emissionen und Prozessemissionen stark reduziert werden, während Treibhausgasemissionen aus der Nutzung fossiler Ressourcen als Rohstoffquelle und für Verbrennungsprozesse verbleiben, weil diese nur teilweise durch alternative Quellen ersetzt werden können. Weitere Fortschritte erreicht die Branche hier, indem sie Kunststoffe durch ein verbessertes mechanisches und chemisches Recycling wieder als Ausgangsmaterial für die Produktion von Basischemikalien verwendet. Der beschriebene Technologiepfad erfordert, dass eine Reihe an Technologien bis 2040 zur Marktreife

weiterentwickelt wird. Dies macht erhebliche Investitionen der Unternehmen in Forschung und Entwicklung der Verfahren und staatliche Förderung und Unterstützung erforderlich.

Im Pfad Treibhausgasneutralität werden die im limitierten Technologiepfad beschriebenen Anstrengungen noch intensiviert, um die deutsche Chemie 2050 weitgehend treibhausgasneutral zu stellen. Bei insgesamt 45 Mrd. € zusätzlichen Investitionen und 628 TWh jährlichem Strombedarf (dies entspricht der gesamten deutschen Stromproduktion von 2018) im Zieljahr 2050 wird der CO₂-Ausstoß der Branche in diesem Pfad zwischen 2020 und 2050 um 112,8 Mio. Tonnen CO₂ auf nahezu null reduziert. Für die untersuchten Verfahren bleiben nur geringe Restemissionen, die durch weitere Technologien reduziert werden müssen, jedoch nicht Gegenstand der Studie waren. Technologien werden

in diesem Pfad schon dann eingeführt, wenn sich aus ihrem Einsatz eine CO₂-Ersparnis ergibt – unabhängig von ihrer Wirtschaftlichkeit. Von 2035 bis 2050 werden so alle konventionellen Verfahren der Basischemie durch alternative Verfahren ohne CO₂-Emissionen ersetzt. Die größten CO₂-Minderungen werden erst in den 2040er Jahren erbracht, wenn die Technologien in der Breite wirken können und der deutsche Strommix weitgehend dekarbonisiert ist. Allerdings führt die Einführung der neuen, strombasierten Verfahren auch zu einem erheblichen Anstieg des Strombedarfs der deutschen Chemie ab Mitte der 2030er Jahre bzw. des Investitionsbedarfs, wobei der größte Teil ab 2040 nötig wird.

Die wesentlichen politischen Voraussetzungen, von denen die Studie ausgeht, sind die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien zu einem Preis von 4 ct/kWh und eine umfassende Förderung neuer Technologien sowie

eine Unterstützung der Markteinführung durch staatliche Zuschüsse für Investitionen. Als wichtigste politische Rahmenbedingungen wurden das Hinwirken der Politik auf günstige Rohstoffpreise und die regulatorische Anerkennung neuer Technologien als Fortschritt identifiziert, der nicht durch regulatorische Hürden gebremst wird. Eine internationale Klimaschutzvereinbarung sollte vergleichbare Wettbewerbsbedingungen schaffen, und bis zu ihrer Verwirklichung sollten Maßnahmen zum Schutz vor Carbon Leakage erhalten bleiben. Auch sollten Hemmnisse für die Nutzung und Eigenerzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien für die Industrie abgebaut werden.

Die Roadmap Chemie 2050 wurde im Zeitraum Dezember 2018 bis August 2019 durch DECHEMA und FutureCamp unter Mitwirkung eines Begleitkreises des VCI und dort vertretener Unternehmen erarbeitet.





Fortentwicklung der Roadmap im Projekt Chemistry4Climate

Die C4C-Fact-Finding-Studie baut in ihrer Betrachtung der chemischen Industrie und ihrer Transformation zur Treibhausgasneutralität auf der Roadmap auf. Sie wurde jedoch methodisch und hinsichtlich des Betrachtungsrahmens erweitert und mit Blick auf die zugrundeliegenden Annahmen aktualisiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede beschrieben. Ein weiteres wesentliches Element von C4C war die ausführliche Diskussion der Annahmen und (Zwischen-) Ergebnisse des Fact-Finding und damit des Studiendesigns mit einem breiten Stakeholderkreis.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Studien ist die angestrebte Gesamtambition. Zur Zeit der Erstellung der Roadmap wurde noch eine Minderung von 80–95 Prozent bis 2050 angestrebt. Nachdem der Deutsche Bundestag im Juni 2021 in Reaktion auf einen Beschluss des Bundesverfassungsgerichts ein überarbeitetes Klimaschutzgesetz beschlossen hat, ist das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2045 gesetzlich festgeschrieben. Für das C4C-Fact-Finding bedeutet dies, dass der betrachtete Zeithorizont von 2050 auf 2045 vorgezogen wurde.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist jener zu den Wachstumsannahmen. Während die Roadmap mit konstanten Produktionsmengen der Grundstoffchemie und einem leichten jährlichen Zuwachs der Spezialchemie von 2 Prozent rechnet, wird im Fact-Finding hingegen unter Berücksichtigung der VCI-/Prognos-Studie „Wege in die Zukunft – Weichenstellung für eine nachhaltige Entwicklung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie“ (2019) für die Grundstoffchemie ein jährlicher Produktionsrückgang von 0,5 Prozent angenommen, für die Spezialchemie eine jährliche Steigerung von 1,1 Prozent. Die veränderten Wachstumsannahmen stellen eine sehr wichtige Veränderung dar mit deutlichem Einfluss auf die ermittelten Bedarfe. Hinsichtlich der Annahmen zu den Energieeffizienzgewinnen unterscheiden sich die beiden Studien nur in Bezug auf Elektrolyseure, für die eine Effizienzsteigerung auf durchschnittlich 70 Prozent (Roadmap: 60 Prozent) angenommen wurde.

