


# Vergleich Hoch-Wärmeintegrierter Adsorberkonzepte für eine Anwendung in Direct-Air-Capture-Verfahren

Carsten Drechsler\* und David W. Agar

DOI: 10.1002/cite.201900069

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Zur Überwindung des hohen kohlenstoffdioxidspezifischen Energieeintrags bei Temperaturwechseladsorptionskonzepten für Direct-Air-Capture-Prozesse wird eine Anwendung hoch-wärmeintegrierter Verfahrenskonzepte untersucht. Die detaillierte Modellierung und Simulation eines Band- als auch Wanderbettadsorberkonzeptes deutet darauf hin, dass eine Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Adsorbens von mehr als 90 % erreicht werden kann. Hier eröffnet eine Kombination der vorgestellten Konzepte mit einem Power-to-Gas-Verfahren das Potenzial zur Realisierung eines autothermen Gesamtprozesses.

**Schlagwörter:** Adsorption, Direct-Air-Capture, Kohlenstoffdioxid, Simulation, Wärmeintegration

*Eingegangen:* 30. April 2019; *revidiert:* 26. Oktober 2019; *akzeptiert:* 18. November 2019

## Comparison of Highly Heat-Integrated Adsorber Concepts for Use in Direct Air Capture Processes

To overcome the high carbon dioxide-specific energy input in temperature swing adsorption concepts for direct air capture processes, an application of highly heat-integrated process concepts is being investigated. The detailed modeling and simulation of a belt and a moving bed adsorber concept indicates that a recovery of the sensitive heat of the adsorbent of more than 90 % can be achieved. Here, a combination of the presented concepts with a power-to-gas process opens up the potential for the realization of an autothermal overall process design.

**Keywords:** Adsorption, Carbon dioxide, Direct air capture, Heat integration, Simulation

## 1 Einleitung

Spätestens seit dem Pariser Klimaabkommen [1] ist das Phänomen des Klimawandels und die damit verbundene Forderung der Verringerung von Treibhausgasemissionen zur Vermeidung eines Anstiegs der Erdtemperatur um mehr als 2 °C in den Blickpunkt öffentlichen Interesses gerückt. Jedoch wird in aktuellen Studien zur Klimaproblematik deutlich, dass zur Gewährleistung dieses Ziels neben der Emissionsreduktion eine direkte Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre in Betracht gezogen werden sollte, wo hingegen zur Realisierung des favorisierten 1,5 °C-Ziels eine Anwendung sogenannter negativer Emissionstechnologien (NET) unvermeidbar erscheint [2, 3].

Neben einer Vielzahl verschiedener Ansätze für NET [4] tritt hier zunehmend die Entwicklung technischer Prozesse zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus atmosphärischer Luft (Direct-Air-Capture, DAC [5]) in den Fokus wissenschaftlichen

Interesses [6], wobei überwiegend die Anwendung von Ab- und Adsorptionsprozessen untersucht wird. Hier scheinen aufgrund des geringen CO<sub>2</sub>-Anteils in atmosphärischer Luft (~400 ppm) insbesondere chemisorptionsbasierte Verfahren für diese Trennaufgabe geeignet [7]. Jedoch bringt die starke Verdünnung des Kohlenstoffdioxids hohe CO<sub>2</sub>-spezifische Energieeinträge bei der Anwendung von Temperaturwechselverfahren (TSA) mit sich [8]. Eine Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Feststoffs durch hoch-wärmeintegrierte Adsorberkonzepte kann in diesem Zusammenhang zu einer deutlichen Reduktion des CO<sub>2</sub>-spezifischen Energiebedarfs beitragen.

---

Carsten Drechsler, Prof. Dr. David W. Agar  
carsten.drechsler@tu-dortmund.de  
Technische Universität Dortmund, Fakultät für Bio- und Chemieingenieurwesen, Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik, Emil-Figge-Straße 66, 44227 Dortmund, Deutschland.

Die Analyse eines hoch-wärmeintegrierten Band- und Wanderbettkonzeptes bildet hier die Basis für einen technischen Vergleich der Konzeptvarianten. Letzterer erfolgt insbesondere unter dem Aspekt der Realisierung eines autothermen Gesamtprozesses durch eine Integration der DAC-Einheit in ein Power-to-Gas(PtG)-Konzept.

