



Schlussbericht vom 29. Oktober 2018

Bau und Betrieb einer industriemassstäblichen Anlage zur CO₂-Abscheidung aus der Luft





Bau und Betrieb einer
industriemassstäblichen Anlage
zur CO₂-Abscheidung aus der Luft



CLIMEWORKS

Capturing CO₂ from air

Datum: 29. Oktober 2018

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Climeworks
Birchstrasse 155, CH-8050, Zürich
www.climeworks.com

Autoren:

Anna Ahn, ana@climeworks.com
Benjamin Keusch, bk@climeworks.com
Dominique Kronenberg, dk@climeworks.com

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung: Peter Jansohn, peter.jansohn@psi.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501196-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Das ETH Spin-off Climeworks filtert CO₂ aus der Umgebungsluft mit Hilfe der weltweit ersten kommerziellen Direct Air Capture (DAC) Technologie. Climeworks DAC Anlagen entfernen das CO₂ direkt aus der Atmosphäre, reduzieren so deren CO₂ Gehalt und bieten damit einen wesentlichen Baustein zum Erreichen der Klimaschutzziele. Im Rahmen dieses Projektes wurde die weltweit erste DAC-Anlage auf industriellem Massstab gebaut, Betriebsdaten über mehr als ein Jahr gesammelt und dadurch die Climeworks Technologie erheblich optimiert. Die Pilotanlage wurde auf dem Dach der KEZO in Hinwil, Zürich installiert und wird mit deren Prozesswärme betrieben. Das gefilterte CO₂ wird in diesem Projekt vom benachbarten Gewächshaus der Gebr. Meier Primanatura AG genutzt, die das hochreine Gas zum Düngen ihrer Kulturen einsetzt. Die CO₂ Düngung ermöglicht Gewächshausbetrieben bis zu 20% Mehrertrag auf der gleichen Anbaufläche zu erwirtschaften.

Résumé

Grâce à sa technologie de capture du CO₂, la spin-off de l'ETHZ Climeworks filtre le CO₂ de l'air ambiant. Ses installations de captage direct de l'air (DAC) éliminent le CO₂ de l'atmosphère, permettant aux clients d'inverser leurs émissions ou de réutiliser le CO₂ pour une vaste gamme d'applications. Dans le cadre de ce projet, la première installation mondiale à captage direct à l'air à échelle industrielle a été construite et des données opérationnelles ont été collectées sur plus d'un an, ce qui a permis d'améliorer considérablement la technologie de Climeworks. L'installation pilote a été installée sur le toit de l'usine d'incinération des déchets KEZO à Hinwil, Zurich, qui fournit la chaleur nécessaire au processus de captage du CO₂. Le CO₂ capté est acheminé vers la serre voisine, propriété de Gebrüder Meier Primanatura AG, où le gaz est utilisé pour la fertilisation des cultures. Ce procédé permet d'augmenter leur rendement jusqu'à 20%.

Abstract

The ETH Spin-off Climeworks captures CO₂ from air with the world's first commercial carbon dioxide removal technology. Its direct air capture (DAC) plants remove CO₂ from the atmosphere, allowing customers to reverse their emissions and realize their climate goals. Within this project the worldwide first DAC plant on an industrial scale was built and operational data collected over more than one year, resulting in the considerable improvement of the Climeworks technology. The pilot plant was installed on the roof of the KEZO waste incineration plant in Hinwil, Zurich, which provides low temperature heat for the CO₂ capture process. The air-captured CO₂ is delivered to the neighboring greenhouse, owned by the Gebrüder Meier Primanatura AG, that uses the gas for fertilization. Greenhouse fertilization with CO₂ enables an increase in crop yield by up to 20%.



