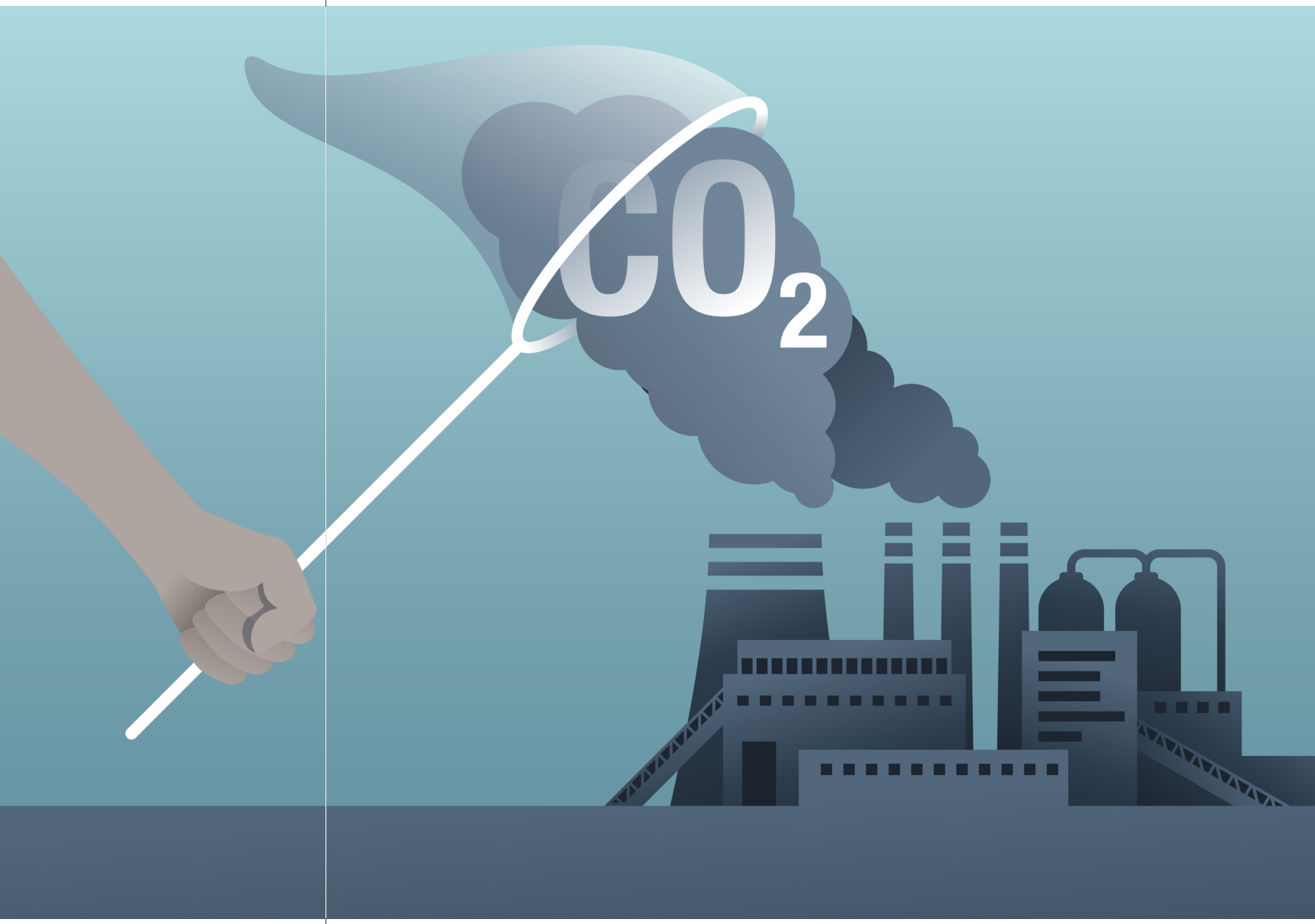
Schweizerische Eidgenossenschaf
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Forschungskonzept des Bundesamtes für Energie zu CO_2-Entnahme und Speicherung für die Periode 2023 - 2028



Quelle Titelbild: Dimitry Kovalchuk/Shutterstock.com

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
1. Ausgangslage 4
2. Sektorielle CO_2-Emissionen: Aktueller Stand und Ziele 7
3. CCUS und NET: Bestehende Lösungen und Innovationspotential 10
CO_2-Abscheidung bei Punktquellen 10
Verwendung von CO_2 12
CO_2-Transport 13
CO_2-Speicherung im geologischen Untergrund 14
Negative Emissions-Technologien 16
Übergeordnete Themen die durch das BFE gefördert werden 18
4. Die BFE Förderprogramme 19

1. Ausgangslage

Auf Basis des Sonderberichts des IPCC zur Erwärmung um 1.5°C hat der Bundesrat am 28. August 2019 beschlossen, dass die Schweiz bis 2050 ihre Treibhausgasemissionen auf Netto-Null reduzieren wird[1]. Dies konkretisiert und verschärft den Beschluss, dass die Schweiz dazu beiträgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen und eine Erwärmung auf maximal 1.5°C anzustreben, wozu sie sich aufgrund der Ratifikation des Übereinkommens von Paris im Oktober 2017 verpflichtet hatte[2]. Das Netto-Null Ziel bis 2050 legt den Grundstein für die langfristige Klimastrategie 2050, welche der Bundesrat am 27. Januar 2021 verabschiedet[3] und beim UNO-Klimasekretariat einreicht hat. Inhalt dieser ist es, dass die Schweiz ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 um 50% (gegenüber 1990) reduziert und bis 2050 netto-null erreicht. Diese Zielvorgaben basieren auf den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+), welche auch die Rolle von CO_2-Vermeidung und Methoden zur CO_2-Entfernung aus der Atmosphäre beleuchten[4].

Das Erreichen des Netto-Null-Ziels erfordert, dass im Energiesektor die CO_2 Emissionen in erster Linie durch Energieeffizienzsteigerung und Ausbau der erneuerbaren Energien so weit wie möglich reduziert werden. Dies betrifft vor allem die Sektoren Gebäude, Mobilität und Industrie. Auch in anderen Sektoren, etwa in der Landwirtschaft, Abfallverbrennung, Zementproduktion und Chemieindustrie, muss der Treibhausgasausstoss so weit wie möglich reduziert oder vermieden werden. Nichtsdestotrotz werden bis 2050 Treibhausgase geschätzten 12 Mio. Tonnen CO_2-Äquivalente Emissionen dadurch nicht zu vermeiden sein[4]. Diese schwer vermeidbaren Treibhausgas-Emissionen betreffen vor allem die Landwirtschaft, Abfallverbrennung. Zementproduktion, ferner die Chemieindustrie. Ein Teil dieser Emissionen kann zusätzlich durch CO_2 Abscheidung mit anschliessender Nutzung und/oder Speicherung (eng. Carbon Capture, Utilization and/or Storage, CCUS) reduziert werden (ca. 7 Millionen Tonnen CO_2). Bei grossen Punktquellen (z.B. Abfallverbrennungsanlagen oder Zementproduktionsanlagen) kann das CO_2 direkt an der Anlage abgeschieden werden. Das abgeschiedene CO_2 kann nach Transport im Inland oder im Ausland im Untergrund eingelagert werden (eng. Carbon Capture and Storage, CCS) oder in Materialen (z.B. Recycling-Zement) eingebunden werden (eng. Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS). Die derartige Vermeidung der schweizweiten CO_2 Emissionen wird aber nie vollständig sein, da in diesen und anderen Sektoren (z.B. Landwirtschaft, Luftfahrt) CO_2 Abscheidung nicht oder kaum im erforderlichen Massstab möglich sein wird. Dies bedeutet, dass eine beachtliche Menge CO_2 (ca. 5 Mio. Tonnen CO_2) durch sogenannte Negative-Emissions-Technologien (NET) dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt werden muss.

Insgesamt bezeichnen die Begriffe «**Carbon Capture, Utilization and/or Storage**» (CCS, CCU oder CCUS, im Folgenden unter **CCUS** zusammengefasst) und **«Negative Emissionstechnologien»** (**NET**) eine Reihe von Ansätzen und Technologien, mit denen CO_2-Emissionen vermieden, gespeichert und sogar aus der Atmosphäre entzogen werden können[5]. Dabei ist die Klimawirksamkeit dieser Ansätze anhängig von der CO_2-Quelle. Wird fossiles CO_2 abgeschieden, ist CCUS als Vermeidungstechnologie zu verstehen. Wird biogenes CO_2 abgeschieden ist es den NET zuzurechnen, da ein Netto-Entzug aus der Atmosphäre erreicht wird. Die verschiedenen Ansätze werden im Bericht zu deren Bedeutung für die Erreichung die

[1] Bundesrat will bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz (admin.ch), Bern 28.8.2019

[2] SR 0.814.012 - Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember

[3] Langfristige Klimastrategie der Schweiz, 27. Januar 2021

[4] EP2050+ Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz

[5] Vgl. Begriffsdefinitionen und Erklärungen im Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211.

klimapolitischen Ziele (Bericht zur Erfüllung des Postulates 18.4211[6]) eingehend erklärt und behandelt (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2). In einem Bericht des Bundesrates[7] werden Schritte und Massnahmen aufgezeigt, wie CCUS und NET in den nächsten Jahren ausgebaut werden können, um ihren nötigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten. Es wird ausserdem festgehalten, dass die Schweiz im Bereich CCUS und NET mit zum Teil weltweit führenden Unternehmen und Forschenden bereits gut aufgestellt ist und diese Pionierrolle als Chance nutzen kann.

