

Position zur Umsetzung des 8. Energieforschungsprogramms

FORSCHUNG FÜR DIE “WÄRMEWENDE” IN DER CHEMIEINDUSTRIE

Executive Summary

Die Position des VCI beschreibt die Anforderungen für die **Umsetzung der Mission “Wärmewende 2045” im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms (EFP)** und die Inhalte, die für die chemische Industrie von besonderem Interesse für eine klimaneutrale Wärmewende sind. Kern der Ausführungen ist das Programmziel 2 („Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilieren und effizienter machen“) des EFP.

Die Position diskutiert die möglichen zukünftigen Technologien der Chemieindustrie für eine klimaneutrale Wärme- und Kälteversorgung und den für die Etablierung der Technologien notwendigen **Forschungsbedarf** im Rahmen dieser Transformation sowie die Anforderungen an Skalierung und Umsetzung an den Chemiestandorten. Zentraler Aspekt im Rahmen der Transformation ist der Erhalt bzw. die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie. Das Zeitfenster für die Transformation wird durch den Rechtsrahmen vorgegeben, es ist der Zeitraum von heute bis 2045. Folglich muss die Wärmewende im Wesentlichen auf bereits heute bekannten und verfügbaren Technologien aufbauen, da ansonsten die Umsetzung der Transformation in der Chemieindustrie aufgrund erforderlicher Investitionszyklen kaum realisierbar ist. Inhaltlich werden hier insbesondere diejenigen technologischen Aspekte der Wärmewende herausgearbeitet, die aus forschungspolitischer Sicht für eine klimaneutrale Wärmewende 2045 der Chemieindustrie und ihrer Prozesse von Bedeutung sind. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass eine Defossilierung lediglich der für die Produktion von Chemieprodukten notwendigen Kälte- und Wärmeströme der Chemieindustrie das Ziel sein muss, nicht aber für die Erzeugung chemischer Produkte selbst, da Kohlenstoffverbindungen die Basis vieler chemischer Prozesse sind bzw. in Zwischenstufen prozessbedingt entstehen.

Eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Kälte- und Wärmeversorgung der Chemiestandorte ist eine weitgehend **klimaneutrale Elektrifizierung** sämtlicher Sektoren des Energiesystems. Eine wettbewerbsfähige Umwandlung elektrischer Leistung in die Nutzenergieströme “Kälte und Wärme“ mit den hier beschriebenen und zu erforschenden Technologien ermöglicht den (weitgehenden) erforderlichen Ersatz fossiler Energieträger für “Kälte und Wärme“. Die ausschließliche Fokussierung auf die jeweiligen Technologien zur klimaneutralen Umwandlung elektrischer Energie in Kälte- und Wärmeenergie ist jedoch nicht ausreichend, da eine ausgeglichene Energiebilanz über einen Zeitraum keine Aussage über die zeitliche Verteilung der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie sowie über die zeitliche Verteilung der im gleichen Zeitraum erforderlichen Bedarfe bezüglich Kälte- und Wärmeenergie macht. Neben den jeweiligen Technologien selbst besteht folglich Forschungsbedarf bezüglich der Frage wie die Energiebilanz über verschiedene Energieformen (elektrische Energie, Wärmeenergie, chemisch gebundene Energie) hinweg zu jedem beliebigen **Zeitpunkt** ausgeglichen bzw. steuerbar werden kann.

- ▶ Somit besteht auch Forschungsbedarf bzgl. Systemintegration und Sektorkopplung aus Sicht des Energiesystems insgesamt.
- ▶ Da zur Lösung dieses Problems **Energiespeicher** sowie die Sektorkopplung der Energiesektoren erforderlich sind, besteht auch auf diesen Feldern Forschungsbedarf, um eine zeitliche Kongruenz zwischen Bereitstellung verschiedener Energieströme sowie zeitlich variablen Energiebedarfen herstellen zu können und dadurch steuerbar zu machen. Dies ist die unabdingbare technische Voraussetzung für ein wettbewerbsfähiges Energiesystem.
- ▶ Weiterhin besteht Forschungsbedarf bezüglich der an Chemiestandorten unmittelbar in Produktionsprozessen unvermeidbar erzeugten fossilen Nebenprodukte (z.B. Restgase) bzw. extern angelieferter Produkte (z.B. Ersatzbrennstoffe) bzw. deren Weiterverarbeitung. Forschungsbedarf besteht somit in Reinigung der Rauchgasströme, der effektiven Abtrennung von CO₂-Strömen sowie deren Weiterverarbeitung vor Ort in Form von CCU (Carbon Capture and Use).

Hinsichtlich der Energiespeicher beschränkt sich die Position auf die Darstellung der forschungs- und technologiepolitischen **Anforderungen an thermische Speicher** und deren möglichen Einsatz im industriellen Umfeld. Eine Ausnahme bilden die Bezüge zur Langzeitspeicherung elektrischer Energie in Form von chemischer Energie: Künftig besteht durch die Speicherung geeigneter klimaneutraler chemischer Produkte mit ähnlich hoher Energiedichte wie Erdgas, die Möglichkeit elektrische Energie langfristig chemisch zu speichern - wenn möglich unter Nutzung vorhandener Infrastruktur (Sektorkopplung zwischen elektrischer & chemischer Energie). Gleichzeitig besteht durch diese Form von Sektorkopplung die Möglichkeit, die Steuerbarkeit des Energiesystems zu optimieren und resilienter auszugestalten. Hierfür müssen neue Märkte und Geschäftsmodelle etabliert werden, deren ökonomische Analyse nicht mehr der Energieforschung obliegt.