Take-home messages

- Das Pilotprojekt «Bau und Betrieb einer industriemassstäblichen Anlage zur CO₂-Abscheidung aus der Luft» hat die Umsetzbarkeit der Climeworks Direct Air Capture (DAC) Technologie im industriellen Massstab demonstriert und bewiesen.
- DAC ist eine «Negative Emissions Technology» (NET), welche vom Weltklimarat IPCC als notwendige Technologie zur Erreichung der Klimaziele angesehen wird. Die Pilotanlage, die im Rahmen dieses Projekts gebaut wurde, stellt die erste DAC-Anlage auf industriellem Massstab weltweit dar und fördert so die Rolle der Schweiz als Innovationsweltmeister und wichtigen Wirtschaftsstandort.
- Zudem hat die DAC Technologie das Potenzial, positiv zur Schweizer Energiestrategie 2050 beizutragen: Insbesondere im Power-to-X Bereich kann DAC genutzt werden, um den Transportsektor mittels synthetischer Kraftstoffe nachhaltig zu transformieren. Atmosphärisches CO₂ kann auch für erneuerbare Materialien verwendet werden (z.B. für Baustoffe), welche für die nachhaltige Entwicklung der Schweizer Infrastruktur eingesetzt werden können.
- Das vorliegende Projekt ist somit eine Pionierleistung und stellt den ersten wichtigen und erfolgreichen Meilenstein zur Kommerzialisierung der Climeworks DAC Technologie dar.
- Das Projekt hat internationales Interesse geweckt. Über 1'000 nationale und internationale Medienartikel wurden im Zusammenhang mit der DAC Anlage in Hinwil veröffentlicht.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Abstract	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Ausgangslage.....	6
Über Climeworks	6
Die Climeworks Direct Air Capture Technologie.....	6
Anwendungsbereiche	7
Über das Projekt	7
2 Ziele des Projektes.....	8
3 Grundlagen – Randbedingungen.....	9
4 Konzept – Anlagenbeschrieb.....	10
5 Vorgehen – Methode	11
6 Ergebnisse.....	11
7 Kommunikation	13
8 Ausblick & weitere Schritte.....	14
9 Schlussfolgerungen.....	14
Abkürzungsverzeichnis	16



1 Ausgangslage

Über Climeworks

Das ETH Spin-off Climeworks filtert CO₂ mit Hilfe der weltweit ersten kommerziellen Direct Air Capture (DAC) Technologie aus der Umgebungsluft. Climeworks DAC Anlagen entfernen das CO₂ direkt aus der Atmosphäre, reduzieren so deren CO₂ Gehalt und bieten damit einen wesentlichen Baustein zum Erreichen der Klimaschutzziele. Das Unternehmen wurde 2009 von den beiden ETH-Doktoranden Christoph Gebald und Jan Wurzbacher gegründet.

Climeworks beschäftigt heute das weltweit grösste und erfahrenste Expertenteam im DAC Bereich, mit dem Ziel, bis zum Jahr 2025 ein Prozent der globalen CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre herauszufiltern.

Die Climeworks Direct Air Capture Technologie

Die Climeworks DAC Technologie filtert CO₂ durch einen zweistufigen zyklischen Adsorptions-Desorptions-Prozess aus der Umgebungsluft. Dieser Prozess wird in einem so genannten CO₂ Kollektor durchgeführt. Im ersten Schritt wird Umgebungsluft vom Kollektor angesaugt und das darin enthaltene CO₂ wird chemisch an den Filter gebunden (Adsorption), wobei CO₂-arme Luft wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Sobald der Filter mit CO₂ gesättigt ist, wird er im zweiten Schritt auf etwa 100°C erhitzt. Dadurch wird das CO₂ freigesetzt (Desorption) und als reines Gas gesammelt. Nach der Regeneration des Filters kann der Prozess von vorne beginnen (vgl. Abb. 1).

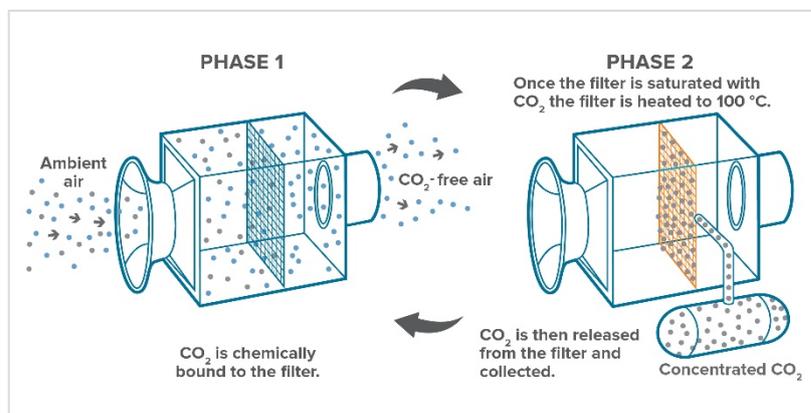


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Climeworks Technologie

Alle Climeworks Anlagen sind modular aus CO₂ Kollektoren aufgebaut, wodurch sie flexibel skaliert werden können. Die Modularität ermöglicht die Reduktion von Produktions- und Betriebskosten, und die CO₂ Kollektoren können vielseitig und für verschiedene Anwendungszwecke verwendet sowie in automatisierter Massenproduktion hergestellt werden. Darüber hinaus haben die Climeworks Anlagen einen vergleichsweise sehr kleinen physischen Fussabdruck, haben keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt und Biodiversität und benötigen kein Wasser für den Adsorptions-Desorptions-Prozess. Im Gegenteil: Während des Prozesses wird sogar Wasser ebenfalls aus der Umgebungsluft gewonnen (für jede Tonne CO₂ ca. eine Tonne H₂O).