## 2 Hoch-wärmeintegrierte Adsorberkonzepte

### 2.1 Autothermer Gesamtprozess

Das konzeptionelle Design einer DAC-Einheit wird neben energetischen Aspekten maßgeblich durch die Fragestellung nach der Verwendung des Stroms an konzentriertem CO<sub>2</sub> beeinflusst. Anstelle einer Speicherung wird hier eine chemische Umsetzung des CO<sub>2</sub> in Betracht gezogen. So ermöglicht eine Kombination des DAC-Verfahrens mit einem PtG-Konzept, bspw. mittels der stark exothermen Sabatier-Reaktion,



die Produktion von Methan. Ferner kann die freigesetzte Reaktionswärme als Energiequelle für den Desorptionsprozess genutzt werden. Hier stellt sich die Frage, ob durch eine ausreichend hohe Energieintegration in der DAC-Einheit ein autothermer Gesamtprozess ermöglicht wird, so dass für den vereinfachten Fall eines reinen TSA-Prozesses

$$-\Delta H_{\text{R}}^{\circ} \geq -\Delta H_{\text{Ad}} + (1 - \eta_{\text{Int}}) \frac{c_p \Delta T}{\Delta \Theta_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

mindestens erfüllt sein muss, also die freigesetzte Reaktionswärme mindestens die Summe der Adsorptionswärme von CO<sub>2</sub> und der sensiblen Wärme zur Temperaturänderung des Feststoffs übersteigt. Eine allgemeinere Formulierung von Gl. (2) ist durch

$$q_{\text{ratio}} = \frac{\dot{Q}_{\text{R}}}{\dot{Q}_{\text{Ex}}} \geq 1 \quad (3)$$

gegeben, wo  $q_{\text{ratio}}$  das Verhältnis der freigesetzten Wärme ( $\dot{Q}_{\text{R}}$ ) zum Energiebedarf des Desorptionsschrittes ( $\dot{Q}_{\text{Ex}}$ ) darstellt. [9]

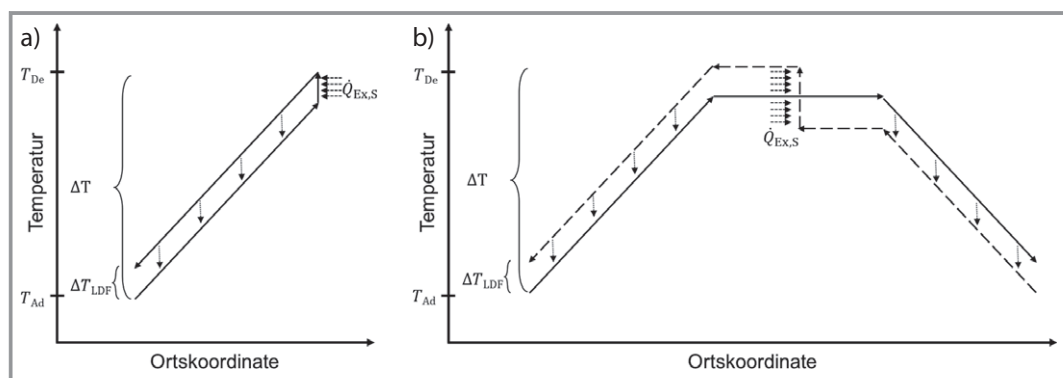
### 2.2 Energieintegrationskonzept

Das grundlegende Konzept zur Realisierung eines hohen Wirkungsgrads ( $\eta_{\text{Int}}$ ) der Rückgewinnung der sensiblen Wärme beruht auf einer Transformation des zyklisch stationären Zustands des Adsorptionsprozesses von der Zeit- auf die Ortskoordinate [9]. Diese ermöglicht einen direkten Gegenstromwärmeaustausch des Sorbens mit sich selbst über ein stationäres Transfermedium (Abb. 1a) oder alternativ einen indirekten Gegenstromwärmeaustausch mittels eines bewegten Transfermediums (Abb. 1b).

Abb. 1 visualisiert die sich einstellenden idealisierten Temperaturprofile des Sorbens während dessen Aufheizung und Abkühlung. Es zeigt sich, dass die extern zugeführte Energie ( $\dot{Q}_{\text{Ex,S}}$ ) für die Temperaturänderung des Sorbens nur noch dazu verwendet werden muss, das Letztere um die lineare Triebkraft des Wärmeaustausches ( $\Delta T_{\text{LDF}}$ ) (direkte Wärmeübertragung) bzw. um  $2\Delta T_{\text{LDF}}$  im Fall des indirekten Wärmeübertrags aufzuheizen.

