



Energieforschung heute – Chemie 2050

Leitplanken der Chemieindustrie auf dem Weg in die Zukunft der Energieversorgung – Forschungslücken und Randbedingungen

Executive Summary

Die Chemieindustrie stellt sich ein auf ein verändertes System der Energieversorgung mit einem großen Anteil an erneuerbaren Energien. Damit dies gelingen kann, müssen die heute sichtbaren Forschungsansätze mit Hinblick auf die Anforderungen der global agierenden und mit langfristigen Investitionen im internationalen Wettbewerb stehenden Chemieindustrie deutlich priorisiert und konsequenter umgesetzt werden. Dafür braucht die Chemieindustrie die Unterstützung des deutschen Industriennetzwerks, der Politik und der Bundesressorts sowie der Wissenschaft.

Die besondere Rolle der Chemie in der Forschung für die Energieversorgung und Rohstoffbereitstellung der Zukunft wird in zentralen Studien des Akademienprojekts (ESYS), des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) und der Deutschen Energieagentur (dena) hervorgehoben – die Chemie bietet Lösungen, insbesondere im „industriellen“ Maßstab. Auf Basis dieser Studien leitet der VCI detaillierte forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen für die Förderung der Energieforschung und für innovationspolitische Rahmenbedingungen im Bereich der Energieversorgung ab – dabei ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass politisch festgelegte Ziele zum Implementierungsgrad vorgegebener Technologien nicht zwangsläufig zu Emissionsminderungen führen und nicht zwangsläufig den volkswirtschaftlich und ökologisch sinnvollsten Pfad beschreiben:

- Die Maßnahmen zur Förderung der Energieforschung müssen einen deutlichen **Schwerpunkt auf eine auf den Weltmarkt ausgerichtete Technologieentwicklung** aus Deutschland aufweisen.
- Mit seinen traditionellen und historisch gewachsenen Netzwerken zwischen Industrie und Wissenschaft in den Sektoren der Energieversorgung und der industriellen Produktion hat der sowohl durch den zunehmenden Technologiewettbewerb als auch durch politische Rahmenbedingungen herausgeforderte **Industriestandort Deutschland einen in der Welt nahezu einmaligen Vorteil**. Sein Mangel an Rohstoffen und an potentiellen Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien kann **eine besondere Chance für die Umsetzung eines neuen, auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystems, unter Erhalt die Wertschöpfungsketten der Chemie und der benachbarten Kernbranchen**, darstellen.
- Die Einbindung erneuerbarer Energien in das Energieversorgungssystem ist notwendig. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Nutzung erneuerbarer Energien aufgrund von **Verlusten bei zusätzlichen Energiewandlungsschritten** in der Regel mit niedriger Energieeffizienz im Gesamtsystem industrieller Prozesse einhergeht. In der Folge sind die politisch geforderten und ökonomisch sinnfälligen fortlaufenden Effizienzsteigerungen der Verfahren in der produzierenden Industrie und insbesondere in der Chemieindustrie nicht mehr in dem Maße realisierbar.

- Aus Sicht der Chemie sind die zentralen Fragen nach der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa für die sektorengekoppelte Chemieproduktion in der forschungspolitischen Diskussion bislang nicht ausreichend berücksichtigt. Dies ist für die zukünftige Schließung des Kohlenstoffkreises inklusive der Diversifizierung des zukünftigen Rohstoffbedarfs bedeutsam, wodurch die wichtige Nutzung von Wertstoffen aus dem Materialrecycling erst in nachhaltiger Weise möglich wird. Die politischen Maßnahmen zur Förderung von Forschung und Entwicklung und der Anpassung der regulativen Rahmenbedingungen sollten daher die **begrenzte Verfügbarkeit erneuerbarer Energien** stärker als bisher berücksichtigen.
- Es ist dringend notwendig zu diskutieren, ob und wie die vorhandenen **Energieinfrastrukturen** effizient und effektiv im Rahmen eines auf erneuerbaren Energien beruhenden Energieversorgungssystems nutzbar sein werden. Infrastrukturen sind durch lange Investitionszyklen geprägt, so dass **zeitnah die notwendigen Anpassungen vorgenommen** werden müssen.
- Trotz zahlreicher Projekte zur Nutzung erneuerbaren Stroms für Industrieprozesse insbesondere in der Chemie („Power-to X“) bleiben **Forschungs- und Förderlücken** auf Gebieten, die wesentliche Impulse zur Flexibilisierung und gegebenenfalls zur Elektrifizierung von Industrieprozessen und damit zum Erhalt wichtiger Basiselemente zentraler industrieller Wertschöpfungsketten über die Sektorenkopplung leisten können und die daher geschlossen werden sollten.
- Die Herausforderungen, welche die politisch gesetzte „Energiewende“ an die Energieversorgungssysteme stellt, erfordern eine **permanente konzeptionelle Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung** in Deutschland über die bestehende Systematisierung hinweg. Dies betrifft die ressortübergreifende Ausgestaltung und Koordination der Forschungsförderung sowie die Anpassungen der Formate und der konzeptionellen Ausgestaltung der Forschungsförderung und der Programme.
- Die erforderlichen Technologien für die zukünftige Energieversorgung müssen zum Teil noch entwickelt oder weiterentwickelt werden, der **notwendige Zeitbedarf für Forschung und Entwicklung, Pilotanlagen und Skalierung** liegt bei über 20 Jahren. Zentrale Studien zeigen sehr hohe Investitionskosten für stromintensive erneuerbare Energien nutzende Prozesse. Aufgrund unsicherer regulativer Rahmenbedingungen entstehen hier erhebliche Unsicherheiten für Investitionen der Unternehmen. Forschung und Entwicklung und die **Etablierung entsprechender Rahmenbedingungen im großzügigen Maße und zu einem frühen Zeitpunkt**, sind der einzige Weg zu Innovationen aus der Chemie an der Basis der Wertschöpfungsketten.
- **Die regulatorischen Rahmenbedingungen müssen dahingehend umgestaltet werden, dass Planungssicherheit für Investitionen besteht** und Investitions- sowie betriebliche Hürden für stromintensive Prozesse abgebaut werden. Dazu gehört u.a. die Freistellung von Stromnetz-Entgelten, der EEG-Umlage und der Stromsteuer. Diese und andere regulatorische Zusatzkosten auf dem Strompreis würden ansonsten einen wirtschaftlichen Betrieb von PtX-Technologien im Sinne eines technologieoffenen Wettbewerbs („Level playing field“) nicht zulassen.

Inhaltsverzeichnis

Energieforschung heute – Chemie 2050	1
Leitplanken der Chemieindustrie auf dem Weg in die Zukunft der Energieversorgung – Forschungslücken und Randbedingungen	1
Executive Summary	1
1. Einleitung	5
2. Gapanalyse der Energieforschungsförderung aus Sicht der Chemieindustrie im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen	7
2.1. Potentiale erneuerbarer Energien und von Kohlenstoff.....	7
2.2. Effekte der Einbindung erneuerbarer Energien auf die Energieeffizienz über die Sektorenkopplung.....	10
2.3. Forschungspolitische Weichen jetzt stellen	12
Anhang	15
I. Studien-Analyse	15
1. BMWi-Leitprojekt zu Technologien und zu Trends für die Energiewende	15
1.1. Strukturen der Energiesektoren	15
1.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung.....	16
1.3. Energiebedarf und Potentiale:	17
1.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung	17
2. dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050“ ²⁴	18
2.1. Strukturen der Energiesektoren	18
2.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung.....	19
2.3. Energiebedarf und Potentiale	20
2.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung	20
3. Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) ²⁰	21
3.1. Strukturen der Energiesektoren	21
3.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung.....	21
3.3. Energiebedarf und Potentiale	22
3.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung	22
II. Ableitung forschungspolitischer Empfehlungen	23
1. Zukünftige Infrastrukturen der Chemiesektoren bei mindestens 80 % Emissionsminderung und Einbindung diskontinuierlich anfallender Energie.....	24

2. Technologische Pfade für die Sektorenkopplung und die zukünftige Rolle einzelner Technologien.....	25
3. Energiebedarf und Potentiale der erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland und Europa; zukünftig benötigte Energieimporte und deren prioritäre Verwendungszwecke	28
4. Politische Rahmenbedingungen zur Umsetzung neuer Technologien für die Energiewende: Förderformate und Regulierung.....	29

1. Einleitung

Das Thema der Energieversorgung der Zukunft ist forschungspolitisch von zentraler Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie an ihren Produktions- und Innovationsstandorten insbesondere in Deutschland. Die Chemieindustrie ist ein Enabler zentraler Wertschöpfungsketten der Industrie und ein zentraler Teil der Lösung der Energiewende an der Basis wichtiger technologischer Entwicklungen. Sie leistet wichtige Beiträge für die Integration erneuerbarer Energien in das deutsche Energiesystem und für die Kopplung der Energiesektoren.^{1, 2} Energierelevant für die chemische Industrie sind die Bereiche

1. **Energie**, d.h. die Bereitstellung der Energie für Produktion und Stoffwandlung in Form von Wärme, Strom, Kälte etc. – zukünftig unter stark zunehmender Integration fluktuierender erneuerbarer Energien, zum Beispiel mit thermischen Speichern und zunehmender Integration von Niedertemperaturabwärme, zum Beispiel mit Wärmepumpen oder Kältemaschinen.
2. **Rohstoffe und Plattformchemikalien**, d.h. die Bereitstellung der Plattformchemikalien – Grundstoffe, heute vorwiegend auf Basis fossiler Rohstoffe als nicht energetisch genutzte Energieträger, zukünftig auf Basis erneuerbaren Stroms, von Kohlendioxid (CO₂) und sekundärer Kohlenstoffquellen, d.h. kohlenstoffhaltigen Abfällen und Wertstoffen.³
3. **Prozesse**, d.h. die Bereitstellung energieeffizienter zunehmend flexibler Produktionsprozesse unter Vermeidung von CO₂-Emissionen und unter Nutzung von Wasserstoff (H₂) und CO₂ als Rohstoff oder unter Nutzung der Produkte des chemischen Recyclings oder durch elektrifizierte Verfahren und Prozesse. Die Möglichkeit zur Nutzung von CO₂ und H₂, aber auch von kohlenstoffhaltigen Abfällen, kann demnach auch als eine zukünftige „License to operate“ der Chemieindustrie verstanden werden. Damit wird die Verbundwirtschaft durch neue Kreisläufe erweitert zum Beispiel durch die Abscheidung von CO₂ für die Nutzung zur Synthese oder durch in den Kreislauf zurückgeführte Stoffströme.
4. **Infrastrukturen und Verbundwirtschaft**, d.h. effiziente, lokale und überregionale Energie- und Stoffverbünde für Energie- und Stoffströme, zukünftig für einen neuen Mix der Energieträger Gas und Strom und für hoch flexible neue Energieströme

¹ VCI-Diskussionspapier „Technologische Optionen zur flexiblen Nutzung von elektr. Energie und Energiespeichern in der Chemieindustrie“, VCI-Position „Flexible Nutzung ... Chemieindustrie“, April 2015

² VCI-Position zur Sektorenkopplung in der Energieversorgung – Potentiale und Herausforderungen sektorübergreifender Prozesse in der Chemieindustrie und ihre Rolle bei der Hebung energietechnischer Potentiale aus forschungspolitischer Sicht, Oktober 2017

³ VCI-Position „Kreisläufe für Kohlenstoff“, April 2019, aktualisierte Fassung auf Grundlage des Positionspapiers „Chemisches Recycling: Ein zusätzlicher Baustein für nachhaltiges Abfallmanagement und zirkuläre Wirtschaft“, VCI/PlasticsEurope Deutschland, 2019

über Sektorengrenzen – zum Beispiel Power-to-Steam oder Power-to-Wasserstoff⁴ zur Aufnahme von nicht bedarfsgerecht produziertem Strom und neuer Stoffströme (s.o.).⁵

Über alle vier Bereiche kann die Chemieindustrie Beiträge zur Reduzierung der CO₂-Emissionen für die eigene Produktion und die Produktion in der industriellen Wertschöpfungskette und in anderen verbrauchernahen Sektoren leisten. So kann beispielsweise im Verkehrssektor ein Reduzierungsbeitrag über synthetische Treibstoffe (aus erneuerbaren Energien erzeugtem H₂ und CO₂ als Rohstoff – s.o.) erbracht werden.