Die Roadmap betrachtet zehn Produkte der Grundstoffchemie. Innerhalb des Fact-Finding werden zusätzlich Buten und Isomere aufgenommen und es erfolgt eine getrennte Betrachtung von Wasserstoff. Die Spezialchemie wird nicht mehr pauschalisiert, sondern nach Sektoren gegliedert aufgenommen. Das C4C-Fact-Finding geht damit sehr viel differenzierter auf die einzelnen Technologien zur Herstellung der untersuchten Produkte ein und umfasst eine erweiterte Anzahl an Prozessen. Neu hinzugekommen ist die Route über Methanol zu Olefinen und Aromaten, so dass ein direkter Vergleich zur Route über synthetisches Naphtha möglich ist. Lediglich die Methanpyrolyse wurde angesichts

einer Neubewertung von Erdgas als Brückentechnologie infolge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine nicht mehr in die Szenarien aufgenommen, sondern nur als Technologie ausgewiesen.

Auf Bedarfsseite wurde ausgehend von den Produktionskapazitäten verschiedener Standorte eine regionale Aufschlüsselung des Wasserstoff- und Strombedarfs vorgenommen, ebenfalls eine Neuerung gegenüber der Roadmap. Ebenfalls wurde der Wärmebedarf für die Grundstoffchemie ausgewiesen. Bei der Spezialchemie erfolgte eine aufgeschlüsselte Betrachtung des Strom- und Wärmebedarfs nach acht Sektoren. Die Roadmap enthielt hierzu keine aufgeschlüsselte Betrachtung und arbeitete stattdessen mit der Annahme, der Kohlenstoff aus der Grundstoffchemie gehe vollständig in die Spezialchemie.

Die Berücksichtigung der Verfügbarkeit der betrachteten Rohstoffe und von Strom aus erneuerbaren Energien konnte durch die Beteiligung der Partner Deutsches Biomasseforschungszentrum, BKV und verschiedener Fraunhofer-Institute seitens der DECHEMA besser mit dem aktuellen Stand der Forschung abgeglichen werden.

Hinsichtlich des Technologiehochlaufs wurden auf Basis des Klimaneutralitätspfades der Roadmap für die drei in Chemistry4Climate betrachteten Szenarien unterschiedliche Annahmen getroffen.

In Bezug auf Kosten werden im Fact-Finding insbesondere Investitionen betrachtet, daher wird auf eine Modellierung energie- und CO₂-bezogener Kosten verzichtet und diesbezüglich auch keine explizite Annahme getroffen. Im Vordergrund der Analysen stehen die Bestimmung von Bedarfen und die Ableitung von Aussagen für Energien, CO₂ und andere Rohstoffe sowie dazugehörige Infrastrukturen.