### 2.3 Technische Realisierung

Neben der Gewährleistung eines hohen Grades an thermischer Integration müssen die betrachteten Verfahren die spezifischen Anforderungen für einen Einsatz als DAC-Einheit erfüllen. So erscheint es aufgrund des hohen Verhältnisses von Luftmolekülen zu CO<sub>2</sub> (2500:1) aus energetischer Sicht nicht sinnvoll, den thermophysikalischen Zustand der Luft zu verändern [5]. Dies impliziert, dass keine Verdichtung der



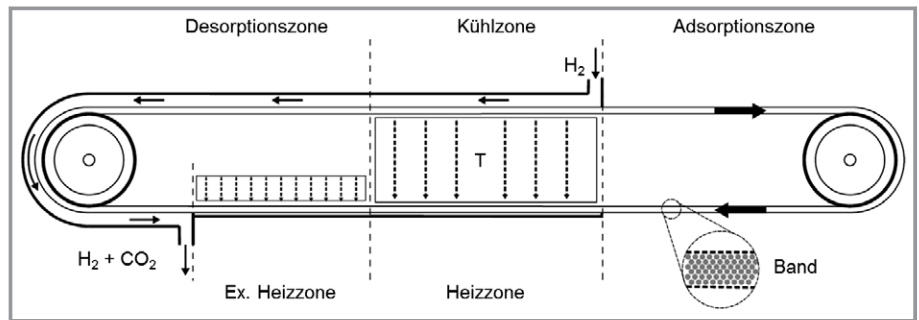
**Abbildung 1.** Idealisierte Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Sorbens durch einen a) direkten bzw. b) indirekten Wärmeaustausch des Sorbens mit sich selbst. Anstelle der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  muss nur Wärme ( $\dot{Q}_{\text{Ex,S}}$ ) zum Ausgleich des thermischen Schlupfes in der Feststoff- (–) und ggf. Transportmediumphase (– –) proportional zur Triebkraft der Wärmeübertragung ( $\Delta T_{\text{LDF}}$ ) dem System zugeführt werden. Energieflüsse sind mit (· ·) gekennzeichnet.

letzteren durchgeführt werden sollte. Somit wird der Stofftransport von  $\text{CO}_2$  zu und innerhalb der Verfahrenseinheiten von der natürlichen Konvektion der Luft abhängig. Folglich sollten die vorgestellten Konzepte geringe Druckverluste gewährleisten. Da sich somit eine direkte Durchströmung des Sorbensbetts als schwierig erweisen würde, müssen die Konzepte große freie Oberflächen zur atmosphärischen Luft bieten und gleichzeitig nur geringe Diffusionswege innerhalb des Sorbensbetts aufweisen, um diffusive Stofftransportlimitierungen zu minimieren.

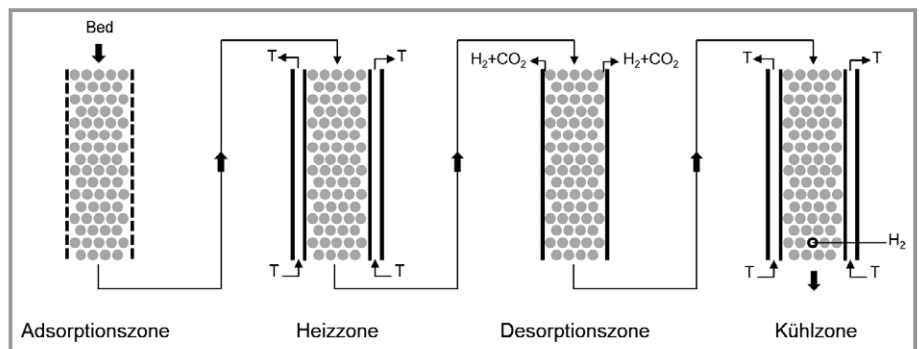
Zur Realisierung eines direkten Wärmeaustausches entsprechend Abb. 1a wird hier das Konzept eines Bandadsorbers, in dem die Sorbenspartikel physikalisch innerhalb einer sich bewegenden Bandstruktur immobilisiert sind, verfolgt [9]. Abb. 2 zeigt die wesentliche Struktur des Adsorberkonzeptes, welche in fünf Zonen unterteilt werden kann.