Es besteht anerkanntermaßen die Notwendigkeit, erneuerbare Energien in das Energiesystem zu integrieren und insbesondere in die Energiesektoren, die bislang überwiegend durch fossile Energieträger gespeist werden. Da dies, wie unten gezeigt wird, die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa erheblich übersteigt, ist deren effiziente Verwendung unbedingtes Gebot. Dabei muss die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen in dem betrachteten Energiesektor zu höheren CO₂-Einsparungen führen als eine direkte Substitution fossiler Stromerzeugung im konventionellen Stromsektor – sofern diese möglich wäre.

Die Chemieindustrie stellt sich also ein auf ein verändertes System der Energieversorgung mit einem großen Anteil an erneuerbaren Energien und zunehmender Nutzung von sekundären Einsatzstoffen. Im Chemiesektor könnten die technologischen Lücken zwischen den Sektoren des Energiesystems unter gegebenen Rahmenbedingungen einen Paradigmenwechsel im Anlagendesign und Betrieb erforderlich machen, beispielsweise von kontinuierlichem zu lastflexiblem Betrieb mit möglichst großer Lastanpassung und schnellen und häufigen Lastwechseln. Daraus können sich wiederum Geschäftsmodelle zum Beispiel auf Basis der Interdependenzen in den Preisstrukturen von Gas und Strom sowie nutzbaren Abfallströmen entwickeln, die mit den betriebswirtschaftlichen Investitions- und Betriebskosten gegenzurechnen wären. Damit die Chemieindustrie ihre Rolle erfüllen kann, müssen **die heute sichtbaren Forschungsansätze im Hinblick auf die Anforderungen einer global agierenden und mit langfristigen Investitionen im internationalen Wettbewerb stehenden Industrie deutlich priorisiert und konsequenter umgesetzt werden**. Dafür braucht die Chemieindustrie die Unterstützung des deutschen Industriennetzwerks, der Politik und der Bundesressorts sowie der Wissenschaft.

Die besondere Rolle der Chemie in der Forschung für die Energieversorgung und Rohstoffbereitstellung der Zukunft wird von zentralen Studien des Akademienprojekts (ESYS), des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) und der Deutschen Energieagentur (dena) (s. Anhang I) **hervorgehoben**. Auf dieser Basis werden im folgenden die Lücken in der Forschung und Entwicklungs-(FuE-Förderung) und bezüglich der notwendigen Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

⁴ Power-to-Wasserstoff/Hydrogen (PtH₂): Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien – in der Regel über Elektrolyseverfahren in H₂; Power-to-Steam (PtS): Umwandlung „erneuerbaren Stroms“ beispielsweise über Elektrodenkessel in Dampf für die Industrieproduktion.

⁵ Forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen der chemischen und biotechnischen Industrie zur Ressourceneffizienz und zur Rohstoffbasis im Wandel, Feb. 2014

2. Gapanalyse der Energieforschungsförderung aus Sicht der Chemieindustrie im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen

2.1. POTENTIALE ERNEUERBARER ENERGIEN UND VON KOHLENSTOFF

Die Analyse der Lücken in der Förderung zur Energieforschung fußt auf den in Tabelle 1 zusammengestellten Daten zu den Potentialen an erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa, zum Primär- und Endenergiebedarf und zum Bedarf an chemischen Rohstoffen sowie zur benötigten Strommenge für Power-to-X (PtX)-Technologien.⁶ Allein für die Nutzung von erneuerbarem Strom für PtX-Produkte in der Chemieindustrie sind rund 1.000 TWh⁷ zu Grunde zu legen, in den Sektoren Stahl und Verkehr ist mit ähnlichen Größenordnungen zu rechnen. Die Daten in Tabelle 1 machen deutlich, dass die Kapazitätsprognose der Internationalen Energieagentur (IEA) für die in Europa installierbaren Kapazitäten an regenerativen Energien bis 2050 erheblich überschritten werden dürfte, wenn größere Mengen erneuerbarer Energien für die Produktion beispielsweise von Chemiegrundstoffen und von Kraftstoffen genutzt werden sollen. Die in der öffentlichen Darstellung diskutierten Energiemengen, die für eine Sektorenkopplung in den unterschiedlichen Phasen der Energiewende⁸ benötigt werden, sind deutlich zu niedrig angesetzt.

Exkurs „Grüner Wasserstoff (H₂)“

Ein potentieller Schlüssel für die Reduktion der CO₂-Emissionen der Produkte, die als Plattformchemikalien in der Chemieindustrie genutzt werden könnten (Kohlenwasserstoffe, Methanol oder Oxygenate⁹) ist die Herstellung „grünen“ H₂- und „grünen“ Synthesegases (Gemisch aus H₂, CO und CO₂ zur Herstellung von chemischen Grundstoffen). Im Vergleich mit konventionellen Herstellrouten (Dampfreformierung) sind die CO₂-Emissionen allerdings nur dann geringer, wenn praktisch ausschließlich erneuerbarer Strom zur Elektrolyse verwendet wird. Zur Ermittlung CO₂-Emissionsminderungspotentials müssen die Nutzung des nachhaltig produzierten H₂- und Synthesegases zur Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen und die direkte H₂-Nutzung gegeneinander abgewogen werden, da die Effizienz der Prozesskette für synthetische Kraftstoffe vergleichsweise niedrig ist und nach wie vor CO₂-Emissionen im Verkehr in ungefähr gleicher Höhe entstehen; energieeffiziente Möglichkeiten bietet daher auch die Elektromobilität durch die direkte Nutzung des „grünen“ H₂ in Brennstoffzellenfahrzeugen für große Reichweiten (und mit Batteriefahrzeugen für kurze Strecken). In der Chemieindustrie können regenerativ erzeugter H₂ und Synthesegas bereits heute genutzt werden; dies leistet Beiträge zur Senkung der CO₂-Emissionen.

Die Fragen nach den verfügbaren erneuerbaren Energiekapazitäten in Deutschland und Europa für die sektorengkoppelte Produktion der Chemieindustrie und andere Sektoren sind aus Sicht des VCI in der forschungspolitischen Diskussion bislang nicht

⁶ Umsetzung von Strom aus (erneuerbaren) Energiewandlungsanlagen in chemische Produkte und Prozesswärme (auch PtX).

⁷ 1 Terawattstunde = 1 Billion (10¹²) Wh – entsprechend einer Energiemenge von etwa 100 Mio. t Öl, d.h. des Energieinhalts eines Öltankers oder der Energiemenge, die ein großes Kohle- oder Atomkraftwerk in rund sechs Wochen liefert.

⁸ Die Phasen der Energiewende, Kap. 2.9, Stellungnahme ESYS-Projekt, Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende – s. Fußnote 22

⁹ organische chemische Verbindungen, die Sauerstoff enthalten und die Kraftstoffen zugesetzt werden

ausreichend berücksichtigt. In der Chemieindustrie ist dies auch für die zukünftige Schließung der Kohlenstoffkreisläufe inklusive der Diversifizierung zukünftigen Rohstoffbedarfs bedeutsam, wodurch die wichtige Nutzung von Wertstoffen aus dem Materialrecycling erst in nachhaltiger Weise möglich wird. Die politischen Maßnahmen zur Förderung von FuE und der regulativen Rahmenbedingungen sollten daher die Begrenzungen in der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien stärker als bisher berücksichtigen.

Jahr	Erneuerbare Energien-Potentiale / PJ [10 ¹⁵]		CO ₂ aus ind. Punktquellen / Mio. t CO ₂ eq		Primärenergiebedarf/ PJ		Endenergiebedarf/ PJ		Chemierohstoffbedarf (konv.)/ PJ		Strommenge für PtX/ TWh		
		D	EU	D	EU	D	EU	D	EU	D	EU	D	EU
Heute	Biomasse	1.174	9.765	438	1,750	12.900	65,354	9.329	48.818	835 ¹⁴	3.517		
	Wasser	61	1085	[2017]	¹¹	[2018] ¹²	[2017] ¹³	[2018]	[2017]	[2017] ¹⁵	[2018]		
	Wind	408	1.305	¹¹	[2017]			¹²	¹³		¹⁶		
	PV	167 ¹⁰ [2018]	409 [2017]										
2030					1.700 ¹⁷		53.297 ¹⁷		40.026 ¹⁷	742-835 (je Szen.) ¹⁴		0 (Chemie-ind.) ¹⁴	
2050	Biomasse, Wasser [Leistung GW]	202-1.577 ¹⁸				6.450 ¹⁹	45.199-51.647 ¹⁷		30.647	31-835 je nach Szenario ¹⁴	4.144 ²⁰	75-734 ¹⁸ (allg.), o. Chemie 0-1.070 (Chemie je Szen.) ¹⁴	4.900 ²⁰ (Chemie-industrie)
	Wind off-	18-45 GW					je nach Szenario		33.662 ¹⁷ (nach Szenario)				
	Wind onshore	70-380 GW											
	PV	78-275 GW											

Tab. 1: Potentiale erneuerbarer Energien und Kohlenstoff-Verfügbarkeit in Deutschland und Europa

Von der Frage der Energieversorgung nicht zu trennen, ist die Versorgung der Chemieindustrie mit Kohlenstoff (s.o.). Die möglichen Kreisläufe des Kohlenstoff-Inputs in der Chemieindustrie zeigt Abbildung 1. In der Chemieindustrie kann der benötigte Kohlenstoff auf insgesamt sieben verschiedenen Ebenen im Kreis geführt werden.