Die bestkonzipierten Fördermaßnahmen und -programme bleiben wirkungslos, wenn die **Anforderungen der Nutzer** nicht adäquat berücksichtigt werden. Wichtig ist es in der Forschungspolitik, einen deutlichen Fokus auf die Umsetzung der Technologien und den Transfer der Forschungsergebnisse zu legen. Aus VCI-Sicht sind ff. Maßnahmen umzusetzen:

- ▶ Auch in Zeiten schrumpfender Ressortbudgets müssen technologiesouveränitäts-relevante Schlüsseltechnologien wie die Wärmeversorgung mit größeren Budgets strategisch direkt & indirekt gefördert werden. Es müssen adäquate Instrumente der experimentellen FuE in Form von Pilot- und Demonstrationsprojekten sowie Reallaboren zur Stärkung des Übergangs von innovativen Technologien und technologischen Konzepten in den Markt etabliert werden in „nahtlose“ Förderung einzelner TRL-Phasen. Wichtig sind Testumgebungen und der Aufbau von Testzentren z.B. Pilotanlagen zu PtG, PtL, PtX im industriellen Umfeld.
- ▶ Forschungsprogramme müssen gemeinsam und unter Berücksichtigung der Anforderungen der Stakeholder aus der Industrie und ihrer Partner aus der Wissenschaft gestaltet werden, Forschungsprogramme und Projekte sollten agil gestaltet werden.
- ▶ Umfangreiche Genehmigungsverfahren für innovative Prozesse führen zu Verzögerungen und finanziellen Belastungen und hemmen die Einführung von Transitionstechnologien.

FORSCHUNG FÜR DIE “WÄRMEWENDE” IN DER CHEMIEINDUSTRIE

Inhalt

<i>Executive Summary</i>	1
1. Einleitung	3
2. Forschungsbedarf auf mehreren Ebenen	4
3. Anforderungen an die Wärmeversorgung der chemischen Industrie	4
4. Anmerkungen zum Projektmanagement der Wärmewende 2045	9
5. Ausblick.....	10
Backup zur Technologie der Hochtemperaturwärmepumpen	11
Thermodynamische Grenzen.....	11
Hochtemperaturwärme mit nachgeschalteter mechanischer Brüdenkompression (Brüdenverdichtung)	13

1. Einleitung

Ausgangspunkt für dieses Dokument ist die Mission “Wärmewende 2045“ im 8. Energieforschungsprogramm (EFP) sowie die kritische Würdigung derjenigen Inhalte, die für die Chemieindustrie von besonderem Interesse sind. Dies betrifft insbesondere die Ausführungen des Programmziels 2 „Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilieren und effizienter machen“.

Anmerkung:

Es muss kritisch hinterfragt werden, ob eine vollständige **Defossilierung** der Wärme- und Kälteversorgung insbesondere in der chemischen Industrie bis 2045 das Ziel sein soll bzw. überhaupt ein realistisches Ziel ist oder ob stattdessen eine **klimaneutrale** Wärme- und Kälteversorgung bis 2045 anzustreben ist. Das Ziel Klimaneutralität beinhaltet mehr Optionen zur Zielerreichung und erscheint aus heutiger Sicht deutlich realistischer und schneller zu erreichen als Defossilierung. Klimaneutralität als ersten Schritt der Wärmewende schließt zudem eine zeitlich nachfolgende Defossilierung nicht aus! Im Rahmen der Mission “Wärmewende 2045“ werden beide Begriffe verwendet.

Neben der Diskussion möglicher Technologien, die für eine klimaneutrale Wärme- und Kälteversorgung der chemischen Industrie künftig in Frage kommen und dem dafür notwendigen Forschungsbedarf, wird auch auf einige wichtige Aspekte der Umsetzbarkeit eingegangen. Letzteres betrifft u.a. die Aspekte **Erprobung, Skalierbarkeit, Wettbewerbsfähigkeit** sowie **zeitlicher Horizont**.

Die unmittelbare Einbindung dieser Aspekte erscheint für den Erfolg der Mission “Wärmewende 2045” geboten, da bereits die Bezeichnung der Mission nicht nur auf künftige Technologien und deren Forschungsbedarf abzielt, sondern mit dem Jahr 2045 auch konkret ein Enddatum nennt, anlässlich dem die im 8. EFP genannten Ziele erreicht werden sollen. Nicht zuletzt hat das 8. EFP die angewandte Energieforschung zum Gegenstand. Vor dem Hintergrund des gegebenen Zeitrahmens (Zeitraum bis 2045) als politische/gesetzliche Vorgabe (Klimaneutralität; hier speziell im Sektor Wärme und Kälte) hat das 8. EFP im Wesentlichen bereits heute bekannte Technologien zum Gegenstand, die im Zeitraum bis 2045 im Wärmesektor etabliert werden sollen.

