

Prozessintegration, Effizienz und Kosten von CCS für Holzheizkraftwerk, KVA und Vergärungsanlage

Prof. Dr. Beat Wellig

CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik

Hochschule Luzern – Technik & Architektur

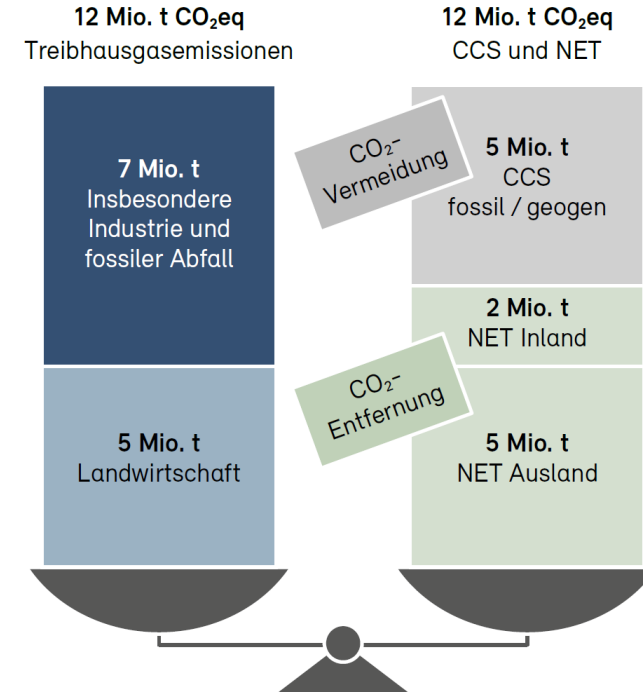
19. Holzenergie-Symposium, 11. September 2026, ETH Zürich

Null heisst Null

Zur Erreichung von Netto-Null müssen schwer vermeidbare Emissionen ausgeglichen werden.

Die Schweiz muss, je nach Szenario, jährlich **10 bis 15 Millionen Tonnen CO₂** dauerhaft speichern (im Inland und Ausland).

Quelle: Modellvergleich SWEET-CROSS (CooRdination Of Scenarios for SWEET), www.sweet-cross.ch/results/



CCS: Carbon Capture and Storage, NET: Negative Emission Technologies

Quelle: Langfristige Klimastrategie, Bericht des Bundesrats, 2021

Null heisst Null

Was bedeuten 10 bis 15 Mio. Tonnen negative CO₂-Emissionen pro Jahr?

2050 muss jährlich mehr CO₂ dauerhaft gespeichert werden, als alle Gebäude in der Schweiz heute emittieren (rund 9.4 Mio. Tonnen CO₂-eq/Jahr).

Quelle: Treibhausgasinventar, BAFU



CO₂-Abscheidung aus Punktquellen

Punktquellen mit biogenen Brennstoffen:

- KVA
- Holzheizkraftwerke
- Klärschlamm-Verbrennungsanlagen
- Biogasanlagen



BFE-Projekt «Process Integrated Carbon Capture PICC»

Ziele

- Guidelines für Design, Optimierung und Integration von CO₂-Abscheidungsanlagen
- Einflusses der CO₂-Abscheidung auf das integrierte System
- Quantifizierung der Auswirkungen von CCUS auf das Schweizer Energiesystem (ETHZ, in dieser Präsentation nicht behandelt)



BFE-Projekt «Process Integrated Carbon Capture PICC»