Anwendungsbereiche

Die Climeworks Technologie hat drei Hauptanwendungsbereiche. Die langfristig wichtigste Anwendung besteht in der permanenten Sequestrierung von atmosphärischem CO₂, um den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre zu reduzieren («Negative Emission Technology», NET). Zu diesem Zweck betreibt Clime-works seit November 2017 eine Pilotanlage in Island, bei der das aus der Atmosphäre gefilterte CO₂ in Wasser aufgelöst und in den Untergrund gepumpt wird, wo es innerhalb von zwei Jahren mineralisiert und damit sicher und permanent aus der Atmosphäre entfernt wurde.

Eine mittel- bis langfristige Anwendung für die Climeworks-Technologie stellt die Bereitstellung von atmosphärischem CO₂ für die Produktion von synthetischen, erneuerbaren Kraftstoffen dar («Power-to-Liquids, PtL» / «Power-to-Gas, PtG»). Die Synthese von Treibstoffen aus erneuerbarem Strom, Wasser und atmosphärischem CO₂ ermöglicht eine CO₂-neutrale Energiespeicher- und Transportlösung unter Verwendung der bestehenden Infrastruktur für kohlenwasserstoffbasierte Treibstoffe.

Kurz- bis mittelfristig liegt ein Fokus auf der Lebensmittel- und Getränkebranche sowie der kommerziellen Landwirtschaft. Das atmosphärische CO₂ wird hier für kohlenensäurehaltige Getränke oder zur Steigerung des Ernteertrags genutzt.

Über das Projekt

Das vorliegende Projekt stellt eine Weltpremiere dar: Die weltweit erste DAC Pilotanlage im Industriemasstab wurde gebaut (siehe Abb. 2) und über mehr als ein Jahr hinweg betrieben. Hierbei konnten Betriebsdaten über einen längeren Zeitraum gesammelt und dadurch die Climeworks Technologie erheblich optimiert werden.

Die Anlage besteht aus 18 CO₂-Kollektoren (DAC-18) und wurde auf dem Dach der Kehrrechtverwertungsanlage des Zweckverbands Kehrrechtverwertung Züricher Oberland KEZO installiert, welche die Anlage mit Energie für deren Betrieb versorgt. Das herausgefilterte CO₂ wird an das benachbarte Gewächshaus der Gebrüder Meier Primanatura AG verkauft, die das CO₂ nutzt, um den Ernteertrag zu steigern.



Abbildung 2: Die Climeworks DAC Anlage in Hinwil

2 Ziele des Projektes

Das übergeordnete Ziel des Projektes war es, eine Pilotanlage zur Sammlung von Betriebsdaten und für die Optimierung der Climeworks Technologie zu bauen.

Insgesamt sollten die folgenden fünf Meilensteine durch das Projekt erreicht werden:

1. **Pionierleistung:** Im Rahmen des Projekts sollte die weltweit erste industriemassstäbliche DAC-Anlage gebaut und in Betrieb genommen werden, um jährlich bis zu 900 Tonnen CO₂ zur Düngung eines Gewächshauses zur Verfügung zu stellen.
2. **Technologietransfer:** Um das Projekt zu realisieren, musste eine industrielle Fertigungsinfrastruktur für die innovative Technologie aufgebaut werden, um einen Technologietransfer vom Versuchsmaßstab an der ETH Zürich/Empa hin zur industriellen Fertigung zu ermöglichen.
3. **Leistungsdaten:** Der Bau und anschliessende Betrieb der weltweit ersten kommerziellen DAC-Anlage sollte die Gewinnung wichtiger Erkenntnisse bzgl. der Effizienz (Energie-, Material- und Flächeneinsatz pro Menge CO₂) und Risiken (Langzeitverhalten) ermöglichen. Damit wird ein wertvoller Beitrag zur nationalen und internationalen Forschung und Entwicklung im Bereich der NET und zur Geschäftsentwicklung von Climeworks geleistet.
4. **Kompetenzaufbau:** Durch das Projekt soll Climeworks das aus der Entwicklung und dem Bau der DAC-Anlage gewonnene Know-how ausbauen und auf den kommerziellen Massstab umsetzen, um den Kompetenzaufbau in den Bereichen industrielle Fertigung, Projektabwicklung und Betrieb von Industrieanlagen zu ermöglichen, wodurch Climeworks einen internationalen Wettbewerbsvorteil ausarbeiten kann.
5. **Referenzprojekt:** Die Realisierung des Projektes stellt ein Fallbeispiel für die nationale und internationale Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der NET dar. Darüber hinaus kann Climeworks potentielle Kunden von der Funktionsweise einer industriemassstäblichen Climeworks-Anlage überzeugen und so die zukünftige Geschäftstätigkeit sicherstellen.