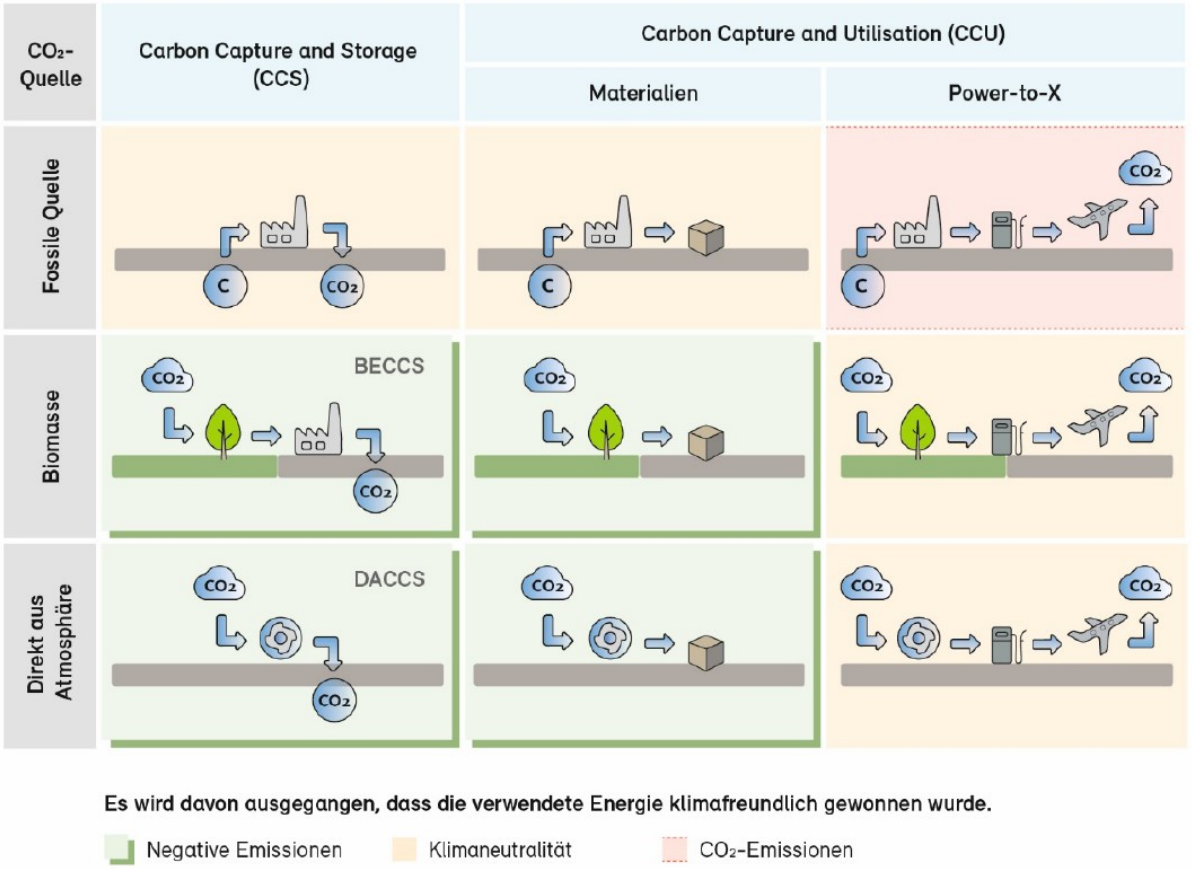


Abbildung 1: Darstellung der Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) Prozessketten. Quelle BAFU Darstellung[8]

Obwohl jedoch zahlreiche CCUS und NET Ansätze diskutiert werden und teilweise sogar in Umsetzung sind, befinden sich die Teilaspekte der dazugehörigen Prozessketten in sehr unterschiedlichen Stadien bezüglich des technologischen Reifegrades (eng. Technological Readiness Level, TRL[9]). Die Ressortforschung des BFE kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten, dass sich CCUS und NET Technologien angebotsseitig («Technology Push») von Forschung über Pilot- und Demonstrationsprojekte zur kommerziellen Skalierung entwickeln. Dabei sind für das BFE in erster Linie energierelevante Themen zu CCUS und NET von Bedeutung. Dies umfasst die CCUS und NET Themen im Energiesektor an sich oder mit breiterem Energiebezug, d.h. Themen die der Dekarbonisierung/Defossilisierung[10] des Energiesektors

[6] Von welcher Bedeutung könnten negative CO2-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018, 2. September 2020.

[7] CO2-Abscheidung und Speicherung (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET) Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können Bericht des Bundesrates, 18 . Mai 2022

[8] Von welcher Bedeutung könnten negative CO2-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018, 2. September 2020.

[9] OECD Frascati Manual und BFE P+D Vollzugsweisung

[10] Dekarbonisierung: Fossile Brennstoffe werden durch kohlenstofffreie Brennstoffe ersetzt (z.B. Wasserstoff, Ammoniak). Defossilisierung: Fossile Brennstoffe werde durch CO_2-neutrale Brennstoffe ersetzt (z.B. Biogas)

dienen (z.B. CO_2 Abscheidung bei KVAs) oder den Energiebedarf und die Kosten von CCUS und NET Technologien reduzieren (CO_2 und Energieeffizienz der CCUS und NET Prozesskette).

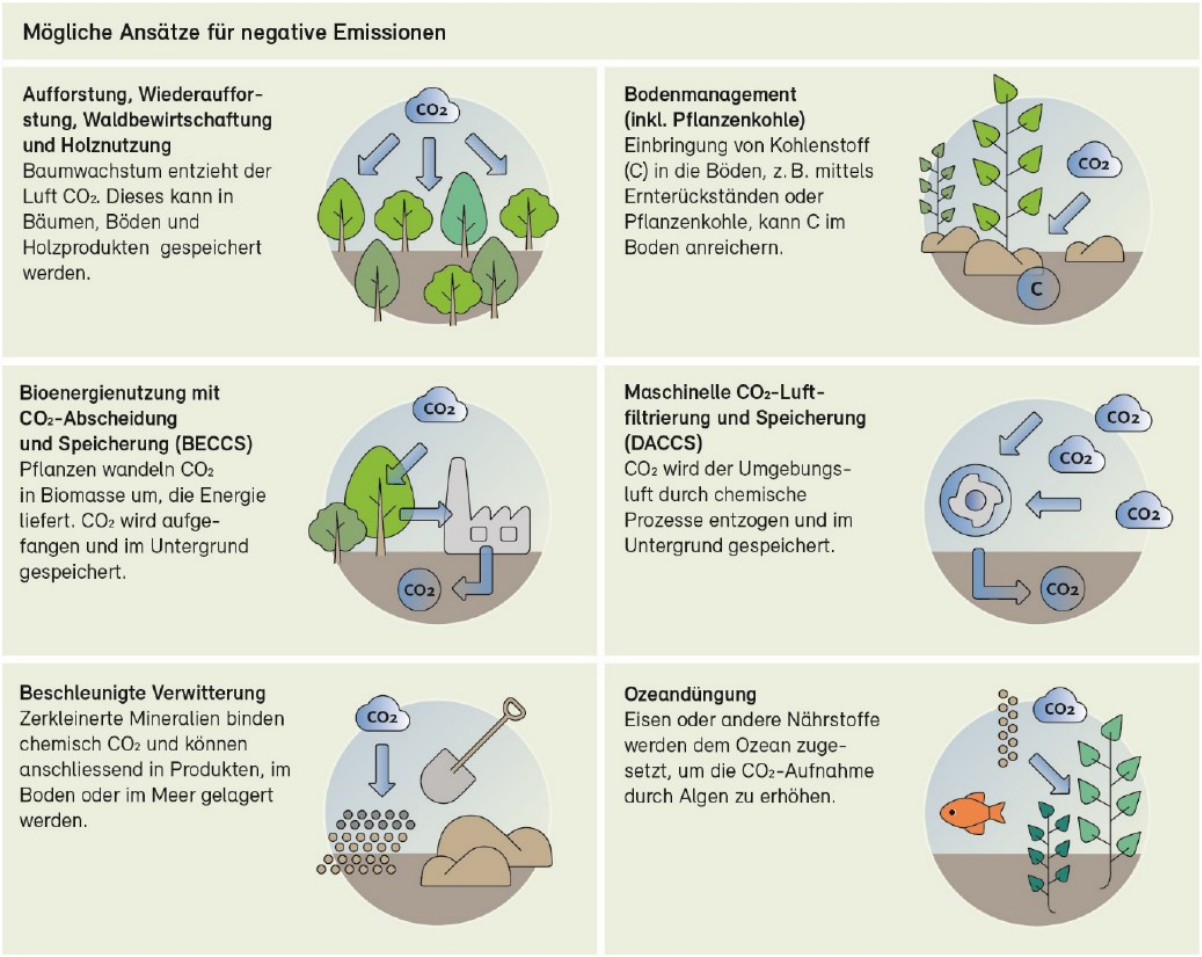


Abbildung 2: Darstellung verschiedener Ansätze für negative Emissionen (Quelle: BAFU-Darstellung gestützt auf Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)) [11]

Beim BFE stehen zur Förderung von CCUS und NET verschiedene Programme zur Verfügung: Das Forschungsprogramm CCUS/NET zielt darauf ab, Forschungsprojekte mit tiefen TRL (ca. 1-6) zu fördern. Das Pilot- und Demonstrationsprogramm fördert Projekte welche die marktnahe Entwicklung von innovativen Technologien und Lösungen zum Ziel haben (TRL 4-9). Weiter befasst sich das Förderprogramm SWEET im Rahmen einer Ausschreibung (Netto-Null Call) mit dem Themenbereich CCUS/NET[12]. Zusätzlich ist das BFE bei zahlreichen schweizerischen, europäischen und internationalen Forschungsprogrammen (ERA-Net ACT, CETP, IEAGHG) aktiv, um die Vernetzung verschiedener Forschungsakteure zu fördern und den internationalen Wissensaustausch zu stärken.