¹⁰ inkl. Biodiesel, sonstige EE

¹¹ https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5

¹² Quelle: BMWi Energiedaten Gesamtausgabe

¹³ Quelle: Eurostat

¹⁴ Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland, DECHEMA, FutureCamp, Sept. 2019

¹⁵ https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_426_435.html

¹⁶ Quelle: IEA, The future of petrochemicals

¹⁷ European Environment Agency, Trends and projections in Europe 2018; EEA report 16/2018 https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2018-climate-and-energy/at_download/file

¹⁸ ESYS Analyse Sektorkopplung, Kap. 4, S. Fußnote 25

¹⁹ 6. Monitoringbericht Energiewende, BMWi

²⁰ Technologiestudie „Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry“, DECHEMA, Aug. 2017

im Prozess der Weiterverarbeitung die Emissionen in den Exportländern und ggf. sogar global ansteigen, wenn dort der heimische Energiemarkt zu einem großen Teil noch aus fossilen Quellen abgedeckt würde.

Vor dem Hintergrund der Frage, inwieweit die deutsche (Chemie-)Industrie zukünftig in adäquater Weise mit erneuerbaren Energien versorgt werden kann und ob gegebenenfalls neue Importabhängigkeiten entstehen, müssen die Fördermaßnahmen einen deutlichen Schwerpunkt auf eine auf den Weltmarkt ausgerichtete Technologieentwicklung in Deutschland und den Export von Energietechnologien aus Deutschland aufweisen.

2.2. EFFEKTE DER EINBINDUNG ERNEUERBARER ENERGIEN AUF DIE ENERGIEEFFIZIENZ ÜBER DIE SEKTORENKOPPLUNG

Die prononcierter werdende Diskussion zur Sektorenkopplung ist grundsätzlich zu begrüßen.²³ Die Einbindung erneuerbarer Energien in das Energieversorgungssystem ist notwendig. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Nutzung erneuerbarer Energien aufgrund von Verlusten bei zusätzlichen Energiewandlungsschritten in der Regel mit niedriger Energieeffizienz im Gesamtsystem industrieller Prozesse einhergeht. **In der Folge sind die politisch geforderten und ökonomisch sinnfälligen fortlaufenden Effizienzsteigerungen der Verfahren in der produzierenden Industrie und insbesondere in der Chemieindustrie nicht mehr in dem Maße realisierbar.** In anderen Worten: In alternativen Prozessen, die erneuerbare Energien nutzen, können zwar in den einzelnen Prozessschritten hohe Wirkungsgrade und hohe Prozesseffizienzen erreicht werden, insgesamt erfordern diese Prozesse aber zusätzliche Umwandlungsschritte und somit zusätzliche Energieeinträge, die bei fossilen Rohstoffen als stofflicher Energieinhalt direkt in die Reaktion eingetragen werden.

Dabei sollte die Etablierung der unterschiedlichen Sektorenkopplungsoptionen sinnvollerweise neben der ökologischen Relevanz auch die jeweilige ökonomische, technische und betriebliche Umsetzbarkeit berücksichtigen. Der Markteintritt der derzeit und zukünftig verfügbaren Optionen wird sich, basierend auf spezifischen Randbedingungen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergeben. Die Zeitpunkte, wann unterschiedlicher Sektorenkopplungsoptionen ihre technologische Verfügbarkeit und wann ihre potentielle Wirtschaftlichkeit erreichen, können derzeit noch nicht sicher eingeschätzt werden und hängen von unterschiedlichen technologischen und wirtschaftlichen Bedingungen sowie den Gegebenheiten an den jeweiligen Standorten ab. Darüber hinaus wird der Zeitpunkt der ökonomisch sinnfälligen Markteinführung erheblich von regulatorischen Rahmenbedingungen beeinflusst.²⁴ Außerdem ist die Entwicklung neuer technologischer Prozesse möglich, wodurch sich der Markteintrittszeitpunkt einzelner Technologien wiederum verschieben oder gar ausbleiben kann.

Dabei sollte der Markteintritt der technologischen Optionen zur Sektorenkopplung allein

²³ VCI-Position zur Sektorenkopplung, s.o. Fußnote 3

²⁴ Regulierungsgrundlagen für die Sektorenkopplung aus Sicht der chemischen Industrie v 1.0, VCI, März 2019

durch den Wettbewerb gesteuert werden, welcher wiederum grundsätzlich technologieoffen gestaltet sein muss. Auf die Notwendigkeit, bei der Einführung von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien in adäquater Weise deren begrenzte Erzeugungskapazitäten am Standort Deutschland und in Europa zu berücksichtigen, wurde oben bereits hingewiesen.

In Zukunft wird der Wettbewerb um die Nutzung der „negativen Residuallast“ – nicht bedarfsgerecht produzierter Strom (s.o.) – zunehmen. Darüber hinaus stehen Entscheidungen zu einem erheblichen Stromnetzausbau an. Dabei sind die Möglichkeiten zur Flexibilisierung der Stromnutzung²⁵ und insbesondere der großen potentiellen PtSteam-Senken der Chemieindustrie im aktuellen Szenariorahmen für den Stromnetzausbau zu berücksichtigen;²⁶ hier bestehen ungenutzte Potentiale und damit Nachbesserungsbedarf. Darüber hinaus muss der ökonomisch und volkswirtschaftlich sinnvolle Mix der Stromnutzung im Prozesswärmebereich und in der Gas- oder Kraftstoffwirtschaft abgeschätzt werden.

Exkurs „PtSteam“

Die Chemieindustrie hat einen großen Bedarf an Prozessdampf und -wärme.² Thermische Energie kann im Gegensatz zu Strom in chemischen Prozessen kaskadiert auf schrittweise fallendem Temperaturniveau mit Möglichkeiten zur Rückintegration von Abwärme genutzt werden. Dies bietet erhebliche Vorteile für die langfristige Nutzung von Dampf auch in einem Energiesystem mit erneuerbarem Strom. Prozesswärme (Power-to-Heat)-Anwendungen können in Kombination mit thermischen Großenergiespeichern und innovativer hybrider Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), d.h. unter Nutzung erneuerbaren Brennstoffs oder gespeicherter Wärme, einen Beitrag zur Flexibilisierung des Stromsystems insbesondere in der Chemieindustrie leisten.

Thermische Hoch-Temperatur-Energiespeicher stellen eine gute Option mit kostengünstiger Speicherung für die Nutzung im großtechnischen Maßstab beispielsweise dar. Derzeit wird nur die thermische Flüssigsalzspeicherung großtechnisch genutzt, die allerdings nicht die Einspeicherung (der Kondensationswärme) von Dampf ermöglicht; außerdem existiert derzeit eine Demonstrationsanlage auf Basis latenter Tieftemperaturkälte. Mit zunehmender Elektrifizierung steigt darüber hinaus der Entwicklungsbedarf zur industriellen Nutzung der Niedertemperaturabwärme. Das Konzept der hybriden KWK mit elektrisch beladenen thermischen Großenergiespeichern ist damit eine branchenspezifische Technologie mit hohen sonst nicht erreichbaren Jahresnutzungsgraden, die eine ganzjährige Strom-Ein- und Ausspeicherung ermöglichen, mit hohen Strom-zu-Strom-Wirkungsgraden.

²⁵ Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie – Methodik, Potenziale, Hemmnisse; Ausfelder, Seitz, von Roon, im Rahmen des Kopernikus Projekts „SynEnergie“ gefördert vom BMBF, 2018

²⁶ Hinweis auf die besondere Eignung von Power-to-Steam in der chemischen Industrie in, Studie „Energiezukunft 2050“, Forschungsstelle Energiewirtschaft (Ffe), 2009; sowie Fußnote 25, Bd. 2, Kapitel 3 Thermische Speicher - Zusammenfassung: „Elektrisch beheizte thermische Speicher ermöglichen einen Beitrag thermischer Prozesse zur Flexibilitätsbereitstellung durch eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung und -nutzung. Für die Grundstoffindustrien sind prinzipiell verschiedene Anwendungen denkbar. Die größten Potenziale bestehen in der Prozessdampfbereitstellung in der chemischen Industrie und in Aggregaten der Feuerfestindustrie.“

2.3. FORSCHUNGSPOLITISCHE WEICHEN JETZT STELLEN

Es ist notwendig, mögliche Transformationspfade der Chemieindustrie in Deutschland in einer zukünftigen Energieversorgung aufzuzeigen und dabei die Leitlinie der „**Technologieoffenheit**“ zu bewahren. Mit seinen traditionellen und historisch gewachsenen Netzwerken zwischen Industrie und Wissenschaft in den Sektoren der Energieversorgung und der industriellen Produktion hat der sowohl durch den zunehmenden Technologiewettbewerb als auch durch politische Rahmenbedingungen herausgeforderte Industriestandort Deutschland einen in der Welt nahezu einmaligen Vorteil. Auf der Habenseite weist die deutsche Industrielandschaft großes technologisches Know-how über eine breite Wertschöpfungskette, etablierte Infrastrukturen und im Rohstoffbereich CO₂-Punktquellen auf, wohingegen es an Rohstoffen und an potentiellen Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien mangelt. Insgesamt kann dies aber **eine besondere Chance für die Umsetzung eines neuen, auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystems**, unter Erhalt die Wertschöpfungsketten der Chemie und der benachbarten Kernbranchen, darstellen.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen um den hohen Investitionsbedarf in bestehende Infrastrukturen im Verkehrsbereich bis hin zu einem dringenden Nachholbedarf bei Digitalinfrastrukturen muss die Diskussion zur effektiven und effizienten Nutzung der vorhandenen Energieinfrastrukturen im Rahmen eines auf erneuerbaren Energien beruhenden Versorgungssystems intensiviert werden. Dazu gehören neben dem Ausbaubedarf von Stromübertragungskapazitäten auch periphere Anlagen der Energiewandlung und Energiespeicherung sowie beispielsweise Wasserstoffinfrastrukturen in der Chemieindustrie. **Bekanntermaßen ist der Infrastrukturaufbau durch lange Investitionszyklen geprägt, so dass zeitnah Grundlagen zu legen sind.**²⁷

Dies gilt auch für eine Branche wie die Chemie mit langen Investitionszyklen zur Entwicklung neuer Technologien bei neuen industriellen Prozess- und Fertigungstechniken von zwei bis drei Jahrzehnten, für die die Politik frühzeitig Weichen stellen muss. Daher braucht die Chemieindustrie langfristige Planungssicherheit, um in die Entwicklung und Markteinführung neuer, innovativer verstärkt erneuerbare Energien nutzender Technologien investieren zu können. **FuE und die Etablierung entsprechender Rahmenbedingungen großzügig und zu einem frühen Zeitpunkt, sind der einzige Weg eine innovative Industrie an der Basis der Wertschöpfungsketten zu erhalten:** „*Forschung und Entwicklung [sind zu] forcieren: Bund und Länder sollten bei der Ausrichtung der Forschungsförderprogramme darauf achten, dass Erforschung und Entwicklung der langfristig erforderlichen klimaschonenden Technologien bereits jetzt ausreichend möglich ist und Anreize für den schrittweisen Einsatz in den Unternehmen sicherstellen.*“²³ Wie oben gezeigt, sind die Anforderungen des Klimaschutzes nicht nur allein ein Thema der Energiewende, sondern bedingen mit der Einführung der zirkulären Wirtschaft des Kohlenstoffs auch eine langfristige Neuausrichtung der Rohstoffversorgung. Die langfristigen Veränderungen in der Chemieindustrie infolge der Energiewende sind aller Voraussicht nach fundamental, da „...*ambitionierte Klimaziele etwa*

²⁷ s. auch das Projekt „Carbontrans“ in Leuna in Kooperation mit dem Kooperationsnetzwerk Chemie+

für die chemische Grundstoffindustrie grundlegende Veränderungen in einem heute hochgradig integrierten Wertschöpfungsnetzwerk [mit sich bringen].²⁸

In Deutschland besteht insbesondere bei den für den Erhalt der heimischen Basischemie hoch relevanten PtC-Technologien²⁹ **erheblicher Aufholbedarf**. Dies betrifft den Bereich der Grundlagenforschung ebenso wie die Unterstützung von Pilotentwicklungen bis zu Markteinführungsmechanismen. In der Chemieindustrie bieten sich in sogenannten Hybridsystemen, die Strom und Gas aus erneuerbaren Energien in einem zum „konventionellen“ Produktionsverfahren parallelen Prozess flexibel nutzen, Möglichkeiten das zukünftige Energiesystem mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien zu flexibilisieren, die aber ihren Nachteil der hohen Investitionskosten für doppelte Produktions- und Infrastrukturen behalten würden.