3 Grundlagen – Randbedingungen

Vor dem Projektstart hatte Climeworks folgende Meilensteine bereits erreicht:

Mit dem Bau eines Demonstrators im Dezember 2012 konnte Climeworks erfolgreich die Skalierung der Technologie vom Labormassstab auf eine Kapazität von etwa einer Tonne CO₂ pro Jahr demonstrieren (Abb. 3).

Basierend auf dem Demonstrator wurde in einem gemeinsamen Projekt mit einem Schweizer Ingenieursdienstleister im Zeitraum Februar bis Juni 2013 ein Konzept für ein kostengünstig in grossen Stückzahlen herstellbares Adsorptionsmodul entwickelt. Die Konzeptstudie wurde zwischen Juli und Dezember 2013 von Climeworks weiterentwickelt und schliesslich die Konstruktion für das erste Adsorptionsmodul festgelegt. Darauf aufbauend wurde von Januar bis Juni 2014 das Adsorptionsmodul mit einer Nenn-CO₂ Kapazität von 45-55 Tonnen CO₂ pro Jahr von Climeworks gebaut und im Juli 2014 in Betrieb genommen.

Dieses Adsorptionsmodul («CO₂ Kollektor» oder «DAC-1», da bestehend aus einem Kollektor) (Abb. 4) stellt den finalen Skalierungsschritt der Climeworks Technologie und damit die Grundlage für den Bau der industriellen Pilotanlage dar. Es bildet das modulare Kernstück von kommerziellen Climeworks-Anlagen. Für den Bau der Pilotanlage wurden 18 Adsorptionsmodule in einer Gesamtanlage kombiniert («DAC-18»), um eine CO₂ Kapazität von bis zu 900 Tonnen CO₂ pro Jahr zu erreichen.

Ende 2014 bestand das Climeworks Team noch aus 13 Mitarbeitern. Das vorliegende Projekt hat die Entwicklung von Climeworks weiter vorangetrieben: Mittlerweile arbeiten 60 Mitarbeiter für das Unternehmen und insgesamt 14 CO₂-Filteranlagen konnten entweder realisiert werden oder befinden sich in Planung / Produktion. Auch zukünftig möchte Climeworks weiter expandieren, wobei die Pilotanlage aus diesem Projekt den ersten wichtigen Meilenstein darstellt.



Abbildung 3: Climeworks Demonstrator



Abbildung 4: Climeworks Kollektor



4 Konzept – Anlagenbeschreibung

Die industriemasstäbliche Pilotanlage (erste Generation einer industriellen Pilotanlage, DAC-18), die im Rahmen dieses Projektes gebaut wurde, besteht aus 18 CO₂ Kollektoren, welche mit Hilfe der weltweit ersten *kommerziellen* Direct Air Capture Technologie CO₂ direkt aus der Umgebungsluft herausfiltern. Die Kollektoren wurden in Containerstrukturen mit Standardabmessungen eingepasst, welche auf dem Dach der KEZO in der Wildbachstrasse 2, 8340 Hinwil, installiert wurden (Abb. 5). Die Anlage versorgt das Gewächshaus der Gebrüder Meier mit hochreinem CO₂ Gas (>99% Reinheit) direkt vor Ort (via Rohrleitung), wodurch der Transport des Gases vermieden wird und eine fortlaufende Belieferung mit CO₂ sichergestellt werden kann. Die Gewächshausatmosphäre wird mit dem CO₂ angereichert, sodass die CO₂ Konzentration bestenfalls nie unter 400ppm sinkt. Erhöhte CO₂-Level innerhalb des Gewächshauses regen die Photosynthese zusätzlich an und können den Ernteertrag um bis zu 20 Prozent steigern. Die Anlage läuft autonom und eignet sich für einen 24/7 Betrieb. Da das Gewächshaus nur tagsüber CO₂ benötigt, wurde ein zusätzliches Modul zur CO₂ Verflüssigung eingebaut. Das in der Nacht gesammelte CO₂ wird verflüssigt, um das Speichervolumen zu reduzieren, und dann am nächsten Tag im gasförmigen Zustand zum Gewächshaus geleitet.



Abbildung 5: DAC-18 Anlage auf dem Dach der KEZO

Climeworks ist für den Bau und Betrieb der DAC-18 Anlage zuständig, während die KEZO die benötigte Energie (vor allem Prozesswärme) liefert und den Standort zur Verfügung stellt. Das hochreine CO₂ wird an die Gebrüder Meier Primanatura AG zum Marktpreis verkauft (Abb. 6).