Bevor die Forschungsprioritäten des BFE umrissen werden, werden die sektoriellen CO_2-Reduktionsziele beleuchtet und die Lösungen durch CCS und NET technisch und bezüglich des jeweiligen Technologiereifegrades beschrieben. Dies, um aufzuzeigen, wo sich die verschiedenen Ansätze und entsprechende Innovation besonders zielführend sind.

[11] Von welcher Bedeutung könnten negative CO2-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018, 2. September 2020.
[12] SWEET: Calls for proposals: overview (admin.ch)

2. Sektorielle CO_2-Emissionen: Aktueller Stand und Ziele

Das Treibhausinventar des Bundes[13] gibt Auskunft über die aktuellen Treibhausgasemissionen für verschiedene Sektoren. Diese sind in Tabelle 1 den Prognosen für das Jahr 2050 der BFE Energieperspektiven 2050+ (EP2050+[14]) gegenübergestellt. Sollte die Dekarbonisierung und Defossilisierung der Sektoren Verkehr, Gebäude gelingen und die Emissionen im Industriesektor und in der Landwirtschaft so weit wie möglich reduziert werden, verbleiben **von den aktuell >40 $MtCO_{2eq}$ immer noch 12 $MtCO_{2eq}$ schwer vermeidbare Emissionen**. Diese fallen grösstenteils bei Punktquellen in der Industrie (7 $MtCO_{2eq}$), sowie in der Landwirtschaft (ca. 5 $MtCO_{2eq}$) an.

Tabelle 1: Treibhausgasemissionen[15] (umgerechnet in CO_2-Äquivalente) in der Schweiz im Jahr 2020 und die entsprechenden Ziele für 2050.

	2018	2050			
	THG Emissionen	THG Emissionen	Abgeschiedenes CO_2	Abgeschiedenes fossiles CO_2	Negative Emissionen
Inland Schweiz gesamt	**46.4**	**12**	**7.0**	**5.0**	**2.0**
Verkehr[16]	15.0	0	0	0	0
Gebäude	12.3	0	0	0	0
Abfall und Deponien	0.7	0.5	0	0	0
Landwirtschaft	6.0	4.6		0	0
Industrie gesamt	**12.4**	**7.0**	**7.0**	**5.0**	**2.0**
Industrie, Energie	7.9	4.0			
Industrie, Prozesse	4.4	3.0			
Pro Industriezweig					
KVA	5.0[17]	3.6	3.6	2.6	1.0
Zement[18]	2.8	2.4	2.4	1.8	0.6
Chemie	1.3	0.5	0.5	0.5	0
Biomassekraftwerke	-	0.4	0.4	0	0.4
Andere	3.2[19]	0.1	0.1	0.1	0
Negative Emissionen im Ausland	-	-	5.0	0	5.0

Die verbleibenden Emissionen in der Landwirtschaft sind Emissionen aus Böden und der Viehhaltung, da die energetischen Emissionen in der Landwirtschaft auf null gehen werden. Weitere Reduktionen der nicht energetischen Emissionen sind nur durch eine deutliche Umstrukturierung der Landwirtschaft oder der

[13] Treibhausgasinventar der Schweiz (admin.ch)

[14] Energieperspektiven 2050+ (admin.ch)

[15] Energieperspektiven 2050+ (admin.ch), Grafik 101.

[16] Exkl. Internationaler Luftverkehr: dieser war 2019 verantwortlich für ca. 5.7 $MtCO_{2eq}$, im Corona-Jahr 2020 für ca. 2.1 $MtCO_{2eq}$.

[17] Es wurde im Vergleich zum Treibhausgasinventar angenommen, dass zusätzlich nochmal 2.5 $MtCO_2$ biogene hinzukommen.

[18] cemsuisse geben in ihrer Roadmap an, dass die CO_2 Emissionen seit 1990 um ca. 30% gesenkt werden konnten, vor allem durch Effizienzsteigerung in den Prozessen, durch Nutzung von biogenem Brennstoff, sowie durch die vermehrte Herstellung von klinkerreduziertem Zement.

[19] Lebensmittel, Metall, Papier, Bau- und Industriemaschinen, Fernwärme, Raffinerien, Verdampfungsemissionen (Öl/Gas), restliche Emissionen

Ernährungsgewohnheiten zu erreichen. Diese Emissionen bilden einen grossen Teil der schwer vermeidbaren Emissionen, die mit **negativen Emissionstechnologien** kompensiert werden müssen.

Im Gegensatz dazu können die verbleibenden Emissionen im Industriesektor durch Abscheidungstechnologien weiter reduziert werden, da diese zumeist aus Punktquellen stammen. Der Industriesektor umfasst die Zementindustrie, Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), die Chemieindustrie, Lebensmittelindustrie, Metallindustrie, Papierherstellung, Bau- und Industriemaschinen sowie weitere Industriezweige. Es werden im Industriesektor ausserdem Emissionen durch Nutzung von fossilen Energieträgern (7.9 $MtCO_{2eq}$) und den industriellen Prozessen (z.B. Zementproduktion) inhärente Emissionen (4.4 $MtCO_{2eq}$) unterschieden. Die relevantesten Punktquellen in der Schweiz sind die **Zementindustrie**, die **KVAs** und die **Chemieindustrie**. Weltweit ist unter anderem die Metallindustrie für einen grossen Anteil der nicht-energetischen THG Emissionen verantwortlich. In der Schweiz ist dieser Industriezweig jedoch vergleichsweise klein und dementsprechend weniger relevant.

Die EP2050+ gehen davon aus, dass die **energetischen Emissionen** im Industriesektor ausser bei den KVAs bis 2050 fast vollständig reduziert werden können. Restemissionen kommen aus der Verwertung fossiler Abfälle. Zusätzlich werden jedoch die inhärenten Emissionen aus den industriellen Prozessen selbst anfallen (z.B. Herstellung von Zement, Chemische Prozesse, Metall). Eine besondere Rolle kommt dabei der energetischen Verwertung von Abfällen zu: kann man das CO_2 weitgehend abscheiden und speichern, erreicht man sogar substantielle negative Emissionen, da etwa die Hälfte der Abfälle biogenen Ursprungs sind. Dies ist aktuell vor allem für KVAs wichtig, aber auch für die Zementindustrie. In der Zementindustrie beinhalten die Gesamtemissionen sowohl Anteile des Energiebedarfs bei der Zementproduktion (ca. ein Drittel) als auch die inhärenten CO_2 Emissionen (zwei Drittel, z.B. Prozessemissionen bei der Kalzinierung).

Scheidet man **fossiles und geogenes CO_2** von industriellen Punktquellen in der Schweiz so weit wie möglich ab, werden laut EP2050+ immer noch jährlich 7 $MtCO_{2eq}$ verbleiben. Zusätzlich kann durch die energetische Nutzung von Biomasse (KVAs und Biomassekraftwerke) mit anschliessender CO_2-Abscheidung jährlich ca. 2 $MtCO_2$ negative Emissionen generiert werden. Es verbleiben noch ca. 5 $MtCO_{2eq}$, welche durch negative Emissionen ausgeglichen werden müssen, vor allem Direct Air Capture (DAC) im Ausland und einem kleinen Anteil durch Pflanzenkohle[20] (0.01 $MtCO_2$). Bei diesen sogenannten residualen Emissionen handelt es sich vor allem um Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft sowie einem nicht abscheidbaren Anteil der CO_2-Emissionen aus industriellen Prozessen. Welcher Anteil der total in der Schweiz abgeschiedenen 7 $MtCO_2$ (fossil/geogen und biogen) auch tatsächlich in der Schweiz entweder im Untergrund oder in langlebigen Produkten gespeichert werden kann bleibt unsicher. EP2050+ geht von 3 $MtCO_2$ aus was aber mit einer beachtlichen Unsicherheit behaftet ist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Schweizer Untergrund noch nicht systematisch erkundet wurde und daher nicht klar ist, wie hoch das erschliessbare Speichervolumen effektiv ist[21].