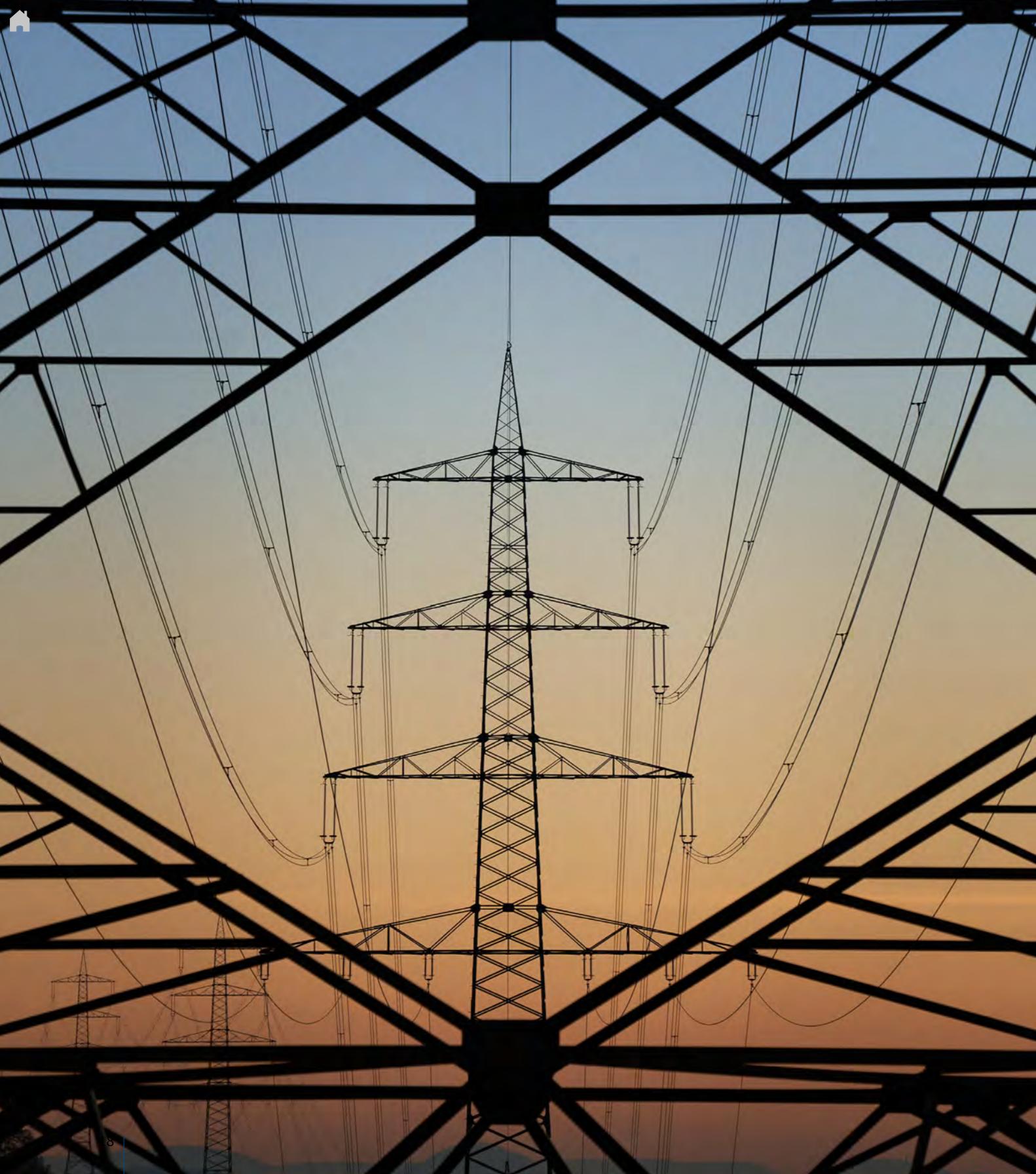
Tabelle 1: Annahmen C4C-Fact-Finding vs. Roadmap Chemie 2050

Parameter	Fact-Finding (2021/22)	Roadmap Chemie 2050 (2019)
Produktionsmengen	- 0,5 % p. a. für die Grundstoffchemie +1,1 % p. a. für die Spezialchemie	0 % p. a. für die Grundstoffchemie +2 % p. a. für die Spezialchemie
Energieeffizienzentwicklung	Grundstoff-/Spezialchemie: 2020: 0,5 % / 2,0 % 2030: 0,2 % / 1,5 % 2040: 0,05 % / 1,0 % 2045: 0,02 % / 0,5 %	Grundstoff-/Spezialchemie: 2020: 0,5 % / 2,0 % 2030: 0,2 % / 1,5 % 2040: 0,05 % / 1,0 % 2050: - % / 0,5 %
Spezialchemie	Aufgeschlüsselte Betrachtung des Strom- und Wärmebedarfs nach 8 Sektoren	Keine aufgeschlüsselte Betrachtung; Annahme: Kohlenstoff aus Grundstoffchemie geht vollständig in die Spezialchemie; kein Import/Export
Produkte	Zusätzlich Buten und Isomere; Wasserstoff getrennt betrachtet; Spezialchemie nach Sektoren	10 Grundchemikalien
Prozesse	Wasserstoff/CO ₂ , für Olefine und Aromaten über MTA/MTO; Biomasse und Kunststoffabfälle über Pyrolyse zu Naphtha	Für Olefine u. Aromaten zusätzlich FT-Naphtha + E-Cracker, Flashpyrolyse von Biomasse, Ethylen über Bioethanol
Wärmebereitstellung	Separat für Grundstoff- und Spezialchemie; 90 % Effizienz bei Power-to-Heat 70 % Effizienz für H ₂ als Brennstoff	Nicht separat betrachtet
Wasserstofferzeugung	Effizienzsteigerung auf Ø 70 %; 47,5 MWh/t H ₂	Konservativ 60 % Effizienz; 55 MWh/t H ₂

Hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen ist das C4C-Fact-Finding differenzierter als die Roadmap. Dies gilt etwa für die Beschaffung, Erzeugung und den Einsatz von grünem sowie blauem, türkischem und grauem Wasserstoff. Das Fact-Finding spiegelt hier den fortgeschrittenen Stand des regulatorischen Umfelds wider und ist enger an die aktuellen Pläne der Bundesregierung angelehnt. Zudem ist das gesamte Thema der Infrastruktur für Wasserstoff, PtX und Strom genauer abgebildet.