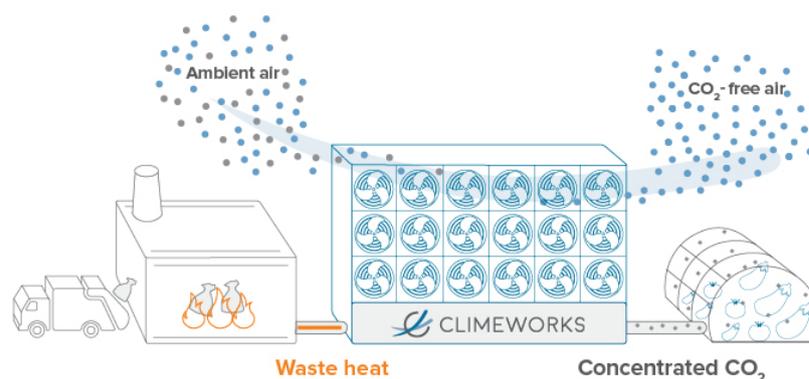


Abbildung 6: Infografik zur Funktionsweise der DAC-18 Anlage



5 Vorgehen – Methode

Die einzelnen Aktivitäten und Arbeitspakete (AP) für den Bau und Betrieb der DAC-18 Anlage sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Aktivitäten	Anfangsdatum	Enddatum	Meilenstein(e)	Zuständige/r Projektpartner/in
Vorstudie	10.2014	12.2014	AP 1: Detaillierter Projektplan	Climeworks
	12.2014	11.2016	AP 2: Baubewilligung	
Entwicklung	10.2014	06.2015	AP 3: Konstruktion der DAC-18 Anlage und der Fertigungsgegenstände	Climeworks
	11.2014	12.2015	AP 4: Aufbau Fertigungsgegenstände	
	10.2014	11.2017	AP 5: Auslegung, Verfahrenstechnik, Bestellung der Komponenten und Programmierung der Steuerung	
	10.2014	09.2015	AP 6: Bereitstellung Filtermaterial (Sor-bent)	
Bau	03.2015	10.2016	AP 7: Fertigung der Adsorptionsmodule	Climeworks / KEZO
	04.2015	04.2017	AP 8: Aufbau der Verfahrenstechnik	
	09.2016	03.2017	AP 9: Standort Vorbereitung	
	11.2016	04.2017	AP 10: Standort-Montage der DAC-18 Anlage	
Messungen / Erfolgskontrolle	02.2017	08.2017	AP 11: Inbetriebnahme DAC-18 Anlage	Climeworks
	09.2017	08.2018	AP 12: Betriebsdaten über ein Jahr	
Technischer Transfer / Be- richterstattung	10.2014	08.2018	AP 13: Dokumentation der DAC-18 Anlage	Climeworks

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete

6 Ergebnisse

Das Projekt hat die Umsetzbarkeit der Climeworks Technologie im industriellen Massstab demonstriert und bewiesen und dadurch erheblichen Mehrwert für alle Beteiligten generiert (vgl. Kapitel 9). Durch die Sammlung von Betriebsdaten über mehr als ein Jahr hinweg wurde die Technologie fortlaufend optimiert und wichtige Kompetenzen für den Bau und Betrieb von zukünftigen Anlagen aufgebaut. An dieser Stelle wird auf einige messbare Parameter eingegangen, welche die Performance der Anlage beschreiben und damit aufschlussreiche Informationen über den Betrieb von DAC-Anlagen liefern.

Die getesteten Parameter umfassen die CO₂ Kapazität, den Energiebedarf, die CO₂ Reinheit und den Druckverlust der Anlage:

- Die CO₂ Kapazität (die Menge CO₂, die während eines Adsorptions-Desorptions-Zyklus aus der Umgebungsluft gefiltert wird) konnte seit der Inbetriebnahme durch Optimierung der Verfahrensparameter um ca. 30% gesteigert werden. Gegen Ende des Projekts erreichte die Anlage nahezu den nominalen Wert von 2.5 Tonnen CO₂ pro Tag. Wir gehen davon aus, dass



durch weitere Verbesserungen am Prozess (Erhöhung des Luftdurchsatzes, schnelleres Aufwärmen des Filtermaterials und enger getaktete Adsorptions-/Desorptions-Zyklen) die definierten nominalen Werte erreicht werden können. Ausserdem sind wir sehr erfreut zu sehen, dass die Anlage einen anhaltend hohen CO₂ Output liefert, was vermuten lässt, dass die Degradierung des Filtermaterials langsamer abläuft als anfänglich erwartet. Die Annahme, dass das Filtermaterial erst nach ca. 2-4 Jahren ersetzt werden muss, erscheint nach den ersten Erfahrungen auf industriellem Massstab weiterhin realistisch und bestätigt die aktuell verwendeten Kostenmodelle.