Besonders die Unterstützung des **Markteintritts verbunden mit klaren und verlässlichen politischen Rahmenbedingungen** wird in wissenschaftlichen Studien als entscheidend angesehen, um unternehmensseitige FuE- und Investitionsentscheidungen in Richtung Aufbau einer heimischen PtC-Industrie zu beeinflussen (s. Anhang I, Kap. 1.2, Seite 5).

- Die erforderlichen Technologien für die zukünftige Energieversorgung müssen zum Teil noch entwickelt werden, der notwendige Zeitbedarf für FuE, Pilotanlagen und Skalierung liegt bei über 20 Jahren. Die zugrunde gelegten Studien belegen die notwendigen sehr hohen Investitionskosten für stromintensive erneuerbare Energien nutzende Prozesse. Investitionen im Energieversorgungsbereich werden derzeit durch Investitions- und betrieblichen Hürden im stark regulierten Energiemarkt behindert. Laut wissenschaftlichen Studien steht das derzeitige System von Entgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen einer weitergehenden Sektorenkopplung vielfach entgegen. Aufgrund von unsicheren regulativen Rahmenbedingungen entstehen hier also erhebliche Unsicherheiten – eine ausführliche Ableitung von Empfehlungen zur Anpassung der notwendigen Rahmenbedingungen, um ein („Level playing field“) zu erreichen, erfolgt an anderer Stelle.^{30, 31}
- Zum Abbau dieser Hürden sollten u.a. Stromnetz-Entgelte zielorientiert erhoben und diese in der Folge weitgehend von Steuern und Abgaben (zum Beispiel die EEG-Umlage und die Stromsteuer) befreit werden, da diese und andere regulatorische Zusatzkosten zum Strompreis ansonsten einen wirtschaftlichen Betrieb nicht

²⁸ dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende, Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena), Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH), Juli 2018

²⁹ „Power-to-Chemicals“ (PtC) spezifisch für Anwendungen der über Elektrolyse-H₂ erzeugten Energierohstoffe als Bausteine für die chemische Synthese (Plattformchemikalien)

³⁰ Grundlagen zur Markteinführung von Stromspeichern aus Sicht der chemischen Industrie, VCI, Juli 2017

³¹ Regulierungsgrundlagen für die Sektorenkopplung aus Sicht der chemischen Industrie, VCI, März 2019

zulassen und somit die Einführung von PtX-Technologien³² verhindern würden.

- Aus VCI-Sicht ist die sehr begrüßenswerten Fördermaßnahme „Reallabore“ im 7. Energieforschungsprogramm für die Transformation der Energiewirtschaft und -nutzung sowie für die Sektorenkopplung notwendig, aber nicht hinreichend, um Reallabore dauerhaft im Industriemaßstab etablieren zu können. Es müssen im Dialog der Stakeholder zeitnah Gesetze, Richtlinien und Verordnungen im Bereich der Energieversorgung im Sinne der Möglichkeit, die Reallaborprojekte langfristig fortführen zu können und den Unternehmen Investitionssicherheit zu geben, nachgesteuert werden.

Die **Empfehlungen zur Förderung zukünftigen Forschungsbedarfs und zu adäquaten forschungspolitischen Rahmenbedingungen für die Energieversorgung aus Sicht der Chemieindustrie** finden sich im Anhang II („Ableitung forschungspolitischer Empfehlungen“ auf Seite 23), abgeleitet aus einer Analyse zentraler Studien zur Energieforschung, die sich vorangestellt in Anhang I („Studienanalyse“ auf Seite 15) findet.

Ansprechpartner im VCI

Dr. Martin Reuter, Verband der Chemischen Industrie e.V., Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt, Telefon: ++49(0)69/2556-1584, E-Mail: reuter@vci.de; Website: www.vci.de; Twitter: [@chemieverband](https://twitter.com/chemieverband)

Registernummer des EU-Transparenzregisters: 15423437054-40. Der VCI ist in der „öffentlichen Liste über die Registrierung von Verbänden und deren Vertretern“ des Deutschen Bundestags registriert.

Der VCI vertritt die wirtschaftspolitischen Interessen von rund 1.700 deutschen Chemieunternehmen und deutschen Tochterunternehmen ausländischer Konzerne gegenüber Politik, Behörden, anderen Bereichen der Wirtschaft, der Wissenschaft und den Medien. Der VCI steht für mehr als 90 Prozent der deutschen Chemie mit rund 183 Mrd. Euro Umsatz in 2016 und 446.000 Mitarbeitern.

³² PtX: „X“ ist die Verallgemeinerung für alle Anwendungsfelder, bei denen erneuerbare Energien in andere Energieformen zur Nutzung in anderen Sektoren gewandelt wird.

Anhang

I. Studien-Analyse

1. BMWi-Leitprojekt zu Technologien und zu Trends für die Energiewende

Das BMWi-Leitprojekt zu Technologien und zu Trends für die Energiewende³³ untersucht Lücken bei der Technologieentwicklung, den Bedarf zur Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen sowie der Formate der Energieforschungsförderung. Es soll Impulse für das 7. Energieforschungsprogramm liefern. Aus Sicht des VCI sollte das Leitprojekt ein zentraler Orientierungspunkt für die weiteren Aktivitäten zur Energieforschung sein.

1.1. Strukturen der Energiesektoren

Hinsichtlich der Energieträger und der Sektoren wird festgestellt:

- **Elektrifizierung:** „Die Elektrifizierung unterstützt die Integration der erneuerbaren Energien und wird mit deren Ausbau in Kombination mit Flexibilitätsoptionen weiter an Bedeutung gewinnen. Energieeffiziente Wärmeerzeugung in Form von PtHeat-Anwendungen ... (Wärmepumpen, Elektrowärme, Elektrifizierung im Verkehr) ... substituier[t] fossile Energieträger.“ Dabei stellen „einerseits die Weiterentwicklung einzelner Technologien und andererseits die Systemintegration inklusive Sicherstellung der Versorgungssicherheit Herausforderungen für die Energieforschung dar.“
- **Erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe:** Für die Substitution fossiler Brenn- und Kraftstoffe und „als zentrales Element für die Versorgungssicherheit“ „spielen alternative Kraftstoffe [flüssige chemische Energieträger] aus regenerativen Energieträgern eine wesentliche Rolle.“ Forschungsbedarf besteht bei der Optimierung der Herstellungsverfahren und Prozessrouten inklusive der Erschließung geeigneter CO₂-Quellen und bei der Verbesserung der Wirkungsgrade sowie dem Anlagen-Up-scaling und der Integration in das Energiesystem; erforscht werden sollten weiterhin die Pfadabhängigkeiten der industriellen Produktion, die aus neuen Infrastrukturen erwachsen. Darüber hinaus wird Forschungsbedarf für die energetische und stoffliche Nutzung alternativer Brennstoffe für Prozesswärmeanwendungen und innovative KWK-Techniken gesehen.
- **Querschnittsthemen:** Flexibilitätsoptionen und Sektorenkopplung: „Flexibilitätsoptionen müssen ganzheitlich betrachtet und bewertet werden. ... es [ist] wichtig, Flexibilitätsoptionen so weiterzuentwickeln, dass diese effizienter, kostengünstiger und

³³ Leitprojekt „Technologien für die Energiewende - Forschungsbedarfe und Marktpotenziale“ wurde vom Wuppertal Institut, Frh ISI und dem IZES, September 2018; Strategisches Leitprojekt des BMWi „Trends und Perspektiven der Energieforschung“ - Teilprojekt B „EnFo-2030“: Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende, DLR, FfE e.V., ifo Institut und Universität Münster, TU München, September 2018

ressourcenschonender werden.“ „Es müssen neue Ansätze in der Bewertung und zu einer systemdienlichen Marktintegration von Flexibilitätsoptionen gefunden und dabei weltweite Entwicklungen berücksichtigt werden.“

1.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung

Das BMWi-Leitprojekt identifiziert folgende Lücken in der Technologieentwicklung:

- **Power-to-Gas (PtG und PtH₂)-Technologien:**³⁴ Ein wesentlicher Anteil der Bruttowertschöpfung von H₂-Technologien wird im Maschinenbau gesehen. Es wird festgestellt, dass die derzeit verfügbaren Elektrolyseure noch nicht serienreif im Sinne eines Einsatzes zur Umwandlung erneuerbaren Stroms sind. Die Forschung für diese für das zukünftige erneuerbare Energiesystem relevante Technologie sollte mit einem Schwerpunkt auf die Verbesserung der Kosten und Effizienz ausgerichtet sein. „Der Ausbau der Elektrolysetechnik muss schon heute beginnen, damit notwendige zukünftige Kostensenkung durch Stückzahl und Scale up-Effekt erreicht werden ein Bedarfssprung abgemildert werden kann.“ Es wird ein hohes Marktpotenzial durch einen großen internationalen Exportmarkt gesehen.
- **Power-to-Gas-Technologien**
 - Methanisierung chemisch-katalytisch: Die Entwicklungsstufen der einzelnen Methanisierungstechnologien sind von Grundlagenforschung bis nahezu Marktreife unterschiedlich. Dabei stellen der intermittierende Betrieb und die Wärmekontrolle eine besondere Herausforderung dar, wozu unterschiedliche Konzepte benötigt werden. Dies gilt nicht zuletzt hinsichtlich der Wartung und Betriebskosten. Weiteres FuE-Potential wird für DAC-Technologien³⁵ zur CO₂-Bereitstellung aus der Luft inklusive systemdienliche Gesamtkonzepte gesehen.
 - Methanisierung biologisch: Leistungsoptimierung insbesondere hinsichtlich des H₂-Eintrags, Kostenentwicklung, Flexibilisierungspotential, Bereitstellungskosten aufgrund erhöhten Bedarfs an Kohlendioxid, Klimateffizienz der biologischen Methanisierung;
 - Bioelektrochemische Methanisierung: Interaktion zwischen Mikrobiologie und Elektrodenmaterial, Reaktorkonzepte, Leistungsoptimierung.
- **Power-to-Liquids/Chemicals-Technologien:**²⁷ Das Forschungsfeld Power-to-Liquids (PtL) ist im Vergleich zum Thema Biokraftstoffe aber auch zu PtG noch wenig bearbeitet. PtL- und Power-to-Chemicals (PtC)-Technologien wird zugesprochen, die

³⁴ Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Hydrogen (PtH₂): Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien – in der Regel über Elektrolyseverfahren in H₂ (PtH₂) und in einem weiteren Schritt mit CO₂ zu „synthetischem“ Methan (Erdgas). Power-to-Liquids (PtL): Umwandlung der PtH₂ und PtG-Produkte zu Kohlenwasserstoffen; bei „PtL“ in Kraftstoffe für den Mobilitätsbereich, bei „Power-to-Chemicals“ spezifisch für Anwendungen der erzeugten Energierohstoffe als Bausteine für die chemische Synthese (Plattformchemikalien).

