

Die im 2023 verabschiedeten 8. Energieforschungsprogramm (EFP) definierten Missionen legen den Rahmen für die strategische Weiterentwicklung essentieller Bausteine der Energietransition fest und setzen besondere Schwerpunkte auf resiliente und effiziente Energiesysteme, Beschleunigung des Wandels zur effizienten und klimaneutralen Wärme- und Kälteversorgung, bezahlbare und sichere Stromversorgung aus regenerativen Quellen, Technologieentwicklung zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft und Stärkung der Rolle der Energieforschung als Impulsgeber des Fortschritts in Wirtschaft und Gesellschaft. Eine fundamentale Stärkung und Ergänzung der o.g. Ziele stellt die vom Bundeskabinett beschlossenen Carbon Management Strategie (CMS, August 2024) dar. Diese erkennt die zentrale unterstützende Rolle der CO₂-Speicher- und Kohlenstoff-Verwendungstechnologien zur Erreichung der Klimaziele an und etabliert klare politische Eckpfeiler für den Umgang mit CCS (Carbon Capture and Storage) und CCU (Carbon Capture and Usage). Die CMS schafft wichtige Voraussetzungen für die Implementierung der Langfriststrategie Negativemissionen, welche sich mit CDR-Technologien (Carbon Dioxide Removal, e.g. BECCS & DACCS) und Low Carbon Energy Storage, z.B. H₂ Lagerung und Geothermie, befasst, insbesondere im Hinblick auf die notwendige CO₂-Infrastruktur und CO₂-Speicherung.

Im Bereich der Förderungsstruktur:

- Das neue EFP sollte unbedingt Förderinstrumente für grenzüberschreitende Forschungs- und Demonstrationsprojekte, insbesondere innerhalb der EU und mit assoziierten Partnerländern zur Verfügung stellen. Der Ausstieg des BMWi aus dem internationalen Programm CETP (Clean Energy Transition Partnership) im Bereich CCUS hat die deutsche Industrie und deutsche Forschungseinrichtungen von der internationalen Zusammenarbeit abgeschnitten.
- Das zu gestaltende Forschungsprogramm sollte die Ziele der Forschung technologieneutral formulieren und Schwerpunkte abhängig vom Potenzial der CO₂-Minderung (Klimaschutzeffekt), der Sektorkopplung (Stärkung der Technologieentwicklung mit Mehrfachnutzen für verschiedene Anwendungen und Vermeidung der Entwicklung kleinskaliger „Insel-Lösungen“), der Systemflexibilität (Flexibilität im Sinne mehrerer Anwendungsmöglichkeiten, als auch flexibel im Sinne der Zusammenarbeit mit der schwankenden Erneuerbaren Stromerzeugung) und der Kosteneffizienz (z.B. spezifische Kosten pro t vermiedener CO₂-Emissionen) setzen. Kosteneffizienz, schnelle Umsetzbarkeit der entwickelten Technologien, Funktionalität und gesellschaftliche Akzeptanz werden in der Regel durch evolutive Technologieentwicklung erreicht und eher selten durch disruptive Ansätze. Deshalb sollte das EFP bei First-of-a-kind-Anlagen darauf achten, dass die Demonstration nicht durch zu hohe Auflagen und Forderungen, die erst für das Erreichen eines CO₂-neutralen Zielzustandes in einigen Jahrzehnten legitim sind, überfordert werden (niedrigste Kosten, niedrigste Emissionen, höchste Effizienzen, höchste Flexibilität, konkurrenzfähig im Vergleich zu fossilen Techniken,...)
- Das neue EFP sollte Themen im Bereich CCUS berücksichtigen, da CCUS-Prozesse meist sehr energieintensiv sind und die Entwicklung energieeffizienter CCUS-Verfahren (bzw. Synergien mit anderen Sektoren bzgl. Energienutzung) einen wesentlichen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs liefern kann.

Hinsichtlich der spezifischen Forschungsthemen, sollten folgende Aspekte und Problematiken berücksichtigt werden.