- Der Energiebedarf der Anlage konnte in den ersten Betriebsmonaten um ca. 10% gesenkt werden. Das mittelfristige Ziel, welches pro abgeschiedene Tonne CO₂ einen Energiebedarf von 300 – 450 kWh Strom und 1'500 – 2'000 kWh Wärme bei 100°C vorsieht, wurde mit dieser Anlage der ersten Generation noch nicht erreicht. Insbesondere wurden für den Wärmebedarf Werte im Bereich 3'500 – 4'000 kWh pro Tonne CO₂ gemessen. Die mehrmonatige Betriebsphase hat aber wertvolle Erkenntnisse für die energetische Weiterentwicklung der Technologie geliefert. Einzelne verfahrenstechnische Komponenten sowie die prozessinterne Wärmerückgewinnung bergen noch Potential zur Verbesserung, was durch einen bereits umgesetzten Prototypen der zweiten Anlagengeneration unterdessen bestätigt wurde, mit welchem Wärmebedarfswerte von deutlich unter 2'000 kWh pro Tonne CO₂ nachgewiesen werden konnten.
- Die Reinheit des gefilterten CO₂ war bereits zu Beginn sehr hoch (>99%) und wird weiterhin beobachtet und sichergestellt. Für eine Anwendung des aus der Luft gefilterten Kohlenstoffdioxids in der Getränke- und Nahrungsmittelindustrie ist eine nachgeschaltete Aufreinigung des CO₂ nötig, welche mittels Verflüssigung des Gases erreicht werden kann. So können die verbleibenden Sauerstoff- und Stickstoff-Anteile weiter gesenkt werden, um eine lebensmittelkonforme Produktqualität zu garantieren.
- Ein Anstieg des Druckverlusts kann beim Transportieren der Umgebungsluft durch die CO₂ Kollektoren aufgrund von Verschmutzungen der Kollektoren über die mehrmonatige Betriebsphase vorkommen. Ein solcher Anstieg war bis jetzt aber nicht messbar, was sehr erfreulich ist, da somit kein Bedarf für zusätzliche Schmutzfilter oder regelmässige Reinigungsarbeiten an den CO₂ Kollektoren besteht.

Über die einjährige Messkampagne im Projekt hinweg konnten die technischen Parameter der Pilotanlage deutlich verbessert werden. Die zum Projektende gemessenen Werte entsprechen den Erwartungen an diese weltweit erste DAC-Anlage im industriellen Massstab. In gewissen Bereichen sind aber noch weitere Verbesserungen und zusätzliche Betriebserfahrung nötig, bevor Climeworks DAC-Anlagen grossflächig und gewinnbringend im europäischen Markt eingesetzt werden können. Insbesondere bei der Anlagenverfügbarkeit und beim Energieverbrauch besteht Optimierungspotential, welches während dem weiteren Betrieb über das Projektende hinaus zunehmend ausgeschöpft werden soll.

Die Pilotanlage ermöglichte das Testen der Climeworks Technologie unter *realen* Bedingungen auf *industriellem* Massstab – die Erkenntnisse aus dem laufenden Betrieb sind unabdingbar für die weitere Entwicklung der Technologie. Durch das vorliegende Projekt konnten so wichtige Schlüsse für die nächste Generation von DAC-Anlagen gezogen werden. Die nächste Anlagen-Generation ist bereits in Produktion und wird noch im Jahr 2018 in Betrieb genommen. Es handelt sich hierbei um eine DAC-12 Anlage, die ebenfalls in Hinwil installiert wird. Sie unterscheidet sich von der bestehenden Anlage insbesondere durch eine Weiterentwicklung der CO₂ Kollektoren, bei welchen weniger Material verbaut werden konnte, um somit die Kapitalkosten der Anlage senken zu können. Ausserdem wurden Optimierungen vorgenommen die den Austausch des Filtermaterials vereinfachen, wodurch eine effizientere

und kostengünstigere Wartung möglich wird. Darüber hinaus wird eine Verbesserung der CO₂ Kapazität sowie des Energiebedarfs um jeweils weitere 10% erwartet.

7 Kommunikation

Während des Projektverlaufs wurde entschieden, einen grossen Eröffnungsevent für die DAC-18 Anlage zu organisieren, welcher sehr erfolgreich durchgeführt wurde. Der Event zählte ca. 200 Teilnehmer, darunter 145 externe Gäste, 15 Medienvertreter und 40 Climeworks Mitarbeiter. Im Rahmen des Events wurde den Gästen eine Führung durch die Anlage in Kleingruppen angeboten (siehe Abb. 7).



Abbildung 7: Eindrücke vom Eröffnungsevent

Das Projekt hat internationales Interesse sowohl an Climeworks, als auch am Standort Schweiz erweckt. Über 1'000 nationale und internationale Medienartikel wurden im Zusammenhang mit der DAC-18 Anlage veröffentlicht, darunter:

Medium	Artikel
NZZ	<i>Zürcher Startup-Unternehmen mit Weltpremiere: CO₂ wird aus der Luft gefiltert</i>
Tagesanzeiger	<i>Zürcher mit Weltpremiere im Klimaschutz</i>
Die Zeit	<i>Fein gefiltert</i>
Wired	<i>Weltpremiere: Schweizer filtern CO₂ aus der Luft und düngen damit</i>
BBC	<i>Climate's magic rabbit: Pulling CO₂ out of thin air</i>
The Times	<i>Using carbon dioxide to help grow veg</i>
Fast Company	<i>This machine just started sucking CO₂ out of the air to save us from climate change</i>
Science	<i>In Switzerland, a giant new machine is sucking carbon directly from the air</i>
Bloomberg	<i>Swiss pickles set to benefit from first carbon capture plant</i>
CNN	<i>This power plant captures CO₂ from the air</i>
Sky News	<i>Company captures carbon dioxide from the air in quest to avoid CO₂ shortages</i>

Tabelle 2: Eine Auswahl von Medienartikeln über die DAC-18 Anlage



Aufgrund des grossen Interesses werden seit dem Eröffnungsevent am 31. Mai 2017 in etwa monatlich öffentliche und private Besichtigungen der DAC-18 Anlage durchgeführt, auch in Zusammenarbeit mit der KEZO und der Gebrüder Meier Primanatura AG. Hierbei werden jeweils die Anlage, das Projekt und die Firma Climeworks vorgestellt. Das Publikum ist divers und umfasst Journalisten, Personen aus der Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, Privatpersonen, Schulklassen, aber auch potentielle Investoren und Kunden von Climeworks.

8 Ausblick & weitere Schritte

Für Climeworks stellt der Bau und Betrieb der industriemassstäblichen DAC-18 Anlage den ersten grossen Meilenstein einer kontinuierlichen und steilen Entwicklung der DAC Technologie dar. Zukünftig sollen einerseits die Pilotanlage weiter betrieben werden und andererseits auch neue Anlagen gebaut und verkauft werden.

Der weitere Betrieb der DAC-18 Anlage über die Projektdauer hinaus ermöglicht die Sammlung von Betriebsdaten über einen noch längeren Zeitraum hinweg und damit die kontinuierliche Optimierung der Technologie. Diese Erkenntnisse sind wichtig für die Entwicklung aller weiteren Generationen von Climeworks DAC-Anlagen.

Das Projekt hat zudem weitere Kundenaufträge und Investitionen in Climeworks katalysiert. Mittlerweile sind insgesamt 14 CO₂-Filterungsanlagen realisiert worden oder befinden sich in Planung / Produktion – darunter eine weitere Anlage auf industriellem Massstab (der 2. Generation), mit einer nominalen Kapazität von 600 Tonnen CO₂ pro Jahr, die ebenfalls auf dem Dach der KEZO installiert und erstmals die Getränkeindustrie mit hochreinem CO₂ aus der Luft beliefern wird. Ende September 2018 wurde zudem eine DAC-3 Anlage in Italien im Rahmen eines Power-to-Methane Projekts in Betrieb genommen. Das Climeworks CO₂ wird hierbei mit erneuerbarem Wasserstoff katalytisch methanisiert, verflüssigt und zur Betankung von Erdgasfahrzeugen eingesetzt.

Langfristig möchte Climeworks das CO₂ in der Atmosphäre nicht nur wiederverwenden (CCU, wie etwa zur Anreicherung der Gewächshaus-Atmosphäre in Hinwil), um damit CO₂-Neutralität zu ermöglichen, sondern es auch sicher und permanent durch Mineralisierung im Untergrund speichern (CCS), um negative Emissionen zu schaffen. Die hohe CO₂-Konzentration in der Atmosphäre verlangt nicht nur eine Reduktion von Treibhausgasemissionen, sondern auch das Entfernen der bereits emittierten Emissionen. Zu diesem Zweck wird bereits eine Pilotanlage in Island betrieben, wobei sich weitere Anlagen und Projekte im Bereich NET in Planung befinden.

9 Schlussfolgerungen

Das Projekt war ein grosser Erfolg und hat die Umsetzbarkeit der Climeworks Technologie im industriellen Massstab demonstriert und bewiesen.