Projektpartner in PICC

KVA Linth



HHKW Galgenen



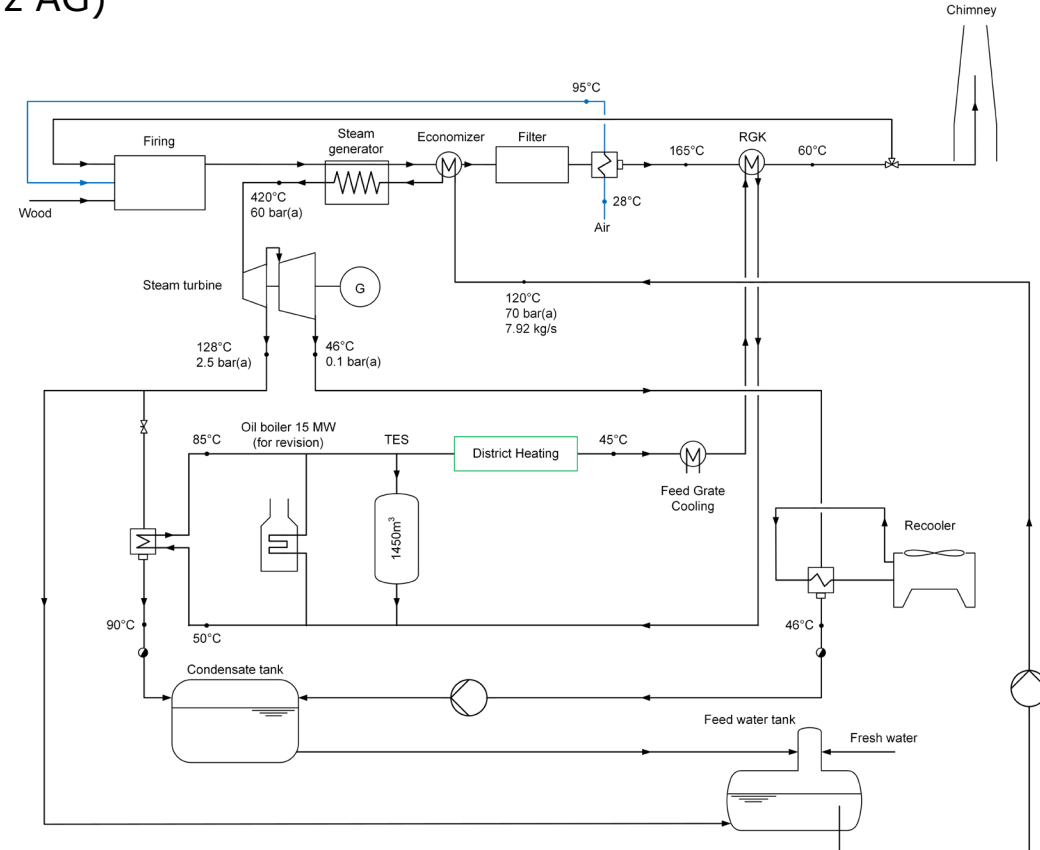
KSV/ARA Werdhölzli



HHKW Galgenen (Energie Ausserschwyz AG)