Nach der Adsorptionszone gelangt das Sorbens in die Heizzone, in der es im Gegenstromwärmeaustausch mit sich selbst, induziert durch ein festes Transfermedium (T) mit uniaxialer Wärmeleitfähigkeit, aufgeheizt wird. In der sich anschließenden externen Heizzone erfolgt die externe Wärmezufuhr mit dem Ziel, das Sorbens um die Triebkraft des Wärmetransfers ( $\Delta T_{\text{LDF}}$ ) zu erwärmen, bevor es in der Desorptionszone regeneriert wird. Abschließend passiert es die Kühlzone, in der dessen sensible Wärme zurückgewonnen wird. Hier ist zu beachten, dass das Strippgas ( $\text{H}_2$ ), das im Gegenstrom relativ zum Band strömt und in der Kühlzone eingeleitet wird, am Übergang zwischen Desorptions- und externer Heizzone die Einheit verlässt. Dies ermöglicht es, die gleichgewichtsbestimmte Triebkraft des Desorptionsprozesses bestmöglich auszunutzen und gleichzeitig höchstmögliche Kontaktzeiten zwischen dem Strippgas und Sorbens sicherzustellen.

Im Gegensatz zum Bandadsorberkonzept beinhaltet der in Abb. 3 skizzierte Wanderbettansatz als Realisierung des indirekten Wärmerückgewinnungskonzeptes (Abb. 1b) vier verschiedene Zonen. Nach der Adsorptionseinheit wird das Bett zunächst in einer Heizeinheit durch Gegenstromwärmeaustausch mit einem flüssigen Transfermedium auf Desorptionstemperatur aufgeheizt. In der nachfolgenden Desorptionszone erfolgt in Analogie zum Bandadsorberkonzept die Desorption von  $\text{CO}_2$  in ein im Gegenstrom geführtes Strippgas, das bereits in der sich anschließenden



**Abbildung 2.** Prinzipskizze eines Bandadsorberkonzeptes zur Realisierung einer direkten Wärmerückgewinnung über ein festes Transfermedium (T) mit uniaxialer Wärmeleitfähigkeit.



**Abbildung 3.** Prinzipskizze eines Wanderbettadsorberkonzeptes zur Realisierung einer indirekten Wärmerückgewinnung über ein flüssiges Transfermedium (T).

Kühleinheit mit den Sorbenspartikeln in Kontakt tritt. In letzterer erfolgt die Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Sorbens durch Gegenstrombetrieb mit dem flüssigen Transfermedium. Somit kann als wesentlicher konzeptioneller Unterschied zwischen den beiden Konzepten sowohl die Art des Wärmetransfers/Transfermediums als auch die Position des externen Wärmeertrages, die von einem direkten Wärmeertrag auf das Band in der externen Heizzone hin zu einer externen Aufheizung des flüssigen Transfermediums im Wanderbettkonzept variiert, genannt werden. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass im Wanderbettkonzept neben dem Temperaturwechsel ein Betrieb im leichten Unterdruckbereich ( $> 5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ) angestrebt wird.

### 3 Vergleich der Konzepte

Ein grundlegender Vergleich der vorgestellten Adsorberkonzepte für einen Betrieb mit dem Sorbens Lewatit VP OC 1065 [10] wird in Tab. 1 gegeben. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass beide Konzepte einen autothermen Betrieb ermöglichen ( $q_{\text{ratio}} > 1,1$ ), wobei für das Wanderbettkonzept der zusätzliche Energiebedarf für den Unterdruckbetrieb berücksichtigt wird. Ferner ist zu beachten, dass durch den indirekten Wärmetransfer in letzterem der Wärmeschlupf in einer Größenordnung von  $2\Delta T_{\text{LDF}}$  liegt, wohingegen im Bandadsorberkonzept externe Wärme

**Tabelle 1.** Vergleich zwischen dem Band- und Wanderbettadsorberkonzept. Die Bewertung erfolgt anhand der Skala: gut (+), neutral (o), schlecht (-).

	Bandadsorber	Wanderbettadsorber
Autothermalität	+	+
Thermische Integration	+	o
Wärmetransfer	+	o
Massentransfer	o	o
Größe	o	-
TVSA	o	+
Arbeitskapazität	o	+
Flexibilität	o	+

proportional zu  $\Delta T_{LDF}$  zur Temperaturänderung des Sorbens benötigt wird. Dieser Effekt wird hier zusätzlich durch die größere Tiefe des Wanderbettkonzeptes und damit bedingte höhere Temperaturgradienten innerhalb des Betts verstärkt. Nichtsdestotrotz erzielen beide Konzepte in den Simulationen eine Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Feststoffs von über 90 %.