2. Forschungsbedarf auf mehreren Ebenen

Inhaltlich werden in diesem Dokument insbesondere diejenigen Aspekte der Wärmewende herausgearbeitet, die für die Transformation der chemischen Industrie und ihrer Prozesse von Bedeutung sind. Damit verbunden ist eine Abgrenzung von Aspekten der Programmziele 3 und 4 sowie insbesondere von Programmziel 1. Diese Abgrenzungen ergeben sich aus den **Anforderungen der chemischen Produktionsprozesse** sowie den Gegebenheiten an Chemiestandorten. In Bezug auf den **Forschungsbedarf** zu klärende Fragen sind:

1. Die Frage nach dem “Was“:
Welche der (klimaneutralen) **Wärme-Technologien** sind für die Anforderungen der chemischen Industrie grundsätzlich geeignet?
2. Die Frage nach dem “Wieviel“:
Welche künftigen **Bedarfe** bestehen bezüglich der Wärmeströme in der Chemieindustrie?
Welche **Potentiale** an klimaneutraler Wärmetechnologien stehen künftig zur Verfügung?
3. Die Frage nach dem “Wie“:
Unter welchen **Voraussetzungen** können neue Wärme-Technologien die heute eingesetzten Technologien bei laufendem Betrieb technisch/wirtschaftlich schrittweise ersetzen?
4. Die Frage nach dem “Wann“:
Wie müssen **Meilensteine** im Zeitablauf organisiert werden, damit möglichst alle chemischen Produktionsstandorte und Prozesse mit Ihren individuellen Anforderungen im gegebenen Zeitrahmen die Transformation bewältigen können (u.a. Standardisierung versus individuelle Anforderungen).

3. Anforderungen an die Wärmeversorgung der chemischen Industrie

Charakterisierung von Wärmeströmen allgemein

Die thermodynamisch maßgebliche Größe zur Charakterisierung der Wärmequalität ist die spezifische **Exergie** gemessen in der Maßeinheit [kJ/kg] bzw. der Exergieanteil des Energie-

bzw. Wärmestroms.¹ Die benötigten **zeitvarianten Wärmeströme** (Leistungen), gemessen in der Maßeinheit [kJ/sec = kW], sind die Parameter zur Dimensionierung von Anlagen zur Wärmebereitstellung. Spezifische Exergie und Massenstrom eines Wärmestroms sind somit die Kenngrößen für die Bereitstellung von Wärme bzw. zur Dimensionierung von Anlagen zur Wärmebereitstellung. Hingegen ist Arbeit gemessen in [kWh] *keine* geeignete Kenngröße für die Bewertung der Wärmequalität.

Charakterisierung des Wärmebedarfs industriell-chemischer Prozesse („Prozesswärme“)

Typische Merkmale des Wärmebedarfs chemischer Prozesse sind:

- a) Bereitstellung von Wärme bei hohen Prozesstemperaturen (hochkalorische Wärme in Form von Dampf, hoher Exergieanteil des Wärmestroms)
- b) Vor-Ort-Erzeugung der Hochtemperaturwärme in Form von Dampf, Verteilung über Rohrleitungen innerhalb der Fabriken bzw. Versorgung eines gesamten Standortes von einer zentralen oder mehreren Wärmequellen über ein Rohrleitungsnetz am Standort
- c) Große bis sehr große Wärmeströme (Leistungen) erforderlich
- d) Bereitstellung der Wärmeströme folgt sowohl qualitativ (Dampftemperatur, Dampfdruck, Überhitzungsgrad, Dampfreinheit, Feuchtegrad bei Nassdampf) als auch quantitativ den individuellen Anforderungen der Produktionsprozesse bzw. der Auslastung der Produktionsanlagen
- e) Kombinierte Vor-Ort-Prozessregelung von zeitvarianten Wärmebedarfen/Wärmesenken/Wärmequellen einschließlich notwendiger Reserveanlagen sowie deren optimiertem Betrieb, ggf. im Rahmen von Sektorkopplung
- f) Kontinuierliche (24/7) Bereitstellung von Wärmeströmen prozessbedingt auf unterschiedlichen Dampf-Druckniveaus erforderlich

Abgrenzung zu Wärmeströmen in Gebäuden („Raumwärme“)

Typische Merkmale des Wärmebedarfs in Gebäuden:

- a) Niederkalorische Wärme in Form von Wasser
- b) Standardisierte Gebäudewärmepumpen sowie Dämmung von Gebäuden
- c) Leitungsgebundene Verteilung einschließlich Warmwasserspeicherreservoirs bei Fernwärmeversorgung (für dichtbesiedelte Quartiere)
- d) Einzelversorgung innerhalb eines Gebäudes mittels Gasthermen/Wärmepumpen/Pelletheizungen bei kleinen Wärmeströmen/Leistungen (um mehrere Größenordnungen kleiner im Vergleich zu industriell benötigten Wärmeströmen)
- e) Bereitstellung der Wärmeströme folgt jahreszeitlichen Schwankungen
- f) Einheitliches Druckniveau

¹ Exergie ist der Anteil eines Energiestroms, der vollständig in andere Energieformen umwandelbar ist – Beispiel: 1 kWh elektrische Energie lässt sich zu 100% in Wärmeenergie umwandeln; umgekehrt lässt sich Wärmeenergie nicht zu 100% in elektrische Energie umwandeln. Es gilt: je höher die Temperatur des Wärmestroms, desto höher dessen Exergieanteil, oder etwas vereinfacht gesagt, desto „höherwertiger“ ist der Wärmestrom.

Status-Quo der Wärmeerzeugung in der chemischen Industrie

Zurzeit erfolgt die Wärmeerzeugung in der chemischen Industrie überwiegend durch

- I) Erdgasbefeuerte Kesselanlagen
- II) Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Erdgas
- III) Nutzung exothermer Reaktionswärme chemischer Prozesse
- IV) Verwertung von Restgasen und Ersatzbrennstoffen

Vielfach wird dabei Hochdruckdampf erzeugt, der durch nachgeschaltete Reduzierungseinrichtungen (Redstationen, Gegendruckturbinen) auf gewünschte Dampfdruckniveaus herunterkaskadiert wird. Analog erfolgt im Elektroenergieversorgungssystem die Bereitstellung elektrischer Leistung auf einer geeigneten Spannungsebene durch Umspannung von höheren Spannungsebenen auf niedrigere Spannungsebenen (auch wenn der Anlass für die Kaskadierung nicht direkt vergleichbar ist).