Beispielhafte Fallstudie

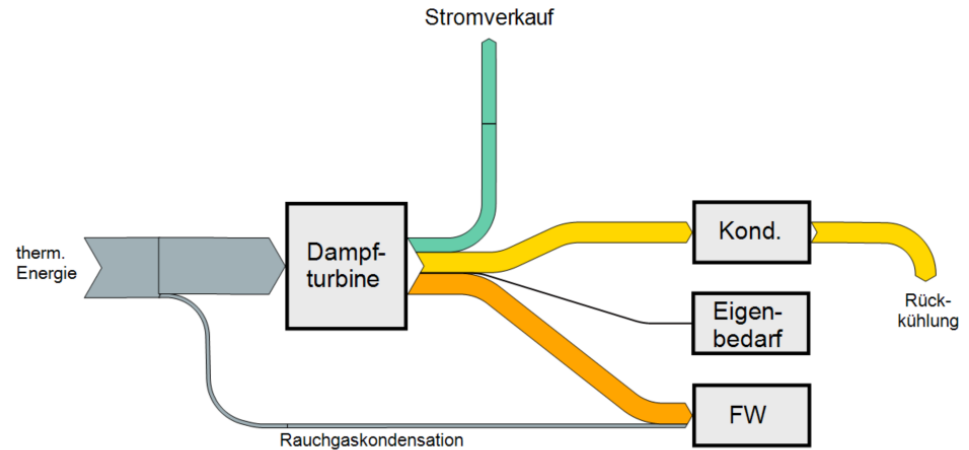
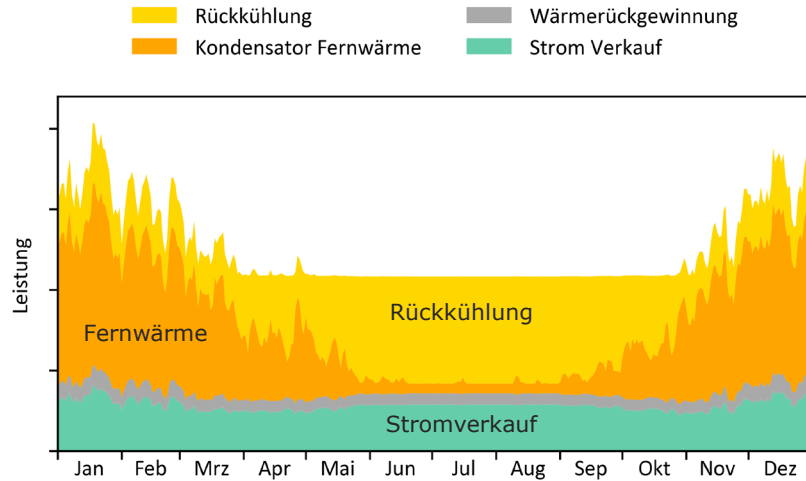
- Verbrennung von Altholz und Holzschnitzeln
- Thermische Leistung $22 \text{ MW}_{\text{th}}$ (Kesselleistung)
- Emittierte CO_2 -Menge $46'000 \text{ t CO}_2/\text{a}$
- Wärmeverbraucher: Fernwärmenetz (FW) und interne Prozesse



HHKW Galgenen

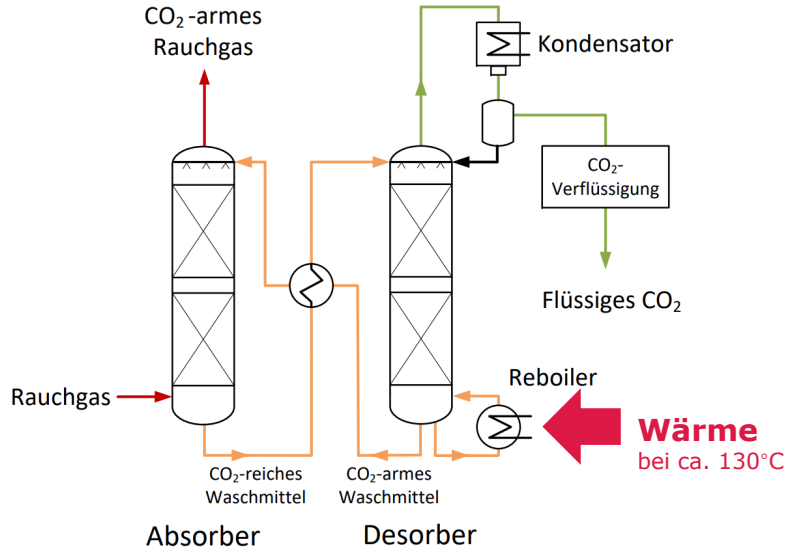
Ist-Zustand

Stromproduktion, Wärmeproduktion für Fernwärmenetz: Jahresverlauf und Sankey-Diagramm