Die in der Simulation ermittelten geringen Temperaturgradienten orthogonal zur Sorbensbewegungsrichtung von wenigen Kelvin deuten darauf hin, dass keine starken Wärmetransportlimitierungen vorliegen. Allerdings sei hier angemerkt, dass auch kleine Temperaturvariationen über die Betttiefe, verglichen mit der Zielsetzung einer Rückgewinnung der sensiblen Wärme des Feststoffs proportional zu dessen Temperaturänderung von wenigen Kelvin, einen hohen Einfluss auf die Energiebilanz des Gesamtkonzeptes haben können.

Aufgrund der Überströmung des Sorbensbetts zur Vermeidung hoher Druckverluste in der Adsorptionszone ist der Stofftransport innerhalb des Betts diffusionsbestimmt. Hier zeigt sich, dass hohe Stofftransportlimitierungen diffuser Art, begründet durch den geringen Molanteil an  $\text{CO}_2$  in atmosphärischer Luft, vorliegen. Bedingt durch letztere und das Bestreben, einen hohen Grad der Rückgewinnung der sensiblen Wärme zu erreichen, werden auch bei kleinen Bettiefen ( $\sim 1$  cm) lange Zykluszeiten in einer Größenordnung von 10 h benötigt, die durch Vergleichsweise kleine Feststoffgeschwindigkeiten ( $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ) und große Längen der modellierten Konzepte mit 30 m (Bandadsorber) bzw. 50 m (Wanderbett) realisiert werden.

Die Realisierung eines Temperatur-Vakuumwechsel-Adsorptionsprozesses (TVSA) scheint durch die einfache Implementierung einer gasdichten Schleuse für die Sorbenspartikel im Fall des Wanderbettadsorbers einfacher möglich zu sein als im Bandadsorberkonzept. Dies impliziert, dass eine Erhöhung der Arbeitskapazität bei einer maximalen, durch die Stabilität des Sorbens bestimmten, Desorptions-temperatur [11] durch eine zusätzliche Absenkung des

Betriebsdruckes eher im Wanderbettkonzept zu realisieren ist. Letztere kann insbesondere von Bedeutung sein, falls die Gleichgewichtsbeladung des Sorbens bei maximaler Betriebstemperatur keine Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Molanteils in der Gasphase auf das für die Sabatier-Reaktion stöchiometrisch bedingte Verhältnis von 1:4 ( $\text{CO}_2$ : $\text{H}_2$ ) ermöglicht oder dies nur bei geringen Arbeitskapazitäten erreicht wird.

Aus betriebstechnischer Sicht ist ferner die Flexibilität der dargestellten Konzepte von Bedeutung. Neben dem design-technischen Aspekt einer unabhängigen Festlegung der Heiz- und Kühlzonenlänge verfügt das Wanderbettkonzept durch die Betriebsparameter des flüssigen Wärmetransfermediums und dessen externe Beheizung über zusätzliche Stellgrößen. Auch eröffnet die Möglichkeit eines Feststofftransports zwischen den Betriebszonen eine einfache Aufteilung letzterer in separate Teilbetriebseinheiten sowie einen einfachen Austausch des Sorbens. Allerdings müssen diese Vorteile unter dem Aspekt des zusätzlichen Aufwands des Feststofftransports und einer möglichen höheren Abnutzung der Sorbenspartikel betrachtet werden.

Verglichen mit alternativen Wärmeintegrationskonzepten, wie bspw. der thermischen Kopplung mehrerer zeitlich zyklisch betriebener Absorber mittels Thermoöl [12], ermöglichen die dargestellten Ansätze einen kontinuierlichen Produktstrom und auch die Realisierung des Wärmeaustausches innerhalb einer Verfahreseinheit, die den logistischen Aufwand der Kopplung mehrere Adsorbereinheiten vermeidet und zusätzliche Wärmeverluste minimiert. Eine weitere Verringerung letzterer verglichen mit statischen Adsorberkonzepten kann ferner durch die sich einstellenden räumlich stationären Temperaturprofile erzielt werden, durch die Temperaturänderungen im Wesentlichen auf den Gas- und Feststoffstrom begrenzt werden, so dass bspw. das Aufheizen und Abkühlen des Adsorbermantels entfällt. Unter dem Gesichtspunkt einer Realisierung sehr hoher Wirkungsgrade der thermischen Integration zeigt zudem eine vereinfachte Betrachtung des thermischen Schlupfes, dass die direkte thermische Kopplung im Vergleich zur indirekten Wärmeintegration durch ein fluides Transfermedium den Vorteil eines nur halb so großen Wärmeverlustes von  $\Delta T_{LDF}$  aufweisen kann.