Da im C4C-Fact-Finding die oben beschriebenen Analysen im Vordergrund stehen und die Arbeiten zu großen Teilen in der 2. Jahreshälfte 2021 durchgeführt wurden, sind die

durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine ausgelösten Veränderungen, zum Beispiel in den Energiemärkten, nicht in der Modellierung berücksichtigt. Gleiches gilt für die deutlichen Ambitionssteigerungen im europäischen Klimaschutz im Zuge der weiteren Ausgestaltung des Green Deal bzw. von „Fit for 55“, zum Beispiel im EU-Emissionshandel mit der entsprechenden Wirkung auf seit 2019 stark gestiegene Preise für Emissionsberechtigungen. Gleichwohl haben diese in den Diskussionen mit den Stakeholdern insbesondere im Laufe des Jahres 2022 eine große Rolle gespielt und flossen in die Bewertung und weitere Ausgestaltung der auf das Fact-Finding aufbauenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen ein.



Die bei Chemistry4Climate betrachteten Szenarien

Auf Basis des Fact-Finding sowie der erarbeiteten Schlussfolgerungen wurden drei Szenarien zur Erreichung des Ziels der Treibhausgasneutralität bis 2045 untersucht:

- ◆ Szenario 1:
Fokus auf maximale direkte Stromnutzung
- ◆ Szenario 2:
Fokus auf Wasserstoff und PtX-Brenn- und Rohstoffe
- ◆ Szenario 3:
Fokus auf Sekundärrohstoffe (Kunststoffabfälle und Biomasse)

Der Technologiehochlauf folgt grundsätzlich der in der Roadmap getroffenen Annahme, dass eine Implementierung aufgrund der notwendigen Technologieentwicklungen bis zur Marktreife und des Investitionsvorlaufs im Wesentlichen erst ab Mitte 2030 bis 2040 maßgeblich zunimmt. Dies gilt insbesondere für die Szenarien 1 und 2; Szenario 3 weicht hiervon ab. Dieses Szenario beinhaltet die differenzierte Analyse von Biomassepotenzialen sowie den Beitrag von Kunststoffabfällen zur Kohlenstoffversorgung und die

Rolle der (Kunststoff-)Kreislaufwirtschaft. Das Szenario geht von einer größtmöglichen Nutzung jener Rohstoffe bis hin zum maximal verfügbaren Potenzial aus. Der Technologiehochlauf für die Nutzung von Biomasse wird, insbesondere für Waldrestholz im Zuge des Waldumbaus, beschleunigt angenommen, der Einsatz von Kunststoffabfällen folgt mit zeitlichem Versatz. Die Deckung des Kohlenstoffbedarfs wird aufgrund der limitierten Verfügbarkeit dieser Rohstoffe ergänzt um CO₂ aus verschiedenen Quellen.

Tabelle 2: Vergleich der Szenarien; alle angegebenen Werte beziehen sich auf 2045

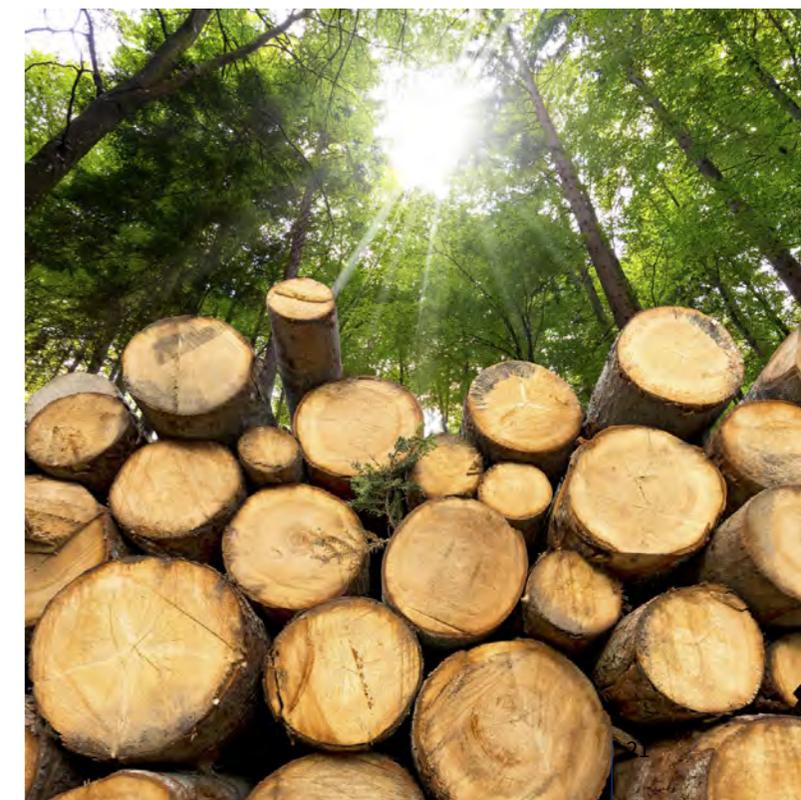
Parameter [Einheit]	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Anmerkung
Strombedarf [TWh]	464	508	325	In Szenario 2 am höchsten wegen hohem H ₂ -Bedarf inkl. Strombedarf für Wasserstoff
Wasserstoffbedarf [TWh]	214	283	148	H ₂ -Bedarf für Fischer-Tropsch-Naphtha und Brennstoff in Szenario 2 besonders hoch
CO ₂ -Bedarf [kt]	44.051	51.977	21.310	Fischer-Tropsch-Naphtha-Route (Szenario 2) hat den höchsten CO ₂ -Bedarf
Biomassebedarf [kt Trockenmasse]	2.700 für Spezialchemie		26.576 für Grundstoff, 2.700 für Spezialchemie	Nutzung zusätzlicher Biomasse und Einsatz in Grundstoffchemie nur in Szenario 3; dann max. verfügbares Potenzial ausgeschöpft
Kunststoffabfallbedarf [kt]	3.160 für Mech. Recycling		3.160 für Mech. Recycling, 2.228 für Chem. Recycling	Chemisches Recycling und Einsatz in Grundstoffchemie nur in Szenario 3; dann max. verfügbares Potenzial ausgeschöpft
Fischer-Tropsch-Naphtha-Bedarf [kt]	-	15.334	6.134	
Bio-Naphtha-Bedarf [kt]	-	-	5.691	Nur in Szenario 3
Methanolbedarf [kt]	30.558	-	-	Nur in Szenario 1 für MTO/MTA zu Olefinen und Aromaten
Nomin. Investitionen [Mio. €]	40.296	40.623	25.676	In Szenario 1 und 2 wegen Investitionen in Elektrolyseure am höchsten