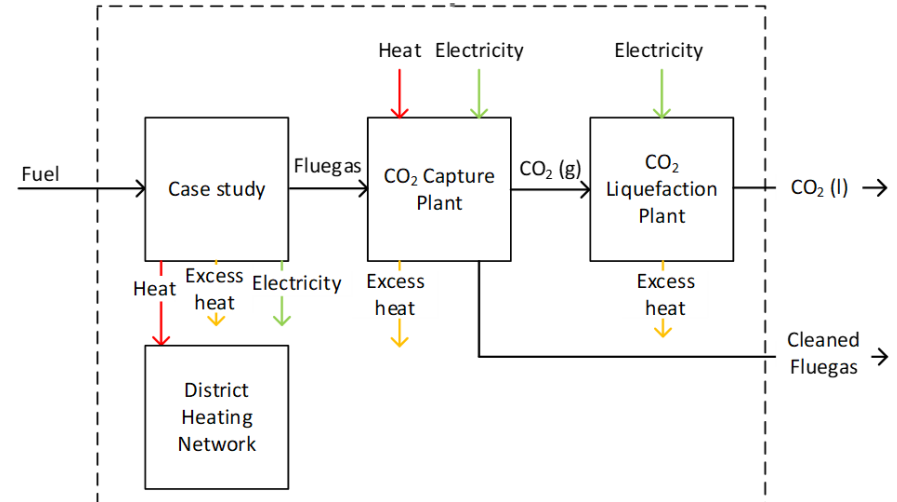
Herausforderung

Amin-Wäsche und Verflüssigung



Abscheidung von 1 kg CO₂ benötigt grob 0.9 kWh Wärme und 0.2 kWh Strom.

Integration CO₂-Abscheidungsanlage



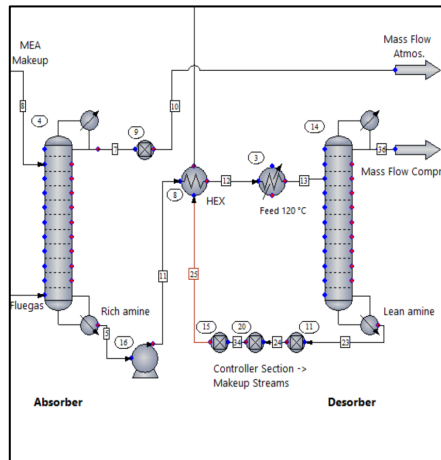
«Streit um die Wärme» → thermoökonomisch optimale Integration der CO₂-Abscheidungsanlage

Methodik

Integriertes Prozessdesign

I. Prozess-Simulation

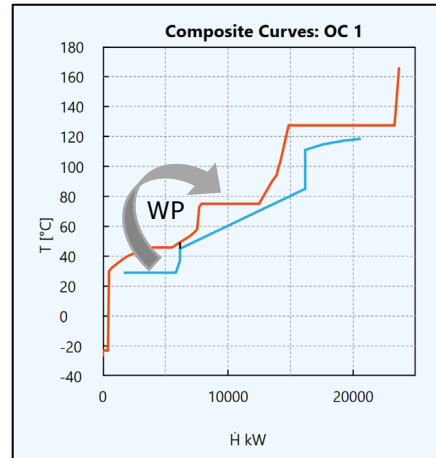
Optimierung CO₂-Abscheidungsanlage mit CHEMCAD



Amin-Wäsche

II. Pinch-Analyse

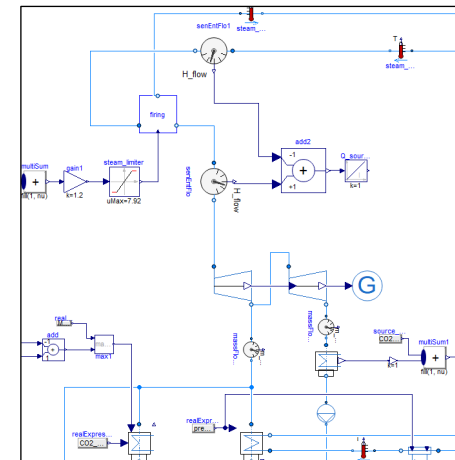
Optimale Wärmeintegration mit PinCH Software