Auch wenn der Einsatz dynamischer Konzepte auf den ersten Blick viele Vorteile ermöglichen kann, erschwert jedoch insbesondere der höhere technische Aufwand einer Bewegung des Feststoffs dessen Realisierung im allgemeinen Vergleich zu statischen Konzepten. Zwar zeigt der Einsatz von bspw. Rotoradsorbern [13], dass eine Bewegung des Sorbens in technischen Anwendungen sinnvoll sein kann, jedoch bedarf es weiterer kostenbasierter Studien, um dies für die vorgestellten Konzepte abschätzen zu können. Die prinzipbedingte Ähnlichkeit zwischen den entwickelten Ansätzen und konventionellen Rotoradsorbern lässt erahnen, dass sowohl eine DAC-Anwendung letzterer als auch eine Übertragung der in Abb. 1 dargestellten Energieintegrationskonzepte auf diese möglich erscheint. Jedoch würden bei vergleichbaren Umfangsgeschwindigkeiten und Zykluszeiten

sehr große Adsorberdurchmesser benötigt werden, was eine technische Realisierung erschwert. Hier ergibt sich insbesondere die Problematik steigender Wärmetransportlimitierungen bei großen Rotorabmessungen bzw. höherer leitfähigkeitsbedingter Wärmeschlüpfe bei kleinen Umfangsgeschwindigkeiten. Im Speziellen würde eine Übertragung des direkten Wärmeaustauschkonzeptes (Abb. 1) auf Rotoradsorber ein Wärmetransfermedium im inneren des Rotors oder entlang dessen Oberfläche voraussetzen. Im ersten Fall ergibt sich im Wesentlichen das Design eines Bandadsorbers, wo hingegen der letztere Fall vergleichsweise lange Strecken der Wärmeübertragung aufweist, die mit erhöhten Wärmeverlusten und Kosten für das Transfermedium einhergehen. Eine konventionelle Alternative könnte in diesem Zusammenhang durch einen wärmeintegrierten Rotoradsorber mit Heißgasdesorption [13] gegeben sein. Hier stellen jedoch insbesondere die benötigten hohen Aufkonzentrierungsfaktoren (> 500) Herausforderungen bei einer einstufigen Realisierung dar.

Es zeigt sich, dass beide vorgestellten Ansätze aus technischer Sicht ein hohes Potenzial für eine Anwendung als hoch-wärmeintegrierte Adsorberkonzepte für DAC-Anwendungen aufweisen und die dargestellten Konzepte der Energieintegration sich prinzipiell auf bereits existierende dynamische Adsorberkonfigurationen übertragen lassen. Eine sich dieser Studie anschließende kostenbasierte Optimierung der vorgestellten Ansätze wird angestrebt, um Aussagen über deren Umsetzbarkeit unter wirtschaftlichen Aspekten zu treffen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden hoch-wärmeintegrierte Adsorberkonzepte für eine Anwendung in DAC-Verfahren mit besonderem Fokus einer Integration mit einer PtG-Technologie zum Gesamtdesign eines autothermen Prozesses untersucht. Die hier zusammengefassten Ergebnisse detaillierter Simulationen erlauben den Vergleich eines direkten Rückgewinnungskonzeptes für die sensible Wärme des Sorbens mittels eines im TSA-Betrieb arbeitenden Bandadsorbers mit einem indirekten Konzept zur thermischen Integration innerhalb einer Adsorbereinheit in Form eines TVSA-Wanderbettadsorberkonzeptes. Insgesamt zeigen beide Verfahren ein hohes Potenzial zur Realisierung des autothermen Gesamtprozesses unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen, die durch den Einsatz als DAC-Einheit bedingt werden. Ausgehend von dem hier dargestellten technischen Vergleich der Konzepte gilt es, diese in einer kostenbasierten Analyse des Gesamtprozesses zu vergleichen. Neben einer Optimierung der Betriebs- und Designparameter soll hierzu des Weiteren der Einfluss der Koadsorption von Wasser (Luftfeuchte) auf den Prozess betrachtet und Maßnahmen gegen die vorgefundene Stofftransportlimitierung in der Adsorptionszone entwickelt werden.