Hier nicht eingerechnet sind Emissionen aus dem Flugverkehr, die 2019 5.7 $MtCO_2$[22] betrugen. Diese sind mithilfe von nicht-fossilen synthetische Treibstoffe zu vermeiden und/oder durch weitere negative Emissionen zu kompensieren. Bei der Herstellung von synthetischen Treibstoffen kommt der Abscheidung von biogenem oder atmosphärischem CO_2 eine wichtige Rolle zu.

[20] Energieperspektiven 2050+ (admin.ch)

[21] Motion 20.4063 Schluss mit der Blackbox. Klimaschutz, Energiesicherheit und Infrastrukturnutzung dank Erforschung des Untergrunds

[22] Treibhausgasemissionen aus dem Flugverkehr (admin.ch)

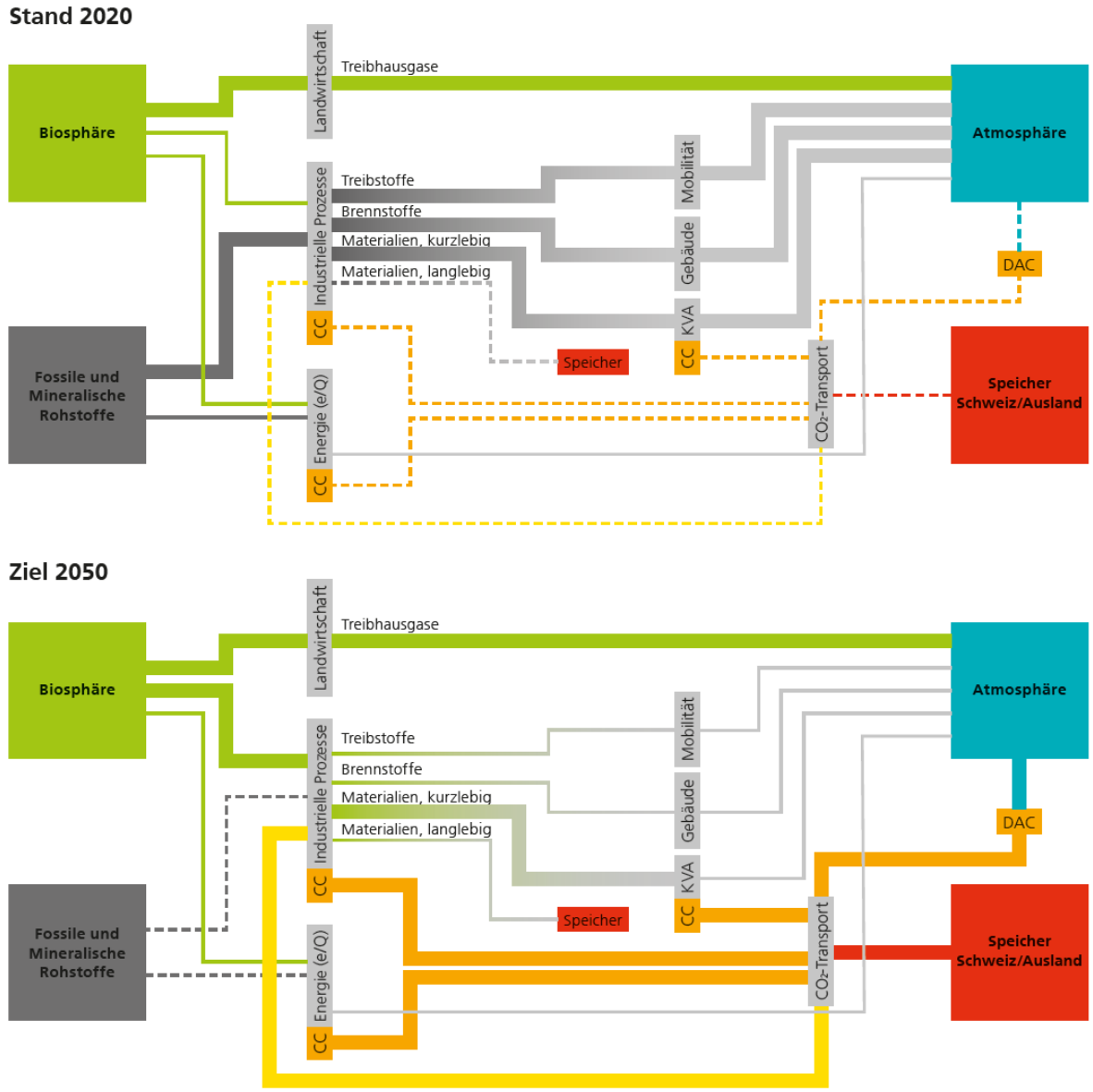


Abbildung 3: Konzeptuelle Darstellung der Kohlenstoffflüsse heute (Stand 2020) und 2050. Die Linien sind nicht entsprechend der Kohlenstoffmenge dargestellt. Dicke Linien: dominante Kohlenstoffflüsse, dünne Linien: geringere Kohlenstoffflüsse, dünne gestrichelte Linien: untergeordnete oder angedachte Kohlenstoffflüsse.

3. CCUS und NET: Bestehende Lösungen und Innovationspotential

Im Folgenden werden die verschiedenen technologischen Komponenten von CCUS und NET beschrieben, bezüglich des Entwicklungsstands eingeordnet und die Themen, die das BFE fördert, umrissen. **Dabei ist festzuhalten, dass das BFE Forschung und Innovation im Bereich CCUS/NET fördert, weil viele technologische Komponenten der CCUS und NET Prozessketten einen klaren Energiebezug haben:** Einerseits erfordert die gesamte Prozesskette der CO_2-Abscheidung, Transport und Einlagerung Energie, was sich massgeblich auf die Ökobilanz und die Kosten der jeweiligen Ansätze auswirkt. Der Ausbau der CCUS Infrastruktur muss dabei effizient in das Energiesystem der Schweiz integriert werden. Andererseits fallen ein grosser Teil der CO_2-Emissionen bei der Energieproduktion an und müssen dort so weit wie möglich vermieden werden. Zudem ergeben sich beim Einsatz von CCUS und NET regulatorische und gesellschaftliche Fragen, die energiepolitisch relevant sind.

CO_2-Abscheidung bei Punktquellen

Ein weit entwickeltes CO_2-Abscheidungsverfahren, bei welchem aus dem Abgasstrom einer Verbrennung das CO_2 abgetrennt wird ist **Post-Combustion Capture (PCC).** Beim verbreitetsten PCC-Verfahren – der **Amin-Wäsche** – wird das gekühlte Abgas in einer Absorber-Anlage in einen Gegenstrom aus Aminen geleitet, welche das CO_2 absorbieren. Das CO_2 wird von den CO_2-angereicherten Amine im Desorber unter hohen Temperaturen abgegeben. Dies wird bereits bei verschiedenen Punktquellen (z.B. Erdgas-Aufbereitung, Ammoniak-Herstellung, Kohle-Kraftwerken, Wasserstoffproduktion aus Erdgas) kommerziell eingesetzt. Neben der Amin-Wäsche werden weitere **chemische oder physikalische Absorptionsverfahren** entwickelt, welche auf anderen Lösungsmitteln-Zusammensetzungen oder auf mehrphasigen Absorptionsverfahren basieren (z.B. flüssig-fest, flüssig-flüssig, ionische Lösungen). Eine weitere Gruppe von CO_2-Abscheidungsverfahren nutzt die **Adsorption mithilfe von porösen Feststoffen** (Zeolithen, Metallorganischen Frameworks, Carbonaceous Materials, usw.). Dabei wird angenommen, dass diese Abscheidung ökologischer ist als bei lösungsbasierten Ansätzen und dass sie flexibler an sehr unterschiedliche Temperatur- und Druckbedingungen, sowie Gaszusammensetzungen angepasst werden kann. Generell liegt der Vorteil von PCC darin, dass damit bestehende Anlagen leicht nachgerüstet werden können (z.B. KVAs, Heizkessel bei Zement- oder Stahlwerken). Daher kommt sie auch zum Einsatz, wenn andere Abscheidungsmethoden (Oxyfuel oder Pre-combustion) nicht infrage kommen.

Beim **Oxyfuel Combustion (OC) Verfahren** wird vor der Verbrennung der Sauerstoff von der zugeführten Luft in einer Luftzerlegungsanlage getrennt, so dass die Verbrennung praktisch ohne Stickstoff stattfindet. Es entstehen CO_2 und Wasserdampf, so dass das CO_2 durch Einleiten in ein Wasserbad abschieden werden kann. Der Nachteil von OC liegt jedoch darin, dass das Verfahren bei bestehenden Anlagen nicht einfach nachgerüstet werden kann. Der Vorteil wird neben den sehr hohen erreichten CO_2-Konzentrationen (>99%) darin gesehen, dass der Energiebedarf (und evtl. die Kosten) für die Abscheidung bedeutend geringer ist als z.B. beim PCC. Auch wenn das Verfahren teils noch in Pilotanlagen getestet wird, gehen die EP2050+ davon aus, dass es dereinst bei der Zement-, Stahl- und Chemieindustrie sowie bei Biomassekraftwerken zur Anwendung kommen wird.