Variante mit Wärmepumpe

III. Simulation Gesamtsystem

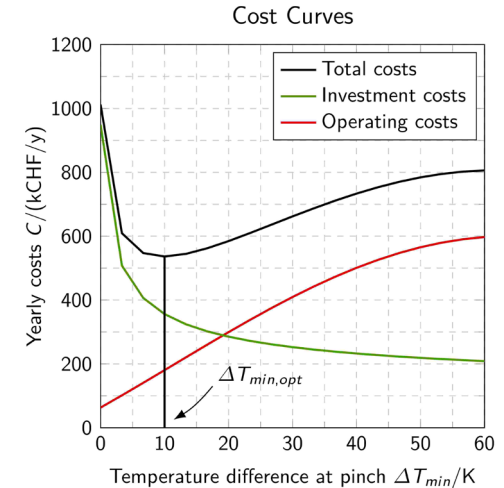
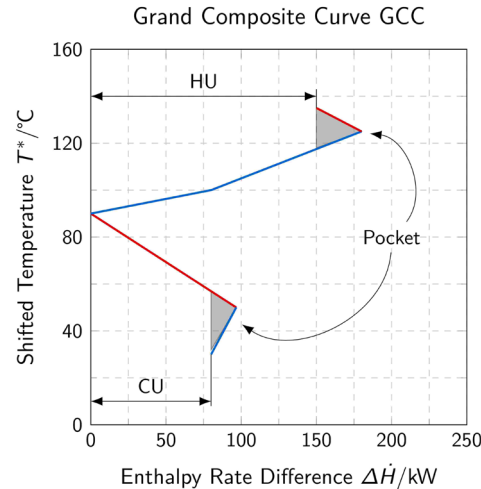
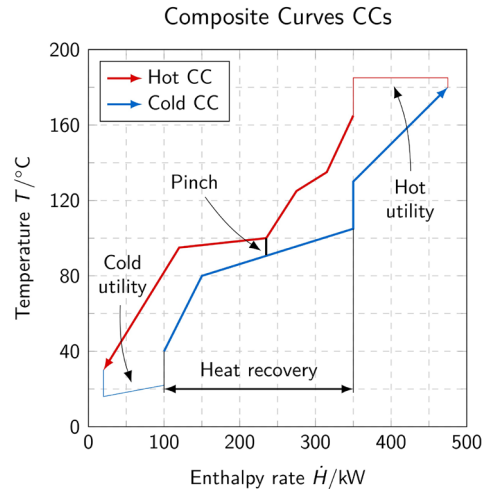
Betriebscharakteristik und Variantenstudien mit Modelica



Integriertes Gesamtsystem

Exkurs Pinch-Analyse

System-orientierte Methode, um den optimalen Energieeinsatz und das optimale Anlagendesign unter der Randbedingung minimaler Kosten zu ermitteln. Die **Pinch-Analyse** ist das wichtigste Werkzeug für die energetische Prozessintegration.