Im Vergleich der drei Szenarien zur Klimaneutralität sind die erheblichen Unterschiede bei den jeweils benötigten Mengen sehr deutlich. Das gilt auch und besonders für die jeweils benötigten Mengen an Strom, Wasserstoff und CO₂ sowie für die Investitionskosten. Je mehr Biomasse und Kunststoffabfälle als Rohstoffe für die Chemieindustrie verfügbar sind, desto geringer sind die Bedarfe an Strom, Wasserstoff und CO₂ samt den dazugehörigen Infrastrukturen sowie – ohne Berücksichtigung der Infrastrukturkosten – auch die Investitionsbedarfe.

Der Strombedarf in den strom- und wasserstoffbasierten Szenarien 1 und 2 von bis zu 500 TWh ist angesichts der geschätzten Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland von 750 bis 1.000 TWh kritisch zu bewerten. Ein Import von Strom, Wasserstoff oder Wasserstoffträgern wie Ammoniak oder Methanol in erheblichem Umfang scheint in diesen Szenarien aus heutiger Sicht unvermeidlich. Der CO₂-Bedarf aus großen stationären Punktquellen ist bis 2045 prinzipiell ausreichend, wobei die tatsächliche Verfügbarkeit dieser Quellen Unsicherheiten unterliegt. Insbesondere unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind entlegene Quellen nur schwer erschließbar. Biomasse und Kunststoffe sind in begrenztem Umfang verfügbar und gerade Biomasse unterliegt einer starken Nutzungskonkurrenz mit anderen Sektoren. Inwieweit mögliche Importe von nachhaltiger Biomasse und Kunststoffabfällen Lücken schließen können, erscheint aus heutiger Sicht zumindest fraglich.

Die Nutzung von Methan für eine Methanpyrolyse ist aufgrund der Versorgungslage und der gegenüber der Dampfpreformierung geringen Wasserstoffausbeute in den Szenarien quantitativ nicht berücksichtigt worden. Auch Carbon Capture and Storage (CCS) in der Chemieindustrie ist in den Szenarien nicht betrachtet worden. Die Nutzung von blauem Wasserstoff würde den Erhalt bestehender Anlageninfrastruktur erlauben, ist aber mit der weiteren Nutzung fossiler Rohstoffe verbunden und erfordert eine zusätzliche Infrastruktur zum Transport und zur Speicherung von CO₂.

Die angenommenen Investitionsbedarfe sind nicht inflationsbereinigt. Sie bleiben in allen Szenarien hoch und beinhalten keine Betriebskostenvergleiche, was in Anbetracht der starken Bepreisung von CO₂ in der EU gerade im Vergleich zu Wettbewerbsregionen außerhalb der EU auch Förderinstrumente sinnvoll erscheinen lässt. Hohe Investitionskosten beruhen in allen Szenarien auf der notwendigen Installation neuer Anlagen (Fischer-Tropsch-Anlagen, zusätzliche Methanolanlagen und Methanol-to-Olefins-/Methanol-to-Aromatics-Anlagen, Pyrolyse- und Vergasungsanlagen für Biomasse und Kunststoffe etc.). Für Cracker wird eine Umrüstbarkeit auf E-Cracker angenommen. Die notwendige Transportinfrastruktur für die alternativen Rohstoffe (CO₂, Biomasse, Abfalllogistik), aber auch für Strom- und Wasserstoffnetze ist nicht inkludiert, sie übersteigen die angenommenen Investitionen um ein Vielfaches. In den wasserstoffbasierten Szenarien sind die Investitionsbedarfe besonders hoch. Es wurden Investitionskosten von 4.000 €/t H₂ angenommen, was ca. 736 €/kW Elektrolyseur-Leistung und einem mittleren Wert entspricht.