#### Formelzeichen

$c_p$	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Wärmekapazität
$q_{\text{ratio}}$	[-]	Energieverhältnis
$\dot{Q}_{\text{Ex}}$	[W]	benötigte Energie für den Desorptionsprozess
$\dot{Q}_{\text{Ex,S}}$	[W]	benötigte Energie zur Temperaturänderung des Sorbens
$\dot{Q}_{\text{R}}$	[W]	bereitgestellte Energie durch die Sabatier-Reaktion
$T_{\text{Ad}}$	[K]	Adsorptionstemperatur
$T_{\text{De}}$	[K]	Desorptionstemperatur

#### Griechische Symbole

$\Delta H_{\text{Ad}}$	[J mol <sup>-1</sup> ]	Adsorptionswärme
$\Delta H_{\text{H}}^{\circ}$	[J mol <sup>-1</sup> ]	Reaktionswärme
$\Delta T$	[K]	Temperaturdifferenz zwischen Ad- und Desorption
$\Delta T_{\text{LDF}}$	[K]	Triebkraft der Wärmeübertragung
$\Delta \Theta_{\text{CO}_2}$	[mol kg <sup>-1</sup> ]	Arbeitskapazität
$\eta_{\text{int}}$	[-]	Wirkungsgrad der thermischen Integration

#### Abkürzungen

DAC	Direct Air Capture
NET	negative Emissionstechnologie
PtG	Power-to-Gas
TSA	Temperaturwechsel-Adsorption
TVSA	Temperatur-Vakuumwechsel-Adsorption

#### Literatur

- [1] *Paris Agreement*, United Nations, 2015. [https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch\\_XXVII-7-d.pdf](https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf)
- [2] J. Rogel, G. Luderer, R. C. Pietzcker, E. Kriegler, M. Schaeffer, V. Krey, K. Riahi, *Nat. Clim. Change* 2015, 5 (6), 519–527. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2572>
- [3] A. Marcucci, S. Kypreos, E. Panos, *Clim. Change* 2017, 144 (2), 181–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2051-8>
- [4] S. Fuss, C. D. Jones, F. Kraxner, G. P. Peters, P. Smith, M. Tavoni, D. P. van Vuuren, J. G. Canadell, R. B. Jackson, J. Milne, J. R. Moreira, N. Nakicenovic, A. Sharifi, Y. Yamagata, *Environ. Res. Lett.* 2016, 11 (11), 115007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/115007>
- [5] K. S. Lackner, H. J. Ziocck, P. Grimes, in *Proc. of the 24th Int. Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems* (Eds: B. A. Sakkestad), Coal & Slurry Technology Association, Washington, DC 1999.
- [6] R. Socolow, M. Desmond, R. Aines, J. Blackstock, O. Bolland, T. Kaarsberg, N. Lewis, M. Mazzotti, A. Pfeffer, K. Sawyer, J. Siirola, B. Smit, J. Wilcox, *Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals: A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs*, American Physical Society, College Park, MD 2011.

- [7] K. S. Lackner, S. Brennan, J. M. Matter, A.-H. A. Park, A. Wright, B. van der Zwaan, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2012**, *109* (33), 13156–13162. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1108765109>
- [8] T. Wang, K. S. Lackner, A. B. Wright, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2013**, *15* (2), 504–514. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2CP43124F>
- [9] C. Drechsler, D. W. Agar, *Comput. Chem. Eng.* **2019**, *126*, 520–534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.023>
- [10] R. Veneman, *Adsorptive systems for post-combustion CO2 capture design, experimental validation and evaluation of a supported amine based process*, Ph.D. Thesis, University of Twente **2015**.
- [11] Q. Yu, J. de la P. Delgado, R. Veneman, D. W. F. Brilman, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2017**, *56* (12), 3259–3269. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04645>
- [12] G. S. Duarte, B. Schürer, C. Voss, D. Bathen, *Chem. Ing. Tech.* **2016**, *88* (3), 336–345. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201500031>
- [13] G. Konrad, G. Eigenberger, *Chem. Ing. Tech.* **1994**, *66* (3), 321–331. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.330660305>