Optionen für eine klimaneutrale vor-Ort-Wärmeerzeugung/Kälteerzeugung in der chemischen Industrie

- (1) Nutzung von Abwärme in Kombination mit Hochtemperaturwärmepumpen
- (2) Nutzung von Flusswasserwärme/Umweltwärme in Kombination mit Hochtemperaturwärmepumpen
- (3) Hochtemperaturwärmepumpen mit nachgeschalteter Brüdenverdichtung
- (4) Nutzung von Abwärme zur Bereitstellung von Kälteleistung
- (5) Elektrodenkessel (Power-to-heat)
- (6) Elektrisch beheizte Steamcracker
- (7) Thermische Energiespeicher (Flüssigsalzspeicher, Keramikspeicher)
- (8) Synthetische Brennstoffe, Wasserstoff
- (9) Erdgasgefeuerte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)/Restgasverbrennung mit CCU/CCS

Die Optionen (1) bis (8) basieren direkt oder indirekt auf einer weiteren umfangreichen Elektrifizierung des Wärmesektors und **erhöhen den künftigen Bedarf an elektrischer Leistung** (Bsp.: Zum Betrieb einer Wasserstoffelektrolyse wird ebenso elektrische Leistung benötigt wie für den Antrieb der Verdichter in Hochtemperaturwärmepumpen).

Obwohl die Elektrifizierung von industriellen Chemieprozessen sehr wichtige Optionen eröffnet und eine zunehmende Rolle spielt, kann aus VCI-Sicht eine weitgehende Elektrifizierung des Wärmesektors mit elektrischer Leistung aus erneuerbaren Energien (EE) als prioritärem Ansatz für die Wärmewende nur **schrittweise** erfolgen, da es aus heutiger Sicht zweifelhaft erscheint, dass elektrische Netzanschlusskapazitäten kurzfristig in ausreichender Menge zu diesem Zweck zur Verfügung stehen werden. Zu berücksichtigen ist auch der Platzbedarf thermischer Energiespeicher wie Flüssigsalzspeicher und Keramikspeicher. Dies ist vor dem Hintergrund der wünschenswerten Integration thermischer Speicher in bestehende Industriestandorte mit begrenztem Platzangebot zu diskutieren und in der weiteren Entwicklung solcher Systeme zu berücksichtigen.

Notwendige und hinreichende Voraussetzung für die (sukzessive) Realisierbarkeit

Technisch implizite Voraussetzung für alle genannten Optionen ist, dass klimaneutral erzeugte elektrische Leistung räumlich und zeitlich in ausreichender Höhe zur Verfügung steht. Dies ist die notwendige Voraussetzung.

Wirtschaftlich implizite Voraussetzung für alle genannten Optionen ist, dass klimaneutral erzeugte elektrische Leistung zu Preisen zur Verfügung steht, die eine wettbewerbsfähige Bereitstellung von Wärmeleistung ermöglicht. Dies ist die hinreichende Voraussetzung.

Bedarfsanalyse und Potentialanalyse

Hinsichtlich Bedarfsanalyse und Potentialanalyse der diversen Optionen für eine klimaneutrale vor-Ort-Wärmeerzeugung/Kälteerzeugung in der Chemieindustrie besteht Forschungsbedarf. Zielgröße ist deren vorausschauende Optimierung im Rahmen von Investitionszyklen (Bedarfe und Potentiale ändern sich nicht adhoc).

Anmerkung zur Elektrifizierung des deutschen (europäischen) Energiesystems:

Eine weitgehende klimaneutrale Elektrifizierung sämtlicher Sektoren des Energiesystems impliziert, dass elektrische Leistung an jedem Ort zu jedem Zeitpunkt in ausreichender Menge verfügbar ist. Die Verfügbarkeit an jedem Ort wird durch den Transport über Netze gewährleistet, wobei die Netztopologie auch signifikant von der Verteilung der Stromerzeugungsanlagen (Quellen) und Strombedarfsanlagen („Senken“) abhängt. Über Transportnetze wird elektrische Leistung jedoch lediglich räumlich verschoben. Die zeitliche Verfügbarkeit elektrischer Leistung setzt voraus, dass jederzeit Stromerzeugungsanlagen und/oder Speicher elektrischer Leistung zur Verfügung stehen, um den Bedarf elektrischer Leistung in allen Sektoren zu decken. Hinsichtlich der notwendigen (indirekten) Langzeitspeicherung elektrischer Energie (Größenordnung $\gg 1$ Tag) bleibt anzumerken, dass hierfür geeignete Chemieprodukte genutzt werden können, die ohnehin am Markt verfügbar sind. Eine solche Langzeitreserve kann zu Zwecken der Rückverstromung analog einer Erdölbevorratung oder Erdgasreserve vorgehalten werden. Wie die vorgenannten Reserven auch, hat eine derartige „Rückverstromungsreserve“ einen Versicherungsscharakter und muss natürlich in Ihrer Kapazität minimiert werden. Nichtsdestotrotz erfüllen Chemieprodukte sämtliche Anforderungen für eine indirekte Langzeitspeicherung:

- ▶ hoher Exergieanteil
- ▶ hohe Energiedichte
- ▶ lagerfähig
- ▶ transportfähig
- ▶ anpassbar an erforderliche Kapazität

Eine künftige klimaneutrale Energieversorgung wird *überwiegend* auf Basis erneuerbarer Energien beruhen. Anders als im heutigen Energiesystem werden dabei **dezentral verteilte Energiespeicher** eine wesentlich umfangreichere Rolle spielen. Deren Errichtung und Einbindung in ein klimaneutrales Energiesystem wird ebenfalls sowohl Zeit als auch Investitionsmittel erfordern, so dass beides auch nur **schrittweise** realisiert werden kann. Vor diesem Hintergrund sollten zwischenzeitlich auch noch Technologien mit modifizierten Bestandsanlagen für eine klimaneutrale Energieerzeugung genutzt werden können wie z.B. Option 9 erdgasgefeuerte KWK-Anlagen mit CCU/CCS.

Industrielle Wärmespeicher (thermische Speicher)

Wärmespeicher bieten Stand heute punktuell die Möglichkeit sowohl gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung von Wärmebedarfen zeitlich zu entkoppeln als auch reine Wärmeerzeugung zeitlich von Wärmebedarfen zu entkoppeln. In *diskontinuierlichen* industriellen Prozessen bieten **Wärmespeicher** die Möglichkeit u.a. auch ansonsten ungenutzte Abwärmeströme zu reкуперieren und Prozessen z.B. für eine Vorwärmung zeitlich versetzt wieder zur Verfügung zu stellen – vorausgesetzt das Temperaturniveau des Wärmestroms aus dem Wärmespeicher korrespondiert mit dem Temperaturbedarf des nachgeschalteten Prozesses.

Thermische Speicher können insbesondere für kleine Standorte und Betriebe sowie für die Flexibilisierung des Anlagenbetriebs eine geeignete Wirkung entfalten. Neben der Speicherung von Prozess- oder KWK-Wärme können sog. Wärmebatterien zur **Realisierung der Sektorenkopplung** zwischen fluktuierendem Dargebot erneuerbarer Energien und kontinuierlichem Bedarf von Wärme für die Chemieproduktion dienen. Wärmespeicher können damit eine zeitliche Entkopplung von mechanischer, elektrischer sowie thermischer Leistung bewirken. Für Kurzzeitanwendungen sind in Einzelfällen Kombinationen aus (wärmegeführter) KWK-Anlage und geeignetem Speicher möglich.

In der Vergangenheit haben sich solche Konzepte für hochkalorische Wärmeanwendungen jedoch weder aus technischen noch aus wirtschaftlichen Gründen durchgesetzt. Forschungsbedarf besteht bei der **Einbindung von Wärmespeichern in kontinuierlich betriebene Hochtemperaturprozesse** der chemischen Industrie.

Bewertung der Optionen zur klimaneutralen vor-Ort-Wärmeerzeugung/Kälteerzeugung

Für alle Optionen besteht **Forschungsbedarf auf mehreren Ebenen:**

- ▶ Unmittelbar hinsichtlich der **Entwicklung der Technologien sowie deren Skalierbarkeit**
- ▶ Hinsichtlich der **Systemintegration** der Technologien in bestehende und neue Infrastrukturen durch Simulationen
- ▶ Hinsichtlich der **Erprobung der Technologien** in realen Systemen/vor Ort einschließlich scale-up
- ▶ Hinsichtlich der **Prozessregelung und Steuerung des Gesamtsystems** aus Wärmetechnologien und anfordernden chemischen Prozessen (u.a. Kennfeldermittlung, Gradienten, Flexibilität, Anlageneffizienz, Anlagendynamik, Vollastbetrieb, Teillastbetrieb)

Beispielhaft besteht spezifischer Forschungsbedarf u.a.:

- ▶ Mittels **Hochtemperaturwärmepumpen** können derzeit Temperaturen bis 200°C erreicht werden (für eine Reihe von chemischen Prozessen nicht ausreichend).
- ▶ Bereitstellung von **Kälteleistung aus Abwärme** ist mittels Absorptionskältemaschinen möglich; Absorptionskältemaschinen sind größer zu bauen als vergleichbare Kompressionskältemaschinen, da diese bei einem Vergleich der spezifischen Kosten der Kälteerzeugung auf das einzelne Aggregat bezogen ineffektiver sind – ein Vergleich der spezifischen Kosten der Kälteerzeugung ist somit auf Systemebene durchzuführen.
- ▶ **Prozessintegration industrieller Power-to-Heat-Anlagen** im Rahmen einer künftigen Sektorenkopplung als kritische Infrastruktur
- ▶ **Thermische Energiespeicher** können zur Spitzenlastabdeckung und Zwischenspeicherung von Wärme in ein System eingebunden werden. Nutzbare Temperaturen sind

Flüssigsalzspeicher	ca. 500°C
Keramikspeicher	ca. 1000°C

Die Nutzung synthetischer Brennstoffe bzw. Wasserstoff für die Wärmeerzeugung in der chemischen Industrie ist derzeit nicht absehbar bzw. erscheint derzeit nicht wirtschaftlich. Dennoch sind die Möglichkeiten für Entwicklung und Etablierung von Hybridsystemen aus Strom und Gas sowie Biomasse als Flexibilisierungsmöglichkeiten zu erforschen.