Beim **Pre-Combustion Capture (PreCC)** Verfahren werden ähnlich wie bei OC nicht einfach die Abgasströme der Verbrennung zerlegt, sondern aus der Luft Sauerstoff abgetrennt. In einer Sauerstoff- und Wasserdampf-Atmosphäre wird Kohlenstoff (z.B. aus Kohle oder Biomasse) zu Synthesegas («Syngas», ein Gemisch aus CO und H_2) umgewandelt, welches in der Wasser-Gas-Shift Reaktion zu H_2 und CO_2 umgesetzt wird, wobei dann das CO_2 ähnlich wie bei PCC abgeschieden wird. Der Wasserstoff kann dann z.B. in der chemischen Produktion eingesetzt werden. Das Verfahren ist effizienter als die beiden zuvor

genannten Verfahren, muss jedoch (wie bei OC) in den Verbrennungsprozess integriert werden und daher im Anlagedesign mitbedacht werden. Bestehende Anlagen sind schwierig umzurüsten und das Verfahren ist nur für bestimmte Prozesse geeignet. Das Verfahren ist bei Erdgas-Anwendungen bereits kommerziell, bei anderen Anwendungen noch in Entwicklung.

Zusätzlich zu den obigen Verfahren sind weitere innovative Verfahren in Entwicklung: Calcium-Looping, bei welchem vor allem Potential bei der Zementproduktion gesehen wird; membran-basierte Verfahren als Bestandteil von Pre- und Post-Combustion; Verwendung von ionischen Flüssigkeiten, usw.

Tabelle 2: Technologiereifegrad (TRL) der verschiedenen Ansätze zur CO_2-Abscheidung bei Punktquellen gemäss Bui et al (2018)[23] und oder IEA Energy Technology Perspectives[24]

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Post-Combustion Capture											
Amin-Wäsche											
Absorption, mehrphasige Lösungsmittel											
Adsorption an porösen Feststoffen											
Absorption, ionische Lösungen											
Oxyfuel-Verfahren											
Bei Kohlekraftwerken											
Bei Zementwerken											
Bei Gaskraftwerken											
Pre-Combustion											
Bei Erdgasanwendungen											
Bei Stromproduktion											
Calcium Looping											
Membran-Verfahren (bei Erdgasanw.)											

Themen die durch das BFE gefördert werden

Gemäss Zielsetzungen in Tabelle 1, steht für das BFE die Abscheidung bei Kehrrichtverbrennungsanlagen (Waste-to-Energy), in der Zement- und Chemieindustrie im Vordergrund, da diese die mengenmässig relevantesten Emittenten darstellen. Ferner ist die direkte Abscheidung aus der Luft (DACC) und aus Bioenergie-Anlagen (BECC, Strom- und Wärmebereitstellung aus Bioenergie) von besonderem Interesse, da damit die für die Schweiz notwendigen negativen Emissionen von 7 $MtCO_2$ im In- und Ausland generiert werden können (vgl. auch unten zu NET). Damit die Abscheidung auf das erforderliche Level hochskaliert werden kann, müssen die Verfahren bezüglich Kosten pro Tonne CO_2 soweit optimiert werden bis sie in einem zukünftigen CO_2-Markt wettbewerbsfähig sind.

Von Interesse sind daher innovative Abscheidungsverfahren (neue Materialen, alternative Absorptions- und Desorptions-Ansätze Prozessintegration, usw.), welche eine Optimierung der Energieeffizienz, Abscheidungsrate (idealerweise >95%), Selektivität verschiedener Gaskomponenten, Toleranz auf Unreinheiten, Umweltbelastung usw. sowie die Senkung der CAPEX und OPEX zur Folge haben. Ausserdem muss die Integration der CO_2-Abscheidung in bestehende Prozesse in Bezug auf Flexibilität, Dimensionen, Modularisierungsgrad, Einbindung in Stoffkreisläufe und das Energiesystem (inklusive der Nachnutzung der Energie in Kaskaden) weiter optimiert werden.

[23] Bui et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062-1176.

[24] IEA Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. IEA erweitert die TRL Skala bis 11 um den Marktübertritt besser abzubilden

Verwendung von CO_2

Abgeschiedenes CO_2 könnte in vielfältiger Weise weiterverwendet werden, wobei je nach Langlebigkeit der so entstandenen Produkte das CO_2 als permanent gespeichert oder temporär gespeichert betrachtet werden kann und entsprechend unterschiedliche Klimawirkungen haben. Ein Beispiel für letzteres ist die Verwendung von CO_2 für die Produktion **synthetischer Treibstoffe** oder als **Ausgangsstoff für Chemikalien** (z.B. Lösungsmittel, usw.). Während die temporäre Speicherdauer bei synthetischen Treibstoffen Monate bis Jahre beträgt, ist sie z.B. für Polymere oder Gebäudeisolationsmaterial in der Regel etwas länger. Die temporäre Speicherung in Produkten trägt also eher zur CO_2-Reduktion und Defossilisierung der Chemieindustrie oder der Treibstoffe bei, entziehet dem Kohlenstoff-Kreislauf aber kein CO_2. Es ist davon auszugehen, dass CO_2-basierte Treibstoffe im Energiesektor eine wichtige Rolle spielen werden (Power-to-X, vgl. Abbildung 1), da so Energie chemisch gespeichert und die Flexibilität der Elektrizitätsproduktion unterstützt werden kann. Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste ist der Energiebedarf solcher Produktionspfade jedoch enorm.

Weitere mögliche temporäre bis permanente[25] CO_2-Senken sind **Baumaterialen, wie z.B. Recyclingbeton,** wodurch langfristige Speicherung erreicht werden kann. Dabei wird aufbereiteter Recycling-Beton einer CO_2-Atmosphäre ausgesetzt, um die Karbonatisierung zu beschleunigen (auch Active Carbon Curing genannt) und dann wieder der Betonmischung beigefügt. Diese Verfahren werden hierzulande bereits kommerziell genutzt.

Verwendung von CO_2 findet sich auch in der Erdölindustrie beim sogenannten **Enhanced Oil Recovery**. Dabei wird CO_2 in Ölreservoire injiziert, was die Produktionsraten erhöht. Das Verfahren kann so optimiert werden, dass so viel CO_2 wie möglich im Untergrund verbleibt und – je nach Bedingungen – sogar netto CO_2 gespeichert wird, obwohl durch die Verwendung des produzierten Erdöls letztendlich weiteres CO_2 in die Atmosphäre gelangt[26]. Die Methode hat jedoch für die Schweiz wenig direkte Relevanz, zeigt aber auf, dass CO_2-Injektion in den Untergrund bereits in der Praxis bewährt ist.

Tabelle 3: Technologiereifegrad (TRL) der verschiedenen Ansätze zur CO_2-Verwendung gemäss Bui et al (2018)[26] und oder IEA Energy Technology Perspectives[27]. Die breite Spannweite von TRL bei synthetischen Treibstoffen und Chemieindustrie liegt daran, dass hier eine Vielzahl an Stoffen gemeint sind, für die die Entwicklungsstufen unterschiedlich sind.

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Synthetisch Treibstoffe											
Verwendung in Chemieindustrie											
Recyclingbeton											
Enhanced Oil Recovery											

[25] Es gibt keine einheitliche Definition wann CO_2 als permanent gespeichert gilt. Wir verwenden hier grob «permanent», wenn CO_2 100 - 1000 Jahre aus dem Kohlenstoff-Kreislauf entzogen wird.

[26] Bui et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062-1176.

[27] IEA Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. IEA erweitert die TRL Skala bis 11 um den Marktübertritt besser abzubilden

Themen die durch das BFE gefördert werden

Da die Verbleibzeit des CO_2 in verschiedenen Verwendungspfade schwierig abzuschätzen ist und die entsprechenden Ökobilanzen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind, bleibt momentan unklar, was deren Rolle in zukünftigen Energiesystemen sein wird (vgl. Perspektiven in Tabelle 1), zumal das Potenzial der einzelnen Verwendungspfade nicht abschliessend geklärt ist. Zentral ist dabei jedoch, dass gerade temporäre Speicheransätze (insbesondere synthetische Treibstoffe) dem Netto-Null Ziel nur dienen, wenn die CO_2-Quellen biogen oder atmosphärisch sind. Nichtsdestotrotz sind innovative Ansätze zur Nutzung von CO_2 insbesondere in langlebigen Produkten (z.B. Baumaterialien) von Interesse.