Alle fünf Meilensteine (Kapitel 2) wurden erreicht. Der Bau und Betrieb der DAC-18 Anlage als weltweit erste DAC-Anlage im industriellen Massstab ist eine *Pionierleistung* und ermöglichte den *Technologie-transfer* von ETH Zürich/Empa Forschung hin zur industriellen Fertigung. Das Sammeln von *Leistungsdaten* über so einen grossen Zeitraum hinweg ermöglichte wichtige Erkenntnisse und trug so zur NET Forschung und Entwicklung bei (viele NET Forschungspublikationen führen Climeworks als wichtige



Referenz auf). Climeworks erfuhr durch das Projekt eine steile Lernkurve und konnte wichtige *Kompetenzen aufbauen*, die dem Unternehmen einen klaren Wettbewerbsvorteil im internationalen Umfeld geben. Bis dato ist es noch keinem anderen Unternehmen gelungen, eine DAC-Anlage im Industriemassstab zu bauen und zu betreiben. Nicht nur national, sondern auch international wird die DAC-18 Anlage als wichtiges *Referenzprojekt* angesehen, was durch die zahlreichen Medienartikel und das internationale Interesse demonstriert wird (vgl. Kapitel 7).

Insgesamt hat das Projekt «Bau und Betrieb einer industriemassstäblichen Anlage zur CO₂-Abscheidung aus der Luft» die Erwartungen übertroffen. Die DAC-18 Anlage gilt sowohl national als auch international als Pionierleistung und durch den Dauerbetrieb der Anlage konnten wertvolle Daten gesammelt und aus Herausforderungen gelernt werden.

Die Durchführung des Projektes hat einen Mehrwert für folgende Parteien geschaffen:

- Schweizer Staat: DAC wird vom Weltklimarat IPCC als notwendige Technologie angesehen, wenn das Ziel eines globalen Temperaturanstiegs von 1.5°C bzw. 2.0°C eingehalten werden soll. Die Inbetriebnahme der DAC-18 Anlage als weltweit erste industriemassstäbliche DAC-Anlage ist international auf sehr grosses Interesse gestossen und fördert so die Rolle der Schweiz als Innovationsweltmeister und als wichtigen Wirtschaftsstandort. Darüber hinaus hat die DAC Technologie das Potenzial, einen positiven Beitrag zur Schweizer Energiestrategie 2050 zu leisten. Insbesondere im Power-to-X Bereich, welcher PtL und PtG umfasst (vgl. Kapitel 1), kann DAC genutzt werden, um den Transportsektor mittels synthetischer Kraftstoffe nachhaltig zu transformieren. Atmosphärisches CO₂ kann auch für erneuerbare Materialien verwendet werden (z.B. für Baustoffe), welche für die nachhaltige Entwicklung der Schweizer Infrastruktur eingesetzt werden können.
- Internationale und nationale Forschung im Bereich der NET: Der IPCC legt etlichen Szenarien für die weitere Entwicklung der weltweiten CO₂ Konzentration den grossmassstäblichen Einsatz von NET zugrunde, wobei DAC eine mögliche Portfoliotechnologie darstellt. Die DAC-18 Anlage hat in diesem Forschungsgebiet einen weltweit einmaligen Meilenstein gesetzt, da zuvor keine industriemassstäbliche DAC-Anlage existiert hat. Dadurch konnten erstmals die Effizienz und Risiken von DAC-Anlagen in grösseren Massstab getestet werden.
- KEZO und Gebrüder Meier Primanatura AG: Sowohl die KEZO als auch die Gebrüder Meier Primanatura AG gelten als innovativ und zeichnen sich als Vorreiter hinsichtlich nachhaltigem Energieeinsatz aus. Die DAC-18 Anlage unterstreicht den Innovationscharakter der beiden Projektpartner und sorgt für gesteigerte Strahlkraft. Seit der Inbetriebnahme der DAC-Anlage haben die KEZO, Gebrüder Meier Primanatura AG und Climeworks mehrfach gemeinsam Führungen veranstaltet und Journalisten aus aller Welt empfangen.
- Climeworks: Das Projekt ermöglichte Climeworks den Markteintritt mit einem ersten Industrieprodukt und hat damit ein Referenzprojekt geschaffen, welches weitere Kundenaufträge und Investitionen katalysiert hat. Unter anderem konnte Climeworks 2018 eine Finanzierungsrunde über 30.5 Millionen CHF erfolgreich abschliessen und eine weitere industriemassstäbliche Anlage am Standort der KEZO befindet sich momentan im Aufbau und wird der Getränkeindustrie erstmals atmosphärisches CO₂ zur Verfügung stellen.



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BFE	Bundesamt für Energie
CHF	Schweizer Franken
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAC	Direct Air Capture
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEZO	Zweckverband Kehrichtverwertung Zürcher Oberland
NET	Negative Emission Technologies