4. Anmerkungen zum Projektmanagement der Wärmewende 2045

Die bestkonzipierten Fördermaßnahmen und -programme bleiben wirkungslos, wenn die Anforderungen der Nutzer nicht adäquat berücksichtigt werden. Daher „erinnert“ der VCI im Zusammenhang mit den notwendigen inhaltlichen Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Wärmeversorgung an die notwendigen allgemeinen forschungspolitischen Maßnahmen, zu denen der VCI vielfach Stellung genommen hat. Wichtig ist es, in der Forschungspolitik einen deutlichen Fokus auf die Umsetzung der Technologien und den Transfer der Forschungsergebnisse zu legen.

Aus VCI-Sicht sind ff. Maßnahmen umzusetzen:

1. Auch in Zeiten schrumpfender Ressortbudgets müssen **technologiesouveränitäts-relevante Schlüsseltechnologien**, wozu die Wärmeversorgung gehört, strategisch mit größten Haushaltsmitteln direkt und indirekt gefördert werden.
2. Insbesondere muss eine weitere „Säule“ der Förderung im deutschen Innovationssystem im Bereich adäquater Instrumente der **experimentellen FuE in Form von Pilot- und Demonstrationsprojekten sowie Reallaboren** etabliert werden, um den Übergang von innovativen Technologien und technologischen Konzepten in den Markt zu stärken.
3. Dabei muss eine „nahtlose“ Förderung einzelner TRL-Phasen über einen abgestimmten Instrumentenmix realisiert werden. **Forschungsprogramme** müssen gemeinsam und un-

ter Berücksichtigung der Anforderungen der Stakeholder aus der Industrie und ihrer Partner aus der Wissenschaft **gestaltet** werden, Forschungsprogramme und Projekte sollten agil gestaltet werden.

4. Wichtig sind **Testumgebungen** und der Aufbau von Testzentren z.B. Pilotanlagen zu PtG, PtL, PtX im industriellen Umfeld.
5. FuE-Netzwerke mit Forschungseinrichtungen und Unternehmen sowie die Bildung regionaler Cluster fördern den Transformationsprozess zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie. Auch die umfangreichen **Genehmigungsverfahren für innovative Prozesse** führen zu Verzögerungen und finanziellen Belastungen und hemmen so die Einführung von Transitionstechnologien. Beispielhaft genannt seien hier die erforderliche Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Errichtung von Elektrolyseuren zu Herstellung von Wasserstoff und die Forderung umfangreicher Unterlagen für Anträge zur Genehmigung von Forschungsanlagen.

5. AUSBLICK

Abschließend sind – neben den erforderlichen ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen – vier wesentliche Parameter für einen Projektstrukturplan “Wärmewende 2045“ aus Sicht der chemischen Industrie benannt:

1. Akteure und Scale-up

Welche der in diesem Positionspapier genannten Optionen für welchen chemischen Produktionsprozess technisch geeignet und wirtschaftlich umsetzbar ist, kann nur individuell auf Basis der jeweiligen Spezifikationen/Prozessanforderungen beantwortet werden. Umso wichtiger ist es, dass die Entwicklung der oben genannten Technologien sowie deren Skalierbarkeit zeitlich vor deren Einsatz an Chemiestandorten simuliert und in Testständen erprobt wird. Hierzu bieten sich als Akteure Großforschungseinrichtungen oder Kooperationen aus Großforschungseinrichtungen, Unternehmen der chemischen Industrie (Spezifikationen!) und Hochschulen an. Im zweiten Schritt erfolgt die Systemintegration an den Chemiestandorten, deren Inbetriebnahme sowie deren Probetrieb.

Für beide Transformationsschritte sind Fördermittel in ausreichender Höhe zur Verfügung zu stellen, die Etablierung von Reallaboren zu ermöglichen sowie eine Möglichkeit zu schaffen, technologische Ergebnisse aus Kooperationen effizient auszuschöpfen.

2. Vermeidung der Kaskadierung

Wie oben erläutert, erfolgt heutzutage die Bereitstellung von Wärmeleistung in der chemischen Industrie vielfach durch Erzeugung von Hochdruckdampf mit anschließender Kaskadierung zu niedrigeren Druckstufen. Im Rahmen der Transformation sollte angestrebt werden, Wärmeleistung unmittelbar auf der benötigten Dampfdruckstufe bereitzustellen.

Eine andere Möglichkeit Dampf auf niedrigeren Dampfdruckstufen zu verwenden ist, chemi-

sche Prozesse durch neue chemische/katalytische/biotechnologische Verfahren so umzugestalten, dass dies möglich wird. Dies ist nicht unmittelbar Gegenstand der Mission “Wärmewende 2045“ steht jedoch nichtsdestotrotz in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bereitstellung der erforderlichen Wärmeleistung. Hier besteht ebenso vielfältiger Forschungsbedarf.

3. Residuale Rest-Wärmeleistung

Erforderliche residuale Wärmeleistung jenseits klimaneutraler Technologien:

Die erforderlichen Wärmeleistungen an Chemiestandorten werden durch die Anforderungen der chemischen Prozesse determiniert. Neben der Entwicklung, Erprobung sowie Systemintegration klimaneutraler Wärmetechnologien hängt deren Realisierung an Chemiestandorten von der Voraussetzung ab, dass elektrische Leistung klimaneutral sowohl gemäß der notwendigen als auch der hinreichenden Bedingung zur Verfügung steht.