- Innovative CCU Verfahren zur energieeffizienten Herstellung von Materialien und Produkten in der Kreislaufwirtschaft.
- Kritische Bewertung solcher Produkte hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften und ihrer Nachhaltigkeit in Cradle-to-Cradle Perspektive
- Ansätze zur Integration von CCU Konzepten in nachhaltige Wertschöpfungsketten der chemischen Produktion.
- Innovative CCU Methoden zur Herstellung von synthetischen Treibstoffen
- Bewertung solcher Treibstoffe hinsichtlich ihrer Anwendungseigenschaften und ihrer Nachhaltigkeit in Well-to-Wheel Perspektive

CO_2-Transport

Eine zentrale Komponente des CCUS Prozesskette ist der Transport vom Abscheidungs- zum Verwendungs- oder Speicherort. Während für geringe Mengen und kurze Distanzen Transport per Lastwagen und Bahn möglich ist[28], ist es zu erwarten, dass der Transport langfristig bei vollem Ausbau der CO_2 Abscheidung grösstenteils über Pipelines und über sehr grosse Distanzen per Schiff geschehen wird. Bei Transport per Pipeline und Schiff wird das CO_2 komprimiert damit es in superkritischem oder flüssigem Zustand vorliegt. Bei Pipelines hängt der Komprimierungsvorgang von der Fliessrate und dem Druckverlust entlang der Pipeline ab. Da die für die Komprimierung relevanten hydrodynamischen und thermophysikalischen Eigenschaften von der genauen Zusammensetzung (d.h. Verunreinigungen) des CO_2-Stroms abhängen, muss diese für kosteneffizientes Design des Pipelinesystem mitbedacht werden. Gleichzeitig erfordern die Spezifikationen der Pipelines (etwa bez. Reinheit), dass an der Übergabeinfrastruktur unterschiedliche CO_2-Ströme homogenisiert werden. Die Technologie und entsprechende Normen ist insgesamt weit entwickelt, da Pipelinetransport beim Enhanced Oil Recovery bereits Standard ist und auch bei dezidierten Speicherprojekten bereits zur Anwendung kommt (vgl. Alberta Carbon Trunk Line [29,30]).

Es wird erwartet, dass ein Teil des in der Schweiz abgeschiedenen CO_2 ins Ausland transportiert werden muss (z.B. 4 $MtCO_2$ von insgesamt 7 MtCO2 laut EP2050+). Die Studie CO2NET[31] zeigt in einer groben Designstudie und Kostenschätzung auf, wie CO_2-Emittenten mit zwei Pipelinesträngen (eine in der West- und eine in der Ostschweiz) mit einander verbunden und an zukünftige Pipelines in Nachbarländern angeschlossen werden könnten.

[28] DemoUpCarma | Homepage (ethz.ch)

[29] Alberta Carbon Trunk Line - Alberta Major Projects

[30] Environmental Assessment - Shell Canada Limited Quest Carbon Capture & Storage Project - Environmental Impact Assessment (EIA) and application for approval - Open Government (alberta.ca)

[31] CO2NET Grobes Design und Kostenschätzung für ein CO2 Sammel-Netzwerk in der Schweiz - Texte (admin.ch)

Tabelle 4: Technologiereifegrad (TRL) der verschiedenen CO_2-Transportmöglichkeiten gemäss Bui et al (2018)[32] und oder IEA Energy Technology Perspectives[33]

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pipeline											
Schiffstransport, Hafen zu Hafen											
Schiffstransport zu Offshore-Plattformen											
Bahntransport											
Lastwagentransport											

Themen die durch das BFE gefördert werden

Beim Transport (insbesondere mit Pipelines) gibt es also wenige technische offene Fragen die in der Forschung zu klären sind. Im Vordergrund stehen daher Fragestellungen, wie ein Transportsystem in der Schweiz sinnvoll umzusetzen und zu regulieren ist. Zukünftige Studien müssen zeigen, wie verschiedene Akteure sich in Cluster organisieren können um gemeinsam genutzte Transportinfrastruktur (Lastwagen, Bahn oder Pipeline) CO_2 Hubs und Injektions-Plattformen aufzubauen. Ferner müssen die technischen Anforderungen von CO_2-Pipelines in der Schweiz (z.B. Anpassung von internationalen Standards auf die Schweiz) insbesondere im Zusammenhang mit der Zusammensetzung des CO_2-Stroms (Wassergehalt, Unreinheiten, usw.) oder variablen CO_2-Fliessraten beleuchtet werden. Steigerung der Effizienz bei der Beladung und Entladung, sowie bei der Zwischenlagerung wirkt sich entscheidend auf die Transportkosten aus.

CO_2-Speicherung im geologischen Untergrund

Um CO_2 im Untergrund permanent zu speichern, muss das CO_2 über Bohrungen in geologische Gesteinsformationen injiziert werden. Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Arten CO_2 im Untergrund zu speichern: **in salinen Aquiferen, in erschöpfte Gasreservoire oder in porösem mafischen Gesteinen (z.B. Basalt)**. Bei salinen Aquiferen oder erschöpften Gasreservoire wird das gasförmige CO_2 vor der Injektion komprimiert um seine Dichte zu erhöhen. Die Injektion muss daher in mindestens ~800 m stattfinden damit das CO_2 nicht gasförmig wird. Typischerweise liegt das CO_2 dann im superkritischen Zustand vor (d.h. Dichte einer Flüssigkeit, Viskosität eines Gases). Bei diesen sogenannten konventionellen Speichern müssen die porösen Speicherformationen gegen oben durch eine impermeable Deckengesteinsschicht («Cap Rock», undurchlässige Gesteinsschicht, wie etwa Ton) begrenzt sein, welche verhindert, dass das CO_2 nach oben entweicht. Neben dieser geologischen Barriere sorgen verschiedene Mechanismen dafür, dass das CO_2 permanent im Gestein verbleibt: durch Auflösung im Porenwasser, durch Zurückhalten im Porenraum durch Kapillarkräfte («Residual Trapping») und durch Reagieren mit dem Wirtsgestein gefolgt von Ausfällung von Karbonatmineralien.

Erschöpfte Gasreservoire werden bezüglich CO_2-Austritte als interessant angesehen, weil diese Reservoire ja erwiesenermassen bereits über Millionen Jahre Gas beherbergen konnten, ohne dass ein beachtlicher Teil entwichen wäre. Jedoch besteht bei diesen Reservoiren die Gefahr, dass Leckagen in verfüllten Förderbohrungen entstehen können.

Dank jahrzehntelanger Erfahrung durch «Enhanced Oil Recovery»-Projekte und inzwischen auch reinen Speicherprojekten sind die Prozesse relativ gut verstanden und können situativ optimiert werden. Aktuell gibt es mehr als 29 kommerzielle CCS Projekte bei denen CO_2 entweder gespeichert oder für EOR benutzt

[32] Bui et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062-1176.

[33] IEA Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. IEA erweitert die TRL Skala bis 11 um den Marktübertritt besser abzubilden

wird (Stand 2022[34]). Das petrophysikalische Verhalten von CO_2 in salinen Aquiferen (Fliessverhalten, Kapillarkräfte, Speichermechanismen, etc.) ist dank grosser Fortschritte in den letzten Jahren weitgehend verstanden. Sind im Porenraum zusätzlich Kohlenwasserstoffe vorhanden, verändern sich die Speichereigenschaften jedoch signifikant, z.B. ist das Speichern durch Kapillarkräfte dann weniger ausgeprägt. Zusammen mit der inhärenten Heterogenität der Formationen führt dies zu Diskrepanzen zwischen vorhergesagter und tatsächlicher Ausbreitung des CO_2.

Bei der Speicherung von CO_2 in porösem Basalt (dritte Speichervariante) wird das CO_2 zuerst in Wasser gelöst wird. In den Poren des Basalts reagiert es in relativer kurzer Zeit (weniger als 1-2 Jahre) mit den Mineralien des Basalts und wird beinahe vollständig in Karbonatmineralien umgewandelt. Erste kommerzielle Projekte werden bereits betrieben (z.B. in Island). Aufgrund des beachtlichen globalen Vorkommens von Basalt (vgl. Trapp-Basalte in Indien u.a.) wird das Speicherpotential dieser Methode hoch, wenn auch noch als sehr unsicher, eingeschätzt. Generell besteht der Nachteil, dass das CO_2 in Süsswasser gelöst wird und der Wasserbedarf beträchtlich ist, weshalb auch die Verwendung von Salzwasser in Betracht gezogen wird. Ein Verständnis der Kinetik der Karbonatisierung in Basalt und wie diese beeinflusst werden kann, könnte helfen den Prozess zu optimieren.

Tabelle 5 Technologiereifegrad (TRL) der verschiedenen CO_2-Speichermöglichkeiten gemäss Bui et al (2018)[35] und oder IEA Energy Technology Perspectives[36]

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Saline Aquifere											
Erschöpfte Gasspeicher											
Karbonatisierung in porösem Basalt											

Themen die durch das BFE gefördert werden

Für die Schweiz ist vor allem die Speicherung in salinen Aquiferen von Interesse, das es in der Schweiz kaum erschöpfte Gasreservoire gibt und mögliche Speichergelegenheiten in Basalt im Moment unklar sind. Bei salinen Aquiferen kann man sich bereits auf bestehende Praxis im Ausland stützen. Für die CO_2-Speicherung in der Schweiz besteht jedoch die Hürde, dass der Schweizer Untergrund nicht überall systematisch erkundet ist (vgl. Motion 20.4063[37]). Im Rahmen der Beantwortung dieser Motion wird ein koordiniertes nationales Erkundungsprogramm entwickelt, welches auf sich weitgehend kommerziell erhältlichen Methoden stützt.

Forschung- und Innovationsbemühungen können aber dieses Vorhaben massgeblich unterstützen, insbesondere, wenn diese in Zusammenhang mit CO_2-Injektions-Pilotprojekten durchgeführt werden.