³⁵ Sammlung von CO₂ aus der Luft durch Ad- und anschließender Desorption an aminfunktionalisierten Polymeren

Notwendigkeit eines ambitionierten Netzausbaus zu entschärfen. Es wird deutlich, dass sich der Bedarf an H₂ und damit an regenerativ erzeugtem Strom erheblich erhöhen wird, ebenso der Bedarf an CO₂ als Rohstoff (hier besteht eine Verbindung zur Biogasherstellung, die gewisse Kapazitäten an CO₂ aus biogenen Quellen zur Verfügung stellen kann). Universeller Forschungsbedarf wird auf dem Gebiet der Katalysatoren in Kombination mit dazugehörigen chemischen Prozessen (Prozesseffizienz, Prozessverständnis, Anlagen-Set-up) und Materialien bzw. Trägermaterialien gesehen, insbesondere für die Fischer-Tropsch-Synthese³⁶ und die Methanol- bzw. Ammoniaksynthese. Weiterhin bleiben Life Cycle Analysen (LCA) ein wichtiges Thema. Insbesondere bei PtC-Technologien, die „für den Erhalt der heimischen Basischemie hoch relevant“ sind, wird für Deutschland ein „erheblicher Aufholbedarf“ gesehen. Dabei sollte sich „die notwendige Förderung [...] auf alle Bereiche erstrecken, von der Katalyse-Grundlagenforschung über die Unterstützung von Pilotentwicklungen bis zu Markteinführungsmechanismen. Besonders letzterer Bereich, verbunden mit einer klaren verlässlichen politischen Signalgebung ist entscheidend, um unternehmensseitige FuE- und Investitionsentscheidungen hin zu einem Aufbau einer heimischen PtC-Industrie zu beeinflussen. Ist diese Zielrichtung belastbar vorgegeben, steigt das Interesse von potentiellen Marktakteuren hinsichtlich der Investitionen in FuE-Aktivitäten wesentlich an.“

Innovationslücken mit Chemiebezug in Fazit:

- Dies sind u.a. künstliche Photosynthese, reversible Elektrolyseure, CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC), CCU im Kleinmaßstab bei CO₂-Quellen, Ertüchtigung von Salzkavernen für die H₂-Einlagerung, Nutzungsmöglichkeiten bestehender Infrastrukturen für PtG-Anwendungen von H₂, Untersuchung der Potentiale klimaneutraler CO₂-Quellen und Anlagenskalierbarkeit für PtG (Methanisierung).

1.3. Energiebedarf und Potentiale:

s. „1.2.“

1.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung

Die Studie äußert sich zu aktuellen regulatorischen Herausforderungen und Förderformaten bzw. Strukturen zur Umsetzung der Energieforschung wie folgt:

- **Regulatorische Herausforderungen:** Die Frage der Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen ist zu klären ebenso wie die Effizienz der Wirkung von Preissignalen auf eine „Dekarbonisierung des Energiesystems“. „Zu prüfen sind auch die Finanzierungsmöglichkeiten und die Abstimmung sowohl von Maßnahmen zur Flexibilisierung der Energienachfrage als auch von Optionen zur Bereitstellung und Flexibilität und Sicherung der Versorgungssicherheit über Energiespeicher und Back-up-Erzeugungskapazitäten.“ Dabei steht heute „das derzeitige System von

³⁶ Die Fischer-Tropsch-Synthese (auch Fischer-Tropsch-Verfahren, kurz FT-Synthese) ist ein großtechnisches Verfahren zur Kohleverflüssigung durch indirekte Hydrierung von Kohle.

Entgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen [...] vielfach einer weitergehenden Sektorkopplung entgegen. Eine Weiterentwicklung dieses Systems der Energiepreise erscheint in diesem Zusammenhang als wichtige regulatorische Herausforderung“ Die Studie stellt fest: „Reallabore können in der Energieforschung einen wichtigen Mehrwert bieten, um FuE-Ergebnisse durch die Interaktion mit dem Nutzer in realer Umgebung schneller in erfolgreiche Produkte und Services zu überführen.“ Darüber hinaus werden Kriterien für die Einrichtung von Reallaboren aufgestellt.

- **Förderformate:** „Die Bewältigung der vielfältigen Herausforderungen der Energiewende erfordert eine konzeptionelle Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Deutschland, bei der neu und über die bestehende Systematisierung hinweg gedacht wird.“ Es „erscheint auch eine ressortübergreifende Ausgestaltung und Koordination der Forschungsförderung sinnvoll.“ Dabei wird die Notwendigkeit herausgestellt, bei der Weiterentwicklung des Energieforschungsprogramms „auch die Formate und Ausgestaltung der Forschungsförderung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen“. Dies betrifft die konzeptionelle Gestaltung des Forschungsprogramms, die Art und Zusammensetzung der geförderten Projekte bis zur administrativen Organisation und Koordination der Förderung. Auch für die Effizienzverbesserung von Förderverfahren wird Bedarf gesehen, denn „der Aufwand für Koordination, Abstimmung ... [wird] als hoch eingestuft.“

2. dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050“²⁴

Die Studie betrachtet drei Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien:

- Ein Referenzszenario mit Fortschreibung der aktuellen Politik- und Technologieentwicklungen bis 2050, aber demzufolge ohne Zielerreichung.
- Ein Elektrifizierungsszenario mit der Annahme einem Schwerpunkt auf die Elektrifizierung aller Sektoren, jeweils mit 80 und 95 %- Ziel.
- Ein Technologiemixszenario mit breiter Anwendung unterschiedlicher Technologien und Energieträger, jeweils mit 80 und 95 %-Ziel.

Das Treibhausgas-Minderungsziel von 80 % und auch das 95 %-Ziel werden mit erheblichen Anstrengungen in allen Sektoren als erreichbar angesehen. Es wird festgestellt, dass ein breit gefächertes Energieträgermix ökonomisch kostengünstiger und technologisch robuster als die einseitige Ausrichtung auf strombasierte Anwendungen ist. Dabei ist der Ausbau der erneuerbaren Strom-Erzeugungskapazitäten bis an die Grenzen von Akzeptanz und technischer Umsetzbarkeit unverzichtbar.

2.1. Strukturen der Energiesektoren

- **Für die chemische Grundstoffindustrie werden erhebliche Veränderungsnotwendigkeiten ausgemacht:** „Der mit der Transformation verbundene Strukturwandel betrifft neben den viel diskutierten Veränderungen in der Kohlewirtschaft

perspektivisch auch viele weitere Branchen und Industriezweige. So bringen ambitionierte Klimaziele etwa für die chemische Grundstoffindustrie grundlegende Veränderungen in einem heute hochgradig integrierten Wertschöpfungsnetzwerk.“

- **„Folgen der Energiewende für die Industrie untersuchen:** Die Bundesregierung sollte kurzfristig Folgestudien zu den genauen strukturellen Auswirkungen der Energiewende auf die Industrie und die verfügbaren Grundstoffe in den verschiedenen Branchen anstoßen, um Chancen und Risiken rechtzeitig und angemessen adressieren zu können.“

2.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung

- **Analyse der Transformationspfade:** Die Transformationspfade werden gewertet und verglichen. Aussagen zum Kostenoptimum des Gesamtsystems können daher in der Studie nicht getroffen werden: „Es war im Rahmen der dena-Leitstudie außerdem nicht möglich, die Investitionen im Industriesektor realistisch abzuschätzen. Zum einen sind die Anlagen im industriellen Bereich meist sehr individuell ausgelegt; es lassen sich deshalb kaum Standardinvestitionskosten bestimmen. Zum anderen handelt es sich teilweise um Technologien, die noch zu entwickeln sind oder deren weitere Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet ist. Eine wissenschaftlich fundierte Benennung der notwendigen Investitionskosten ist nicht möglich.“
- **Technologiemix mit sektorübergreifendem Energiesystem:** Ein Technologiemix mit sektorübergreifendem Energiesystem ist realistisch und wirtschaftlich günstiger. Technologiepolitische Rahmenbedingungen sollen Technologieoffenheit sichern: „Die Investitionszyklen zur Entwicklung neuer Technologien sind je nach Branche sehr unterschiedlich und können bei neuen industriellen Prozess- und Fertigungstechniken zwei bis drei Jahrzehnte umfassen. Die Wirtschaftsakteure brauchen deshalb langfristige Planungssicherheit, um in die Entwicklung und Markteinführung neuer, innovativer Technologien investieren zu können.“
- **„Wasserstoffanwendungen einführen:** Die Industrie bietet einen guten Einstiegsmarkt für Wasserstoffanwendungen. Bund und Länder sollten weitere Pilotprojekte zur Wasserstoffnutzung in der Industrie anstoßen und fördern. Die Umsetzung sollte – im Sinn einer integrierten Energiewende – erneuerbare Energien, Infrastrukturen und Industriekunden ganzheitlich betrachten.“
 „Bei der Einführung von neuen Wasserstoffanwendungen sollte von Anfang an insbesondere CO₂-frei erzeugter Wasserstoff eingesetzt werden, um einen Entwicklungsmarkt für die Skalierung von Power-to-Gas/ Power-to-Liquid-Technologien zu schaffen. Die Bundesregierung sollte dafür auf europäischer Ebene auf eine angemessene Anrechenbarkeit der Nutzung von klimafreundlichen synthetischen Energieträgern auch in Vorprozessen auf anwendungssektorspezifische Quoten und Ziele hinwirken. Dies betrifft beispielsweise die Treibhausgas-Minderungsquote beziehungsweise die Flottenemissionsziele der Fahrzeughersteller. Dadurch kann beispielsweise für derzeitige Wasserstoffanwendungen in Raffinerien ein Anreiz zum Einsatz von grünem Wasserstoff entstehen.“

2.3. Energiebedarf und Potentiale

- **PtX:** Es wird davon ausgegangen, dass PtX-Produkte („Green PowerFuels“) ein entscheidender Faktor sind und dass diese zum Großteil nach Deutschland importiert würden: „Dritter entscheidender Faktor sind synthetische erneuerbare Energieträger, die zum Großteil nach Deutschland importiert werden. Sie decken im Jahr 2050 zwischen 150 und 900 TWh/a in allen Anwendungsbereichen ab, die sich durch eine direkte Nutzung erneuerbaren Stroms nicht oder nur schwer von Emissionen befreien lassen. Diese „Green PowerFuels“ schließen zugleich Lücken, die perspektivisch durch Umsetzungshemmnisse entstehen.“
- **CCS und CCU:** Ein 95 % Ziel ist nicht ohne CCS oder CCU erreichbar: „Im Industriesektor verbleiben auch unter Berücksichtigung der heute absehbaren technischen Innovationen bei emissionsintensiven Prozessen noch CO₂-Emissionen von insg. 16 Mio.t CO₂. Diese Emissionen können aus heutiger Perspektive nur durch den Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Capture and Utilization (CCU) vermieden werden.“

2.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung

- **Zu den energiepolitischen Rahmenbedingungen und zu den Exportchancen für die deutsche Wirtschaft:** „Die Energiewende kann nur gelingen, wenn sie auch industrie- und wirtschaftspolitisch ein Erfolg ist. Dafür braucht es einerseits Instrumente zum Schutz der deutschen Industrie vor Wettbewerbsnachteilen aufgrund im internationalen Vergleich höherer deutscher Klimaschutzanforderungen (Carbon-Leakage-Schutz) und internationale Vereinbarungen für den globalen Handel. Andererseits bietet der weltweit wachsende Bedarf an Energiewendetechnologien auch Exportchancen für die deutsche Wirtschaft.“
- **Zur CO₂-Bilanzierung:** Die Leitstudie verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, wichtige Systemgrenzen werden genannt: Es gilt das Quellprinzip, d.h. die Emissionen werden am Entstehungsort angerechnet. Allerdings werden importierte Brenn- und Kraftstoffe, die mithilfe von erneuerbaren Energien unter Verwendung von CO₂ aus der Luft oder aus CO₂-haltigen Abgasen synthetisch erzeugt werden, klimaneutral gewertet: „Abweichend vom Quellprinzip werden Emissionen aus der Verbrennung solcher importierten „GreenPowerFuels“ in der dena-Leitstudie als klimaneutral betrachtet, da es sich um einen Kohlenstoffkreislauf handelt: Die Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, wurden zuvor an einer anderen Stelle aus der Atmosphäre entnommen. Folglich gehen synthetische Brennstoffe mit einem CO₂-Faktor von null in die nationale CO₂-Bilanzierung ein.“
- Aus den **Handlungsempfehlungen** der Leitstudie:
 - „Rahmen für CO₂-Vermeidung sichern: Die Politik sollte ein verlässliches regulatorisches Fundament gestalten, das auf die Vermeidung von CO₂-Emissionen ausgerichtet ist, möglichst auf europäischer oder globaler Ebene.“

- „Internationale Märkte aufbauen: Die Bundesregierung sollte konsequent für die Entwicklung globaler Märkte für synthetische Brenn- und Kraftstoffe werben, diese mit anstoßen und unterstützen (zum Beispiel im Rahmen der Energiepartnerschaften und auf G20-Ebene) sowie die Technologieführerschaft anstreben.“
- „Die Bundesregierung sollte die Einführung von zeitlich begrenzten Instrumenten zur Markteinführung von Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Anlagen prüfen.“
 „Forschung und Entwicklung [sind zu] forcieren: Bund und Länder sollten bei der Ausrichtung der Forschungsförderprogramme darauf achten, dass die Erforschung und Entwicklung der langfristig erforderlichen klimaschonenden Technologien bereits jetzt ausreichend möglich ist und Anreize für den schrittweisen Einsatz in den Unternehmen sicherstellen. Die Politik muss schnellstmöglich stabile Rahmenbedingungen schaffen und Schwerpunkte setzen, um die Bereitschaft der Industrie für Investitionen in neue Verfahren zu erhöhen und diese langfristig kalkulierbarer zu machen (Planungssicherheit).“

3. Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)²⁰

Die Analyse des ESYS-Projekts kommt zu dem Schluss, dass die Klimaschutzziele nur bei ganzheitlicher Optimierung aller Sektoren im Energiesystem erreicht werden können. Dabei werden die „systemischen Mehrkosten der Energiewende“ je nach Reduktionspfad der CO₂-Emissionen (70 - 85%) auf 1 bis 2 % des deutschen BIP von 2016 geschätzt, also 30 - 60 Mrd. € jährlich bis 2050 bzw. in Summe 1 - 2 Bio. € bis 2050. Eine Reduktion von über 85% hält die Studie bis 2050 für unrealistisch. Erst ab 2050 könne die „finale Defossilierung“ beginnen.

3.1. Strukturen der Energiesektoren

- Die Sanierungsquoten für den Gebäudebestand müssten deutlich erhöht werden, um alle Gebäude bis 2050 energieeffizient zu machen. Hier wird kurzfristiger Handlungsbedarf gesehen.

3.2. Technologische Pfade und Lücken in der Technologieentwicklung

- **Effizienten Technologien zur Stromnutzung wie Elektroautos und Wärmepumpen** wird eine hohe Bedeutung prognostiziert. **Synthetische Brenn- und Kraftstoffe** würden voraussichtlich ab etwa 2025 in größerem Umfang benötigt, ab 2030 sollen H₂ und synthetische Kraftstoffe das Energiesystem prägen; dabei wird auch der Import synthetischer Brenn- und Kraftstoffe diskutiert. Die Potentiale der Bioenergie seien effizient zu nutzen.
- Für die Industrie werden **Hybridsysteme** aus Strom und Gas als Flexibilisierungsmöglichkeiten gesehen, die aber ihren Nachteil der hohen Investitionskosten für doppelte Infrastrukturen behalten würden. Für die Schaffung von Pufferkapazitäten durch Sektorenkopplung würden sowohl entsprechende Steuerungstechniken als auch

geeignete Geschäftsmodelle benötigt. Größere Effizienzpotenziale werden bei der Nutzung industrieller Abwärme gesehen.

3.3. Energiebedarf und Potentiale

- Der **Stromverbrauch** könnte sich laut der Studie bis 2050 aufgrund von zunehmender Elektrifizierung nahezu verdoppeln. In der Folge müssten die **Kapazitäten der Windkraft- und PV-Anlagen** um den Faktor 5 - 7 auf mehr als 1.000 TWh und einer installierten Leistung von bis zu 500 GW anwachsen.
- **Kurz- bzw. Langzeitspeicher sowie flexible Stromnutzungsmodelle** müssten künftig dazu beitragen, die Volatilität der Erzeugung auszugleichen. Darüber hinaus würden Reservekapazitäten im Umfang etwa der heutigen konventionellen Kraftwerkskapazitäten benötigt, vornehmlich emissionsarme Gaskraftwerke mit H₂, Erdgas oder synthetischem Methan sowie Brennstoffzellen.

3.4. Politische Rahmenbedingungen: Förderformate und Regulierung

- Das zentrale Instrument zur Erreichung der Klimaziele sei ein „**einheitlicher, wirksamer CO₂-Preis**“: „Eine Möglichkeit besteht darin, das europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) auf alle Sektoren auszuweiten und einen Preiskorridor festzulegen. Gelingt dies nicht, könnte eine europaweite oder nationale CO₂-Steuer eingeführt werden.“ Darüber hinaus werden ergänzende Maßnahmen wie Investitionszuschüsse, Steuererleichterung, Marktanzreizprogramme und die staatliche Ko-Finanzierung von Infrastrukturen sowie eine FuE-Förderung als notwendig angesehen. Die Anpassung des rechtlich-regulatorischen Rahmens für den großflächigen Einsatz von H₂ und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen müsste zeitnah angegangen werden.

II. Ableitung forschungspolitischer Empfehlungen

Trotz zahlreicher Projekte zum Thema „Power-to-X“ (PtX) bleiben in der Chemieindustrie Forschungslücken und Lücken der Forschungsförderung in Bereichen, die wesentliche Impulse zur Flexibilisierung und gegebenenfalls zur Elektrifizierung von Industrieprozessen und der Sektorenkopplung leisten können und die daher geschlossen werden müssen. Dies sind beispielsweise Prozesse der Vergasung und Pyrolyse zur Kreislaufführung des Kohlenstoffs, zu Plasmaprozessen, zur Methan(Erdgas)spaltung und zu elektrochemischen Verfahren sowie zu alternativen Verfahren der Hybrid-Produktion zur Nutzung erneuerbarer Energien an den Chemiestandorten. Deren Bedeutung ist zwar derzeit noch vergleichsweise gering, sie weisen aber im Kontext der Sektorenkopplung und einer verstärkten Elektrifizierung hohe Potentiale auf.

Auf Basis der oben zitierten wissenschaftlichen Studien lassen sich forschungspolitische Empfehlungen zur zukünftigen Energieversorgung ableiten. Als Leitfragen bzw. Randbedingungen werden folgende Schlussfolgerungen einer Metastudie im Auftrag des VCI³⁷ zugrunde gelegt:

1. Um die Emissionen um mindestens 80 % zu senken, müssen in allen zentralen Sektoren der deutschen Industrie bestehende Strukturen verändert werden. In diesen Veränderungen liegen große Risiken aber auch Chancen für die deutschen Wertschöpfungsmotoren.
2. Die Entwicklung der Verfahren – spezifisch in der Chemieindustrie – wird in den vorliegenden Studien noch zu wenig thematisiert. Dabei erfordern alle in den Studien betrachteten Szenarien zeitnahe Technologieentscheidungen ab den frühen 20er Jahren dieses Jahrhunderts.
3. Auf den Zusammenhang zwischen zukünftigen Energie- und Rohstoffbedarf der Chemieindustrie finden die zugrunde gelegten Studien keine eindeutige Antwort. Diese müssen aber zumindest aus forschungspolitischer Sicht vorskizziert werden, um die notwendigen Energieforschungsprojekte priorisieren zu können.
4. Die resultierenden politischen Handlungsempfehlungen der Studien sind aus Sicht der Chemieindustrie zu spezifizieren. Ohne regulatorische Rahmenbedingungen, welche die spezifischen Bedingungen der Markteinführung neuer Technologien berücksichtigen, werden sich innovative Projekte, d.h. die Umsetzung der Ergebnisse der Energieforschung, nicht realisieren lassen.

Einzelne Themenstichworte werden in dieser Systematik mehr als einmal genannt, da die Themenfelder hier aus dem Blickwinkel unterschiedlicher Fragestellungen und damit von verschiedenen Forschungsprogrammen adressiert werden sollen.

³⁷ Metastudie "Transformationspfade für die chemische Industrie in Deutschland", FutureCamp im Auftrag des VCI, September 2018

1. Zukünftige Infrastrukturen der Chemiesektoren bei mindestens 80 % Emissionsminderung und Einbindung diskontinuierlich anfallender Energie

Ziel:

Forschungspolitische Empfehlungen zur Vorbereitung der zukünftigen potentiellen Infrastrukturen **des Chemiesektors**, wenn dieser **in einem Energiesystem** arbeitet, welches bereits **mindestens 80 % der Emissionen** im Vergleich zu 1990 **gesenkt** hat und diskontinuierlich anfallende erneuerbarer Energie einbindet.

Leitfragen & Rahmenbedingungen für die Ableitung von FuE-Empfehlungen:

- Die Flexibilitätspotentiale in der Industrie sind begrenzt.
- Die Speicherkosten sind hoch.
- Die Rolle der KWK-Anlagen ist noch ungeklärt.
- Die Energieversorgungssysteme weisen für die Nutzung erneuerbarer Energien – teilweise aufgrund ihrer Volatilität notwendige – Redundanzen auf.
- Ein adäquater Infrastrukturausbau des Strom- und Gasnetzes bleibt notwendig.

Empfehlungen für Forschung und Entwicklung:

- Hybride KWK:
 - Bewertung des Potentials hybrider KWK mit elektrisch beladenen thermischen Großenergiespeichern zur Kostenoptimierung und Stabilisierung des Stromgesamtsystems und des möglichen Beitrags zur wirtschaftlichen und sicheren Energieversorgung von Industriestandorten.
 - Energieversorgung der Produktionsstandorte auf erneuerbarer Basis, insbesondere Bereitstellung von Prozessdampf
- Elektrifizierung in der Chemieindustrie:
 - Elektrifizierung zur Integration der erneuerbaren Energien und deren Ausbau in Kombination mit Flexibilitätsoptionen: Energieeffiziente Wärmeerzeugung in Form von PtHeat-Anwendungen (Wärmepumpen, Elektrowärme) zur Substitution fossiler Energieträger; Weiterentwicklung einzelner Technologien und die Systemintegration inklusive Sicherstellung der Versorgungssicherheit.
- Elektrifizierung in anderen Sektoren:
 - Entwicklung effizienter Technologien zur Stromnutzung wie Elektroautos (sowohl Batterien als auch mit Brennstoffzellen)
- Flexibilitätsoptionen und Sektorenkopplung:
 - Neue Ansätze zur Bewertung und zur systemdienlichen Marktintegration von

Flexibilitätsoptionen zur weiteren Technologieentwicklung.

- Systemische Untersuchungen bezüglich benötigter Strom- und Gasnetzinfrastruktur sowie deren Kopplung untereinander: Untersuchung der Auswirkungen einer großflächigen Kopplung von Sektoren mit deren zukünftigen individuellen Bedarfsprofilen an gasförmigen und flüssigen Energieträgern (hergestellt mit erneuerbaren Energien) sowie des Strombedarfs.
- Zirkuläre Wirtschaft
 - Entwicklung von Verfahren der zirkulären Wirtschaft des Kohlenstoffs unter Nutzung erneuerbaren Stroms zur Herstellung und Speicherung von H₂.
 - Rolle und Energiebedarf von Recycling-Technologien für die Chemieindustrie, insbesondere für Polymere und Kunststoffe
 - Verfügbarkeit und Verwendungszweck von Biomasse (für die rohstoffliche Nutzung für Grundchemikalien oder für die Nutzung zu energetischen Zwecken).

2. Technologische Pfade für die Sektorenkopplung und die zukünftige Rolle einzelner Technologien

Ziel:

Fokus auf Empfehlungen für die Entwicklung der notwendigen technologischen Optionen für die Umsetzung der Sektorenkopplung

Leitfragen für die Ableitung von FuE-Empfehlungen:

- Wie lässt sich der Mix an Roh-/Brennstoffen aus Wasser, CO₂, Biomasse oder Reststoffen für die Chemieindustrie und für andere Industrien gestalten?
- Welche Rolle spielt zukünftig Methan aus Elektrolyse-H₂ im Energiegesamtsystem?
- Kann es alternative Plattformchemikalien neben oder anstelle von Methan aus Elektrolyse-H₂ geben, die als Energieträger dienen wie z.B. Methanol, Ameisensäure oder Ammoniak?
- Wie müssen die Kapazitäten der benötigten Wasserelektrolysen bemessen sein, um deren Betriebsstunden zu maximieren bei gleichzeitiger maximaler Nutzung von Strommengen aus erneuerbaren Quellen, die andernfalls abgeregelt werden müssten? Ist die Anzahl der Betriebsstunden ausreichend, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Elektrolysen zu gewährleisten?³⁸
- Nach wie vor herrscht große Unklarheit mit Blick auf einzuschlagende technologische Pfade, mit Blick auf die zukünftige Rolle von Technologien wie Wasserelektrolyse

³⁸ Andernfalls würde der Wasserstoff entweder zu teuer oder die Nutzung von „Graustrom“ würde insgesamt zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen führen.

und Brennstoffzelle, Li-Ionen-Akkus im Mobilitätssektor, Elektrokesseln und Großwärmepumpen zur Wärmeerzeugung sowie hinsichtlich der Erfordernisse von Speichersystemen. Unter welchen Voraussetzungen und zu welchem Zeitpunkt nähern sich die Kosten zur Produktion von gasförmigen oder flüssigen Kraftstoffen basierend auf Elektrolyse-H₂ den heutigen Kraftstoffkosten an? Wie lassen sich eine klimafreundliche Herstellung im Ausland und der Transport der Energie- und Rohstoffe nach Deutschland gestalten, wie sind diese zu evaluieren? (s.a. III).

Empfehlungen für Forschung und Entwicklung:

- H₂-Herstellung (Elektrolyse-Technologien) und alternative Prozesse
 - Entwicklung serienreifer Elektrolyse-Technologien in sektorgekoppelten Systemen insbesondere hinsichtlich der Kosten und Effizienz auch für den internationalen Exportmarkt.
 - Skalierung der Elektrolysetechnologie zur Senkung der Investitions- und betriebswirtschaftlichen Kosten für die Herstellung von H₂ aus erneuerbaren Energien und für Synthesegas zur Ergänzung der Nutzung in herkömmlichen H₂- und Synthesegasanwendungen; Intensivierung der Forschung zur Verringerung der Edelmetallkatalysatorbeladung und neuer Werkstoffe für die Niedertemperaturelektrolyse.
 - Weiterentwicklung der lastflexiblen Niedertemperaturelektrolyse wie der alkalischen und der PEM-Wasserelektrolyse hinsichtlich Investitions- und Betriebskosten zur netz- und systemdienlichen Nutzung im Bereich kurz- und mittelfristiger Schwankungen in Kombination mit H₂-Speichern; Entwicklung und Integration der netzbasierten Transport- und Speicherlösungen industriellen Maßstab.
 - Entwicklung kleiner kostengünstiger Elektrolyseure und H₂-Speicher für die lokale Unterstützung dezentraler Energiesysteme (Verteilebene, H₂-Tankstellen etc.)
 - Evaluierung alternativer Verfahren zur H₂-Herstellung (zum Beispiel durch thermochemische Redox-Reaktion oder biologische Verfahren) hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Klimarelevanz.
- Hybride Produktionsverfahren:
 - Entwicklung von PtX-Technologien und Elektrolyseverfahren zur Herstellung von chemischen Grundstoffen (Plattformchemikalien)
 - Entwicklung und Etablierung von Hybridsystemen aus Strom und Gas sowie Biomasse als Flexibilisierungsmöglichkeiten: Steuerungstechniken und Geschäftsmodelle für die Realisierung von Pufferkapazitäten in der Industrieproduktion mit doppelten Infrastrukturen
- Technologien zur Methanisierung
 - Weiterentwicklung von Technologien zur Methanisierung (chemisch-katalytisch)

von der Grundlagenforschung bis nahezu Marktreife insbesondere hinsichtlich des intermittierenden Betriebs und der Wärmekontrolle.

- Stärkere Betonung des Forschungsfelds Power-to-Liquids und Power-to-Chemicals insbesondere auf dem Gebiet der Katalysatoren in Kombination mit dazugehörigen chemischen Prozessen (Prozesseffizienz, Prozessverständnis, Anlagen-Set-up) und Materialien/Trägermaterialien
 - Stärkung der Forschung zur Fischer-Tropsch-Synthese und zur Methanol- beziehungsweise Ammoniaksynthese.
- Elektrische Wärmeerzeuger (PtHeat), Abwärmenutzung und thermische Speicher:
 - Entwicklung thermischer Energiespeicher (sensibel, latent, thermo-chemisch) hoher Temperatur für den großtechnischen Maßstab (Großenergiespeicher)
 - Entwicklung und praktische Erprobung von Niedertemperatur-Technologien und Betriebskonzepten für PtHeat-Systeme bei stark fluktuierenden Strompreisen (hybride Wärmeerzeuger), Entwicklung von Planungsinstrumenten zur Integration in Alt- und Neuanlagen sowie für eventuell erforderliche ergänzende Infrastrukturen.
 - Entwicklung von Großwärmepumpen zur Abwärmenutzung (auch für höhere Temperaturen)
- Alternative C-Quellen und CO₂-Nutzung
 - Entwicklung kostengünstiger Direct-Air-Capture (DAC)-Technologien inkl. systemdienlicher Gesamtkonzepte zur Verbesserung der Energieeffizienz.
 - Substitution fossiler Brenn- und Kraftstoffe: Optimierung der Herstellungsverfahren und Prozessrouten inklusive der Erschließung geeigneter CO₂-Quellen und Verbesserung der Wirkungsgrade, Anlagen-Up-scaling und Integration ins Energiesystem; Erforschung der Pfadabhängigkeiten der industriellen Produktion infolge der notwendigen neuen Infrastrukturen.
 - Energetische und stoffliche Nutzung alternativer Brennstoffe für Prozesswärmanwendungen (in Fällen, in denen der erneuerbare Strom nicht direkt nutzbar ist) und innovative KWK-Techniken.
 - Entwicklung von Verfahren der zirkulären Kohlenstoff-Wirtschaft mit Kunststoffabfällen, Klärschlämmen und mit optional Braunkohle als Rohstoff.

3. Energiebedarf und Potentiale der erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland und Europa; zukünftig benötigte Energieimporte und deren prioritäre Verwendungszwecke

Ziel:

Realisierung des erhöhten Bedarfs an erneuerbaren Energieerzeugungskapazitäten, wenn die erneuerbaren Energien beispielsweise im industriellen Sektor, aber auch im Verkehrssektor genutzt werden sollen.

Leitfragen:

Da der Energiebedarf und die Potentiale der erneuerbaren Erzeugung erheblich auseinandergehen, ist eine Energieautarkie in Deutschland auf Basis erneuerbarer Energien nicht realistisch. Wichtig ist es aus Sicht der Chemieindustrie, Antworten auf die Frage zu entwickeln, wofür die perspektivisch theoretisch maximal nutzbaren 1.000 TWh unter Gesichtspunkten der Effizienz und Effektivität genutzt werden sollen:

- Für strombasierte Prozesse in der Industrie?
- Zur Wärmeerzeugung in Haushalten und Industrie (thermisch, über Brennstoffe)?
- Für die Mobilität über Flüssigkraftstoffe?

Empfehlungen für Forschung und Entwicklung:

- Intensivierung der forschungspolitischen Diskussion zur Weiterentwicklung der etablierten Energie- und Produktionsinfrastrukturen zur Nutzung in einem zukünftigen Energiesystem.
- Etablierung adäquater Instrumente der experimentellen Forschung und Entwicklung (FuE) in Form von Pilot- und Demonstrationsprojekten sowie Experimentierräumen zur Stärkung des Übergangs von innovativen Technologien und technologischen Konzepten in den Markt.
- PtHeat-Anwendungen:
 - Entwicklung von Komponenten für PtHeat-Anwendungen (Hochtemperaturwärmepumpen, Großenergiespeicher – Kosten und Sicherheitsaspekte auf thermischer Basis, Integrations-, System- und Steuerungskonzepte, Werkzeuge zur Bewertung der Integration von Großenergiespeichern in Prozessdampfversorgungssysteme, regulatorischer Rahmen für Energie- und Netzkosten.
 - Berücksichtigung der großen potentiellen PtSteam-Senken der Chemieindustrie im aktuellen Szenariorahmen für den Stromnetzausbau
 - Intensivierung der Diskussion über Möglichkeiten zur effizienten und effektiven Nutzung vorhandener Energieinfrastrukturen für ein erneuerbares Energieversorgungssystem hinsichtlich PtHeat-Anwendungen.

4. Politische Rahmenbedingungen zur Umsetzung neuer Technologien für die Energiewende: Förderformate und Regulierung

Ziel:

Analyse der notwendigen Maßnahmen zur Anpassung regulatoriver Rahmenbedingungen zur Umsetzung neuer Technologien für die Energiewende.

Leitfragen:

- Wie lassen sich die regulatorischen Rahmenbedingungen umgestalten, damit Planungssicherheit für Investitionen besteht und Investitions- sowie betriebliche Hürden für stromintensive Prozesse abgebaut werden?
- Wie lassen sich Prozesse etablieren, die eine zeitnahe Nachsteuerung der Gesetze, Richtlinien und Verordnungen im Bereich der Energieversorgung im Sinne einer langfristigen Fortführung der Reallaborprojekte und der Investitionssicherheit für die Unternehmen sicherstellen?

Empfehlungen für Forschung und Entwicklung und für die politischen Rahmenbedingungen:

- **Energieforschungspolitische Rahmenbedingungen:**
 - Verlässliche politische Rahmenbedingungen für FuE- und Investitionsentscheidungen seitens der Industrie zum Aufbau einer heimischen PtX-Industrie mit Ausblick auf den Weltmarkt; politische Schwerpunktsetzung zur Förderung von Investitionen in neue Verfahren (Planungssicherheit).
 - Budgets zur Energieforschung: Obwohl die Fördermittel sukzessive erhöht wurden, sind sie im internationalen Vergleich immer noch niedrig und unter dem OECD-Durchschnitt.
- **Weiterentwicklung der Strukturen im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms:**
 - Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der Formate und Ausgestaltung der Forschungsförderung (konzeptionelle Gestaltung der Forschungsprogramme, Art und Zusammensetzung der geförderten Projekte, administrative Organisation und Steuerung der Förderung).^{39, 40}
 - Konsequente Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Deutschland über bestehende Systematisierung hinaus: Diskussion über die Umsetzungsmöglichkeiten in einzelnen Fördermaßnahmen; deutliche Verbesserung der ressortübergreifenden Ausgestaltung und Koordination der Forschungsförderung;

³⁹ Anforderungen des VCI an das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Mai 2017

⁴⁰ Vorschläge des VCI zur Steigerung der Effizienz von Förderverfahren aus Sicht der chemischen Industrie, Mai 2014

Unterstützung von Pilotentwicklungen und Markteinführungsmechanismen.

- Themenoffene und technologie neutrale Förderinstrumente: Zur langfristigen Verfolgung von Forschungsthemen, die grundlegende „break-through-Innovationen“ hervorbringen könnten, sollten die Energieforschungsprogramme ergänzend eine technologieorientierte Themenausrichtung wieder stärker in den Blick nehmen und Schlüsseltechnologien besonders fördern. Darüber hinaus braucht die deutsche Forschungslandschaft innovative Förderinstrumente wie beispielsweise „Frühbeet“ und themenoffene „bottom-up“-Projekte.
- Effizienzverbesserung von Förderverfahren zur Senkung des immer noch hohen Aufwands für Koordination und Abstimmung (s.o.).
- Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen:
 - Abschätzung der Wirkung von Preissignalen auf die Finanzierungsmöglichkeiten und die Abstimmung sowohl von Maßnahmen zur Flexibilisierung der Energienachfrage als auch von Optionen zu Energiespeicherung und zur Bereitstellung einer versorgungssicheren Flexibilität.
 - Definition eines Prozesses zur Umsetzung der in den Reallaboren erarbeiteten Ergebnisse in regulatorisches Handeln, so dass bereits zum Start der Förderprojekte für Reallabore bereits erste Schritte eingeleitet werden können, welche die Fortführung erfolgreicher Reallabore unterstützen.
 - Die Bundesregierung sollte die Einführung von zeitlich begrenzten Instrumenten zur Markteinführung von PtX-Anlagen prüfen.
- Anpassung der Regulierung für Reallabore
 - Weiterentwicklung des Konzepts der Reallabore⁴¹ hinsichtlich der direkten Anwendung und Ergänzung der im 7. Energieforschungsprogramm bereits verankerten kriterienbasierten Experimentierklausel (die zeitweilige Befreiung des Versuchsbetriebs von Entgelten, Abgaben und Umlagen).
 - Entlastung der im Rahmen von Reallaborprojekten verbrauchten Strommengen von administrativen Strompreisaufschlägen, wie z.B. EEG-Umlage oder Netzentgeltzahlungen (wird im Rahmen des SINTEG-Projektes bereits praktiziert)
 - Befreiung von der Obergrenze je Antragnehmer der Allgemeinen Gruppenfreistellungsverordnung (AGVO)
 - Erleichterung des Zugangs zu relevanten Energiesystemdaten
 - Ggf. erleichterte Genehmigung für Reallabor-Standorte oder spezifische Regelungen für den Sektorenübergang von erneuerbarem Strom.
 - Entbindung von der verpflichtenden Entkopplung eigener Anlagen zur erneuerbaren Energieerzeugung über Wind und PV für Betreiber von PtF-Anlagen von

⁴¹ Reallabore als Förderinstrument der Energieforschung im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, VCI, Dez. 2018

einem Netzanschluss (§ 3 Abs. 2 37. BImSchV).⁴²

■ Weiterentwicklung der Marktmechanismen

- Die Erdgasreformierung und verwandte Verfahren (Pt-Chemicals) („vermiedene Erdgasentnahmen“⁴³): Sektorenkopplungskonzepte, die auf vermiedener Erdgasentnahme basieren, wirken auf den Energieinhalt des Gasnetzes in identischer Weise wie Power-to-Gas-Konzepte; vermiedene Erdgasentnahmen entsprechen daher einer Energiespeicherung im Erdgasnetz. Folglich muss vermiedene Erdgasentnahme mittels Substitution von Erdgas durch regenerativ erzeugtes Brenngas regulatorisch gleichwertig mit PtG-Konzepten behandelt werden.
- Die Sektorenkopplung unterstützt die Versorgungssicherheit bei zunehmend fluktuierender und nicht steuerbarer Stromerzeugung. Das Stromversorgungssystem muss durch die Sektorenkopplung gesteuert und flexibel genutzt werden können. Wird Sektorenkopplung im Rahmen von Systemdienstleistungen genutzt, ist keine regulatorische Unterscheidung zwischen Lastmanagement und der Erbringung von Systemdienstleistungen einerseits und Energiespeicherung andererseits möglich. Deshalb bedürfen Lastmanagement, Erbringung von Systemdienstleistungen sowie Energiespeicherung einer äquivalenten regulatorischen Behandlung (technologieneutrale Behandlung der Flexibilitätsoptionen für ein „Level Playing field“).
- Der Nutzungspfad für eingespeicherte Energie ist den Marktkräften zu überlassen: Bestimmte Optionen zur Nutzung der Speicherenergie, z. B. Rückverstromung, sollten gegenüber anderen Nutzungsformen nicht regulatorisch bevorzugt werden; keine Erhebung von Abgaben und Umlagen auf flexible und systemstützende Strommehrentnahmen (d.h. zusätzliche Stromnutzung durch einen substituierenden oder ergänzenden Prozess unter Nutzung erneuerbarer Energie); Ausdehnung der Wirkung des § 61 I EEG auf Speicherstrom, welcher nicht unmittelbar rückverstromt wird.
- Netzzugang: Perspektivisch turnusmäßige Evaluierung der Netzzugangsprivilegien für die Einspeisung von Speichergas mit dem Ziel, ein „Level playing field“ zwischen den Flexibilisierungsoptionen zu schaffen; Gleichbehandlung prozessbedingter und biogener CO₂-Quellen zur Methanisierung; Begrenzung der H₂-Einspeisung in Gasnetze an die gegenüber H₂-Anteilen sensitive Industrieanlagen angeschlossen sind und damit Ausdehnung der Anforderung der allgemeinen Gasversorgung hinsichtlich der Netzkompatibilität von H₂-Einspeisungen zumin-

⁴² Dabei sollte sichergestellt sein, dass für den Betrieb der PtX-Anlagen Strom aus EE-Anlagen eingesetzt wird, der nicht direkt zur Substitution fossiler Stromerzeugung eingesetzt werden kann (negative Residuallast). Andernfalls würden Teile des EE-Angebots dem Strommarkt entzogen und somit dort zu höheren Emissionen führen.

⁴³ Sektorenkopplungskonzepte, wie die Substitution der Erdgasreformierung durch regenerativ erzeugten Wasserstoff (Power-to-Chemicals), welche auf vermiedener Gasentnahme beruhen, können in gleicher Weise wie Power-to-Gas-Konzepte als Stromspeicher fungieren – s.a. VCI-Position Regulierungsgrundlagen Sektorenkopplung, Fußnote 21

dest auf Industrieentnahmen.

- **Netznutzungsentgelte:** Mit § 118 Abs. 6 EnWG und § 19 Abs. 4 StromNEV bestehen Regelungen zu der Netzentgelttarifierung, die eine Marktintegration von Stromspeicherlösungen befördern; keine regulatorische Beschränkung einer Rückspeisung aus einem Energiespeicher in ein drittes vom Entnahmenetz abweichendes Stromnetz.
- **Last-Flexibilität sollte angereizt und nicht verordnet werden:** Flexibilitätspotenziale eines Produktionsprozesses, beispielsweise der Chlor-Alkali-Elektrolyse, sind abhängig von dem jeweils nachgelagerten Produktionsverbund. Deshalb darf Lastflexibilität nicht verordnet, sondern sollte marktbasierend und nicht-diskriminierend angereizt werden.