Die starken Wechselwirkungen zwischen den Szenarien bezüglich damit einhergehender Bedarfe verdeutlichen auch, welche Bedeutung die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Rechtsakten haben, die insbesondere im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets vorliegen. Zumeist sind diese noch nicht final verabschiedet (zum Beispiel Rechtsakte zur Erneuerbaren-Energie-Richtlinie – RED, Erweiterungen des EU-Emissionshandelssystems – EU-ETS und Einführung des CO₂-Grenzausgleichssystems (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), Sustainable Carbon Cycles, oder sie fehlen noch, wie zum Beispiel Festlegungen zum Umgang mit Carbon Capture and Usage (CCU) im EU-Emissionshandel. Daraus ergeben sich auch Ansatzpunkte für die weitere Ausgestaltung nationaler Strategien, etwa zum Carbon Management.

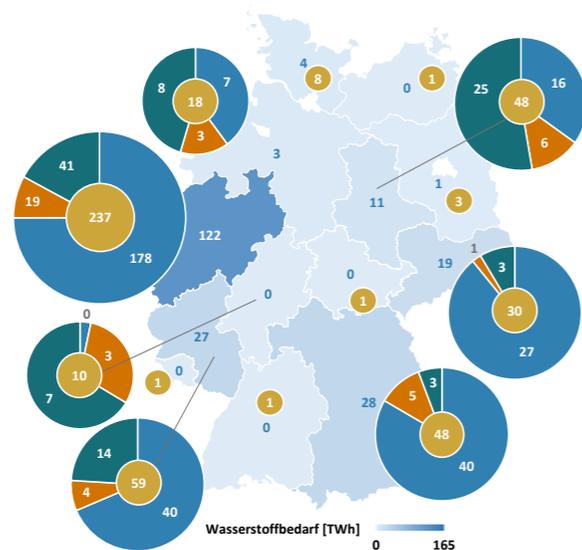
Die Unterschiede zwischen den Szenarien schlagen sich auch bei den abgeschätzten regionalisierten Bedarfen nieder. Die Abbildung stellt den regionalen Wasserstoff- und Strombedarf (untergliedert nach Prozesse, Utilities und Wärme)

gegenüber. Unterschiede treten nur für solche Regionen auf, in denen eine anteilige Grundchemikalienproduktion existiert, die sich entsprechend in den Szenarien niederschlägt. Diese Ergebnisse geben u. a. Anhaltspunkte dafür, dass nicht alle Bedarfe der Chemie zwangsläufig mit bundesweiten Infrastrukturen abgedeckt werden müssen, sondern auch regionalisierte branchenübergreifende Konzepte denkbar sind.

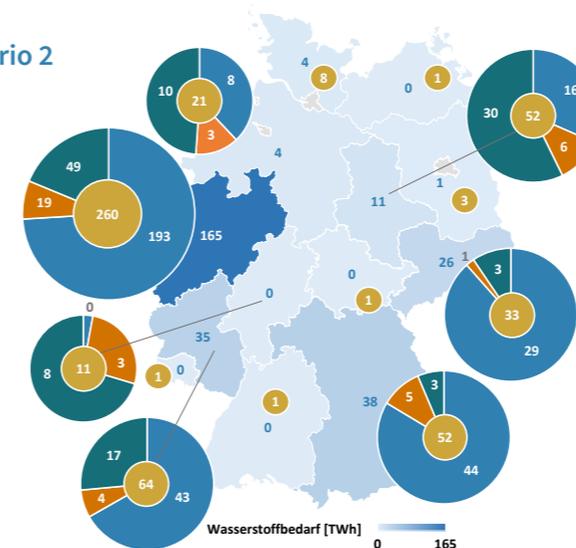
Sowohl bei der Bewertung der einzelnen Szenarien als auch im Vergleich ist stets zu beachten, dass die Szenarien idealtypische Betrachtungen für die gesamte Branche darstellen. Welcher Technologie- und damit einhergehende Klimaneutralitätspfad im jeweiligen Einzelfall und Mix eingeschlagen wird, ist eine auf der Ebene einzelner Unternehmen zu treffende Entscheidung. Trotzdem zeigen die Szenarien das Spektrum und auch die deutliche Fortentwicklung der Arbeiten an der Transformation der Chemieindustrie im Zuge des Prozesses Chemistry4Climate auf.

