



FFE

Trans4In

Energietransformation im Chemiedreieck Bayern

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bayernets 
energie transport systeme

Tyczka 
HYDROGEN

bayernwerk

WACKER

2022

Trans4In

Energietransformation im Chemiedreieck Bayern



Herausgeber:



Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0

Mail: info@ffe.de

Web: www.ffe.de

Abschlussbericht zum Projekt:

Trans4In

Energietransformation im Chemiedreieck Bayern

Veröffentlicht am:

24.10.2022

FfE-Nummer:

BMBF-06

Autor:innen:

Philipp Hench,
Tobias Hübner,
Serafin von Roon

Projektpartner:

bayernets GmbH,
Bayernwerk AG,
Tyczka GmbH,
Wacker Chemie AG

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen:

03HY201E

RC20220131

Inhalt

Vorwort und Danksagung	7
Zusammenfassung der Kernaussagen	9
1 Was zeichnet das Chemiedreieck aus?	11
2 Wie sind wir bei der Ableitung der Transformationspfade vorgegangen?	16
2.1 Vorgehensweise	16
2.2 Partnerstruktur	19
3 Wie verändern sich die Unternehmen im Bilanzraum durch die Transformation?	20
3.1 Beschreibung der Szenarien: <i>Strom-</i> und <i>Wasserstoffpfad</i>	20
3.2 Ergebnisdiskussion: <i>Strom-</i> und <i>Wasserstoffpfad</i>	22
4 Was müsste außerhalb des Bilanzraums passieren, um die Transformation zu erreichen?	28
4.1 Anforderungen an das Energiesystem durch die industrielle Transformation	28
4.2 Politische Instrumente als Hilfestellung für die Transformation	30
5 Was sagen die Projektpartner von Trans4In?	32
5.1 Statements der Projektpartner von Trans4In	32
5.2 Forderungen von den Projektpartnern an die Politik	33
6 Literatur	34

Vorwort und Danksagung

Die Energiekrise im Jahr 2022 deckt auf wie stark unsere Gesellschaft auf Erdgas angewiesen ist. Drohende Knappheit und die damit einhergehenden hohen Preise belasten neben den privaten Haushalten besonders die energieintensive Industrie. Zur Vermeidung einer Gasmangellage muss der Gasverbrauch kurzfristig deutlich reduziert werden. Blicken wir nicht nur auf die kommenden Winter, sondern auf die kommenden Jahrzehnte und die gegebenen Klimaschutzziele, muss fossiles Erdgas vollständig ersetzt werden. Die fossile Energie, die heute noch durch die Fernleitungsnetze fließt, transportieren wir in Zukunft über Stromtrassen oder Wasserstoffnetze.

Die Studie Trans4In – Energietransformation im Chemiedreieck Bayern verdeutlicht die Dimension der Herausforderung, vor der Industrieunternehmen, Infrastrukturbetreiber und Erzeuger stehen. Die Industrieunternehmen im Chemiedreieck möchten im Sinne ihrer individuellen Pläne zur Dekarbonisierung im Vergleich zum Jahr 2019 doppelt so viel Energie über die Strom- und Gas- bzw. Wasserstoffnetze beziehen - eine Perspektive, die schnelles Handeln von allen Akteuren erfordert.

Trans4In ist Teil des vom Bundesministerium geförderten Projekts „TranHyDE“ und wurde durch die Unterstützung der Projektpartner bayernets GmbH, Bayernwerk AG, Tyczka GmbH und Wacker Chemie AG ermöglicht. Die FfE fungierte als Intermediär der Akteure, welche die Energiewende umsetzen. Als Transformationsbegleiterin ist sie das Bindeglied zwischen Wissenschaft und Praxis.



Teilnehmer:innen des zweiten Begleitkreistreffens

Mein Dank gilt allen Projektpartner:innen, welche an der Studie teilgehabt und sie ermöglicht haben. Ganz besonders möchte ich mich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bei den Industriepartnern im Chemiedreieck bedanken. Folgende Unternehmen bildeten den Untersuchungsgegenstand der Studie und unterstützten das Vorhaben mit ihrer Zeit und Expertise in mehreren Workshops und Gesprächen zu ihren Transformationsstrategien: AlzChem Trostberg GmbH, Borealis Polymere GmbH, Clariant Produkte (Deutschland) GmbH, Dyneon GmbH, InfraServ GmbH & Co., Gendorf KG, Linde GmbH, OMV Deutschland GmbH, Vinnolit GmbH & Co. KG. und Wacker Chemie AG.

Dr.-Ing. Serafin von Roon, Geschäftsführer der FfE

Erklärung

Das dieser Publikation zugrundeliegende Vorhaben „TransHyDE-Sys“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 03HY201E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.



Zusammenfassung der Kernaussagen

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Projektpartnern geförderten Projekts „Trans4In“ hat die FfE Transformationsstrategien von neun energieintensiven Unternehmen der Region (nachfolgend: Bilanzraum) analysiert und zusammengefasst. Die energieintensiven Industrieunternehmen haben ihre Stromnetzanschlusspunkte allesamt im Landkreis Altötting. Im Jahr 2019 verantworteten die Unternehmen rund 80 % des Stromverbrauchs. Zusammen mit den Industriepartnern vor Ort hat die FfE den zukünftigen energieträgerbezogenen Verbrauch prognostiziert (siehe Unterscheidung zwischen Projekt- und Industriepartner in Kapitel 2.2. Die Zahlen liefern die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten zur regionalen Transformation und der damit einhergehenden, notwendigen Energieinfrastruktur. Für die Transformation werden zwei Szenarien betrachtet: der Strompfad und der Wasserstoffpfad. Der *Wasserstoffpfad* unterscheidet sich vom *Strompfad* dadurch, dass die Industriepartner vor Ort ab 2030 von einer überregionalen Wasserstoffversorgung ausgehen und bei unsicheren Technologieentscheidungen die Wasserstoffoption wählen.



Die Planungen der befragten Unternehmen sind auf Klimaneutralität ausgerichtet. Die Transformationsstrategien der Unternehmen sind überwiegend mit dem bayerischen Ziel im Einklang, die Klimaneutralität in 2040 zu erreichen. Im Rahmen der Studie wird bei der Datenerhebung ggü. den Unternehmen das Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2040 vorgegeben [1]. Bei der Analyse zeigt sich jedoch, dass die Transformationspfade der Unternehmen nicht alle mit den Zielen der Landesregierung synchronisiert sind. Einige Unternehmen orientieren ihre Transformationsstrategien an den Zieljahren des Europäischen Klimaschutzgesetzes (2050) [2] oder des Bundes-Klimaschutzgesetzes (2045) [3].



Der Energieverbrauch steigt ausgehend vom Jahr 2019 von 9 TWh/a bis zum Jahr 2050 je nach Szenario auf 16 bzw. 18 TWh/a. Sowohl im *Strompfad* als auch im *Wasserstoffpfad* steigt der gesamte Energieverbrauch aufgrund steigender Wirtschaftsleistung, Erweiterung und Umstellung des Produktportfolios um bzw. auf klimaneutrale Produkte, wie zum Beispiel Sustainable Aviation Fuels, grünes Methanol und der Substitution von energetisch genutzten Koppelprodukten, die beispielsweise als Nebenprodukte bei der Verarbeitung von Rohöl entstehen. Der Anteil des Strom- und Wasserstoffverbrauchs erhöht sich dabei, da das Erdgas vollständig

substituiert wird. Im *Wasserstoffpfad* ergibt sich ein Energieverbrauch von 16 TWh/a, der sich mit 10,7 TWh/a auf den Stromverbrauch und 5,5 TWh/a auf den Wasserstoffverbrauch aufteilt. Der gesamte Energieverbrauch im *Strompfad* liegt bei 18 TWh/a, wobei bei diesem Szenario der Wasserstoff mittels Elektrolyse bei den Industriepartnern vor Ort produziert wird.



Die Umsetzungswahrscheinlichkeit der Projekte ist abhängig von den wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen und kann aus Studiensicht daher nicht abschließend beurteilt werden.

Die beteiligten Unternehmen haben in den Befragungen die Projekte skizziert, die sie auf dem Weg zur Klimaneutralität anstreben. Ob die Projekte tatsächlich umgesetzt werden und ob der resultierende Energieverbrauch in Zukunft eintritt, hängt von ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab, die in Trans4In nicht berücksichtigt werden.



Ohne die Anbindung an die überregionale Wasserstofftransportinfrastruktur (European Hydrogen Backbone) ist der prospektive Stromverbrauch in der Region deutlich höher.

Bei dem Ansatz der strombasierten Produktion von Wasserstoff via lokaler Elektrolyse (*Strompfad*) in der Region, liegt der Stromverbrauch bei rund 18 TWh, und ist damit um 7 TWh höher als bei einer Versorgung der Region mit Wasserstoff aus dem Transportnetz.



Den Transformationsstrategien der Unternehmen folgend verdoppelt (im Szenario Wasserstoffpfad) bzw. vervierfacht (im Szenario Strompfad) sich der Leistungsbedarf aus dem Stromnetz nahezu.

Der erhöhte Strom- und Wasserstoffverbrauch hat entsprechende Implikationen auf die netzseitigen (Anschluss-) Kapazitäten. Ohne Anschluss an das Wasserstoffnetz vervierfacht sich die benötigte Stromnetzkapazität im Zuge der Transformation. Aber auch mit dem Anschluss an das Wasserstoffnetz ist eine Verdopplung der Stromnetzkapazitäten nötig, um die Transformationsstrategien der Unternehmen umzusetzen.



Der Ausbau erneuerbarer Energien ist Grundlage für eine erfolgreiche Transformation im Chemiedreieck Bayern.

Die Unternehmen des Chemiedreiecks benötigen für die Transformation große Mengen erneuerbarer Energien in Form von Strom und Wasserstoff. Hierzu bedarf es der starken Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung.

1 Was zeichnet das Chemiedreieck aus?

Das Gelingen der Energiewende in der Industrie ist entscheidend für das Ziel Deutschlands, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen [3]. Der Freistaat Bayern möchte darüber hinaus bereits bis 2040 klimaneutral werden. Dazu soll gemäß dem Bericht aus der bayerischen Kabinettsitzung vom 28. Juni 2022 das Bayerische Klimaschutzgesetz angepasst werden [1].

Um die bayerischen Klimaziele zu erreichen und gleichzeitig die Wirtschaftskraft zu erhalten, spielt die Transformation des Chemiedreiecks Bayern eine besondere Rolle. Die Industrie im Landkreis Altötting verbrauchte im Jahr 2019 durchschnittlich 18 GWh/km². Der bayerische Mittelwert liegt bei 1,1 GWh/km² [4]. In 2019 verbrauchten die gesamten Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes in Altötting Strom in Höhe von 4,7 TWh [5]. Dies entspricht etwa 6 % des bayerischen Stromverbrauchs¹. Der Anteil des Landkreises am Gasverbrauch Bayerns ist vergleichbar und beträgt etwa 7 %² [6]. Aus ökonomischer Perspektive trägt der Landkreis Altötting etwa 1 % zum bayerischen Bruttoinlandsprodukt bei (5,4 Mrd. bei 643,4 Mrd. in Bayern) [7]. Ein Drittel (32,5 %) der Beschäftigten in der bayerischen Chemiebranche arbeitet im Landkreis Altötting sowie im benachbarten Landkreis Mühldorf [8].

¹ Endenergieverbrauch in Bayern in 2019 – Strom: 77 TWh

² Gasverbrauch von Altötting in Regionalstatistik nur bis 2012 veröffentlicht. Dieser beträgt in 2012 5,6 TWh und entspricht 6,9 % des Gasverbrauchs in Bayern (EEV in Bayern in 2012 – Gase: 81 TWh)

An Trans4In beteiligen sich neun energieintensive Unternehmen (nachfolgend Industriepartner genannt), die wie in Abbildung 1-1 dargestellt ihre Standorte größtenteils in Altötting betreiben.

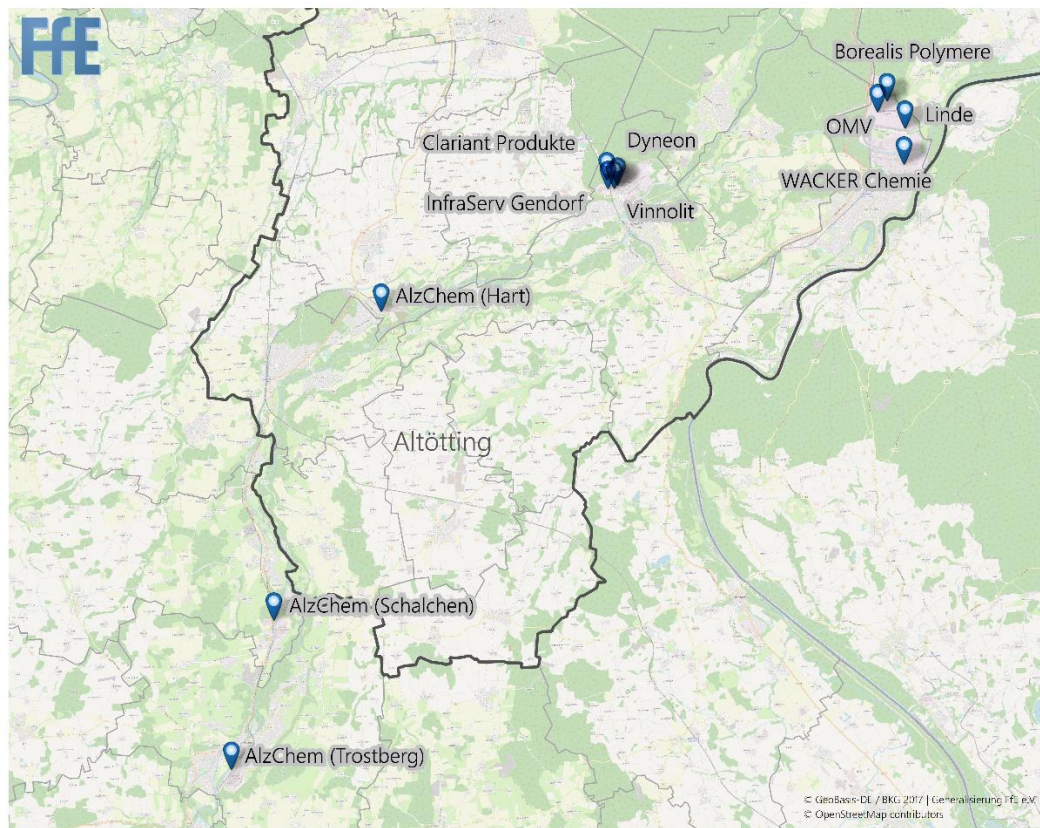


Abbildung 1-1: Standorte der Industriepartner

Sie sind Untersuchungsgegenstand der Studie und bilden den Bilanzraum. Geografisch unterteilt sich der Bilanzraum in drei Cluster. Im Chemiepark Gendorf (Cluster *Gendorf*), dessen Energieversorgung durch die InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG betrieben wird, sitzen die Unternehmen Dyneon GmbH, Vinnolit GmbH & Co. KG und Clariant Produkte (Deutschland) GmbH. Weitere Unternehmen im Chemiepark Gendorf sind in Summe für lediglich ca. 5 % des Energieverbrauchs des Chemieparks verantwortlich und werden im Rahmen der Studie nicht befragt. In Zusammenarbeit mit dem Chemieparkbetreiber InfraServ werden diese Verbräuche in Summe in den Bilanzraum einbezogen. In Burghausen (Cluster *Burghausen*) betreiben die Unternehmen WACKER Chemie, OMV Deutschland GmbH, Borealis Polymere GmbH und Linde GmbH ihre Produktionsanlagen. Ebenso werden die Anlagen des Unternehmens Siltronic AG³ in Burghausen berücksichtigt. Die AlzChem Trostberg GmbH betreibt Standorte in Trostberg, Hart und Schalchen (Cluster *AlzChem*). Infrastrukturell sind die drei Standorte via direkter Gasnetzverbindung und Stromleitungen innerhalb des Chemieparks Trostberg verbunden. Der Stromnetzanschlusspunkt befindet sich im Landkreis Altötting. Im Chemiepark Trostberg zählen nur die Produktionsanlagen der AlzChem Trostberg GmbH zum Bilanzraum. In Summe deckt der Bilanzraum in Trans4In etwa 80 % des Stromverbrauchs im Landkreis Altötting ab.

³ Siltronic AG ist kein Industriepartner von Trans4In und wurde im Rahmen der Studie nicht befragt

Abbildung 1-2 visualisiert den Energieverbrauch (links) und die Emissionen (rechts) der Unternehmen des Bilanzraums im Basisjahr 2019. Neben den ausgewiesenen Energiemengen beziehen die Unternehmen geringe Mengen Heizöl. Die Bezugsmengen sind im Vergleich zum Strom- und Erdgasverbrauch klein. Abbildung 1-2 vernachlässigt sie deshalb.

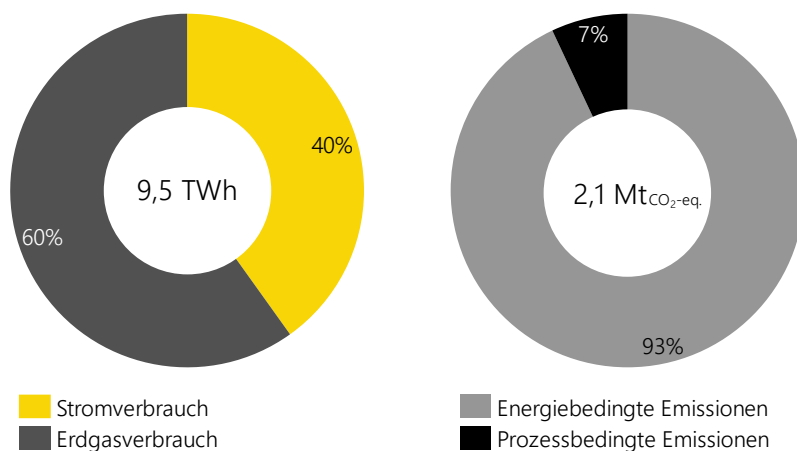


Abbildung 1-2: Energieverbrauch (links) und Scope 1-Emissionen (rechts) im Bilanzraum von Trans4In

In Summe verbrauchen die Unternehmen des Bilanzraums 9,5 TWh an Energie, welche sich aus 40 % Strom und 60 % Erdgas zusammensetzt (links). Darüber hinaus nutzen die Unternehmen Energie, welche im Material „Rohöl“ gebunden ist und bei der Umwandlung im Steamcracking-Prozess als Koppelprodukt anfällt. Ebenso entstehen bei ausgewählten Prozessen, wie beispielsweise der Carbid Herstellung, Koppelprodukte, die sich für die energetische Weiterverwertung eignen. Um den externen Energiebezug auszuweisen und Analysen hinsichtlich der prospektiv notwendigen Strom- und Erdgasinfrastruktur zu erleichtern, vernachlässigt Abbildung 1-2 die innerhalb des Bilanzraums entstehenden, energiereichen Koppelprodukte. Die in Abbildung 1-2 dargestellten Energieträger werden den Unternehmen des Bilanzraums leitungsgeliefert über das Strom- sowie das Erdgasnetz zur Verfügung gestellt. Die energetisch genutzten Koppelprodukte fließen über den Stoffstrom, bspw. über die Transalpine Pipeline (TAL-Pipeline), in den Bilanzraum. Stoffströme klammert die Studie im Wesentlichen aus.

Die Unternehmen des Bilanzraums emittieren in Summe Emissionen i.H.v. 2,1 Mt_{CO₂-eq.} (siehe Abbildung 1-2 rechts), welche zu 93 % auf den Energieverbrauch (energiebedingt) und zu 7 % auf die Umwandlungsprozesse der Materialien (prozessbedingt) zurückzuführen sind (Scope 1, Stromemissionen nicht berücksichtigt).^{4, 5}

⁴ Scope 1-Emissionen werden bei den Unternehmen erfragt. Methodisch werden die prozessbedingten Emissionen über die Differenz zwischen den Scope 1-Emissionen und den energiebedingten Emissionen (berechnet über Emissionsfaktoren) ermittelt.

⁵ Da die nationalen Emissionsbilanzierung (nationale Inventarberichte) und die Sektorziele der Industrie am Quellprinzip orientiert sind, werden die Stromemissionen auch in diesem Bericht nicht dem Industriesektor zugeordnet

Abbildung 1-3 schlüsselt die Energieflüsse des Bilanzraums weiter auf.

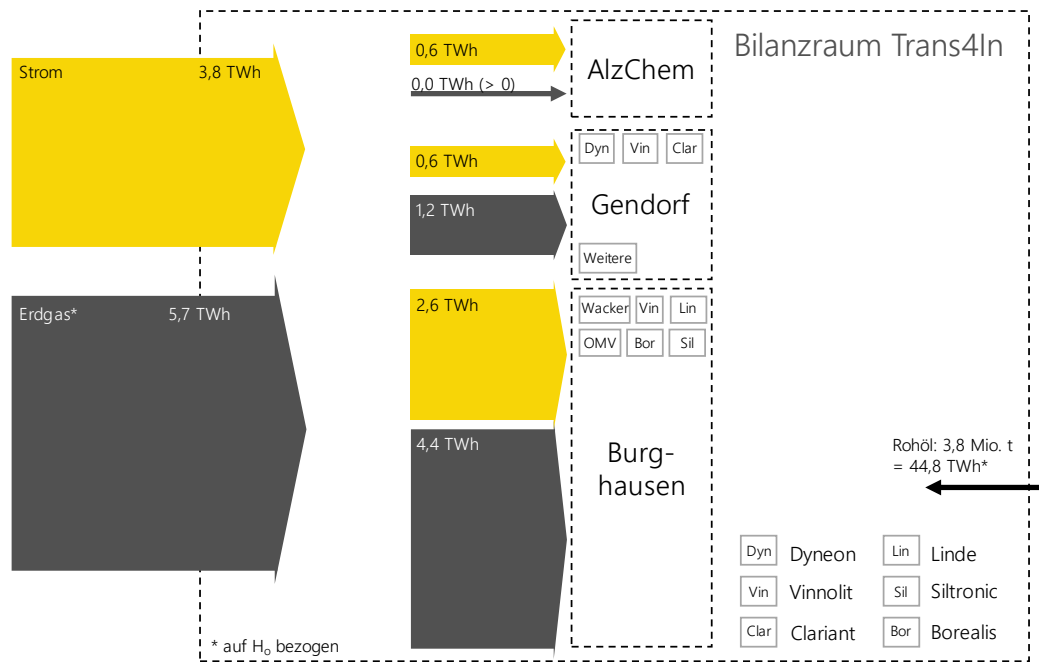


Abbildung 1-3: Energieflüsse im Bilanzraum Trans4In im Jahr 2019

Gleichermaßen entnehmen AlzChem sowie der Chemieparks Gendorf dem Stromnetz 0,6 TWh. In Burghausen werden 2,6 TWh Strom aus dem Netz bezogen. Dies entspricht allerdings nicht dem Endenergieverbrauch des Bilanzraums. Drei Unternehmen erzeugen via Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Dampf und Strom, welche wiederum innerhalb des Bilanzraumes verbraucht und nicht dem Netz entnommen werden. Das Erdgas wird laut Abbildung 1-3 zu 4,4 TWh in Burghausen und zu 1,2 TWh in Gendorf verbraucht. Die Werte entsprechen dem Nettobezug aus dem Gasnetz, nicht jedoch dem Endenergieverbrauch der Unternehmen. Die Unternehmen verwerten zusätzlich Koppelprodukte, die bei der Produktion als Nebenprodukt anfallen. 2019 wurden beispielsweise insgesamt 3,8 Mio. t Rohöl eingesetzt. Beim Dampfcracken von Kohlenwasserstoffen (*engl. steamcracking*) fallen neben dem Zielprodukt „Ethylen“ Koppelprodukte an, die zuvor im Edukt des Prozesses (Rohöl bzw. Rohbenzin oder Naphta) gebunden sind und anschließend teilweise zur Energiebereitstellung im Steamcracker genutzt werden (z. B. Methan) [9], [10]. Vom ursprünglichen Energiewert des Rohöls (44,8 TWh) nutzen der Steamcracker und weitere Prozesse knapp 9 % (3,9 TWh) für die Bereitstellung der notwendigen Prozesswärme [11].

Nachfolgend zu Kapitel 1 beschreibt der Bericht in Kapitel 2 die Methoden der Studie. Anschließend befasst sich Kapitel 3 mit der Transformation der Unternehmen im untersuchten Bilanzraum. Die Ergebnisse der Studie werden zudem diskutiert und eingeordnet. Auf Kapitel 3 aufbauend beschreibt Kapitel 4 die Voraussetzungen für die Transformation außerhalb des Bilanzraums. Abschließend geben die Projektpartner in Kapitel 5 ihre Einschätzung zur Studie und der Transformation im Chemiedreieck Bayern wieder.

Einordnung der angegebenen Zahlen

Systemstudien geben in der Regel den Endenergieverbrauch an. In Trans4In werden die leitungsgebundenen Energieflüsse über das Strom-, Erdgas- und prospektive Wasserstoffnetz in den Bilanzraum betrachtet und als Energieverbrauch bezeichnet. In diesem Sinne unterscheidet sich der Energieverbrauch vom Endenergieverbrauch, wenn innerhalb der Bilanzgrenze Energieträger umgewandelt werden (z. B. Erdgas in Strom und Dampf) oder bei Prozessen Koppelprodukte entstehen, die energetisch weiterverwertet werden, an den Bilanzgrenzen allerdings in den stofflichen Fluss integriert sind.

Primärenergie bezeichnet den Energieinhalt von natürlich vorkommenden Energieträgern, die noch keiner weiteren Verarbeitung unterzogen wurden, wie z. B. Holz, Erdgas oder Steinkohle in der Lagerstätte. Die regenerativen Energien, wie z. B. Wind und Sonne, zählen hier ebenfalls dazu.

Sekundärenergie wird durch verlustbehaftete Umwandlung aus Primärenergie gewonnen. Beispielhaft ist hier die Herstellung von Heizöl aus Erdöl oder die Wandlung von solarer Strahlung / Windenergie in Strom.

Unter Endenergie versteht man denjenigen Teil der Primärenergie, welcher schließlich dem Verbraucher zur Verfügung steht, wie z. B. Benzin an der Tankstelle, Fernwärme im Haushalt oder synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff in der Industrie.

Scope 1- , Scope 2- und Scope 3-Emissionen

Im Scope 1 befinden sich direkte Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen), die vor Ort von Quellen ausgestoßen werden, die den Unternehmen gehören, oder von ihnen kontrolliert werden. Verbrennungsöfen und Fahrzeuge, aber auch prozessbedingte Emissionen, werden im Scope 1 bilanziert.

Scope 2 umfasst die indirekten THG-Emissionen, die bei der Produktion und Bereitstellung von extern bezogener Energie, wie beispielsweise Strom oder Fernwärme, anfallen.

Die Scope 3-Emissionen beinhalten Emissionen, die in der vorgelagerten und nachgelagerten Wertschöpfungskette aufgrund der unternehmerischen Aktivitäten entstehen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Emissionen, die bei der Herstellung von eingekauften Materialien, bei Geschäftsreisen oder durch die Entsorgung der hergestellten Produkte entstehen. [12]

2 Wie sind wir bei der Ableitung der Transformationspfade vorgegangen?

Die Studie „Trans4In – Energietransformation im Chemiedreieck Bayern“ ist mit der Unterstützung vieler Partner entstanden. Das Kapitel beschreibt das Vorgehen und die Partnerstruktur. Abbildung 2-1 visualisiert die Methodik in vereinfachter Form. Kapitel 2.1 beschreibt die Methoden näher. Kapitel 2.2 stellt die Partnerstruktur von Trans4In dar.



Abbildung 2-1: Visualisierung der Methodik

2.1 Vorgehensweise

Die nachfolgenden zehn Punkte fassen die Vorgehensweise in Trans4In zusammen:

1. **Unternehmenskontakt:** In Rücksprache mit den Projektpartnern werden ansässige Unternehmen im Chemiedreieck Bayern kontaktiert und das Partizipationsinteresse abgefragt. Dabei fokussiert sich Trans4In geografisch auf die Gemeinden Burghausen und Burgkirchen. Um die Relevanz der Unternehmen für die Studie zu bewerten und geeignete Unternehmen auszuwählen, schätzt die FfE initial den Energieverbrauch auf Basis öffentlich verfügbarer Datensätze und Unternehmensinformationen ab. Neun energieintensive Unternehmen der Region bilden schließlich den untersuchten Bilanzraum der Studie.
2. **Vertraulichkeitserklärung:** Energiedaten sowie deren Entwicklung sind sensible Daten für energieintensive Unternehmen. Deshalb werden Vertraulichkeitserklärungen zwischen den Industrieunternehmen und der FfE geschlossen.
3. **Begleitkreistreffen I:** Eine Auftaktveranstaltung zum Projekt in Burghausen initiiert die Studie. Ziel der Veranstaltung ist es, das Projekt vorzustellen und ein einheitliches Verständnis hinsichtlich der Projektziele und -inhalte zu erreichen. Zudem trägt das persönliche Kennenlernen der Projektpartner zu einer erhöhten Partizipationsbereitschaft und einer geeigneten Kommunikation bei. Am ersten Begleitkreis nehmen die Projektpartner⁶ sowie die an der Studie teilnehmenden Industrieunternehmen⁷ und interessierte Stakeholder aus Wissenschaft, Verbänden, und Industrie teil.

⁶ bayernets GmbH, Bayernwerk AG, Tyczka GmbH und Wacker Chemie AG

⁷ AlzChem Trostberg GmbH, Borealis Polymere GmbH, Clariant Produkte (Deutschland) GmbH, Dyneon GmbH, InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG, Linde GmbH, OMV Deutschland GmbH und Vinnolit GmbH & Co. KG

4. **Erhebung und Aufbereitung unternehmensspezieseller Transformationspfade:** Im Anschluss an die Auftaktveranstaltung startet die Erhebung unternehmensspezieseller Transformationspfade. In einem ersten Schritt wird ein für das Projekt entwickelter Fragebogen an die Partner versendet. Der Fragebogen fokussiert sich auf die Erhebung der energieintensiven Prozesse, des Energieverbrauchs und der Emissionen ausgehend vom Status Quo bis ins Jahr 2050. Zu Beginn wird den Unternehmen das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 kommuniziert. Die Strategien einzelner Unternehmen sind allerdings mit den deutschen, bzw. europäischen Zieljahren synchronisiert. Deshalb wird das Stützjahr 2050 als Zieljahr hinzugezogen, sodass sich am Ende der Transformationspfade die Scope 1-Emissionen aller Unternehmen nahe null befinden. Auf Basis der Rückmeldungen werden die Ergebnisse des Fragebogens gemeinsam mit den Industrieunternehmen in Fachgesprächen diskutiert und ggf. ergänzt bzw. erweitert. Darauf aufbauend werden die bereits geplanten disruptiven THG-Verminderungsmaßnahmen der Unternehmen aufgenommen und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die Anschlussleistung abgeleitet. Neben der Datengrundlage aus dem Fragebogen und den Gesprächen dienen Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen, wie beispielsweise die Umwelterklärungen der Unternehmen sowie die NEP-Gas-Datenbank, als Berechnungsgrundlage [13]. Die Energieverbräuche, die dazugehörigen Leistungen sowie die geplanten Maßnahmen bilden den Transformationspfad auf Unternehmensebene, der im nächsten Schritt mit den Transformationspfaden der anderen befragten Unternehmen zusammengeführt wird.
5. **Aggregation der unternehmensspeziesellen Transformationspfade:** Um die Vertraulichkeit der Daten sicherzustellen und einen Überblick zu geclusterten Regionen zu erhalten, werden die Daten und Diagramme aggregiert. Die Ergebnisse werden ausschließlich als Cluster veröffentlicht. Leistungs-, Energie- sowie Emissionsdaten sind sensible Daten für Unternehmen. Besonders prognostizierte Unternehmensdaten ermöglichen Rückschlüsse auf deren Strategie. Trans4In möchte vermeiden, dass bei der wissenschaftlichen Arbeit Wissenslücken offenbleiben, weil Unternehmen Daten aus Vertraulichkeitsgründen nicht zur Verfügung stellen. Um die Herausforderung zu lösen wird vereinbart, dass die Daten ausschließlich in aggregierter Form veröffentlicht werden.
6. **Begleitkreistreffen II:** In einem zweiten Begleitkreistreffen werden die Zwischenergebnisse diskutiert und erstes Feedback eingeholt. Anschließend präsentieren die bayernets GmbH und die Bayernwerk AG den aktuellen Stand der regionalen Strom- und Wasserstoffnetzentwicklung. In einer methodisch als Fishbowl mit dem gesamten Plenum umgesetzten Diskussion bringt der Begleitkreis konkrete Wünsche über weitere einzubeziehende Akteure und konkrete Umsetzungsvorschläge ein. Dabei gilt der Fokus auch dem Austausch zwischen den Akteuren.
7. **Weitere Rückmeldungen und Einarbeitung des Feedbacks:** Die Phase nach dem 2. Begleitkreistreffen wird genutzt, um die Ergebnisse zu finalisieren und das Feedback der einzelnen Akteure einzuarbeiten. Des Weiteren werden Verständnisprobleme identifiziert, die im Abschlussbericht konkret adressiert werden. Der Abschlussbericht wird in dieser Phase begonnen und im engen Austausch mit den Projektpartnern geschrieben.
8. **Abschlussveranstaltung bzw. Begleitkreistreffen III:** Der Abschlussbericht wird im Zuge der Abschlussveranstaltung veröffentlicht und final mit den Akteuren diskutiert.

Politik, Wissenschaft, Presse und Industrie sind eingeladen, sich an der Diskussion zu beteiligen.

Ü1: Begleitender Stakeholder-Prozess: Trans4In wird durch einen intensiven Stakeholder-Prozess begleitet. Neben der Koordination und Kommunikation zwischen den Industrie- und Projektpartnern werden zum einen weitere Projektvorhaben in der Region in die Studie eingebunden. Zum anderen werden weitere Partner mit in den Begleitkreis aufgenommen und separate Workshops, bspw. zur Netzentwicklung auf Übertragungsebene mit Tennet, durchgeführt.

Ü2: Wissensaustausch zwischen Trans4In und TransHyDE-Sys: Um den Wissenstransfer in die Praxis zu unterstützen, baut Trans4In auf die bislang vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse des Forschungsprojekts „TransHyDE-Sys“ auf. So dient die initial in TransHyDE-Sys vorgenommene Regionalisierung der deutschen Industrieverbräuche u. a. dazu, den in Trans4In bottom-up erhobenen und auf Landkreisebene aggregierten, energieträgerbezogenen Verbrauch abzugleichen. Darüber hinaus erarbeitet TransHyDE-Sys technoökonomische Parameter zu potenziell klimaneutralen Verbrauchstechnologien wie Wärmepumpen, Elektrokesseln und alternativen Verfahrensrouten, die in Trans4In als Grundlage zur Erarbeitung der Transformationspfade dienen.

Die Ergebnisse des Projekts „Trans4In“ sind im Wesentlichen den Ergebnissen des übergeordneten Projekts „TransHyDE-Sys“ vorgelagert. Um den Wissenstransfer praxisnaher Lösungen aus Trans4In in TransHyDE-Sys zu unterstützen, werden die Kernergebnisse von Trans4In in einem TransHyDE-Verbundtreffen vorgestellt und mit den Konsortialpartnern diskutiert. Liegen die finalen Ergebnisse aus TransHyDE vor (voraussichtlich Ende 2024), erfolgt ein Abgleich zwischen der praxisnahen und der mit den Modellen errechneten theoretischen Transformation. Als Regionalstudie erlaubt Trans4In einen tieferen Einblick in die praxisnahe Transformation und liefert Erkenntnisse, die Modelle bislang nur unzureichend abbilden können. Um die Erkenntnisse aus TransHyDE in die Praxis zu transferieren und zu spiegeln, sind nach Abschluss von Trans4In zudem halbjährliche Lenkungscreistreffen in 2023 und 2024 vorgesehen.

2.2 Partnerstruktur

Der Erfolg des Projekts ist vielen Partnern zu verdanken, die sich in das Vorhaben eingebracht haben. Im Kapitel wird die Partnerstruktur erklärt und die einzelnen Partner vorgestellt. Das Projekt unterscheidet drei Gruppen, die sich teilweise überschneiden. Die Gruppen visualisiert Abbildung 2-2.

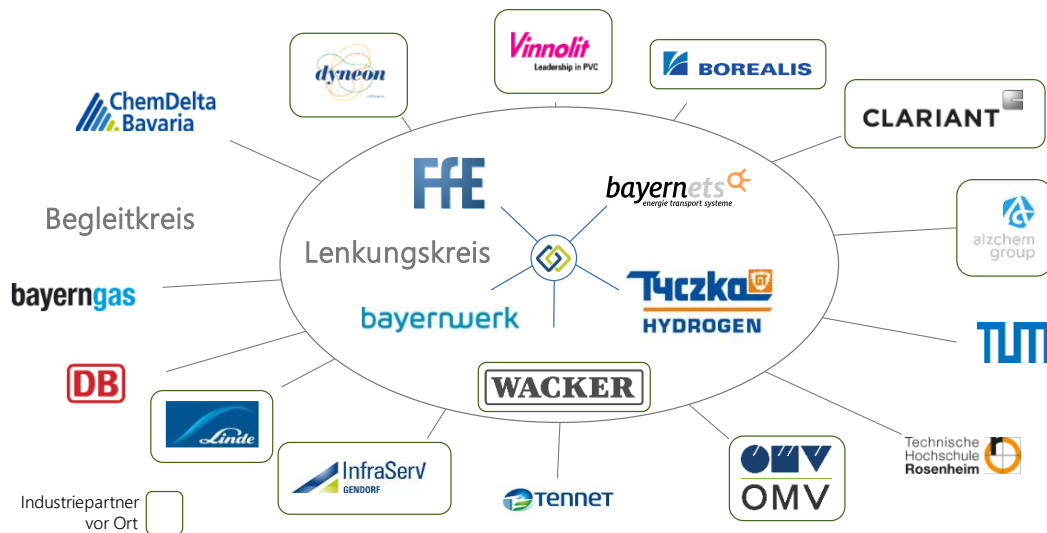


Abbildung 2-2: Partnerstruktur in Trans4In

- **Lenkungskreis:** Mitglieder des Lenkungskreises sind die Projektpartner bayernnets GmbH, Bayernwerk AG, Tyczka GmbH und Wacker Chemie AG; diese haben Trans4In mit ihrer Expertise eng begleitet. Die Projektpartner sind ebenfalls assoziierte Projektpartner im übergeordneten Forschungsprojekt TransHyDE-Sys.
- **Industriepartner vor Ort:** Die Industriepartner vor Ort bilden den Bilanzraum und gleichzeitig den Untersuchungsgegenstand der Studie. Neben der Wacker Chemie AG, welche gleichzeitig Projektpartner der Studie ist, sind folgende Unternehmen den Industriepartnern zuzuordnen: AlzChem Trostberg GmbH, Borealis Polymere GmbH, Clariant Produkte (Deutschland) GmbH, Dyneon GmbH, InfraServ GmbH & Co., Gendorf KG, Linde GmbH, OMV Deutschland GmbH und Vinnolit GmbH & Co. KG.
- **Begleitkreis:** Weitere relevante Stakeholder bilden den Begleitkreis. Neben den Mitgliedern des Lenkungskreises und den Industriepartnern vor Ort sind folgende Organisationen Teil des Begleitkreises: Initiative ChemDelta Bavaria, Technische Universität München, Technische Hochschule Rosenheim, Bayerngas GmbH, DB Cargo AG und Tennet TSO GmbH.

3 Wie verändern sich die Unternehmen im Bilanzraum durch die Transformation?

Ausgehend vom Status Quo bedingt die Transformation der Unternehmen im Bilanzraum wesentliche Änderungen des Energiemix und der Emissionen in der Region. In der kurzen Frist können Unternehmen meist detaillierter planen als in der langen Frist. Langfristig erhöht sich bei der Unternehmensplanung die Unsicherheit hinsichtlich der zu wählenden Transformationsoptionen. Dabei bewegen sich die Transformationsoptionen der Unternehmen im Spannungsfeld zwischen dem Einsatz der beiden potenziell klimaneutralen Energieträger „Strom“ und „Wasserstoff“. Die Studie begegnet der Unsicherheit in der langen Frist durch die Ausarbeitung zweier Transformationspfade, die sich zum einen verstärkt auf den Einsatz von Strom (*Strompfad*), zum anderen auf den Einsatz von Wasserstoff (*Wasserstoffpfad*) fokussieren. Die Studie präsentiert in diesem Kapitel die Ergebnisse der beiden Transformationspfade.

Die ausgewiesenen Ergebnisse umfassen den energieträgerbezogenen Verbrauch, die Anschlussleistung sowie die Scope 1-Emissionen je Stützjahr (2019, 2025, 2030, 2040, 2050). Darüber hinaus werden die disruptiven Transformationsoptionen in geclusteter Form beschrieben. Zuvor zeigt das Kapitel die grundsätzliche Transformation der Chemiebranche auf, welche deduktiv auf die Transformation der Unternehmen in Trans4In übertragen werden kann.

3.1 Beschreibung der Szenarien: *Strom-* und *Wasserstoffpfad*

Der Bilanzraum in Trans4In umfasst relevante Akteure in der Chemiebranche. Deutschlandweit zählt die Chemiebranche (Grundstoffchemie und Sonstige Chemische Industrie, Zeilen 49 und 50 in der Energiebilanz) mit einem Anteil von knapp 24 % am industriellen Endenergieverbrauch zu den größten Verbrauchern im verarbeitenden Gewerbe [14]. Überwiegend setzt die Chemiebranche Strom und Erdgas zur Wärmeerzeugung ein [14]. Mit Windenergie- und Photovoltaikanlagen stehen im Bereitstellungssektor bereits etablierte Optionen zur Verfügung, um den Emissionsfaktor für den Strommix zu verringern. Das Erdgas nutzt die Chemieindustrie hauptsächlich zur Dampferzeugung [15]. Mit der industriellen Großwärmepumpe besteht eine vollelektrische Alternative zur erdgasbasierten Dampferzeugung im Niedertemperaturbereich (bis etwa 140 °C) [16]. Bei höheren Temperaturen (bis etwa 500 °C) können Elektro- bzw. Elektrodenkessel genutzt werden [15]. Spezielle Prozessanlagen wie der elektrische Steamcracker [9], [15] verringern bisherige energiebedingte Emissionen bei der Erzeugung von Prozesswärme im Hochtemperaturbereich. Ebenso können Wasserstoffbrenner hohe Temperaturniveaus erreichen und zum Ersatz fossiler Prozesswärmeerzeugung beitragen [17]. Alternativen wie das MTO-Verfahren ermöglichen es zudem, die mit den Grundprodukten einhergehenden Emissionen zu verringern. So produziert das MTO-Verfahren Ethylen basierend auf Methanol statt auf fossilem Naphtha [18]. Im Gegensatz zu Naphtha kann Methanol potenziell klimaneutral aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden [19]. Grundsätzlich gilt, dass die Chemieindustrie die Rohstoffbeschaffung von Naphtha auf recycelte oder erneuerbare Rohstoffe umstellen muss. Im bereits beschriebenen MTO-Verfahren sind Wasserstoff und CO₂ die Edukte der Produktionskette. Darüber hinaus können Biomasse, Altkunststoffe sowie

synthetisches bzw. biobasiertes Naphtha nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren das fossile Naphtha ersetzen [20].

Neben petrochemischen Produkten werden im Bilanzraum auch Heizöl, Diesel und Kerosin hergestellt. Letzteres dient hauptsächlich der Versorgung des Münchner Flughafens [11]. Für den Flugverkehr bestehen, neben der Option synthetische bzw. biobasierte Kraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels SAF) einzusetzen, aus heutiger technischer Sicht kaum Alternativen zur Defossilisierung. Alternative Antriebssysteme, welche auf Strom und Wasserstoff basieren, befinden sich noch in der Entwicklung. Deren Marktreife und flächendeckende Anwendung über alle Distanzen erscheint in den kommenden zwei Jahrzehnten als unwahrscheinlich [20].

Die ausgewiesenen Scope 1-Emissionen der Chemieindustrie können im Wesentlichen in zwei Gruppen unterteilt werden. Neben Emissionen infolge der Verbrennung fossiler Energieträger (energiebedingte Emissionen) verursacht die Produktumwandlung (z. B. Herstellung von Calciumcarbid) sowie Energieträgerverluste prozessbedingte Emissionen.

Die beiden Szenarien *Strompfad* und *Wasserstoffpfad* sind im Lichte dieser grundlegenden Entwicklungen in der Chemieindustrie zu betrachten. In den Transformationspfaden entscheiden die Unternehmen, welche Prozesse und Technologien sie im Rahmen der Transformation einsetzen. Die grundsätzlichen Möglichkeiten gehen auf vergleichbarer Lösungsansätze zurück, die auch in bestehenden Systemstudien skizziert werden [20], [21].

Neben der Umsetzung von Transformationsoptionen, welche sich hauptsächlich auf den Energieverbrauch und die Emissionen auswirken, enthalten die Pfade Wachstumserwartungen der Unternehmen. Die Wachstumserwartungen erhöhen den Energieverbrauch.

Allgemein muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen der Studie keine ökonomischen Analysen durchgeführt werden. Somit kann keine Aussage über die Umsetzungswahrscheinlichkeit der einzelnen Transformationsoptionen getroffen werden. Im Fokus der Szenarien stehen die Umsetzungsprojekte, welche für ein klimaneutrales Chemiedreieck Bayern erforderlich sind. In beiden Szenarien wird die energetische Nutzung von Biomasse nicht in Betracht gezogen, da die logistische Anbindung des ChemDeltas über die Bahn laut Experteninterview mit DB Cargo bereits die Kapazitätsgrenzen ausreizt und restliche verfügbare Kapazitäten für die stoffliche Nutzung von Biomasse bevorzugt werden.

Abbildung 3-1 visualisiert die unterschiedlichen Rahmenbedingungen des *Strompfads* (links) und des *Wasserstoffpfads* (rechts).



Abbildung 3-1: *Strompfad* und *Wasserstoffpfad*

Im *Strompfad* (links) wird angenommen, dass ab 2030 ausreichende Stromversorgungskapazitäten verfügbar sind. Bei der Entscheidung unter Unsicherheit (Wasserstoff oder Strom) in der langen Frist bevorzugt das Szenario folglich Transformationsoptionen, die auf eine direkte Elektrifizierung des Verbrauchs abzielen. Im

Strompfad wird der notwendige Wasserstoff hauptsächlich mittels strombasierter Elektrolyse innerhalb des Bilanzraumes hergestellt.

Im Gegensatz zum *Strompfad* geht der *Wasserstoffpfad* davon aus, dass eine Anbindung des bayerischen Chemiesdreiecks ans überregionale Wasserstofftransportnetz erfolgt und ausreichend Wasserstoffmengen über das Transportnetz zur Verfügung stehen. Bei der Entscheidung unter Unsicherheit in der langen Frist bevorzugt das Szenario folglich Transformationsoptionen, die Wasserstoff nutzen.

3.2 Ergebnisdiskussion: *Strom-* und *Wasserstoffpfad*

Abbildung 3-2 zeigt den aggregierten Energieverbrauch des Bilanzraumes zwischen 2019 und 2050 im Wasserstoffpfad (H₂) und im Strompfad (EL).

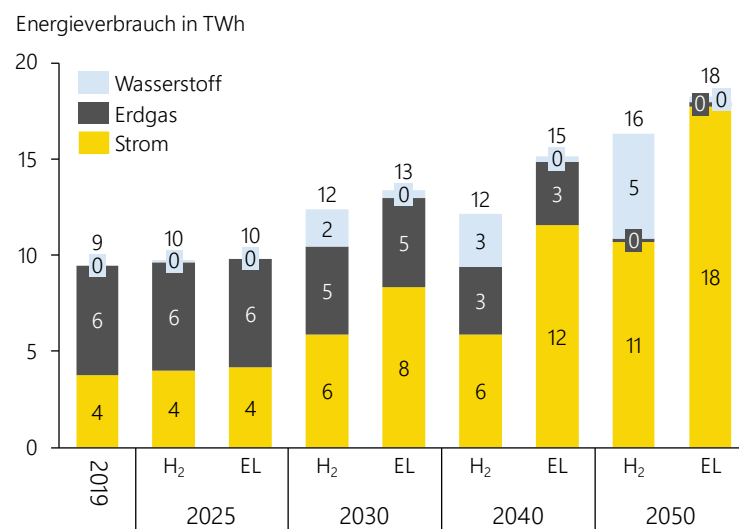


Abbildung 3-2: *Wasserstoffpfad* (H₂) und *Strompfad* (EL) - Energieverbrauch in TWh

Im *Strompfad* verdoppelt sich der Energieverbrauch von ~9 TWh in 2019 auf ~18 TWh in 2050. Im *Wasserstoffpfad* steigt der Energieverbrauch auf ~16 TWh in 2050. Die Steigerung des Verbrauchs ist auf drei Aspekte zurückzuführen:

- Einige Unternehmen im Bilanzraum gehen von einem Anstieg der Wirtschaftsleistung aus. Dabei erhöht die Wirtschaftsleistung den Verbrauch stärker als ihn Effizienzsteigerungen senken.
- Die Erweiterung um klimaneutrale Produkte mündet teilweise in einem erhöhten Energieverbrauch. Die Produktion von synthetischen Brennstoffen wie zum Beispiel SAF, grünes Methanol erfordert zum einen erneuerbaren Wasserstoff als stoffliches Edukt und zum anderen Energie für die Synthese.
- Zudem erhöhen sich die ausgewiesenen energetischen Verbräuche, da ein Teil der zuvor im Stofffluss (Rohöl als Edukt) gebundenen Energie infolge der Transformation durch Strom und Wasserstoff ersetzt wird. Bei der Verarbeitung von Rohöl oder Kalkstein entstehen beispielsweise Koppelprodukte, die vergleichbar zu Erdgas sind und bisher ausschließlich energetisch genutzt werden.

Neben der Steigerung des Energieverbrauchs verdeutlicht Abbildung 3-2 die zunehmende Substitution des Erdgases durch klimaneutrale Alternativen. Die bisher eingesetzten

KWK-Anlagen zur Dampf- und Stromproduktion werden Schritt für Schritt durch strombasierte Alternativen substituiert und ab 2030 komplett ersetzt. Die dadurch wegfallende Stromproduktion innerhalb des Bilanzraums wird durch einen zusätzlichen Netzbezug aufgefangen. Hinzu kommt ein Mehrbedarf an elektrischer Energie für die Dampfproduktion infolge des Einsatzes von Wärmepumpen (bis etwa 140 °C) und Elektrodenkesseln im *Strompfad*. Analog wird im *Wasserstoffpfad* Niedertemperaturdampf durch Wärmepumpen bereitgestellt, wohingegen die Hochtemperaturwärme teilweise mittels Wasserstoffbrennern erzeugt wird. Beispielsweise wird der Erdgasverbrauch beim Steamcracking und bei weiteren Produktionsprozessen elektrifiziert oder durch Wasserstoff ersetzt. Obwohl der Fokus der Studie nicht auf der inkrementellen Effizienzsteigerung liegt, gehen einige Unternehmen durch die verbesserte Abwärmenutzung von relevanten Wärmeeinsparungen aus.

Im *Strompfad* wird der stofflich benötigte Wasserstoff in der Region per Elektrolyse vor Ort produziert und deshalb in der Darstellung in Abbildung 3-2 nicht separat ausgewiesen. Die Energie zur Wasserstoffproduktion ist im *Strompfad* als elektrische Energie bilanziert. Im *Wasserstoffpfad* dagegen wird der Wasserstoff nicht im Bilanzraum hergestellt, sondern über ein überregionales Wasserstoffnetz bezogen. Da die Herstellung durch die Elektrolyse nicht innerhalb des Bilanzraums erfolgt, ergibt sich in Summe im *Wasserstoffpfad* ein niedrigerer Gesamtenergieverbrauch als im *Strompfad*.

Der in Abbildung 3-2 ausgewiesene Wasserstoffverbrauch entspricht dem kumulierten Energieverbrauch der einzelnen Unternehmen des Bilanzraums. So entsteht im *Strompfad* ab 2025 ebenfalls ein Wasserstoffverbrauch (> 0), der nicht durch die jeweiligen Unternehmen selbst produziert wird. Durch einen regionalen Transfer zwischen den Unternehmen kann der Verbrauch gedeckt werden. So entsteht schon heute Wasserstoff als Koppelprodukt bei der Chlorelektrolyse, der bisher überwiegend energetisch bei der Chlorproduktion verwertet wird. Darüber hinaus sind einzelne Unternehmen bereit, Wasserstoffproduktionskapazitäten über den eigenen Verbrauch hinaus aufzubauen.

Abbildung 3-3 ergänzt den zeitlich aufgelösten Energieverbrauch um die Emissionen der Szenarien.

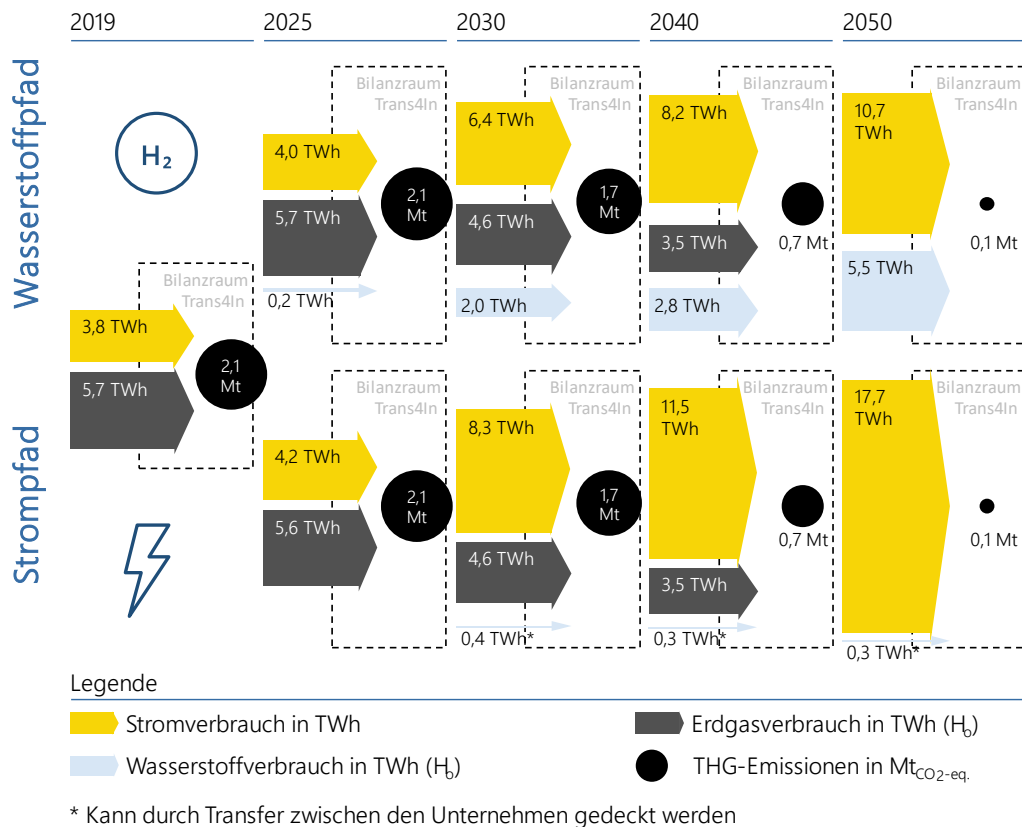


Abbildung 3-3: Entwicklung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen des Bilanzraumes in MtCO₂-eq/a (Scope 1, stofflich und energetisch)

Sowohl im *Strom-* als auch im *Wasserstoffpfad* sinken die Scope 1-Emissionen auf 0,1 MtCO₂-eq. in 2050. In beiden Pfaden entwickeln sich die Emissionen nahezu identisch, da die unterschiedlichen Transformationsoptionen zu vergleichbaren Einsparungen führen und zu den gleichen Zeitpunkten umgesetzt werden. Die Umstellung der Dampfproduktion von Erdgas auf alternative Energieträger wird zum Beispiel in beiden Szenarien in einem ähnlichen Zeitraum durchgeführt. Die THG-Emissionen sinken dementsprechend um denselben Betrag. Lediglich die Wahl des potenziell klimaneutralen Energieträgers (Strom oder Wasserstoff) unterscheidet sich. Zudem ist bemerkenswert, dass die Emissionen bis zum Jahr 2025 kurzzeitig ansteigen, bevor sie bis 2050 kontinuierlich sinken. Dieser Anstieg ist auf kurzfristig zu erwartende Erhöhungen der Wirtschaftsleistung zurückzuführen. Die Wachstumserwartung prognostizieren die Unternehmen selbst. Sie werden keiner Realitätsprüfung unterzogen. Die Daten können aufgrund ihrer Vertraulichkeit nicht veröffentlicht werden.

Hauptsächlich werden die energiebedingten Emissionen durch die Substitution des Erdgases vermieden. Des Weiteren bestehen prozessbedingte Emissionen, die jedoch, wie in Abbildung 1-2 dargestellt, nur einen kleinen Anteil der Emissionen im Bilanzraum ausmachen. Wie bereits beschrieben, zählt die Verbrennung von Koppelprodukten zu den prozessbedingten Emissionen. Diese können substituiert oder via Carbon Capture and Use (CCU) abgeschieden und dem Stoffkreislauf zugeführt werden. Durch die Abscheidung und Nutzung des unvermeidbaren CO₂, das zu chemischen Produkten wie Methanol oder weiteren synthetischen Brennstoffen verarbeitet werden kann, erhöht sich der Energieverbrauch bei

gleichzeitig sinkenden Scope 1-Emissionen. Für eine Klimaneutralität müsste der gebundene Kohlenstoff dauerhaft im Stoffkreislauf bleiben. Alternativ können die Produkte basierend auf biogenen Rohstoffen hergestellt werden. Als Beispiele können das Projekt zur SAF-Herstellung der OMV [22] sowie das Projekt Rhyme Bavaria der Wacker Chemie genannt werden [23].

Abbildung 3-4 weist die sich ergebenden Anschlussleistungen aus.

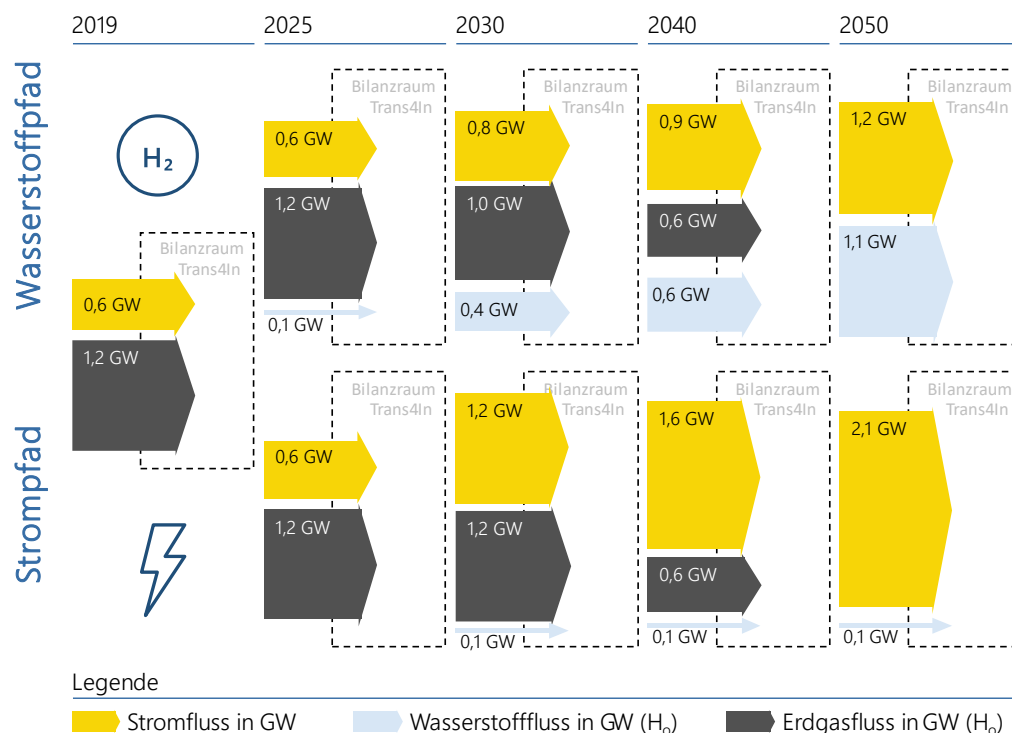


Abbildung 3-4: Wasserstoffpfad und Strompfad - Anschlussleistung in GW

Im Wasserstoffpfad verdoppeln sich die Stromnetzanschlussleistungen von etwa 0,6 GW auf 1,2 GW in 2050 gegenüber 2019. Die Wasserstoffnetzanschlussleistung umfasst etwa 1,1 GW in 2050. Damit entspricht die Wasserstoffnetzanschlussleistung in etwa der Anschlussleistung von Erdgas in 2019. Im Strompfad ergibt sich aufgrund der inhärenten Logik des Szenarios keine relevante Wasserstoffanschlussleistung. Die Unternehmen decken die Wasserstoffverbräuche des Strompfads unilateral innerhalb des Bilanzraums. Die Stromnetzanschlussleistung steigt dagegen stark von 0,6 GW auf 2,1 GW. Die lokale Wasserstoffproduktion im Strompfad sowie die hohe Saisonalität des Dampfverbrauchs sind der Haupttreiber dafür und prägen den Unterschied zwischen den Stromnetzanschlussleistungen im Strom- und Wasserstoffpfad. Weiterhin ergeben sich in den Stützjahren 2030 und 2040 sowohl ein Wasserstoff- als auch ein Erdgasverbrauch. In dieser Übergangszeit benötigen die Unternehmen sowohl einen Anschluss an ein Erdgas-, als auch an ein Wasserstoffnetz.

Abbildung 3-5 bis Abbildung 3-8 schlüsseln die zuvor beschriebenen Energieverbräuche und Anschlussleistungen auf einer niedrigeren Aggregationsstufe auf.

Abbildung 3-5 zeigt zunächst die Energieverbräuche des *Wasserstoffpfads*.

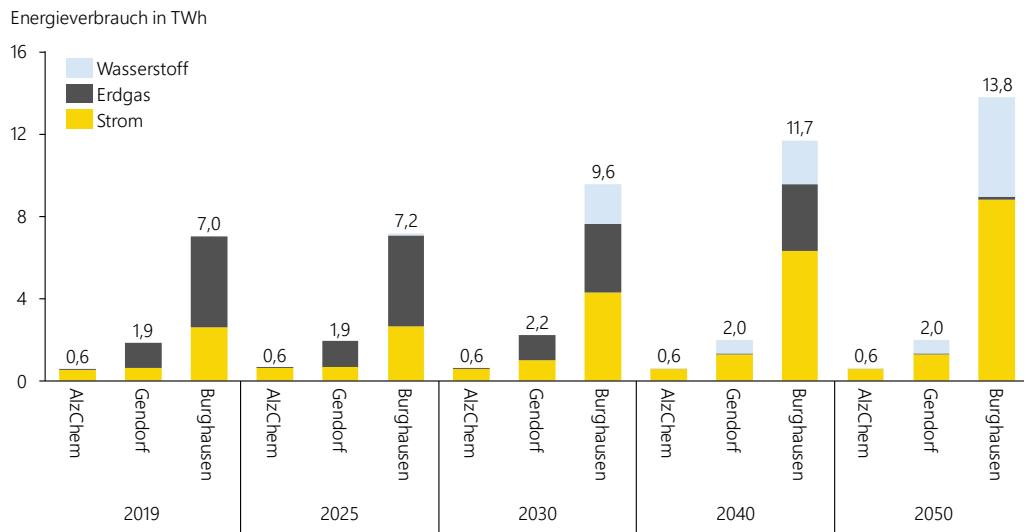


Abbildung 3-5: *Wasserstoffpfad* - geclusterter Energieverbrauch

Der Bilanzraum ist in die Cluster *AlzChem*, *Gendorf* und *Burghausen* unterteilt (siehe Definition in Kapitel 1). Es wird deutlich, dass der Verbrauch im Cluster *Burghausen* aufgrund der bereits genannten Aspekte (Wirtschaftswachstum, neue Produkte, Substituierung der energetisch genutzten Koppelprodukte) stark zunimmt, während die Verbräuche in den Clustern *AlzChem* und *Gendorf* auf gleichem Niveau verbleiben. Der Verbrauch im Cluster *AlzChem* ist bereits im Jahr 2019 stark strombasiert und verändert sich bis 2050 nur marginal. Der Gesamtverbrauch in *Gendorf* bleibt ebenfalls konstant.

Abbildung 3-6 schlüsselt die Energieverbräuche des *Strompfads* aus Abbildung 3-2 auf einer niedrigeren Aggregationsstufe auf.

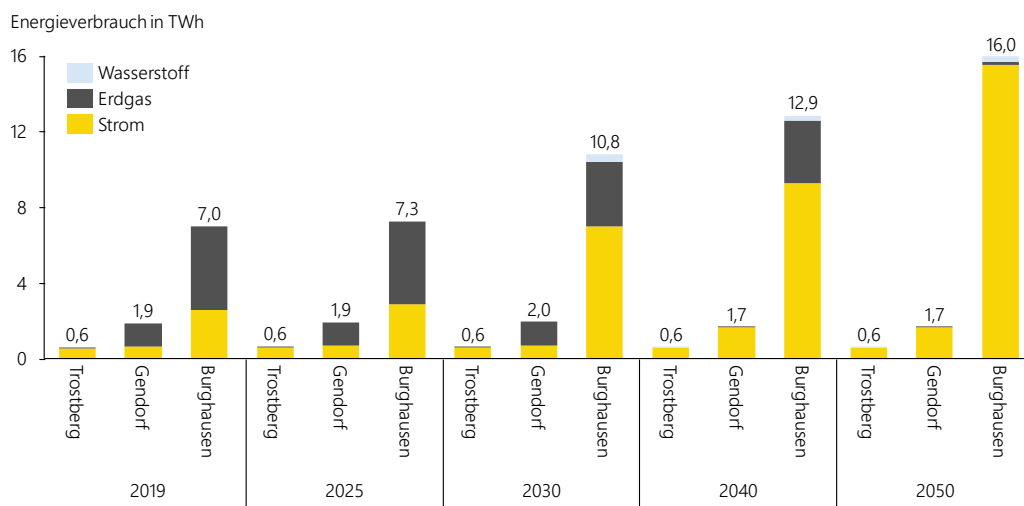


Abbildung 3-6: *Strompfad* - geclusterter Energieverbrauch

Der Verzicht auf die überregionale Wasserstoffversorgung im *Strompfad* resultiert in einem hohen Elektrifizierungsgrad in allen Clustern. Vergleichbar zur Abbildung 3-5 ist ein hoher Anstieg des Energieverbrauchs im Cluster *Burghausen* zu verzeichnen.

Abbildung 3-7 schlüsselt die Anschlussleistungen aus Abbildung 3-4 auf einer niedrigeren Aggregationsstufe auf.

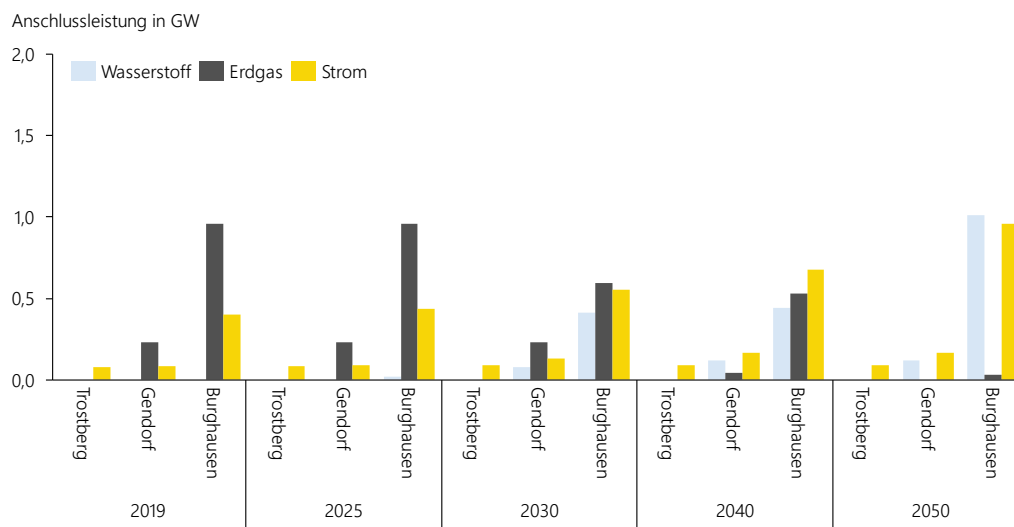


Abbildung 3-7: *Wasserstoffpfad* – geclusterte Anschlussleistungen

Es wird deutlich, dass im *Wasserstoffpfad* die größte Anschlussleistung für Wasserstoff im Cluster *Burghausen* verortet ist. Aber auch *Gendorf* bezieht Wasserstoff über das Netz. Das Cluster *AlzChem* ist in den Szenarien nicht auf einen Anschluss an das Wasserstoffnetz angewiesen. Trotz hoher Anschlussleistungen für Wasserstoff steigt zudem der Bedarf an Stromnetzanschlussleistung deutlich.

Abbildung 3-8 schlüsselt die Anschlussleistungen aus Abbildung 3-4 auf einer niedrigeren Aggregationsstufe auf.

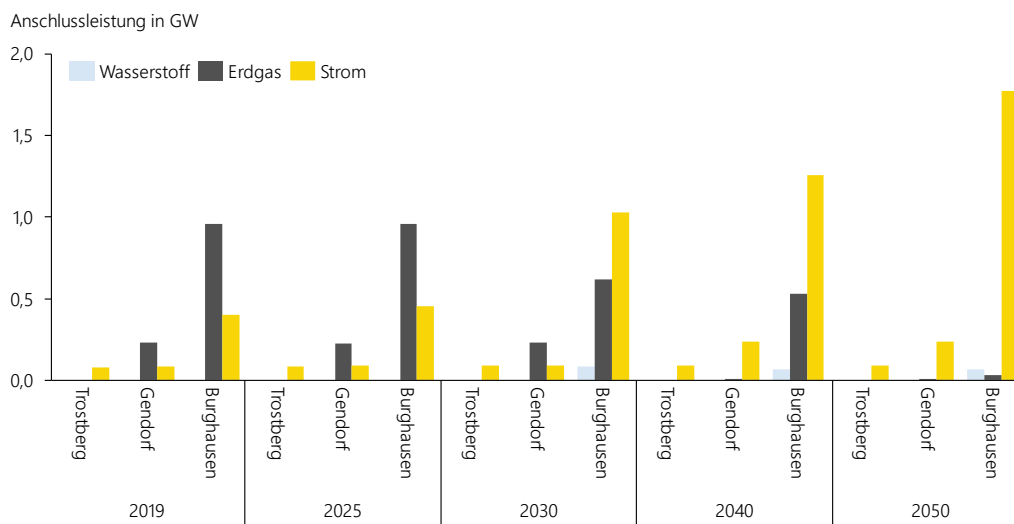


Abbildung 3-8: *Strompfad* - geclusterte Anschlussleistungen

Abbildung 3-8 zeigt, dass die Stromanschlussleistungen in den Clustern *Gendorf* und *Burghausen* um ein Vielfaches zunehmen. Sie verdeutlicht, dass im *Strompfad* die Energie ausschließlich über das Stromnetz bezogen wird.

4 Was müsste außerhalb des Bilanzraums passieren, um die Transformation zu erreichen?

Die ausreichende Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und Wasserstoff an der Bilanzgrenze ist eine zentrale Annahme der Transformationspfade. Die Pfade gehen dementsprechend davon aus, dass sowohl erneuerbare Energiequellen als auch die damit einhergehende Infrastruktur in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Um dennoch Rückwirkungen abschätzen zu können, thematisieren die Abschnitte 4.1 und 4.2, welche Anforderungen die industriellen Transformationspfade an das Energiesystem außerhalb des Bilanzraums stellen und welche politischen Instrumente Hilfestellung bei der Transformation leisten können.

4.1 Anforderungen an das Energiesystem durch die industrielle Transformation

Um die Anforderungen durch die industrielle Transformation an das Energiesystem abzuschätzen und die Zielgrößen im Jahr 2050 des dritten Kapitels einzuordnen, weist der folgende Abschnitt drei „Entweder-Oder“-Szenarien aus. Die Szenarien betrachten unterschiedliche Optionen zur Versorgung des Bilanzraums mit erneuerbaren Energien. Die Szenarien gehen auf stark vereinfachte Annahmen zurück.



Szenario 1: Regionale Erzeugung

Die regionale erneuerbare Energieerzeugung wird stark ausgebaut. Um den Stromverbrauch im *Strompfad* zu decken, ist es ab 2023 erforderlich jede Woche ein Erzeugungsäquivalent von einem 4,5 MW - Windrad in der Region zu bauen⁸ [24]. Damit geht ein starker Ausbau des Verteilnetzes, der Umspannwerke und weitere Netzkomponenten sowie die Notwendigkeit regionaler Flexibilitätsoptionen wie z. B. Stromspeicher einher.

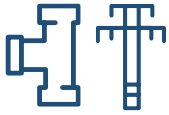


Szenario 2: Starker Ausbau der überregionalen Stromnetze

Der erneuerbare Strom wird zum überwiegenden Teil in die Region transportiert. Dafür wird neben dem überregionalen Ausbau der erneuerbaren Energien das Stromnetz erweitert. Die Anschlusskapazität steigt auf 2,1 GW. Im Jahr 2019 verfügen die Unternehmen über eine Anschlusskapazität von 0,6 GW. Eine 380 kV-Freileitung hat eine Kapazität von 1,8 GVA⁹ (bei $\cos \varphi = 1$ gilt: GVA = GW) [25].

⁸ mit 2 200 Volllaststunden

⁹ Doppelleitung mit Viererbündeln und einem Querschnitt 264/34



Szenario 3: Ausbau Wasserstoff- und Stromnetze

Die Region wird an das europäische Wasserstoffnetz angeschlossen, aus dem jährlich 5,5 TWh Wasserstoff bezogen werden. Dafür benötigen die Unternehmen eine Anschlussleistung von ca. 1,1 GW Wasserstoff. Eine Wasserstofftransportleitung hat eine Kapazität von ca. 2,2 GW [26]¹⁰. Das Stromnetz muss zudem von derzeit 0,6 GW auf 1,2 GW Anschlusskapazität erweitert werden.

Szenario 1 ist an die Ergebnisse des *Strompfads* angelehnt und zeichnet ein Bild, in dem die Übertragungs- und Fernleitungsnetze nicht aus- bzw. umgebaut werden. Ab 2023 bis 2050 wird jede Woche ein Windrad gebaut, um den Energieverbrauch in 2050 bilanziell zu decken. Angesichts des immensen Flächenbedarfs, dem starken Ausbau des Verteilnetzes sowie der lokalen Volatilität der Winderzeugung, wird dieses Szenario als unwahrscheinlich eingeschätzt. Trotz der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit ist davon auszugehen, dass auch die regionale Energieerzeugung bei der Transformation einen Beitrag leisten kann. Jedes Projekt zur regionalen Energieerzeugung vermindert den Ausbaubedarf der Übertragungsnetze. Im Projekt *Rückenwind* beispielsweise wird der Bau von 40 Windrädern in der Region untersucht [36]. Auch bei einer bayernweiten Betrachtung muss der Ausbau der erneuerbaren Energien erheblich beschleunigt werden, wie die Studie *Energiewende jetzt!* zeigt [27].

Szenario 2 bezieht sich ebenfalls auf den *Strompfad* und zeichnet ein Bild, in dem das Übertragungsnetz den zusätzlichen Energieverbrauch vollständig bereitstellt. Die im Strompfad entstehenden zusätzlichen 1,5 GW Anschlussleistung entsprechen in etwa einer 380 kV Freileitung¹¹. Auch in diesem Kontext sind bereits erste Projekte geplant: So soll die Übertragungsleitung zwischen Pirach und Pleinting ausgebaut und die Spannungsebene von 220 kV auf 380 kV angehoben werden [28]. In der Diskussion im Begleitkreis wurde hervorgehoben, dass diese zusätzliche 380 kV-Leitung die Versorgung der Umspannwerke verbessert, sie allerdings nicht zu einer erheblichen Erhöhung der Stromversorgung im ChemDelta führt.

Szenario 3 greift die Ergebnisse des Wasserstoffpfads auf. Das Szenario kombiniert den Ausbau des Stromnetzes mit dem Anschluss an ein überregionales Wasserstoffnetz. Im Vergleich zu Szenario 2 (1,5 GW zusätzlich) erhöht sich die Stromanschlussleistung lediglich um 0,6 GW. Der Ausbaudruck auf das Stromnetz ist folglich in Szenario 3 geringer. Zusätzlich wird die Region an ein Wasserstoffnetz mit einer Anschlussleistung von mindestens 1,1 GW angebunden. Die nötige Anschlussleistung von 1,1 GW könnte vereinfachend abgeschätzt bereits durch die Umwidmung einer Pipeline gedeckt werden¹⁰ [26]. Die Initiative der Fernleitungsnetzbetreiber im *Hydrogen Backbone* sieht ein Startnetz vor, das die Region an ein überregionales Wasserstoffnetz anschließt [29].

Szenario 2 und 3 erweitern die Notwendigkeit zum Ausbau erneuerbarer Energien geografisch. Die politische Problemstellung der Identifikation erneuerbarer Erzeugungskapazitäten bleibt in allen drei Szenarien bestehen.

¹⁰ Durchmesser: 500 mm, Druck: 50 – 100 bar, Massefluss: 15,6 kg/s

¹¹ Dabei gilt es zu beachten, dass die Anschlussleistungen in Trans4In als Wirkleistungen angegeben sind. Bei einem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) kleiner eins müssen die Leitungen größer ausgelegt werden

Neben den Aspekten zur Erzeugung und Infrastruktur ist die Versorgungssicherheit zu thematisieren. Im Gegensatz zu den hauptsächlich auf einen Energieträger bzw. eine Region beschränkten Szenarien 1 und 2 diversifiziert Szenario 3 die Energieerzeugung und die Wahl des Energieträgers stärker. Zusätzlich unterstützt die Speicherfähigkeit des Wasserstoffs eine kontinuierliche Energieversorgung der Region. Es ist demgemäß anzunehmen, dass Szenario 3 die derzeit sehr hohe Versorgungssicherheit am Chemiedreieck Bayern im Rahmen der Transformation eher aufrechterhält als die extremeren Szenarien 1 und 2. Die für die untersuchten Unternehmen besonders wichtige hohe Versorgungssicherheit kann zudem in allen Szenarien durch Hybridlösungen, den Ausbau von energetischen und stofflichen Speichern sowie der Erschließung von weiteren Flexibilitätspotenzialen gesteigert werden.

4.2 Politische Instrumente als Hilfestellung für die Transformation

Szenario 3 aus Kapitel 4.1 umfasst neben dem Ausbau des Stromnetzes auch die Einbindung der Region in die überregionale Wasserstoffwirtschaft. Dieses Kapitel skizziert Initiativen der Politik, die den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft fördern sollen.

In beiden Szenarien der Studie steigt der Bedarf an Wasserstoff und Strom im Bilanzraum. Die Szenarien setzen voraus, dass die erforderliche zusätzliche Energiemenge bereitgestellt werden kann. In den Diskussionen im Rahmen der Studie wird jedoch deutlich, dass es zu Beginn die wechselseitig abhängige Kausalkette zwischen Erzeugung, Infrastruktur und Verbrauch zu überwinden gilt (Henne-Ei-Problem). Es zeigt sich, dass die Akteure nicht aktiv werden können, ohne ihr eigenes Risiko *ceteris paribus* zu erhöhen. Beispielsweise ist aus Perspektive der Infrastrukturbetreiber neben der Kenntnis über die Senke auch die Verortung der Quelle für die Investitionsentscheidung entscheidend. Die Transformation der Industrie und die damit einhergehenden, veränderten Energieverbrauchsmengen und -formen stützen sich reziprok auf die vorhandene und geplante Infrastruktur.

Die Politik hat das Problem erkannt und im Zuge der nationalen Wasserstoffstrategie Instrumente entwickelt, welche die Situation auflösen könnten [30].