Dies vorausgeschickt muss auch das Szenario betrachtet werden, dass im Zeitraum bis 2045 nicht zu allen (noch zu definierenden) milestones die erforderliche Wärmeleistung gemäß dem geplanten Fortschrittsgrad der Mission “Wärmewende 2045“ zur Verfügung steht, weil die oben genannten Voraussetzungen nicht erfüllt sind – ein Ausblenden dieses Szenarios wäre fahrlässig. Falls dieses Szenario eintritt, muss zur Sicherstellung der Produktion in der chemischen Industrie auf bestehende Wärmeerzeugungsanlagen zurückgegriffen werden. Ein weiterer denkbarer Fall ist eine Lücke in der residualen Rest-Wärmeleistung, die – zumindest bis 2045 – klimaneutral bereitgestellt werden kann.

In diesen Fällen ist die naheliegendste Möglichkeit die erforderliche Rest-Wärmeleistung durch nachgerüstete KWK-Anlagen bzw. nachgerüstete Erdgaskessel mit CCU/CCS-Technologie zu ertüchtigen. Anreize klimaneutrale Wärmetechnologien einzuführen, bestehen durch den CO₂-Emissionshandel bzw. sind durch geeignete Fördermittel zu schaffen, so dass Unternehmen deren Einführung beschleunigt angehen können, wobei es jedem Unternehmen überlassen bleiben sollte, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Geschwindigkeit deren Etablierung erfolgt. Ordnungspolitische Entscheidungen stehen dem nicht entgegen, sondern werden ohnehin als Kriterium bei ökonomischen Entscheidungsfindungen einbezogen.

4. Topologie der Verteilung von Abwärmequellen/effiziente Abwärmenutzung

Je höher der Exergieanteil des Abwärmestroms, desto höher ist die Temperatur des Abwärmestroms und desto effizienter arbeitet eine (Hochtemperatur-) Wärmepumpe. Um das Nutzungspotential von Abwärmequellen auszuschöpfen, bietet es sich an, konzentrierte Abwärmequellen insbesondere hoher Leistung möglichst in oder in der Nähe von Chemiestandorten anzusiedeln. Dies trifft insbesondere zu auf Rechenzentren, Elektrolyseure sowie in Chemieanlagen vielfach ohnehin vorhandene Abhitzequellen.

Backup zur Technologie der Hochtemperaturwärmepumpen

Thermodynamische Grenzen

Mittels Hochtemperaturwärmepumpen können Temperaturen jenseits der Siedetemperatur von Wasser bei Umgebungsdruck erzeugt werden, so dass Wärmeleistung in Form von Dampf

zur Verfügung steht. Thermodynamisch wird die niedrige Temperatur eines Arbeitsfluids (in HTWP: Kältemittel) durch Zufuhr externer Leistung (hier: Umweltwärmeleistung sowie elektrische Leistung) erhöht und auf ein anderes Fluid (hier: Wasser) übertragen, das Wärmeleistung in Form von Nutzleistung (hier: Dampf) für chemische Prozesse bereitstellt.

Beispiel:

Aus einem Abwärmestrom mit einer Temperatur von 60°C kann mit einer (mehrstufigen) Hochtemperaturwärmepumpe ein Dampf/Nutzwärmestrom mit einer Temperatur von 140°C erzeugt werden. Als Kenngröße für die Effizienz des Wärmepumpenprozesses dient die **COP** (Coefficient of Performance, **Leistungszahl**). Die COP ist wie folgt definiert:

$$\text{COP} = \text{Nutzwärmeleistung} / \text{zugeführte elektrische Leistung} \quad (1)$$

Die Leistungszahl COP ist größer als 1; je größer COP, desto besser ist die Effizienz des Wärmepumpenprozesses. Die Leistungszahl ist größer als 1, weil zur Erzeugung der Nutzwärmeleistung neben der elektrischen Leistung zum Antrieb des Verdichters der HTWP auch Umweltwärmeleistung bzw. Abwärmeleistung verwendet wird. Je höher der Anteil an Umweltwärmeleistung an der Nutzwärmeleistung, desto größer ist die Leistungszahl COP und desto effizienter ist der Wärmepumpenprozess. Die Umweltwärmeleistung ist umso höher, je höher deren Exergie ist bzw., je höher die Temperatur des Umweltwärmestroms ist. Daher ist unmittelbar ersichtlich, dass beispielsweise eine Luft-Wasser-Wärmepumpe bei einer Luft-Umgebungstemperatur von 25°C eine höhere COP hat als bei einer Luft-Umgebungstemperatur von 10°C. Die Leistungszahl COP ist also kein fester Wert (keine Maschinenkenngroße der HTWP), sondern hängt von den Betriebsbedingungen ab.

Thermodynamisch lässt sich zeigen, dass eine physikalische Grenze für die COP existiert. Der zugrundeliegende thermodynamische Prozess ist der sogenannte Carnot-Prozess.

Der Carnot-Prozess liefert die theoretisch maximale COP in Abhängigkeit der thermodynamischen Temperaturen am kalten Ende (Umweltwärme) und am heißen Ende (Nutzwärme). Die thermodynamische Temperatur ist hierbei die Temperatur in Kelvin:

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \text{COP}_{\text{max}} = T_{\text{heiss}} / (T_{\text{heiss}} - T_{\text{kalt}}) \quad (2)$$

COP_{Carnot} ist umso größer, je geringer die Differenz zwischen Temperatur der Nutzwärme und Temperatur der Umweltwärme ist. Dies ist auch anschaulich eine gute Erklärung für die thermodynamische Größe **Exergie**:

Je höher die Temperatur der Umweltwärme ist, desto "wertvoller" ist die Umweltwärme, weil in diesem Fall die Temperaturdifferenz im Nenner von Gleichung (2) klein ist und folglich die Leistungszahl COP groß ist. Der Exergieanteil ist umso höher, je höher die Temperatur des Umweltwärmestroms ist. Damit folgt unmittelbar:

Je höher die Leistungszahl COP desto höher wegen (1) auch die Nutzwärmeleistung:

$$\text{Nutzwärmeleistung} = \text{COP} * \text{zugeführte elektrische Leistung} \quad (3)$$

Hochtemperaturwärme mit nachgeschalteter mechanischer Brüdenkompression (Brüdenverdichtung)

Erzeugung von Dampf aus Abwärme mittels Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) mit nachgeschalteter mechanischer Brüdenkompression – dazu muss man sich zunächst vergegenwärtigen, wie eine Wärmepumpe prinzipiell aufgebaut ist: In einer Wärmepumpe durchläuft ein Kältemittel einen geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess indem:

- (1) umlaufende flüssiges Kältemittel in einem Verdampfer wird durch die Aufnahme von Umweltwärmeleistung/Abwärmeleistung verdampft. Der Zustrom von Abwärme in Form von Luft oder Wasser erfolgt durch einen elektrisch angetriebenen Ventilator (Luft) oder durch eine elektrisch angetriebene Pumpe (Wasser);
- (2) anschließend wird das gasförmige (verdampfte) Kältemittel durch einen elektrisch angetriebenen Verdichter verdichtet und durch polytrope Kompression auf höhere Temperatur und höheren Druck gebracht;
- (3) in einem Wärmetauscher gibt das Kältemittel einen Energiestrom an das Nutzwärmemedium (vielfach Wasser) ab und kondensiert dabei; Wasser verdampft durch die Aufnahme des Energiestroms.
- (4) durch die Durchströmung eines Expansionsventils wird das Kältemittel verflüssigt und der Kreisprozess beginnt mit Schritt 1 erneut.

In einer HTWP wird das Nutzwärmemedium (flüssiges Wasser) durch die Energieübertragung im Wärmetauscher der HTWP so stark erhitzt, dass auf der Ausgangsseite des Sekundärkreislaufs Wasserdampf entsteht. Die erzielbaren Dampfdrücke sind jedoch durch den Kreisprozess, den das Kältemittel durchläuft, sowie durch die Art des Kältemittels limitiert. Nichtsdestotrotz kann der Wasserdampf durch nachgeschaltete **mechanische Brüdenverdichtung** mit elektrisch angetriebenen Verdichtern (Turboverdichtern oder Schraubenverdichtern) in der Regel mehrstufig auf höhere Dampfdruckniveaus verdichtet werden. Da durch die polytrope Verdichtung gleichzeitig auch die Dampftemperatur erhöht wird, lassen sich die für die chemischen Prozesse erforderlichen Dampfzustände erzeugen. Eine Konditionierung der Dampftemperatur bei unverändertem Dampfdruck lässt sich durch Injektion von Einspritzwasser herstellen. Für den Fall, dass Abwärme unmittelbar in Form von Niederdruckdampf vorliegt, kann der Niederdruckdampf direkt, d.h. ohne den vorgeschalteten HTWP-Prozess durch mechanische Brüdenverdichtung in Prozesswärme/Nutzwärme umgewandelt werden.

Forschungsbedarf hinsichtlich Hochtemperaturwärmepumpen:

1. Erzeugung von **Dampftemperaturen von ca. 300°C** ohne mechanische Brüdenverdichtung (erforderlich für viele chemische Prozesse)
2. **Wärmetauscher**
3. **Verdichter**
4. **Kältemittel** (thermodynamische Eigenschaften, Stabilität, Umweltverträglichkeit)
5. **Verschmutzung** der Komponenten (reduziert die Effizienz)

6. **Effizienz** der HTWP im gesamten Kennfeld (Teillast/Vollast)
7. **Brüdenverdichtung**
8. **Prozessregelung** und Effizienz der Komponenten
9. **Systemintegration**
10. **Modellierung und Optimierung** der thermodynamischen Prozessschritte
11. **Skalierbarkeit** der Komponenten
12. Senkung der **Investitionskosten**.

Ansprechpartner:

Dr. Martin Reuter
Forschungs- & Technologiepolitik
T +49 (69) 2556-1584 | E reuter@vci.de

Verband der Chemischen Industrie e.V. – VCI

Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt

www.vci.de | www.ihre-chemie.de | www.chemiehoch3.de | [LinkedIn](#) | [Twitter](#) | [YouTube](#) | [Facebook](#)

[Datenschutzhinweis](#) | [Compliance-Leitfaden](#) | [Transparenz](#)

- ▶ Registernummer des EU-Transparenzregisters: 15423437054-40
- ▶ Der VCI ist unter der Registernummer R000476 im Lobbyregister, für die Interessenvertretung gegenüber dem Deutschen Bundestag und gegenüber der Bundesregierung, registriert.

Der VCI ist Europas größter Verband für Chemie und Pharma. Mit seinen 22 Fach- und 7 Landesverbänden repräsentiert er die Interessen von rund 2.000 Unternehmen – vom Global Player bis zum hoch spezialisierten Mittelständler. Mit 240 Milliarden Euro Umsatz im Jahr 2024 und mehr als 560.000 Beschäftigten in Deutschland zählt die Branche zu den stärksten Treibern für Innovation, Wohlstand und Zukunft. Für eine starke chemisch-pharmazeutische Industrie von heute und morgen ist der VCI in Deutschland, in Europa und weltweit aktiv.