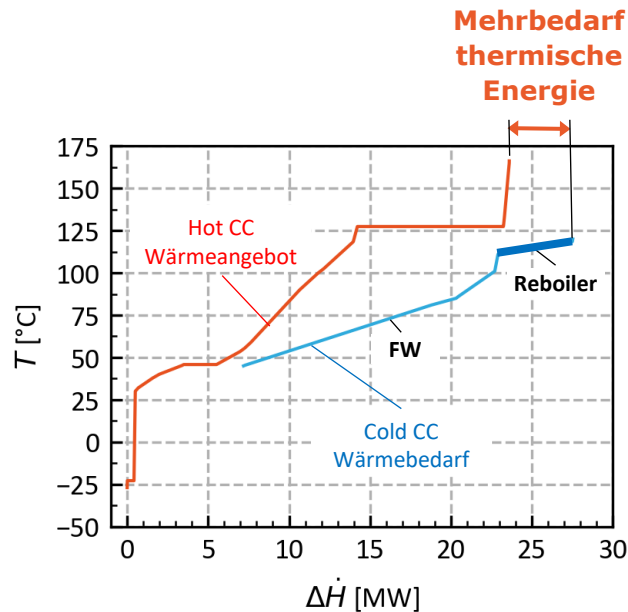


Der «Pinch» teilt das Gesamtsystem in zwei Untersysteme – mit Wärmedefizit oberhalb und Wärmeüberschuss unterhalb des Pinches. Wichtig: Eine korrekt integrierte Wärmepumpe arbeitet über den Pinch.

HHKW Galgenen

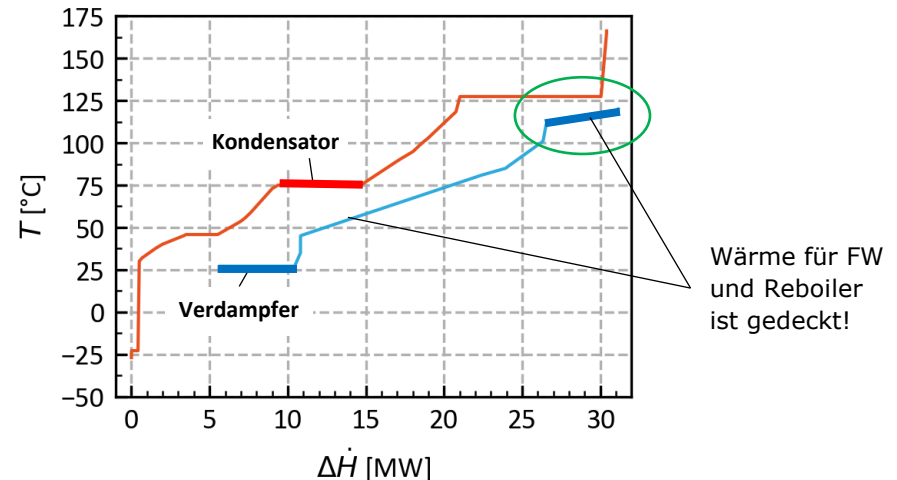
Composite Curves des Gesamtsystems

1) Integration CO₂-Abscheidungsanlage führt zu Mehrbedarf an Holz (und Rückkühlung)



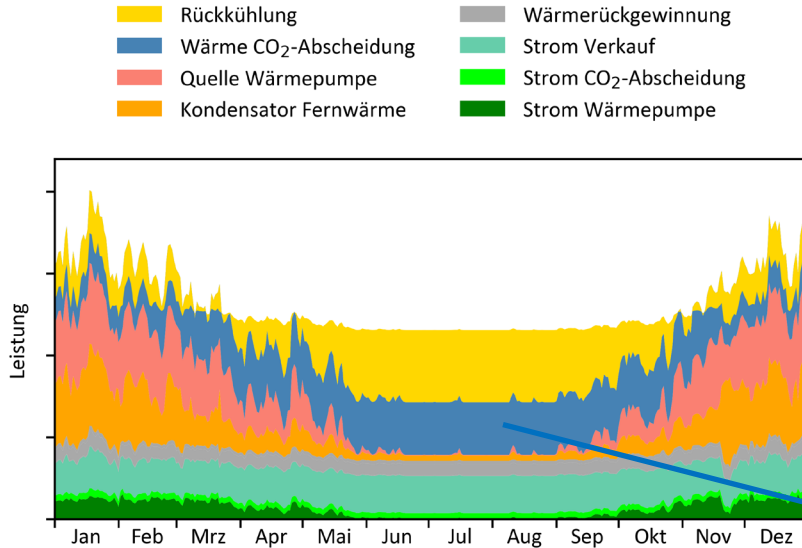
(CCs für durchschnittlichen Wintertag)