- Innovative und effiziente Prospektionsmethoden zur Auffindung von Speicherresourcen, zur Abschätzung des Speichervolumens, zur Charakterisierung der Eigenschaften der Speicherformation und zur effektiven Standortauswahl.
- Methoden zur optimalen Erschliessung von Speicherformationen inklusive Entwicklungen im Bereich Bohrverfahren, Verrohrung und Anbindung an die geologische Formation inklusive Methodik der sicheren Verfüllung/Verschliessung der Bohrungen.

[34] Home - Global CCS Institute

[35] Bui et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062-1176.

[36] IEA Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. IEA erweitert die TRL Skala bis 11 um den Marktübertritt besser abzubilden

[37] Motion 20.4062: Schluss mit der Blackbox. Klimaschutz, Energiesicherheit und Infrastrukturnutzung dank Erforschung des Untergrunds

- Charakterisierung von möglichen Speichergesteinen und Deckformationen des Schweizer Untergrundes hinsichtlich der kurz- und langfristigen chemischen, thermischen, hydraulischen und mechanischen Antwort auf die CO_2-Injektion, inkl. Verbesserung des Verständnisses der Kinematik der verschiedenen Speichermechanismen
- Verbesserung von Modellieransätzen für die Vorhersagen und Optimierung des Verhaltens des Speicherreservoirs und der darüber liegenden Deckgesteine.
- Forschung zu Sicherheitsaspekten von CO_2 Speicherung: Umwelteinflüsse, induzierte Seismizität, operationelle Risiken. Ansätze zur Minderung von Risiken und Behebung von technischen Problemen (z.B. Leckagen entlang Bohrungen oder durch Deckgebirge).
- Entwicklung von Messmethoden und Überwachungskonzepten zur Permanenz des CO_2 im Speicher (auch nach dem Speicherbetrieb) und der Betriebssicherheit.
- Methoden für das Monitoring, Verifikation und Berichterstattung zur Quantifizierung der CO_2-Vermeidung oder –Entfernung.

Negative Emissions-Technologien

Um negative Emissionen zu generieren werden sogenannte naturbasierte und technologische Ansätze verfolgt. Zu den **naturbasierten NET-Ansätzen** gehören z.B. Auf- und Wiederaufforstung, beschleunigte Verwitterung, Ozeandüngung, Bodenmanagement inkl. Einsatz von Pflanzenkohle. Bei den **technologischen NET-Ansätzen** kommen die bisher erwähnten CCUS-Technologiegruppen zur Anwendung. Dabei wird CO_2 entweder direkt aus der Luft (Direct Air Capture), aus den Abgasen einer Bioenergie-Anlage oder bei der Herstellung von Pflanzenkohle durch Pyrolyse abgeschieden. Bei letzteren beiden Ansätzen wird das CO_2 über den indirekten Weg durch die Biomasse auch der Atmosphäre entzogen. Wird das abgeschiedene CO_2 in langlebigen Produkten gespeichert (DACCUS/BECCUS/PyCCUS) oder im geologischen Untergrund eingelagert (DACCS/BECCS/PyCCS), werden negative Emissionen generiert. Bei der Einlagerung der Pflanzenkohle in den Boden entstehen dadurch ebenfalls negative Emissionen.

Insbesondere bei diesen technologischen Ansätzen sind Energienutzung, Energieeffizienz und die nachhaltigen Potenziale (z.B. Verfügbarkeit der Biomasse) zentrale Themen. Diese sind für das BFE von besonderem Interesse und werden im Folgenden kurz beschrieben.

CO_2 Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture)

Bei der CO_2-Abscheidung direkt aus der Luft (DAC) kommen wie bei Abscheidung an Punktquellen absorptions- oder adsorptionsbasierte Verfahren zur Anwendung, wobei die Luft mit Ventilatoren dem Sorptionsmittel zugeführt werden muss. Aufgrund der geringen CO_2-Konzentrationen der Luft (420 ppm, d.h. bis zu 100-300-mal tiefer als in Abgasströmen bei Kohle- oder Gasverbrennungen) ist die erforderliche Energie beachtlich (etwa 3-mal so hoch wie bei Punktquellen). Um die effektiv entzogene CO_2-Menge aus der Luft zu maximieren, muss die Energiequelle so wenig CO_2-intensiv wie möglich sein. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die witterungsbedingte Variabilität der Lufteigenschaften eine bedeutende Rolle bei der Abscheidungseffizienz spielt. Der hohe Energieaufwand führt unter anderem dazu, dass die Kosten pro Tonne vermiedenes CO_2 bedeutend höher sind (600 – 1000 CHF je nach Schätzung, vgl. EP2050+) als bei der Abscheidung an Punktquellen (100 – 200 CHF). Da beachtliche Mengen Luft umgewälzt werden müssen (ca. 1.8 Mio. m^3 für 1 tCO_2) brauchen die Anlagen in der Regel viel Platz. Weiterhin dürften der Wasserbedarf und die Umwelteinflüsse der Abscheidematerialen die Ökobilanz der DACC Methoden beeinflussen.

Bioenergie mit CCS (BECCS)

Die CO_2-Emissionen, die bei der Energieerzeugung aus Biomasse entstehen, können mit den oben beschriebenen Abscheidetechnologien für Punktquellen abgefangen werden und im Untergrund oder langlebigen Materialien gespeichert werden. Eine wichtige Rolle für die Schweiz spielt der Bereich Waste-to-Energy, also die Strom- und Wärmeproduktion aus Kehrrichtverbrennungsanlagen (KVA). Da ein bedeutender Anteil (ca. 50%) des Abfalls biogenen Ursprungs ist, generiert die Abscheidung des biogenen Anteils negative CO_2-Emissionen. Ähnliches gilt für Zementwerke, wenn dort biogene Abfälle als alternativer Brennstoff eingesetzt werden. BECCS bei KVAs, Zementwerken und verschiedene Arten von Biomassekraftwerken sind daher von grosser Bedeutung für der Erreichung der Netto-Null Ziele der Schweiz (vgl. Tabelle 1 und EP2050+[38]). Weltweit gilt BECCS als der am weitesten entwickelte NET Ansatz.

Pyrolyse mit CCS / Pflanzenkohle

Die **Pyrolyse** ist eine sauerstoffarme Verbrennung von Biomasse bei hohen Temperaturen (>300°C) bei der sogenannten Pflanzenkohle und weitere Pyrolyseprodukte wie Gas und Öle entstehen. Die Pflanzenkohle besitzt einen hohen Kohlenstoffanteil und kann auf landwirtschaftlichen Böden ausgebracht werden. Die Pflanzenkohle verbleibt dabei sehr lange im Boden, wodurch negative Emissionen generiert werden[39]. Ob so gleichzeitig auch die Bodenqualität (z.B. Wasseraufnahmefähigkeit, Reduktion von N_2O Emissionen, usw.) verbessert wird, ist zurzeit umstritten. Die Öle und das Gas können ebenfalls weiterverwendet werden, etwa energetisch für die Pyrolyse selbst. Werden die CO_2-Emissionen aus dieser nachgelagerten Verbrennung ebenfalls abgeschieden, können zusätzlich zum Einbringen der Pflanzenkohle in den Boden weitere negative Emissionen generiert werden. Pyrolyse ist in der Schweiz bereits in Anwendung.

Tabelle 6: Technologiereifegrad (TRL) einiger technologie-basierten NET-Ansätzen gemäss Bui et al (2018)[40] und oder IEA Energy Technology Perspectives[41]

TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Direct Air Capture											
BECCS											
Stromproduktion											
Ethanolproduktion											
Methanproduktion											
Mit Lignozellulose											
PyCCS											

Themen die durch das BFE gefördert werden

In Bezug auf Negative Emissionstechnologien fokussiert das BFE auf technologische Ansätze (BECCS, DACCS und PyCCS), da dabei ein starker Bezug zu Energiethemen besteht. Themen zu naturbasierten Ansätzen werden ebenfalls punktuell gefördert, wobei diese vor allem unterstützt werden, wenn ein Bezug zu einer energischen Fragestellung oder eine Überlappung mit den BFE-Kompetenzen vorhanden ist.

In Bezug auf DACCS und BECCS sind die oben erwähnten Forschungsthemen zu CCS ebenfalls relevant. Bei BECCS und PyCCS stehen zusätzlich Themen, die sich auf die Verfügbarkeit und Nutzung der Biomasse beziehen, im Vordergrund. Dies sind z.B. die Verwendung alternativer nachhaltiger Biomassen, welche

[38] Energieperspektiven 2050+

[39] Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Bericht des Bundesrats (admin.ch)

[40] Bui et al. "Carbon capture and storage (CCS): the way forward." Energy & Environmental Science 11.5 (2018): 1062-1176.