Im Bereich **CO₂-Abscheidung** und **-Nutzung (CCUS)** ergeben sich für die kommenden Jahre mehrere Forschungsfelder, die besonders auf industrielle Skalierbarkeit und wirtschaftliche Umsetzung ausgerichtet sein sollen:

- Die **CO₂-Abscheidung** erfordert je nach eingesetzter Technologie einen hohen bis sehr hohen Energieaufwand, etwa für die Regeneration chemischer Absorptionsmittel, die Erzeugung des nötigen Drucks bei physikalischer Absorption oder die Verflüssigung des CO₂. Deshalb sind alle

Maßnahmen, die den Energiebedarf senken oder die Abscheideeffizienz anderweitig erhöhen, als förderfähig zu betrachten. Skaleneffekte, die Anlagen- und Prozesstechnik gegenüber dem aktuellen Stand verbessern, können dabei zusätzlich zur Effizienzsteigerung beitragen. Durch die gleichzeitige Steigerung der Energie- bzw. Abscheideeffizienz und die steigenden CO₂-Preise im europäischen Emissionshandel (EU-ETS) erreichen diese Verfahren die Wirtschaftlichkeitsschwelle. Damit ermöglichen die neuen, verbesserten Technologien eine rentable Umsetzung und beschleunigen die Marktdurchdringung von CO₂-Abscheideanlagen. Im Vergleich zum Direct-Air-Capture (DAC) arbeitet die CO₂-Abscheidung aus der energetischen Nutzung biomassebasierter Energieträger (BECCS) mit einem deutlich höheren CO₂-Gehalt im Abgasstrom und bildet damit ein indirektes, aber wesentlich effizienteres Verfahren. Unvermeidbare CO₂-Emissionen aus den Bereichen wie der thermischen Verwertung, Zement-, Keramik- und Glasindustrie müssen auch nach Erreichen der Klimaneutralität weiterhin abgeschieden werden. Die dabei gewonnenen Kohlenstoffmengen decken nach einer vollständigen Defossilisierung jedoch nicht den gesamten Bedarf der deutschen Industrie, etwa für Kunststoffe oder andere chemische Produkte. Deshalb muss die erwartete Versorgungslücke durch CO₂-Abscheidung aus biogenen Quellen – Bioenergy Carbon Capture and Utilization (BECCU) – geschlossen werden. Neben BECCS sollte daher insbesondere BECCU als förderfähige Technologie betrachtet werden. Sowohl bei BECCS als auch bei BECCU müssen prozessbedingte atmosphärische Emissionen und Besonderheiten der Abgaszusammensetzung beachtet werden. Alle CO₂-Abscheidetechnologien müssen an die vorhandene Bestandsinfrastruktur angebunden werden. Daher ist die Förderung von nachrüstbaren Retrofit-Lösungen für unterschiedliche Anlagentypen zwingend erforderlich. Benötigt wird ein Portfolio von technischen Lösungen, das die verschiedenen CO₂-Gehalte (von kleiner 5% bis etwa 50%) und die prozessspezifischen Nebekomponenten von Abgasen der relevanten CO₂-Quellen abdeckt. Zusätzlich werden skalenübergreifende Konzepte benötigt, die sich flexibel an verschiedene Anlagengrößen im Bestand und an Neuanlagen anpassen und integrieren lassen. Die prozesstechnische Integration von CO₂-Abscheidung und Aufbereitung des abgeschiedenen CO₂ bis zu der für den Transport erforderlichen Reinheit kann einen wichtigen und bisher wenig beachteten Beitrag zur Kostenreduktion leisten. Technisch und juristisch müssen praktikable Lösungen für den Umgang mit abgeschiedenen Nebekomponenten gefunden werden.

Die Entwicklung energieeffizienter Abscheideverfahren überschneidet sich mit der Entwicklung von Hochtemperatur-Wärmepumpen für den industriellen Einsatz, wenn es um die Elektrifizierung der thermischen Regenerierung von Lösemitteln geht.

Akademische Forschung muss Grundlagen für ein besseres Verständnis von praktisch relevanten Effekten (z.B. der Degradation von Absorptionsmitteln) beitragen, die langfristig zusammen mit Erfahrungen aus Pilot- und Demonstrationsanlagen für die Optimierung von Abscheideverfahren genutzt werden können. Wo akademische Forschung die eigentliche Verfahrensentwicklung adressiert, sollte der Fokus auf (für praktische Anwendungen) aussichtsreichen neuen Verfahren liegen.

- Eine besondere Rolle spielt die CO₂-Abscheidung aus Erdgas mit dem Ziel der Gewinnung von blauem Wasserstoff. Diese Technologie ist weitestgehend marktreif und kann eine Schlüsselrolle beim Hochfahren des deutschen Wasserstoff-Netzes und beim Aufbau von CO₂-Export Kapazitäten spielen. Die großskalige Demonstration dieser Brückentechnologie sollte unterstützt werden. Politisch / ökonomisch müssen Lösungen gefunden werden, wie Lock-In Effekte vermieden und der Charakter einer Brückentechnologie gewahrt werden kann, um das Hochfahren von Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff (zu ökonomisch vertretbaren Konditionen) nicht zu behindern.

- Mit Blick auf DACCS sollten die Senkung der Abscheidungskosten und die Integration in vielversprechende Wertschöpfungsketten im Mittelpunkt von Forschung und Entwicklung stehen. Neben einer Reduktion des (unvermeidbar hohen) Energiebedarfs kann ein besseres Verständnis der Degradation von Sorbentien und Lösemitteln zur ökonomischen Optimierung beitragen. Die Technologien, die derzeit das Demonstrationsstadium erreicht haben, lassen überwiegend inkrementelle Verbesserungen erwarten. Förderwürdig sind vielversprechende neue Technologien, die aber eine realistische Chance auf großtechnische Umsetzung haben müssen. In großem Stil werden DACCS-Anlagen aller Voraussicht nach nicht in Deutschland etabliert werden. Daher sollten auf hohem TRL-Level primär Projekte, die auf den Export von Technologie abzielen, und Projekte, die DACCS in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern (mit besseren naturräumlichen Voraussetzungen) und in ganzen Wertschöpfungsketten betrachten, gefördert werden. In Deutschland haben BECCS und BECCU Techniken mehr Potential.
- CCU-Techniken können grundsätzlich nur in Wertschöpfungsketten betrachtet werden. CO₂ ist hier in einer kompletten Wertschöpfungskette ein Ausgangsstoff mit negativem Preis. Über die ökonomischen Erfolgchancen von CCU entscheiden Preisstruktur und Volumen des für das Endprodukt adressierten Marktes. Daher sollten auf hohem TRL-Level primär Pilot- oder Demonstrationsprojekte gefördert werden, die komplette Wertschöpfungsketten adressieren. Ausschlaggebend ist dabei neben dem ökonomischen Potential das langfristig zu erwartende Potential zur Reduzierung atmosphärischer CO₂-Emissionen. In der akademischen Forschung sind grundlagenorientierte Arbeiten förderwürdig, die z.B. die Anforderungen verschiedener Prozessketten an die Reinheit des CO₂ oder die Entwicklung robuster Katalysatoren adressieren.
- In Bezug auf den Transport von abgeschiedenem CO₂ zur Nutzung oder Speicherung sind primär weitere Arbeiten zum Verständnis des Einflusses von Nebenkomponten auf den Betrieb eines CO₂-Pipelinenetzes bzw. auf Verflüssigung und Tanktransport notwendig. Neben grundlagenorientierten Arbeiten zu den in dichtem CO₂ ablaufenden chemischen Prozessen, den resultierenden Phasengleichgewichten und dem sich daraus ergebenden Korrosionsrisiko sollten im Pilotmaßstab Anlagen gefördert werden, mit denen Erfahrungen mit Betriebsparametern, der Zuverlässigkeit von Simulationstools, der praktischen Eignung von Messtechnik (Volumen-, Massenstrom und Zusammensetzung) und betrieblichen Abläufen gesammelt werden können. Zwischengekühlte Verdichter für den CO₂-Transport in Pipelines und für Verflüssigungsanlagen sind marktverfügbar, bedürfen aber weiterer Optimierung. Laufende und neue Initiativen zur Entwicklung von europäischen Standards für Zusammensetzungen, Messtechnik und technische Lösungen sollten unterstützt werden – CO₂-Transport wird in der Regel grenzüberschreitend sein, der europäischen Integration kommt eine Schlüsselrolle zu.

Systemische Studien müssen unter Berücksichtigung räumlicher Gegebenheiten und unter Berücksichtigung des sich entwickelnden Verständnisses für Probleme beim CO₂-Transport optimale Verknüpfungen von verschiedenen Transportarten betrachten. Derzeit erscheint unklar, ob das lange favorisierte multimodale Netz mit Übergängen zwischen Tank- und Pipelinetransport unter realistischen Bedingungen wirklich optimal ist. In jedem Fall muss bei solchen Studien aber die Schnittstelle zur Speicherung betrachtet werden (Kann bei niedriger Temperatur flüssiges CO₂ direkt in eine Speicherstätte injiziert werden? Muss mit einer Pipeline bis zur Küste transportiertes CO₂ nicht doch noch verflüssigt werden, weil Offshore-Lagerstätten per Schiff erreicht werden müssen?). Bei einer systemischen Betrachtung von CCU muss neben der Verfügbarkeit von CO₂ auch räumlich aufgelöst die Verfügbarkeit von Wasserstoff und (grünem) Strom berücksichtigt werden.

Fragen der öffentlichen Wahrnehmung und der juristischen Randbedingungen werden gerade für den großskaligen Transport von CO₂ von entscheidender Bedeutung sein. Hier kommt einer

systematischen und glaubwürdigen Information der Öffentlichkeit sowie der Klärung juristischer Fragen große Bedeutung bei.

- Im Bereich der Speicherung muss zwischen dem Export von CO₂ zur Offshore-Speicherung und potenzieller Onshore-Speicherung in Deutschland unterschieden werden.

Auf europäischer Ebene wird (primär) für die Offshore-Speicherung die Bedeutung der Hochskalierung zum „Gigatonnen Maßstab“ betont. Zur technischen Bereitstellung entsprechender Speicherkapazitäten müssen vor allem grundsätzlich etablierte Verfahren zur Erschließung von Lagerstätten beschleunigt werden – hier geht es zunächst um den Aufbau von Kapazitäten. Mit Blick auf Forschung und Entwicklung sollen Technologien gefördert werden, die die notwendigen Prozesse beschleunigen. Monitoring Lösungen und Techniken für das langfristige Verschließen von Speicherstätten müssen weiterentwickelt und erprobt werden, der rechtliche Rahmen für die Lizenzierung von Lagerstätten, für Anforderungen an das Monitoring und für Fragen der langfristigen Haftung muss geklärt werden, und die gegenseitige Beeinflussung von benachbarten Lagerstätten muss weiter untersucht werden. Schnittstellen zwischen Transport und Speicherung müssen berücksichtigt werden. Fragen der Reinheit des einzuspeichernden CO₂ treten derzeit eher in den Hintergrund – die Reinheitsanforderungen für den Transport schienen höher zu sein als die für die Speicherung. Diese Prozesse sollten von deutschen Instituten, Universitäten und Unternehmen intensiv begleitet werden, um Auswirkungen auf CO₂-exportierende Unternehmen / Staaten richtig einschätzen zu können.

Auf nationaler Ebene kann langfristig die Onshore-Speicherung an Bedeutung gewinnen. Die Kosten für Onshore-Speicherung werden derzeit als viel geringer eingeschätzt, weil Transportwege kürzer werden und teure Offshore-Technologie vermieden werden kann. Gleichzeitig ist aber bei Onshore-Speicherung in Deutschland mit größerem öffentlichem Widerstand zu rechnen – hier kommt im Vorfeld einer umfassenden Information der Öffentlichkeit besondere Bedeutung bei. Speicheroptionen sollten systematisch erkundet werden, um unter Berücksichtigung der Erfahrungen auf europäischer Ebene zu einer realistischen Potentialanalyse zu gelangen. Die Frage nach größeren Demonstrationsprojekten hängt von einer politischen Einschätzung ab – unter Umständen sollte hier abgewartet werden, bis sich in der Bevölkerung die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass es sich bei der langfristigen Speicherung von CO₂ um eine erprobte und sichere Technologie handelt.

Mit dem Beitritt Deutschlands zum ECCSEL-ERIC Netzwerk (Juni 2025) wurde die nationale Carbon Management Strategie stärker in der Europäischen Forschungs- und Innovationsumgebung verankert, wobei der Ausbau der Forschungsinfrastruktur und der nationalen Kooperationsnetzwerke unterstützt durch das zu gestaltende 9. EFP zur Stärkung des Industrie- und Forschungsstandorts Deutschland und zum Ausbau einer resilienten technologischen Infrastruktur unerlässlich ist.

Unterzeichnet

Die ECCSEL-ERIC Node Deutschland

<https://eccsel.eu/>