2) Integration CO₂-Abscheidungsanlage **mit Wärmepumpe** ermöglicht die Optimierung des Gesamtsystems



HHKW Galgenen

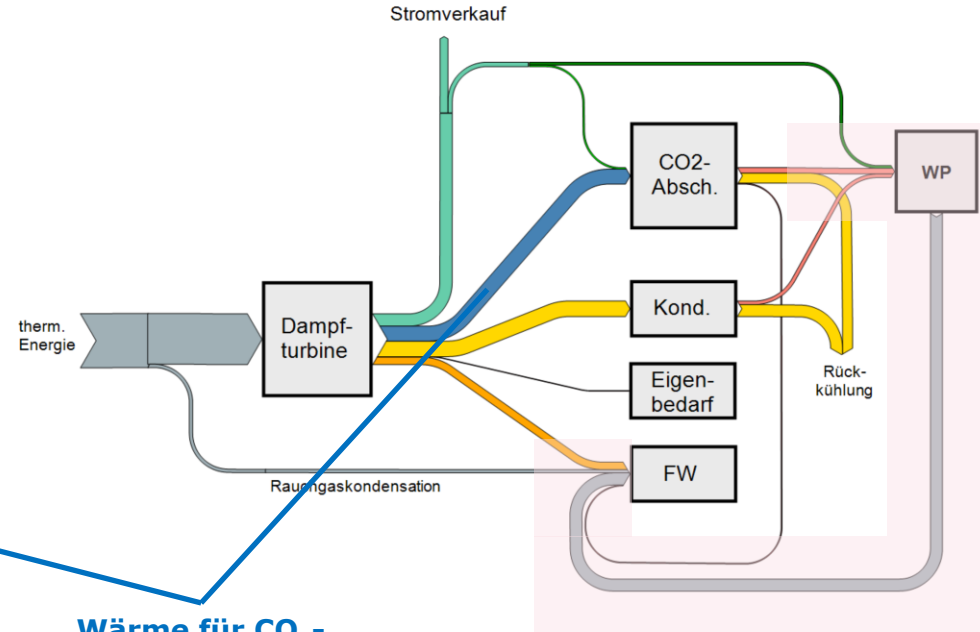
Integration CO₂-Abscheidung und Wärmepumpe



Wärme für CO₂-Abscheidung

Vergleich mit Ist-Zustand:

Holzverbrauch	-7%
Fernwärmeverkauf	identisch
Stromverkauf	-23%
Abgeschiedenes CO₂	84%



HHKW Galgenen

Techno-ökonomische Analyse (ohne Transport und Endlagerung)

	ohne WP	mit WP
Betriebskosten [Mio. CHF/a]		
CO ₂ -Abscheidungsanlage, Zwischenlagerung, EEMs	1.6	1.7
Annualisierte Investitionskosten [Mio. CHF/a]		
CO ₂ -Abscheidungsanlage	4.2	4.0
EEM (inkl. WP und WÜ)	0.01	0.5
Betriebs- und Investitionskosten [Mio. CHF/a]	5.8	6.2
Mehrkosten Holz [Mio. CHF/a]*	1.2	-0.2
Verringerung Einnahmen [Mio. CHF/a]* (Mindereinnahmen Stromverkauf)	0.5	2.1
Jährliche Gesamtkosten [Mio. CHF/a]	7.5	8.1
Gesamtmenge CO ₂ abgeschieden [t CO ₂ /a]	40'900 (72%)	38'000 (90%)
Spezifische CO₂-Abscheidungskosten [CHF/t CO₂]	183	211