- Beispielsweise garantiert die Initiative H₂-Global über ein doppeltes Auktionsmodell sowohl den Verbrauchern als auch Erzeugern über einen festgelegten Zeitraum einen festen Energiepreis. Dies schafft Planungssicherheit für Erzeuger, Verbraucher und demzufolge auch für die Infrastrukturbetreiber, da sie in einem zweiten Schritt mit verbindlichen Quellen und Senken rechnen können. Der erste Bieterprozess für die Produzenten soll Ende 2022 stattfinden. Auf der Verbraucherseite beginnt der Prozess Ende 2024. Konkrete Mengenziele wurden noch nicht ausgegeben [31].
- Darüber hinaus werden im Rahmen der IPCEI-Projekte und der Wasserstoff-Reallabore Projekte entlang der gesamten Wertschöpfungskette gefördert, die als Grundbausteine der Wasserstoffwirtschaft dienen könnten [32], [33].
- Ein weiteres Beispiel sind Klimaschutzverträge. Sie wurden im Koalitionsvertrag 2021 beschlossen und sollen die Mehrkosten bei Investitionsentscheidungen der im Vergleich zur Referenz kostenintensiveren Klimaschutztechnologien abdecken [34]. Der Staat garantiert im Rahmen des Klimaschutzvertrages einen festen Preis des

Wasserstoffs und deckelt somit laufende Mehrkosten gegenüber der fossilen Alternative [35].

Die drei Ansätze offerieren die Option, die Transformation in und um den Bilanzraum zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die Instrumente sind auf die individuellen Akteure anzupassen. Ihre Wirksamkeit gilt es in Pilotprojekten zu prüfen. In den Diskussionen mit den Industrieunternehmen und den Projektpartnern wurden zu den politischen Instrumenten zwei Punkte hervorgehoben:

- Die genannten Instrumente reichen bei Weitem nicht aus, um die Transformation zu beginnen und umzusetzen.
- Für den Aufbau der Wasserstofftransportinfrastruktur gibt es aktuell weder auf nationaler noch europäischer Ebene rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen für die Planung und den Betrieb eines deutschland- und europaweiten Wasserstoffnetzes.

5 Was sagen die Projektpartner von Trans4In?

Die Studie Trans4In wurde eng von den Projektpartnern bayernets GmbH, Bayernwerk AG, Tyczka GmbH und Wacker Chemie AG begleitet. Im Folgenden geben die Partner ihre Perspektive zur Studie wieder und formulieren Forderungen an die Politik.

5.1 Statements der Projektpartner von Trans4In



„Das Projekt Trans4In hat den Energiehunger und Wasserstoffbedarf im Chemiedreieck Bayern in den nächsten Jahrzehnten untermauert. Für den leitungsgebundenen Wasserstofftransport in Südbayern stehen wir in den Startlöchern. Sobald der politische Auftrag für das Wasserstoffstartnetz vorliegt und eine Lösung im Hinblick auf das Amortisationsrisiko für Wasserstoffleitungen in der Erlösregulierung umgesetzt ist, können wir endlich loslegen. Doch unsere Rohre müssen mit Wasserstoff gefüllt werden und dafür sind enorme Wasserstofferzeugungskapazitäten im In- und Ausland notwendig. Dabei ausschließlich auf grünen Wasserstoff zu setzen, wird innerhalb des extrem ambitionierten Zeitplans nicht funktionieren. Zumindest für den Hochlauf brauchen wir jede Art von treibhausgasneutral erzeugtem Wasserstoff.“



„Trans4In hat aufgezeigt, vor welchen Herausforderungen die Energieversorgung im Chemiedreieck in den kommenden Jahren stehen wird. Sowohl auf der Strom- als auch auf der Gasseite sind erhebliche Anstrengungen nötig, um die Infrastrukturen auf die neuen Anforderungen vorzubereiten. Es ist unser Ziel, unsere Kunden auf dem Weg der Dekarbonisierung bestmöglich zu begleiten.“



„Das Trans4In Projekt zeigt mit den beiden Pfaden auf einfache und pragmatische Weise Leitplanken, entlang derer die Transformation der Energieversorgung im Chemiedreieck zu vollziehen ist. Der Vergleich unterschiedlicher Umsetzungspfade über mehr Strom- oder Wasserstoffleitungen zeigt: Die Transformation ist machbar und grüner Wasserstoff ist ein Schlüssel der Energiewende. Die Tatsache, dass mit beiden Pfaden die Ziele erreicht werden können, verdeutlicht: Jeder erste Schritt geht in die richtige Richtung, so lange man ihn unternimmt.“



„Das Trans4In Projekt macht deutlich, wie wichtig der zügige Ausbau der Energieinfrastruktur für die zukünftige Entwicklung des Chemiedreiecks Bayern ist. Eine stabile und wettbewerbsfähige Versorgung mit Strom und Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen ermöglicht den Transformationsprozess und ist ein entscheidender Standortfaktor für die Region.“

5.2 Forderungen von den Projektpartnern an die Politik

Die Politik kann entscheidend zum Erfolg der Energietransformation im Chemiedreieck Bayern beitragen. Die Projektpartner der Studie fordern die Politik dazu auf, die Transformation mit folgenden Maßnahmen aktiv zu unterstützen.

Verbrauch – Transformation



Initiierung eines Umsetzungskonzeptes für ein klimaneutrales Chemiedreieck: Gemeinschaftliches und koordiniertes Vorgehen bei der Transformation

Erzeugung und Umwandlung



Zügiger Ausbau der Erneuerbaren Energieerzeugung (Wind und Solar) in allen Regionen, auch in Bayern



Aufbau von grünen Wasserstoffquellen und nationalen sowie internationalen Bereitstellungspfaden



Stabile Rahmenbedingungen und Investitionssicherheiten für den Aufbau von Elektrolysekapazitäten sowie den Bezug von erneuerbarem Strom für die Wasserstoffproduktion

Infrastruktur



Entfesselung des Ausbaus der Energienetze durch Beschleunigung der bestehenden Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie die Positivkommunikation für die Energieinfrastruktur durch die Politik



Geeigneter regulatorischer Rahmen und konkreter politischer Auftrag an die Netzbetreiber für den Aufbau eines Wasserstoffnetzes

6 Literatur

- [1] Pressemitteilungen: Bericht aus der Kabinettsitzung vom 28. Juni 2022. In <https://www.bayern.de/bericht-aus-der-kabinettsitzung-vom-28-juni-2022/>. (Abruf am 2022-07-22); München: Bayerische Staatsregierung, 2022.
- [2] VERORDNUNG (EU) 2021/1119 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). Brüssel: Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2021.
- [3] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Ausgefertigt am 2019-12-19, Version vom 2021-07-07; Bonn: BMU, 2021.
- [4] Fläche und Bevölkerung nach Ländern. In <https://www.statistikportal.de/de/bevoelkerung/flaechen-und-bevoelkerung>. (Abruf am 2022-09-25); Stuttgart: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2022.
- [5] Jahrerhebung über die Energieverwendung der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe - Energieverbrauch, Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte (Tabelle: 43531-01-02-4). Düsseldorf: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2022.
- [6] Energiebilanz 2019 „klassisch“ (Methodik der Länder). In <https://www.stmwi.bayern.de/energie/energiedaten/energiebilanz-2019/>. (Abruf am 2022-8-22); München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2022.
- [7] Statistische Berichte: Bruttoinlandsprodukt und Bruttowertschöpfung in Bayern 2012 bis 2020 - Kreisfreie Städte und Landkreise, Regierungsbezirke, Regionen, Arbeitsmarktregionen. In https://statistik.bayern.de/statistik/gesamtrechnungen/vgr/#link_1. (Abruf am 2022-07-20); München: Bayerisches Landesamt für Statistik, 2022.
- [8] Bundesagentur für Arbeit: Branchen im Fokus. In <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Branchen-im-Fokus/Branchen-im-Fokus-Nav.html>. (Abruf am 2022-8-22); Nürnberg: Statistik der Bundesagentur für Arbeit, 2022.
- [9] Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: Dechema, 2019.
- [10] Ren, Tao et al.: Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. In: Energy 31. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, 2006.
- [11] Umwelterklärung 2020. Burghausen: OMV Deutschland GmbH, 2020.
- [12] The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Geneva, Washington D.C.: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2004.
- [13] Steinkamp, Ansgar: NEP-Gas-Datenbank. In <https://www.nep-gas-datenbank.de/app/#/>. (Abruf am 2022-08-08); Essen: Open Grid Europe GmbH, 2022.
- [14] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019: <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html>; Berlin: AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2021.
- [15] Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.

- [16] Wolf, Stefan et al.: Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland. Stuttgart, Hannover: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2014.
- [17] Sterchele, Philip et al.: Anhang zur Studie Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2020.
- [18] Radgen, Peter et al.: Exergie und Wirtschaft - Untersuchung der Transformationspfade von Hauptprozessen in der deutschen Wirtschaft mit dem Ziel der Dekarbonisierung auf der Grundlage von exergetischen Analysen und Untersuchung der Auswirkungen möglicher Veränderungen auf den Schutz der natürlichen Ressourcen und der natürlichen Umwelt. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart, 2020.
- [19] Bazzanella, Alexis et al.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- [20] Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. München: BDI, 2021.
- [21] Schneider, Clemens et al.: klimaneutrale Industrie - Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Berlin: AGORA Energiewende, 2020.
- [22] Pressemitteilungen: Bayern startet Aufbau einer Produktionsanlage für grünes Kerosin. In <https://www.bayern.de/bayern-startet-aufbau-einer-produktionsanlage-fr-grnes-kerosin-2/>. (Abruf am 2022-07-16); München: Bayerische Staatsregierung, 2021.
- [23] Renewable HYdrogen and MEthanol Bavaria: RHYME Bavaria. In <https://www.wacker.com/cms/de-de/about-wacker/research-and-development/rhyme-bavaria/detail.html>. (Abruf am 2022-07-22); Burghausen: WACKER Chemie AG, 2022.
- [24] Windenergie in Deutschland - Zahlen und Fakten. In: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>. (Abruf am 2022-04-30); Berlin: Bundesverband WindEnergie e. V., 2022.
- [25] Seidl, Hannes; Reemt, Heuke: Das deutsche Höchstspannungsnetz: Technologien und Rahmenbedingungen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2014
- [26] Krieg, Dennis: Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. Jülich: Jülich Forschungszentrum, 2012.
- [27] Harper, Ryan et al.: Energiewende jetzt! Was konkret gemacht werden muss, um die bayerischen Klimaschutzziele zu erreichen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2021.
- [28] Pirach-Pleinting. In <https://www.tennet.eu/de/projekte/pirach-pleinting>. (Abruf am 2022-09-25); Bayreuth: TenneT TSO GmbH, 2022.
- [29] van Rossum, Rik: European Hydrogen Backbone - A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries. Utrecht, NL: Guidehouse, 2022.
- [30] Die nationale Wasserstoffstrategie. Ausgefertigt am 2020-06-10; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
- [31] Bollerhey, Timo: H2GLOBAL – IDEE, INSTRUMENT UND INTENTIONEN - Policy Brief H2Global Stiftung 01/2022. Hamburg: H2Global Stiftung, 2022.
- [32] Pichlmaier, Simon et al.: Reallabore der Energiewende: Transferforschung Trans4Real startet. In: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt. Ausgabe 5, 2021. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2021.

- [33] Nationaler Wasserstoffrat: Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021–2025. Berlin: Nationaler Wasserstoffrat, 2021.
- [34] Koalitionsvertrag zwischen SPD, FDP und Grünen- 20. Legislaturperiode - Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Berlin: Koalitionsvertrag zwischen SPD, FDP und Grünen, 2021.
- [35] Hauser, Philipp et al.: Klimaschutzverträge für die Industrietransformation - Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie. Berlin: Agora Industrie, 2021.
- [36] Cibu, Nadine: Energiekrise im Chemiedreieck: Schwierige Phase steht noch bevor. In <https://www.br.de/nachrichten/bayern/energiekrise-im-chemiedreieck-schwierige-phase-steht-noch-bevor,TI3Y39V>. (Abruf am 2022-9-30); München: Bayerischer Rundfunk, 2022.