[41] IEA Energy Technology Perspectives 2020 – Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage. IEA erweitert die TRL Skala bis 11 um den Marktübertritt besser abzubilden

bislang kaum genutzt werden oder ein Abfallprodukt darstellen (Erweiterung des Substratspektrums und Kaskadennutzung). Dabei sind auch Verbesserungen in den Vorbehandlungsmethoden (Verdichtung, Pelletisierung, usw.) der Biomasse anzustreben um z.B. die Transporteffizienz zu steigern. Die Prozesse sind ausserdem hinsichtlich des Umgangs mit Feuchtigkeit und Unreinheiten zu optimieren. Bei der Herstellung von Pflanzenkohle sind ausserdem Prozessoptimierung, Verbesserung der Pflanzenkohlequalität, sowie anwendungsrelevante Aspekte (Ausbringung, Markt) von Interesse. Wichtig sind BECCS und PyCCS Pfade, die bezüglich des Wasserverbrauchs, CO_2-Ausstosses, Energiebedarfs und der Landnutzung optimiert sind. Generell bestehen bei BECCS and PyCCS noch grosse Unsicherheiten bezüglich des Potenzials für die Schweiz.

Übergeordnete Themen die durch das BFE gefördert werden

Bei allen CCUS/NET sind Studien zur Ökobilanz der gesamten Prozesskette oder von Teilprozessketten von besonderem Interesse. Dies damit gewährleisten werden kann, dass tatsächlich zu einer Emissionsminderung oder negative Emissionen generiert werden und dass diese akkurat quantifiziert werden können. Besonders herausfordernd ist dies unter anderem für Bioenergie-Ansätze, da der Effekt der Biomasse-Produktion schwierig einzurechnen ist, ferner für CO_2-Verwendungspfade, da durch temporäre Entnahme des CO_2 der Zeitfaktor der Speicherung angemessen abzubilden ist. Diese Herausforderungen führen dazu, dass die Klimawirksamkeit einiger CCUS/NET-Pfade schwierig einzuschätzen ist (und dadurch möglichweise nicht angemessen in Prognosen berücksichtig werden). Methodische Weiterentwicklung und Anwendung von Ökobilanzierung ist daher von Interesse.

Sowohl bei CCUS als auch bei NET ist die Überwachung, Berichterstattung und Verifikation (Monitoring, Reporting and Verification MRV) NET wichtig, um eine wahrheitsgetreue Einschätzung der Emissions-Vermeidung oder der negativen Emissionen und eine damit verbundene Zertifizierung zu gewährleisten.

Gleichzeitig sind auch techno-ökonomische Analysen und deren Entwicklungen hin zu adäquater Repräsentation von CCUS und NET in Integrated Assessment Models wichtig, damit deren Wert im Schweizer (und globalen) Energiesystem und als klimawirksame Massnahmen abgeschätzt werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch Ansätze zur Bildung von Industrieclustern welche Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs, zur Nutzung gemeinsamer Infrastruktur und des geteilten Risikos bieten notwendig um die Kosten der CCUS und NET Prozessketten zu optimieren.

Für die gesamte Prozesskette sind Studien zu energiepolitisch relevanten geistes- und sozialwissenschaftlichen Fragestellungen von Interesse. Dazu zählen Analysen zur Entwicklung von regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen, um eine energie- und kosteneffiziente Integration von CCUS und NET in das Energiesystem der Schweiz zu ermöglichen. Ebenfalls bedeutsam sind Analysen zu Präferenzen der Akteure und zur gesellschaftlichen Akzeptanz von CCUS und NET, zu raumplanerischen Aspekten, sowie zu Gesundheits- Sicherheits- und Umweltaspekten. Schliesslich interessieren Studien zur Optimierung der Rahmenbedingungen für Investitionen in Infrastruktur im Bereich CCUS und NET.

4. Die BFE Förderprogramme

Beim BFE stehen zur Förderung von CCUS/NET mehrere thematische Forschungs- und Entwicklungsprogramme (F+E)[42], das Pilot und Demonstration (P+D) Programm[43], sowie das Programm SWEET zur Verfügung. Während bei den F+E[44] und P+D Programmen Förderbeiträge je nach Programm entweder durch Ausschreibungen (Top-Down) oder in einem Bottom-Up Prinzip qualitätsgesteuert und im Hinblick auf verfügbare Mittel vergeben werden, arbeitet das Programm SWEET ausschliesslich mit thematischen Ausschreibungen (Top-Down).

Aktuell existiert kein dezidiertes F+E Programm für CCUS/NET, die F+E Projekte mit TRL1-4 werden jedoch vorwiegend mit folgenden Programmen gefördert:

- **Industrielle Prozesse[45]**, für Themen im Bereich der CO_2-Abscheidung, des CO_2-Transports und der CO_2-Nutzung (Kontakt: elena-lavinia.niederhaeuser@bfe.admin.ch)
- **Bioenergie[46]**, für Biomasse-basierte NET Projekte (Kontakt: vanessa.burg@bfe.admin.ch)
- **Geoenergie[47]**, für Themen der CO_2-Speicherung (Kontakt: florence.begue@bfe.admin.ch)
- **Energie-Wirtschaft-Gesellschaft[48]**, für sozioökonomische Themen (Kontakt: anne-kathrin.faust@bfe.admin.ch)

Jedoch leisten auch weitere Forschungsprogramme Beiträge zu CCUS/NET-verwandten Themen (z.B. Gebäude und Städte, Wasserstoff usw).

Das P+D Programm[49] zielt auf die gesamte Breite von CCUS/NET Themen ab, wobei der TRL bei 4-9 sein muss (Kontakt: pilot-demo@bfe.admin.ch). Sowohl beim F+E Programmen wie auch für das P+D Programm empfiehlt es sich, ein Projekt zuerst als Projektskizze einzureichen. Erst nach Rücksprache mit der Programmleitung ist es sinnvoll, die umfassendere Offerte für das Forschungsvorhaben oder den Antrag für ein F+E oder P+D auszuarbeiten. Anträge sind möglichst in elektronischer Form an die zuständige Programmleitung zu richten.

Die Ausschreibung durch SWEET zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt, welche auf CCUS/NET Themen abzielt, soll im Januar 2024 eröffnet werden[50] (Kontakt: sweet@bfe.admin.ch). Gefördert werden Konsortialprojekte, die lösungsorientierte Forschung zu CCUS/NET durchführen mit dem Ziel einer Umsetzung der Resultate in die Praxis. Angestrebt wird eine Zusammenarbeit zwischen Universitäten, dem

---

[42] Forschungsprogramme (admin.ch)

[43] Pilot- und Demonstrationsprogramm (admin.ch)

[44] Vergabeverfahren für BFE-Forschungsprogramme

[45] Industrielle Prozesse (admin.ch)

[46] Bioenergie (admin.ch)

[47] Geoenergie (admin.ch)

[48] Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG) (admin.ch)

[49] Upate vom September 2026: «Information über den Entscheid des Bundesrates zu den Sparmassnahmen»
Aufgrund des Entscheids des Bundesrates über die vorgeschlagenen Massnahmen zur Entlastung der Bundesfinanzen, die unter anderem die Streichung der Unterstützung für P+D-Projekte ab 2027 vorsehen, werden ab 2027 keine Finanzbeiträge mehr für P+D-Projekte gewährt.

[50] Update September 2026: Der SWEET Call 1-2024 «Net-Zero» hat zur erfolgreichen Lancierung des ACHIEVE-Konsortiums geführt, das sich mit der Entwicklung und Umsetzung von Lösungen im Bereich CCUS/NET befasst.

ETH-Bereich, Fachhochschulen, sowie Institutionen der öffentlichen Hand (Bund, Kantone, und Gemeinden) und der Privatwirtschaft.

Die Programme des BFE reihen sich in die Schweizer Förderungslandschaft (SNF, Innosuisse, Stiftung KliK, usw) ein, welche ebenfalls CCUS/NET fördern und sich gegenseitig ergänzen sollen. Da CCUS/NET Teil der langfristigen Klimastrategie ist, werden damit einhergehende politische und regulatorische Themen federführend durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) bearbeitet. Dazu stehen dem BAFU auch Fördermittel zur Verfügung, welche neben der Ressortforschung[51], die Umwelttechnologieförderung[52], sowie den Technologiefond[53] umfassen. Insgesamt ist es wichtig zu betonen, dass die Multidisziplinarität des CCUS und NET Themen es erfordert, dass diese in enger Zusammenarbeit mit anderen betroffenen Bundesstellen (insb. BAFU, aber z.B. auch ARE bei raumplanerischen Themen) bearbeitet werden.

Das BFE beteiligt sich ausserdem an internationalen Innovations-Förderprogrammen und Gremien mit dem Ziel, Forschung und Industrie über die Landesgrenzen zu vernetzen. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die aktuellen Herausforderungen sowie die zukünftige Auslegung von CCUS/NET eine starke internationale Zusammenarbeit erfordert. Das BFE ist Partner bei den ERA-NETs ACT, der Zero-Emission Platform (ZEP), bei der Clean Energy Transition Partnership (CETP), sowie bei verschiedenen «Technology Collaboration Programmes» der Internationalen Energie Agentur (Greenhouse Gas, Bioenergy, Geoenergy, Advanced Motor Fuels,…).

[51] BAFU (2020): Forschungskonzept Umwelt 2021-2024 (Update September 2026: Forschungskonzept Umwelt 2025-2028)
[52] Umwelttechnologieförderung (admin.ch)
[53] Bürgschaften für innovative Technologien (technologiefonds.ch)