*verglichen mit Szenario 2026 ohne CO₂-Abscheidung

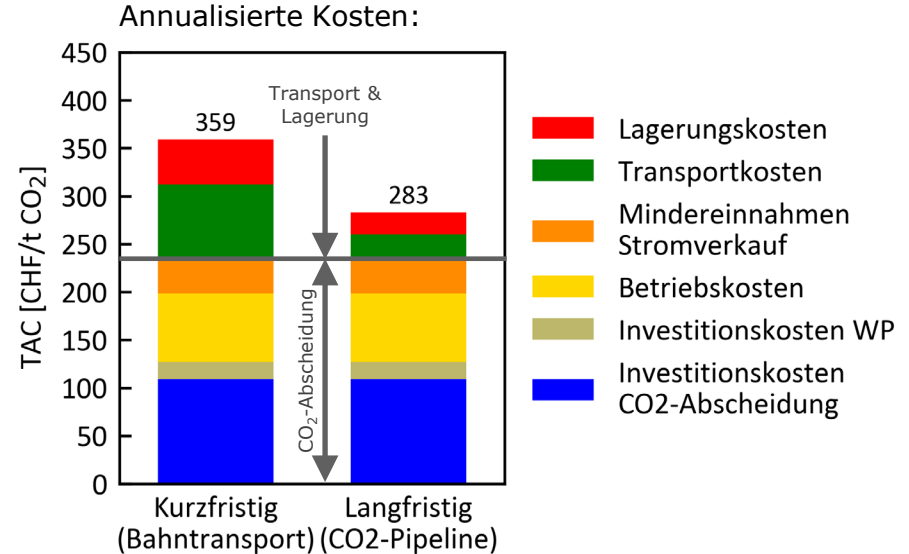
Vergleich der Fallstudien

- In allen Fallstudien Szenarien ohne/mit Wärmepumpen betrachtet (genügend Wärmequellen vorhanden).
- Grössere CO₂-Abscheidungsanlagen sind wie erwartet wirtschaftlich interessanter. Der Strom spielt eine wichtige Rolle für die Wirtschaftlichkeit («Umverteilung» Wärme/Strom).
- Die Temperaturanforderungen der Prozesse (KVA, HHKW, KSV) beeinflusst die Wirtschaftlichkeit aufgrund der möglichen Wärmerückgewinnung.

	Einheit	KVA Linth	KSV Werdhözli	HHKW Galgenen
Jährliche Abscheidung	t CO ₂ /a	120'000	19'800	38'000
FW-Vorlauftemperatur	°C	90	74	85
FW-Rücklauftemperatur	°C	57	49	45
Strompreis	CHF/MWh _{el}	80	160	130
Grösse der WP	MW _{th,Kond}	17.1	1.6	5.1
Annualisierte Investitions- kosten für CO ₂ - Abscheidungsanlage	Mio. CHF/a	7.5	2.3	4.0
Spezifische Kosten	CHF/t CO₂	130	222	211

Take-aways

- Die CO₂-Abscheidung beeinflusst Gesamtsystem stark (Strom- und Wärmeerzeugung).
- Erfolgt die Integration mit einer Wärmepumpe, wird für die CO₂-Abscheidung keine zusätzliche thermische Energie (z.B. Holz) benötigt.
- Die Wirtschaftlichkeit ist von vielen Faktoren abhängig. Die Kosten für die CO₂-Abscheidung betragen je nach Fallstudie und Anlagenkonfiguration **150-250 CHF/t CO₂**.



Kosten für Transport und Lagerung: P. Eckle, M. Krüger, M. Spokaite: Feasibility of a demonstrator for the carbon capture and storage value chain in CH with a waste-to-energy plant. <https://www.suslab.ch/ms-ccs-feasibility>

Vielen Dank!

Bundesamt für Energie BFE, Carina Alles

Projektpartner:

- HHKW Galgenen, Urs Rhyner
- KVA Linth, Daniel Marxer
- KSV/ARA Werdhölzli, Daniel Rensch

Projektteam:

- Hochschule Luzern HSLU: Dario Allgäuer, Benjamin Ong und weitere Mitarbeiter
- Energy Science Center ETH Zürich, Gianfranco Guidati