Abbildung 1: Regionaler Strom- und Wasserstoffbedarf im Jahr 2045, Szenarien 1–3

Szenario 1

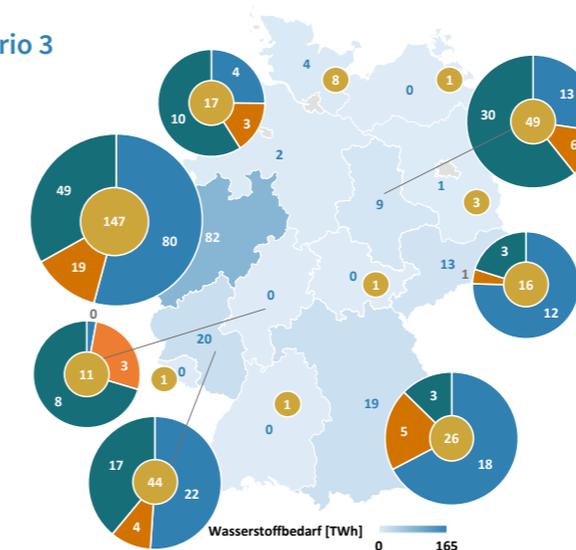


Szenario 2



- Strombedarf Prozesse (in TWh)
 - Strombedarf Utilities (in TWh)
 - Strombedarf Wärme (in TWh)
 - Strombedarf gesamt (in TWh)
- Werte < 10 TWh Strombedarf lediglich summarisch dargestellt

Szenario 3



Die Darstellung der Energie- und Wasserstoffbedarfe nach Bundesländern beruht im Wesentlichen auf den Standorten der produzierenden Unternehmen für die hier näher betrachteten Hauptprozesse sowie einer Analyse der Daten aus Destatis bzgl. Aufschlüsselung des Energiebedarfs auf Landkreisebene. Diese sind jedoch nicht nach Industriesektor aufgeschlüsselt und wurden nicht in die Darstellung einbezogen, wenn sie nicht eindeutig zugeordnet werden konnten. Einige Daten sind darüber hinaus als geheim deklariert und nicht zugänglich. Daher ist diese Darstellung ggf. in einzelnen Bundesländern (zum Beispiel Baden-Württemberg, Hessen und Brandenburg) nicht vollständig und eher als untere Abschätzung zu verstehen.



Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ein wesentlicher Teil des Stakeholderprozesses waren drei Facharbeitsgruppen, die sich mit den Themen „Energieversorgung und Infrastruktur der Zukunft“ (AG 1), „Kreislaufwirtschaft und Rohstoffversorgung der Zukunft“ (AG 2) und „Regulatorische Rahmenbedingungen“ (AG 3) auseinandergesetzt haben. Das zentrale Ergebnisformat der Arbeitsgruppen stellt ein Kapitel zu Schlussfolgerungen und Empfehlungen dar. Hierbei wurden zu insgesamt sechs Themengebieten 33 Thesen formuliert und begründet. In ihnen finden sich differenzierte Einschätzungen von Expert:innen zu den wesentlichen Zukunftsfragen der Branche in Form von konstruktiven Beiträgen. Aufbauend auf den wissenschaftlichen Darstellungen und Modellierungen des Fact-Finding spiegeln sie das sowohl in grundlegender Fachkenntnis als auch in der operativen Praxis verwurzelte Wissen der Gegenwart wider.

Nachfolgend werden wesentliche Aussagen der Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammenfassend und stark verkürzt dargestellt.

Kunststoff-Kreislaufwirtschaft

Kunststoffabfälle können als Sekundärrohstoffe einen großen Teil des Kohlenstoffbedarfs der Chemieindustrie decken. Dahin gehend bedarf es eines Mentalitätsumschwungs in Industrie, Gesellschaft und Politik. Auch muss die erforderliche Qualität der Kunststoffrezyklate gewährleistet werden. Das entscheidende Kriterium für den Umgang mit Stoffströmen in der EU stellt die Ökobilanz in Verbindung mit technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit dar. Eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe muss entlang der gesamten Wertschöpfungskette verwirklicht und die Kreislauffähigkeit von Produkten gemäß einem Design for Circularity bereits bei deren Entstehung mitgedacht werden. Es bedarf eines komplementären Ansatzes für mechanisches und chemisches Recycling, generell muss Technologieoffenheit bei der Weiterentwicklung von Verwertungsverfahren ermöglicht werden. Europa soll als Recycling-Binnenmarkt begriffen und innerhalb dessen bürokratische Hürden in Hinsicht auf Transport und Verwertung von Sekundärrohstoffen abgebaut werden.

Biomasse

Der Einsatz von Biomasse kann einen wesentlichen Beitrag zur Rohstoffversorgung der Chemieindustrie leisten. Klimaschutzwirksamkeit ist das wesentliche Kriterium für den Einsatz nachhaltiger Biomasse. Der Umgang mit Nutzungskonkurrenzen soll durch die Einführung einer Nutzungshierarchie gemäß einer Kaskadennutzung geklärt werden. Stoffliche Nutzungen von Biomasse müssen Vorrang haben, energetische Nutzungen der Biomasse sollten sich eher auf Hochtemperaturprozesse in der Industrie fokussieren, im Idealfall im Verbund mit Abscheidung und Nutzung von CO₂, um so nach einer energetischen eine weitere stoffliche Nutzung zu ermöglichen. So wird auch eine Maximierung der Nutzung von Primärholz und nachwachsenden Rohstoffen in der Chemieindustrie empfohlen. Die Potenziale der Bioökonomie gilt es zu fördern und zu nutzen. Sektorübergreifend sollen Nachhaltigkeitsstandards und -zertifi-

zierungen für Biomasse implementiert werden. Für Importe gilt es, die Gewährleistung der Versorgungssicherheit und Resilienz durch den Einsatz von Biomasse zu thematisieren.

CO₂-Quellen

CO₂ wird als Kohlenstofflieferant in der chemischen Industrie unverzichtbar, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Carbon Capture and Utilization (CCU) wird ein Kernelement der Treibhausgas-Neutralitätsstrategie der Chemie sein. Die notwendige CO₂-Transportinfrastruktur muss vorbereitet und geschaffen werden, gerade hier können auch regionalisierte Konzepte zum Tragen kommen.

Strom aus erneuerbaren Energien

Ein rascher und ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Energien und der notwendigen Stromnetze ist elementare Voraussetzung der Transformation. Bezüglich der Weiterentwicklung der Infrastruktur müssen eine engere Verzahnung und die Berücksichtigung regionaler Bedarfe als Teile des Netzentwicklungsplanungsprozesses stattfinden. Um ihren Gesamtstrombedarf 2045 zu decken, wird die Bundesrepublik auf Importe angewiesen sein. Flexibilitäten (Demand Side Management) müssen genutzt werden, und Strom aus Erneuerbaren muss rund um die Uhr verfügbar gemacht werden. Daher werden auch Speichertechnologien ein essenzieller Bestandteil des zukünftigen Energiesystems sein. Bei Modellierungen sollte künftig eine Berücksichtigung von Wärmebedarfen (Power to Heat) auch auf regionaler Ebene erfolgen.

Wasserstoff

Wasserstoff ist für die chemische Industrie eine wertvolle Zukunftsressource und unterliegt insbesondere während des Markthochlaufs absehbaren Nutzungskonkurrenzen. Der Einsatz von Wasserstoff sollte daher dort angereizt werden, wo er nicht substituiert (insbesondere in der stofflichen Nutzung) und/oder mit hohen Treibhausgaseinsparungen eingesetzt werden kann. Trotz der Notwendigkeit von Importen sollte auf verstärkte heimische und europäische Erzeugung gesetzt werden. Für das Zieljahr 2045 sollte eine ausschließliche Verwendung von grünem Wasserstoff angestrebt werden, wobei während der Transformations-

phase die Nutzung verschiedener Technologieoptionen mit möglichst niedrigem CO₂-Fußabdruck möglich sein soll (technologieoffener Ansatz). Die notwendige leitungsgebundene H₂-Transportinfrastruktur muss geschaffen bzw. bestehende Netze müssen umgewidmet werden. Der Aufbau von Wasserstoff-Speicherkapazitäten wird ein wesentlicher Baustein des künftigen Energiesystems sein.

Finanzierung der Transformation

Strom zu wettbewerbsfähigen Preisen ist und bleibt elementare Voraussetzung für ein Gelingen der Transformation, etwa durch einen international wettbewerbsfähigen effektiv zu bezahlenden Transformationsstrompreis von 4–6 ct/kWh beziehungsweise durch die Senkung der staat-

lichen Preisbestandteile beim Strom. Ebenfalls braucht es einen schnellen Markthochlauf von Wasserstoff – zu international wettbewerbsfähigen Preisen. Die Maximierung des Recycling- sowie des nachhaltigen Biomassepotenzials soll durch Förderprogramme und ein kohärentes finanzielles Anreizsystem vorangetrieben werden, auch zur Dämpfung zusätzlicher Strom- und Wasserstoffbedarfe. Mit Klimaschutzverträgen soll für langfristige Planungssicherheit bei der Transformation gesorgt werden. Schließlich sollten öffentliche Fördermaßnahmen für den Mittelstand angepasst werden.



Herausgeber/V.i.S.d.P. :

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) vertreten durch
Jörg Rothermel
Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) vertreten durch
Ljuba Woppowa

Autor:innen:

Frauke Bierau-Delpont, Kimberly Gabriel, Martin Kaspar
(VCI/VDI; Geschäftsstelle Chemistry4Climate)
Florian Ausfelder, Alexis Bazzanella, Katja Wendler (DECHEMA e.V.)
Roland Geres, Andreas Wehr (FutureCamp Climate GmbH)

Bildnachweis:

Adobe Stock: © eyetronic, © The Cherokee, © Ken Osawa,
© Kampan, © malp, © Grispb, © Jan, © Alberto Masново,
© narawit, © Atstock Productions

Quellenangabe Grafiken:

DECHEMA e.V., Big (©) GeoNames, Microsoft,
TomTom

Auflage: 250 Exemplare

Stand: April 2023

Klimaneutral auf 100 % Recyclingpapier gedruckt,
ausgezeichnet mit dem „Blauen Engel“.

Hier geht's zur
Langfassung:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages