



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Technische Sorptionsprozesse für energetische Anwendungen (TSEA)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Industrielle Prozesse
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur (HSLU T&A)
CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik (CC TEVT)
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch/tevt

Autoren:

Stefan Krimmel, Dipl.-Ing., Hochschule Luzern, stefan.krimmel@hslu.ch
Tobias Käch, BSc in Maschinentechnik, Hochschule Luzern, tobias.kaech@hslu.ch
Prof. Dr. Mirko Kleingries, Hochschule Luzern, mirko.kleingries@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Carina Alles
BFE-Programmleiter:	Dr. Carina Alles
BFE-Vertragsnummer:	SI/501146-01

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

Vorwort

Das im nachfolgenden Bericht dokumentierte Projekt wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) durchgeführt.

Wir bedanken uns herzlich beim BFE, insbesondere bei Frau Dr. Carina Alles für die Betreuung des von Ihren Vorgängern, dem ehemaligen BFE-Bereichsleiter Herrn Martin Pulfer sowie dem ehemaligen Leiter des Forschungsprogramms „Industrielle Prozesse“ Herrn Dr. Michael Spirig, mitinitiierten Projektes.

Ein besonderer Dank gilt Frau Heike Schreiber vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH-Aachen und Herrn Florian Brunner von der Brunner Energieberatung GmbH, für die sehr hilfreichen Beiträge bei den zwei durchgeführten Begleittreffen.

Horw, im Juli 2016
Hochschule Luzern – Technik & Architektur
CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 sind die Absenkung von CO₂-Emissionen und des Primärenergiebedarfs zu politischen Zielen der Schweiz geworden. Die Strategie zur Erreichung der Ziele im Industriesektor beinhaltet unter anderem die Steigerung der Energieeffizienz und die Integration von regenerativen Energien in industrielle Prozesse. Sorptionsprozessen wird ein Potenzial zugesprochen, eine zeitnahe und wirtschaftliche Umsetzung der Strategie zu unterstützen.

Die Sorptionsprozesse sind mit dem Schwerpunkt auf der Adsorption in den Grundzügen erklärt und in vier Sorptionskategorien eingeteilt, deren technische Umsetzungen anwendungsorientiert aufgezeigt werden. Eine Stoffdatenbank fasst die Stoffdaten der gesichteten Fachliteratur zusammen und kann digital angefordert werden.

Das energetische Potenzial der Sorptionskategorien ist quantitativ angenähert und auf die Schweiz hochgerechnet. Drei berechnete Praxisbeispiele von Trocknungsprozessen zeigen, dass Sorptionsprozesse zu einer höheren Prozessqualität bei gemindertem Energiebedarf führen können und unter bestimmten Rahmenbedingungen wirtschaftlich umsetzbar sind.

Es liessen sich keine allgemeingültigen Rahmenbedingungen bestimmen, die in jedem Falle einen energetischen und ökonomischen Vorteil des Einsatzes von Sorptionsprozessen gegenüber alternativen Methoden mit sich bringen. Es werden daher die Rahmenbedingungen genannt, die ein hohes energetisches und ökonomisches Potenzial der Sorptionsprozesse unterstützen.

Abstract

In the context of the energy strategy 2050, the reduction of CO₂ emissions and primary energy demand becomes a political target of Switzerland. The strategy for achieving the targets in the industrial sector relies on, among others, increasing energy efficiency and integrating renewable energy in industrial processes. Sorption processes can support the prompt and economic implementation of this strategy.

The Sorption processes are divided into four categories of sorption and explained with a focus on the main features of the adsorption, also the related practical applications will be shown. A material database summarizes the data of the reviewed literature and will be made available in a digital format. The energy potential of the sorption classes is quantitatively approximated and extrapolated to the potential impact in Switzerland. Three practical examples show that Sorption processes in the field of drying processes from both technical and economic reasons are currently feasible under narrow conditions.

No general conditions without a detailed analysis of the overall process could be determined that would in any case allow for an energetic and economic advantage compared to alternative methods. Therefore, conditions are specified, which generally support a high energetic and economic potential of the sorption process.

Résumé

Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050, la réduction des émissions de CO₂ et de demande en énergie primaire est devenue un objectif politique de la Suisse. La stratégie pour atteindre les objectifs dans le secteur industriel, comprend entre autres l'augmentation de l'efficacité énergétique et l'intégration des énergies renouvelables dans les procédés industriels. Les procédés de sorption offrent un certain potentiel pour une implémentation rapide et économique de la stratégie.

Les processus de Sorption sont répartis en quatre classes de sorption et décrits succinctement en mettant l'accent sur leur réalisation technique. Une base de données rassemble les données des matériaux qui ont été identifiés lors d'une recherche littéraire. Celle-ci pour être commandé sous forme digitale.

Le potentiel énergétique des différentes classes de sorption est estimé quantitativement et extrapolé à la Suisse. Trois exemples concrets montrent que les procédés de sorption dans le domaine de séchage ne sont actuellement réalisables que dans des conditions étroites pour des raisons techniques et économiques.

D'une manière générale, il n'a pas été possible de définir des conditions d'exploitation qui assurent à tous les coups un avantage énergétique et économique pour les systèmes à sorption par rapport aux méthodes classiques. Ce rapport s'efforce à décrire les conditions d'exploitation, qui aident à obtenir un haut potentiel énergétique et économique pour les systèmes à sorption.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	6
SYMBOLVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG.....	9
1.1. AUSGANGSLAGE	9
1.2. ZIEL UND METHODIK DER STUDIE.....	9
2 GRUNDLAGEN ZU SORPTIONSPROZESSEN.....	10
2.1. BEGRIFFSDEFINITIONEN.....	10
2.2. THERMODYNAMIK DER SORPTION	13
2.3. SORBENTIEN	17
2.4. REAKTORBAUARTEN	21
3 STOFFDATENBANK	23
3.1. STRUKTUR DER DATENBANK	23
3.2. VISUALISIERUNG DER DATEN.....	25
3.3. ZUSAMMENFASSUNG	26
4 FUNKTIONSWEISE DER SORPTIONSPROZESSE	27
4.1. WÄRMETRANSFORMATION.....	27
4.2. THERMISCHE ENERGIESPEICHERUNG.....	30
4.3. STOFFTRENNUNG.....	36
4.4. STOFFTRENNUNG UND WÄRMETRANSFORMATION.....	39
4.5. STOFFSPEICHERUNG	47
4.6. ZUSAMMENFASSUNG	50
5 KLASSIFIZIERUNG	51
5.1. KLASSIFIZIERUNG VON INDUSTRIELLEN PROZESSEN	51
5.2. KLASSIFIZIERUNG VON SORPTIONSPROZESSEN	52
6 POTENZIALE	55
6.1. EINORDNUNG DES ENERGIEBEDARFS DER INDUSTRIE.....	55
6.2. ENERGETISCHE OPTIMIERUNG.....	56
6.3. ABWÄRMEPOTENZIAL DER INDUSTRIE	58
6.4. UMFRAGE ZUM POTENZIAL.....	60
6.5. POTENZIALE DER SORPTIONSKLASSEN	60
6.6. ZUSAMMENFASSUNG	65
7 QUANTIFIZIERTE PRAXISBEISPIELE	67
7.1. KONVEKTIONSTROCKNER.....	67
7.2. KONTAKT- UND PRALLSTRAHLTROCKNUNG	72
7.3. SPRÜHTROCKNER.....	77
7.4. ZUSAMMENFASSUNG	81
8 FAZIT	83
9 AUSBLICK	85
LITERATURVERZEICHNIS	87
ANHANG	91

Abkürzungsverzeichnis

AKM	Ad-/Absorptionskältemaschine
AWP	Ad-/Absorptionswärmepumpe
BET	benannt nach: Stephen <u>B</u> runauer, Paul <u>E</u> mmett und Edward <u>T</u> eller
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIO	Biologisch
CaA	Bezeichnung für ein Molekularsieb 5A
Camp	Combined adsorption membrane process
CHF	Schweizer Franken
COP	Coefficient of Performance
CSA	Composition Swing Ad-/Absorption
DWS	Druckwechsel-Sorption
EER	Energy Efficiency Ratio
ERG	Energierückgewinnung
HT	Hochtemperatur
HWT	Haftwassertrockner
HiL	Hardware in the Loop
IAST	Ideal Adsorbed Solution Theory
iWRG	interne Wärmerückgewinnung
KVA	Kehrrichtverbrennungsanlage
KWS	Konzentrationswechsel-Sorption
LKW	Lastkraftwagen
LTT	Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
MIX	Mischkammer
MOF	Metallorganische Gerüstverbindungen
NFPA	National Fire Protection Association
NMVOC	non-methane-volatile organic compounds
PSA	Pressure Swing Ad-/Absorption
PVC	Polyvinylchlorid
r. F.	relative Feuchte der Luft
RAST	Real Adsorbed Solution Theory
RNV	Regenerative thermische Nachverbrennung
SCA	Simplified Competitive Adsorption
TRL	technologischer Reifegrad
TSA	Temperature Swing Ad-/Absorption
TWS	Temperaturwechsel-Sorption
UBP	Umweltbelastungspunkt(e)
VCM	Vacancy Solution Model
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige Kohlenwasserstoffe)
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜ	Wärmeübertrager
ZAE	Zentrum für Angewandte Energieforschung

Symbolverzeichnis

d	Durchmesser	m
Δh	spezifische Enthalpie	kJ/kg
e	spezifischer Energiebedarf	kJ/kg
E	Energiebedarf	kJ
ε	Porosität	-
η	Wirkungsgrad	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
p	Druck	bar
φ	relative Feuchte	-
Q	Energie/Wärme	kJ
R	Verhältnis des Energiebedarfs zum Referenzfall	-
T	Temperatur	°C, K
w	Massenanteil	kg/kg _{Gesamt}
X	Beladung Festkörper	kg/kg _{Bezug} , mol/mol _{Bezug}
Y	Beladung Gasphase	kg/kg _{Bezug} , mol/mol _{Bezug}

Indizes

0	niedrigstes Temperaturniveau
1	mittleres Temperaturniveau
2	höchstes Temperaturniveau
2	Austritt
0.K	Kondensator auf niedrigem Temperaturniveau
0.V	Verdampfer auf niedrigem Temperaturniveau
A,Sorptiv	(Partialdruck des Sorptivs) an der Oberfläche des Sorbens
abs	absolut
AG	Aktiengesellschaft
aus	Austritt
aussp.	Ausspeichern
B	Bindungsenthalpie
D	Dampf
Des	Desorption
ein	Eintritt
einsp.	Einspeichern
el	elektrisch
end,el	elektrische Endenergie
end,th	thermische Endenergie
HiL	Hardware in the Loop
i	beliebige Komponente i
K	Kondensationsenthalpie
K	Kondensator
L	Schüttung
L	Luft

max	Maximum
min	Minimum
P	Korn
p	isobar (spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck)
Prim	Primärenergie
recirc	Rezirkulation
S	Sättigung
S	Sorptionsenthalpie
th	thermisch
U	Umgebung
V	Verdampfungsenthalpie
V	Verdampfer
W	Wasser
Zeol	Zeolith

1 Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die energiepolitischen Ziele der Schweiz verfolgen unter anderem eine Reduktion der CO₂- und Schadstoffemissionen bei einer weiterhin zuverlässigen Energieversorgung. Die Ziele sollen über die Massnahmen des Aktionsprogramms „EnergieSchweiz 2013 - 2020“ erreicht werden, welche im Wesentlichen eine Reduktion des Energiebedarfes durch Steigerung der Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien verfolgen [1]. Das Aktionsprogramm ist integraler Bestandteil des Massnahmenkatalogs der Strategie 2050, welche einen schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie vorsieht.

In dem Industriesektor benötigen die Bereiche *Prozesswärme* (86 PJ/a) sowie *Antriebe & Prozesse* (40 PJ/a) rund drei Viertel des Energiebedarfs des Industriesektors und 16% des gesamten inländischen Energiebedarfs. Um die Ziele des Aktionsplans Energiestrategie 2050 im Sektor *Industrie* effizient umzusetzen, wird die Optimierung der Energieeffizienz in diesen beiden Bereichen forciert. Bei der energetischen Optimierung von industriellen Prozessen wird dabei ein immer grösserer Fokus auf die Integration von Sorptionsprozessen gerichtet [2].

Sorptionsprozesse werden seit dem 20. Jahrhundert wissenschaftlich begleitet. Trotz einer stetig wachsenden Anzahl an industriellen Sorptionsprozessen werden für Forschung und Entwicklung noch grosse Potenziale gesehen, da der Prozess als unzureichend verstanden und schwer zu berechnen gilt [3].

Sorptionsprozesse versprechen für den Industriesektor in den Bereichen der *Prozesswärme* sowie *Antriebe & Prozesse* Einsparpotenziale, jedoch ist aktuell kein Bericht bekannt, der einen Überblick über das energetische Potenzial der Sorptionsprozesse für industrielle Prozesse beinhaltet. Die bekannte Literatur behandelt in der Regel nur einen Teilaspekt der Technik oder ein konkretes Anwendungsgebiet.

1.2. Ziel und Methodik der Studie

Diese Studie analysiert das Potenzial von Sorptionsprozessen in energetischen Anwendungen und soll einen Überblick zu deren Stand der Technik, Herausforderungen sowie Varianten der Integration in industrielle Prozesse geben. Dabei sollen die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsfelder identifiziert und Methoden aufgezeigt werden, wie die Prozessintegration gestaltet werden kann.

Es werden die Grundlagen der Sorptionsprozesse erläutert und anhand von Anwendungsbeispielen die energetischen Potenziale aufgezeigt. Anhand des Nutzens des Sorptionsprozesses für den Gesamtprozess, werden die Sorptionsprozesse in vier Sorptionskategorien eingeteilt, für die das energetische Potenzial bestimmt und auf die Schweiz exemplarisch hochgerechnet wird. Die bei der Recherche ermittelten Stoffdaten sind in einer Stoffdatenbank zusammengetragen, die über die Hochschule Luzern – Technik & Architektur erhältlich ist.

Drei Schweizer Unternehmen stellen Daten von Trocknungsprozessen zur Verfügung, in die jeweils beispielhaft ein Sorptionsprozess integriert wird. Dazu wird das jeweilige Anlagenschema in einem Fließbild dargestellt und auf die Integrationsmöglichkeiten eines Sorptionsprozesses hin analysiert. Für den qualitativ bestimmten optimalen Sorptionsprozess wird das ökonomische und energetische Potenzial quantifiziert.

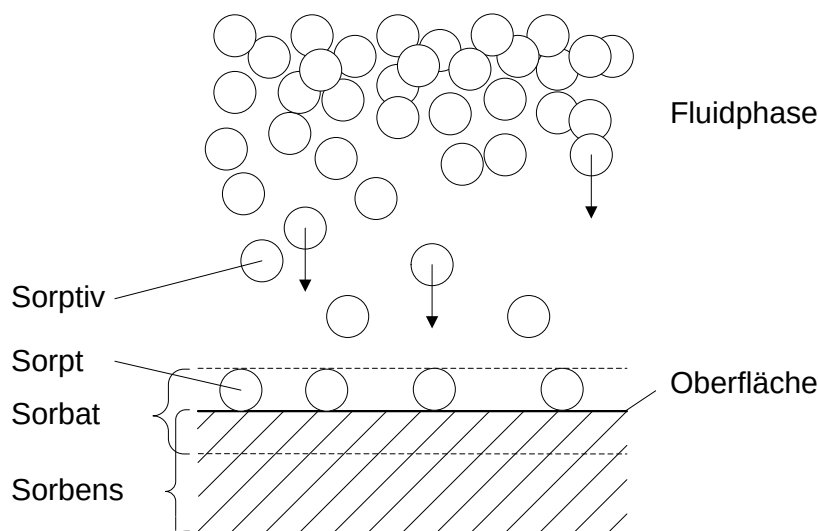
2 Grundlagen zu Sorptionsprozessen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Mechanismen von Sorptionsprozessen vorgestellt. Ziel ist es, die Grundlagen zu vermitteln, um Vor- und Nachteile sowie Herausforderungen von Sorptionsprozessen in energetischen Anwendungen bewerten zu können.

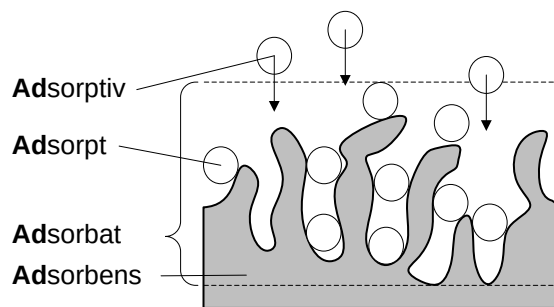
2.1. Begriffsdefinitionen

Zur sprachlich präzisen Beschreibung von Sorptionsprozessen werden die in Abbildung 3 aufgeführten Fachbegriffe verwendet und am Beispiel der Physisorption erläutert. Im Anschluss werden Begriffe der allgemeinen Thermodynamik erläutert, die für die Beschreibung der Thermodynamik der Sorptionsprozesse Verwendung finden.

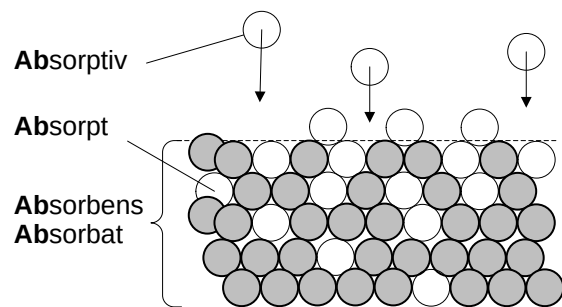
Die bei der Beschreibung des allgemeinen Sorptionsprozesses fehlenden Präfixe **Ad-** und **Ab-** werden entsprechend der nachfolgenden Definition und gemäss Abbildung 1 b und c verwendet.



a) Begriffsdefinition beim Sorptionsprozess



b) Schematische Darstellung und angepasste Begriffe der Adsorption



c) Schematische Darstellung und angepasste Begriffe der Absorption

Abbildung 1: Schematische Darstellungen und Definition der Begriffe des Sorptionsprozesses an der Stoffgrenze

Sorption

Sorption beschreibt den allgemeinen Fall, dass ein Fremdstoff bei einem anderen Stoff an- oder eingelagert wird.

Sorptiv

Der bisher als Fremdstoff bezeichnete Stoff wird in der Fluidphase „Sorptiv“ genannt. In der in Abbildung 1 gewählten Darstellung ist ein Einkomponentenfluid dargestellt, somit entsprechen alle Moleküle des Fluids dem Sorptiv. Bei einem Mehrkomponentenfluid werden nur die Moleküle Sorptiv genannt, die sich im/am Sorbens anreichern, dies können je nach Stoffpaarung eine bis alle

Komponenten des Fluids sein. In diesem Falle ist es notwendig, die einzelnen Sorptive weiter zu präzisieren (Sorptiv A, Sorptiv B), da die Prozesseigenschaften für jede Stoffpaarung (Sorptiv – Sorbens) unterschiedlich sind.

Sorbens (pl. Sorbentien)

Als Sorbens wird der Stoff bezeichnet, der beim Ad-/Absorptionsprozess den Fremdstoff aufnimmt und beim Desorptionsprozess abgibt. Das Sorbens wird auch **Sorptionsmittel** genannt.

Sorpt

Ist das Sorptiv an das Sorbens gebunden, so wird es Sorpt genannt. Sorpt und Sorptiv sind somit Moleküle eines Stoffes, befinden sich aber im Falle des Sorptivs in der abgebenden Fluidphase und sind im Falle des Sorpts an dem Sorbens gebunden.

Absorption

Als **Absorption** wird die Einlagerung eines Fremdstoffes in eine zumeist flüssige Phase bezeichnet. Es findet ein Stofftransport des Sorpts im Sorbens statt.

Adsorption

Als **Adsorption** wird die Anlagerung eines Fremdstoffes an einer festen Phase bezeichnet.

Desorption

Für die Ab- und Adsorption wird der Umkehrprozess **Desorption** genannt.

Sorbat

Der Bereich, in dem Sorpt und Moleküle des Sorbens in Wechselwirkung stehen, wird Sorbat genannt. Im Falle der Adsorption ist dies der Bereich auf der Oberfläche. Im Falle der Absorption entspricht in der Regel das Absorbat dem Absorbens mit einer Beladung ungleich Null. Bei einer schlechten Durchmischung und gehemmten Diffusionsvorgängen in der Flüssigkeit kann das Absorbat ebenfalls nur im oberflächennahen Bereich vorliegen.

Desorbat

Ein- oder Mehrkomponentenfluid in der Umgebung des Sorbens, welches bei der Desorption das Sorptiv aufgenommen hat.

Physisorption

Die Bindungskräfte im Sorbat werden von intermolekularen Kräften ohne Elektronenübergang dominiert (sowohl bei der Ab- wie auch bei der Adsorption). Diese Kräfte sind:

- Dipolkräfte
- Dispersionskräfte
- Induktionskräfte

Die technisch relevanten Sorptionsprozesse für energetische Anwendungen beruhen im Wesentlichen auf der Physisorption.

Chemisorption

Bei der Chemisorption liegt im Sorbat eine chemische Bindung vor. Die Bindung erfolgt durch einen Elektronenübergang zwischen dem Sorpt und dem Sorbens.

Prozesse mit Chemisorption werden unter wirtschaftlichen Bedingungen meist irreversibel gefahren, da die Desorption bei der Chemisorption in industriellen Prozessen nur selten wirtschaftlich durchführbar [3]. Das beladene Sorbens wird bei vollständiger Beladung entsorgt und durch neues Material ersetzt.

Für energetische Sorptionsprozesse ist die Chemisorption auf Grund der häufig irreversiblen Prozessführung von untergeordneter Bedeutung. Verwendung findet die Chemisorption insbesondere bei sogenannten Polizeifiltern, als letzte Stufe einer Gaswäsche.

Einkomponentenprozess

Ein Sorptionsprozess, bei dem nur ein Stoff beziehungsweise eine Komponente der Fluidphase über Bindungskräfte in Wechselwirkung zum Sorbens steht.

Mehrkomponentenprozess

Ein Sorptionsprozess, bei dem mehrere Stoffe beziehungsweise Komponenten des Fluids über Bindungskräfte in Wechselwirkung zum Sorbens stehen. Die Bindungskräfte der einzelnen Komponenten zum Sorbens beeinflussen sich gegenseitig und lassen sich mit derzeitigen Modellen nicht beschreiben. Dominieren die Bindungskräfte einer Komponente gegenüber denen der restlichen Komponenten, wird daher zur Vereinfachung der analytischen Beschreibung des Prozesses, die Betrachtung auf die dominante Komponente reduziert.

Sättigungsdampfdruck $p_s(T)$ [bar]

Gasdruck, der sich in einem geschlossenen System mit einem Reinstoff einstellt, wenn Gas- und Flüssigphase des Stoffes im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Der Dampfdruck ist temperaturabhängig.

Partialdruck $p_i(T)$ [bar]

Druck, den eine Komponente in einem idealen Gasgemisch einnimmt. Die Summe aller Partialdrücke der jeweiligen Komponenten i entspricht dem Gesamtdruck, der temperaturabhängig ist.

Spez. Verdampfungsenthalpie v_{h_v} [kJ/kg]

Energie, die erforderlich ist, um ein Kilogramm eines Stoffes von der Flüssig- in die Gasphase zu überführen. Sie ist gleich der negativen spez. Kondensationsenthalpie.

Spez. Kondensationsenthalpie v_{h_k} [kJ/kg]

Energie, die frei wird, wenn ein Kilogramm eines Stoffes von der Gas- in die Flüssigphase überführt wird. Sie ist gleich der negativen spez. Verdampfungsenthalpie.

Spez. Bindungsenthalpie v_{h_b} [kJ/kg]

Energie, die pro Kilogramm eines Stoffes zur vollständigen Aufspaltung der intermolekularen Bindung aufgewendet werden muss.

Spez. Sorptionsenthalpie v_{h_s} [kJ/kg]

Energie, die pro Kilogramm Sorptiv umgesetzt wird, um dieses vom/aus dem Sorbat zu lösen. Sie entspricht der Summe aus der spezifischen Verdampfungs- und der spezifischen Bindungsenthalpie. Wird beim Umkehrprozess (Ad-/Absorption) das Sorptiv am/im Sorbens gebunden, bedeutet dies für das Sorptiv einen Verlust an Bewegungsenergie, welche in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird.

Massenanteil w_i [kg_i/kg_{Gesamt}]

Die Masse einer Komponente im Verhältnis zur Gesamtmasse eines Stoffgemisches.

Beladung X_i oder Y_i [kg_i/kg_{Bezug}; mol_i/mol_{Bezug}]

Massen-/Molanteil eines Stoffes bezogen auf die Masse/Molzahl einer Bezugskomponente. X wird für feste, Y für gasförmige Stoffe verwendet. Die Beladung wird analog zur Beladung feuchter Luft wie folgt berechnet:

$$X_i = \frac{m_i}{m_{\text{Sorbens}}} = \frac{\text{aufgenommene Sorptivmasse [kg]}}{\text{unbeladene Sorbensmasse [kg]}}$$

Alternativ gilt für die molare Beladung:

$$X_i = \frac{n_i}{n_{\text{Sorbens}}} = \frac{\text{aufgenommene Stoffmenge Sorptiv [mol]}}{\text{unbeladene Stoffmenge Sorbens [mol]}}$$

Sorptionskategorien

Bei einem Sorptionsprozess findet immer eine Trennung/Verbindung von mindestens zwei Stoffen statt, bei der Energie frei/benötigt wird. In Abhängigkeit des wesentlichen Nutzens, auch wenn dieser zum Teil nicht klar identifizierbar ist, werden die Sorptionsprozesse den Sorptionskategorien zugeordnet, siehe Tabelle 1.

Name	Beschreibung: Der Sorptionsprozess wird durchgeführt, um...
Wärmetransformation	...beim Ad-/Absorptionsprozess die freiwerdende Sorptionsenthalpie oder das Stofftrennungspotenzial dazu zu nutzen, das Temperaturniveau über den Prozess zu verändern.
Thermische Energiespeicherung	...die Sorptionsenthalpie zu einem späteren Zeitpunkt in Form von thermischer Energie zu nutzen.
Stofftrennung	...das Sorptiv aus einem Fluid zu entfernen.
Stoffspeicherung	...bei einem späteren Bedarf am Sorptiv, dieses durch den Desorptionsprozess aus dem Sorbat zu erhalten.

Tabelle 1: Beschreibung der Sorptionskategorien

2.2. Thermodynamik der Sorption

Physikalische Vorgänge

Der Sorptionsprozess ist eine Verknüpfung von simultanen Stoff- und Wärmetransportvorgängen, die jeweils diffusiv und konvektiv erfolgen können. Durch den simultanen Ablauf beeinflussen sich die einzelnen Prozesse gegenseitig und führen zu einem komplexen Gesamtprozess.

Der Sorptionsprozess kann, ausgehend von einem Adsorptionsprozess, für ein Sorptivmolekül in sieben Teilschritten beschrieben werden, siehe Abbildung 2. Dabei beschreiben die Teilschritte 1 - 4 den Stofftransport und die Teilschritte 5 - 7 den Wärmetransport und sind gemäss Bathen [3] unten beschrieben.

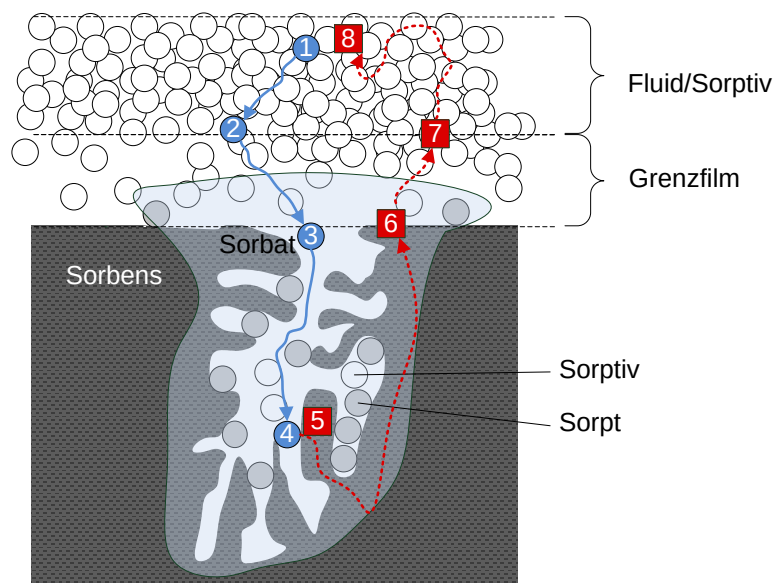


Abbildung 2: Teilschritte der Adsorption im Bereich der Phasengrenze nach Bathen [3]

1. Stofftransport an die äussere Grenzschicht (1 → 2)

Das Adsorptiv gelangt zunächst aus der fluiden Bulk-Phase (Fluid/Sorptiv) durch konvektive und/oder diffusive Transportmechanismen an den Grenzfilm über der Oberfläche des Adsorbens. Eine solche Abgrenzung ist nicht real, sie wird jedoch bei Modellbildungen angenommen.

2. Stofftransport durch den Grenzfilm (2 → 3)

Der Stofftransport durch die Grenzschicht erfolgt durch Diffusion. Im Allgemeinen wird im Grenzfilm ein linearer Konzentrationsgradient angenommen.

3. Stofftransport in den Poren (3 → 4)

In den Poren des Adsorbens laufen verschiedene Diffusionsmechanismen teilweise parallel, teilweise nacheinander ab. Diese komplexen Vorgänge führen zu verschiedenen Verläufen der Adsorptionsisothermen, die später noch näher betrachtet werden, siehe Abbildung 4 auf Seite 15. In der Modellbildung des Sorptionsprozesses werden die Teilschritte 2 und 3 häufig zu einem zusammengefasst, da beide diffusionsgesteuert sind.

4. Adsorption (4 → 5)

Die eigentliche Adsorption im Adsorptionsprozess ist eine exotherme Anlagerung des Sorptivs an das Sorbens unter Bildung eines Sorbats. Die Kinetik des Adsorptionsvorganges wird in der Regel vernachlässigt, da diese im Verhältnis zu den Diffusionsprozessen des Stofftransportes sehr viel schneller abläuft. Die Kinetik von Adsorptionsprozessen resultiert somit im Wesentlichen aus den Diffusionsvorgängen der Teilschritte 1 - 3.

5. Energietransport innerhalb des Adsorbens (5 → 6)

Die frei werdende Adsorptionswärme wird hauptsächlich über Wärmeleitung an die Oberfläche des Adsorbens transportiert. Die Wärmeleitung in den Adsorbentien ist auf Grund der Porenstruktur ineffizient und kann mit der Wirkungsweise eines porösen Dämmstoffes verglichen werden.

6. Energietransport durch den Grenzfilm (6 → 7)

Der Wärmetransport durch den Grenzfilm erfolgt wie der Stofftransport im Teilschritt 2 diffusiv. In Modellen gelten für die beiden Teilschritte häufig dieselben Annahmen.

7. Energietransport in der fluiden Bulk-Phase (7 → 8)

Der Abtransport der frei werdenden Wärme erfolgt im freien Fluid über Konvektion und Wärmeleitung (analog zum Stofftransport).

Die jeweiligen Teilschritte lassen sich auch auf Absorptionsprozesse übertragen, wobei die Teilschritte im Absorbens im Gegensatz zu denen im Adsorbens einer anderen Kinetik unterliegen. Die Stoffkonzentration an der Oberfläche des Sorbat/Sorbens wird für ein Fluid in der Gasphase im Allgemeinen über den Partialdruck beschrieben, in der Flüssigphase über das Massen- oder Molverhältnis. Das thermodynamische Gleichgewicht der genannten Teilschritte kann prinzipiell auf drei Arten formuliert werden, siehe auch Abbildung 3:

- Über **Sorptionsisothermen**, das heisst die Gleichgewichtsbeziehung zwischen der Beladung des Sorbens mit dem Sorptiv (zum Beispiel: Massenverhältnis Sorpt/Sorbens) zur Konzentration des Sorptivs in der Umgebung (zum Beispiel: Partialdruck), siehe Abbildung 3 links.
- Über **Sorptionsisosteren**, das heisst die Auftragung der Konzentration des Sorptivs in der Umgebung in Abhängigkeit der Temperaturen bei einer konstanten Beladung des Sorbens/Sorbats, siehe Abbildung 3 Mitte.
- Über **Sorptionsisobaren**, das heisst die Beziehung zwischen der Beladung des Sorbens/Sorbats und der Temperatur bei konstanter Konzentration des Sorptivs in der Umgebung (hier Partialdruck), siehe Abbildung 3 rechts.

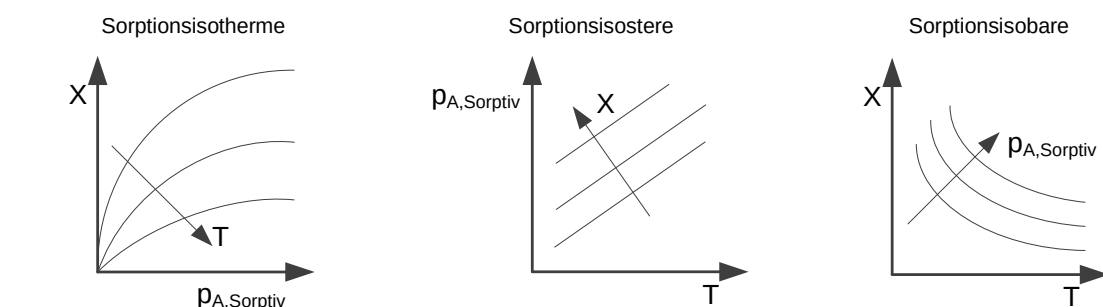


Abbildung 3: Schematische Verläufe des thermodynamischen Gleichgewichtes von Sorptionsprozessen mit dem Sorptiv in der Gasphase in Abhängigkeit der Formulierung [4]

Zur Charakterisierung von Sorptionsprozessen werden im Allgemeinen die Sorptionsisothermen verwendet und sollen daher im Folgenden näher vorgestellt werden.

Sorptionsisothermen

In Abhängigkeit der hemmenden und dominierenden Teilschritte des Sorptionsprozesses ergeben sich charakteristische Verläufe der Sorptionsisothermen. Diese Verläufe haben einen entscheidenden Einfluss auf die Prozessführung und sind von der Stoffpaarung beziehungsweise den Stoffpaarungen und Aggregatzuständen der Stoffe abhängig.

Die Sorptionsisothermen lassen sich für Einkomponentensysteme durch Grundgleichungen beziehungsweise deren Kombination abbilden, siehe Tabelle 2. Die Sorptionsisotherme von Mehrkomponentensystemen lässt sich nur bedingt aus den verschiedenen Einkomponentensystemen ableiten. Die bestehenden Modelle zur Bestimmung von Sorptionsisothermen bei Mehrkomponentensystemen sind nicht zur Auslegung von Prozessen geeignet und finden vorwiegend bei theoretischen Fragestellungen Anwendung [3].

Die genaue Bestimmung der Sorptionsisothermen erfolgt daher für jedes einzelne System experimentell [3]. In Tabelle 2 sind für die Paarung Gasphase-Feststoff (Adsorption) verbreitete Gleichungen zur Bestimmung der Adsorptionsisothermen von Einkomponentensystemen und Modelle zur Bestimmung der Adsorptionsisothermen bei Mehrkomponentensystemen aufgeführt.

Grundgleichungen für Einkomponentensysteme	Modelle für Mehrkomponentensysteme
• Henry-Gleichung • Langmuir-Gleichung • BET-Gleichung • Freundlich-Isotherme	• Multi-Dubinin-Astakhov • Ideal Adsorbed Solution Theory (IAST) • Simplified Competitive Adsorption (SCA) • Real Adsorbed Solution Theory (RAST) • Vacancy Solution Model (VCM)

Tabelle 2: Übersicht zu Berechnungsalgorithmen von Adsorptionsisothermen [3]

In Abhängigkeit des Verlaufs der Sorptionsisothermen lassen sich diese in sechs Gruppen einteilen, siehe Abbildung 4 und über die unten zugeordneten Gleichungen nach Bathen [3] beschreiben.

- I. Langmuir-Gleichung
- II. BET-Gleichung (benannt nach: Stephen Brunauer, Paul Emmett und Edward Teller)
- III. Freundlich-Gleichung
- IV. BET-Gleichung mit Hysterese
- V. Kombination aus Freundlich- und Langmuir-Gleichung
- VI. Keine Zuordnung (Mehrschichtenadsorption [5])

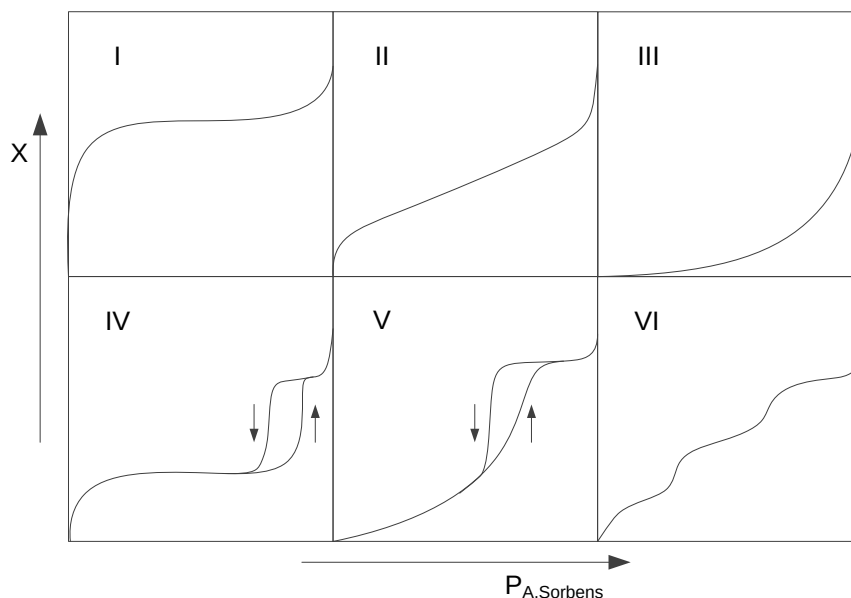


Abbildung 4: Verlauf der sechs Adsorptionsisothermen-Typen [5]

Die Hysterese in den Verläufen der Sorptionsisothermen IV und V begründet sich auf Grund der Kapillarkondensation an einem porösen Festkörper und ist vom Porenradius abhängig. Sie wird bei einem Porenradius von 100 nm technisch bedeutsam und wird mit abnehmenden Porenradien ausgeprägter [3].

Desorption

In der Regel wird das Sorbens in technischen Sorptionsprozessen für mehr als einen Sorptionsprozess verwendet. Daraus folgt, dass bei der Prozessführung eine Regeneration des Sorbens vor-

gesehen werden muss, die als Desorption bezeichnet wird.

Das thermodynamische Gleichgewicht in einem Sorptionsprozess ist immer von den drei Größen Temperatur, Druck und Konzentration abhängig, siehe Abbildung 3 auf Seite 14. Daraus lassen sich drei Grundprinzipien der Desorption ableiten, bei denen jeweils nur eine der drei Größen verändert wird:

- **DWS (PSA):** Druckwechsel-Sorption (*engl. Pressure Swing Ad-/ Absorption*)
Desorption durch die Absenkung des Systemdrucks
- **TWS (TSA):** Temperaturwechsel-Sorption (*engl. Temperature Swing Ad-/ Absorption*)
Desorption durch die Erhöhung der Temperatur
- **KWS (CSA):** Konzentrationswechsel-Sorption (*engl. Composition Swing Ad-/ Absorption*)
Desorption durch die Absenkung der Konzentration bzw. des Partialdrucks des Sorptivs

Sorptionsenthalpie

Die Sorptionsenthalpie ist insbesondere bei thermischen Anwendungen eine entscheidende Grösse bei der Auslegung eines Systems. Zur Berechnung des entsprechenden Temperaturhubes muss die Sorptionsenthalpie bekannt sein. Die Sorptionsenthalpie setzt sich gemäss nachfolgender Formel 2-1 aus der Verdampfungs- und der Bindungsenthalpie zusammen.

$$\Delta h_S = \Delta h_V + \Delta h_B \quad 2-1$$

Die Sorptionsenthalpie ist wie die Sorptionsisotherme von der Stoffpaarung und deren Aggregatzuständen, bei Feststoffen zusätzlich von deren Oberflächenstruktur und Porosität, der Beladung vom Sorpt im Sorbens und der Temperatur abhängig. Liegen keine Daten zur Sorptionsenthalpie vor, so verweist Bathen auf Faustformeln von Ruthven [6] und v. Gemmingen [7], die bei einer Gasphasen-Adsorption die Adsorptionenthalpie um den Faktor 1.2 - 3 höher schätzen lassen als die Verdampfungsenthalpie des Sorptivs [3].

Die Abhängigkeit der Stoffpaarung und die Unsicherheit bei der Anwendung von Faustformeln zur Abschätzung von Sorptionsenthalpien wird in Abbildung 5 für das Sorptiv Wasser (in der Gasphase) deutlich. Die Abhängigkeit von Temperatur und Druck begründet sich im Wesentlichen über die Abhängigkeit der Verdampfungsenthalpie von Wasser und führt zu einer vertikalen parallel Verschiebung der Kurven. Der Einfluss der Stoffpaarung ist an den unterschiedlichen Verläufen der Adsorptionenthalpien von Zeolith und Silicagel zu erkennen. Der Einfluss der Beladung wird durch den hohen Quotienten zwischen der maximalen und minimalen Adsorptionenthalpie ersichtlich. Für Zeolith beträgt der Quotient ungefähr 2.7 und für Silicagel 1.9. Die Faustformeln berücksichtigen nicht, um welche Stoffpaarung es sich handelt und in welchem Bereich der Beladungshub stattfindet. So ist bei beiden Stoffpaarungen beim Beladungshub von 0.05 kg/kg die Adsorptionenthalpie deutlich höher, wenn der Hub zwischen 0.00 und 0.05 kg_W/kg_{Sorbens} anstatt zwischen 0.20 und 0.25 kg_W/kg_{Sorbens} stattfindet.

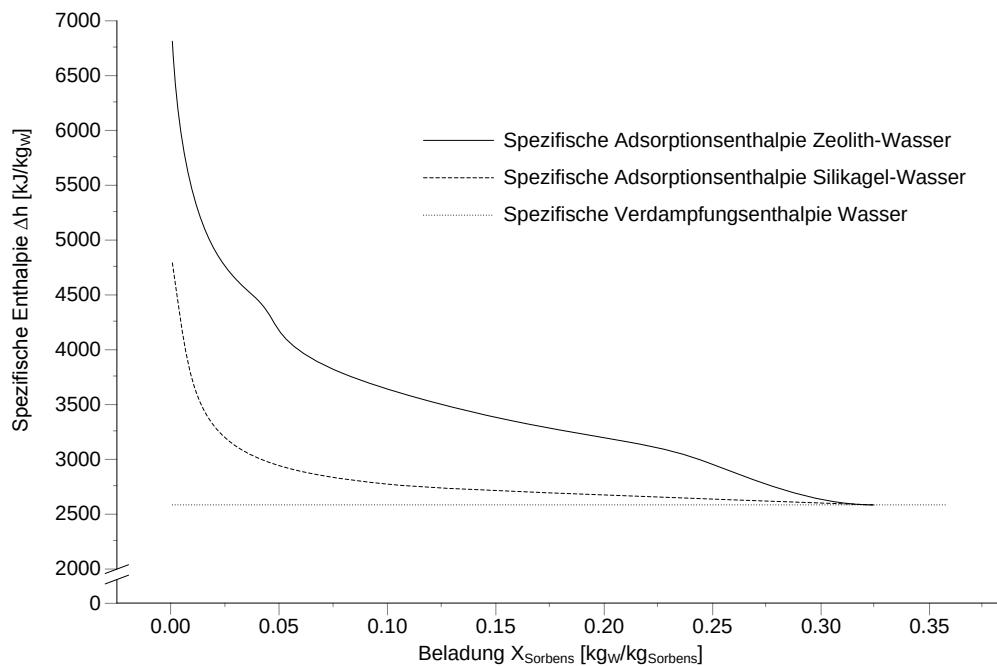


Abbildung 5: Adsorptionsenthalpien der Stoffpaarungen Zeolith-Wasserdampf und Silicagel-Wasserdampf bei einer Temperatur von 20°C, nachgezeichnet von Hauer [8]

2.3. Sorbentien

Sorbentien lassen sich anhand der dominierenden Bindungskräfte in Sorbentien der Chemisorption und in Sorbentien der Physisorption gliedern (Abbildung 6). Die erste Gliederungsstufe lässt sich jeweils in die Ad- und in die Absorbentien unterteilen.

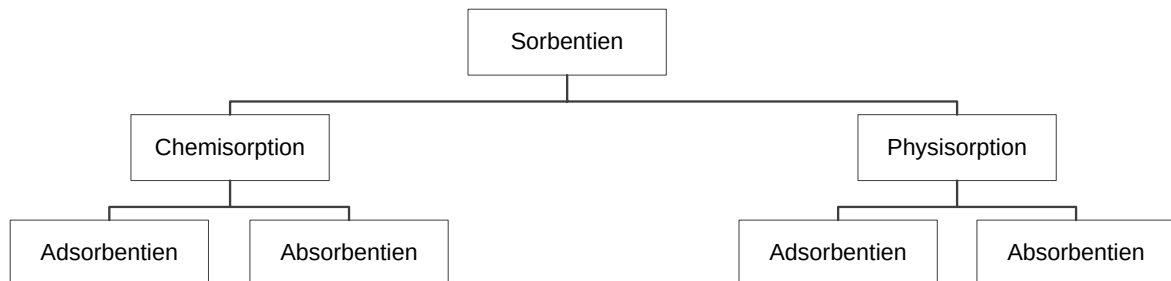


Abbildung 6: Gliederung von Sorbentien

Sorbentien der Chemisorption

Auf Grund der untergeordneten Bedeutung der Chemisorption bei energetischen Anwendungen werden im Folgenden die bedeutendsten Sorbentien der Chemisorption lediglich aufgelistet und nicht näher beschrieben, siehe Tabelle 3.

Sorbentien für Chemisorption		
Basische Calciumverbindungen	Basische Natriumverbindungen	Basische Metallverbindungen
- CaO - Ca(OH)₂ - CaCO₃ - Ca-Silikate (in Verbindung mit H₂O)	- NaOH - Na₂CO₃ - NaHCO₃	- MgO - Mg(OH)₂ - Al₂O₃ - Eisenoxide
Gemische aus den oben angeführten Komponenten		

Tabelle 3: Wirtschaftlich bedeutende Sorbentien der Chemisorption [9]

Sorbentien der Physisorption

Technische Sorbentien der Physisorption werden in der VDI-Richtlinie 3674 in fünf Gruppen eingeteilt [5]:

- Kohlenstoffhaltige Adsorbentien
- Oxidische Adsorbentien
- Polymeradsorbentien
- Mischadsorbentien
- Metallorganische Gerüstverbindungen (MOF)

Die ersten drei Sorbentengruppen der obigen Auflistung sind in energetischen Sorptionsprozessen am weitesten verbreitet. Deren zugehörigen Adsorbentien sowie deren Einsatzgebiete sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Mischadsorbentien werden hauptsächlich zur Gasreinigung von gezielten Komponenten eingesetzt. Die MOFs werden derzeit vorwiegend für die Gasspeicherung diskutiert [5].

Adsorbens	Anwendungsfeld Gasphase	Anwendungsfeld Flüssigphase
Kohlenstoffhaltige Adsorbentien		
Aktivkohle	Abluftreinigung Adsorption von VOCs	Trink-, Prozess-, Abwasseraufbereitung Getränkstabilisierung u. Entfärbung Goldgewinnung
Aktivkoks	Dioxin- / Furan-Adsorption SO _x -NO _x -Abscheidung	
Kohlenstoff-Molekularsiebe	Adsorption polarer Stoffe Luftzerlegung	p-Xylol-Abtrennung
Oxidische Adsorbentien		
Zeolithe	Gastrocknung Abluftreinigung Kohlenwasserstofftrennung Luftzerlegung Adsorption von VOCs	Abwasserbehandlung Entfernung radioaktiver Nuklide Olefin/Paraffin-Trennung P-Xylol-Abtrennung Trocknung von organischen Flüssigkeiten
Kieselgel Silicagel	Gastrocknung Geruchsminderung Adsorption von VOCs	Trocknung von organischen Flüssigkeiten Chromatografische Trennung
Tonminerale	Autoabgasreinigung Gasentschwefelung	Speiseölherstellung, Altölaufbereitung Waschwasseraufbereitung
Aktivtonerde	Abluftreinigung Gastrocknung, -reinigung	Trink-, Prozess- u. Abwasseraufbereitung Trocknung von organischen Flüssigkeiten
Polymeradsorbentien		
Polysterole, Polyacrylester	Lösemittelrückgewinnung Abluftreinigung	Entbittern von Fruchtsäften Reinstwassergewinnung
Phenolische Adsorberharze		Trink-, Prozess- u. Abwasseraufbereitung Stofftrennung von z.B. Zuckern u. Proteinen

Tabelle 4: Bedeutende Adsorbentien der Physisorption mit Anwendungsfeldern nach Bathen [3]

Kennwerte zur Charakterisierung von Adsorbentien

Zur Charakterisierung der Adsorbentien und deren praxisrelevanten Eigenschaften werden folgende Kennwerte verwendet, die häufig auch leicht abgewandelt verwendet werden [3].

- Partikelgrösse
 - o Partikelgrößenverteilung
 - o Modalwert
 - o Mittlerer Partikeldurchmesser
 - o Partikelgrößenbereich
- Dichte
 - o Wahre Dichte, Materialdichte, Feststoffdichte

- o Scheinbare Dichte
- o Schüttdichte
- o Filterschüttdichte
- o Rütteldichte
- Porosität
 - o Innere Porosität bzw. Kornporosität ε_p
 - o Äussere Porosität bzw. Schüttungsporosität ε_L
- Spezifische Oberfläche (innere Oberfläche)
 - o BET-Methode
 - o Iodtest
 - o Kohlenstofftetrachloridtest
- Porenradienverteilung
 - o Makroporen > 50 nm
 - o Mesoporen 2.0 - 50 nm
 - o Mikroporen 0.1 - 2.0 nm
 - o Submikroporen < 0.4 nm

Eine Übersicht der typischen Grössenordnung von Kennwerten poröser Adsorbentien und deren Anwendungsgebiete ist in Tabelle 5 gegeben.

Adsorbens	Anwendung (typische Beispiele)	Rüttel- dichte	Schein- bare Dichte	Wahre Dichte	Porenvolumen		Spez. Ober- fläche	Spez. Wärme- kapazität
					d < 20 nm	d > 20 nm		
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[ml/g]		[m ² /g]	[J/(kg·K)]
Aluminiumoxid	Gasentschwefelung	700-800	1200	1900	0.4		100-400	920
Kieselgel, engporig	Gastrocknung, Geruchsminderung	700-800	1100	2200	0.35-0.45	< 0.1	600-850	920
Kieselgel, weitporig	Adsorption von Kohlenwasserstoffen	400-800		2200	0.3-0.45	0.05-0.1	250-350	920
Molekularsiebe/ Zeolithe, hydrophil	Gastrocknung, Trennung von Kohlenwasserstoffen	600-800			0.25-0.35	0.3-0.4	500-1000	900
Molekularsiebe/ Zeolithe, hydrophob	Lösemittelrückgewinnung Lösemittelaufkonzentrierung, Abluftreinigung	400-500	1100	2100	0.2-0.3		500-700	900
Polymeradsorbentien (Styrol-Divinylbenzol-Harze)	Lösemittelrückgewinnung Benzinrückgewinnung	300-400	400	1000	1.1-1.25		1000-1500	350

Tabelle 5: Kennwerte poröser Adsorbentien mit Anwendungsbeispielen [5]

Zeolithe/Molekularsiebe

Zeolithe sind vulkanischen Ursprungs oder werden synthetisch hergestellt. Sie bestehen aus hydratisierten kristallinen Aluminosilikaten. Gelangen die Moleküle des Sorptivs, wie zum Beispiel Wasserdampf, durch die Porenstruktur an die innere Oberfläche, lagern sich die Moleküle in den Kristallstrukturen des Zeoliths ab, ohne diese zu verändern. Die Kristallgitter weisen eine aus SiO₄- und AlO₄-Tetraedern aufgebaute dreidimensionale Struktur mit einem Hohlraum auf, der von gleich grossen Öffnungen umgeben ist (Abbildung 7). Der Flächen der Öffnungen lassen nur Moleküle unterhalb eines kritischen Durchmessers durch, welche dann im Inneren der Struktur adsorbiert werden. Auf Grund dieses Siebeffektes auf molekularer Ebene werden die Zeolithe auch Molekularsiebe genannt [5].

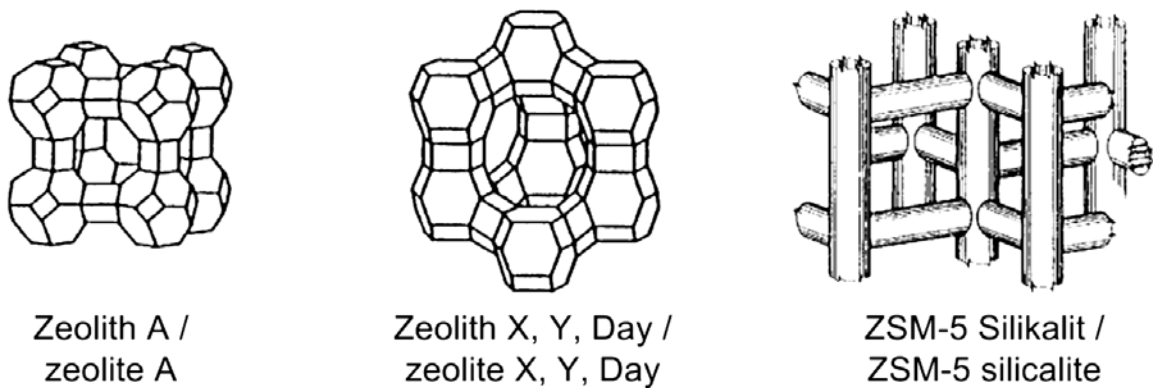


Abbildung 7: Porensystem ausgewählter Zeolithe [5]

Aktivtonerde/Aluminate

Durch das direkte Erhitzen von Aluminiumhydroxid aus dem Bayerprozess entsteht ein poröses, pulverförmiges Aluminat. Es wird im nächsten Arbeitsschritt kompaktiert und im Anschluss auf die gewünschte Partikelgrösse zerkleinert, bevor es bei 500°C - 600°C aktiviert wird [5].

Kieselgel/Silicagel

Kieselgele werden durch Ausflockung aus kolloidaler Kieselsole gewonnen und bestehen zu 99% aus Siliziumdioxid [10]. Durch die Temperaturführung und die definierten pH-Werte beim Trocknungsvorgang lassen sich die Porenradien des Kieselgels einstellen, wobei das Kieselgel über eine Porenradiusverteilung und nicht über einen definierten Porenradius verfügt. Daher unterscheidet man Kieselgele in engporige und weitporige Kieselgele, die sich ebenfalls in ihren spezifischen Oberflächen unterscheiden [5].

Aktivkohle

Aktivkohle wird aus Braun- oder Steinkohle und anderen Materialien wie Torf oder Holz hergestellt. Die Kohlen werden entweder über heisse Gase oder mit Chemikalien aktiviert. Sie haben eine grosse Variationsbreite bei der Porengrössenverteilung, der spezifischen Oberfläche und dem Porenvolumen [5].

Aktivkokse

Der Herstellungsprozess entspricht dem der Aktivkohle, jedoch unterscheiden sich die Aktivkokse von der Aktivkohle durch ein kleineres Porenvolumen und eine kleinere spezifische Oberfläche. Ist das Porenvolumen $< 0.25 \text{ ml/g}$ und die spezifische Oberfläche $< 400 \text{ m}^2/\text{g}$, wird von Aktivkoksen gesprochen [5].

Kohlenstoffmolekularsiebe

Sie weisen ein noch kleineres Porenvolumen als Aktivkokse auf ($< 20 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$) und haben Mikroporen mit einem Durchmesser von 0.50 nm - 1.00 nm. Gasmoleküle in dieser Grössenordnung weisen in den Kohlenstoffmolekularsieben unterschiedliche Diffusionskoeffizienten auf, wodurch eine Stofftrennung erfolgen kann [3].

Polymere Adsorbentien

Polymere Adsorbentien sind in der Regel kugelförmige hydrophobe Adsorberharze aus unpolaren makroporösen Polymeren. Sie werden einsatzspezifisch durch Polymerisation von Styrol hergestellt. Durch die Steuerung des Polymerisationsprozesses lassen sich die Porenstruktur, die spezifische Oberfläche und die Polarität sehr gezielt einstellen [3].

2.4. Reaktorbauarten

Zum Ablauf eines Sorptionsprozesses muss das Sorptiv mit dem Sorbens in Kontakt kommen. Das Bauteil, in dem die Zusammenführung erfolgt, wird allgemein Reaktor genannt. In Abhängigkeit der Aggregatzustände von Sorptiv und Sorbens lassen sich die Reaktoren über die angestrebte Kinetik des Sorbens im Reaktor klassifizieren, siehe Abbildung 8.

Prozessbedingt ist das Sorptiv immer in Bewegung, unabhängig vom Aggregatzustand. Das Sorbens hingegen kann im Reaktor örtlich gebunden sein, oder sich frei bewegen. In Abbildung 8 sind die Reaktorbauarten so angeordnet, dass in der jeweiligen Gruppe die Geschwindigkeit des Sorbens von links nach rechts zunimmt. Bei der Adsorption in der Gasphase bilden Rotorsysteme eine Kombination aus Fest- und Wanderbett-Adsorbern. Das Sorbens ist fest an eine Rotorstruktur gebunden, wird aber von dieser durch den Reaktor bewegt.

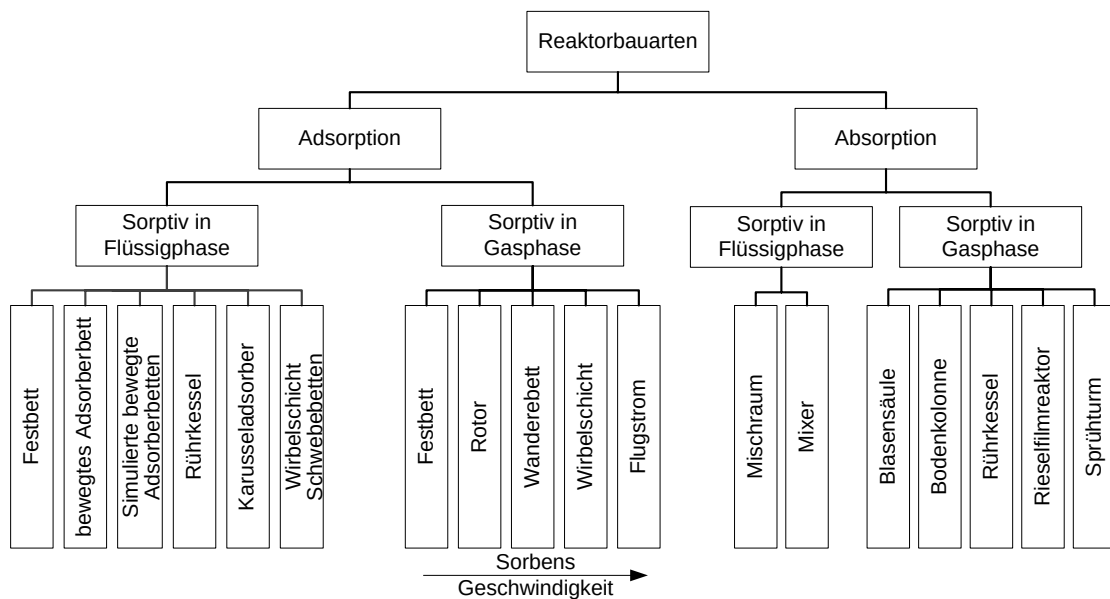


Abbildung 8: Klassifizierung der Reaktorbauarten

Im Allgemeinen weisen die Sorbentien in der festen Phase eine geringe Härte und Abriebfestigkeit auf. Daher ist in technischen Sorptionsprozessen das Festbett beziehungsweise das bewegte Festbett, der Sorptionsrotor, die bevorzugte Umsetzungsvariante. Die Relativbewegung zwischen den Partikeln des Sorbens und zwischen dem Sorbens und der Umgebung wie bei den weiteren Varianten wird dabei vermieden, siehe Abbildung 9.

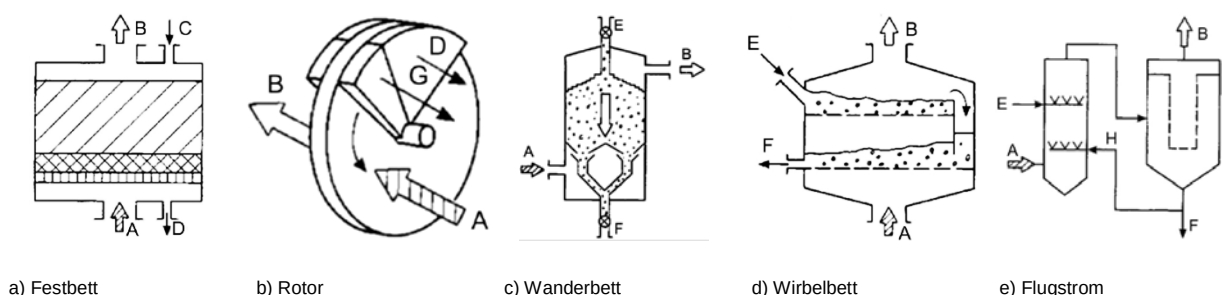


Abbildung 9: fünf prinzipielle Adsorberbauarten [5]

A = Rohgas; B = Reingas; C = Desorptionsmedium; D = Desorbat; E = Adsorbens, regeneriert;
F = Adsorbens, beladen; G = Kühlmedium; H = Rezirkulat

Bei den Absorptionsprozessen ist das Ziel, eine möglichst grosse Oberfläche zwischen dem flüssigen Sorbens und dem Sorptiv zu schaffen. Befindet sich das Sorptiv in der Gasphase, so kann dieses entweder durch das Sorbens, oder entlang der Oberfläche geleitet werden. Befindet sich das Sorptiv in der Flüssigphase, erfolgt eine Vermischung und nach dem Absorptionsprozess muss die Trägerflüssigkeit von der Sorbensflüssigkeit getrennt werden. Gängige Reaktorbauarten sind in Abbildung 10 gezeigt.

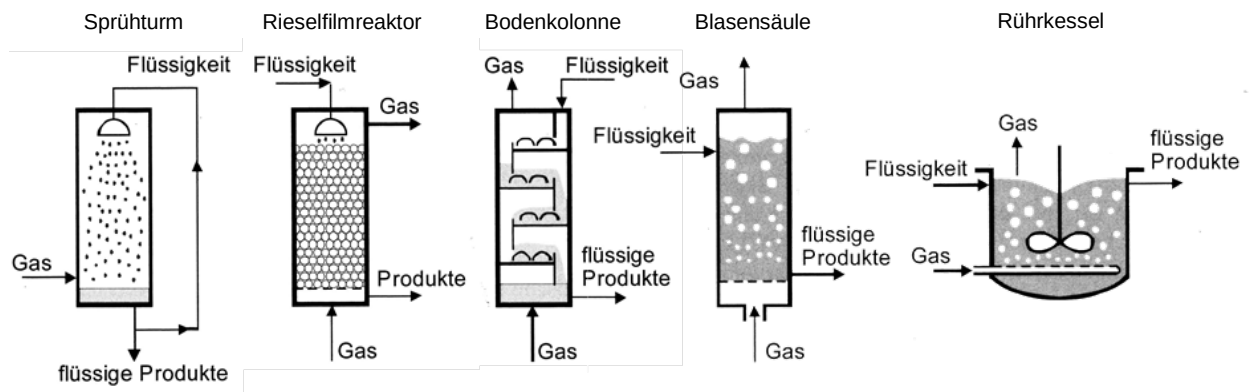


Abbildung 10: fünf prinzipielle Absorberbauarten [11]

3 Stoffdatenbank

Die Datenbank umfasst die Stoffdaten der in der Literaturrecherche gesichteten Sorptionsprozesse der Sorptionskategorien *Wärmetransformation* und insbesondere *thermische Energiespeicherung*. Stoffdaten zu den zwei weiteren Sorptionskategorien *Stofftrennung* und *Stoffspeicherung* sind in der Datenbank nicht mit aufgenommen. Wie in den Kapiteln 4 und 6 gezeigt wird, unterscheiden sich die Mechanismen, wie sich das energetische Potenzial der Sorptionskategorien begründet. Bei den Sorptionsprozessen der berücksichtigten Sorptionskategorien wird durch eine thermische Speicherung oder Wandlung direkt die Sorptionsenthalpie des Prozesses genutzt, so dass die Eigenschaften des Prozesses von besonderer Bedeutung sind. Bei den Sorptionskategorien *Stofftrennung* und *-speicherung* begründet sich das energetische Potenzial im Wesentlichen durch die Substitution von energetisch ungünstigeren technischen Prozessen, wie beispielsweise die Taupunktcondensation bei der Entfeuchtung. Die benötigten Kennwerte für das Charakterisieren der Prozesse sind in der Regel komplexer als bei den beiden thermischen Sorptionskategorien. Zum Beispiel sind bei Stofftrennungsprozessen in der Regel Mehrkomponentenfluide zu betrachten, so dass nicht das eine Arbeitspaar Sorptiv-Sorbens existiert, sondern verschiedene Sorptive in Konkurrenz um einen Platz im/am Sorbat stehen.

Die Stoffdatenbank ist in Microsoft Access[®] programmiert und über die Homepage der Forschungsgruppe *SORPTION* der Hochschule Luzern – Technik & Architektur beziehbar (www.hslu.ch/sorption). Die Seite umfasst eine Beschreibung der Struktur, des Umfangs sowie eine Kontaktadresse, unter der die Stoffdatenbank kostenlos angefordert werden kann. Um einen möglichst grossen Multiplikationsfaktor zu erzeugen, ist die Stoffdatenbank in Englisch verfasst. Sie soll den Kontakt zu anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie fördern.

3.1. Struktur der Datenbank

In Abbildung 11 ist die Struktur der Datenbank in einem Beziehungsdiagramm dargestellt. Die Datenbank besteht aus fünf Tabellen, die über die Tabelle *System* verknüpft sind.

Tabelle System

In der hierarchisch obersten Tabelle *System* werden die Eigenschaften des Arbeitspaares beschrieben. Entsprechend den Daten der Literaturquellen sind die bekannten Kennwerte zu dem Arbeitspaar hinterlegt. Der direkte Vergleich der Werte einer Kategorie untereinander ist nur bedingt möglich und erfordert in jedem Fall das Studium der Primärquelle. Die Kennwerte sind in den Literaturquellen zum Teil unterschiedlich bestimmt oder gar nur theoretisch untersucht, so dass nur selten ein gemeinsamer Bezugspunkt vorliegt. Beispielsweise werden bei der Bestimmung der Speicherdichte unterschiedliche Temperaturhübe und –niveaus betrachtet, die zum Teil die sensiblen Wärmekapazitäten berücksichtigen, zum anderen Teil aber eben nicht. Gleiches gilt für die Masse und das Volumen des Speichersystems, teilweise berücksichtigen die Kennwerte nur das Medium, teilweise auch die konstruktiven Bauteile des Systems. Bei den theoretisch bestimmten Werten muss im Bereich der Speicherkapazitäten beachtet werden, dass die Werte noch keine Aussage über die Kinetik des Prozesses enthalten, die einen grossen Einfluss auf die Lade- und Entladeleistung hat. Die entsprechenden Primärliteraturquellen sind in der Tabelle *Reference* hinterlegt und somit immer eindeutig zugeordnet.

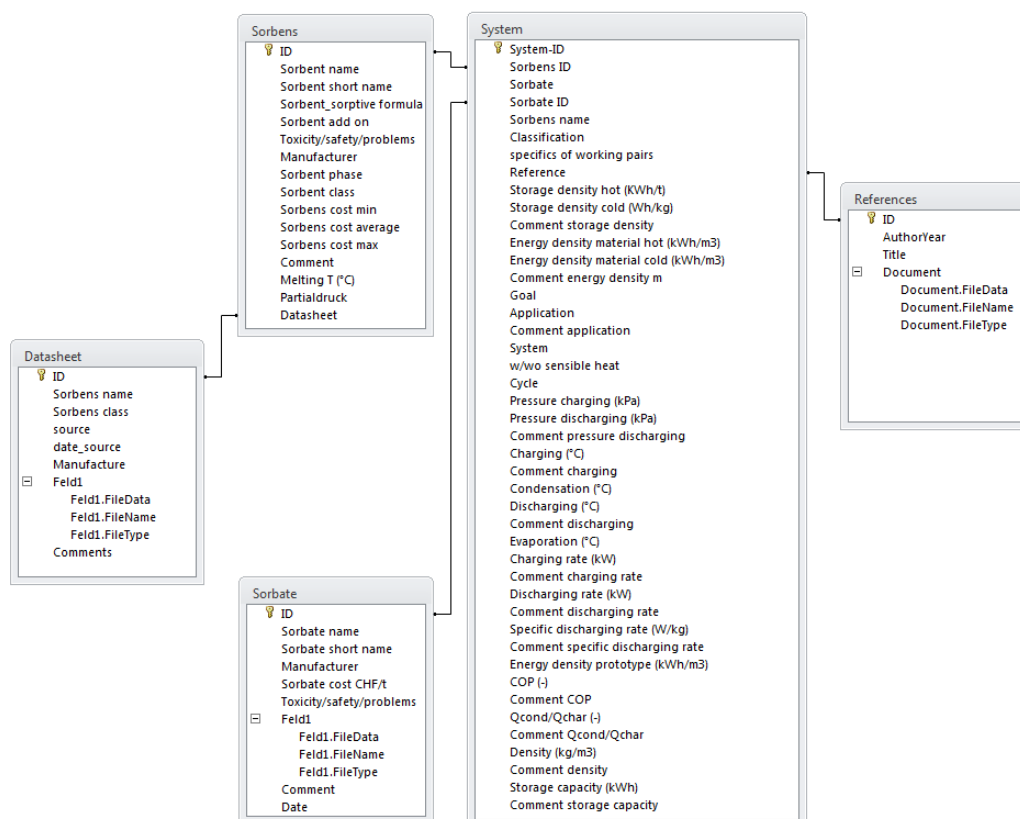


Abbildung 11: Darstellung der Beziehungen zwischen den Tabellen innerhalb der Stoffdatenbank

Tabelle Reference

Die Tabelle Reference enthält die bibliografischen Daten und gegebenenfalls einen Downloadlink zur Primärliteraturquelle, siehe Tabelle 6.

Tabelle Sorbens

Die Tabelle beinhaltet die Stoffdaten der Sorbentien. Die einzelnen Stoffdaten unterscheiden sich in Abhängigkeit des Herstellers. Daher liegen teilweise mehrere Stoffdaten verschiedener Hersteller zu einem Stoff (eigentlich Produkt) vor. Wenn der Hersteller nicht genannt werden kann, sind entsprechende Werte recherchiert und zusammengetragen und als Bandbreite zum jeweiligen Stoff angegeben. Über die Verknüpfung der Tabellen *Sorbens* und *System* ist die Zuordnung des verwendeten Sorbens zum Arbeitspaar in der Tabelle *System* gegeben. Zusätzlich zu den gegebenen Stoffdaten aus der Literatur, sind weitere Daten ergänzend recherchiert. Beispielsweise sind die Informationen bezüglich Brand-, Gesundheits- und Reaktionsgefahr aus der jeweiligen Literatur durch zusätzliche recherchierte Werte ergänzt und gemäss dem Code „NFPA 704“ (Gefahrendiamant) in fünf Stufen von 0 für „ohne Gefahr“ bis 4 für „hohe Gefahr“ eingeteilt [12].

Tabelle Datasheets

Ist in der Primärliteratur der Hersteller des Sorbens genannt, so ist das Datenblatt zum Sorbens vom Hersteller in der Datenbank hinterlegt und dem Sorbens zugeordnet.

Tabelle Sorbate

Entsprechend der Tabelle *Sorbens* enthält auch die Tabelle *Sorbate* die in der Primärliteratur genannten Stoffdaten, welche mit Daten der Recherche ergänzt sind.

ID	AuthorYear	Title	🔗
1	Purkathofer2001	Sorptionsspeicher - Langzeitspeicherung von Wärme mit hohen Energiedichten	🔗(1)
2	ITW Universität Stuttgart2014	Die Sommerwärme bis zum Winter speichern	🔗(1)
3	N'Tsoukpoe2009	A review on long-term sorption solar energy storage	🔗(1)
4	Wang2007	A review on adsorption working pairs for refrigeration	🔗(1)
5	N'Tsoukpoe2014	A systematic multi-step screening of numerous salt hydrates for low temperature	🔗(1)
6	Yu2013	Sorption thermal storage for solar energy	🔗(1)
7	Gantenbein2003	Sorptionsspeicher - Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage	🔗(1)
8	Fumey2013	Closed sorption heat storage based on aqueous sodium hydroxide	🔗(1)
9	Henninger2012	Novel sorption materials for solar heating and cooling	🔗(1)
10	Mugnier2001	Energy storage comparison of sorption systems for cooling and refrigeration	🔗(1)
11	Trausel2014	A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage	🔗(1)
12	Xu2014	A review of available technologies for seasonal thermal energy storage	🔗(1)
13	DeBoer2003	Determination of structural, thermodynamic and phase properties in the Na2S-H2O	🔗(1)
14	Bertsch	Low temperature chemical heat storage - an investigation of hydration reaction	🔗(1)
15	Li2012	A Target-Oriented Solid-Gas Thermochemical Sorption Heat	🔗(0)
16	Liu2011	Evaluation of a seasonal storage system of solar energy for house heating using	🔗(0)
17	J.Jänchen2003	Studies of the water adsorption on Zeolites and modified	🔗(0)
18	Bales2005	Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat	🔗(0)
19	Henninger2012	Novel sorption materials for solar heating and cooling	🔗(0)
20	Kerskes2010	EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS ON THERMO-CHEMICAL HEAT	🔗(0)
21	Hongois2014	Developement and characterisation of a new MgSO4-zeolite composite for long	🔗(0)
22	Posern and Kaps2010	Calorimetric studies of thermochemical heat storage materials based on mixture	🔗(0)
23	Van Essen2010	Characterization of MgSO4 Hydrate for Thermochemical Seasonal Heat Storage	🔗(0)
24	Boer2002	DETERMINATION OF STRUCTURAL, THERMODYNAMIC AND PHASE PROPERTIES IN	🔗(0)
25	Lahmidi2005	Definition, test and simulation of a thermochemical storage	🔗(0)
26	Zondag2012	Prototype thermochemical heat storage with open reactor system	🔗(0)

Tabelle 6: Auszug aus der Microsoft Access®-Tabelle "References"

3.2. Visualisierung der Daten

Um einen Überblick über die in der Stoffdatenbank enthaltenen Daten zu erlangen, bietet sich eine grafische Aufarbeitung der Daten an. Zu diesem Zweck können in Microsoft Access® die Arbeitspaare und Kennwerte, an denen Interesse besteht, aus allen Tabellen über einen Suchfilter ausgewählt und in Tabellenform exportiert werden.

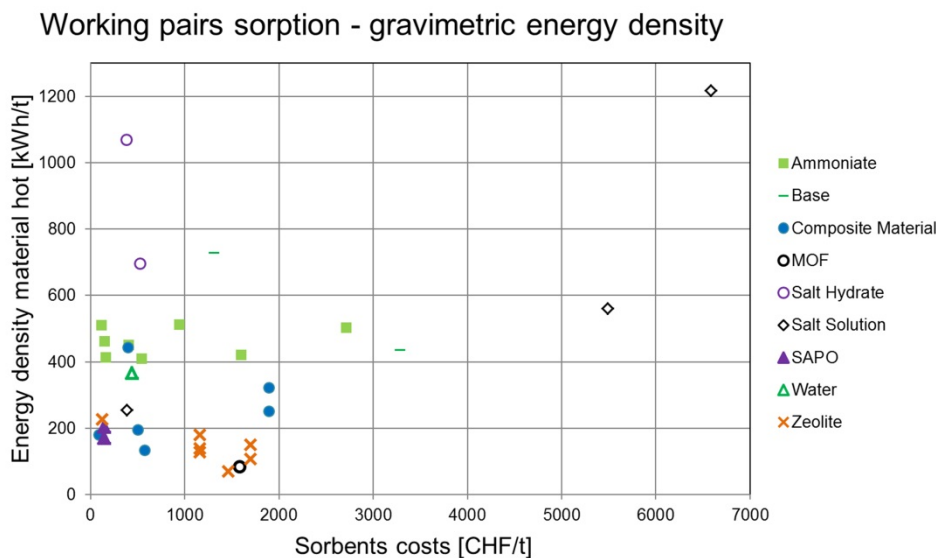


Abbildung 12: Punktdiagramm der gravimetrischen Energiedichte über den Sorbentkosten der Arbeitspaare aus der Stoffdatenbank

In einem externen Programm (zum Beispiel Microsoft Excel®) lassen sich die gewünschten Daten grafisch darstellen. In Abbildung 12 ist die gravimetrische Energiedichte des Sorbens über den Sorbentkosten (mit sensiblem Anteil) für alle Stoffe dargestellt, für die der entsprechende Wert hinterlegt ist. Es ist zu beachten, dass in dieser Darstellung die verschiedenen Systembedingungen und Bestimmungsmethoden nicht identifizierbar sind. So ist es für eine Interpretation der Daten

notwendig, das Diagramm aus Abbildung 12 um weitere Informationen zu ergänzen. Hierfür sind in Abbildung 13 im Sinne der Übersichtlichkeit drei Sorbentengruppen ausgewählt und um die chemische Kurzformel ergänzt worden. Diese Zuordnung ermöglicht es, weitere Stoffdaten in der Datenbank nachzuschlagen und gegebenenfalls im Diagramm zu ergänzen oder in der entsprechenden Primärliteratur nach weiteren Informationen zur Datenerhebung zu schauen.

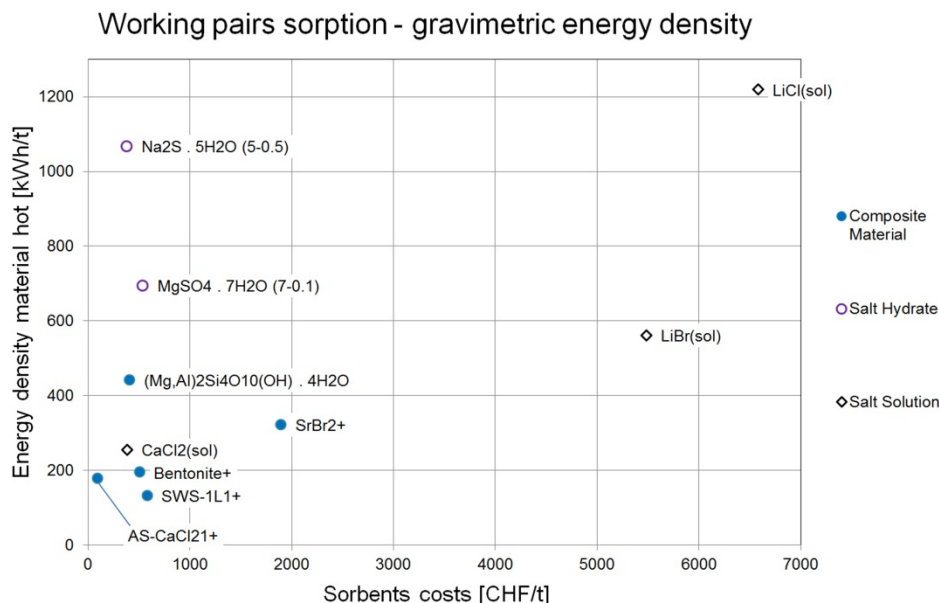


Abbildung 13: Punktdiagramm der gravimetrischen Energiedichte über den Sorbentskosten ausgewählter Sorbentien mit genauer Stoffbezeichnung

3.3. Zusammenfassung

Die Stoffdatenbank umfasst die in der Literatur gesichteten energetischen Eigenschaften von Sorptionsprozessen der Sorptionskategorien *Wärmetransformation* und *thermische Energiespeicherung*. Auf Grund von unterschiedlichen Bezugsgrößen müssen bei der Verwendung der Daten die Angaben der Primärliteratur berücksichtigt werden. Die Stoffdaten zu den Sorptionskategorien *Stoffspeicherung* und *Stofftrennung* sind in dieser Studie nicht berücksichtigt. Ein Überblick zur Eignung von Sorbentien zu definierten Referenz-Mehrstoffsystemen wird als wichtig angesehen und ist von der Wirtschaft gefragt. Eine weitere Pflege und Erweiterung der Datenbank ist wünschenswert, um einen optimalen Nutzen der Datenbank zu gewährleisten.

Die aktuellen Stoffdaten aus den 24 Literaturquellen beziehen sich jeweils auf andere Betriebspunkte und sind somit untereinander schwer vergleichbar. Für einen optimalen Nutzen der Stoffdatenbank ist anzustreben, dass für bedeutende Arbeitspaare wie zum Beispiel für Zeolithe mit dem Sorptiv H₂O die Isothermen, Isobaren und Isosteren sowohl grafisch wie auch mathematisch im technisch relevanten Bereich hinterlegt werden. So wäre zum einen die Identifikation des optimalen Zeoliths für einen Anwendungsfall möglich, zum anderen ermöglicht die mathematische Beschreibung des Arbeitsprozesses eine präzise Auslegung des Prozesses beziehungsweise Bestimmung des zu erwartenden Potenzials.

Mögliche Erweiterungsoptionen sind Daten zu den Sorptionskategorien *Stofftrennung* und *Stoffspeicherung*. Eine Übersicht mit charakteristischen Werten zur Eignung von Sorbentien für die Trennung von verschiedenen Stoffen aus einem Gasstrom, beispielsweise VOCs aus der Abluft, also von Mehrstoffsystemen, ist wünschenswert und im Kontakt zur Industrie häufig angefragt worden.

4 Funktionsweise der Sorptionsprozesse

In diesem Kapitel werden die technischen Eigenschaften, die Funktionsweise und das energetische Potenzial der Sorptionsprozesse erläutert. Wo es hilfreich erscheint, werden Anwendungsbeispiele des Prozesses zur Erläuterung aufgeführt. Die Gliederung orientiert sich im Sinne der Übersichtlichkeit an den in Kapitel 5 definierten Sorptionskategorien.

4.1. Wärmetransformation

Sorptionsprozesse können dazu genutzt werden, Wärme zu transformieren. Dafür müssen mindestens zwei Wärmeströme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus als Antrieb vorliegen. In Abhängigkeit davon, ob das Temperaturniveau der Nutzwärme über, zwischen oder unter den beiden Antriebsströmen liegt, nennt man die Anlage Wärmetransformator, Wärmepumpe oder Kältemaschine, siehe Abbildung 14.

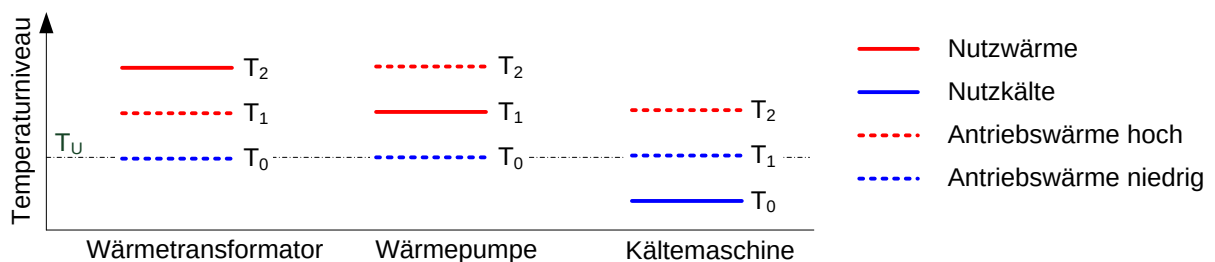


Abbildung 14: Bezeichnung einer Wärmetransformationsmaschine in Abhängigkeit der Temperaturniveaus der Wärmeströme

Bei den thermisch angetriebenen Wärmetransformatoren werden zur Differenzierung zu den mechanisch angetriebenen Wärmetransformationsmaschinen die Begriffe Ad-/Absorptionswärmepumpe (AWP), Ad-/Absorptionskältemaschine (AKM) und Ad-/Absorptionswärmetransformator (AWT) verwendet.

Die energetische Effizienz von Wärmetransformationsmaschinen wird über das Verhältnis des thermischen Nutzens über den thermischen Aufwand angegeben. Beim thermischen Nutzen wird die Antriebswärme auf dem niedrigeren Temperaturniveau nicht bilanziert, da der Wärmestrom in der Regel aus der Umgebung (Temperaturniveau T_U in Abbildung 14) bezogen wird. Somit kann die energetische Effizienz grösser 1 werden, so dass anstatt des Begriffes Wirkungsgrad die Begriffe Coefficient of Performance (COP) für AWT und AWP, sowie Energy Efficiency Ratio (EER) für AKM wie folgt verwendet werden [13]:

Der COP ist für einen AWT definiert als:

$$COP_{AWT} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Der COP ist für eine AWP definiert als:

$$COP_{AWP} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

Das EER ist für eine AKM definiert als:

$$EER_{AKM} = \frac{Q_0}{Q_2}$$

Die Antriebswärme auf dem hohen Temperaturniveau der jeweiligen Maschine kann beispielsweise über einen Verbrennungsprozess, eine elektrische Widerstandsheizung, eine solarthermische Anlage oder einen Prozesswärmestrom bezogen werden.

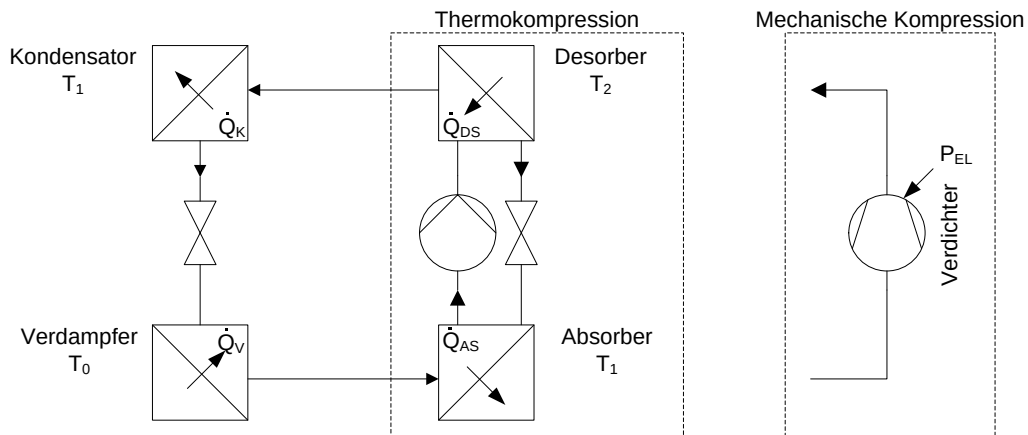


Abbildung 15: Vergleichende Darstellung des vereinfachten Fließbildes einer Absorptionswärmepumpe/Absorptionskältemaschine (Thermokompression) mit dem Fließbild einer mechanischen Wärmepumpe/Kältemaschine (mechanische Kompression).

Die Unterschiede in der Funktionsweise von Absorptionswärmepumpen und Absorptionskältemaschinen zu den mechanisch angetriebenen Pendanten sind in Abbildung 15 dargestellt.

Im Desorber wird die Antriebsleistung $\dot{Q}_{Antrieb} = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_{DS}$ dem System zugeführt und bewirkt die Trennung des Absorbats in Absorptiv (Gasphase) und Absorbens (Flüssigphase). Das Absorbens wird über eine Drossel in den Absorber geleitet. Das Sorptiv durchläuft nach dem Verlassen des Desorbers dieselben Prozessschritte wie das Kältemittel einer mechanisch angetriebenen Maschine. Im Kondensator findet der Aggregatzustandswechsel von gasförmig zu flüssig unter der Abgabe der Kondensationsenthalpie $\dot{Q}_K$ statt. Der Absorber wird isotherm betrieben, so dass die freigesetzte Sorptionsenthalpie über den Wärmestrom $\dot{Q}_{AS}$ abgeführt werden muss. Werden Kondensator und Absorber auf gleichem Temperaturniveau betrieben (T_1), ist im Falle der Betriebsweise als Wärmepumpe die Nutzleistung $\dot{Q}_{Nutz,AWP} = \dot{Q}_1 = \dot{Q}_K + \dot{Q}_{AS}$. Bei der Betriebsweise als Kältemaschine muss das System an dieser Stelle gekühlt werden, wobei die Kühlleistung zum Teil ein Mehrfaches der Kälteleistung $\dot{Q}_{Nutz,AKM} = \dot{Q}_0 = \dot{Q}_V$ entsprechen kann, die das System über den Verdampfer auf dem Temperaturniveau T_0 aufnimmt.

Das Sorptiv strömt nun, durch den niedrigen Dampfdruck des Absorptivs im Absorber getrieben, in der Dampfphase in den Absorber und wird dort vom Absorbens absorbiert. Das so gebildete Absorbat wird über eine Pumpe in den Desorber gefördert, wo der Kreislauf wieder beginnt.

Die Druckerhöhung erfolgt bei der AWP und der AKM über die Zufuhr eines Wärmestroms in den Desorber, daher wird auch von einer Thermokompression gesprochen. Ein wesentlicher Unterschied der Thermokompression gegenüber der mechanischen Kompression ist, dass ausser einer Pumpe keine bewegten Komponenten notwendig sind, woraus sich folgende Vorteile ergeben:

- Leiser Betrieb
- Vibrationsarmer Betrieb
- Geringer Verschleiss
- Lange Lebensdauer
- Hohe Effizienz im Teillastbetrieb

Die Funktionsweise der AWP und AKM wurde anhand eines geschlossenen Absorptionsprozesses dargestellt und erläutert. Adsorptionsprozesse oder eine offene Prozessführung erfordern zum Teil eine andere Betriebsweise der Thermokompression, beruhen aber auf denselben Prinzipien wie der dargestellte Prozess.

Ausführliche Erläuterungen zu den Betriebsweisen und zu Installationsbeispielen von AWP und AKM finden sich in den Literaturstellen gemäss Tabelle 7.

Adsorptions-		Absorptions-	
Wärmepumpe	Kältemaschine	Wärmepumpe	Kältemaschine
[8], [14], [15], [16], [17], [2]	[18], [16], [19], [20], [21], [22]	[14], [17], [23], [24], [25]	[22], [23], [24], [25], [13], [26], [27]

Tabelle 7: Literaturstellen zu Betriebsweisen und Installationsbeispielen von Ad-/Absorptionswärmepumpen (AWP) und Ad-/Absorptionskältemaschinen (AKM)

Eine Marktanalyse von Schade zu sorptiven Wärmetransformationen zeigt auf, dass das Angebot an AKM den Markt gegenüber dem Angebot von AWP dominiert, siehe Abbildung 16 [28]. Bei einer kurzen Literaturrecherche wurden für AWT keine Hersteller oder Anwendungsbeispiele gefunden. Im Bereich der Forschung werden aktuell Forschungsarbeiten zu dem Aufbau der Maschinen beziehungsweise der Verschaltungen der Komponenten und den Arbeitspaaren durchgeführt. Zu nennen sind beispielsweise das Karlsruher Institut für Technologie mit einem nationalen und die Technische Universität Berlin mit in einem internationalen Projekt [29, 30].

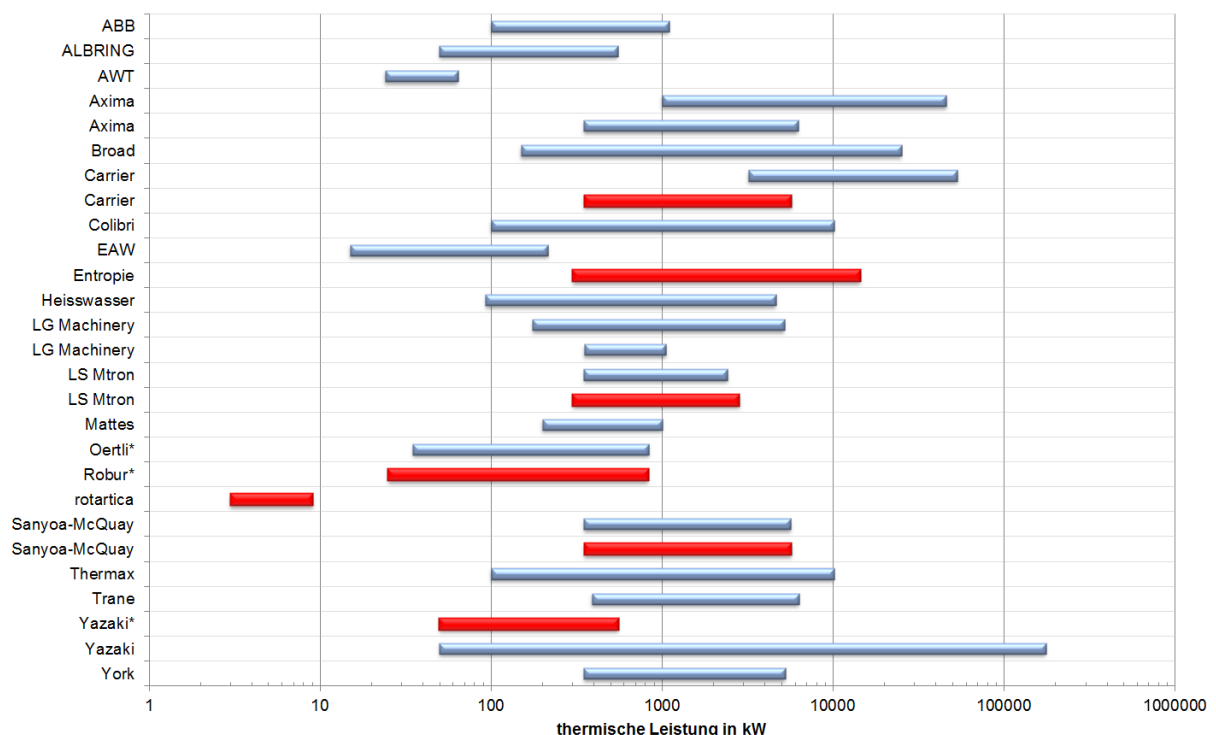


Abbildung 16: Grafische Darstellung der Leistungsbereiche von sorptiven Wärmetransformationsmaschinen im Produktportfolio einzelner Hersteller [28]. blau = Sorptionskältemaschine; rot = Sorptionswärmepumpe

Einordnung

Das energetische und wirtschaftliche Potenzial der drei verschiedenen thermischen Wärmetransformatoren weisen einige generelle Gemeinsamkeiten auf.

Alle Maschinen ermöglichen es, Prozesswärmeströme auf einem geringen Temperaturniveau als Antrieb zu nutzen, die ansonsten ungenutzt an die Umgebung abgeführt würden. Neben ungenutzten Prozesswärmeströmen können auch andere Wärmequellen, wie zum Beispiel die Solarthermie, in die industriellen Prozesse integriert werden. Durch diese Massnahmen wird der iERG erhöht beziehungsweise der Bedarf an Primärenergie gesenkt, woraus eine Minderung der CO₂- und Schadstoffemissionen folgt. Die energetische Effizienz der Maschinen weist keine starke Abhängigkeit zu der Lage der Temperaturniveaus oder der Höhe des Temperaturhubs auf, woraus eine hohe Effizienz der Maschinen im Teillastbetrieb folgt. Mit einer Zunahme des maximalen absoluten Temperaturhubs bei AWT und AKM steigt jedoch der technische Aufwand für die Rückkühlung stark an, so dass der Temperaturhub aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt ist.

Daraus folgt, dass bezüglich des energetischen Potenzials keine Einschränkungen an die Integrationsmöglichkeiten einer entsprechenden Maschine in einen industriellen Prozess bestehen. Folgende Faktoren wirken sich jedoch positiv auf das energetische Potenzial aus:

- die Antriebswärme wird aus einem energetisch günstigen Brennstoff erzeugt.
- die Antriebswärme wird über Solarthermie erzeugt.
- für die zum Antrieb genutzte Prozesswärme besteht keine zusätzliche Nutzungsoption.
- die Maschine muss häufig im Teillastbereich betrieben werden.

Das wirtschaftliche Potenzial der Maschinen beruht auf reduzierten Betriebskosten, die aus dem geringeren Energiebedarf und Wartungsaufwand erfolgen. Dem stehen im Vergleich zu technischen Alternativen hohe Investitionskosten gegenüber, die innerhalb der Amortisationszeit durch die reduzierten Betriebskosten eingeholt werden müssen. Aus den genannten Eigenschaften lassen sich folgende Bedingungen ableiten, die sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken:

- Eine hohe Betriebsstundenzahl pro Jahr.
- Eine hohe Zuverlässigkeit der Maschine.
- Ein häufiger Betrieb im Teillastbereich.
- Die Nutzung von Solarthermie oder nicht anderweitig nutzbarer Prozesswärme als Antriebswärme.

4.2. Thermische Energiespeicherung

Die Sorptionsenthalpie eines Sorptionsprozesses eignet sich bei einem Temperatur-Wechsel-Sorptionsprozess auf Grund der folgenden drei Merkmale zur Speicherung thermischer Energie:

- Sorptionsenthalpie kann verlustfrei gespeichert werden
- hohe Speicherdichte
- hohe Speichertemperaturen

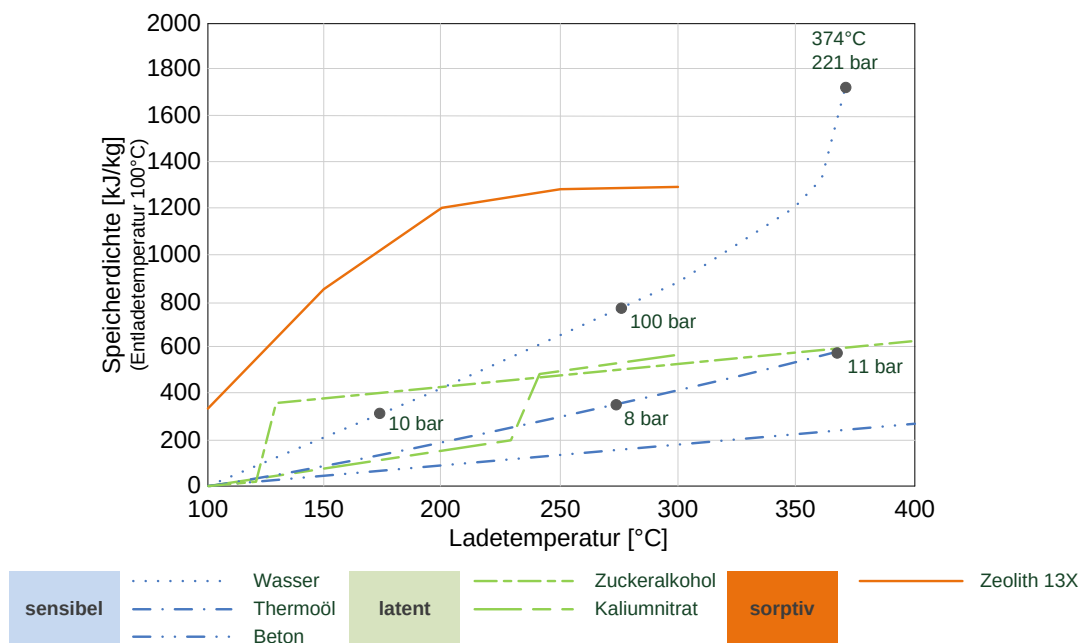


Abbildung 17: Spezifische Energiedichten in kJ/kg ab der Bezugstemperatur von 100°C bis 400°C ausgewählter thermischer Speichermedien; Grafik nach [31], Daten [32, 33]

Die beiden Merkmale „hohe Speicherdichte“ und „hohe Speichertemperaturen“ eines thermischen Energiespeichers mit einem Sorptionsprozess sind in Abbildung 17 verdeutlicht. Es sind die spezifischen Speicherdichten ausgewählter Speichermedien für Temperaturen über 100°C gezeigt, für die konventionelle drucklose Wasserspeicher nicht geeignet sind. Die angegebenen Werte entsprechen den theoretisch erreichbaren Werten der Speichermedien und berücksichtigen nicht die Masse der Speicherhülle [31-33]. Die besten Werte liegen für die chemisch reversiblen Reaktionen (rot) vor, jedoch sind die Speichersysteme noch im Bereich der Grundlagenforschung [31]. Das sorptive Speichermedium Zeolith (gelb) weist für Temperaturen bis 300°C eine spezifische Speicherdichte auf, die das Vielfache der sensiblen und latenten Speichermedien beträgt. Die flüssigen Medien benötigen

eine Druckhülle, welche durch die konstruktiven und sicherheitstechnischen Anforderungen aufwändige Installationen erfordert. Das feste Medium Beton weist geringe spezifische Speicherdichten auf. Die latenten Speichermedien (grün) liegen beim Bezugspunkt von 100°C im festen Aggregatzustand vor und stellen daher hohe Anforderungen an die Wärmeübertragung für das Erreichen einer hohen und konstanten Leistung.

Sorptive thermische Energiespeicher sind aktuell nicht als Standardprodukt auf dem Markt erhältlich und werden nur vereinzelt in Marktnischen kommerziell vertrieben [34]. Die Forschung und Entwicklung konzentriert sich auf Speichersysteme für die Gebäudetechnik. Im Bereich der Gebäudetechnik sollen insbesondere die guten Langzeitspeichereigenschaften für die saisonale Speicherung solarer Energie nutzbar gemacht werden. Eine Übersicht zu Veröffentlichungen der letzten Jahre zu den Bereichen Reaktordesign, Konzept/Regelung und Sorbens von sorptiven Speichersystemen, untergliedert in die Anwendung für die Gebäudetechnik und die Industrie, ist in Tabelle 8 gegeben. Veröffentlichungen zum Sorbens sind wegen der Unabhängigkeit der Anwendung keinem Sektor zugeordnet.

Sektor	Reaktordesign	Konzept/Regelstrategie	Sorbens
Gebäudetechnik	[35], [36], [37], [38]	[18], [35], [36], [37], [39]	[8], [39], [40], [41], [42]
Industrie	[34], [43]	[15], [34], [43]	

Tabelle 8: Ausgewählte Studien und Projekte zur sorptiven thermischen Speicherung in der Gebäudetechnik mit Angabe zum Forschungsschwerpunkt in chronologischer Reihenfolge

Sorptive thermische Speicher können entweder als thermodynamisch offenes oder geschlossenes System konstruiert werden. Bei einem offenen Speichersystem findet ein Massentransport des Sorptivs (in der Regel Wasserdampf der feuchten Luft) über die Systemgrenzen des Speichers statt. Neben der thermischen Energie wird bei offenen Systemen auch ein Stofftrennungspotenzial bei den Speicherprozessen genutzt. Auf Grund dieser Besonderheit werden offene Systeme in Kapitel 4.4 gesondert betrachtet. Ein geschlossenes System ist hingegen ein reiner Energiespeicher, dessen Funktion nachfolgend an einem gläsernen Demonstrator eines Festbettreaktors mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf im Unterdruck kurz erläutert wird, siehe Abbildung 18 und Abbildung 19.

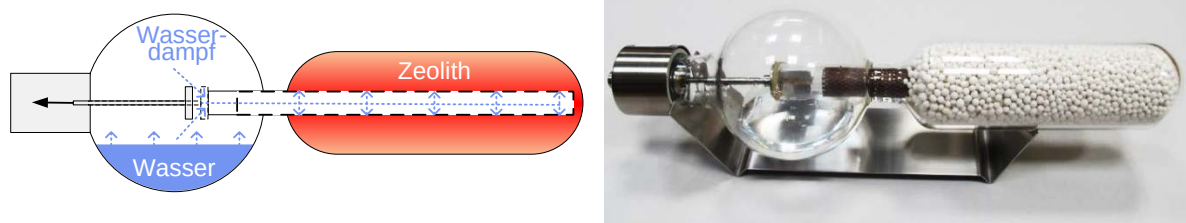


Abbildung 18: Schema (links) und Bild (rechts) eines Demonstrators für einen geschlossenen Festbettreaktor im Unterdruck

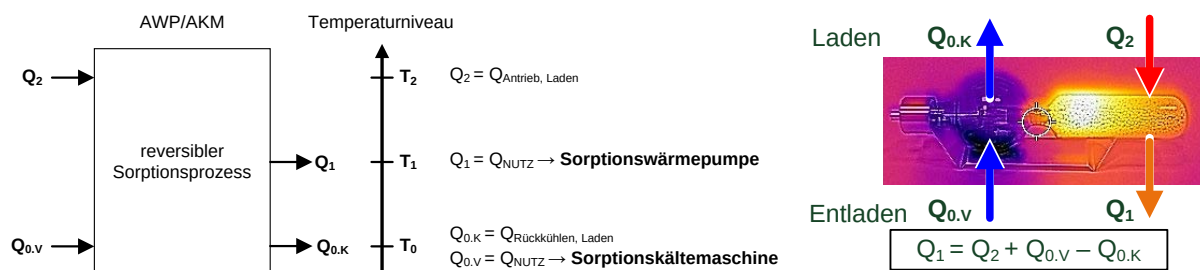


Abbildung 19: links: Skizze der Temperaturniveaus eines sorptiven thermischen Speichers als AWP/AKM
rechts: Energiebilanz eines Demonstrators für einen geschlossenen Festbettreaktor

Beim thermischen Beladen des Speichers wird die Zeolithschüttung erhitzt. Gemäss der Sorptionsisotherme für das Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf, siehe Seite 14, nimmt die Beladung des Zeoliths mit Wasser unter Aufnahme der Energie Q_2 bei hoher Temperatur ab. Das als Dampf frei werdende Wasser strömt in das Wasserreservoir des Speichers, wo es unter Abgabe der Energie $Q_{0,K}$ bei tiefer Temperatur auskondensiert. Wird das Ventil geschlossen und die Wärmequelle entfernt, kühlt das System auf Umgebungstemperatur ab und die Trennung von Wasserdampf und Zeolith bleibt

erhalten. Die thermische Energie ist durch die Adsorptionsenthalpie bis zum Öffnen des Ventils gespeichert. Der Entladevorgang wird durch das Öffnen des Ventils eingeleitet. Es wird solange Wasserdampf vom Zeolith adsorbiert, bis sich wieder ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt. Bei der Adsorption wird in Abhängigkeit des Beladungshubs des Zeoliths gemäss Abbildung 5 die Adsorptionsenthalpie in Form von Wärme Q_1 frei und kann einer Wärmesenke zugeführt werden.

Beim Entladen des Speichers führt die Adsorption des Wasserdampfes zu einer Reduktion des Wasserdampfpartialdruckes im System. In der Folge verdampft das Wasser im Reservoir (Verdampfer), wofür die Verdampfungsenthalpie $Q_{0,V}$ dem Verdampfer von aussen auf einem niedrigen Temperaturniveau zugeführt wird.

Es ist erkennbar, dass die thermische Energiespeicherung über einen Sorptionsprozess der Funktionsweise einer zeitlich versetzt arbeitenden Sorptionswärmepumpe gleicht. Die auf einem hohen Temperaturniveau zugeführte Wärme Q_2 kann beim Entladen sowohl als Wärmesenke ($Q_{0,V} = Q_{Nutz}$) als auch als Wärmequelle ($Q_1 = Q_{Nutz}$) genutzt werden.

Die auf die Sorbensmasse bezogene spezifische Speicherkapazität eines sorptiven Speichersystems ist eine Systemeigenschaft und von den Systemgrössen Temperatur (T) und Partialdruck des Sorptivs ($p_{Sorptiv}$) abhängig, siehe Abbildung 20. Die Grenze der maximalen Speicherkapazität beim Laden wird erreicht, wenn das gesamte Sorptiv aus dem Sorbens ausgetrieben wird, das entspricht einer Beladung des Zeoliths mit Wasser von $X_{min} = 0$. Beim Entladen wird die Grenze der maximalen Speicherkapazität erreicht, wenn im thermodynamischen Gleichgewicht die maximale Beladung des Zeoliths mit Wasser erreicht wird ($X_{max} = 0.32$ [abhängig vom Arbeitspaar]).

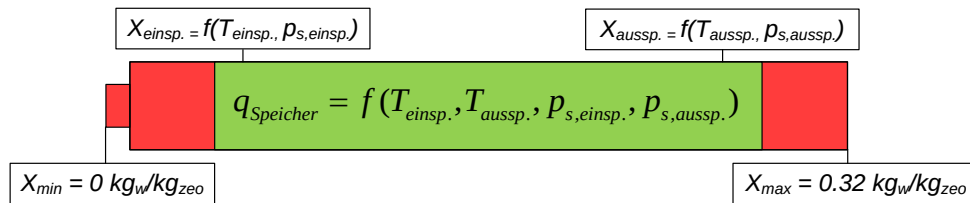


Abbildung 20: Schematische Darstellung der thermischen Speicherkapazität als Systemeigenschaft für das Arbeitspaar Zeolith/Wasserdampf. grün: genutzte; rot: ungenutzte Speicherkapazität

Zur Bestimmung der Speicherkapazität müssen somit sowohl die energetischen Eigenschaften des Arbeitspaares, wie beispielsweise die Funktion der differentiellen Sorptionsenthalpie, als auch die Systemgrössen Temperatur und Partialdruck des Sorptivs beim Laden und Entladen bekannt sein.

Bestimmung der Differenz der Speicherdichten der Speichermedien Zeolith und Wasser

Nachfolgend wird die spezifische Speicherkapazität eines geschlossenen Speichersystems (wie dem oben dargestellten Demonstrator) mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf durch die Auswertung der experimentell bestimmten energetischen Eigenschaften von Zeolith 13X in der Dissertation von Hauer [8] bestimmt. Zur Bestimmung der mathematischen Funktion der spezifischen differentiellen Sorptionsenthalpie (Formel 2-1) ist die dokumentierte charakteristische Kurve der Bindungsenergie über der Temperatur $[\Delta h_B(T)]$ durch eine Regressionsfunktion beschrieben und zu der Funktion der Verdampfungsenthalpie von Wasser über der Temperatur $[\Delta h_V(T)]$ addiert. Aus dem Isotherendiagramm des Arbeitspaares wird die Isobare für einen Wasserdampfpartialdruck von 10 mbar (entspricht bei einem offenen System einer Beladung der Luft mit Wasser von 6 g/kg) ausgelesen und ebenfalls durch eine Regressionsgleichung beschrieben. Durch das Lösen der Formel 4-1 ergibt sich der latente Anteil der thermischen Speicherkapazität in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen dem Ein- und Ausspeichern.

$$q_{\text{Speicher, Zeolith}}(T_{\text{einsp.}}, T_{\text{aussp.}}) = \int_{T_{\text{aussp.}}}^{T_{\text{einsp.}}} (\Delta h_B(X(T)) + \Delta h_V(T)) \cdot dT \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{Zeolith}}} \right] \quad 4-1$$

Für die Quantifizierung des energetischen Vorteils des thermischen Energiespeichers mit einem Sorptionsprozess wird ein thermischer Energiespeicher mit der sensiblen Energie von Wasser als Referenzsystem gewählt. Das Referenzsystem ist durch den Siedepunkt von Wasser bei 1 bar(a) auf eine Einspeicherungstemperatur von $<100^\circ\text{C}$ limitiert. Die thermische Speicherkapazität des Wasserspeichers ergibt sich bei konstanter spezifischer Wärmekapazität des Wasser $c_{p,\text{Wasser}} = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ aus Formel 4-2.

$$q_{\text{Speicher,Wasser}}(T_{\text{einsp.}}, T_{\text{aussp.}}) = \int_{T_{\text{aussp.}}}^{T_{\text{einsp.}}} c_{p,\text{Wasser}} \cdot dT \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{Wasser}}} \right] \quad 4-2$$

Der Energiedichtevorteil lässt sich somit aus der Differenz gemäss der Formel 4-3 bestimmen, wobei zu beachten ist, dass die Differenz nur bis zu einer Einspeicherungstemperatur von 100°C gebildet wird, für Temperaturen grösser 100°C wird die Energiespeicherdichte von dem Arbeitspaar Zeolith/Wasserdampf angegeben.

$$q_{\text{Speicher,Vorteil}}(T_{\text{einsp.}}, T_{\text{aussp.}}) = q_{\text{Speicher,Zeolith}}(T_{\text{einsp.}}, T_{\text{aussp.}}) - q_{\text{Speicher,Wasser}}(T_{\text{einsp.}}, T_{\text{aussp.}}) \Big|_{T_{\text{ein}} < 100^\circ\text{C}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{Speichermedium}}} \right] \quad 4-3$$

Die grafische Darstellung des Energiedichtevorteils nach Formel 4-3 ist in Abbildung 21 für Einspeicherungstemperaturen bis 250°C in einem Flächendiagramm zu sehen. Der Vorteil der hohen Energiedichte ist in dem Temperaturbereich bis 100°C zu erkennen. Die Energiespeicherdichte des Sorptionsprozesses ist in diesem Bereich etwa doppelt so hoch wie die sensible Speicherdichte von Wasser (Beispiel: $q_{\text{Speicher,Zeolith}}(100^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 874 \text{ kJ/kg}$ und $q_{\text{Speicher,Wasser}}(100^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 420 \text{ kJ/kg}$). Der Vorteil des möglichen hohen Temperaturniveaus ist durch den bis zu 250°C erweiterten Temperaturbereich erkennbar. Der Vorteil der geringen Speicherverluste ist der Formel 4-1 entnehmbar. In der Formel werden nur die verlustfreien latenten Anteile der thermischen Speicherkapazität von Zeolith 13X berücksichtigt. Der verlustbehaftete sensible Anteil von Zeolith 13X ist in der Formel 4-1 nicht mit aufgenommen und muss bei der Berechnung des maximalen Vorteils noch addiert werden und würde den energetischen Vorteil noch vergrössern. Der dargestellte Energiedichtenvorteil entspricht somit dem Potenzial, das theoretisch über unbegrenzte Zeitspanne ohne Speicherverluste vorliegt.

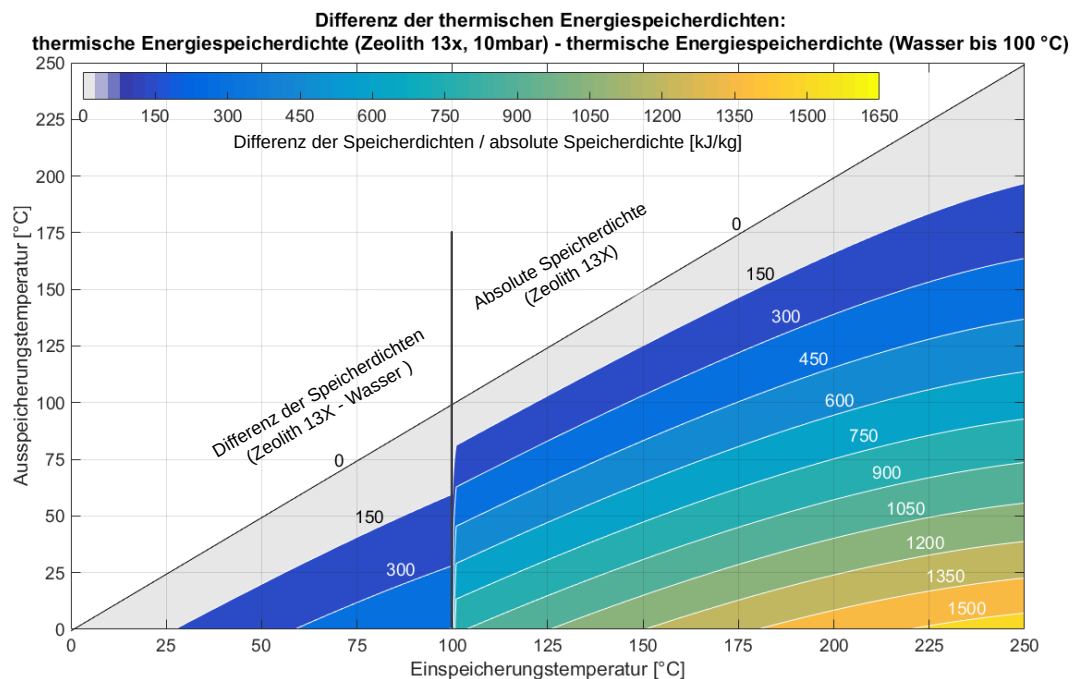


Abbildung 21: Differenz der thermischen Energiespeicherdichten zwischen den Speichersystemen **Zeolith** (latent, [geschlossen: 10 mbar, $T_{\text{Kondensator}} = T_{\text{Verdampfer}} = 7^\circ\text{C}$ oder offen: Wasserdampfpartialdruck = 10 mbar) und **Wasser** (sensibel, bis 100°C)

Einordnung

Im Vergleich zu den technischen Alternativen auf dem Markt weisen Sorptionsprozesse im Bereich der thermischen Energiespeicherung Vorteile wie ein breites Temperaturband oder geringe Speicherverluste auf. Das energetische Potenzial von thermischen Speichern beruht wie bei der Wärmetransformation auf einer Erhöhung des iERG. Gegenüber den technisch alternativen

Speichertechnologien weisen sorptive thermische Energiespeicher insbesondere unter den folgenden Prozessbedingungen energetische Vorteile auf:

- Lange Speicherzyklen notwendig.
- Lade- und Entladetemperatur auf verschiedenen Temperaturniveaus bis zu 250°C.
- Hohe geforderte Speicherdichte (volumetrisch oder gravimetrisch).
- Trockene und warme Abluft eines offenen Sorptionsspeichers als Zuluft eines Trocknungsprozesses.

Das wirtschaftliche Potenzial beruht wie bei der Wärmetransformation und alternativen Technologien zur thermischen Energiespeicherung auf dem reduzierten Brennstoffverbrauch. Dieser ist umso höher, je kürzer der Speicherzyklus, je geringer die sensiblen Speicherverluste und je grösser der Arbeitsbereich des Speichers ist.

Forschungsbeispiel – Hochtemperaturspeicher in einem BHKW-System

Am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen wurde eine Studie zur Integration eines BHKW-Systems (BHKW – Blockheizkraftwerk) mit einem sorptiven thermischen Energiespeicher in die Energieversorgung einer Brauerei durchgeführt. In der Studie wurden die energetischen und wirtschaftlichen Potenziale theoretisch bestimmt und an einer Modellanlage experimentell validiert [15].

Das BHKW-System soll so ausgelegt sein, dass es sowohl die überwiegend gleichmässig anfallende thermische Grundlast bei Temperaturen unter 90°C effizient bereitstellt, als auch die Energieversorgung eines Eindampfprozesses bereitstellt. Bei der Eindampfung der Bierwürze wird für einen kurzen Zeitraum eine hohe Leistung bei mindestens 110°C benötigt. Wird das BHKW für die benötigte Leistung beim Eindampfen der Würze ausgelegt, so wird es überwiegend im energetisch und wirtschaftlich ungünstigen Teillastbetrieb betrieben.

Das Konzept des LTT sieht vor, einen geschlossenen Festbettreaktor mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf als sorptiven thermischen Speicher zur Deckung der Spitzenlast des Eindampfprozesses zu integrieren. Das BHKW wird so dimensioniert, dass während des Zeitraums, in dem die Würzpfanne nicht beheizt werden muss, thermische Energie gespeichert wird, welche die Würzpfanne während der kurzen Betriebszeit zusätzlich benötigt. Somit kann das BHKW kontinuierlich im Nennbetriebspunkt betrieben werden und ist auf eine minimale Grösse dimensioniert, ohne dass Investitionen in einen Zusatzbrenner getätigt werden müssen.

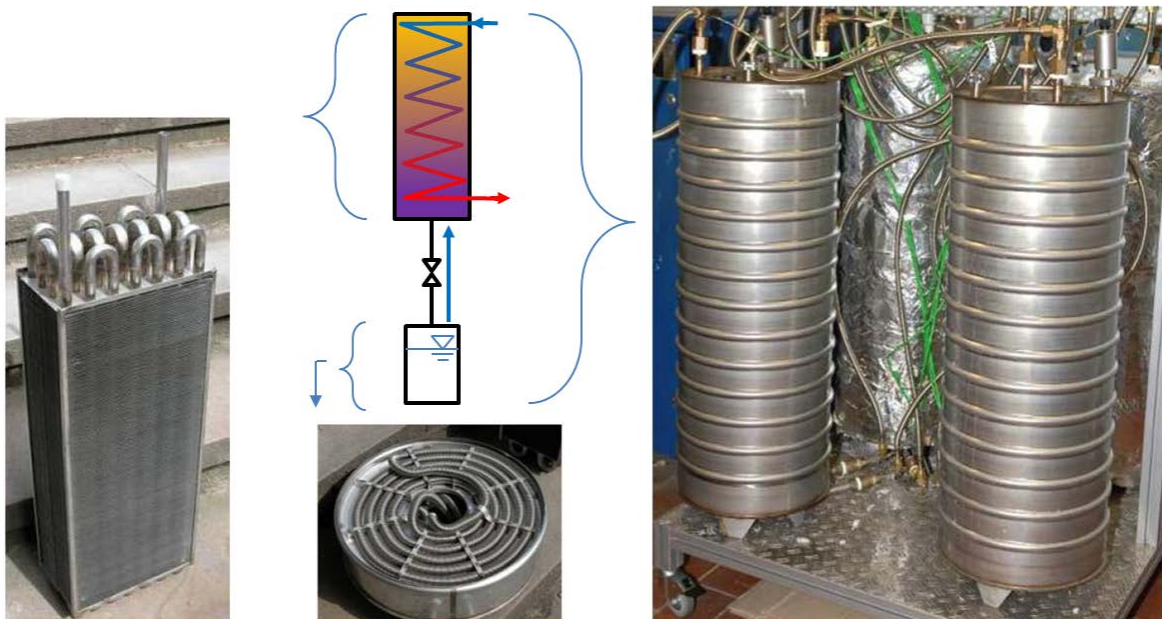


Abbildung 22: Übersicht eines **stationären geschlossenen** thermischen sorptiven Speichersystems [15]
Links: Ad-/Desorber; Mitte: Verdampfer/Kondensator; Rechts: ungedämmte Speichereinheit

Um den Eindampfprozess anzutreiben muss der Speicher bei einer Temperatur von mindestens 110°C entladen werden, so dass entsprechend hohe Ladetemperaturen folgen. Das Zeolith wird über einen Thermo-Öl-Kreislauf bei 200°C über 3 h bei geringer Leistung geladen und kann auf Grund des hohen Verhältnisses von Leistung zu Kapazität innerhalb von 0.5 h entladen werden und zusammen mit der direkten Nutzung der Ladeleistung in dieser Zeit die geforderte Leistung zum Eindampfen der Würze bei Temperaturen über 110°C bereitstellen, siehe Abbildung 23.

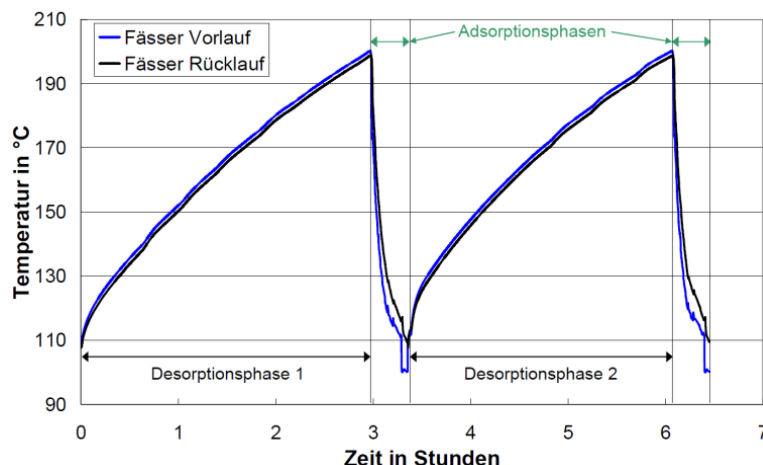


Abbildung 23: Vor- und Rücklauftemperaturen des Integrationsbeispiels eines Speichersystems in ein BHKW-System einer Brauerei über die Zeit eines Arbeitstages [15]

An der Modellanlage wurden Versuche mit verschiedenen Kombinationen der Temperaturniveaus von Verdampfer und Kondensator durchgeführt und der Wirkungsgrad des Speichers gemäss der Formel 4-4 bestimmt. Die experimentell bestimmten Wirkungsgrade und Speicherdichten des Speichers sind in Abhängigkeit der Temperaturniveaus der Verdampfer- Kondensatoreinheit in Tabelle 9 gezeigt.

$$\eta_{HT} = \frac{Q_{Nutzen}}{Q_{Aufwand}} = \frac{Q_{aussp.}}{Q_{einsp.}} = \frac{Q_{Adsorption}}{Q_{Desorption}} \quad 4-4$$

Temperatur-paarung	Kondensator-temperatur	Verdampfer-temperatur	Speicherdichte in kWh/m ³	η_{HT}
Kombination 1	60°C	90°C	61.7	0.78
Kombination 2	90°C	60°C	31.5	0.5
Kombination 3	90°C	90°C	48.7	0.68

Tabelle 9: Gemessene Speicherdichten und Wirkungsgrade am geschlossenen Festbettreaktor mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf in Abhängigkeit der Temperatur der Verdampfer- und Kondensatoreinheit, Temperaturniveau im Reaktor: 110°C bis 200°C [15]

Der höchste gemessene Wirkungsgrad des Speichers in der Modellanlage betrug 78%. In Modellrechnungen wurde gezeigt, dass ein Grossteil des thermischen Verlustes über die Speicherhülle beim Desorptionsprozess bei 200°C anfällt. Wird anstatt der verwendeten Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.06 \text{ W/(m K)}$ eine Vakuumsuperdämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.001 \text{ W/(m K)}$ eingesetzt, so ergibt sich den Berechnungen nach ein theoretischer Wirkungsgrad von mindestens 93% [15].

Die gemessenen Kennwerte des Modellspeichersystems wurden auf die Anlagengrösse der Brauerei skaliert und energetisch und wirtschaftlich analysiert. Das Ergebnis ist, dass der Gesamtenergiebedarf des modellierten Brauereiprozesses durch die Kombination von einem BHKW mit dem hochskalierten thermischen Speicher des Modellprozesses um ca. 78% gesenkt werden kann. Die Wirtschaftlichkeit des Systems wurde nachgewiesen. Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden die zum Zeitpunkt der Studie vorliegenden finanziellen Fördermöglichkeiten mit berücksichtigt.

4.3. Stofftrennung

In der Industrie sind Sorptionsprozesse bei Trennprozessen weit verbreitet. Die Sorptionsprozesse sind zumeist zum Anfang und/oder zum Ende einer Prozesskette in der Anlage integriert. Bei der Prozesskette „Verbrennung von Biogas“ erfolgen beispielsweise zu Anfang eine CO₂-Abtrennung aus dem Biogas und eine SO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas am Ende.

Ist das Trägerfluid, aus dem ein Stoff entfernt wird, das Produkt des Trennungsprozesses, wird von Reinigung gesprochen, ist der entfernte Stoff das erwünschte Produkt des Trennungsprozesses, wird der Vorgang Gewinnung genannt. Für die Gewinnung ist ein Desorptionsprozess zwingend erforderlich, um das Sorptiv als Reinstoff vorliegen zu haben. Bei der Reinigung besteht häufig keine Verwendung für das Sorptiv (dem entfernten Stoff), so dass das Sorbat im Anschluss entsprechend deponiert oder verbrannt werden kann, wenn die Regeneration über einen Desorptionsprozess nicht wirtschaftlich ist [3].

Das zu trennende Gemisch kann dabei in der Gas- oder in der Flüssigphase vorliegen. Im Falle der Trennung in der Gasphase sind sowohl Ad- wie auch Absorptionsprozesse möglich. Bei der Trennung in der Flüssigphase werden, auf Grund der technisch einfacheren Entfernung des Sorbats aus der Flüssigkeit, in der Regel Adsorptionsprozesse eingesetzt.

Qualitätsmerkmale der Trennungsprozesse sind Eigenschaften wie die Reinheit des Stoffes, der maximale Massendurchsatz oder die Robustheit des Prozesses. Die Sorptionstrennprozesse stehen daher in ökonomischer und technischer Konkurrenz zu anderen thermischen und mechanischen Trennverfahren. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens erfolgt über eine Analyse der Kennfelder der einzelnen Trennverfahren in Bezug auf definierte Randbedingungen. Häufig beruhen die Kennfelder nur auf Erfahrungswerten und benötigen dementsprechend einen gewissen Erfahrungsschatz, um erfolgreich angewendet zu werden [3].

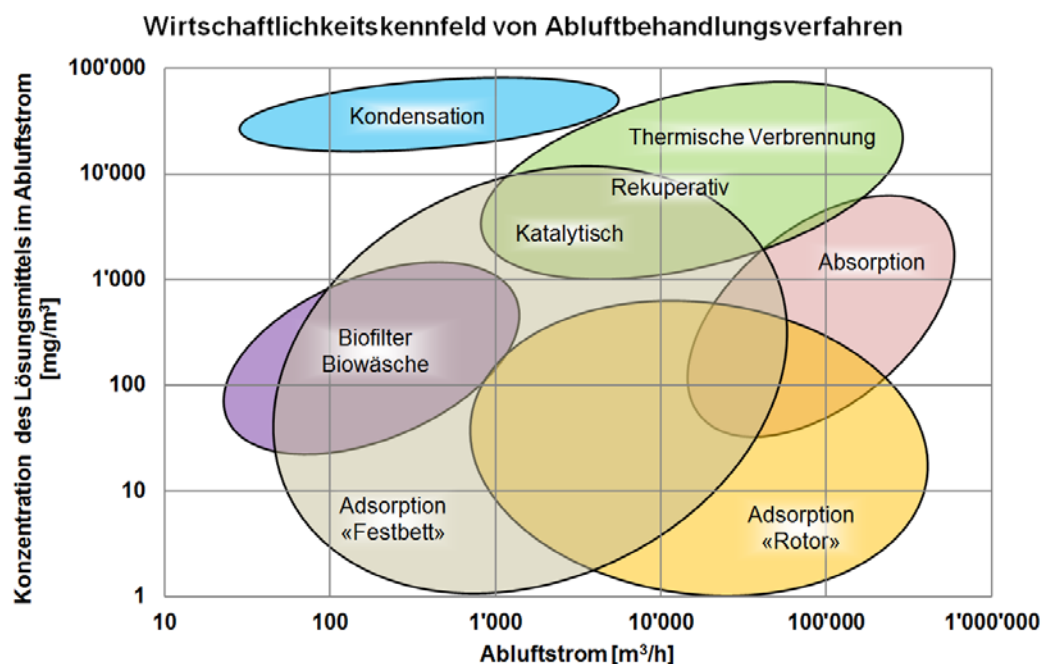


Abbildung 24: Auf Erfahrungswerten basierendes Wirtschaftlichkeitskennfeld von Abluftbehandlungsverfahren nach Wnuk [44]

Einen Überblick über wichtige Einsatzgebiete für Adsorptionsprozesse zur Stofftrennung bei industriellen Anwendungen gibt Bathen [3]:

- Adsorptive Gaszerlegung [Gewinnung von Stickstoff und Sauerstoff]
- Aufbereitung von Rohgasen [z.B. CO₂-Entfernung bei Biogasen]
- Trennung von Gasgemischen in Raffinerien [Isomeren-Trennung]
- Trocknung von Luft [wasserarme Luft für pneumatische Maschinen]
- Vorbehandlung bei der kryogenen Luftzerlegung [Entfernung von CO₂ und H₂O]
- Abluftreinigung [Entfernung von Störstoffen wie Lösungsmittel]
- Abgasreinigung [Entfernung von Schadstoffen wie Dioxinen oder Quecksilber]
- Militär- und Sicherheitstechnik [zum Beispiel in Gasmaskenfiltern oder ABC-Filtern]

Einordnung

Sorptionsprozesse sind im Bereich der Stofftrennung bereits auf Grund des hohen energetischen und wirtschaftlichen Potenzials in der Industrie weit verbreitet. Das energetische Potenzial der Sorptionsprozesse begründet sich durch die Eigenschaft, dass gewünschte Stoffe sich gezielt an am/im Sorbens anlagern und nicht mittels hohem Energieaufwand vom Fluid getrennt werden müssen. Solange die Kapazität des Sorbens bei den Betriebsbedingungen nicht erreicht ist, findet die Anlagerung statt und es können hohe Reinheiten erreicht werden. Bei der Desorption liegt im Allgemeinen eine wesentlich höhere Dichte des abgetrennten Stoffes im System vor als bei der Ausgangssituation. Der erneute Trennprozess liegt dadurch in einem energetisch günstigeren Bereich, da weniger inerte Komponenten an dem Prozess beteiligt sind. Das energetische Potenzial ist umso grösser, je:

- geringer die Konzentration des zu entfernenden Stoffes (-gemisches) im Fluid ist.
- kühler das Fluid ist.
- besser der entfernte Stoff (-gemisch) wieder im Prozess genutzt werden kann.
- grösser der Volumenstrom des Fluids ist

Das wirtschaftliche Potenzial begründet sich durch den niedrigeren benötigten Energieaufwand für den Trennprozess und in Abhängigkeit des Prozesses auch durch die geringeren Investitionskosten. Insbesondere bei geringen Konzentrationen und hohen Volumenströmen liegen die alternativen Technologien sowohl bei den Investitionskosten als auch bei den Betriebskosten über den Sorptionsprozessen. Werden die Stoffe beispielsweise bei geringen Konzentrationen durch eine Membran getrennt, muss der gesamte Volumenstrom entsprechend verdichtet werden, wodurch ein entsprechend gross dimensionierter Verdichter mit einer hohen Leistungsaufnahme benötigt wird. Die Abhängigkeit des wirtschaftlichen Potenzials vom Prozess entspricht daher der oben aufgeführten Abhängigkeit des energetischen Potenzials.

Verminderung von VOC-Emissionen

Aus Gründen des Umweltschutzes wird die Emission von VOCs in der Schweiz seit 1986 durch die Luftreinhalteverordnung reglementiert. Emittiert werden die VOCs in vielen industriellen Prozessen, wie beispielsweise in Raffinerien oder bei der Möbelherstellung. Durch verschiedene politische Instrumente wie einer Lenkungsabgabe auf VOC-Emissionen, sind diese in der Schweiz in den letzten Jahren degressiv gemindert worden [45]. Gemäss dem Luftreinhaltekonzept vom 11. September 2009 ist es das aktuelle Ziel der Schweizer Umweltpolitik, die VOC-Emissionen auf das Bezugsjahr 2005 um 20 - 30% zu senken, siehe Abbildung 25.

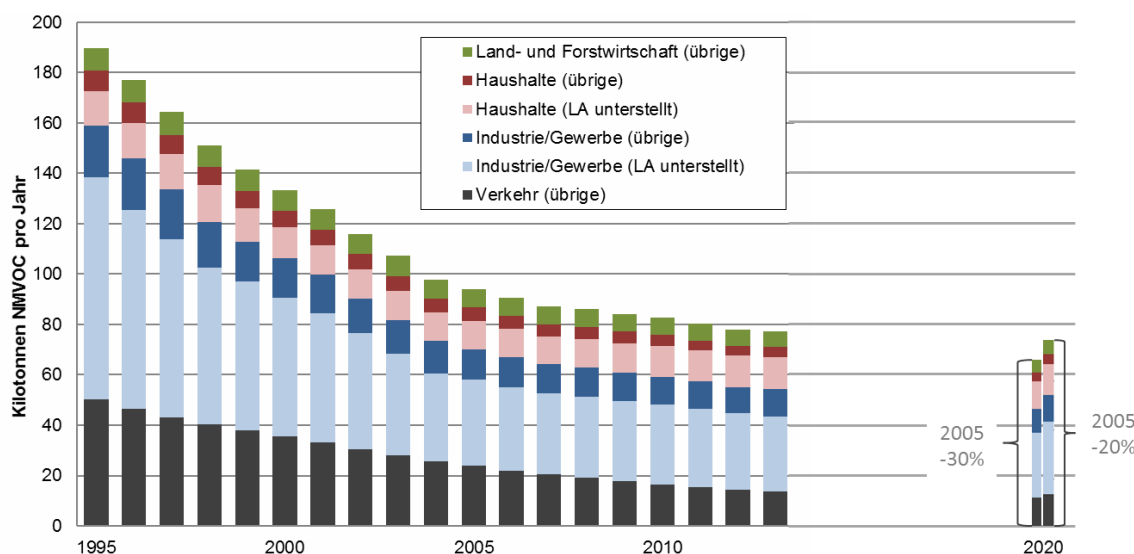


Abbildung 25: Nach Sektoren unterteilte Darstellung der in der Schweiz emittierten Massen an VOCs ohne Methan (non-methane volatile organic compounds, NMVOC) der Jahre 1995 - 2014 [45]. Für 2020 sind die Werte entsprechend den klimapolitischen Zielen der Schweiz eingezeichnet, die einer Reduktion der Emissionen von 2005 um 20 - 30% entsprechen.

In Abbildung 25 ist eine Abnahme der Minderungsrate von VOC-Emissionen zu erkennen. Dies ist durch eine Sättigung an wirtschaftlichen Optimierungsmassnahmen zur Verminderung der VOC-Emissionen begründbar. Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit einer Reduktionsmassnahme ist zu beachten, dass eine Minderung der VOC-Emissionen zu einer Zunahme anderer unerwünschter Schadstoffemissionen führen kann. So wird von Polak et al. beschrieben, dass bei einer regenerativen Nachverbrennungsanlage eine VOC-Entfernungsrate mit 95 - 98% erreicht werden kann, und somit deutlich über den VOC-Entfernungsraten von konventionellen nassarbeitenden Wäschern mit 10 - 30% liegen würde, aber die CO₂-Emissionen in einer Modellrechnung um das Zwei- bis Vierfache steigen [46].

Sorptionsprozesse bieten durch ihre stofftrennende Eigenschaft die Möglichkeit, den mit VOCs beladenen Abluftstrom in einen befreiten- und einen mit VOCs aufkonzentrierten Abluftstrom aufzuteilen. Dies führt zu einer energetisch optimierten Prozessführung und ermöglicht gleichzeitig hohe VOC-Abscheidungsraten [44, 47]. Nach Wnuk werden folgende Eigenschaften für die Sorptionsprozesse zur Ab- und Adsorption von VOCs angegeben [44]:

- **Absorptionsprozesse:**
 - o geeignet für schwankende VOC-Beladung des Abgases
 - o Herausforderung: Absorbens ermitteln und Desorptionsverfahren bestimmen
 - häufig toxisch
 - zum Teil geringe Kapazität
 - Stabilität
 - Eignung für Mehrkomponentengemische
- **Adsorptionsprozesse:**
 - o weite Verbreitung in der Industrie
 - o Rotorkonzepte:
 - geeignet für konstante, schwach beladende und grosse Abgasströme
 - Herausforderung: hohe Investitionskosten
 - o Festbettkonzepte:
 - geeignet für kleine bis mittlere Abgasströme
 - unempfindlich gegen Konzentrationsschwankungen
 - Herausforderung: Desorptionskonzept
 - Wasserdampfdesorption kontaminiert das Abwasser
 - Heissgasdesorption führt zu hohem Energieeinsatz

Praxisbeispiel - Aminrückgewinnung in einer Giesserei

Durch einen neuen sogenannten Camp-Prozess (Combined adsorption membrane process) führt Wnuk auf, wie der hohe Energiebedarf bei der Heissgasdesorption reduziert werden kann, siehe Abbildung 26. Das Abgas (Stickstoff und VOC-Gemisch) des Reaktors während des Desorptionsvorgangs wird über einen Membranfilter geleitet, der nur für die Moleküle der VOC-Verbindungen durchlässig ist. Somit kann das von den VOCs befreite Trägergas Stickstoff wieder aufgeheizt und erneut zur Desorption durch den Reaktor geleitet werden. Hinter der Membran wird nur das Permeat auskondensiert, wodurch der Energiebedarf gemindert wird, da ohne Membran der gesamte Abgasstrom auf die niedrigste Kondensationstemperatur gekühlt werden muss. Das Kondensat kann entsprechend zu neuem Lösungsmittel aufbereitet oder entsorgt werden. Die vorgestellte Prozessführung mindert den Energiebedarf für die Kondensation der VOCs erheblich, wodurch ebenfalls eine Reduktion der Betriebskosten entsteht, siehe Abbildung 27.

Der vorgestellte Prozess wird in einer Giesserei zur Aminrückgewinnung erstmalig getestet [48]. In der Giesserei wird die Abluft der Kernformmaschinen über den Camp-Prozess geleitet, um so das Amin zurückzugewinnen und wiederzuverwerten. In Vorversuchen sind die Funktionsweise erfolgreich nachgewiesen, weitere Komponenten für eine robuste Prozessführung integriert, sowie die Wiederverwendbarkeit des Amins nachgewiesen worden. Vor der Implementierung des Camp-Prozesses in die Anlage wurde das Gasharz-Bindersystem der Giesserei umgestellt. Weitere Vorversuche mit dem neuen Gasharz-Bindersystem ergaben, dass der Prozess weiterhin stabil lief. Es findet weder eine Vergiftung des Adsorbens statt, noch leidet die Funktionsfähigkeit der Membran. Jedoch fällt in der Kondensatorstufe ein Feststoff aus und bildet dabei einen Nadelfilz ähnlichen Belag auf den Kondensatorflächen, Ventilen und anderen Bauteilen. Die so entstehende Verstopfung im Permeatkreis konnte im Rahmen des damaligen Projektes nicht verhindert werden [48].

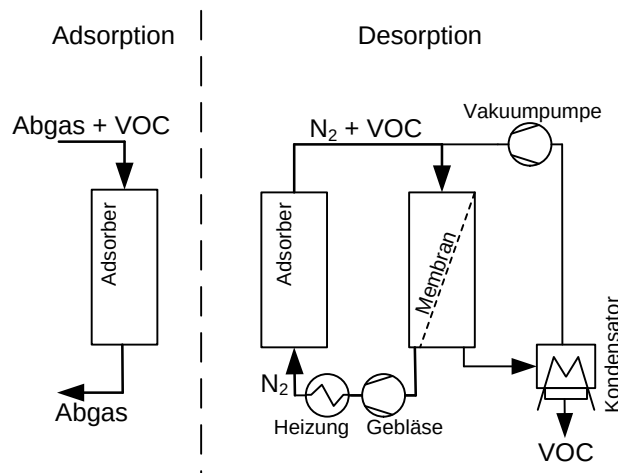


Abbildung 26: Prinzipschema des Camp-Prozesses nach Wnuk [44]

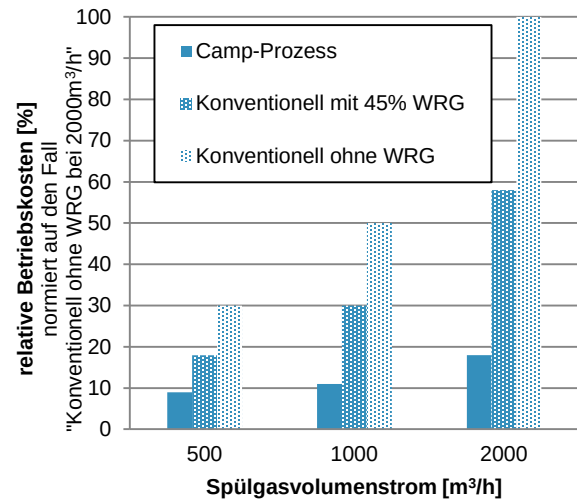


Abbildung 27: Betriebskostenvergleich des Camp-Prozesses gegenüber konventioneller Kondensation des gesamten Spülgases nach Wnuk [44]

Dieses Beispiel der Produktintegration verdeutlicht die hohen Anforderungen an die Prozessauslegung von Mehrkomponenten-Adsorptionsprozessen. Da Simulationen das Verhalten von Mehrkomponentensystemen noch nicht hinreichend genau beschreiben können, bedarf es im Bereich der VOC-Entfernung aus Abgasen, bei jeder Auslegung oder Änderung der Prozessführung experimenteller Erkenntnisse, um erfolgreiche Lösungsstrategien für entsprechende Herausforderungen zu entwickeln.

Im Beispiel der Produktintegration wird aber auch gezeigt, dass das System für den Auslegungsfall funktioniert und skalierbar ist. Über die Brennstoffeinsparung und das zurückgewonnene Lösungsmittel ist der Prozess, bei einer geringeren Umweltbelastung durch CO₂- und VOC-Emissionen, wirtschaftlicher. Darüber hinaus ergaben die Vorversuche, dass die aktive Absaugung an der Kernformmaschine die Luft in der Produktionshalle verbessert und zu gesünderen Arbeitsbedingungen beiträgt.

4.4. Stofftrennung und Wärmetransformation

Als Prozesse, die sowohl die stofftrennende als auch die wärmetransformierende Eigenschaft des Sorptionsprozesses nutzen, sind im Wesentlichen die Trocknungsprozesse identifiziert worden. In Abbildung 40 (Seite 53) ist zu erkennen, dass auch Prozesse in der Industrie vorliegen, in denen zusätzlich die Speicherwirkung genutzt wird („Zeolith-LKW“). Diese Prozesse unterliegen der gleichen thermodynamischen Prozessführung, wobei deren Teilprozesse aber zeitlich und/oder örtlich versetzt ablaufen. Der genannte „Zeolith-LKW“ wird als Praxisbeispiel in diesem Kapitel erläutert.

Zur energetischen Charakterisierung von Trocknungsverfahren eignet sich der spezifische Energiebedarf der zur Verdunstung beziehungsweise Verdampfung von einem Kilogramm Wasser benötigt wird. Dafür wird bei der thermodynamischen Analyse ein System gewählt, bei dem Trocknungsgut und Wasser auf dem Temperaturniveau der Trockenkammer in und aus dem Prozess gelangen und nur die Zuluft erwärmt werden muss. Die für den Trocknungsprozess benötigte Masse Luft ist von der Beladungsdifferenz der Trockneratmosphäre zur Umgebung abhängig und wird nach Formel 4-5 berechnet. Mit der Vereinfachung, dass die Wärmekapazität vom Trocknungsgut und weitere Hilfsenergien nicht berücksichtigt werden, ist der spezifische Energiebedarf e in kJ/kg_w gemäß Formel 4-6 bestimmbar.

$$m_L = \frac{1 \text{ kg}_w}{Y_{\text{Trockner}} - Y_{\text{Umgebung}}} \quad [\text{kg}_L] \quad 4-5$$

$$e = \frac{m_L}{1 \text{ kg}_W} (c_{p,L} + Y_{\text{Umgebung}} \cdot c_{p,D}) \cdot (T_{\text{Trockner}} - T_{\text{Umgebung}}) + r_{\text{Trockner}} \quad [\text{kJ/kg}_W] \quad 4-6$$

Zur Verdeutlichung des energetischen Potenzials der Sorptionsprozesse bei Trocknungsprozessen soll ein Trockner mit Sorptionsprozess mit einem Trockner ohne Sorptionsprozess (Referenzfall) verglichen werden.

Referenzfall

Als Referenzfall wird ein Trockner mit adiabater Verdunstung unter der Vernachlässigung von zusätzlichen Hilfsenergien gewählt, siehe Abbildung 28.

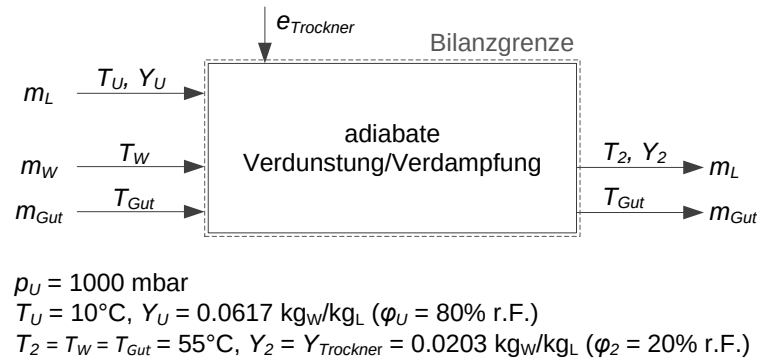


Abbildung 28: Bilanzgrenze und Angaben zu den Stoffströmen des Referenztrockners

Für die gegebenen Bedingungen ist in Abbildung 29 der Energiebedarf nach Formel 4-6 in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft am Austritt gezeigt. Es ist zu beachten, dass in der Rechnung zur Grafik die Eintrittstemperatur des Wassers und des Trocknungsgutes der Austrittstemperatur des Trockners entspricht und diese somit nicht von Umgebungs- auf Trocknungstemperatur erwärmt werden müssen.

Der minimale spezifische Energiebedarf $e_{\min}$ liegt mit 2636 kJ/kg_W nach Abbildung 29 bei der Siedetemperatur des Wassers genau dann vor, wenn das Wasser den Trockner als Reindampf verlässt. In diesem Grenzfall wird dem Trockner keine Luft zugeführt, so dass die Beladung Y_2 der Abluft gegen unendlich geht. Wird die Trocknungstemperatur gesenkt, muss dem Trocknungsprozess Luft beigegeben werden, um das verdunstete Wasser abzuführen. Diese Luft muss erwärmt werden, so dass der spezifische Energiebedarf steigt. Wird die Trocknungstemperatur von 100°C aus erhöht, muss weiterhin keine Luft hinzugegeben werden, aber der Wasserdampf wird überhitzt, so dass der spezifische Energiebedarf entlang der Reindampflinie bei steigenden Temperaturen ebenfalls zunimmt.

Für die Berechnung des energetischen Wirkungsgrades des Trocknungsprozesses η_{Trockner} nach Formel 4-7 wird der minimale spezifische Energiebedarf nach Formel 4-6 mit $e_{\min} = e(T_2 = 100^\circ\text{C}, Y_2 = \infty) = 2636 \text{ kJ/kg}$ als „Nutzen“ des Prozesses definiert. Der „Aufwand“ entspricht dem tatsächlichen spezifischen Energiebedarf des Trockners.

$$\eta_{\text{Trockner}} = \frac{Q_{\text{Nutzen}}}{Q_{\text{Aufwand}}} = \frac{e_{\min}}{e_{\text{Trockner}}} \quad 4-7$$

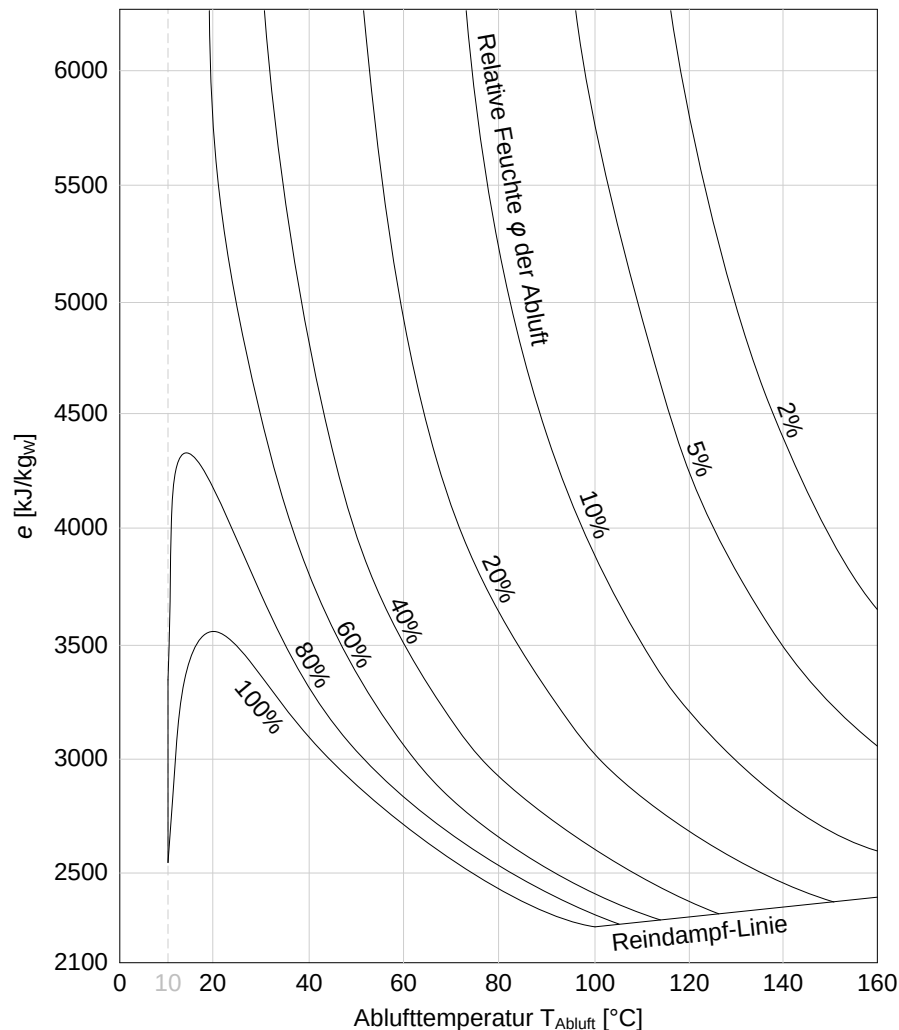


Abbildung 29: Der spezifische Energiebedarf zur Verdampfung/Verdunstung von 1 Kilogramm Wasser bei adiabater Gutszuführung (Temperaturniveau von Wasser und Gut entspricht T_{Abluft}) in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Feuchte am Austritt des Trockners (Abluft), nachgezeichnet von Kröll [49]
 Zuluft: $T_1 = 10^\circ\text{C}$, $Y = 0.006172 \text{ kg/kg}$, $p_{\text{abs}} = 1000 \text{ mbar}$

Aus Abbildung 29 lassen sich zwei Zusammenhänge zur Führung des Trocknungsprozesses beim Referenzfall ableiten, um den spezifischen Energiebedarf zu senken:

1. Ist bei konstanter relativer Feuchte der Trockneratmosphäre die energetisch optimale Temperatur gesucht, gilt bis zum Erreichen der Reindampflinie:
 Je höher das Temperaturniveau ist, desto geringer ist der spezifische Energiebedarf.
 (Wärmeverluste werden nicht berücksichtigt)
2. Ist bei konstanter Temperatur der Trockneratmosphäre deren energetisch optimale relative Feuchte gesucht, gilt:
 Je höher die relative Feuchte, desto geringer ist der spezifische Energiebedarf.
 (Trocknungskinetik wird nicht berücksichtigt)

Trockner mit Sorption

Eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bei konstanten Zuständen der Abluft kann über die Entfeuchtung der Zuluft erzielt werden. Die Einsparung bei konstanten Zuständen der Abluft beruht darauf, dass bei trockenerer Zuluft der Beladungshub grösser wird, wodurch nach Formel 4-5 weniger Zuluft zugeführt und somit auch weniger Luft erwärmt werden muss.

In Abbildung 30 ist der spezifische Energiebedarf für die Entfeuchtung der Zuluft nicht bilanziert, so dass der direkte Einfluss der relativen Feuchte der Zuluft (bei konstanter Temperatur der Zuluft) auf den spezifischen Energiebedarf zu erkennen ist. Der spezifische Energiebedarf des Referenzsystems (Fall A) ist stets über dem spezifischen Energiebedarf des Systems mit geringerer relativer Feuchte der Zuluft. Dabei nimmt ab den Maxima der beiden Kurven in Abbildung 30 die Differenz mit

steigender Temperatur degressiv ab. Somit wird der energetische Vorteil ($e_A - e_B$) von trockener Zuluft für den Trocknungsprozess mit steigendem Temperaturniveau des Trockners geringer.

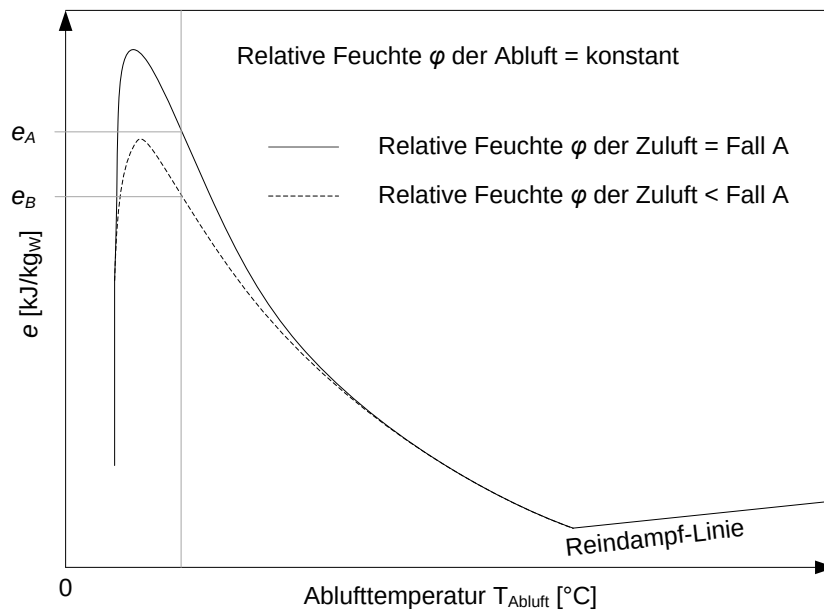


Abbildung 30: Qualitative Darstellung des Einflusses der Entfeuchtung (Konditionierung) der Zuluft auf den spezifischen Energiebedarf des Trockners zur Verdunstung/Verdampfung von 1 Kilogramm Wasser.

Bezogen auf die Zustände der Zu- und Abluft des Trocknungsprozesses bei Umgebungsdruck lässt sich ableiten, dass um einen möglichst geringen spezifischen Energiebedarf des Trocknungsprozesses zu erreichen die Zuluft möglichst trocken und die Abluft möglichst feucht sein sollte. Die ideale Trocknungstemperatur von 100°C kann nicht verallgemeinert werden, da bei realen Trocknungsprozessen die Wärmetransportvorgänge mit berücksichtigt werden müssen. Diese weisen gegenüber dem in Abbildung 29 gezeigten Verlauf des spezifischen Energiebedarfs ein gegenläufiges Verhalten auf. Die energetisch optimale Trocknungstemperatur muss daher für jeden Anwendungsfall individuell bestimmt werden.

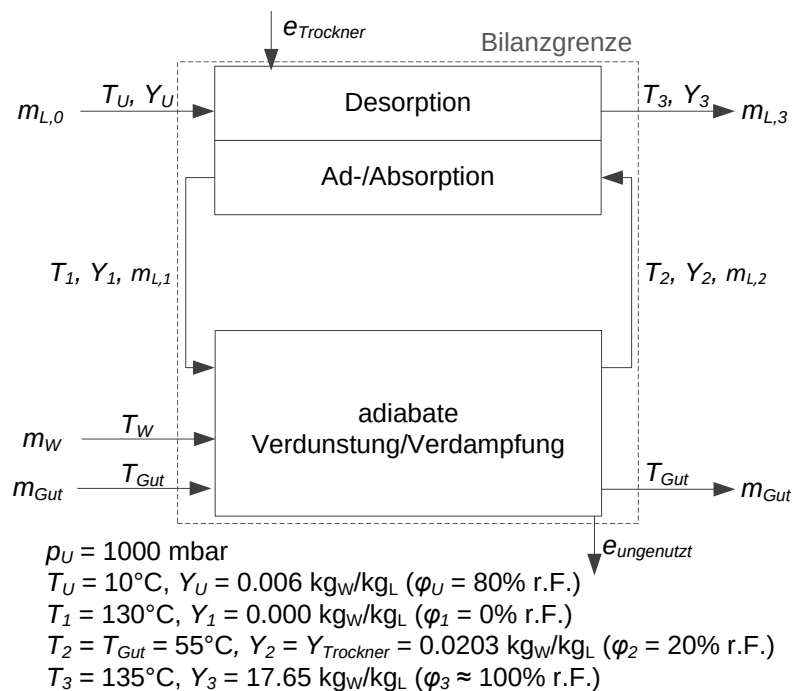


Abbildung 31: Bilanzgrenze und Definition der Stoffströme einer Trocknungsanlage mit Umluftverfahren und Sorptionsprozess

Sorptionsprozesse bieten die technische Möglichkeit, den Trocknungsprozess so zu gestalten, dass bei kühler und trockener Trockneratmosphäre, die Abluft dennoch heiss und feucht ist. Gemäss der

obigen Ausführung kann der Trockner somit in einem energetisch günstigen Bereich betrieben werden. Dies wird an einem Modellprozess mit einem Adsorptionsprozess exemplarisch aufgezeigt. Dazu wird die Luftführung des Trockners aus dem Referenzfall gemäss Abbildung 28 in Umluft geführt und über einen Adsorptionsprozess entfeuchtet. Die Feuchtigkeit wird schliesslich über den Desorptionsprozess aus dem System geführt, siehe Abbildung 31.

Die Trocknungsanlage besteht nun aus zwei Bereichen, der Trocknungskammer, die dem Referenz-trockner entspricht und den Reaktoren für den Ad- und Desorptionsprozess. Die gesamte Abluft der Trocknungskammer wird durch den Adsorptionsreaktor geführt, wo der Wasserdampf aus dem Luftstrom getrennt und die Sorptionsenthalpie ΔH_s in Form von Wärme freigesetzt wird. Der Luftstrom wird erhitzt und getrocknet der Trocknungskammer als Zuluft zugeführt. Die freigesetzte Energie ist nach Formel 2-1 um den Betrag der Bindungsenthalpie grösser, als die benötigte Energie zum Verdunsten des Wassers im Trockner. Da der Referenzfall so gewählt ist, dass kein Energiebedarf für die Erwärmung des Trockengutes und zum Ausgleich der thermischen Verluste berücksichtigt wird, muss der Überschuss an Energie der Trocknungskammer ungenutzt abgeführt werden. Bei realen Trocknungsprozessen kann dieser Überschuss dazu genutzt werden, den Energiebedarf für die Erwärmung des Trockengutes und dem Ausgleich der thermischen Verluste zu minimieren.

Die Desorption erfolgt mit Umgebungsluft auf einem Temperaturniveau von $T_3 = 135^\circ\text{C}$, welches nach Lävemann [34] als unteres Temperaturniveau angegeben wird, bei dem ein Sorptionsprozess mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf effektiv genutzt werden kann. Der Luftmassenstrom durch den Desorptionsprozess ist so gewählt, dass der Fortluftstrom eine Taupunkttemperatur von 99°C bei Umgebungsdruck aufweist ($Y_3 = 17.65 \text{ kg}_\text{W}/\text{kg}_\text{L}$). Der notwendige Luftmassenstrom beträgt bei den gewählten Randbedingungen $m_{L,0} = m_{L,3} = 0.0567 \text{ kg}_\text{L}/\text{kg}_\text{W}$.

Die Entfeuchtung der Zuluft im Umluftbetrieb führt, wie in Abbildung 30 zu erkennen, zu einem reduzierten spezifischen Energiebedarf des Trocknungsprozesses gegenüber dem Referenzfall. Die Reduktion des spezifischen Energiebedarfs begründet sich durch den reduzierten spezifischen Luftbedarf des Trocknungsprozesses, die erhitzte Luft wird effektiver genutzt.

Vergleich des spezifischen Energiebedarfs

In Abbildung 32 und Abbildung 33 sind in Sankey-Diagrammen die Aufteilung der spezifischen Energien der jeweiligen Stoffströme für die Verdunstung/Verdampfung von einem Kilogramm Wasser dargestellt. Bei den Stoffströmen der feuchten Luft sind die spezifischen Energien des Wasserdampfes (blau) und der trockenen Luft (grün) einzeln angegeben.

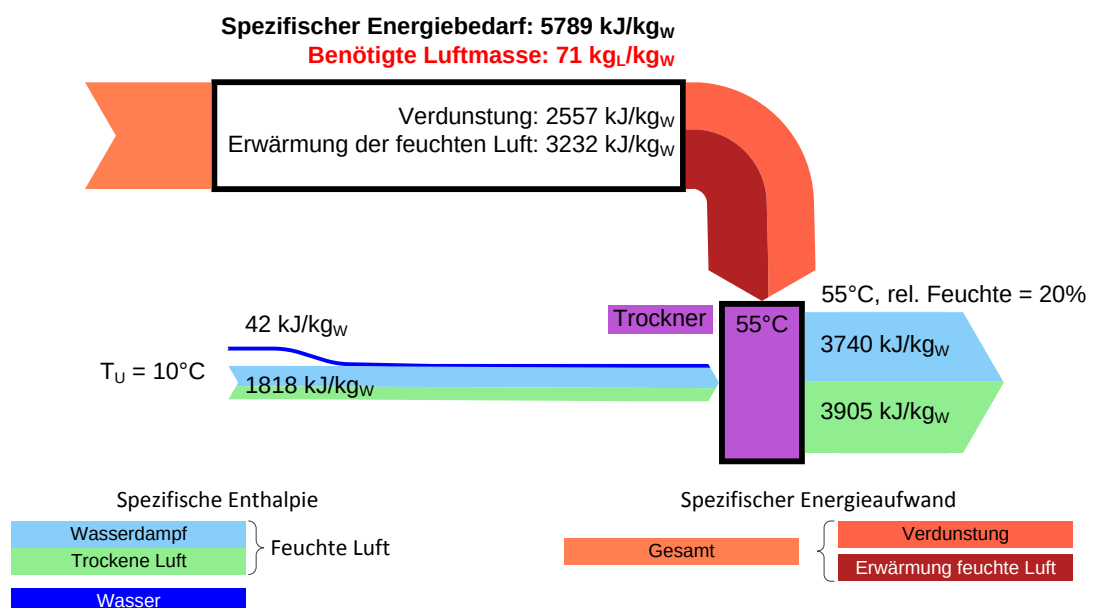


Abbildung 32: Sankey-Diagramm des spezifischen Energiebedarfs am Referenz Trockner

Der spezifische Energiebedarf beträgt beim Referenz Trockner $e = 5789 \text{ kJ/kg}_\text{W}$ und die benötigte Luftmasse $m_L = 71 \text{ kg}_\text{L}/\text{kg}_\text{W}$, siehe Abbildung 32. Für die Verdunstung des Wassers bei 55°C beträgt

die Verdampfungsenthalpie 2557 kJ/kg_w , so dass 55% der zugeführten Energie für die Erwärmung der feuchten Zuluft aufgewendet werden müssen.

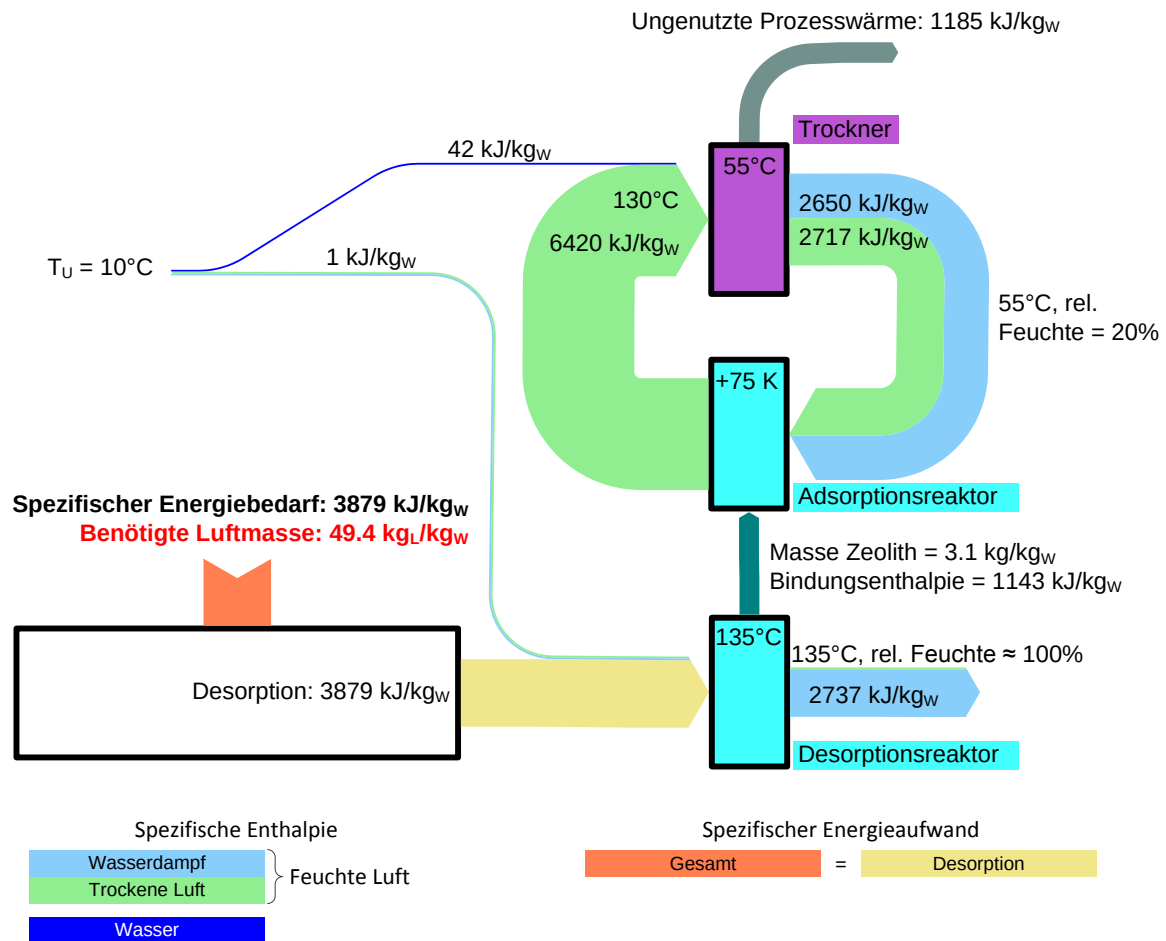


Abbildung 33: Sankey-Diagramm des spezifischen Energiebedarfs am Trockner mit Umluft und Adsorptionsprozess

Für den Adsorptionsprozess wird angenommen, dass die Zuluft der Trocknungskammer bis auf 0% r. F. entfeuchtet und die benötigte Luftmasse um 30% auf $m_L = 49.4 \text{ kg}_L/\text{kg}_w$ reduziert wird. Der spezifische Energiebedarf wird somit um 33% auf $e = 3879 \text{ kJ/kg}_w$ gemindert.

Der Temperaturhub beim Adsorptionsprozess ist von Hauer übernommen, der den maximalen Temperaturhub in Abhängigkeit des Beladungshubs des Zeoliths 13X angibt [8]. Der bestimmte Temperaturhub entspricht dem maximalen Temperaturhub der theoretisch erreicht werden kann. Der reale Temperaturhub wird niedriger sein und kann bei bekanntem Beladungshub des Zeoliths über die mittlere spezifische Sorptionsenthalpie Δh_s bestimmt werden, vergleiche Abbildung 5 (Seite 17).

Einordnung

Die Entfeuchtung der Zuluft der Trocknungskammer führt zu einer Reduzierung der benötigten spezifischen Luftmasse des Trocknungsprozesses. Der erhöhte Beladungshub der Luft über den Trocknungsprozess führt zu einer effektiveren Nutzung der erhitzten Zuluft und minimiert den spezifischen Energiebedarf. Alternative Verfahren zur Minimierung des spezifischen Energiebedarfes sind zum Beispiel konventionelle Wärmerückgewinnungsprozesse. Bei diesen wird der Energiegehalt der feuchten Abluft zur Erwärmung der Zuluft genutzt, so dass die Abluft des Gesamtprozesses ein geringeres Temperaturniveau und eine höhere relative Feuchte aufweist. Das Sankey-Diagramm für eine solche Wärmerückgewinnung ist im Anhang enthalten, siehe Abbildung 64 (Seite 91). Bei dem Beispiel wird die Abluft bis zur Taupunkttemperatur durch die Zuluft abgekühlt, so dass gerade keine Kondensation entsteht. Der spezifische Energiebedarf des Trocknungsprozesses mit dieser WRG-Massnahme beträgt $e = 3534 \text{ kJ/kg}_w$ und ist somit geringer als beim Trocknungsprozess mit Umluft und Sorption, bei dem jedoch ungenutzte Prozesswärme abgeführt wird, die bei einem realen Trocknungsprozess zur Erwärmung des Trockengutes genutzt werden kann.

Die energetischen Einsparungen des Trocknungsprozesses mit Umluft und Sorption und der WRG-Massnahme liegen auf einem Niveau und sind mit starken Vereinfachungen für einen Betriebspunkt bestimmt worden.

Für den betrachteten Betriebspunkt sind die folgenden Kennwerte für den Referenzfall, den Sorptionsprozess mit Umluft und dem Trockner mit WRG-Massnahme in Tabelle 10 angegeben.

- e_{Variante} siehe Formel 4-6 bzw. $e_{\text{Verdunstung}} + e_{\text{Erwärmung}} + e_{\text{Sorption}}$
- η_{Trockner} $e_{\text{Variante}}/e_{\text{min}}$
- R_{Variante} Energiebedarf im Verhältnis zum Referenz Trockner $e_{\text{Variante}}/e_{\text{Referenz}}$
- m_{L1} siehe Formel 4-5
- e_{Sorption} Energiebedarf des Sorptionsprozesses

Variante	e_{Variante} [kJ/kg _w]	η_{Trockner} [-]	R_{Variante} [-]	m_{L1} [kg _u /kg _w]	e_{Sorption} [kJ/kg _w]
Referenz	5789	44%	100%	71	-
Adsorption in Umluft	3879	66%	67%	49	3879
Referenz mit WRG	3534	72%	61%	71	-

Tabelle 10: Energetische Kennwerte der analysierten Prozessvarianten

Sorptionsprozesse weisen somit das energetische Potenzial auf, den Energiebedarf eines Trocknungsprozesses durch eine effizientere Nutzung des eingesetzten Luftmassenstroms zu mindern. Es muss im Einzelfall sorgfältig überprüft werden, wie sich das energetische Potenzial und der technische Aufwand zu konkurrierenden Massnahmen verhält beziehungsweise mit diesen kombiniert werden kann. Hierzu sollte, wenn möglich, eine dynamische Simulation des Prozesses über ein Jahr erfolgen. Die Hochrechnung eines Betriebszustandes auf ein gesamtes Jahr kann zu deutlich von der Realität abweichenden Ergebnissen führen.

Allgemein lassen sich folgende Faktoren nennen, die den energetischen Nutzen der Integration eines Sorptionsprozesses in einen Trocknungsprozess fördern:

- geringe Trocknungstemperatur.
- begrenzte relative Feuchte der Abluft.
- hohe Beladung der Umgebungsluft.

Das wirtschaftliche Potenzial beruht zum einen auf dem reduzierten Energiebedarf und den damit einhergehenden reduzierten Betriebskosten des Trocknungsprozesses. Zum anderen folgt aus der Konditionierung der Zuluft des Trockners, dass Schwankungen bei den Trocknungsbedingungen geringer ausfallen. Durch gleichbleibende Trocknungsbedingungen werden der Regelaufwand verringert und eine höhere Auslastung des Trockners bei konstanter Trocknungsqualität ermöglicht. Eine konstante Trocknungsqualität reduziert die Gefahr von Fehlproduktionen beziehungsweise einem gesonderten Nachtrocknen des Gutes in einem weiteren Prozessschritt. Die wirtschaftlichen Vorteile werden umso bedeutender, je:

- höher die Korrelation zwischen der Trocknungsqualität und den Umgebungsbedingungen ist.
- enger die geforderten Toleranzen der Trocknungsbedingungen sind.
- näher der Trockner an der Kapazitätsgrenze betrieben wird.

Praxisbeispiel – Hochtemperaturspeicher zum Energietransport mit Luftkonditionierung

Abbildung 34: offener sorptiver thermischer Speicher als LKW-Auflieger [34]
links: Ladestation an KVA in Hamm
rechts: Entladestation bei einer 7 km entfernten Trocknungsanlage

Bei einer Demonstrationsanlage eines offenen mobilen Adsorptionsspeichers mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf ist der Enthalpiestrom des Abgases einer Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) bei Hamm in Deutschland mit dem Lufterhitzer der Zuluft einer 7 km entfernten Trocknungsanlage verknüpft, siehe Abbildung 34. Der Reaktor ist mobil auf einer Wechselbrücke eines LKW-Transportsystems montiert und pendelt zwischen der thermischen Quelle und Senke.

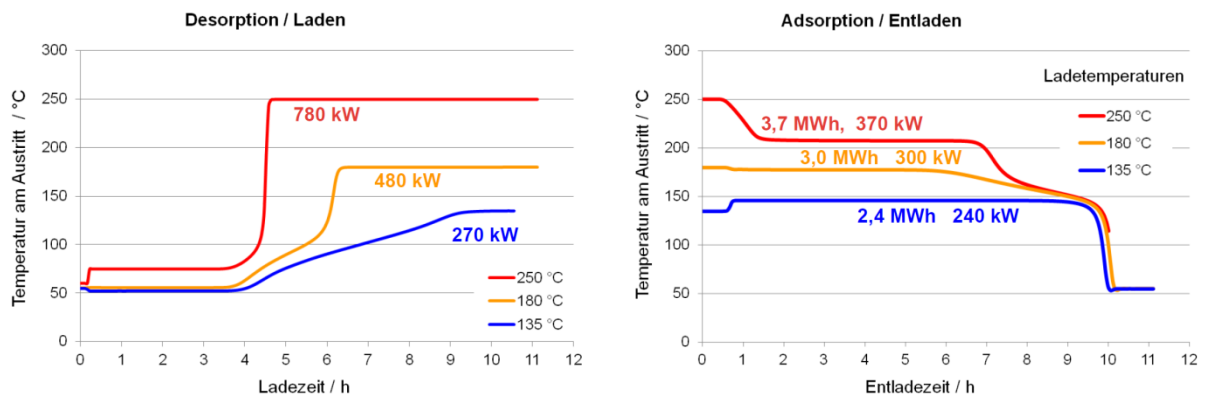


Abbildung 35: Simulierte Temperaturverläufe von den Lade-/Entladetemperaturen über der Zeit des mobilen offenen Festbettreaktors bei drei verschiedenen Soll-Ladetemperaturen. Der Temperaturanstieg von ca. 10 K beim Entladevorgang des mit 135°C geladenen Zeoliths ist durch den Wärmepumpeneffekt begründet [34].

In Abbildung 35 sind die für die Auslegung des Systems simulierten Temperaturverläufe am Austritt des Reaktors gezeigt. Das Integrationskonzept sieht vor, den Speicher mit ca. 200°C warmer Luft über 4 – 6 h zu laden, zur Entladestation zu fahren und dort über 9 h zu entladen (Temperaturverläufe für diese Ladetemperaturen sind nicht in der Abbildung 35 zu sehen. Sie würden zwischen der 180°C- und der 250°C-Isothermen liegen). Bei der Entladestation wird die feuchte Abluft eines Trockners durch den Reaktor geleitet. Die Luft erwärmt sich im Reaktor auf 160°C und wird komplett entfeuchtet. Die heiße trockene Luft wird aus regeltechnischen Gründen mit Umgebungsluft gemischt. Das Luftgemisch strömt mit 80°C in den gasbefeuchten Lufterhitzer der Trocknungsanlage. Die erwärmte Zuluft reduziert während des Entladevorgangs den Energiebedarf des Lufterhitzer und führt durch die reduzierte Wasserbeladung der Zuluft zu einer besseren Trocknungskinetik im Trockner.

Bei der Demonstrationsanlage ist der Entladevorgang zeitbestimmend und betrug abweichend von der Simulation 15 h (Simulation 9 h). Der Transport, inklusive dem An- und Abkoppeln der Reaktoren an der Lade- beziehungsweise Entladestation, benötigt weitere 2.5 h. Daraus resultieren eine Zyklusdauer von 17.5 h und damit eine Zyklusrate von 0.7 Zyklen pro Tag. Für einen wirtschaftlichen Betrieb wird jedoch eine Zyklusrate von 2 Zyklen pro Tag angegeben, so dass die Entwicklung auf die Reduktion des Zeitbedarfes für den Entladevorgang (Erhöhung der Adsorptions- beziehungsweise Entladeleistung) konzentriert werden sollte.

4.5. Stoffspeicherung

Die Eigenschaft von Sorbentien, dass deren Beladung mit einem Sorptiv in Abhängigkeit zu den Umgebungsbedingungen stehen, ermöglicht den Einsatz von Sorbentien als Stoffspeicher. Im thermodynamischen Gleichgewicht findet kein Stoffaustausch mit der Umgebung statt. Wird das Gleichgewicht gestört, beispielsweise durch eine Temperaturerhöhung des Sorbens oder eine Druckabsenkung der Umgebung, findet ein Stoffstrom des Sorptivs vom Sorbens an die Umgebung statt – das Sorbens (als Speicher) wird entladen. Diese Eigenschaft ist besonders zur Speicherung explosiver oder giftiger Stoffe (Sorptiv) geeignet. Wird das thermodynamische Gleichgewicht nicht gestört, ist kein Leckagestrom des Sorptivs möglich.

Anwendungsbeispiel – Wasserstoffspeicherung

Die Wasserstofftechnik ist eine vielversprechende Variante bei der Speicherung von Energie. Zum einen führt ein wachsender Anteil an regenerativen Energiequellen mit fluktuierendem Einspeiseverhalten bei der Stromerzeugung zu einem Bedarf an Energiespeichern, die bei einem Überangebot an elektrischer Energie geladen werden können. Durch sogenannte „Power to Gas-Verfahren“ wird zur Zeit des Überangebots die elektrische Energie beispielsweise durch Elektrolyse in chemische Energie gewandelt. Der so produzierte Wasserstoff kann in ein Erdgasnetz beigemischt oder als Reinstoff gespeichert werden. Eine mögliche Nutzung des gespeicherten Wasserstoffs ist der Einsatz als Treibstoff in der Mobilindustrie, die besondere Anforderungen an die Speichertechnologie stellt. Die Speicher müssen gegenüber thermischen und mechanischen Einflüssen stabil sein und sollen für eine hohe Effizienz des Fahrzeuges ein möglichst geringes Gewicht aufweisen. Das „office for fuel cell technology“ (FCTO) des „United States Department of Energy“ (DOE) untergliedert die H_2 -Speichertechnologien gemäss Abbildung 36 in zwei Klassen [50]. Zum einen in die Reinstoffspeicherung, bei der die Wasserstoffmoleküle unter hohem Druck oder durch Verflüssigung durch Abkühlung gespeichert werden, zum anderen in die Speicherung über eine physikalische oder chemische Verbindung, bei der die Wasserstoffmoleküle mit einem anderen Stoff in Wechselwirkung stehen.

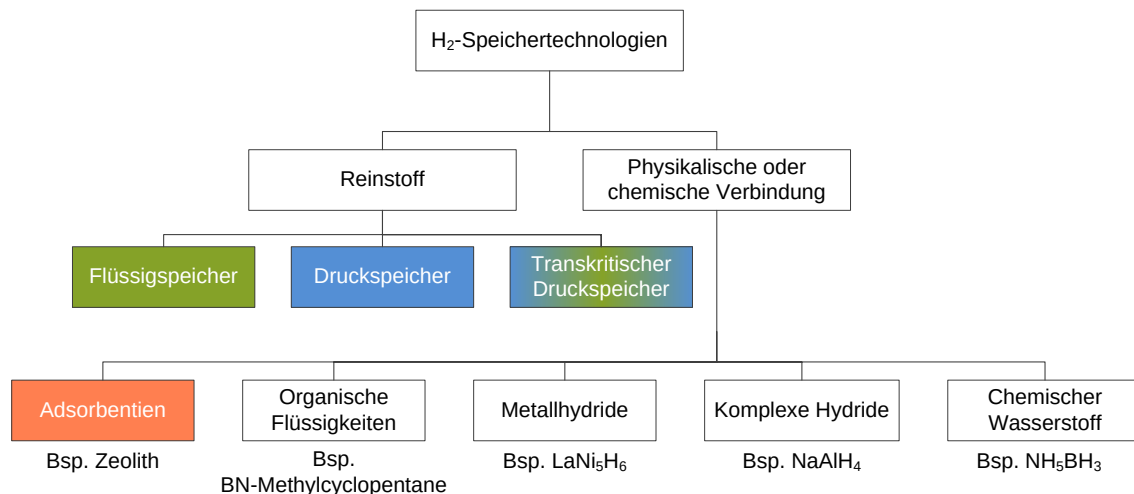


Abbildung 36: Gliederung der Wasserstoffspeichertechnologien gemäss des DEO [50]
Die farblich hervorgehobenen Speichertechnologien werden in Abbildung 37 näher charakterisiert

Die Speicherung von Wasserstoff als Reinstoff entspricht dem Stand der Technik bei der Gasspeicherung. Bei der Flüssigspeicherung wird Wasserstoff durch eine Abkühlung auf eine Temperatur unter 25 K (-248,6°C) bei 1 – 4 bar Absolutdruck verflüssigt, siehe Abbildung 37. Bei den Druckspeichern werden Speicherdrücke von 200 bis 700 bar bei Umgebungstemperatur erreicht. Bei der transkritischen Speicherung wird der Wasserstoff bei hohen Drücken (700 - 1000 bar) und Temperaturen knapp über der kritischen Temperatur von 33 K gespeichert [51].

Die Speicherung von Wasserstoff über physikalische oder chemische Bindungen mit einem weiteren Stoff ermöglicht die Speicherung bei geringeren Drücken gegenüber den konventionellen und den transkritischen Druckspeichern. So wird mit Zeolithen im Druckbehälter bei einer Temperatur von 77 K und bei einem Druck von 15 bar dieselbe Speicherdichte erreicht, wie ohne Zeolithe bei ungefähr 100 bar [52], siehe Abbildung 37.

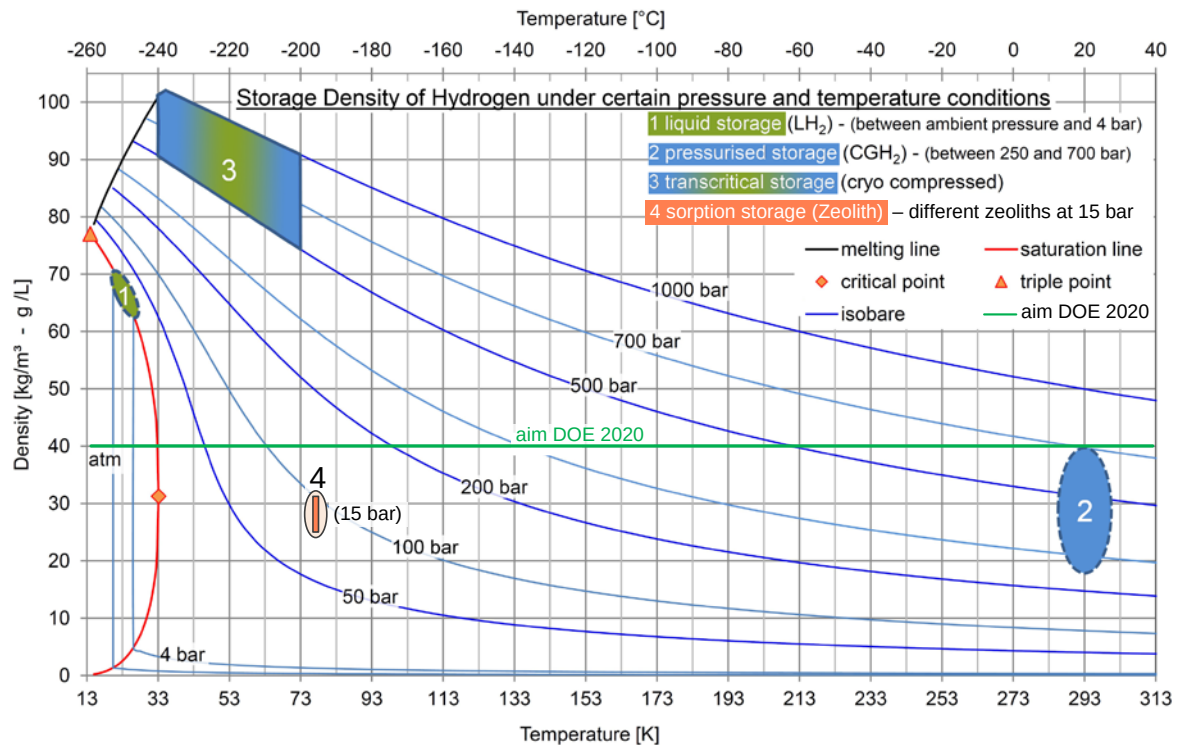


Abbildung 37: Speicherdichte von Wasserstoff bei der Speicherung als Reinstoff bei Temperaturen von 13 bis 313 K und Drücken von 0.07 bis 1000 bar mit eingezeichneten Temperatur- und Druckbereichen von Reinstoff- und Adsorptionsspeichern sowie der angestrebten Speicherdichte von Wasserstoffspeichern in der Automobilindustrie für das Jahr 2020 des U.S. Department of Energy (DOE). Grafik von [51] mit Daten von [52-54] ergänzt.

In Abbildung 37 die vom DOE angestrebte Speicherdichte ($40 \text{ kg}_{\text{System}}/\text{m}^3$) von Speichersystemen für Wasserstoff in der Automobilindustrie für das Jahr 2020 in grün eingezeichnet. Dieses Ziel wird sowohl von den Flüssig- wie auch von den transkritischen Speichern erreicht. Die Druckspeicher erreichen gerade den geforderten Wert. Die Speicherung an dem Adsorbens Zeolith erreicht den geforderten Wert für 2020 noch nicht, weist dafür aber bei weiteren Anforderungen der DOE an Speicher für die Automobilindustrie Vorteile gegenüber den Reinstoffspeichern auf, siehe Tabelle 11. Neben der Speicherdichte sind in den technischen Zielen des DOE für die Wasserstoffspeicher auch weitere technische Ziele wie angestrebte Wirkungsgrade, maximale Wasserstoffverluste für die Kühlung durch Zwangsentladung oder Temperatur- und Druckbereiche des Wasserstoffes an der Schnittstelle zwischen Speicher und Verbraucher [53]. Die Zwangsentladung begründet sich durch das Kühlsystem der Tieftemperaturspeicher, in die auf Grund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung ein Wärmestrom fließt. Um diesen auszugleichen wird Wasserstoff abgelassen und durch die Verdampfungsenthalpie beziehungsweise den Joule-Thomson-Effekt der Speicher gekühlt. Dies führt zum einen zu Speicherverlusten und zum anderen zu Sicherheitsproblemen wie beispielsweise dem Entgasen von Wasserstoff in Garagen, in denen sich ein explosives Gasgemisch bilden kann. Bei den Adsorptionsspeichern konzentriert sich die Forschung insbesondere auf die Materialentwicklung, um auch bei höheren Temperaturen die geforderte Speicherdichte zu erreichen. Somit werden die Verluste durch die Kühlung beim Einspeichern und beim Zwangsentladen gemindert bis vermieden. Den Vorteilen einer hohen Betriebssicherheit und dem geringen Energiebedarf beim Einspeichern ständen somit keine Nachteile mehr entgegen.

Technologie	Vorteil	Nachteil
Flüssigspeicher	+ Hohe Speicherdichte: bis zu $70 \text{ kg}_{\text{System}}/\text{m}^3$ + Geringer Speicherdruck: 1 - 4 bar	– Hoher Energiebedarf zum Kühlen beim Einspeichern – Wasserstoffverluste durch Kühlung mittels Zwangsentladung (Kühlung durch Verdunstung von H_2) – Aufwändige thermische Dämmung – Explosionsgefahr bei Leckage
Druckspeicher	+ Speicherung bei Umgebungstemperatur + Keine Wasserstoffverluste	– Hoher Energiebedarf zum Komprimieren beim Einspeichern – Berstgefahr bei Beschädigung der Druckhülle – Explosionsgefahr bei Leckage
Transkritische Speicherung	+ Hohe Speicherdichte: $\leq 100 \text{ kg}_{\text{System}}/\text{m}^3$	– Hoher Energiebedarf zum Kühlen und Komprimieren beim Einspeichern – Aufwändige Konstruktion durch hohe Ansprüche an Dämmung und Druckkörper – Berstgefahr bei Beschädigung der Druckhülle – Explosionsgefahr bei Leckage – Wasserstoffverluste durch Kühlung mittels Zwangsentladung
Adsorptionsspeicher mit Zeolith	+ Geringer Speicherdruck + Geringer Energiebedarf für Komprimierung beim Einspeichern + Geringe Explosionsgefahr bei Leckage durch Bindung der H_2-Moleküle an ein nicht brennbares Medium + Geringere Wasserstoffverluste durch Kühlung mittels Zwangsentladung gegenüber Reinstoffspeichern	– Hoher Energiebedarf zum Kühlen beim Einspeichern – Wasserstoffverluste durch Kühlung mittels Zwangsentladung

Tabelle 11: Auflistung der Vor- und Nachteile von vier Wasserstoff-Speichertechnologien

Einordnung

Über die Stoffspeicherung mit Sorptionsprozessen lässt sich bei gleichem thermodynamischen Zustand des Systems die Speicherkapazität erhöhen. Somit verringert sich der spezifische Energieaufwand bei der Kompression oder der Abkühlung von Gasen, da bereits bei geringeren Druck- oder Temperaturhuben die identische Stoffmenge gespeichert werden kann. Das energetische Potenzial beruht auf dem reduzierten Energiebedarf beim Befüllen des Speichers und/oder einem geringen Kühlbedarf während der Speicherung.

Das wirtschaftliche Potenzial begründet sich im Wesentlichen durch den reduzierten Konstruktionsaufwand des Druckbehälters und/oder durch die reduzierte Anzahl an benötigten Speichereinheiten für eine gleiche Stoffmenge. Bei explosiven Stoffen können durch die gehemmte Entladung bei einer Leckage eventuell die erforderlichen Sicherheitseinrichtungen geringer ausfallen und somit zusätzlich zu geringeren Investitionskosten führen.

4.6. Zusammenfassung

Wärmetransformation

Es bestehen drei Möglichkeiten der Wärmetransformation über Sorptionsprozesse. Die technischen Umsetzungen werden Ad-/Absorptionswärmetransformator, -wärmepumpe oder -kältemaschine genannt.

Die energetischen und/oder wirtschaftlichen Vorteile gewinnen an Bedeutung, wenn die Antriebswärme aus ungenutzter Prozesswärme oder energetisch günstigen Brennstoffen bezogen wird und die Anwendung eine hohe Anzahl an Jahresbetriebsstunden aufweist.

Thermische Energiespeicherung

Bei der thermischen Energiespeicherung über Sorptionsprozesse ist derzeit das Arbeitspaar Zeolith 13X-Wasserdampf am besten dokumentiert. Dieses Arbeitspaar ermöglicht Arbeitstemperaturen bis zu 250°C. Die energetischen Vorteile liegen bei den geringen Speicherverlusten sowie der flexiblen Betriebsführung, wodurch eine hohe Auslastung des Speichers ermöglicht wird. Das wirtschaftliche Potenzial begründet sich durch die gegenüber alternativen Technologien geringeren Investitionskosten bei Temperaturen über 100°C.

Stofftrennung

Die stofftrennende Eigenschaft von Sorptionsprozessen ermöglicht eine robuste Betriebsführung, die eine hohe Trennleistung bei einer hohen Reinheit ermöglicht. Daher eignen sich die sorptiven Trennprozesse insbesondere für Stoffströme mit einem grossen Volumenstrom und geringen Konzentrationen des abzutrennenden Stoffes.

Stofftrennung und Wärmetransformation

Die simultane Nutzung der stofftrennenden und wärmetransformierenden Eigenschaft von Sorptionsprozessen wurde in der Arbeit für Trocknungsprozesse identifiziert. Durch die konditionierte Zuluft wird der Betriebspunkt des Trockners in einen energetisch günstigeren Bereich verschoben. Dies führt insbesondere bei geringen Trocknungstemperaturen mit einer geringen Beladung der Abluft zu energetischen und wirtschaftlichen Vorteilen. Durch konstante Trocknungsbedingungen können sowohl eine höhere Auslastung, als auch eine höhere und stabilere Trocknungsqualität des Trockners erreicht werden.

Stoffspeicherung

Durch den Einsatz von Sorptionsprozessen bei der Stoffspeicherung kann die erforderliche Verdichtung und/oder Abkühlung von gasförmigen Stoffen reduziert werden. Somit wird zum einen der energetische Aufwand beim Beladen reduziert, zum anderen reduziert sich der konstruktive Aufwand an den Druckbehälter.

5 Klassifizierung

5.1. Klassifizierung von industriellen Prozessen

Die Klassifizierung der Sorptionsprozesse richtet sich in dieser Studie nach den Zielen der industriellen Prozesse. In einem ersten Schritt werden diese über die sechs unten aufgeführten verfahrenstechnischen Prozessgruppen klassifiziert.

- Reaktionsprozesse
- Trennprozesse
- Vereinigungsprozesse
- Zerteilungsprozesse
- Wärmeübertragungsprozesse
- Produkt: Verpackungs-, Lager- und Transportprozesse

Sorptionsprozesse umfassen eine Änderung der Stoffkonzentration (Trennprozess) unter Ab- oder Zugabe von Energie (Wärmeübertragung) und können den Prozessgruppen „Trennen“ und „Wärmeübertragen“ zugeordnet werden, siehe Abbildung 38.

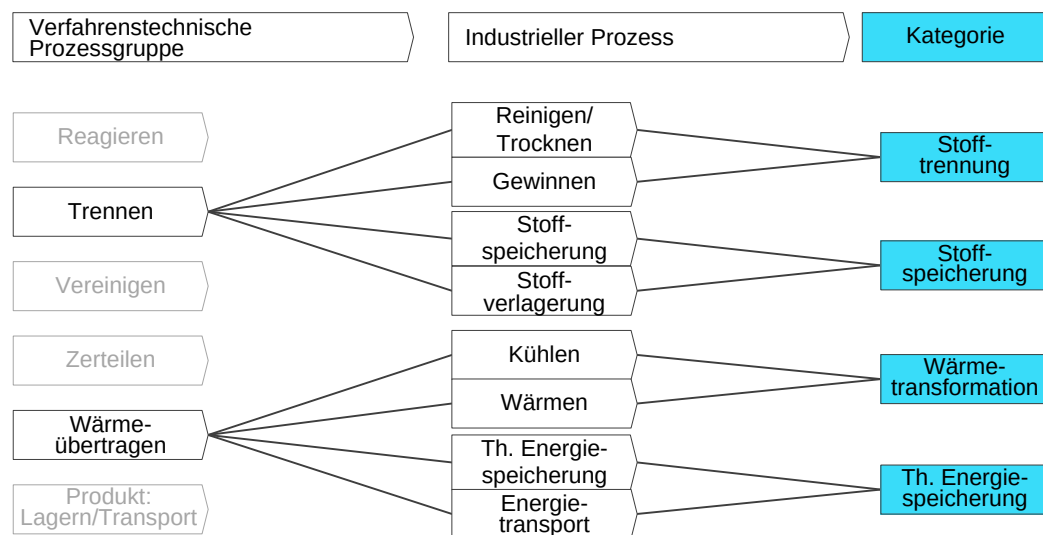


Abbildung 38: Klassifizierung der industriellen Prozesse nach ihrem Prozessziel

Thermische Trennvorgänge verfolgen entweder das Ziel, einen Fluidstrom zu reinigen, beziehungsweise im Sonderfall der Trennung von H_2O , zu trocknen, oder einen Stoff aus dem Fluidstrom als Reinstoff zu gewinnen. In Abhängigkeit des Temperaturgefälles verfolgen Wärmeübertragungsprozesse immer das Ziel, etwas zu erwärmen oder zu kühlen.

Der Nutzen des Prozesses kann direkt oder zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Erfolgt der Nutzen über eine Speicherung zeitlich versetzt, bezeichnet man den industriellen Prozess als Stoffspeicherung, erfolgt der Nutzen zusätzlich örtlich versetzt, als Stoffverlagerung.

Somit lassen sich die industriellen Prozesse über deren Ziel mit einer zugehörigen Sorptionskategorien verknüpfen. Die zeitlich direkte Nutzung der Industrieziele „Reinigen/Trocknen“ und „Gewinnung“ entsprechen dem Ziel „Stofftrennung“ des Sorptionsprozesses. Die zeitlich indirekte Nutzung von „Reinigen/Trocknen“ und „Gewinnen“ mit dem Ziel des Lastausgleiches oder der Stoffverlagerung, entspricht dem Ziel „Stoffspeicherung“. Die zeitlich direkte Nutzung der Wärmeübertragung, das Kühlen oder Erwärmen, entspricht dem Ziel der „Wärmetransformation“. Die zeitlich indirekte Nutzung der Wärmeübertragung mit dem Ziel eines Lastausgleiches oder eines Energietransportes entspricht dem Ziel der „thermischen Energiespeicherung“.

5.2. Klassifizierung von Sorptionsprozessen

Im Kapitel 5.1 wurden die Sorptionskategorien über das Ziel des industriellen Prozesses definiert. In diesem Kapitel wird in einem zweiten Schritt aufgezeigt, welche Sorptionsverfahren bei welchen Sorptionskategorien prinzipiell umgesetzt werden können.

Der Sorptionsprozess kann durch eine Änderung des Absolutdrucks, der Temperatur oder der Konzentration initiiert werden. In Abhängigkeit der geänderten Grösse werden die Sorptionsverfahren wie folgt genannt:

- Druckwechsel-Sorption (DWS) engl.: Pressure Swing Ad-/Absorption (PSA)
- Temperaturwechsel-Sorption (TWS) engl.: Temperature Swing Ad-/Absorption (TSA)
- Konzentrationswechsel-Sorption (KWS) engl.: Concentration Swing Ad-/Absorption (CSA)

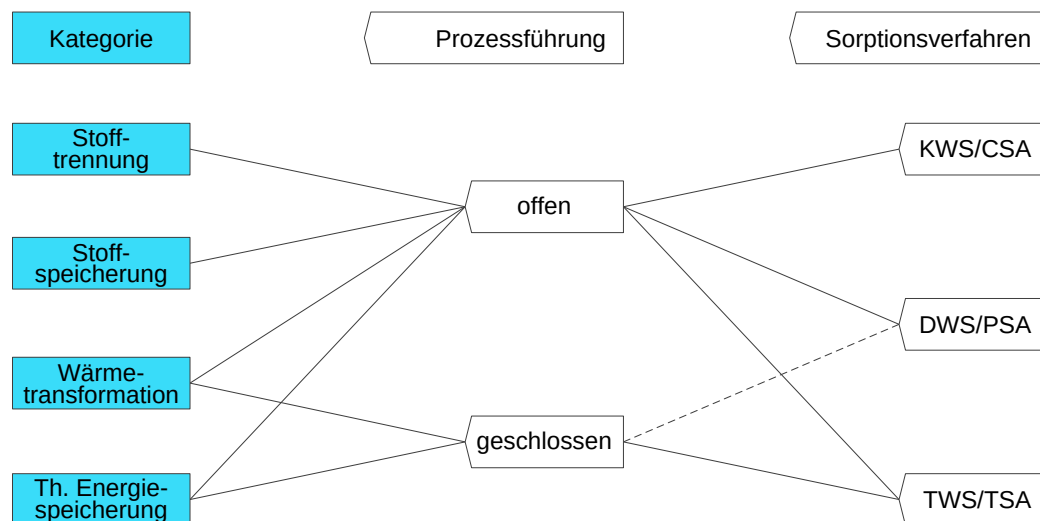


Abbildung 39: Klassifizierung von Sorptionsverfahren in Anlehnung an Bathen [3]

Die Verknüpfung der Sorptionskategorien mit den Sorptionsverfahren ist in Abbildung 39 gezeigt. Über eine thermodynamisch offene Prozessführung lassen sich alle Sorptionskategorien mit allen Sorptionsverfahren verbinden. Über thermodynamisch geschlossene Prozessführungen, lassen sich nur die Sorptionskategorien Wärmetransformation und Thermische Energiespeicherung mit den Sorptionsverfahren DWS und TWS verbinden. Die TWS ist das gängige Sorptionsverfahren für geschlossene Systeme, da eine Änderung eines Temperaturniveaus das Ziel des Prozesses ist.

In Abbildung 40 sind in einem Blasendiagramm beispielhafte Anwendungen von Sorptionsprozessen den Sorptionskategorien zugeordnet. Zum Teil lässt sich das Ziel eines Sorptionsprozesses nicht eindeutig definieren, da beispielsweise sowohl die Entfeuchtung als auch der Temperaturhub des Sorptionsprozesses bei Trocknungsprozessen genutzt wird. Zusätzlich kann durch Lagerung des Sorbens noch Energie gespeichert werden. Der mehrfache Nutzen eines Sorptionsprozesses steigert die Bedeutung eines Prozesses und erleichtert in der Regel einen wirtschaftlichen Betrieb. Im Blasendiagramm sind die entsprechenden Prozesse in den Schnittmengen der jeweiligen Blasen eingezeichnet.

Für die Implementierung eines reversiblen Sorptionsprozesses, das heisst unter Berücksichtigung des Desorptionsprozesses, in einen industriellen Prozess müssen die zur Verfügung stehenden Desorptionsarten ebenfalls analysiert werden. Dazu sind in der Übersichtsgrafik der Sorptionskategorien in Abbildung 41 die Desorptionsarten und deren technische Umsetzung gemäss Bathen [3] mit aufgeführt.

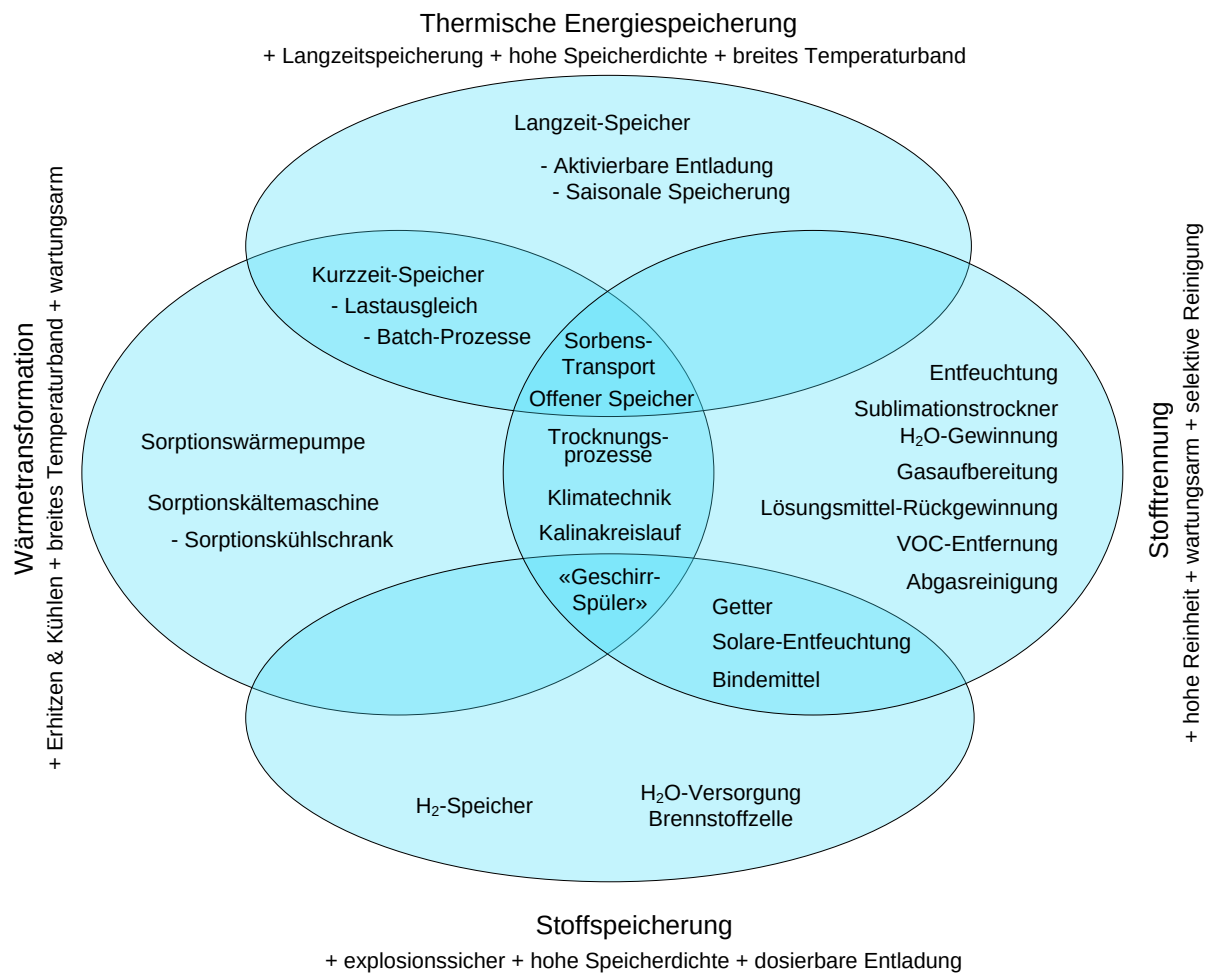


Abbildung 40: Überblick der Einsatzgebiete von Sorptionsprozessen in industriellen Prozessen unter Berücksichtigung ihrer Klassifizierung

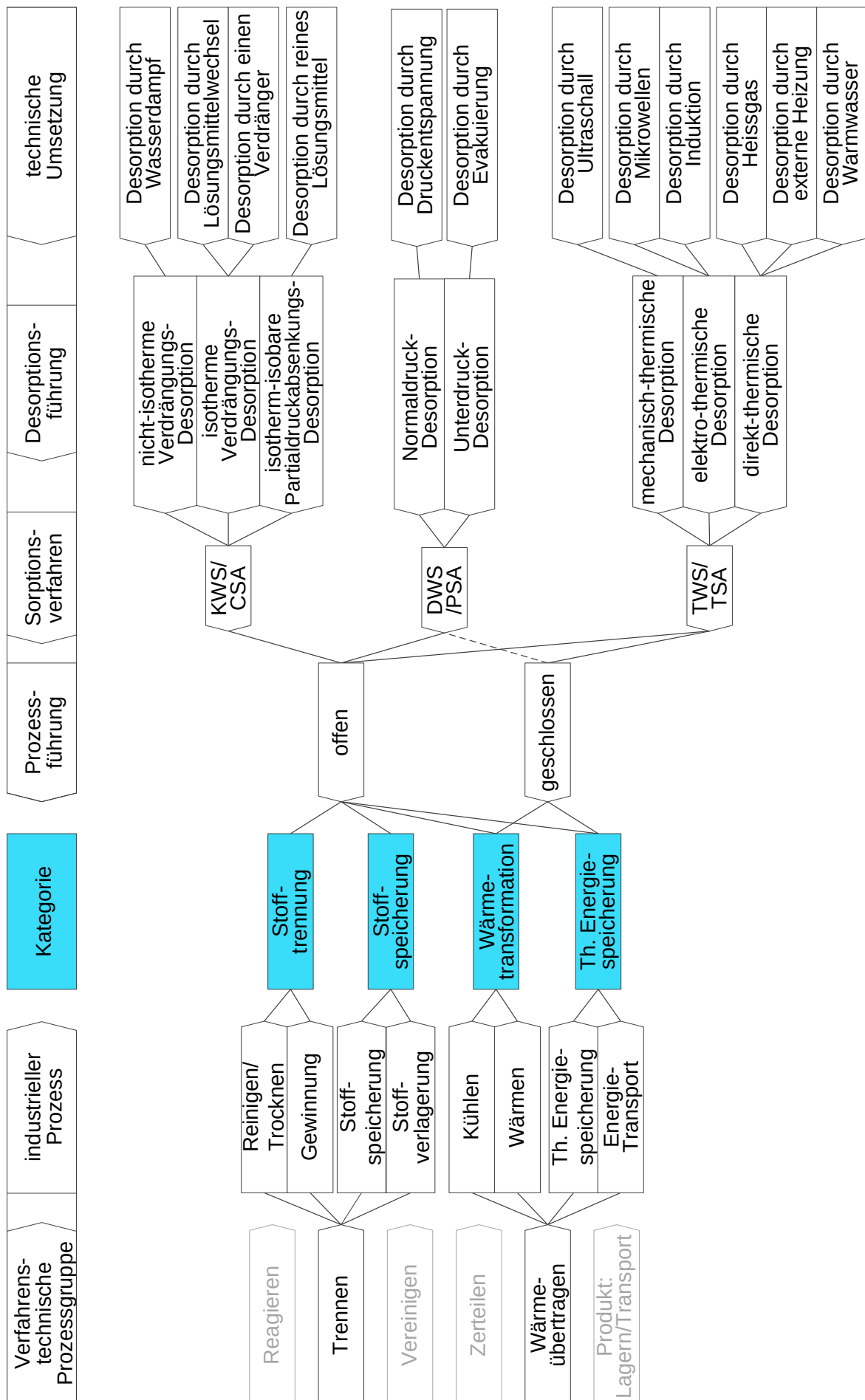


Abbildung 41: Verknüpfung von industriellen Prozessen mit Sorptionsprozessen über das gemeinsame Prozessziel

6 Potenziale

6.1. Einordnung des Energiebedarfs der Industrie

Der Jahresendenergiebedarf der Schweiz beträgt nach Daten aus den Jahren 2000 bis 2013 ungefähr 890 PJ/a [55]. Der Industriesektor macht mit einem Jahresendenergiebedarf von 165 PJ 19% des Gesamtverbrauchs aus, wovon 53% für die Prozesswärme benötigt werden, die somit 10% (87 PJ) des Gesamtverbrauchs der Schweiz beträgt, siehe Abbildung 42.

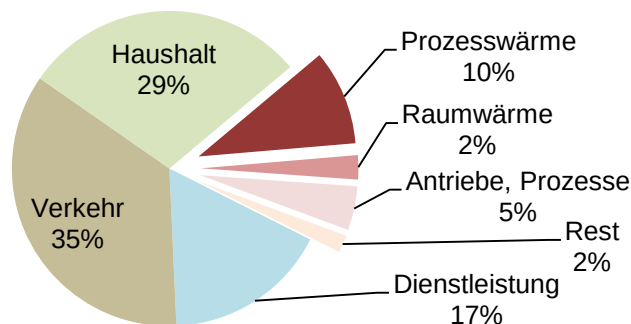


Abbildung 42: Aufteilung des jährlichen Endenergiebedarfs der Schweiz von 890 PJ auf die Sektoren Haushalt, Verkehr, Dienstleistung und Industrie (untergliedert dargestellt), bezogen auf das Jahr 2013 (Daten aus [55]).

Wärmebedarf der Industrie (Prozesswärme)

Die Prozesswärme in der Industrie dient als Antrieb vieler Prozesse, wie beispielsweise eines Trocknungsprozesses. In Abhängigkeit des Industriebereiches ergeben sich charakteristische Temperaturniveaus, auf denen die Prozesswärme benötigt wird, siehe Abbildung 43. Soll ein Prozess über interne Wärmerückgewinnungs-Prozesse (iWRG) energetisch optimiert werden, muss das Temperaturniveau der Abwärme über dem benötigten Temperaturniveau des Prozesses liegen, um direkt eingekoppelt werden zu können. Ist dies nicht möglich, kann in Betracht gezogen werden, den Abwärmestrom direkt oder indirekt (Speicherung) für weitere, externe Prozesse nutzbar zu machen.

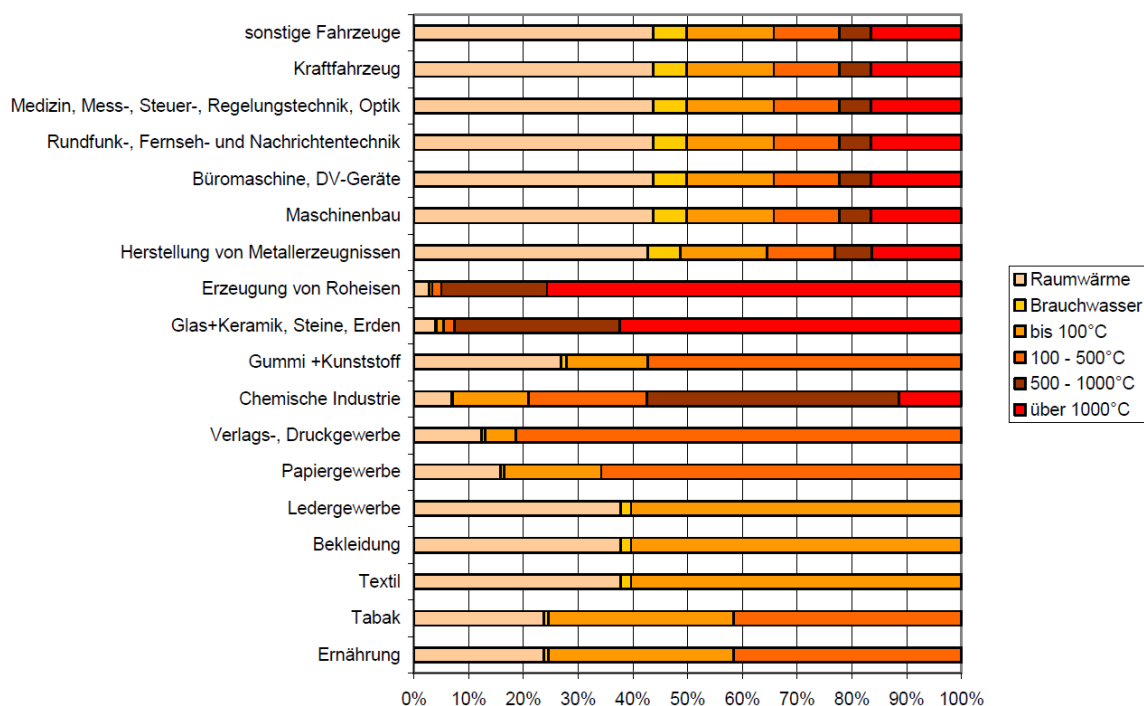


Abbildung 43: Bedarf an Prozesswärme in Abhängigkeit des Temperaturniveaus und der Branche für das Jahr 2001 in Deutschland (Daten aus [56], Grafische Darstellung von [57]).

Kältebedarf der Industrie (Antriebe, Prozesse)

Für die Schweiz ist in einer Studie von Dumortier et al. 2011 der elektrische Energieaufwand für die Kälteerzeugung auf 29 PJ/a bestimmt worden [58], was 14% der jährlichen Schweizer Stromerzeugung im Jahr 2011 (211 PJ) entspricht [55]. Auf den Industriesektor entfallen mit 5 PJ/a ungefähr 17% des elektrischen Energiebedarfs für Kälteerzeugung der Schweiz. Dies entspricht 2% der jährlichen Schweizer Stromerzeugung [58].

6.2. Energetische Optimierung

Exemplarisches Vorgehen am Beispiel der Pinch-Methode

In Kapitel 4 wurde aufgezeigt, über welche Wirkungsmechanismen die Sorptionsprozesse in den jeweiligen Kategorien einen Prozess energetisch optimieren können. Der Nutzen der vorgestellten Prozesse liegt überwiegend bei der Adsorption, während die Desorption als der Antrieb der Prozesse interpretiert werden kann. Die nachfolgende Bestimmung des Potenzials konzentriert sich auf die Betrachtung von TWS-Prozessen. Zum einen ist bei äquivalenten Energieströmen der Wärmestrom energetisch günstiger als ein reiner Exergiestrom wie bei der DWS (Kompressor/Vakuumpumpe), zum anderen fällt in der Industrie ungenutzte Energie in Form von Wärmeströmen an. Für das Vorgehen bei der thermischen energetischen Optimierung von industriellen Anlagen bestehen systematische Methoden, wie beispielsweise die Pinch-Methode [59]. In Abbildung 44 ist die Systematik der Methode im Zwiebelschalenmodell aufgezeigt. Im Folgenden wird exemplarisch erläutert, wie Sorptionsprozesse auf den entsprechenden Ebenen der Pinch-Methodik integriert werden können.

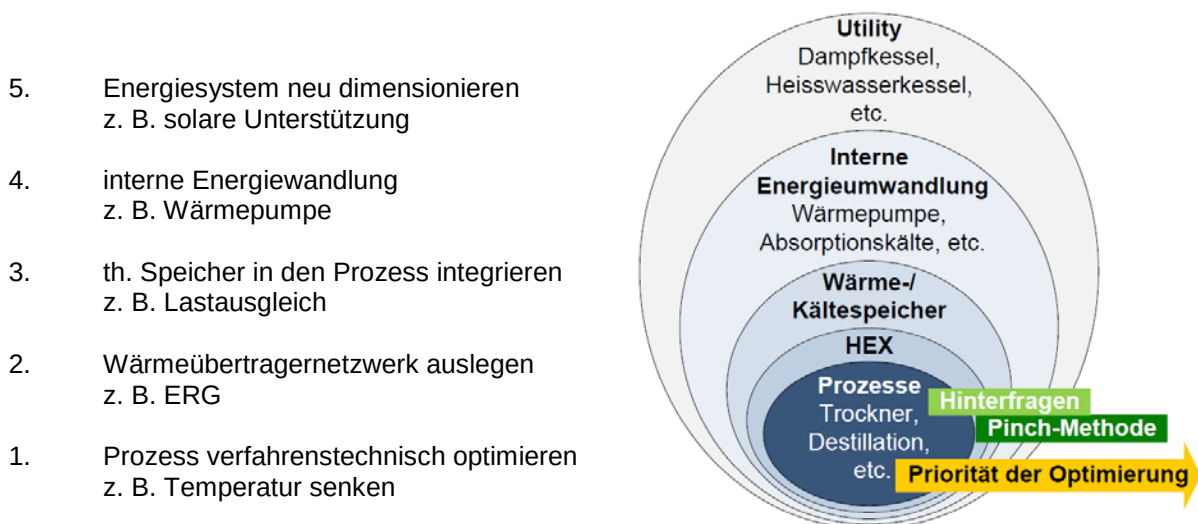


Abbildung 44: Zwiebelschalenmodell des Vorgehens bei der Pinch-Methode [59]

Der erste Schritt der energetischen Optimierung nach der Pinch-Methode ist eine Analyse des einzelnen Prozesses. Wird beispielsweise der Referenzrockner aus Kapitel 4.4 betrachtet, so kann durch das Entfeuchten der Zuluft der Energiebedarf des Trockners um 11% von 5870 kJ/kg_w auf 5277 kJ/kg_w reduziert werden (Energiebilanz um den Trockner). Hier ist anzumerken, dass der um 30% reduzierte Luftmassenbedarf zusätzlich zur Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie für Ventilation führt.

Im zweiten Schritt wird die interne Energierückgewinnung optimiert. Die Analyse kann beispielsweise über mathematische Modelle erfolgen, die eine energetisch optimale Lösung ermitteln. Die optimale Lösung ist aber nicht immer wirtschaftlich umsetzbar, da beispielsweise der konstruktive Aufwand aus bautechnischen Gründen oder der Entfernung zwischen Quelle und Senke zu gross ist. Es bestehen Konzepte, über mobile sorptive Speicher thermische Energie zu transportieren und somit Wärme über kurze Distanzen zu übertragen. Der Vorteil der sorptiven Speichermedien gegenüber sensiblen und latenten Speichermedien ist die hohe Energiedichte und ein hoher Temperaturbereich in dem der Speicher eingesetzt werden kann. So ist beispielsweise ein mobiler Adsorptionsspeicher, mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf, in ein Wärmeübertragernetzwerk integriert (Anwendungsbeispiel

„Zeolith-LKW“ in Kapitel 4.4). Der mobile Teil des Wärmeübertragernetzwerkes kann quasikontinuierlich betrieben werden und erfordert in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten geringere Investitionskosten als ein fest installiertes Nahwärmenetz [60].

Nachdem im zweiten Schritt die räumlich getrennten Quellen und Senken des Prozesses über ein Wärmeübertragernetzwerk verbunden wurden, werden die Quellen und Senken im dritten Schritt über Speicher zeitlich verknüpft. So können thermische Speicher beispielsweise in einem Batchprozess die Abwärme eines Prozesses speichern um einen folgenden Prozess anzutreiben.

Im vierten Schritt wird analysiert, ob durch interne Wärmetransformationsprozesse Wärmeströme nutzbar gemacht werden können, die nach den ersten drei Schritten, auf Grund des Temperaturniveaus, intern nicht rückgewonnen werden können. So kann beispielsweise ein Abwärmestrom als Antriebsenergie für eine Sorptionskältemaschine genutzt werden.

Der fünfte und letzte Schritt dient der Auslegung der Heiz- und Kühlsysteme. Dabei können thermische Speicher zur Glättung der Lastkurve verwendet werden. Wie im Forschungsbeispiel „Hochtemperaturspeicher im BHKW“ gezeigt, wird dabei nicht der Energiebedarf des Prozesses, sondern der Energiebedarf der Anlage durch eine gleichmässige Belastung des Heizsystems gesenkt, siehe Kapitel 4.2. Der niedrigere Energiebedarf von entsprechend ausgelegten Heiz- und Kühlsystemen wird durch deren Betrieb im jeweiligen Nennbetriebspunkt und durch die Vermeidung energetisch ungünstiger Spitzen- und Teillasten erreicht.

Aus der detaillierten Betrachtung des Vorgehens bei der Pinch-Methode wird ersichtlich, dass die energetische Optimierung der Prozesse aus zwei wesentlichen Punkten besteht:

1. Optimierung des Prozesses
2. Interne thermische Energierückgewinnung

Zur Bestimmung des energetischen Potenzials von Sorptionsprozessen durch die Optimierung von Prozessen bedarf es jeweils differenzierter Analysen. So ist beispielsweise bei der Betrachtung des Trocknungsprozesses in Kapitel 4.4 eine Reduktion von dessen Energiebedarf um bis zu 53% theoretisch möglich. Dieses Reduktionspotenzial bezieht sich jedoch auf nur einen Betriebszustand gegenüber einem energetisch schlecht eingestellten (keine iERG) Referenzfall. Für eine differenzierte Aussage zum gesuchten Potenzial muss im ersten Schritt erfasst werden, welche Trocknungstechnik auf welchem Temperaturniveau eingesetzt werden kann und welcher Energiebedarf sich bei welcher iERG-Massnahmen einstellt.

Im Rahmen dieser Studie wird das Potenzial der TWS-Prozesse anhand Vereinfachungen und Übersichtsrechnungen bestimmt. Eine Übertragbarkeit des bestimmten Potenzials auf einen konkreten Einzelfall muss in jedem Fall überprüft werden.

Hemmnisfaktoren Schweizer Unternehmen bei Investitionen in die Energieeffizienz

Der von Fischl et al. im Jahr 2014 vorgestellten Befragung von 119 Schweizer Industrieunternehmen durch die Universität St. Gallen zur Einschätzung der wirtschaftlichen Relevanz von Energieeffizienzmassnahmen kann entnommen werden, dass die Unternehmen von einer zunehmenden wirtschaftlichen Relevanz ausgehen, siehe Abbildung 45 [61]. Gleichzeitig geben 59% der befragten Unternehmen an, dass es derzeit finanzielle Gründe wären, die einer Investition in Energieeffizienzmassnahmen entgegenstünden. Es ist zu erwarten, dass unter der Annahme steigender Energiepreise, der finanzielle Nutzen von Energieeffizienzmassnahmen zukünftig steigen wird und sich somit von einem Hemmnis in einen Anreiz wandelt. 9% der Befragten haben Zweifel am wirtschaftlichen Nutzen der durchzuführenden Massnahmen. Hier sind eine bessere Dokumentation von umgesetzten Massnahmen beziehungsweise die Installation von Pilotanlagen in Abhängigkeit der Massnahme vielversprechende Mittel, um den wirtschaftlichen Nutzen zu belegen. Bei 17% der Unternehmen sind es fehlende personelle Kapazitäten oder fehlendes Fachwissen, um die Massnahmen durchzuführen. Hier kann ein Ausbau der Schulungsmassnahmen oder eine stärkere Vermarktung der Dienstleistung „Energetische Effizienzsteigerung“ die Investition in Energieeffizienzmassnahmen weiter fördern.

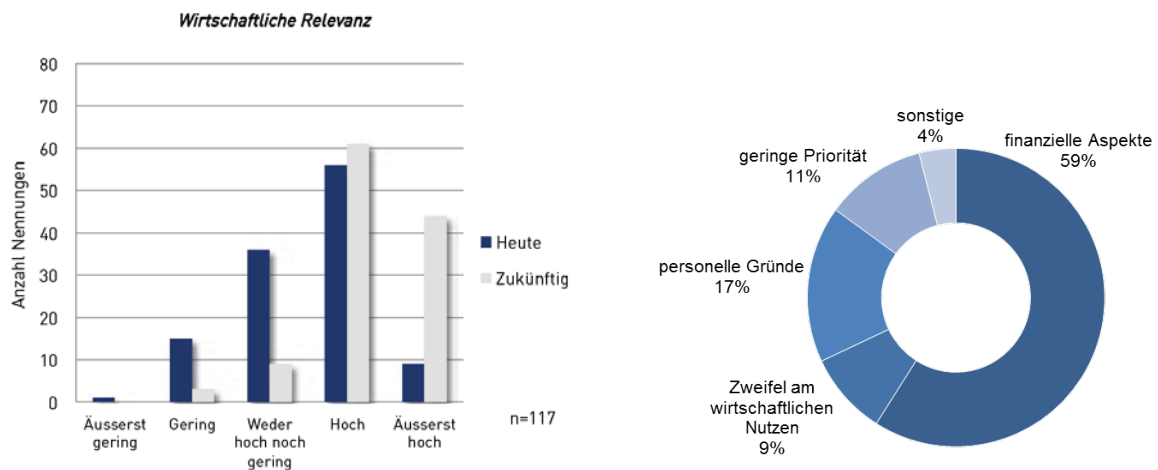


Abbildung 45: Umfrage-Ergebnis von 119 befragten Schweizer Industrieunternehmen zur Einschätzung der wirtschaftlichen Relevanz von Energieeffizienzmassnahmen
links: direkte Befragung nach der wirtschaftlichen Relevanz [61]
rechts: Auswertung der Befragung „Barrieren für Energieeffizienz“ (Daten: [61])

6.3. Fortgeführte Wärmeströme und Abwärme in der Industrie

In der Fachliteratur werden zwei unterschiedliche Definitionen von Abwärme verwendet. Bei der einen Definition wird die an die Umwelt abgegebene Energie als Abwärme eines Prozesses bezeichnet, bei der anderen wird die Energie als Abwärme bezeichnet werden, die bei einem thermisch und ökonomisch optimierten Prozess noch an die Umwelt abgegeben werden muss. In dieser Studie wird zur Differenzierung die an die Umwelt abgeführte Energie (erste Definition) als „fortgeführter Wärmestrom“ bezeichnet und dessen Minimum (zweite Definition) als Abwärme.

International sind nur wenige Studien verfügbar, die belastbare Daten zum Potenzial der Abwärme in der Industrie beinhalten [57]. Die wenigen vorhandenen Studien führen im Allgemeinen eine Ist-Analyse der fortgeführten Wärmeströme von Industrieanlagen auf und analysieren nicht die Abwärme. Bei den in dieser Studie zitierten Daten zu Abwärme wird daher davon ausgegangen, dass es sich um Angaben zu fortgeführten Wärmeströmen handelt.

Zur Bestimmung des Potenzials sind neben der Energiemenge auch Daten zum Temperaturniveau, der Leistung des fortgeführten Wärmestroms, dem zeitlichen Verlauf, der Verunreinigung sowie dem Standort bedeutend. Die nachfolgende Analyse bezieht sich auf Studien aus den europäischen Nachbarländern, die in der industriellen Struktur Ähnlichkeiten zur Schweiz aufweisen. In den Studien wurden keine Angaben zu der Qualität der fortgeführten Wärmeströme gemäss den oben genannten Kriterien gemacht, so dass keine Aussage darüber getroffen werden kann, welcher Anteil der fortgeführten Wärmeströme tatsächlich genutzt werden kann.

In einer norwegischen Studie wurden 105 Industrieunternehmen im Jahr 2008 gebeten, einen Fragebogen zu ihren Energiedaten auszufüllen [62]. 72 Unternehmen beantworteten diese Fragebögen und repräsentierten 63% des norwegischen Energiebedarfs der Festlandindustrie. Die Studie wurde von Pehnt et al. in Bezug auf die deutsche Industrie ausgewertet [57].

In der Studie wird die Energie der fortgeführten Wärmeströme der norwegischen Industrie wie folgt angegeben [57, 62]:

- > 140 °C 7,0 TWh/a (25.2 PJ/a)
- 60-140 °C 3,1 TWh/a (11.2 PJ/a)
- 40-60 °C 5,8 TWh/a (20.9 PJ/a)
- 25-40 °C 3,3 TWh/a (11.9 PJ/a)

Für offene sorptive Speichersysteme mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf, wie es beispielsweise bei Trocknungsprozessen und/oder dem thermischen Energietransport eingesetzt wird,

siehe Kapitel 4.2 und 4.4, wird eine Desorption von über 135°C empfohlen, um eine effektive Desorption zu gewährleisten [34]. Die gesamte Energie der Abwärme >140°C ist somit für offene sorptive Speichersysteme geeignet. Somit könnten in Norwegen über die fortgeführten Wärmeströme 25.2 PJ/a mit einem offenen sorptiven Speichersystem potenziell genutzt werden. Das entspricht 8% des gesamten Energiebedarfes der norwegischen Industrie [63].

Über Sorptionswärmepumpen oder –kältemaschinen können auch Abwärmeströme ab einem Temperaturniveau von ungefähr 40°C genutzt werden. Somit erhöht sich das nutzbare Abwärmepotenzial für Norwegen um den Temperaturbereich 40 – 140°C mit 32.1 PJ/a auf insgesamt 57.3 PJ/a, was 19% des gesamten norwegischen Energiebedarfs im Industriesektor (306 PJ/a) entspricht [63].

Das ZAE Bayern beziffert das Potenzial an fortgeführten Wärmeströmen >135°C in Deutschland auf 80 PJ/a, siehe Abbildung 46, in der die theoretisch nutzbaren fortgeführten Wärmeströme (Referenztemperatur 35°C) in Abhängigkeit des Temperaturniveaus der fortgeführten Wärmeströme aufgetragen ist. Für den Temperaturbereich von 40°C bis 135°C, der beispielsweise für Sorptionskälte- und Sorptionswärmemaschinen als Antrieb genutzt werden kann, lässt sich aus der Abbildung ein Potenzial der fortgeführten Wärmeströme von 45 PJ/a ermitteln ($125 - 80 = 45$ [PJ/a]).

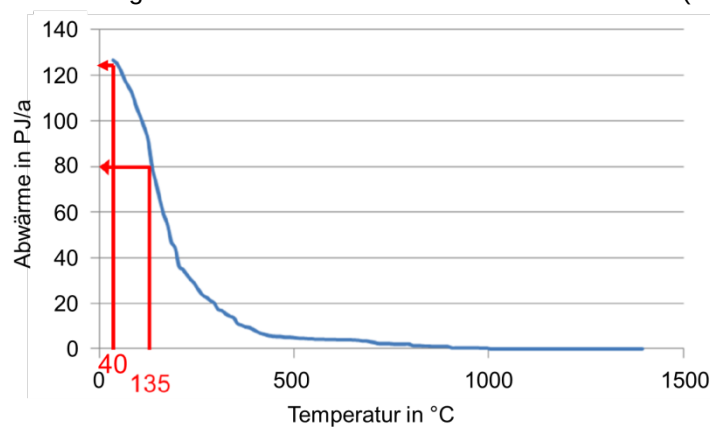


Abbildung 46: Aufkommen an fortgeführten Wärmeströmen über deren Temperaturniveaus in der Industrie für 2008 in Deutschland nach [34].

Der Energiebedarf der deutschen Industrie für Prozesswärme beträgt 1742 PJ/a (2008) [64]. Somit ergibt sich der Anteil der fortgeführten Wärmeströme am Energiebedarf wie folgt:

- 40 – 135°C (45 PJ/a): 3%
- > 135°C (80 PJ/a) 6%

Für 2013 betrug der gesamte Energiebedarf der Schweizer Industrie für Prozesswärme 87 PJ/a [55]. Bestimmt man das Aufkommen der fortgeführten Wärmeströme in der Schweiz über die prozentualen Anteile der norwegischen und deutschen Industrie für die beiden Temperaturbereiche, so ergeben sich folgende Potenziale der fortgeführten Wärmeströme:

- 40°C – 135°C: 3 – 18 PJ/a
- >135°C: 5 – 14 PJ/a

Auf Grund der Industriestruktur in der Schweiz, die eher der deutschen als der norwegischen gleicht, ist davon auszugehen, dass das Potenzial der fortgeführten Wärmeströme in der Schweiz im Bereich des unteren Wertes ist. Die Bandbreite des Potenzials entspricht einem Anteil von 4% bis 13% des angestrebten Gesamtziels der Energiestrategie 2050, den Energiebedarf von 2009 bis 2050 um 251 PJ/a zu senken. Für die Prozesswärme im Industriesektor beträgt die Bandbreite des Potenzials 18 - 64% der Zielsetzung, den Endenergiebedarf in dem Zeitrahmen um 50 PJ/a zu senken, siehe Abbildung 47 [65].

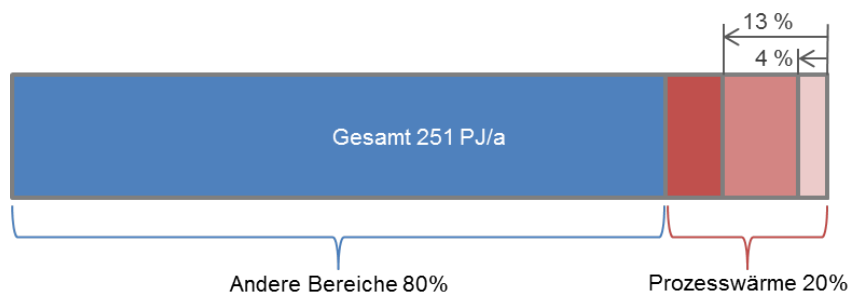


Abbildung 47: Überlagerung der Bandbreite des Potenzials der fortgeführten Wärmeströme der Schweiz mit dem Gesamtziel, den Jahresendenergiebedarf in der Schweiz bis 2050 gegenüber 2009 um 251 PJ/a zu senken [34, 62, 64, 65].

6.4. Umfrage zum Potenzial

Es wurde eine Umfrage mit dem Ziel durchgeführt, eine Einschätzung der Industrie und anderer Forschungseinrichtungen zum energetischen Potenzial von Sorptionsprozessen in der Industrie zu erhalten und diese Einschätzung mit dem Ergebnis der vorliegenden Studie abzugleichen. Aufgrund einer zu klein gewählten Anzahl an Befragten lässt sich das Ergebnis von 5 Rückmeldungen der Umfrage nicht statistisch auswerten und veröffentlichen.

Die Umfrage war so aufgebaut, dass eine grobe Einordnung des Arbeitsfeldes der Befragten aus den Ergebnissen möglich ist. Die Fragen wurden so gestellt, dass sowohl Angaben zu den Sorptionskategorien im Allgemeinen wie auch im Detail zu je zwei Beispielanwendungen gemacht werden konnten.

Der Fragebogen war online ausfüllbar und ist im Anhang ab Seite 93 abgedruckt. Auf Grund des Umstands, dass die in dieser Studie erarbeitete Klassifizierung der Sorptionsprozesse noch nicht bekannt war und in der Umfrage nur knapp erläutert wurde, wäre eine Moderation des Fragebogens hilfreich gewesen. So ergaben sich zum Teil Differenzen zwischen dem Potenzial der Sorptionsklasse und dem Potenzial der Beispielprozesse, siehe Abbildung 75 (Seite 101, Auszug der aufbereiteten Rohdaten).

6.5. Potenziale der Sorptionskategorien

Die Potenziale der Sorptionsprozesse werden für die vier definierten Vorgänge Wärmetransformation, thermische Energiespeicherung, Stofftrennung und Stoffspeicherung anhand von Übersichtsrechnungen für einzelne Branchen beziehungsweise Verfahren erarbeitet. Dieses Vorgehen dient somit dem Aufzeigen des Potenzials der Vorgänge anhand von Beispielen und erlaubt lediglich eine Abschätzung des Potenzials aller Sorptionsprozesse mit dem Hinweis auf eine hohe Unsicherheit.

Die durchgeführte Abschätzung hat nicht den Anspruch, das Potenzial numerisch korrekt zu ermitteln, sondern soll primär eine erste Grundlage schaffen, um über zusätzliche Studien und Diskussionen dem wahren numerischen Wert näher zu kommen.

Wärmetransformation

In Kapitel 6.1 ist aufgeführt, dass 2% des Schweizer Strombedarfs für die Kälteerzeugung in der Industrie aufgewendet werden. Unter der Annahme eines durchschnittlichen EER von 2 ergibt sich ein Kältebedarf in der Industrie von 10 PJ/a. Sorptionskältemaschinen erzeugen über einen thermischen Antrieb eine Wärmesenke, welche die benötigte Kälteleistung im Prozess bereitstellen kann. Wird weiter angenommen, dass 10% der elektrischen Kältemaschinen durch Sorptionskältemaschinen mit einem EER von 0.2 ersetzt werden, ergibt sich ein Bedarf von 5 PJ/a an thermischer Energie, der mit dem Abwärmepotenzial in dem Temperaturbereich von 40°C – 135°C gedeckt werden kann, siehe Kapitel 6.3.

Durch die Substitution von 10% der industriellen elektrischen Kältemaschinen mit über Abwärme angetriebenen sorptiven Kältemaschinen ergibt sich bei den getroffenen Annahmen folgendes energetisches Potenzial:

- Minderung Bedarf elektrischer Energie:
 - o 0.5 PJ/a (0.2% des gesamten Schweizer Strombedarfs)
- Minderung Bedarf Primärenergie ($8 \text{ MJ}_{\text{Prim}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ [66]):
 - o 1.1 PJ/a
- Minderung an CO_2 -Emissionen ($90 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ [66]):
 - o 12'600 $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$

Thermische Energiespeicherung

Für die thermische Speicherung bis zu einer Ladetemperatur von 100°C sind konventionelle Warmwasserspeicher etabliert. Für höhere Temperaturen sind keine befriedigenden technischen Speichertechnologien vorhanden, siehe Kapitel 4.2. Für Temperaturen bis 250°C sind sorptive Speicher mit dem Arbeitspaar Zeolith-Wasserdampf geeignet. Es sind keine Studien über das Marktpotenzial von thermischen Speichern über 140°C bekannt, daher wird im Folgenden das energetische Potenzial für die Schweiz grob bestimmt.

Für eine Abschätzung des Marktpotenzials auf Grundlage der zuvor genannten Angaben zum Wärmebedarf und Potenzial der ungenutzten Prozesswärme in der Industrie, werden folgende Annahmen getroffen:

1. das Potenzial der Abwärme über 140°C beträgt in der Schweiz 10 PJ/a
2. 10% des Potenzials der Abwärme über 140°C der Industrie wird gespeichert (1 PJ/a)
3. In einem Speicher werden im Mittel pro Tag 2880 MJ Wärme gespeichert

Unter den getroffenen Annahmen werden pro Speicher und Jahr 0.001 PJ/a thermische Energie gespeichert (*Energie pro Tag [2880 MJ/Tag] x Anzahl der Tage im Jahr [365 Tage]*). Wird die angenommene gespeicherte thermische Energie pro Jahr (Annahme 2) durch die gespeicherte Energie im Jahr pro Anlage dividiert, ergibt sich ein Bedarf von ca. 1000 Speichereinheiten für die Schweiz.

Zur Bestimmung des energetischen Potenzials wird vereinfachend angenommen, dass die spezifischen CO_2 -Emissionen der Prozesswärme gleich den spezifischen CO_2 -Emissionen des Industriesektors aus Brennstoffen sind ($216 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$) [55, 67].

Aus den getroffenen Annahmen ergeben sich folgende energetischen Potenziale:

- Minderung Endenergiebedarf (entspricht der gespeicherten thermischen Energie):
 - o 1 PJ/a
(1% des Endenergiebedarfes des Verwendungszweckes Prozesswärme)
- Minderung an CO_2 -Emissionen:
 - o 60'000 $\text{t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$

Stofftrennung

Sinkende Grenzwerte durch neue Umweltauflagen durch den Gesetzgeber erfordern in der Industrie einen steigenden Einsatz an Nachbehandlungsanlagen von Entsorgungsströmen wie Abgas oder Abwasser. Anhand des im Kapitel 4.3 genannten Praxisbeispiel zur Lösungsmittelrückgewinnung, wird das energetische Potenzial von Sorptionsprozessen bei Abgasnachbehandlungsanlagen gezeigt. Durch eine im Vergleich zu anderen Technologien häufig energetisch effizientere Betriebsweise, lässt sich die Umweltbelastung durch Sorptionsprozesse für die Abgasnachbehandlung somit reduzieren.

Es wird die Annahme getroffen, dass ohne zusätzliche Massnahmen dieselbe VOC-Fracht im Jahr 2020 von der Industrie emittiert wird, wie im Bezugsjahr 2005. In diesem betrugen die VOC-Emissionen der Industrie ca. 30'000 t, siehe Abbildung 25 [45]. Somit müssen zur Erreichung des Ziels, die VOC-Emissionen bis zum Jahr 2020 um 20% - 30% zu senken, über Abgasnachbehandlungsanlagen oder geänderte Prozessführungen bis zu 30% der VOC-Fracht von 2005 entfernt werden, das entspricht einer jährlichen Masse an zu entfernenden VOCs von bis zu 9'000 t.

Für einen Schweizer Farbhersteller ist das wirtschaftliche und ökologische Potenzial vier verschiedener Abgasnachbehandlungsanlagen in einer Modellrechnung von Gerber angegeben, siehe Tabelle 12.

	Einheit	Anlage 1: Zeolith-Rotor mit UV und katalytischer Oxidation	Anlage 2: Zeolith-Rotor und 2- Kammer-RNV	Anlage 3: 2-Kammer-RNV mit Wärmeauskopplung	Anlage 4: 3-Kammer-RNV mit nachgeschalteter Abwärmenutzung
Emissionen					
VOC-Emission	[kg/a]	1'139	1'139	785	393
CO ₂ -Emission aus VOC	[kg/a]	37'865	37'865	38'573	39'360
CO ₂ -Emission aus Brennstoff	[kg/a]	-	10'130	98'164	108'504
CO ₂ -Emission aus Strom	[kg/a]	17'862	20'610	46'487	30'228
CO ₂ -Emissionseinsparung durch Abwärmenutzung	[kg/a]	-15'926	-	-61'048	-61'048
NO _x -Emission	[kg/a]	-	94	818	904
Umweltbelastung					
VOC	[Mio. UBP/a]	20.5	20.5	14.1	7.1
CO ₂	[Mio. UBP/a]	12.3	21.3	37.9	36.3
NO _x	[Mio. UBP/a]	0.0	3.8	36.8	40.7
Total	[Mio. UBP/a]	32.8	45.6	88.8	84.0
		100%	139%	270%	256%

Tabelle 12: Ökologische Kennwerte vier verschiedener Abgasnachbehandlungsanlagen zur Entfernung von VOCs aus der Abluft eines Schweizer Farbherstellers mit einer gesamten VOC-Fracht von 19.9 t/a [68].
RNV - Regenerative thermische Nachverbrennung, UBP – Umweltbelastungspunkt(e)

Anhand der Anlagen 2 und 3 wird das energetische Potenzial des Einsatzes eines Zeolith-Rotors auf die gesamt zu entfernende Masse an VOCs in der Schweiz von 9'000 t/a hochgerechnet.

In der Modellrechnung weisen die Anlagen eine unterschiedliche VOC-Entfernungsrate auf. Die Anlage 2 entfernt 18.7 t/a und die Anlage 3 19.0 t/a VOCs aus dem Abgas [68]. Für die VOC-Entfernung von 9'000 t/a müssen somit entweder 482 Anlagen Nr. 2 oder 473 Anlagen Nr. 3 installiert werden. Aus den oben getroffenen Annahmen zu den spezifischen CO₂-Äquivalenten von Prozesswärme mit 216 g_{CO2}/kWh_{th} und für elektrische Energie mit 90 g_{CO2}/kWh_{el} ergibt sich der gesamte Energiebedarf der notwendigen Anlagen gemäss Tabelle 13.

Anlage Nr.	Bedarf an elektrischer Energie [PJ _{el} /a]	Bedarf an thermischer Endenergie [PJ _{th} /a]	CO ₂ -Emissionen [t/a]
2	0.4	0.07	14'200
3	0.9	0.3	40'500

Tabelle 13: Auf das Jahr bezogene Kennwerte der von Gerber [68] vorgestellten Anlagen 2 und 3, um die Schweizer Ziele bei der VOC-Reduktion im Jahr 2020 zu erreichen

Mit den getroffenen Annahmen ergibt sich das energetische Potenzial bei der VOC-Entfernung ab dem Jahr 2020 zu:

- Minderung Bedarf elektrischer Energie:
 - o 0.5 PJ/a (0.2% des gesamten Schweizer Strombedarfs)
- Minderung Endenergiebedarf:
 - o 0.7 PJ/a
- Minderung Bedarf Primärenergie (8 MJ_{Prim}/kWh_{el} [66], Feuerungswirkungsgrad = 0.9):
 - o 4.3 PJ/a
- Minderung an CO₂-Emissionen:
 - o 26'300 t_{CO2}/a

Das Potenzial wäre bei einem Vergleich der Anlage 1 mit 3 grösser ausgefallen, aber hier sollte hervorgehoben werden, wie die 2-Kammer-RNV durch das Hinzufügen des Sorptionsprozesses optimiert werden kann und nicht über welches Oxidationsverfahren für VOCs das energetische Optimum erzielt wird.

Wärmetransformation und Stofftrennung

Die Kopplung der Sorptionskategorien Wärmetransformation und Stofftrennung führt zu einer optimierten Prozessführung von Trocknungsprozessen, siehe Kapitel 4.4. In Tabelle 10 (Seite 45) wird gezeigt, dass unter Vernachlässigung sämtlicher Hilfsenergien, der Energiebedarf, durch die Integration eines Sorptionsprozesses in einen Referenzrockner, um 17 bis 53% des Referenzwertes

gesenkt werden kann. Bei optimaler Verschaltung (Umluft mit Bypass) wird wie bei einer optimalen WRG (Wärmeverhältnis ≈ 1) ein Trocknungswirkungsgrad von knapp 100% erreicht.

Die Bestimmung des Potenzials beruht auf einem Referenzfall. Die jahreszeitlich bedingte Änderung des Zustandes der Umgebungsluft und der vom Trocknungsprozess abhängige Zustand der Abluft haben einen entscheidenden Einfluss auf das energetische Potenzial der jeweiligen Massnahmen und sind hier nicht berücksichtigt worden.

Im Folgenden erfolgt die Bestimmung des energetischen Potenzials von Sorptionsprozessen in der Schweizer Trocknungsindustrie anhand des vorgestellten idealisierten Modells.

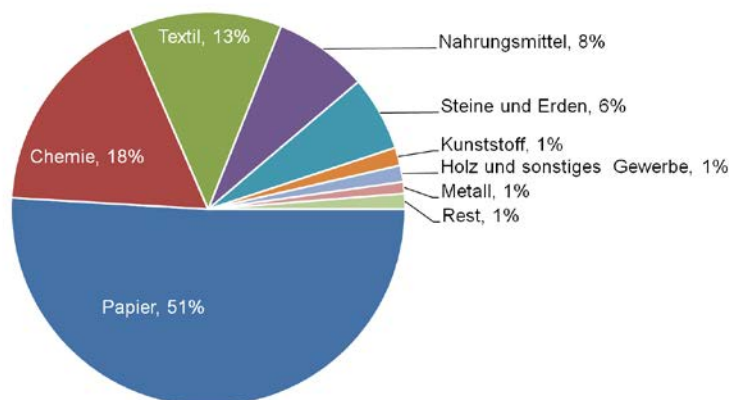


Abbildung 48: Aufteilung des Energiebedarfs für Entwässerung und Trocknung in der Schweizer Industrie im Jahr 1995, Gesamtenergiebedarf für Entwässerung und Trocknung = 14.5 PJ/a (Daten: [69]).

Der Abbildung 48 ist zu entnehmen, dass der Schweizer Energiebedarf für Trocknungsprozesse mit 51% überwiegend in der Papierindustrie anfällt. Die vier Branchen *Chemie*, *Textil*, *Nahrungsmittel* und *Steine und Erden* benötigen zusammen 45% des Schweizer Energiebedarfs für Trocknungsprozesse. Die restlichen 4% des Bedarfs entfallen auf weitere Industriezweige, deren energetische Bedeutung entsprechend geringer ist. In Abhängigkeit der Eignung des dominierenden Trocknungsverfahrens in der jeweiligen Branche für Sorptionsprozesse wird berücksichtigt, welcher Anteil der Branche durch einen Sorptionsprozess optimiert werden kann. Hierzu ist eine Auflistung der häufig eingesetzten Trocknungsanlagen von Kuster [69] ausgewertet worden, siehe Tabelle 14. In der ersten Spalte ist der Anteil des Energiebedarfs der Branche, der in der folgenden Hochrechnung berücksichtigt wird, als Prozentsatz und Absolutwert angegeben.

Der Energiebedarf von Trocknungsanlagen, bei denen die thermodynamischen Vorgänge bei der Trocknung denen des Referenzmodells gleichen, wird gemäss Tabelle 14 zu 3750 TJ/a (3.75 PJ/a) bestimmt. Wird eine durchschnittliche Reduktion des Energiebedarfs der Trocknung von 25% angenommen, ergibt sich das energetische Potenzial von Sorptionsprozessen in Trocknungsprozessen zu:

- Minderung Endenergiebedarf:
 - o 0.9 PJ/a
(1% des Endenergiebedarfes des Verwendungszweckes Prozesswärme)
- Minderung an CO₂-Emissionen:
 - o 54'000 t_{CO2}/a (216 g_{CO2}/kWh_{th} [55, 67])

Branche	Trocknungsgut	Häufig eingesetzte Entwässerungs- und Trocknungsanlagen		
		gute Vergleichbarkeit	mässige Vergleichbarkeit	schlechte Vergleichbarkeit
Papier (10%) [740 TJ/a]	Zellstoff		thermische Trocknungsstufen	Mechanische Trocknungsstufen
	Papier	Konvektionstrocknung		Mechanische Entwässerung, Kontaktstrocknung
Chemie (30%) [763 TJ/a]	Grundstoffe und Produkte		Vielzahl von Trocknungsschritten, zum Teil mit chemischen Prozessschritten kombiniert	
Textil (40%) [729 TJ/a]	Fasern	Kammertrockner		Schleudern
	Garne	Drehzylindertrockner, Kammertrockner		
	Gewebe		Prallstrahltrocknung, weitere Anlagen für Veredlung	Mechanische Entwässerung
Nahrungsmittel (60%) [675 TJ/a]	Getreide	Konvektionstrockner		
	pflanzliche Futtermittel	Heisslufttrockner (60 - 100°C)		Mechanische Entwässerung
	Tabak	Lufttrocknung, Heisslufttrocknung		
	Teigwaren		Hochtemperatur-trocknung	
	Stärke	Pneumatische Trocknung, Kammertrockner		
	Kristallzucker	Trommeltrockner, Etagentrockner		
	Kaffee	Gefriertrocknung, Sprühtrocknung		
	Fleisch	Gefriertrocknung, Vakuumtrocknung, Sprühtrocknung, Klimakammer		
Steine und Erden (60%) [533 TJ/a]	Gips und Gipsprodukte	Kammertrockner, Kanaltrockner		
	Kalk	Sprühtrockner		
	keramische Güter	Kammertrockner, Förderbandtrockner	Prallstrahltrockner	
Restliche (60%) [310 TJ/a]	Diverses	Konvektionstrockner, Freilufttrockner, Vakuumtrockner		Strahlungsöfen, Elektronen- und UV-Strahlungstrockner, Mikrowellentrockner etc.

Tabelle 14: Auszug aus der Auflistung häufig eingesetzter Entwässerungs- und Trocknungsanlagen von Kuster [69] mit Einteilung des energetischen Potenzials von Sorptionsprozessen

1. Spalte, Werte in Klammern: Anteil des Energiebedarfs der Branche, der in der Hochrechnung berücksichtigt ist; (berücksichtigter Anteil der Branche) [berücksichtigter Absolutwert], Daten von 1996

Stoffspeicherung

Im Bereich der Stoffspeicherung mit Sorptionsprozessen ist insbesondere die Wasserstoffspeicherung ein Anwendungsgebiet, in dem der Sorptionsprozess viele Vorteile gegenüber konkurrierenden Technologien aufweist. Die theoretisch möglichen Werte der gravimetrischen und volumetrischen Speicherdichten werden jedoch von den meist im Versuchsstadium befindlichen sorptiven Speichersystemen noch nicht erreicht [70].

Die Wasserstoffspeicherung ist insbesondere in der Anwendung von Power-to-Gas im Bereich der Gas-Infrastruktur und im Verkehrssektor von Bedeutung. Die Wasserstoffinfrastruktur ist noch nicht etabliert und deren weitere Entwicklung von politischen und technischen Faktoren abhängig. Zum derzeitigen Zeitpunkt erscheint daher eine Abschätzung des Potenzials im Rahmen dieser Studie als nicht zielführend. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle davon abgesehen, einen quantitativen Wert oder eine qualitative Aussage für das energetische Potenzial der Stoffspeicherung anzugeben.

6.6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der obigen Hochrechnungen des energetischen Potenzials der einzelnen Sorptionsprozesse sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Ergebnisse repräsentieren das Potenzial der Sorptionskategorien in industriellen Anwendungen anhand ausgewählter Beispiele. Diese sind so gewählt worden, dass eine möglichst transparente Hochrechnung vom Einzelfall auf das energetische Potenzial der Anwendung in der Schweiz erfolgen kann, auch wenn diese einer hohen Unsicherheit obliegt. Auf die Bestimmung des Potenzials der Sorptionsklasse *Stoffspeicherung* wurde verzichtet, da das Potenzial dieser Sorptionsklasse dem Verkehrssektor zugehörig ist und die Studie sich auf industrielle Prozesse konzentriert.

	Wärme- transformation	Thermischer Energiespeicher	Stoff- trennung	Wärmetransformation und Stofftrennung	Summe
E_{Prim} [PJ/a]	1.1	1.3	4.3	1.1	7.8
CO_2 [t/a]	12'600	60'000	26'300	54'000	152'900
$E_{\text{End,el}}$ [PJ/a]	0.5	nicht bestimmt	0.5	nicht bestimmt	> 1
$E_{\text{End,th}}$ [PJ/a]	nicht bestimmt	1	0.2	0.9	> 2.1

Tabelle 15: Zusammenfassung des energetischen Potenzials der ausgewählten Prozesse ohne *Stoffspeicherung*

In der Energiestrategie 2050 wird gemäss einer Studie der PROGNOSE AG [71] von einem Einsparpotenzial der Endenergienachfrage von 251 PJ/a ausgegangen, wenn das Szenario „Neue Energiepolitik“ gegenüber „Weiter wie bisher“ umgesetzt wird [65]. Für den Verwendungszweck *Prozesswärme* in den Sektoren *Dienstleistung* und *Industrie* wird das thermische Einsparpotenzial mit 35.5 PJ/a und das elektrische Potenzial im Sektor *Industrie* mit 15.8 PJ/a angegeben, siehe Abbildung 49, links. Zur Einordnung des energetischen Potenzials der Sorptionsprozesse werden die Werte aus Tabelle 15 auf die genannten Einsparpotenziale bezogen. Dies ist formal nicht korrekt, da zum Beispiel die Einsparungen durch die Sorptionskältemaschinen im Bereich *Antriebe & Prozesse* geltend gemacht werden müssten, dient aber der Übersichtlichkeit und ermöglicht somit eine bessere Einordnung der Ergebnisse.

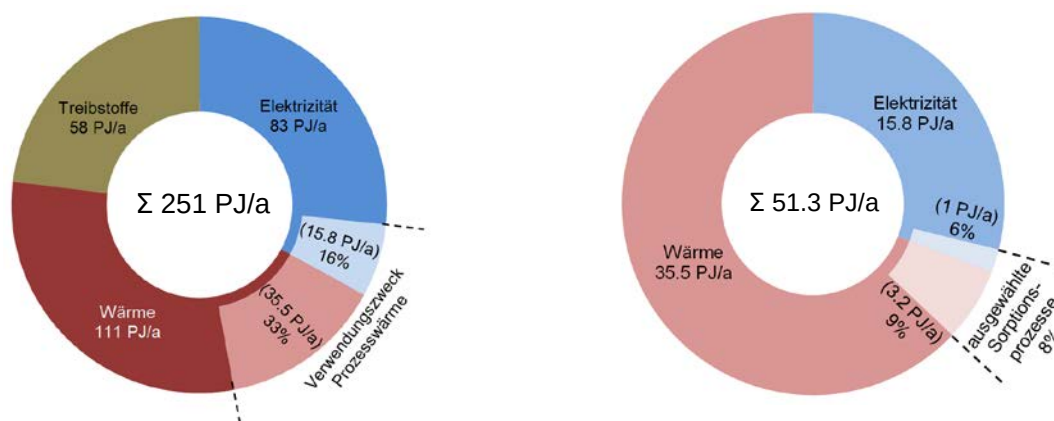


Abbildung 49: links: Anteil der Endenergieformen am Einsparpotenzial von 251 PJ/a an Endenergie der Sektoren Haushalte, Industrie und Dienstleistung, mit der Hervorhebung des Anteils des Verwendungszwecks *Prozesswärme* im Sektor Industrie (Wärmebedarf ist auf *Industrie* und *Dienstleistung* bezogen) [65, 71] rechts: Anteil der Endenergieformen am Einsparpotenzial des Verwendungszwecks „Prozesswärme“ im Industriesektor mit Hervorhebung des bestimmten energetischen Potenzials der Sorptionsprozesse

Bezogen auf das oben bestimmte gesamte Einsparpotenzial an Endenergie für den Verwendungszweck *Prozesswärme* von 51.3 PJ/a, entspricht das energetische Potenzial der Sorptionsprozesse bei den in der Arbeit beispielhaft aufgeführten Anwendungsfeldern einem Anteil von 8%, siehe Abbildung 49, rechts. In Bezug auf die thermische Endenergie (Wärme) beträgt der Anteil 9% und in Bezug auf die elektrische Endenergie (Elektrizität) beträgt der Anteil 6%.

Auf Grund der hohen Anzahl an getroffenen Annahmen bei gleichzeitiger Beschränkung auf die Betrachtung von wenigen beispielhaften Anwendungen, sind die Ergebnisse mit einem hohen Unsicherheitsfaktor zu belegen.

Für einen qualitativen Überblick des energetischen Potenzials sind in Abbildung 50 die einzelnen

Sorptionskategorien nach einem Ampelsystem (grün = hoch, rot = niedrig) farblich kodiert.

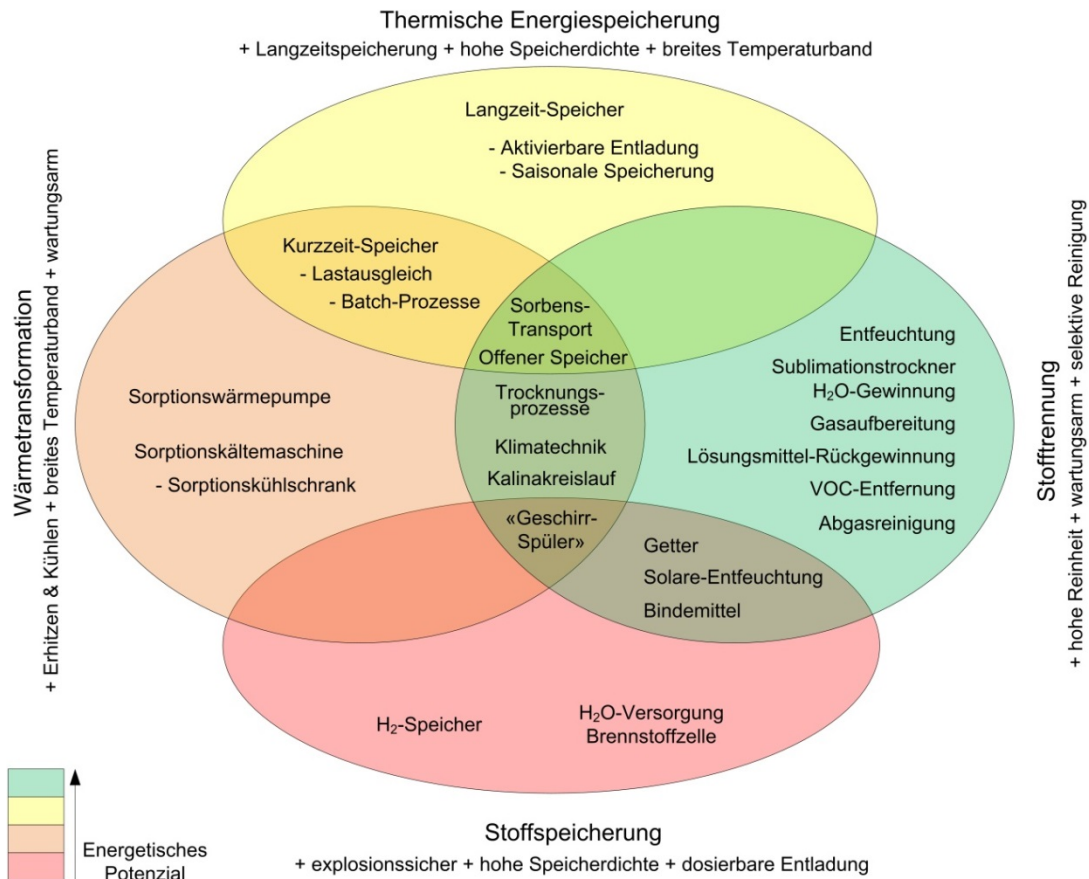


Abbildung 50: Qualitative Einstufung des energetischen Potenzials der vier Sorptionskategorien in der Industrie, Stofftrennung > thermische Energiespeicherung > Wärmetransformation > Stoffspeicherung

Das grösste energetische Potenzial wird für die Sorptionsklasse Stofftrennung gesehen. Die hohen erzielbaren Reinheiten sind ansonsten nur über energieintensive Verfahren erreichbar und die freiwerdende Sorptionsenthalpie beeinflusst zum Beispiel Trocknungsprozesse positiv. Die Desorption, so sie denn durchgeführt wird, erfolgt am aufkonzentrierten Sorbens, wodurch die energetische Effizienz der Trennung steigt, da weniger inerte Anteile beim Trennungsprozess behandelt werden müssen.

Das Potenzial der Sorptionsklasse thermische Energiespeicherung wird auf einem mittleren Niveau gesehen. Im Bereich der thermischen Speicherung weisen sorptive Speichertechnologien den Vorteil auf, dass Speichertemperaturen bis 250°C mit hohen Speicherdichten möglich sind, welche von keiner anderen Speichertechnologie mit einem vergleichbaren technischen Aufwand erreicht werden. Zusätzlich ermöglichen offene Systeme die Möglichkeit, das ebenfalls gespeicherte Stofftrennungspotenzial zu nutzen.

Auf einem leicht niedrigeren Niveau wird die Sorptionsklasse Wärmetransformation eingestuft. Durch das Transformieren von Wärmeströmen lässt sich die iERG in vielen Bereichen optimieren. So kann beispielsweise mit einer Absorptionskältemaschine eine bisher ungenutzte Prozesswärme zur Deckung der Kühllast einer Anlage eingesetzt werden. Mindernd wirkt sich auf das Potenzial aus, dass die mechanisch angetriebenen Wärmepumpen und Kältemaschinen in direkter Konkurrenz stehen und einen geringeren Investitionsaufwand darstellen. Wird ferner davon ausgegangen, dass zukünftig die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung weiter gesenkt werden, verringert sich das energetische Potenzial.

Die Sorptionsklasse Stoffspeicherung wird für die Industrie derzeit als energetisch nicht bedeutend eingestuft.

7 Quantifizierte Praxisbeispiele

Zu Beginn der Studie wurde der Kontakt zur Industrie aufgenommen, um anhand von drei Praxisbeispielen das energetische Potenzial zu quantifizieren. Es erschien als aussichtsreich Anwendungen im Bereich der Trocknungstechnik zu wählen, da bei Trocknungsprozessen wie in Kapitel 6.6 zwei Eigenschaften eines Sorptionsprozesses gezielt genutzt werden können.

Die gewählten Trocknungsprozesse haben sich bei den Kontaktaufnahmen ergeben, sind nicht gezielt ausgewählt worden und entsprechen nicht den idealen Trocknungsprozessen für die Integration eines Sorptionsprozesses. So führen beispielsweise Herausforderungen durch geforderte Lebensmittelverträglichkeiten, hohe Verunreinigungsgrade der Stoffströme oder durch eine bereits CO₂-neutrale Energieversorgung zu einer Reduzierung des energetischen Potenzials.

Die drei Trocknungsprozesse werden unter energetischen und ökonomischen Kriterien betrachtet. Die entsprechende Detailtiefe ist in Abhängigkeit des Datenmaterials unterschiedlich. Der Vergleich drei verschiedener Trocknungsverfahren verdeutlicht die Unterschiede bei den Herausforderungen, den Sorptionsprozess in einen Trocknungsprozess zu integrieren.

7.1. Konvektionstrockner

Technischer Aufbau

Es wird ein, in den Reinigungsprozess von Blechbauteilen integrierter Durchlaufkonvektionstrockner analysiert. Das Trocknungsgut sind verschiedene Formteile aus Dünnsblech, die zum Teil schöpfende Geometrien (Haftwasser sammelt sich in Vertiefungen ohne Abfluss) aufweisen. Nach der Trocknung werden die Bauteile mit Folie versiegelt und an den Kunden versendet.

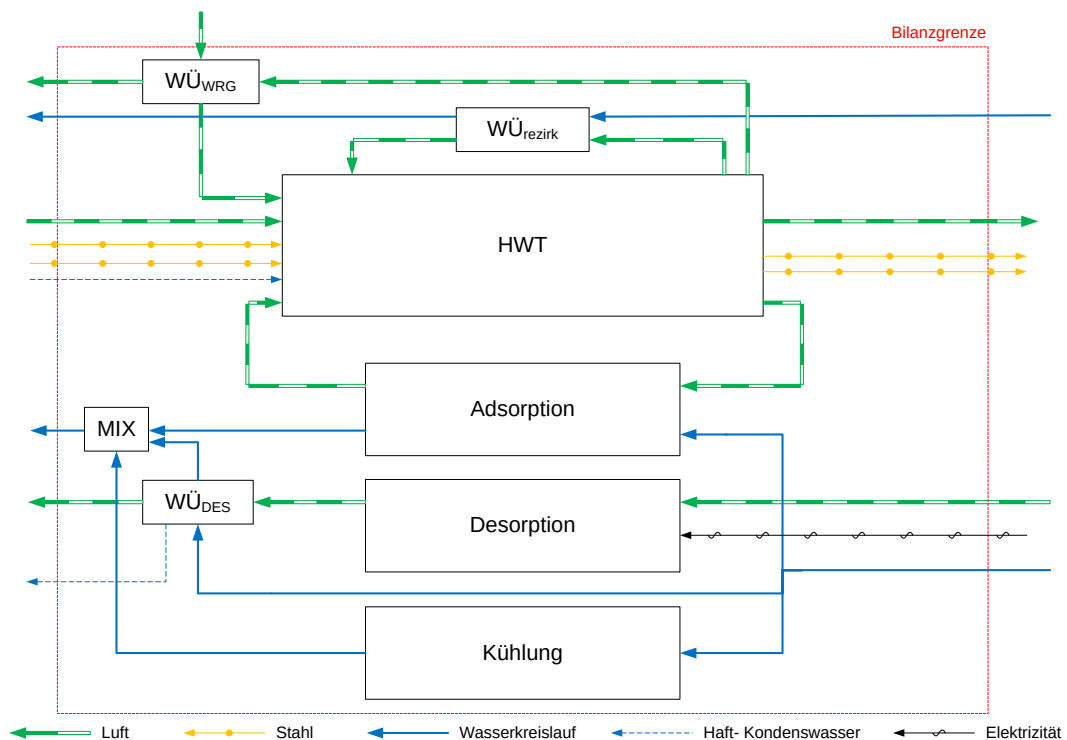


Abbildung 51: Stoffströme des betrachteten Haftwassertrockners mit angeschlossenen Adsorptionssystem

Für das Erreichen der geforderten Stoffübergangskoeffizienten beim Trocknungsprozess werden hohe Luftgeschwindigkeiten, die zum Teil durch Düsen dem Trocknungsgut angepasst werden können, durch einen Umluftstrom eingestellt. Der Umluftstrom ist mit einem Wärmeübertrager ($WÜ_{rezirk}$) an das Heisswassernetz angeschlossen und führt dem Trockner (HWT) die benötigte Energie zu, siehe Abbildung 51. Das Heisswassernetz wird mittels einer Holzhackschnitzelfeuerung betrieben, deren

Wärme ebenfalls in ein Nahwärmenetz eines Quartiers in der direkten Umgebung eingespeist wird. Die Wärmebereitstellung des Trocknungsprozesses ist somit nahezu ohne CO₂-Emissionen, aber um ein Vielfaches teurer, als in der Industrie üblich. Die Zuluft gelangt sowohl über einen WÜ (WÜ_{WRG}) einer WRG, wie auch über die Ein- und Ausgangsschleusen in den Trockner. Die Abluft gelangt ebenfalls über den WÜ der WRG und die Schleusen an die Umgebung.

Das Trocknungsgut mit dem anhaftenden Wasser aus der vorgeschalteten Reinigungsstrasse wird über ein Förderkettensystem durch den Trockner geführt. Es besteht somit ein Stahlmassenstrom der Förderkette und ein Stahl- und Haftwassermassenstrom des Trocknungsguts, die durch den Trockner geführt werden, wobei der Haftwassermassenstrom den Trockner als Wasserbeladung der Abluft verlässt.

Der beispielhaft zu integrierende Sorptionsprozess ist so aufgebaut, dass er den gegebenen Raumbedarf und die vorhandenen Energieströme berücksichtigt. Auf Grund der guten Kennwerte von Zeolith 13X in Bezug auf die Beladungskapazität und Adsorptionseenthalpie beim Sorptiv Wasserdampf, wird Zeolith 13X als Sorbens verwendet. In der Produktionshalle ist die Vorlauftemperatur des Heisswasserkreislaufes mit 80°C auf dem höchsten Temperaturniveau, so dass keine direkten Abwärmeströme anderer Prozesse für den Desorptionsprozess zur Verfügung stehen. Als konstruktive Umsetzung wurden drei Festbettreaktoren gewählt, die alternierend den Adsorptionsprozess, den Desorptionsprozess und eine Abkühlphase durchlaufen und einen weiteren Umluftstrom ergeben. Die Festbettreaktoren werden während des Adsorptionsprozesses und der Abkühlphase von dem Rücklauf des Heisswasserkreislaufes (60°C) durchströmt. Beim Adsorptionsprozess wird so das Bett konstant auf 65°C gekühlt, wodurch zum einen die Beladungskapazität erhöht und zum anderen der Trockner auf konstanten Temperaturniveaus beschickt wird, wodurch die Regelleistung des Trockners gering bleibt. Das Abführen der Wärme über den Rücklauf des Heisswasserkreislaufes ermöglicht, dass die Energie im System bleibt.

Trocknungsprozess

Der Trockner wird gemäss Auslegungsfall mit einer sehr trockenen Abluft ($Y_{\text{Abluft}} = 8 \text{ g}_w/\text{kg}_L$) betrieben, um die geforderte Trocknungsgeschwindigkeit bei einer Trocknungstemperatur von 55°C (relative Feuchte: 8%) zu erreichen. Der Trockner wird zur Zeit der Analyse nicht im Auslegungsfall betrieben, der Betriebspunkt liegt vorwiegen auf einem feuchteren und kühleren Niveau. Im Sommer 2015 sind die Stoffströme des Trockners in Bezug auf Volumen, Temperatur und Beladung für diese Studie erfasst worden, wobei die Volumenströme bei dem eingesetzten Messaufwand zum Teil geschätzt werden mussten. Die Messungen zeigten neben der Bestimmung des Betriebspunktes, dass die WRG eine Störung aufwies und kein Luftmassenstrom durch den WÜ geleitet wurde. Die Störung konnte nach den Messungen umgehend behoben werden. Der Betriebspunkt bei den Messungen im Sommer ergab sich wie folgt:

- Zuluft: Temperatur, Beladung, relative Feuchte = 32°C, 0.01 kg_w/kg_L, 34% (Hallenluft)
- Abluft: Temperatur, Beladung, relative Feuchte = 48.5°C, 0.012 kg_w/kg_L, 17%
- Volumenstrom: Zu-/Abluft..... ≈ 5100 m³/h (5400 kg/h)
- Volumenstrom: Rezirkulation..... ≈ 55'000 m³/h
- Haftwasserstrom ≈ 0.003 kg/s
- Heisswasserkreislauf: Massenstrom, ΔT..... = 1.53 kg/s, 6K

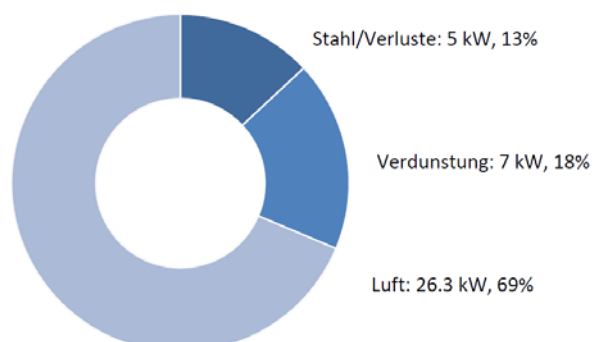


Abbildung 52: berechnete Aufteilung der zugeführten thermischen Leistung (38.3 kW) auf die Bereiche: Erwärmung Stahl und sonstige Verluste, Verdunstungsenthalpie (bei 48°C) und Erwärmung der Trocknerluft

Gemäss Abbildung 29 auf Seite 41 ist durch die geringe relative Feuchte der Abluft zu erwarten, dass der Trocknungswirkungsgrad gemäss Formel 4-7 gering sein wird. Entsprechend der berechneten Aufteilung der zugeführten thermischen Leistung von 38.3 kW auf einzelne Bereiche des Trocknungsprozesses in Abbildung 52, ergibt sich der Trocknerwirkungsgrad zu 18%. Neben dem Leistungsbedarf für die Erwärmung der Trocknungsluft wird eine Leistung von 5 kW für die Erwärmung der durchfahrenden Stahlteile (Trocknungsgut und Förderkette) aufgewendet. Der Leistungsbedarf für die Erwärmung der Stahlteile hat mit 71% der Verdunstungsenthalpie einen hohen Anteil am Energiebedarf. Im Allgemeinen sind die thermischen Verluste über die Trocknerhülle auf dem Temperaturniveau von 48.5°C von der Grössenordnung her nicht von Bedeutung. Durch die geringere Erwärmung der Stahlteile, führt das Absenken der Trocknertemperatur um 1 K jedoch zu einer Reduktion des Energiebedarfs von 0.8% (bei angenommenem gleichen Bedarf für die Verdunstung des Haftwassers und die Erwärmung der Luft).

Modellierung des Sorptionsprozesses

Die Energie für den Desorptionsprozess kann im vorliegenden Fall nicht aus Abwärme anderer Prozesse gewonnen werden. Der Aufbau eines Dampfnetzwerks zwischen dem Trockner und der Holzhackschnitzelfeuerung erscheint aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen nicht aussichtsreich und ist nicht überprüft worden. In der beispielhaften Integration eines Adsorptionsprozesses in den Trocknungsprozess ist daher Elektrizität als Energiequelle gewählt worden.

Gemäss der im technischen Aufbau beschriebenen Integration des Sorptionsprozesses wird in einem Simulationsmodell im Rechenprogramm MATLAB® der Prozess abgebildet.

Es werden folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

- Alle Komponenten arbeiten verlustfrei
- Die Energieströme an den Festbettreaktoren werden über ein Intervall gemittelt
- Hilfskomponenten werden nicht berücksichtigt
- Abwärme des Desorptionsprozesses wird über einen Kondensator bis zu einem Temperaturniveau von 63°C in den Rücklauf des Heisswasserkreislaufes eingespeist

Rahmendaten zum Modellprozess:

- Masse Zeolith pro Festbettreaktor 155 kg
- Zeolith-Art Zeolith 13X
- Intervallzeit pro Reaktor 180 bis 300 min
- Haftwassermassenstrom 3 g/s
- Adsorbierter Wassermassenstrom 2.5 bis 4.3 g/s
- Desorptionstemperatur 200°C
- Volumenstrom des Adsorptionsluftkreislaufes 1500 m³/h
- Volumenstrom des Desorptionsluftstromes 9 m³/h

Es werden folgende Szenarien betrachtet:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Messdaten vom Sommer 2015 | Abluftstrom: 5100 m ³ /h |
| 2. Modellprozess parallel geschaltet zum Betriebspunkt | Abluftstrom: 5100 m ³ /h |
| 3. Auslegungsfall | Abluftstrom: 7200 m ³ /h |
| 4. Modellprozess parallelgeschaltet zum Auslegungsfall | Abluftstrom: 7200 m ³ /h |
| 5. Modellprozess mit angepassten Luftbedarf | Abluftstrom: 2700 m ³ /h |

Die Zustände der Stoffströme sind der Abbildung 76 im Anhang (Seite 102) entnehmbar.

Ergebnisse

Die Auswertung der 3 Szenarien in Abbildung 53 bestätigt, dass die benötigte Leistung des Trockners durch einen Sorptionsprozess gesenkt wird. Beim Modellprozess „Sommer ohne WRG“ wird auf Grund der hohen Wasserbeladung der Abluft der mit 4.3 g/s grösste Wassermassenstrom der 3 Szenarien adsorbiert und führt zu einer erforderlichen elektrischen Leistung von 63 kW. Aus den fortgeführten Enthalpieströmen des Desorptionsprozesses kann eine thermische Leistung von 33 kW in den Heisswasserkreislauf zurückgeführt werden. Mit dieser iERG kann über den Modellprozess die

benötigte Leistung des Trocknungsprozesses um 8% gegenüber dem Szenario „Sommer 2015“ gesenkt werden.

Bei den Modellprozessen zur Basis „Auslegungsfall“ ist auffällig, dass die benötigte Leistung des Trockners ohne WRG 42% geringer ist, als mit WRG. Dieser Effekt begründet sich durch die geringeren Zu-/Abluftmassenströme beim Modellprozess ohne WRG. Auf Grund des integrierten Sorptionsprozesses ist die Beladung der Umgebung höher als im Trockner. Der Luftmassenstrom der über die WRG verläuft, wird beim Prozess ohne WRG nicht ersetzt, so dass dem Prozess insgesamt weniger Wasser zugeführt wird und die Beladung der Zu-/Abluft ebenfalls reduziert wird (-11%), siehe auch Abbildung 76 (Seite 102). Die Reduzierung der Beladung von 11% führt zu einer leichten Abnahme des adsorbierten Wassermassenstroms, wodurch der elektrische Leistungsbedarf ebenfalls gemindert wird. Die wesentliche Leistungsreduktion erfolgt durch das Ausbleiben der Erwärmung der Luft, die durch den Trockner geführt wird und den Trocknungsprozess, durch die höhere Wasserbeladung, negativ beeinflusst.

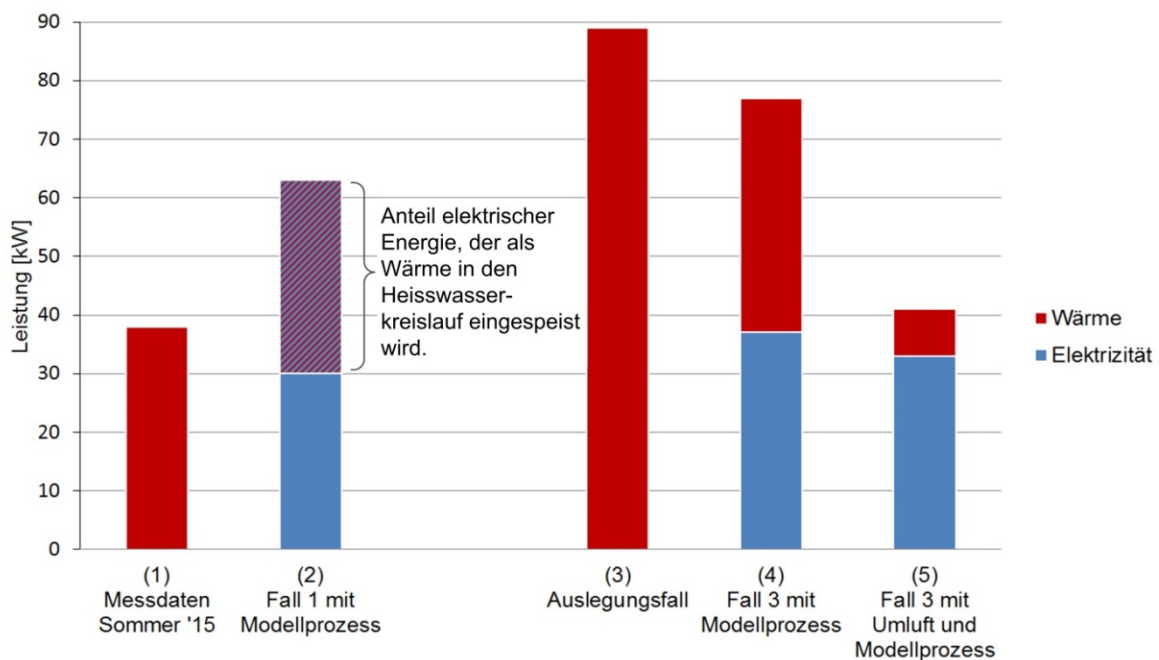


Abbildung 53: Ergebnisse der Simulation des Leistungsbedarfes, aufgeteilt in Leistung aus Wärme und Elektrizität
Schraffierte Fläche beim Modellprozess ohne WRG entspricht thermischer Leistung, die in den Heisswasserkreislauf eingespeist wird (aber elektrisch gewandelt wurde).

Für die Bestimmung der auf ein Jahr bezogenen energetischen Kennwerte der Trocknungsprozesse werden 2200 Betriebsstunden pro Jahr angenommen. Die aus den benötigten Leistungen der modellierten Szenarien resultierenden energetischen Kennwerte sind in Abbildung 54 angegeben. Den Umrechnungen liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- Endenergie [MJ/a]:
Kumulierter Energiebedarf über 2200 h
- Primärenergiebedarf [PJ/a]:

Feuerungswirkungsgrad der Holz-Hackschnitzelfeuerung	90	%
Primärenergiebedarf der elektrischen Energie [66]	8	MJ _{Prim} /kWh _{el}
- CO_{2,Äquivalent}-Emissionen [t/a in Abbildung 54 um Faktor 100 skaliert]:

Wärme aus Holz-Hackschnitzelfeuerung [72]	24	g _{CO2} /kWh _{th}
Elektrizität aus Schweizer Strommix [66]	90	g _{CO2} /kWh _{el}
- Betriebskosten [CHF/a in Abbildung 54 um Faktor 100⁻¹ skaliert]:

Thermische und elektrische Energie [73]:	0.15	CHF/kWh
--	------	---------

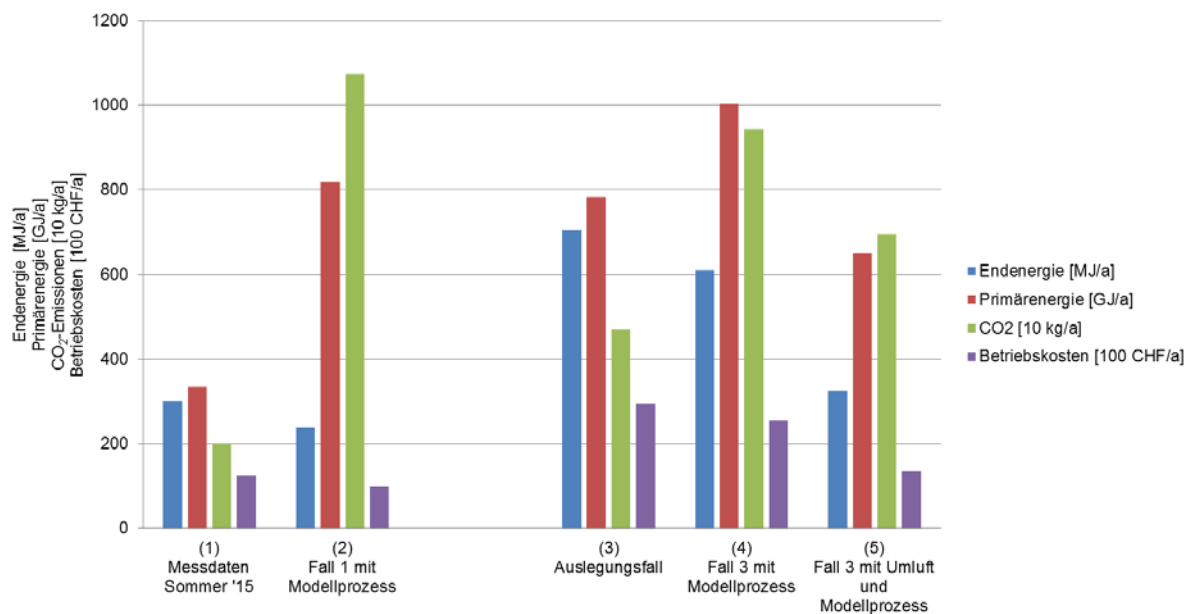


Abbildung 54: Ergebnisse der Simulation zu den energetischen Kennwerten Endenergie, Primärenergie und CO₂-Äquivalente-Emissionen sowie zu den Betriebskosten

Den energetischen Kennwerten kann entnommen werden, dass der Endenergiebedarf durch die Integration eines Sorptionsprozesses reduziert werden kann, vergleiche den Endenergiebedarf von Fall 2 mit Fall 1 und den der Fälle 4 und 5 mit Fall 3 in Abbildung 54. In den Fällen mit einem Sorptionsprozess wird die Energie elektrisch bereitgestellt, so dass durch den Wirkungsgrad von 45% bei der Stromerzeugung der Primärenergiebedarf der Fälle 2 und 4 über dem Referenzprozess liegt. Bei dem auf den minimalen Luftmassendurchsatz reduzierten Szenario (Fall 5) wird der Endenergiebedarf, durch einen für den Sorptionsprozess optimierten minimalen Luftmassendurchsatz, ausreichend weit gesenkt, dass eine Minderung des Primärenergiebedarfs um 17% erreicht wird. Die CO_{2,Äquivalent}-Emissionen sind bei jedem integrierten Modellprozess höher als beim zugehörigen Referenzfall. Dies ist durch den niedrigen Emissionswert der im Werk betriebenen Holzhackschnitzelheizung begründet. Wäre im Werk ein Gasbrenner (250 g_{CO2}/kWh_{th}) für die Heisswassererzeugung im Einsatz, wären die Emissionen des Referenzfalls in etwa um den Faktor 10 grösser. Bei allen betrachteten Fällen wäre somit eine deutliche Reduktion der CO_{2,Äquivalent}-Emissionen erreicht.

Die Betriebskosten sind pro Energieeinheit ermittelt und verhalten sich entsprechend proportional zum Endenergiebedarf. Für die ungünstige Integration des Modellprozesses im Fall 2, ergibt sich eine Kostenreduktion von 1'320 CHF/a. Im Fall 2, beträgt die Kostenreduktion 15'840 CHF/a. Eine Kostenreduktion von 15'850 CHF/a lässt die Wirtschaftlichkeit eines zu integrierenden Sorptionsprozesses innerhalb einer angemessenen Amortisationszeit (< 10 a) für ein standardisiertes Produkt erwarten.

Fazit

Die quantifizierten Werte unterliegen mehreren Annahmen, so dass entsprechend deutliche Abweichungen möglich sind. Für präzisere Aussagen muss ermittelt werden, inwieweit die technische Umgebung dem Trocknungsprozess angepasst werden kann und welche energetischen Effekte sich über die klimatischen Bedingungen eines Jahres ergeben.

Ribback weist auf, dass der Druckverlust über einen Festbettadsorber zu einem nicht vernachlässigbaren Anstieg der Verdichterleistung führt [74]. Dies erfordert bei einer detaillierten Betrachtung die Überprüfung des Reaktorkonzepts. Durch einen Wanderbettreaktor lässt sich beispielsweise der Druckverlust über die Schüttung deutlich verringern und liesse eventuell eine Integration in den bestehenden Luftmassenstrom der Rezirkulation zu, so dass keine zusätzlichen Installationen notwendig wären. Die, wie im Kapitel 4.4 gezeigt, überschüssige Adsorptionseenthalpie kann zu Erwärmung der Stahlbauteile im Prozess behalten werden. Bei einem Wanderbettreaktor befindet sich bei idealer Betriebsführung nur das aktive Zeolith (Das Zeolith innerhalb der MTZ) im Reaktor. Somit ist eine deutlich kleinere Zeolithschüttung notwendig, wodurch die Druckverluste

gemindert werden. Zusätzlich könnte durch den Bau eines zweiten Wanderbettreaktors an einem Abwärmestrom auf entsprechendem Temperaturniveau (z. B. bei der Holz-Hackschnitzelfeuerung oder der 2 km entfernten Biogasverbrennungsanlage der Abwasser Reinigungsanlage Aarburg), der elektrische Antrieb des Desorptionsprozesses durch regenerative thermische Energie ersetzt werden. Wanderbettreaktoren für die simultane Nutzung der Sorptionskategorien Stofftrennung und Wärmetransformation befinden sich derzeit im Entwicklungsstadium [37].

Zusammenfassung

Das Praxisbeispiel gibt erste Richtwerte zum energetischen und ökonomischen Potenzial eines Sorptionsprozesses in einem konvektiven Haftwassertrockner bei einem Temperaturniveau um 50°C.

Folgende Ergebnisse und weiterführende Massnahmen wurden formuliert:

- Hohes theoretisches Potenzial
- Analyse deckte Störung auf, die in einer Wartung behoben wurde
- Wirtschaftliches Potenzial ist vorhanden
- Einschränkung des energetischen Potenzials durch:
 - o bestehendes regeneratives Heizsystem
 - o keine nutzbare Abwärme vorhanden
 - o elektrische Desorption
 - o Druckverluste durch Festbettreaktor
- Weiterführende Massnahmen
 - o Bestimmung des energetischen Potenzials zu konventionellem Heizsystem
 - o Betrachtung eines Wanderbettreaktors statt eines Festbettreaktors
 - o Zeolith als Wärmetransportmedium
 - o Anpassen der technischen Umgebung an die neuen Trocknungsbedingungen
 - Zu-/Abluftmassenstrom des Trockner gegen Null führen
 - Sorptionsprozess in bestehende Rezirkulation integrieren
 - Überschüssige Wärme des Adsorptionsprozesses zur Erwärmung des Stahlmassenstroms verwenden (kein Bypass oder Kühlung des Adsorptionsbettes notwendig)

7.2. Kontakt- und Prallstrahltrocknung

Technischer Aufbau

Es wird eine Papiertrocknungsstrasse in der Schweiz betrachtet, deren Anlagenstruktur im Anhang in Abbildung 77 (Seite 103) gezeigt ist. Die Papiertrocknung erfolgt nach der Siebpresspartie in der Trocknungsstrasse, die aus der Yankeehaube und der Trockenhaube besteht, von einem Wasseranteil von 50% auf 5%, siehe Abbildung 55.

Der Heissdampf für die Trockenzylinder wird in einem Dampfkessel in ca. 200 m Entfernung über einen Erdgasbrenner erzeugt. Die Zuluft für die jeweiligen Partien der Yankeehaube wird unmittelbar an der Haube über Erdgasbrenner direkt erhitzt. Die Wärmebereitstellung für die Trockenhaube erfolgt über den Kondensatrücklauf der Trockenzylinder.

Trocknungsprozess

Die Papierbahn gelangt als erstes in die Nasspartie der Yankeehaube. Die Yankeehaube besteht aus einem ca. 3 m Durchmesser fassenden Stahlzylinder, der von innen über Heissdampf auf eine Oberflächentemperatur von 130°C beheizt wird. Über Düsen in der Haube wird auf die am Zylinder anliegende Papierbahn 300°C warme Luft geleitet. Zwischen den einzelnen Düsen befinden sich Absaugeinrichtungen, über welche die feuchte Luft wieder abgeführt wird. In dem Trockenteil (zweite Hälfte der Yankeehaube) findet derselbe Prozess statt.

Von der Yankeehaube aus gelangt die Papierbahn in die Trockenhaube. In der Trockenhaube wird das Papier mäanderförmig über 28 von innen mit Heissdampf beheizte Stahlzylinder geführt. Die Dampfversorgung der Zylinder fasst diese in 3 Gruppen zusammen. Über den jeweiligen Dampfdruck

einer Gruppe, kann die Oberflächentemperatur der Zylinder eingestellt werden. Die einzelnen Zylinder einer Gruppe können zusätzlich hydraulisch von der Dampfversorgung getrennt werden, so dass diese kalt bleiben. Auf welchem Temperaturniveau welche Zylindergruppe betrieben wird, ist von der zu trocknenden Papiersorte abhängig. Aus der Kelleretage strömt 60°C warme Luft auf, welche die Feuchtigkeit aufnimmt und über die Haube abgesaugt wird.

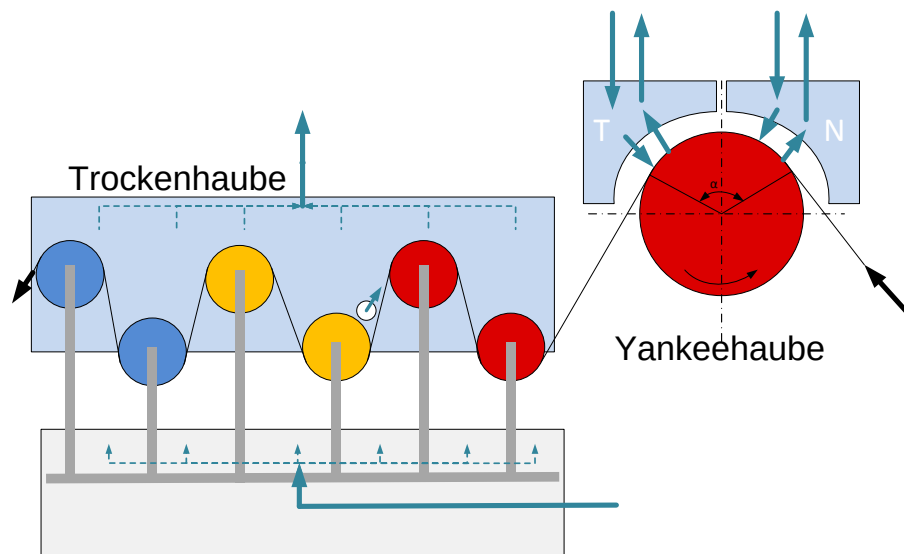


Abbildung 55: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Papiertrocknungsprozesses
Die Papierbahn wird von rechts nach links durch die Anlage geführt
In der Yankee-Haube liegt das höchste Temperaturniveau vor und wird in der Trockenhaube in drei Schritten reduziert (rot = heiss, orange = warm, blau = kalt)

Es liegen keine eindeutigen Daten zu den Stoffströmen der Anlage vor und die vorhandenen Daten beziehen sich zum Teil auf verschiedene Papiersorten. Ausgehend von den Daten von Schwiager [75] wurde über die Wassermassenbilanz zum einen der Trockenanteil vor der Yankeehaube bei den gegebenen Luftmassenströmen und zum anderen der Luftmassenstrom durch die Trockenhaube über die gegebene Wasserbeladungsdifferenz der Zu- und Abluft berechnet. Somit ergeben sich die entsprechenden Bereiche folgende Zustände:

- Umgebung
 - o Temperatur, Beladung 20°C, 12 g_w/kg_L
- Trockenhaube
 - o Zuluft: Temperatur, Beladung 60°C, 12 g_w/kg_L
 - o Abluft: Temperatur, Beladung 65°C, 165 g_w/kg_L
 - o Luftmassenstrom: 7 kg/s
- Yankeehaube
 - o Zuluft: Temperatur, Beladung 300°C, $Y_{\text{Umgebung}} + Y_{\text{Abgas}} = 51$ g_w/kg_L
 - o Abluft: Temperatur, Beladung 160°C, 200 g_w/kg_L
 - o Luftmassenstrom 3 kg/s
- Papierstrom (Eintritt Yankeehaube berechnet [75])
 - o Trockenmassenstrom 1.2 kg/s
 - o Trockenanteil – Eintritt Yankeehaube ... 44%
 - o Trockenanteil – Austritt Yankeehaube .. 53%
 - o Trockenanteil – Austritt Gruppe 1 65%
 - o Trockenanteil – Austritt Gruppe 2 92%
 - o Trockenanteil – Austritt Gruppe 3 94%

Es lässt sich ein spezifischer gesamt Energiebedarf von 4501 kJ/kg_{Papier} bestimmen, der für den aktuellen Trocknungsprozess benötigt wird und sich gemäss Abbildung 56 (links) auf die einzelnen Elementen in den Hauben aufteilt, wobei der Dampfverbrauch für die Zylinder der Trockenhaube von werksinternen Angaben übernommen wurde.

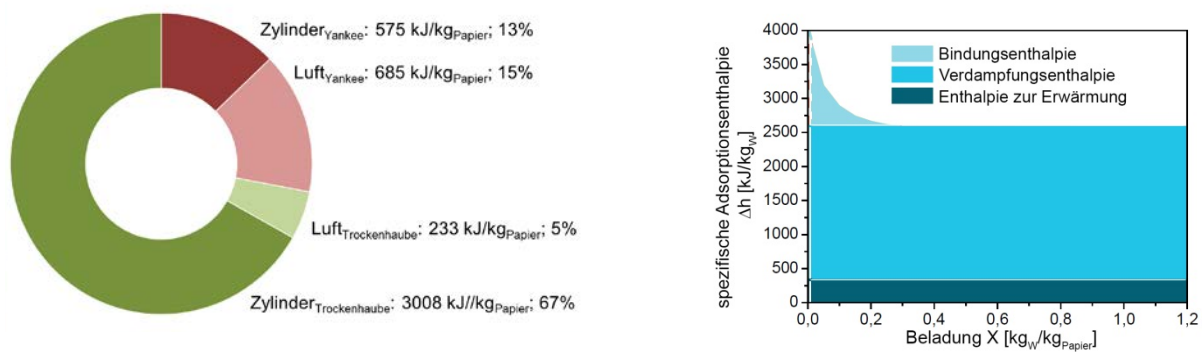


Abbildung 56: links: Aufteilung des benötigten Energiebedarfs von 4501 kJ, um ein kg Papier vom Trockenanteil 0.43 auf 0.94 zu trocknen auf den Energiebedarf der dampfbeheizten Zylinder und Luftströme der Yankee- und Trockenhaube für einen berechneten Referenzfall aus den erhaltenen Daten
rechts: Aufteilung der spezifischen Verdampfungsenthalpie von Wasser aus Papier [76]

Für die Berechnung des Wirkungsgrads des Trockners nach Formel 4-7 muss bei der Bestimmung des minimalen spezifischen Energiebedarfs zum Trocknen von einem Kilogramm Papier (e_{min}) berücksichtigt werden, dass ab einem Feuchtegehalt von 0.3 kg_w/kg_{Papier} die Bindungsenthalpie des Arbeitspaares Wasserdampf-Papier mit aufgebracht werden muss, siehe Abbildung 56 (rechts). Die spezifische Adsorptionenthalpie lässt sich aus Abbildung 56 (rechts) in Abhängigkeit der Wasserbeladung des Papiers ablesen. Über eine Mittelwertwertbildung lässt sich gemäss Formel 7-1 der minimale spezifische Energiebedarf auf $e_{min} = 2588 \text{ kJ/kg}_{\text{Papier}}$ bestimmen. Der Wirkungsgrad der Trocknungsstrasse beträgt unter Vernachlässigung der elektrischen Antriebsenergien somit 69%.

$$e_{min} = \frac{V_{m_{w,X>0.3}}}{m_{\text{Papier}}} \cdot \bar{v}_{h_{v,X>0.3}} + \frac{V_{m_{w,0.06<X<0.3}}}{m_{\text{Papier}}} \cdot \bar{v}_{h_{v,0.06<X<0.3}} \quad 7-1$$

Trocknungsmechanismen

An den Zylindern findet eine Kontakttrocknung statt. Bei der Kontakttrocknung verdampft in Abhängigkeit des Anpressdrucks an der warmen Zylinderoberfläche das Wasser an der Kontaktfläche und diffundiert anschliessend als Dampf durch die Papierbahn zu Aussenseite. Über den Diffusionsweg hinweg kondensiert der Dampf an der kühleren Papierbahn aus und wird zu einem späteren Zeitpunkt erneut verdampft. Somit findet ein Stoff- und Wärmetransport durch die Papierbahn statt. An der Aussenseite der Papierbahn verdunstet das Wasser in Abhängigkeit des Stoffübergangskoeffizienten zur Haubenatmosphäre und kühlt die Papierbahn durch das Abführen der Verdampfungsenthalpie, siehe Abbildung 57.

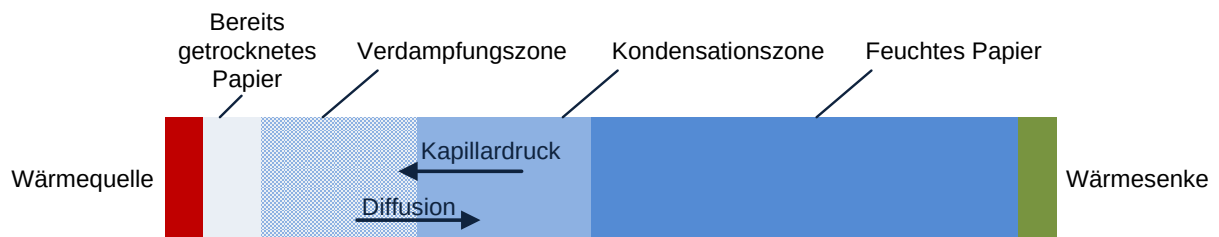


Abbildung 57: Querschnitt durch ein einseitig beheiztes Papier mit den Transportvorgängen durch Verdampfung und Kondensation (Mikro-Soxhlet-Prozess)

In der Yankeehaube wird durch die 300°C warme Prallströmung zum einen die Papierbahn mit aufgeheizt, zum anderen führen die hohe Strömungsgeschwindigkeit und die niedrige Wasserbeladung der Zuluft zur Papieroberfläche zu einem hohen Stoffübergangskoeffizienten vom Wasser aus Papier in Luft.

In der Trockenhaube liegen mit 0.1 bis 0.5 kg_w/kg_L Wasserbeladungen über der Papierbahn in der Luft vor, welche das bis zu 42-fache der Wasserbeladung der Zuluft betragen. Durch die geringe

Luftbewegung in den sogenannten Taschen (Volumen zwischen den Zylindern) wird das verdunstete/verdampfte Wasser nicht schnell genug abtransportiert, wodurch sich insbesondere in der Mitte der Papierbahn nicht gewünschte Beladungsmaxima befinden. Es wird an zwei Stellen der Anlage Luft über Düsenrohre direkt in die Taschen geblasen (siehe weisser Querschnitt in Abbildung 55), wodurch bereits eine verbesserte Homogenisierung des Beladungsprofils des Papiers erreicht wird.

Optionen zur Integration eines Adsorptionsprozesses

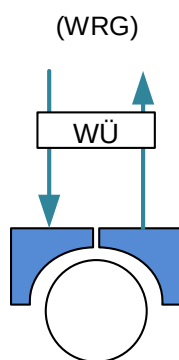
Die Abluft der Hauben ist mit Zellulosefasern beladen. Es sind keine Untersuchungen zum Verhalten von Sorbentien in mit Feststoffpartikeln beladenen Gasströmen bekannt. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Zellulosefasern sowohl die Sorbensoberfläche, als auch die Zwischenräume einer Schüttung über die Zeit zusetzen. Das würde zu einer Minderung des Stoffaustausches zwischen Sorbens und Gasstrom und zu einer Zunahme des Druckverlustes bei der Sorbensschüttung führen. Eine Integration des Sorptionsprozesses direkt in die Abluft der Hauben wird daher nicht berücksichtigt, auch wenn dies ein hohes energetisches Potenzial verspricht.

Die Integrationspunkte des Adsorptionsprozesses reduzieren sich somit auf die beiden Zuluftströme der Trockenhaube, bei denen eine Entfeuchtung zur Reduktion des jeweils benötigten Luftmassenstroms führt.

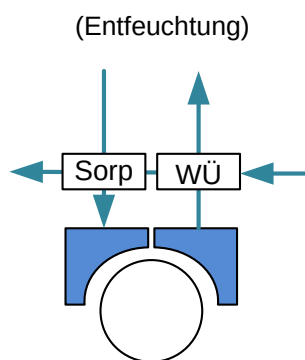
Die Integrationspunkte für den Desorptionsprozess sind entweder der Dampfkreislauf auf einem Temperaturniveau von 190°C oder über einen WÜ der Abluftstrom der Yankeehaube auf einem maximalen Temperaturniveau von 160°C. Um eine Kondensation im Wärmeübertrager zu vermeiden, die zusammen mit den Zellulosefasern zu einer starken Verunreinigung im WÜ führt, soll im Folgenden eine maximale Abkühlung der Abluft der Yankeehaube auf 10 K über deren Taupunkt von etwa 65°C berücksichtigt werden (75°C).

Ist der Wärmestrom über einen WÜ ausgekoppelt, kann dieser auch zur direkten WRG eingesetzt werden. Daher wird zur Beurteilung des energetischen Potenzials eines integrierten Sorptionsprozesses eine direkte WRG-Massnahme mit berücksichtigt. Bei der Trockenhaube wird auf Grund der hohen Wasserbeladung über der Papieroberfläche und einem hohen Anteil an Fehlluft (Luft, die über die Kelleretage in die Trockenhaube gelangt) eine Entfeuchtung der Zuluft der Trockenhaube als nicht förderlich angesehen und nicht betrachtet. Somit wird nur die Yankeehaube betrachtet und die zu untersuchenden Szenarien ergeben sich zu:

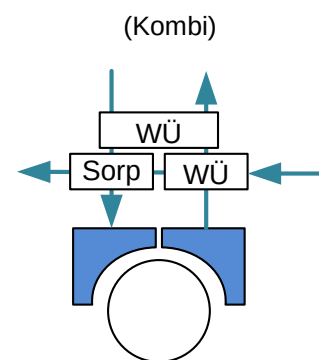
WRG zwischen der Ab- und Zuluft der Yankeehaube



Entfeuchtung der Zuluft der Yankeehaube



Kombination von Entfeuchtung und WRG



WRG

Wird der oben genannte WÜ als Luft-Luft-WÜ integriert, berechnen sich die charakteristischen Größen zu:

- Zuluft: *Temperatur, Beladung* 87.5°C, 12 g_w/kg_L
- Abluft: *Temperatur, Beladung* 105°C, 200 g_w/kg_L
- Luftmassenstrom 3 kg/s
- **Spezifischer Energiebedarf (3 kg/s 87.5 → 300°C): 543 kJ/kg_{Papier}**

Entfeuchtung

Die Zuluft der Yankeehaube wird entfeuchtet, so dass bei gleichbleibender Kapazität der Wasseraufnahme, der Luftmassenstrom reduziert werden kann. Durch die frei werdende Adsorptionsenthalpie erwärmt sich die Zuluft um 40 K und der Temperaturhub durch den Gasbrenner fällt geringer aus. Zur Desorption wird ungefähr 1/3 des Luftmassenstroms der Abluft über den oben definierten WÜ auf 140°C erwärmt und nach der Wasseraufnahme ebenfalls als Abluft an die Umgebung abgegeben. Charakteristische Grössen des Prozesses ergeben sich zu:

- Zuluft: *Temperatur, Beladung* 60°C, 0 g_w/kg_L
- Abluft: *Temperatur, Beladung* 140°C, 200 g_w/kg_L
- Luftmassenstrom 2.8 kg/s
- Luftmassenstrom Desorption 1 kg/s
- Spezifische desorbierte Wassermasse 38 g_w/kg_{Papier}
- Spezifische Entfeuchtungsleistung 34 g_w/kg_{Papier}
- Spezifischer Bedarf Zeolith 227 g_{Zeo}/kg_{Papier}
- **Spezifischer Energiebedarf (2.8 kg/s 60 → 300°C). 560 kJ/kg_{Papier}**

Kombi

Bei der Kombination der beiden Massnahmen wird die Wärme der Abluft erst dem Luftmassenstrom zur Desorption und anschliessend zur zusätzlichen Vorwärmung der Zuluft übertragen. Die entsprechenden charakteristischen Grössen ergeben sich zu:

- Zuluft: *Temperatur, Beladung* 115°C, 0 g_w/kg_L
- Abluft: *Temperatur, Beladung* 95°C, 200 g_w/kg_L
- Luftmassenstrom 2.8 kg/s
- Luftmassenstrom Desorption 1 kg/s
- Spezifische desorbierte Wassermasse 38 g_w/kg_{Papier}
- Spezifische Entfeuchtungsleistung 34 g_w/kg_{Papier}
- Spezifischer Bedarf Zeolith 227 g_{Zeo}/kg_{Papier}
- **Spezifischer Energiebedarf (2.8 kg/s 115 → 300°C) 432 kJ/kg_{Papier}**

Ergebnisse

Der spezifische Energiebedarf der Lufterwärmung der Yankeehaube nimmt in den dargestellten Szenarien um 18 bis 37% ab. Der Anteil der Lufterwärmung der Yankeehaube an dem spezifischen Energiebedarf der Trocknungsstrasse beträgt 15%, so dass der gesamte spezifische Energiebedarf der Trocknungsstrasse zwischen 3 bis 6% gesenkt wird. Der Trocknungswirkungsgrad kann somit von 57 auf bis zu 61% verbessert werden, siehe Abbildung 58 (links).

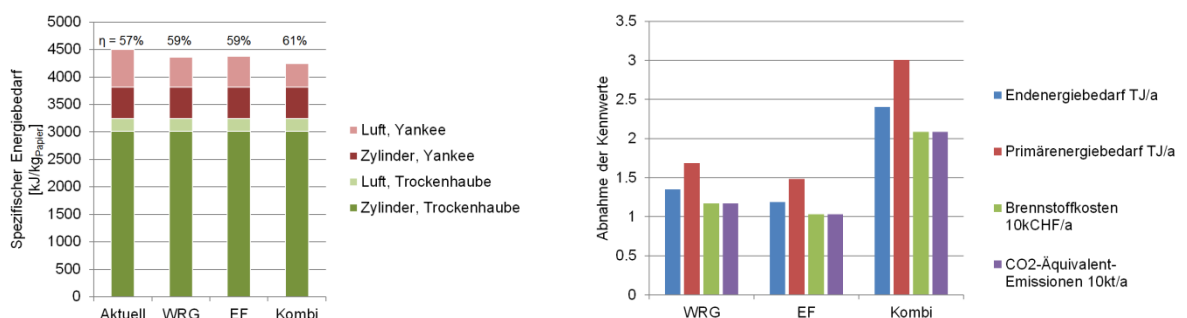


Abbildung 58: links: Aufteilung des spezifischen Energiebedarfs auf die Gruppen in den einzelnen Szenarien und Wirkungsgrad der Trocknungsstrasse
rechts: Abnahme der energetischen Kennwerte in Bezug zum aktuellen Stand

Für eine jährliche Produktion von 9'500 t Papier sind in Abbildung 58 die auf ein Jahr bezogenen energetischen Kennwerten im Balkendiagramm dargestellt. Für die Ermittlung des Primärenergiebedarfs wird ein Wirkungsgrad des erdgasbefeuerten Dampferzeugers bis zur Zapfstelle der Zylinder von 0.8 angenommen. Die Brennstoffkosten werden mit 0.025 CHF/kWh angenommen und die CO₂-Äquivalent-Emissionen mit 250 g_{CO₂}/kWh berücksichtigt [72].

Gegenüber dem Szenario WRG weist die Entfeuchtung der Zuluft der Yankeehaube keine Vorteile

auf, ist jedoch technisch komplexer. Für beide Massnahmen ergibt sich ein jährlicher Betriebskostenvorteil von gut 10'000 CHF, ohne die Berücksichtigung von Personalkosten für Wartung und Reinigung der Komponenten. Beide Massnahmen benötigen daher lange Amortisationszeiten, die vermutlich auch über die 8 a von Infrastrukturmassnahmen hinausgehen [61].

Werden beide Massnahmen kombiniert, addiert sich nahezu deren energetisches Potenzial. Es wird angenommen, dass die Investitionskosten im selben Mass steigen, da nur geringe Synergien der technischen Komponenten erwartet werden. Somit können den Berechnungen nach der Primärenergiebedarf um 3 TJ/a und die CO₂Äquivalent-Emissionen um über 20'000 t_{CO2}/a gesenkt werden, aber der jährlicher Betriebskostenvorteil von 20'000 CHF erscheint als zu gering, als dass ein System zu den aktuellen Marktkonditionen integriert werden kann.

Fazit

In dem analysierten Papiertrocknungsprozess beträgt der Anteil des Energiebedarfs der Lufterwärmung der Zuluft zu den Trockenhauben nur 20% der vom Prozess benötigten Endenergie. Die energetisch effizienteste Integrationsmethode, die Rezirkulation von Abluft, ist auf Grund der hohen Beladung der Abluft mit Zellulosefasern vermutlich nicht möglich. Somit sind kostenintensive WÜs notwendig, die zum einen die energetische Effizienz und zum anderen das wirtschaftliche Potenzial mindern. Dies führt dazu, dass auch bei einer Minderung des Endenergiebedarfs der Zulufterwärmung der Yankeehaube von bis zu 37%, eine Wirtschaftlichkeit des Systems fraglich bleibt. Um ein höheres Potenzial mit geringerem technischem Aufwand zu erreichen, erscheint es ratsam, den Einfluss von Zellulosefasern am Zeolith zu analysieren. Wenn über einfache Filtermechanismen die Feststoffpartikel auf ein verträgliches Mass reduziert werden können, ist eine wirtschaftlichere und effizientere Integration von Sorptionsprozessen möglich.

Auf Grund des aktuellen hohen Anteils an Fehlluft in der Trockenhaube, ist eine Entfeuchtung des Zuluftstroms der Trockenhaube, der im weiteren Verlauf wieder vermischt wird und dessen Erwärmung nur 5% des Endenergiebedarfes ausmacht, nicht untersucht wurden. Innerhalb der Trockenhaube scheint insbesondere die Belüftung der Taschen ein hohes Potenzial zu bieten. Inwieweit sich ein vereinfachtes Prallstromverfahren integrieren lässt und wie es den Trocknungsprozess in Abhängigkeit der Wasserbeladung der Trockner-Atmosphäre beeinflusst, muss Gegenstand weiterer Arbeiten sein. Dies kann zum einen die Zylinderleistung in der Trockenhaube verringern, die mit 67% Anteil am Endenergiebedarf der Trockenhaube einen grossen wirtschaftlichen und energetischen Hebel bietet, zum anderen ist eine Verbesserung der Trockenqualität erreichbar, wie zum Beispiel ein homogenes Feuchteprofil über die Papierbahnbreite, welches positive Effekte auf die Wirtschaftlichkeit der Produktion hat.

Zusammenfassung

Das Praxisbeispiel hebt die Abhängigkeit von Sorptionsprozessen von der Qualität der Abwärme und vom Trocknungsverfahren hervor. Auf Grund der hohen Beladung der Abluft mit Zellulosefasern ist eine direkte Integration des Sorptionsprozesses nicht möglich. Das energetische Potenzial des Sorptionsprozesses ist auf dem Niveau einer direkten WRG-Massnahme. Bei der Kombination beider Massnahmen, werden die energetischen Potenziale beider Massnahmen voll genutzt. Dennoch erscheint das wirtschaftliche Potenzial nicht hinreichend und eine Wirtschaftlichkeit beider Systeme ist fraglich.

7.3. Sprühtrockner

Es wird ein in der Schweiz stehender Sprühtrockner für das Erzeugen von Magermilchpulver betrachtet. Neben dem Magermilchpulver werden über das Jahr auch andere Milchprodukte in dem Sprühtrockner produziert, die teilweise nur im Winter produziert werden können, da im Sommer die Beladung der Umgebungsluft zu hoch ist. Eine weitere Herausforderung des Prozesses ist die Regelung, die in Bereichen auf die Erfahrung des Anlagenführers angewiesen ist, um zum Beispiel bei Wetterumschwüngen die Trocknungsqualität zu halten. Bei der Betrachtung liegt der Fokus auf den Trocknungsprozess des Milchpulvers.

Trocknungsprozess

Der Trocknungsprozess findet in zwei Teilschritten statt. Im ersten Teilschritt, der Haupttrocknung im Sprühturm, wird ein auf 50% Trockenanteil aufkonzentrierter Milchfeed mit einem Massenstrom von 0.646 kg/s bei einem Druck von 190 bar zusammen mit einem 200°C warmen Luftstrom (5.8 kg/s) im Sprühtrockner vernebelt, siehe Abbildung 59.

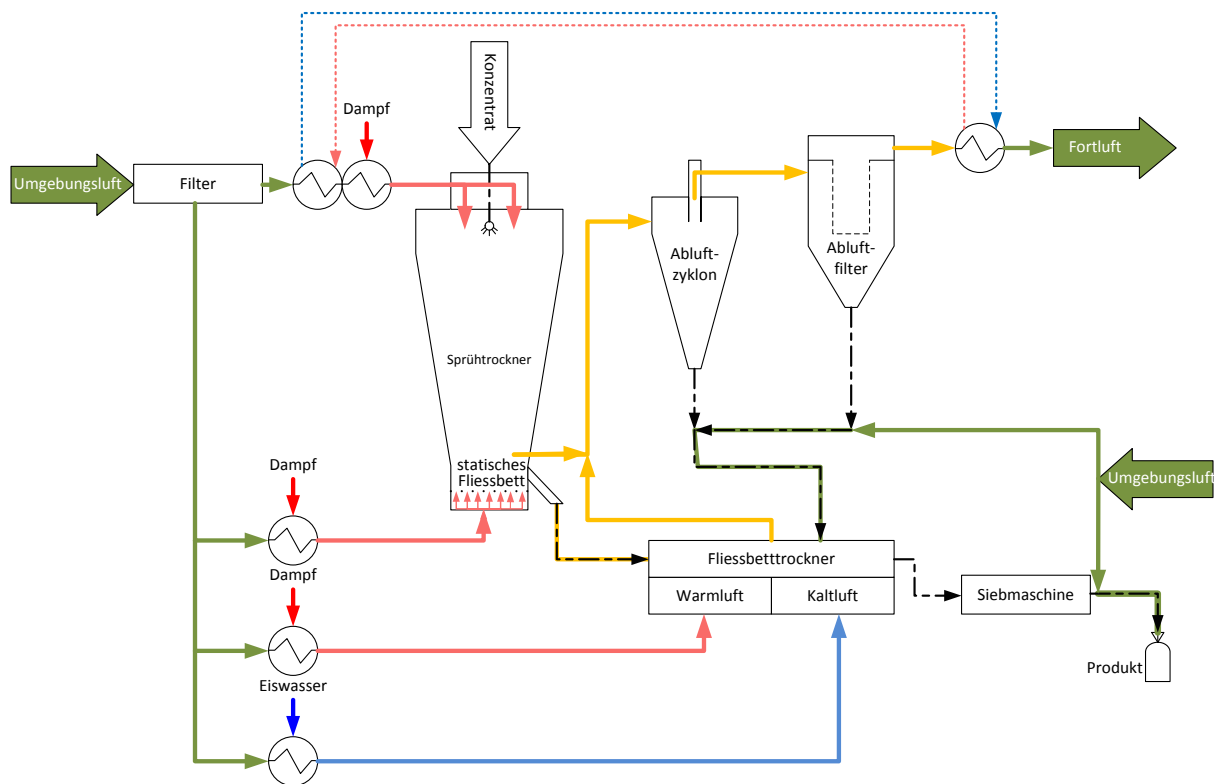


Abbildung 59: Vereinfachtes Fließbild des Trocknungsprozesses von Milchpulver im Sprühturm

Durch die grosse Oberfläche des Milchnebels und die warme und trockene Umgebung findet eine schnelle Trocknung statt und aus den Milchnebeltropfen wird das Milchpulver. Damit das noch feuchte Pulver nicht am Boden des Sprühturms agglomeriert, wird von unten warme und trockene Luft eingeblasen, so dass ein statisches Fließbett entsteht, welches über eine Rohrleitung mit einem Trockenanteil von 96% zu einem Nachrockner gefördert wird. Dieser Trockner ist als Fließbettrockner ausgeführt und arbeitet auf zwei Temperaturniveaus, im vorderen Warmluft-Bereich wird das Pulver bei 35°C auf einen Trockenanteil von 96.5% getrocknet und im folgenden Kaltluft-Bereich bei 6°C auf 26°C gekühlt. Im Anschluss folgen eine Siebung und die Abfüllung des Produktes in entsprechende Lagerbehältnisse.

Die Abluft der beiden Trockner wird mit 84°C in einen Zyklon, zur Trennung von mitgefördertem Milchpulver aus dem Luftstrom, geleitet. Nach einer weiteren Milchpulver-Rückgewinnung wird die Wärme der Abluft über eine WRG dem Zuluftstrom des Sprühtrockners übertragen.

Die Luftherhitzung der gefilterten Zuluftströme erfolgt über ein mit Erdgas befeuertes Dampfsystem, welches auch die Wärme für weitere Prozesse am Werk bereitstellt. Die Kälte wird über den Eiswasserkreislauf des Werkes bereitgestellt, der über eine erdgasbefeuerte Sorptionskälteanlage gekühlt wird.

Für das Bereitstellen der in Tabelle 16 genannten Stoffströme wird eine Gesamtleistung von 1037 kW zusätzlich zu der WRG von 79 kW an den entsprechenden WÜ gemäss der Abbildung 60 übertragen. Der grösste Energiebedarf liegt mit 97% bei der Zuluft des Sprühtrockners vor, wohingegen die Wärmeleistungen für das Fließbett und den Warmluft-Bereich mit zusammen 2% nur eine geringe Bedeutung haben. Die Kälteleistung teilt sich bei der Umgebungsbedingung auf je 4 kW auf die Abkühlung der feuchten Luft und die Kondensation der Beladung auf. Die Kälte wird über eine Absorptionskältemaschine mit einem angenommenen Wärmeverhältnis von 0.75 erzeugt, so dass für die insgesamt 8 kW Kälteleistung 11 kW thermische Leistung bereitgestellt werden müssen.

Strom	Temperatur [°C]	Beladung [g_w/kg_L]	Massenfluss [kg_L/s]
Umgebung	20	12	-
Zuluft-Sprühtrockner	200	12	5.8
Zuluft-Fliessbett	85	12	0.2
Abluft-Sprühtrockner/Fliessbett	84	64	6
Zuluft-Warmluft-Bereich	35	12	0.8
Zuluft-Kaltluftbereich	6	5	0.3
Abluft-Nachtrockner	-	12	1.1
Fortluft	60	56	7.1

Tabelle 16: Stoffströme und deren Zustände bei der Milchpulvertrocknung beim Referenzfall

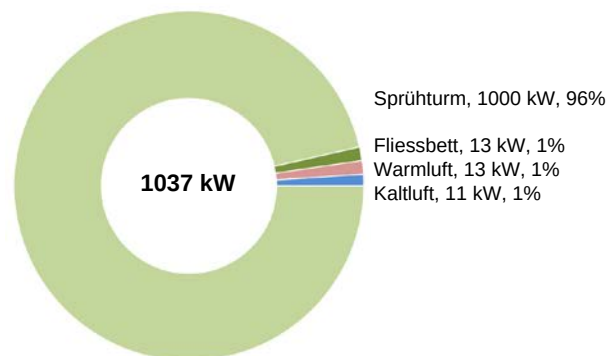


Abbildung 60: Aufteilung der Gesamtleistung von 1037 kW auf die einzelnen WÜ der Stoffströme beim Referenzfall

Optionen zur Integration eines Sorptionsprozesses

Auf Grund des bedeutenden Anteils von 97% der Zuluft des Sprühtrockners, muss sich ein möglicher Integrationspunkt auf diesen Stoffstrom beziehen. Die Abluft böte sich für eine Umluft-Lösung an und könnte theoretisch über die freiwerdende Adsorptionseenthalpie den gesamten Trocknungsprozess antreiben, wobei allerdings bei einem Temperaturniveau von 200°C die Kapazität von Zeolith sehr gering wäre (angenommene Desorptionstemperatur 250°C). Der wesentliche Grund, der einer Betrachtung des Fortluftstroms als potenziellen Umluftstrom entgegensteht, ist ein Hygiene-Aspekt. Zum einen sind keine Studien bekannt, welche die Lebensmittelverträglichkeit oder entsprechende Grenzwerte von Spurenstoffen des Zeoliths im späteren Produkt angeben, zum anderen enthält der Fortluftstrom noch Milchpulverpartikel, dessen Auswirkungen auf die Zeolithschüttung nicht bekannt ist. Neben dem Verkleben oder Zusetzen der Poren, wird insbesondere ein mögliches Bakterienwachstum als kritisch angesehen. Zusätzlich muss die räumliche Distanz vom Austritt der Fortluft zum Eintritt der Zuluft überbrückt werden. Es bestehen somit folgende Themen, die vor einem Nutzen des Fortluftstroms analysiert werden müssen:

- Grenzwerte von Zeolith-Spurenstoffen im späteren Produkt
- Verhalten von Milchpulverpartikeln in der Zeolithschüttung
- Gesetzliche Vorschriften zum Frischluftanteil bei der Lebensmitteltrocknung

Der erste Punkt, der Belastung von Spurenstoffen des Zeoliths im späteren Produkt, muss zwar näher betrachtet werden, wird aber nicht als kritisch angesehen. Natürliche Zeolithe finden zum einen in der Alternativmedizin verschiedenste Anwendungen, zum anderen werden klinische Studien mit Patienten, die unter einem Immundefekt leiden, durchgeführt, so dass eine generelle Verträglichkeit vorliegen muss [77]. Unter der vorausgehenden Annahme, dass die Lebensmittelverträglichkeit gegeben ist, wird der Sorptionsprozess vor dem Filter der Umgebungsluft integriert.

Durch die Adsorption des Wasserdampfes aus der Zuluft an die Zeolithoberfläche erfolgt bei den Umgebungsbedingungen ein Temperaturhub um 40 K auf 60°C und die Beladung der Zuluft wird auf 0 g_w/kg_L reduziert [8].

Wird die Beladung der Abluft des Sprühtrockners konstant gehalten, so folgt aus der Wassermassenbilanz, dass der Luftmassenstrom um 12% auf 5.1 kg/s reduziert werden kann. Dies setzt voraus, dass die für die Sprühtrocknung erforderlichen Strömungszustände im Sprühtrockner mit dem reduzierten Luftmassenstrom aufrecht gehalten werden können.

Bei dem Luftmassenstrom zum statischen Fliessbett wird davon ausgegangen, dass dieser nicht

reduziert, da ansonsten das statische Fließbett nicht aufrecht gehalten werden kann. Auf Grund der geringeren Beladung erfolgt aber eine sichere Prozessführung, da im Fließbett die Gefahr von Agglomerationen reduziert wird.

Für die Zuluft des Warmluft-Bereiches des Nachrockners wird davon ausgegangen, dass eine Reduktion des Luftmassenstroms ebenfalls nicht möglich ist. Über speziell geformte Leitbleche im Trocknerboden „schwebt“ das Milchpulver auf einem Luftkissen durch den Trockner. Durch die gestiegene Wasserdampfpartialdruckdifferenz zwischen dem Milchpulver und dem warmen Luftstrom könnte die Temperatur der Zuluft gesenkt werden, was zum einen die Heizleistung mindert und zum anderen den erforderlichen Kühlbedarf im Kaltluft-Bereich reduziert.

Für die Zuluft des Kaltluft-Bereiches des Nachrockners heben sich die energetischen Effekte der Entfeuchtung und der Temperaturerhöhung auf. Es wird angenommen, dass über eine indirekte Verdunstungskühlung der Luftmassenstrom bei den Umgebungsbedingungen auf 18°C runtergekühlt werden kann und somit kühler als beim Referenzfall ist. Durch das Entfeuchten der Zuluft entfallen die 4 kW Kälteleistung für das Kondensieren der Wasserbeladung wie bei dem Referenzfall.

Für die Desorption ist in dem betrachteten Anlagenbereich keine geeigneter Abwärmestrom vorhanden. Daher wird ein Desorptionsprozess angenommen, der über den Dampfkreislauf des Werkes die Energie bezieht und einen Wirkungsgrad von 0.8 aufweist.

Aus den getroffenen Annahmen und den hergeleiteten neuen Massenströmen ergeben sich die resultierenden Stoffströme gemäss Tabelle 17.

Strom	Temperatur [°C]	Beladung [g _w /kg _L]	Massenfluss [kg _L /s]
Umgebung	20	12	-
Zuluft-Sprühtrockner	200	0	5.1
Zuluft-Fließbett	85	0	0.2
Abluft-Sprühtrockner/Fließbett	67	64	5.3
Zuluft-Warmluft-Bereich	35	0	0.8
Zuluft-Kaltluftbereich	6	0	0.3
Abluft-Nachrockner	-	2	1.1
Fortluft	50	53	6.4

Tabelle 17: Stoffströme und deren Zustände bei der Milchpulvertrocknung beim Referenzfall

Gemäss den Stoffströmen aus Tabelle 17 ergibt sich mit einer WRG-Leistung von 71 kW eine benötigte Wärme- und Kälteleistung von 910 kW, die sich, wie in Abbildung 61 dargestellt, auf die Wärmeübertrager der einzelnen Stoffströme aufteilen, wobei die Rückkühlleistungen nicht berücksichtigt sind.

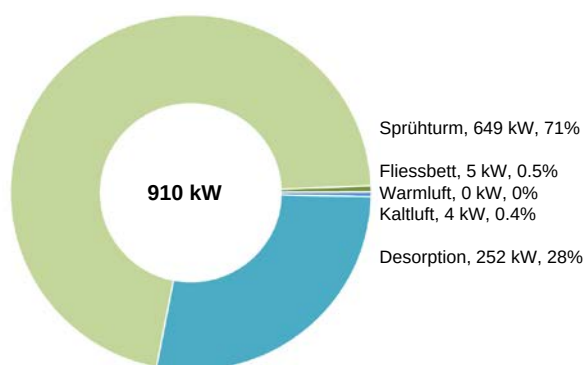


Abbildung 61: Aufteilung der Gesamtleistung von 910 kW auf die einzelnen WÜ der Stoffströme beim integrierten Sorptionsprozess vor dem Filter der Umgebungsluft

Ergebnisse

Der Leistungsbedarf des Sprühtrockners reduziert sich durch die Integration des Sorptionsprozesses von 1037 kW um 12% auf 910 kW wobei die Leistung für den Desorptionsprozess von 252 kW auch durch Abwärme aus anderen Prozessen bezogen werden kann, siehe Abbildung 62 (links). Bezogen auf 2200 Betriebsstunden (10 h * 220 Tage) ergeben sich die energetischen Kennwerte gemäss Abbildung 62 (rechts). Die gesamte thermische Leistung wird sowohl beim Referenzfall wie auch beim integrierten Sorptionsprozess mittels eines Erdgasbrenners bereitgestellt, so dass die relativen

Änderungen der energetischen Kennwerte der relativen Änderung des Leistungsbedarfs entsprechen. Die Einsparung über die Brennstoffkosten betragen 8'730 CHF/a, so dass eine Amortisation einer Investition in ein Sorptionssystem bei den heutigen Energiekosten, nur über eine entsprechend lange Abschreibzeit möglich ist. Wird die Desorptionsenergie aus einem Abwärmestrom gewonnen, erhöhen sich die Brennstoffeinsparungen und eine Amortisation der Investition ist früher gegeben. Durch die konditionierte Zuluft des Trockners über einen Sorptionsprozess muss nur noch die Temperatur der Zuluft geregelt werden. Das Verhältnis vom Feedstrom des Milchkonzentrats zum Luftmassenstrom bleibt bei entsprechender Auslegung für ein Trockengut über das ganze Jahr konstant. Hierdurch werden Fehlproduktionen vermieden, wodurch die wirtschaftliche Gewinnmarge am Trocknungsprodukt sowie der Nutzungsgrad der Ressource Milch steigen und der energetische Aufwand für das Erzeugen des Milchpulvers sinkt. Der Anteil der Fehlproduktion ist nicht bekannt, somit kann dieser Effekt bei den energetischen und wirtschaftlichen Aussagen nicht berücksichtigt werden.

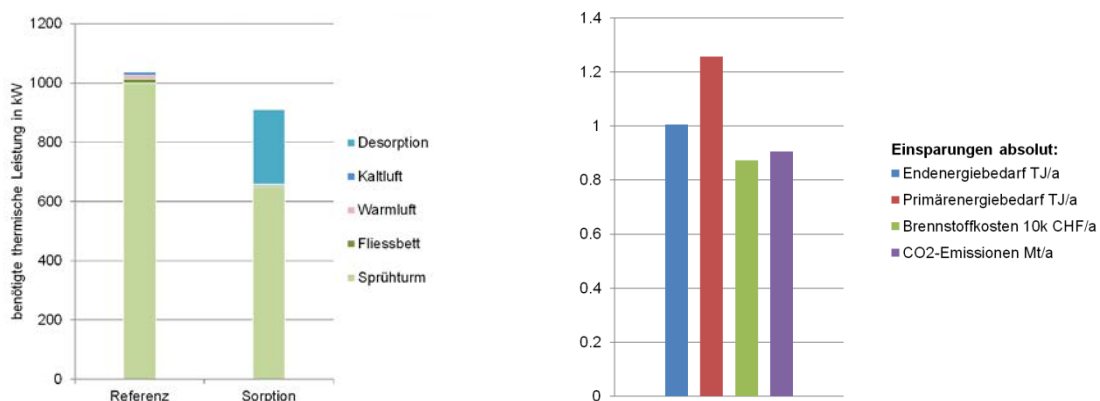


Abbildung 62: links: Aufteilung des spezifischen Energiebedarfs auf die jeweiligen WÜ mit und ohne Sorptionsprozess inklusive der Berücksichtigung einer WRG von 79 kW (Referenz) beziehungsweise 71 kW (mit Sorption) rechts: Einsparungen bei den energetischen Kennwerten, jeweils 12% (Referenz – Sorption)

Fazit

Im betrachteten Fall sind der Adsorptionsprozess vor dem Filter der Umgebungsluft und der Desorptionsprozess extern über das Heissdampfsystem in den Trocknungsprozess integriert, was nicht der energetisch optimalen Lösung (Umluft) entspricht. Die Integration führt zu einer Reduktion des Energiebedarfs von 12% (Sommerbetriebspunkt) und zu konstanten Trocknungsbedingungen. Dieser Anteil kann erhöht werden, wenn eine direkte Nutzung der Fortluft, oder zumindest ein Teil dieser, als Umluftstrom möglich ist, hierzu müssen aber zuerst die hygienischen Risiken bestimmt und bewertet werden.

Bei einer angestrebten Amortisationszeit von 10 a betragen bei den derzeitigen Energiepreisen die zulässigen Investitionskosten grob 87'300 CHF. Ob für diesen Preis ein Sorptionssystem integriert werden kann ist nicht bestimmt, wird aber kritisch gesehen. Welche wirtschaftlichen Vorteile für den Betreiber durch die ganzjährig konstanten Produktionsbedingungen entstehen, ist nicht bekannt, diese haben aber einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Systems.

Es muss somit ein hygienisch unbedenkliches und wirtschaftlich günstiges Sorptionssystem gewählt beziehungsweise entwickelt werden, damit die wirtschaftlichen und energetischen Vorteile des Sorptionsprozesses ausgenutzt werden können.

7.4. Zusammenfassung

Die energetischen Kennwerte eines integrierten Sorptionsprozesses sind mit Daten der Industrie für drei Beispiele aus dem Bereich der Trocknungsprozesse berechnet. Es wird festgestellt, dass die Mechanismen und Auswirkungen von Feststoffpartikeln in der Sorptionsluft in der Fachliteratur nicht näher bestimmt oder beschrieben sind. Bei den Beispielen zur Papiertrocknung und Milchpulverproduktion, wird daher von der energetisch besten Variante, der Integration in einen Umluftstrom, abgesehen. Die bei der Milchpulverproduktion erforderlichen Informationen bezüglich des Bakterienwachstums im Zeolith sowie der Lebensmittelverträglichkeit werden in der Fachliteratur ebenfalls nicht

gesichtet. Für die Integration von Sorptionsprozessen in der Nahrungsmittelindustrie sind entsprechende Nachweise erforderlich, um sicherzustellen, dass die Produktqualität nicht gefährdet wird.

Beim Praxisbeispiel zum Konvektionstrockner wird festgehalten, dass der Druckverlust der Luftströmung durch einen axial durchströmten Festbettadsorber zu hohen Druckverlusten führt. Die so ansteigenden elektrischen Verdichterleistungen mindern das energetische Potenzial bedeutend, so dass die Bauform des axial durchströmten Festbettadsorbers als nicht geeignet erscheint. Als mögliche Alternative wird die Entwicklung eines Wanderbettreaktors vorgeschlagen. Des Weiteren verdeutlicht das Praxisbeispiel, dass bei der Integration eines Sorptionsprozesses in einen Trocknungsprozess weitere WRG-Massnahmen einen negativen Effekt aufweisen können. So hat die über eine WRG zusätzlich zugeführte vorgewärmte Luft im Auslegungsfall einen positiven Einfluss auf die energetischen und wirtschaftlichen Kennwerte, beim betrachteten Sorptionsprozess jedoch einen negativen.

In den drei Beispielen steht in keiner Anwendung ein Abwärmestrom für die Desorption zur Verfügung. Die Desorptionsenergie wird daher in allen Beispielen über fossile Brennstoffe oder elektrischen Strom bereitgestellt, wodurch das energetische und wirtschaftliche Potenzial des Sorptionsprozesses gemindert wird. Dennoch wird für alle drei Beispiele gezeigt, dass eine Reduzierung des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen durch die Integration eines Sorptionsprozesses möglich ist.

8 Fazit

Stoffdatenbank

Die Zielsetzung der Erstellung der Datenbank war es, die bei der Literaturrecherche gesichteten Stoffdaten zusammenzufassen und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. In die mit Microsoft Access® erstellte Datenbank sind 129 Datensätzen aus 26 Literaturstellen eingepflegt worden. Es besteht die Möglichkeit, die Datenbank in digitaler Form zu erhalten (Anfrage über die *FG SORPTION*). Zusätzlich sind zu den einzelnen Stoffen weitere Informationen wie beispielsweise der NFPA-Code angegeben. In Beispielen wird erläutert, wie die hinterlegten Daten grafisch ausgewertet werden können, um die gewünschten Informationen schneller identifizieren zu können.

Klassifizierung von Sorptionsprozessen

Die Zielsetzung bei der Klassifizierung der Sorptionsprozesse war ein strukturierter Überblick, sowohl über die Anwendungsmöglichkeiten von technischen Sorptionsprozessen für energetische Anwendungen als auch über deren Eignung für industrielle Prozesse. Dazu sind die Sorptionsprozesse in vier Kategorien eingeteilt und den grundlegenden Prozessen der Industrie in einer Grafik zugeordnet worden. Bei den Kategorien geben die Namen wieder, welche der stets miteinander verknüpften Eigenschaften des Sorptionsprozesses den wesentlichen Nutzen darstellt. Die Gliederung der industriellen Prozesse hätte in grösserer Detaillierung erfolgen können, wäre aber dann nicht mehr allgemeingültig gewesen. Weiterhin sind markante und in der Fachliteratur gut beschriebene Prozesse in einem Blasendiagramm zusammengefasst und den Sorptionskategorien zugeordnet.

State of the Art & Erarbeitung Überblick Potenziale

Die Ziele der beiden Arbeitspakete waren zum einen, einen Überblick über die energetischen Potenziale zu erstellen, die bei der Verknüpfung von industriellen Prozessen mit Sorptionsprozessen entstehen und zum anderen den Stand der Technik in diesem Bereich wiederzugeben. Dies ist durch die Diskussion der energetischen Potenziale der Sorptionskategorien anhand von aktuellen Anwendungsbeispielen geschehen. Das berechnete energetische Potenzial des Anwendungsbeispiels ist zusätzlich auf eine Anwendung des Prozesses in der gesamten Schweiz für den jeweiligen Bereich hochgerechnet worden.

Gemäss den Hochrechnungen für die Industrie erreichen die beispielhaft gewählten Anwendungsbeispiele ein Einsparpotenzial von 8% an Endenergie des Verwendungszwecks *Prozesswärme*. Unter der Annahme, dass durch weitere, nicht betrachtete Anwendungen, das Einsparpotenzial das bis zu vierfache des berechneten Wertes betragen kann, trüge das energetische Potenzial der Sorptionsprozesse in der Industrie mit einem Anteil von 7% dazu bei, das Ziel der Energiestrategie 2050 zu erreichen (Reduktion des Energiebedarfes in der Schweiz um 251 PJ/a).

Allgemein begünstigende Rahmenbedingungen, wann ein Sorptionsprozess energetisch und/oder wirtschaftlich sinnvoll einen alternativen konventionellen Prozess ersetzen kann, sind qualitativ formuliert. Eine Validierung und vor allem Quantifizierung der folgenden Rahmenbedingung entsteht aus:

- **Wärmetransformation**
 - Antriebswärme ist regenerativ erzeugt
 - Antriebswärme kann nicht anderweitig genutzt werden
 - Häufiger Teillastbetrieb
 - Hohe Betriebsstundenzahl
- **Thermische Energiespeicherung**
 - Lange Speicherzyklen
 - Speichertemperaturen über 100°C
 - Hohe geforderte Speicherdichte

- **Stofftrennung**
 - Geringe Konzentrationen des zu entfernenden/gewinnenden Stoffes
 - Niedrige Prozesstemperaturen
 - Hohe Volumenströme
 - Hohe geforderte Reinheiten
- **Stofftrennung und Wärmetransformation** (Beispiel: Trocknungsprozesse)
 - Geringe zulässige Prozesstemperaturen
 - Hohe Korrelation zwischen Umgebungsluft und Trocknungsqualität
 - Hohe Beladung der Zuluft mit Wasserdampf
- **Stoffspeicherung**
 - Hohe geforderte Speicherdichte (bei der Gasspeicherung)
 - Hohe geforderte Explosionssicherheit
 - Konstante und genaue geforderte Entladungsscharakteristik

Quantifizierung des Potenzials ausgewählter Anwendungen

Für die Quantifizierung des energetischen Potenzials ausgewählter Praxisbeispiele für eine grobe energetische und ökonomische Einordnung von vielversprechenden industriellen Prozessen ist zu Beginn des Projektes der Kontakt zur Industrie aufgenommen worden. Bei drei Schweizer Unternehmen wurde jeweils ein Sorptions- in einen Trocknungsprozess theoretisch integriert. Die drei Praxisbeispiele zeigen, dass unter den aktuellen Marktbedingungen und mit den am Markt erhältlichen Komponenten eine wirtschaftliche Integration des gewählten Prozesses nur schwer erreichbar ist. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass nur Szenarien betrachtet wurden, die eine Optimierung der bestehenden Anlage bedeuten. Die gesamten Planungs- und Installationsarbeiten müssen somit über die zusätzlichen energetischen Einspareffekte zu erwirtschaften sein. Werden die Sorptionsprozesse bereits in der Planung einer neuen Anlage mit berücksichtigt, fällt die wirtschaftliche Belastung durch die Substitution anderer Technologien geringer aus. Darüber hinaus sind die Trocknungsprozesse über den Kontakt zur Industrie entstanden und nicht aktiv danach ausgewählt worden, dass ein Trocknungsprozess möglichst gute Voraussetzungen für einen Sorptionsprozess bietet.

Das aufgezeigte Potenzial an ungenutzter Prozesswärme in der Industrie ist nur im Beispiel der Papiertrocknung beispielhaft zur Desorption genutzt worden, wobei hier die hohe Beladung der Abgasströme mit Zellulosefasern den Nutzungsgrad des Energiestroms reduzieren. In den beiden anderen Praxisbeispielen ist an dem Werk selbst keine ungenutzte Prozesswärme auf einem für den Desorptionsprozess notwendigen Temperaturniveau angefallen. In diesen Fällen musste die Energie für die Desorption zusätzlich zugeführt werden, was sich negativ auf die wirtschaftlichen und ökonomischen Kennwerte ausübte.

9 Ausblick

Die theoretische Integration eines Sorptionsprozesses bei den drei vorgestellten Praxisbeispielen zeigt, dass sowohl technische, als auch wirtschaftliche Herausforderungen für eine steigende Verbreitung der Sorptionsprozesse in der Industrie zu bewerkstelligen sind. Auf Grund des energetischen Potenzials der Sorptionsprozesse ist es empfehlenswert, diese Herausforderungen anzugehen.

Planungssicherheit erhöhen

Ein Weg, die wirtschaftlichen Hemmnisse bei einer Investition abzubauen ist die Minimierung der finanziellen Risiken. Bei der Integration eines Sorptionsprozesses in eine industrielle Anlage kann dies durch die Erhöhung der Planungssicherheit erreicht werden. Um der Industrie die dafür benötigten Planungsgrundlagen bereitzustellen, wird empfohlen, für die beiden Sorptionskategorien *Stofftrennung* und *Wärmetransformation* Randbedingungen eines Modellprozesses zu definieren. Für diese Modellprozesse sind standardisierte Komponenten zu entwickeln, für die in Laborversuchen die in der Industrie relevanten Betriebscharakteristiken zu bestimmen sind. Für geschlossene Wärmetransformationsmaschinen bestehen bereits Algorithmen zur Dimensionierung und Betrachtung der Wirtschaftlichkeit. Werden die Systeme jedoch offen und mit zeitlich versetzten Ad-/Desorptionsprozessen (thermische Energiespeicher) installiert, fehlen entsprechende Rechenvorschriften.

Für die Stofftrennung von Mehrstoffsystemen wie VOC-beladene Gase/Luft, werden ohne Fortschritte in der Modellierung der Prozesse verlässliche Aussagen weiterhin nur über Versuche möglich sein. Durch das Definieren von Referenzbeladungen für verschiedene VOC-Quellen, zum Beispiel Klärschlamm-, Gülle- oder Lacktrocknung kann aber das Verhalten der Aktivkohlen für die jeweilige Anwendung angegeben werden und eine grobe Vorauswahl über die zu erwartende Reinigungsleistung erfolgen. In einem weiteren Schritt können in einfachen und kostengünstig standardisierten Versuchen die Stofftrennungseigenschaften im Labor ermittelt werden, so dass eine Überprüfung der Angaben verschiedener Hersteller möglich ist und für die Auslegung entsprechende Planungssicherheit vorliegt.

Kostenreduktion

Eine Kostenreduktion ist über standardisierte Komponenten mit einem breiten Anwendungsfeld erreichbar. Zeolithe und Aktivkohlen sind Sorbentien mit einem breiten Anwendungsgebiet. In offenen und geschlossenen Systemen weisen Zeolithe mit dem Sorptiv Wasserdampf gute energetische Eigenschaften auf und bilden ein günstiges und sicheres Arbeitspaar. Über dieses Arbeitspaar können zum einen viele Trocknungsprozesse optimiert werden, zum anderen ermöglichen die hohen Adsorptionsenthalpien eine hohe energetische Speicherdichte, so dass auch thermische Energiespeicher damit ausgerüstet werden können.

Für die Konstruktion von standardisierten Komponenten können zum Beispiel in einem ersten Schritt verschiedene Reaktorbauweisen auf ihre Betriebscharakteristik wie zum Beispiel dem Gesamtwirkungsgrad aus Ad- zu Desorptionsenergie hin untersucht werden. Werden auf dem Markt entsprechend erhältliche Zeolithe verwendet, deren Systemeigenschaften mit Wasserdampf ausreichend dokumentiert und in der Stoffdatenbank abgelegt werden, besteht eine gute Datenbasis für eine verlässliche Bestimmung der konkreten Potenziale eines entsprechenden Sorptionsprozesses.

Systementwicklung

Um die Lücke zwischen dem hohen energetischen und ungenutzten Prozesswärmepotenzial und dem Bedarf an desorbiertem Zeolith bei den Trocknungsprozessen zu schliessen, ist mit einem offenen mobilen Festbettreaktor in einer Demonstrationsanlage in Deutschland ein Lösungsansatz aufgezeigt worden. Trotz der energetischen Vorteile stellt sich bei der Demonstrationsanlage kein wirtschaftlicher Betrieb ein, da die Investitionskosten zu hoch und die Zyklendauer zu lang sind. Hier bietet ein offener Wanderbettreaktor einen Lösungsansatz. Neben dem Gasstrom durchströmt auch das Zeolith den Reaktor und kann als Energieträger dem Bedarf angepasst zwischen verschiedenen Lade- und Entladestationen ohne den schweren und voluminösen Reaktor transportiert werden. Für einen entsprechenden Reaktor ist bereits der Funktionsnachweis für den Adsorptionsprozess erbracht worden. Auf den Ergebnissen aufbauend wird empfohlen, einen entsprechenden Lösungsansatz bei

den oben genannten zu entwickelnden Standardkomponenten mit aufzunehmen, um einen direkten Vergleich mit den Betriebscharakteristika von Festbettssystemen zu erhalten [78].

Die Belastung der Prozesswärmeströme mit Schad- und Fremdstoffen in der Industrie ist kein Alleinstellungsmerkmal der Sorptionsprozesse. Häufig ist ein entsprechender Verunreinigungsgrad ein Grund dafür, dass die Energie eines entsprechenden Prozesswärmestroms nicht genutzt wird. Daher wird unabhängig von der technischen Relevanz für Sorptionsprozesse empfohlen, die Entwicklung von entsprechenden selbstreinigenden und/oder gegen Verdrückung unempfindlichen Wärmeübertragern wie zum Beispiel Thermosiphons zu verstärken.

Materialforschung

Die Bestimmung des Einflusses von Schad- und Fremdstoffen auf das Sorbens kann für die in der Industrie relevanten Verunreinigungen in sogenannten „Hardware in the Loop“-Versuchen (HiL) erfolgen. Idealerweise werden die HiL-Versuche ergänzend zu der Bestimmung der Betriebscharakteristika der verschiedenen Reaktortypen durchgeführt. Die Fragestellung der Lebensmittelverträglichkeit kann eventuell über eine tiefergehende Recherche in der Lebensmittel- und Medizintechnik erfolgen und/oder über begleitende Versuche nach den Richtlinien der beiden Fachbereiche durchgeführt werden.

Wissenstransfer

Die Erfahrung in der Zusammenarbeit mit der Industrie in dieser Studie und bei den darüber hinausgehenden Kontakten zeigt, dass die Sorptionsprozesse allenfalls theoretisch bekannt sind. Das energetische Potenzial der Prozesse ist weitgehend nicht bekannt. In laufenden Gesprächen wird seitens der Industrie nach Fortbildungsmöglichkeiten gefragt, die in der Vergangenheit bei grösseren Unternehmen mit entsprechender Teilnehmerzahl bereits in kleinerem Umfang als so genannte Technologie-Impulse umgesetzt werden konnten.

Der Wissenstransfer aus der Forschung in die Industrie kann über die Aus- und Weiterbildung der Fachkräfte erfolgen. Hier bieten sich beispielsweise CAS-Angebote (certificate of advanced studies) an, wie sie z. B. von der Hochschule Luzern durchgeführt werden. Ebenso kann an der Hochschule Luzern die Einführung einer eigenen Vorlesung ausschliesslich zu technischen Sorptionsprozessen ins Auge gefasst werden. Für den Wissenstransfer über die aktive Teilnahme an Kursen hinaus, sind regelmässige und praxisorientierte Fachartikel in entsprechenden Journals zu verfassen.

Die Stoffdatenbank bietet bei entsprechender Pflege ebenfalls eine Plattform, sowohl die Forschungseinrichtungen untereinander, als auch die Forschungseinrichtungen mit den Anwendern zu verknüpfen. Wünschenswert ist, dass sich aus den Kontakten bei der Anfrage nach der Stoffdatenbank bereits ein Netzwerk mit Industrie- und Forschungspartnern im Bereich der Sorptionstechnologien bildet.

Literaturverzeichnis

1. Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation UEVK, *Konzept EnergieSchweiz 2013-2020 als Integraler Bestandteil des ersten Massnahmenpaketes zur Energiestrategie 2050*. 2012: Bern.
2. Núñez, T., *Charakterisierung und Bewertung von Adsorbentien für Wärmetransformationsanwendungen*. Albert-Ludwigs-Universität, Fakultät für Physik, 2001.
3. Bathen, D., Breitbach, M., *Adsorptionstechnik*. VDI Buch, Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
4. Steinweg, B., *Über den Stofftransport bei der Ad- und Desorption von Schadstoffen an/von Aktivkohle im Bereich umweltrelevanter Gaskonzentrationen*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik, 1995.
5. Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 3674, Abgasreinigung durch Adsorption*. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, 2013.
6. Ruthven, D.M., *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
7. v.Gemmingen, U., Mersmann, A., Schweighart, P., *Adsorptionsapparate*. Thermisches Trennen, Stuttgart, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996.
8. Hauer, A., *Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen*. Universität Berlin, Prozesswissenschaften, 2002.
9. Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Richtlinie 3928, Abgasreinigung durch Chemisorption*. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, 1992.
10. Kast, W., *Adsorption aus der Gasphase, Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren*. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1988.
11. Dietzsch, B., Domke, R.M.A., Fleischhauer, W., Leven, V., Müller, W., Ohling, W., Schön, I., Schwister, K., Tarján, I., *Handbuch der Verfahrenstechnik*. ed. K. Schwister, München, Fachbuchverlag Leipzig im Karl Hanser Verlag, 2007.
12. Spencer, A.B., *NFPA Pocket Guide to Hazardous Materials*. ed. G.R. Colonna, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2003.
13. Ziegler, B., *Wärmetransformation durch einstufige Sorptionsprozesse mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser*. Eidgenössische Technische Hochschule, 1982.
14. Lambauer, J., Fahl, U., Ohl, M., Blesl, M., Voss, A., *Industrielle Grosswärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele*. Forschungsbericht, Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung IER, 2008.
15. Schreiber, H., Diaconu, A., Russ, W., Bardow, A., *Entwicklung einer Verfahrenskombination aus Zeolithwärmepumpe, Vakuumeindampfsystem und Blockheizkraftwerk zur energieeffizienten Wärmeversorgung von Brauereien - Abschlussbericht des Projektes "Energiesparende Brauereitechnologie"*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2013.
16. Vasiliev, L.L., *Current Status of the problem of heat pumps and refrigerating devices*. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 83(4): pp. 17, 2010.
17. Eicker, U., *Solare Technologien für Gebäude*. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
18. Erpenbeck, T., *Sorptionsgestützte solare Klimatisierung*. Universität Karlsruhe, Fachbereich Architektur, 1999.
19. Vasiliev, L.L., Mishkinis, D.A., Antukh, A.A., Vasiliev, J., *Solar-Gas Solid Sorption Refrigerator*. Adsorption, 7: pp. 12, 2001.
20. Wang, L.W., Wang, R.Z., Oliveira, R.G., *A review on adsorption working pairs for refrigeration*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: pp. 16, 2009.
21. Weiss, A., *Kühlen durch Abwärme - Energieeffiziente Adsorptionstechnik fördert Klimaschutz*. HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, 64: pp. 3, 2013.
22. Deng, J., Wang, R.Z., Han, G.Y., *A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems*. Progress in Energy and Combustion Science, 37: pp. 32, 2011.
23. Gutiérrez-Urueta, G., Huicochea, A., Rodríguez-Aumente, P., Rivera, W., *Energy and exergy analysis of water-LiBr absorption system with adiabatic absorber for heating and cooling*. Energy Procedia, 57: pp. 9, 2014.

24. Helm, M., Hagel, K., Pfeffer, W., Hiebler, S., Christian, S., *Solar heating and cooling system with absorption chiller and latent heat storage - A research project summary* -. Energy Procedia, 48: pp. 12, 2014.
25. Parham, K., Khamooshi, M., Tematio, D.B.K., Yari, M., Atikol, U., *Absorption heat transformers - A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34: pp. 13, 2014.
26. Plura, S., *Entwicklung einer zweistufigen Absorptionskältemaschine zur effizienten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 2008.
27. Molter, F., *Prima Klima im Putenstall - Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung der Abwärme zur Kühlung*. HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, 64: pp. 4, 2013.
28. Schade, L. *Hersteller von Sorptionsmaschinen*. [cited 2016 31. März]; Available from: <http://absorptionsmaschine.de/thermisch-angetriebene-verfahren/absorptionsmaschinen/vor-und-nachteile-von-absorptionskaeltemaschinen.html>.
29. Bücherl, M. *Nutzung von Niedertemperaturabwärme durch Absorptionskreisläufe zur Kälteerzeugung und Wärmetransformation - Einsatz von neuartigen Arbeitsstoffpaaren*. 2016 28.08.2015 [cited 2016 Juni]; Available from: https://www.ttk.kit.edu/forschung_1665.php.
30. Indus3Es *Indus3Es Project - New technologies for utilization of heat recovery in large industrial systems*. Indus3Es Newsletter, 2016.
31. Corrodi, R., Bertsch, S., *Hochtemperaturspeicher in der Industrie*. Institut für Energiesysteme, Interstaatliche Hochschule für Technik NTB,, Buchs, 2015.
32. Gantenbein, P., Frei, U., *Zeolithspeicher - Zeolithspeicher in der thermischen Solartechnik: Machbarkeit und Potential*. Bern, 2000.
33. Sterner, M., Stadler, i., *Energiespeicher: Bedarf - Technologien - Integration*. Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2014.
34. Lävemann, E., Bayer, A., *Mobile Sorptionsspeicher zur industriellen Abwärmenutzung Grundlagen und Demonstrationsanlage : MobS II*. Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching, 2015.
35. Gantenbein, P., Brunold, S., Frei, U., *Sorptionsspeicher - Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage*. BFE, Bern, 2002.
36. Wagner, W., Jähmig, D., Isaksson, Hausner, R., *Modularer Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte (MODESTORE)*. AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, 2006.
37. Mette, B., *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Reaktionsführung thermochemischer Energiespeicher*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät für Energie,- Verfahrens- und Biotechnik, 2014.
38. Weber, R., Kerskes, H., Drück, H., *Development of a combined hot water and sorption store for solar thermal systems*. Energy Procedia, 48: pp. 10, 2014.
39. Gantenbein, P., Brunold, S., Rei, U., *Sorptionsspeicher Sorptionsmaterialien Studie Wärme- & Stoffaustausch*. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2003.
40. Henninger, S.K., *Untersuchungen von Neuen Hochporösen Sorptionsmaterialien für Wärmetransformationsanwendungen*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Fakultät für Mathematik und Physik, 2007.
41. Storch, J.G.C., *Materialwissenschaftliche Untersuchungen an zeolithischen Adsorbenzien für den Einsatz in offenen Sorptionssystemen zur Wärmespeicherung*. Dissertation, Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, 2010.
42. Henninger, S.K., Jeremias, F., Kummer, H., Schossig, P., Henning, H.-M., *Novel sorption materials for solar heating and cooling*. Energy Procedia, 30: pp. 10, 2012.
43. Hauer, A., Krönauer, A., Lävemann, E., Storsch, G., *Nutzung von Abwärme durch mobile Sorptionsspeicher*. Abschlussbericht, Garching, Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V., 2009.
44. Wnuk, R., *Abluftreinigung und Lösemittel-Rückgewinnung mit dem Camp-Prozess - Ein neues kombiniertes Adsorptions-Membranverfahren*. Verfahrenstechnik, 29(1-2): pp. 4, 1995.
45. BAFU, *Aktennotiz - Emissionsbericht VOC*. Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation UEVK, Editor 2015, Bundesamt für Umwelt, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,; Ittigen.

46. Polak, S., Svehla, J., *Energetischer Vergleich von Nassabscheidern und Regenerativen Nachbrennungen zur Emissionsminderung nach Trocknungsanlagen in der Span- und Faserplattenindustrie*. Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2014.
47. Ojala, S., Koivikki, N., Laitinen, T., Mouammine, A., Seelem, P.K., Laassiri, S., Ainassaari, K., Brahmi, R., Keiski, R.L., *Utilization of Volatile Organic Compounds as an Alternative for Destructive Abatement*. catalysts, 5: pp. 60, 2015.
48. Wnuk, R., *Aminrückgewinnung in Giessereien aus der Abluft von Kernformmaschinen, die nach dem Cold-Box-Verfahren arbeiten*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2001.
49. Kröll, K., Kast, W., *Trockner und Trocknungsverfahren*. Trocknungstechnik, ed. K. Kröll. Vol. Band 2. Berlin, Heidelberg, New York, London, Tokyo, Springer-Verlag, 1989.
50. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. *How is Hydrogen stored?* 2016 [cited 2016 Juni]; Available from: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
51. Kuhn, M. *Storage Density of Hydrogen*. 2015 [cited 2016 07.06.]; Available from: <http://www.ilkdresden.de/en/service/research-and-development-rd/detail/hydrogen-test-area-at-ilk-dresden/>.
52. Sebastián, V., Casado, C., Coronas, J., *Special Applications of Zeolites*. Zeolites and Catalysis, ed. J. Cejka, Corma, A., and Zones, S. Vol. 2. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
53. United States Department of Energy, *Fuel cell technologies office multi-year research, development, and demonstration plan*. 2015, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: Washington DC.
54. Langmi, H.W., Book, D., Walton, A., Johnson, S.R., Al-Mamouri, M.M., Speight, J.D., Edwards, P.P., Harris, I.R., Anderson, P.A., *Hydrogen storage in ion-exchanged zeolites*. Journal of Alloys and Compounds, 404-406: pp. 6, 2005.
55. Kemmler, A., Piégsa, A., Ley, A., Wüthrich, P., Keller, M., Jakob, M., Catenazzi, G., *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2013 nach Verwendungszwecken*. Bern, Bundesamt für Energie, 2014.
56. Kattenstein, T., Drath, T., Ziolk, A., Unger, H., Wagner, H.-J., *Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES*. Ruhr-Universität, Bochum, 2002.
57. Pehnt, M., Bödeker, J., Arens, M., Jochem, E., Idrissova, F., *Die Nutzung industrieller Abwärme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung*. Heidelberg, Karlsruhe, 2010.
58. Dumortier, R., Lang, T., Schmutz, B., *Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz*. Zürich, EnergieSchweiz, 2012.
59. Brunner, F., Krummenacher, P., *Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode*. Bern, Bundesamt für Energie, 2015.
60. Kohli, A., *Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Akkumulatoren - Machbarkeitsstudie*. Bern, 2010.
61. Fischl, M., Lembke, N., Bösch, N., Friedli, T., *Energieeffizienz in Industrie und Kommunen - Kostenvorteile herausholen*. Umwelt Perspektiven, 4: pp. 3, 2014.
62. Sollesnes, G., Helgrud, H.E., *Potensialstudie for utnyttelse av spillvarme fra norsk industri*. Enova, Trondheim, 2009.
63. Karlsen, H.T. *Økt industriproduksjon med mindre energi*. 2013 [cited 2016 April]; Available from: <http://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/okt-industriproduksjon-med-mindre-energi>.
64. Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., Müschen, K., *2050:100% Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Umweltbundesamt, Editor 2010, Umweltbundesamt: Dessau-Rosslau.
65. BFE, *Aktualisierung der Energieperspektiven 2035: Einsparpotenziale nach Verwendungszwecken - Anhang 3*. In *Skizze des Aktionsplans Energiestrategie 2050* 2011, Bundesamt für Energie: Bern.
66. Stolz, P., Frischknecht, R., *Umweltbilanz Strommix Schweiz 2011*. Uster, 2015.
67. BAFU, *Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020)*. Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation UEVK, Editor 2015: Bern.
68. Gerber, R., *VOC-Emissionen: Abluftreinigungskonzept*. Umwelt Persepektiven, 4: pp. 3, 2014.
69. Kuster, J., Zweiacker, J.-F., Rosch, M., *Effiziente Energienutzung: Investitionspraxis in der Industrie*. Bern, 2000.

70. Eichsleder, H., Klell, M., *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik - Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 3 ed. Praxis, ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
71. Kirchner, A., Hofer, P., Kemmler, A., Strassburg, S., *Zwischenbericht I, Energieszenarien für die Schweiz bis 2050*. prognos, Basel, 2011.
72. KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden Württemberg GMBH. *CO2-Emissionsfaktoren*. 2016 [cited 2016 April]; Available from: <http://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/>.
73. Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, *Die kantonalen Strompreise im Vergleich*. 2016, Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom: <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/map/showswissmap.aspx>.
74. Ribback, C., *Energetic, Economic and Enviromental Assessment of SorptionTechnology Integration into Residual Water Drying*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, 2016.
75. Schwieger, H., *Externe Untersuchung der Trockenpartie für das Werk*. Langenfeld, 2013.
76. Stumm, D.R.K., *Untersuchungen zum chemischen Wasserrückhaltevermögen und zur Trocknungsfähigkeit von Papierstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von chemischen Additiven*. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Chemie, 2007.
77. Hübner, J., *Komplementäre Onkologie, Supportive Massnahmen und evidenzbasierte Empfehlungen*. Stuttgart, New York, Schattauer, 2008.
78. Maranda, S., Kleingries, M., Wellig, B., *Thermosiphon-Wärmeübertrager zur Abwärmenutzung*. Bern, 2013.

Anhang

WRG-Studie

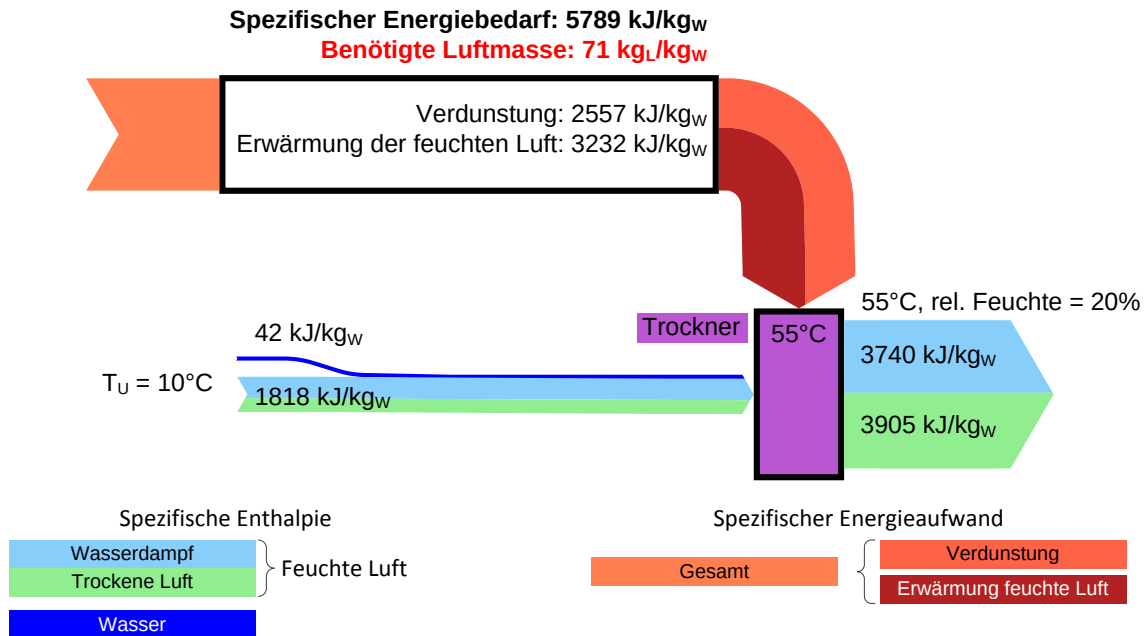


Abbildung 63: Referenztrockner

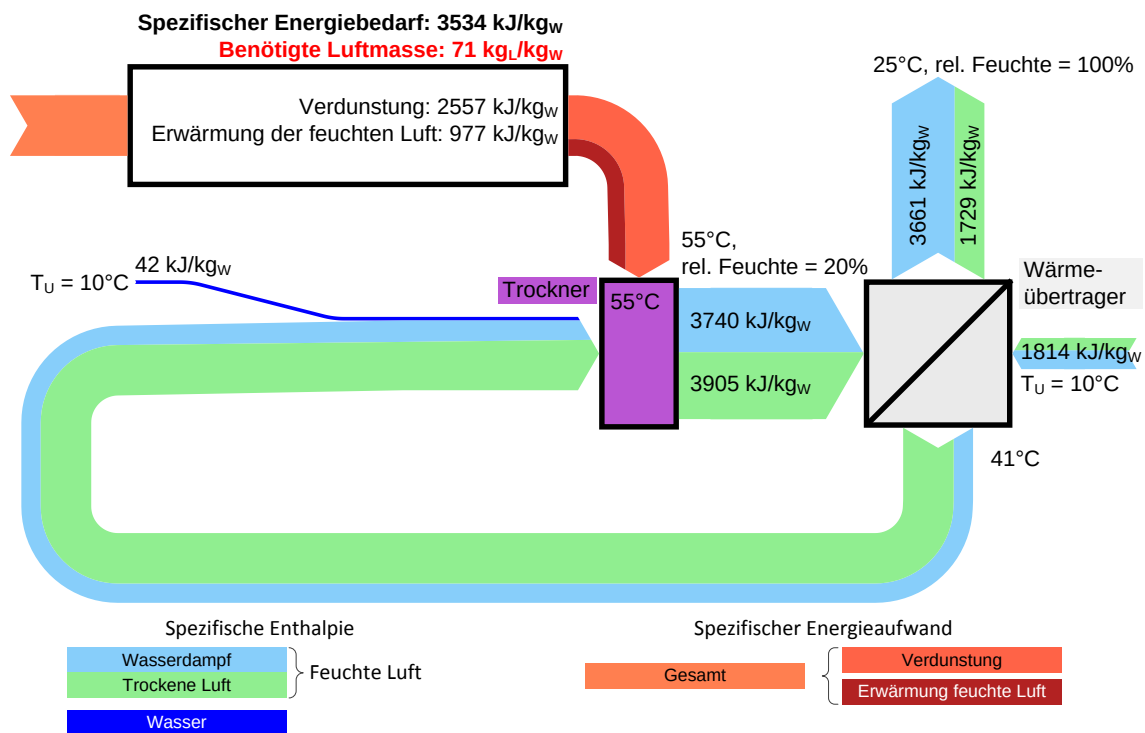


Abbildung 64: Referenztrockner + WRG

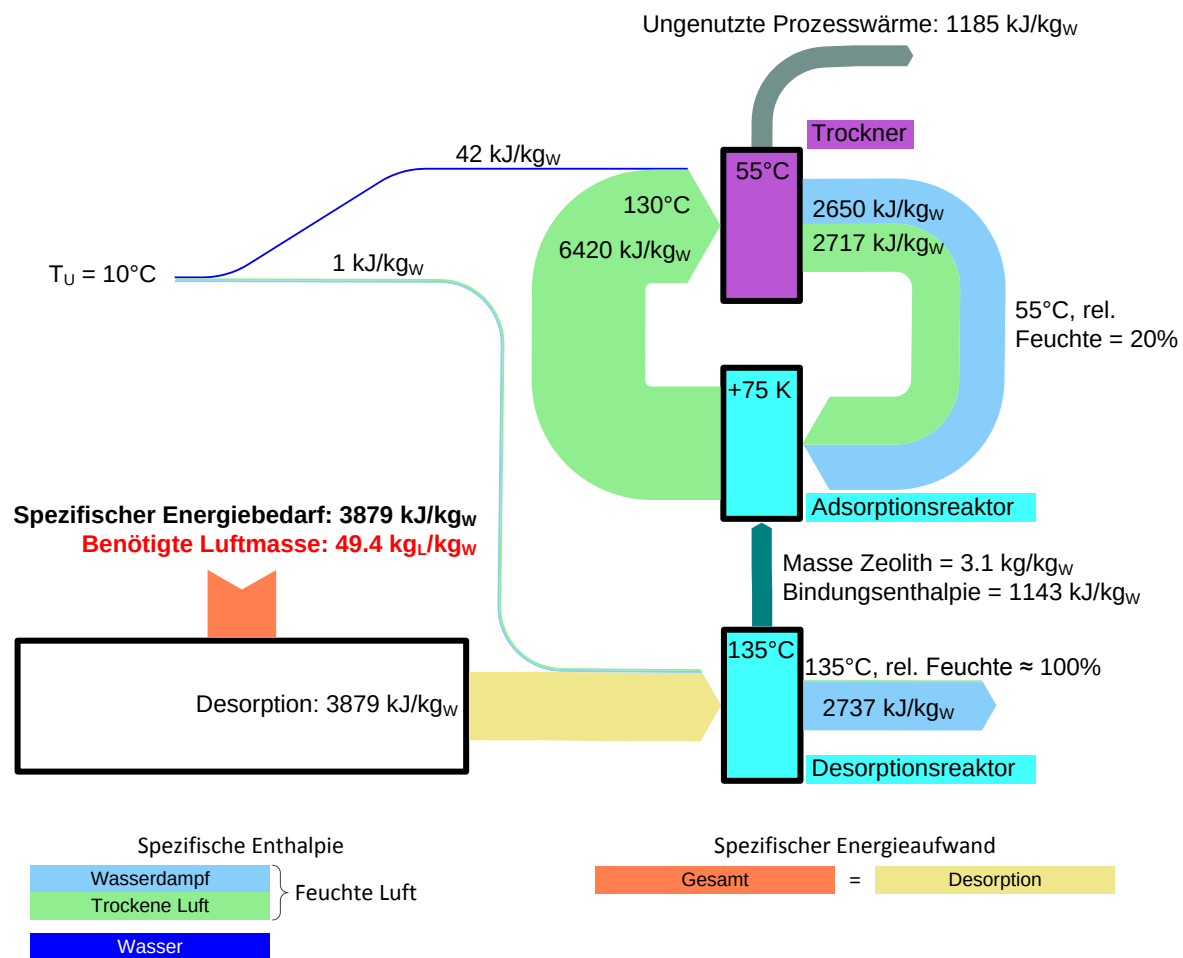


Abbildung 65: Adsorption in Umluft

Umfrage zum Potenzial von Sorptionsprozessen in energetischen Anwendungen

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Forschungsgruppe SORPTION der Hochschule Luzern - Technik & Architektur führt im Rahmen des vom BFE (Bundesamt für Energie) geförderten Projektes „Technische Sorptionsprozesse für energetische Anwendungen“ (TSEA) eine Erhebung zum Meinungs- und Kenntnisbild über Sorptionsprozesse durch.

Gerne nehmen wir auch Ihren Standpunkt mit in die Auswertung auf und freuen uns auf eine rege Teilnahme.

Die Umfrage wird anonym ausgewertet.

Es sind sowohl Personen aus der Industrie, als auch aus der Forschung eingeladen an der Umfrage teilzunehmen.

Die Ergebnisse der Umfrage werden in diesem Frühjahr in Form eines Abschlussberichtes zum Projekt TSEA über das BFE veröffentlicht. Wenn Sie eine Nachricht zur Veröffentlichung des Abschlussberichtes erhalten wollen, können Sie gerne das entsprechende Formularfeld nutzen (der Fragebogen ist dann nicht mehr anonym) oder Sie senden eine separate Mail an stefan.krimme@hslu.ch (der Fragebogen bleibt anonym).

Sie dürfen die Umfrage gerne an interessierte Personen weiterleiten.

Für weitere Informationen über die Forschungsgruppe SORPTION an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur laden wir Sie gerne auf unsere Website ein: www.hslu.ch/sorption

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Umfrage!

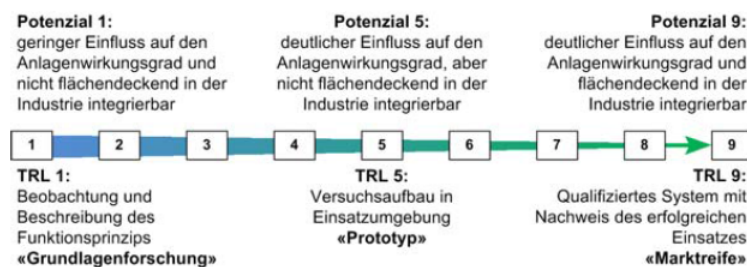
Forschungsgruppe **SORPTION**



Bewertungsskala im Fragebogen

Zur Bewertung des technologischen Reifegrades wird die Skala des „Technology Readiness Level“ (TRL) vom Forschungszentrum Jülich verwendet. Link zur Definition von Anja Degenhardt (2014): <https://goo.gl/JPxTk>

Das Potenzial von Sorptionsprozessen in energetischen Anwendungen wird mit einer äquivalenten Skala bewertet.



Persönlicher Arbeitsbereich

Das Potenzial der Prozesse kann von unterschiedlichen Arbeitsbereichen aus, unterschiedlich wahrgenommen werden. Bitte geben Sie Ihren Arbeitsbereich an.

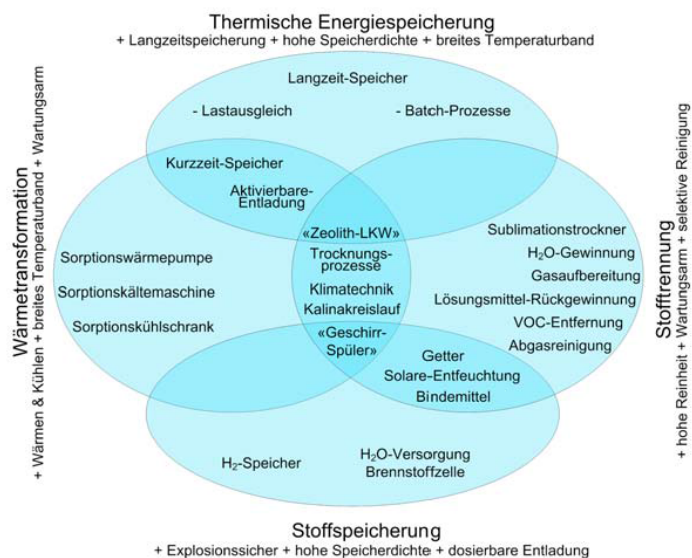
1. Ich arbeite im folgenden Arbeitsbereich:

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Industrie - Allgemein
- ☐ Industrie - F&E
- ☐ Hochschule

Sorptionsprozesse sind vielseitig einsetzbar. Die Prozesse werden gemäss der untenstehenden Abbildung vier Sorptionsklassen zugeordnet.

Abbildung 66: Seite 1/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

**2. Mein Arbeitsbereich umfasst:**

Wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus.

- ☐ Wärmetransformation
- ☐ thermische Energiespeicherung
- ☐ Stofftrennung
- ☐ Stoffspeicherung
- ☐ keinen der genannten Schwerpunkte

3. Optionale Angaben zum Arbeitsbereich

Potenzial der Klasse "Wärmetransformation"

Grobe Einschätzung, auch wenn die jeweiligen Prozesse sehr unterschiedlich sind.

4. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagenforschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

5. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

6. Grösster Hemmnisfaktor (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
- ☐ Integrationskonzept
- ☐ technische Aspekte
- ☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

7. Persönliche Anmerkungen

Potenzial der Klasse "thermische Energiespeicherung"

Grobe Einschätzung, auch wenn die jeweiligen Prozesse sehr unterschiedlich sind.

8. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

9. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

10. Grösster Hemmnisfaktor (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

11. Persönliche Anmerkungen

Potenzial der Klasse "Stofftrennung"

Grobe Einschätzung, auch wenn die jeweiligen Prozesse sehr unterschiedlich sind.

12. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

13. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

14. Grösster Hemmnisfaktor (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

15. Persönliche Anmerkungen

Potenzial der Klasse "Stoffspeicherung"

Grobe Einschätzung, auch wenn die jeweiligen Prozesse sehr unterschiedlich sind.

16. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

17. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

Abbildung 68: Seite 3/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

18. Grösster Hemmnisfaktor (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

19. Persönliche Anmerkungen

Die folgenden zwei Abschnitte beziehen sich auf zwei ausgewählte Prozesse der Klasse "Wärmetransformation"

Sorptionswärmepumpe

Die folgende Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

20. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

21. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

22. Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

23. Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

24. Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

25. Persönliche Anmerkungen

Sorptionskältemaschine

Die folgende Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

26. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

Abbildung 69: Seite 4/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

27. **energetisches Potenzial**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

28. **Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala**

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

29. **Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

30. **Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

31. **Persönliche Anmerkungen**

Die folgenden zwei Abschnitte beziehen sich auf zwei ausgewählte Prozesse der Klasse "thermische Energiespeicherung"

Kurzzeit-Speicher

Zykluszeit < 12 h (mindestens 2 Zyklen/Tag möglich)

Die folgende Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

32. **technologischer Reifegrad**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagenforschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

33. **energetisches Potenzial**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

34. **Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala**

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

35. **Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

36. **Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

37. **Persönliche Anmerkungen**

Langzeitspeicher-Speicher

Zykluszeit > 3 Monate

Die folgende Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

38. **technologischer Reifegrad**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

39. **energetisches Potenzial**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

40. **Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala**

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

41. **Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

42. **Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

43. **Persönliche Anmerkungen**

Die folgenden zwei Abschnitte beziehen sich auf zwei ausgewählte Prozesse der Klasse "Stofftrennung"

Gas-/Luftreinigung

In der Industrie beispielsweise die Abscheidung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) zur Wiederverwendung oder Entsorgung

44. **technologischer Reifegrad**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

45. **energetisches Potenzial**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

Abbildung 71: Seite 6/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

46. **Im Bereich der Gebäudetechnik (Klimatisierung/Dunstabzug) ist die Bewertung gemäss der Skala**

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

47. **Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

48. **Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

49. **Persönliche Anmerkungen**

Luftentfeuchtung

In der Industrie beispielsweise für konditionierte Zuluft von Trocknungsprozessen

50. **technologischer Reifegrad**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

51. **energetisches Potenzial**

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

52. **Im Bereich der Gebäudetechnik (Klimatisierung) ist die Bewertung gemäss der Skala**

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

53. **Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

54. **Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)**

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

55. **Persönliche Anmerkungen**

Die folgenden zwei Abschnitte beziehen sich auf zwei ausgewählte

Prozesses der Klasse "Stoffspeicherung"

H2-Speicher

Die Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

56. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

57. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

58. Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

59. Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

60. Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

61. Persönliche Anmerkungen

Getter

Aufrechterhaltung von Druck und Reinheit in der Unterdrucktechnik

Die Bewertung bezieht sich auf die Anwendung in der Industrie

62. technologischer Reifegrad

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Grundlagen- forschung	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Marktreife

63. energetisches Potenzial

Markieren Sie nur ein Oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
gering	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	hoch

64. Im Bereich der Gebäudetechnik ist die Bewertung gemäss der Skala

Markieren Sie nur ein Oval pro Zeile.

	niedriger	gleich	höher
technologischer Reifegrad	☐	☐	☐
energetisches Potenzial	☐	☐	☐

Abbildung 73: Seite 8/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

65. Grösster Hemmnisfaktor in der Industrie (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

66. Grösster Hemmnisfaktor in der Gebäudetechnik (der einem hohen Verbreitungsgrad entgegen steht)

Markieren Sie nur ein Oval.

- ☐ Systemkosten
☐ Integrationskonzept
☐ technische Aspekte
☐ Konkurrenz-Technologie ist energetisch günstiger/gleich gut

67. Persönliche Anmerkungen

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

68. Bitte senden Sie mir den Downloadlink der Veröffentlichung des Abschlussberichtes an die folgende Mailadresse: (Soll der Fragebogen anonym bleiben, senden Sie bitte eine entsprechende Nachricht zum Erhalt des Downloadlinks an stefan.krimmel@hslu.ch)

Bereitgestellt von
 Google Forms

Abbildung 74: Seite 9/9 der online-Umfrage im Projekt TSEA

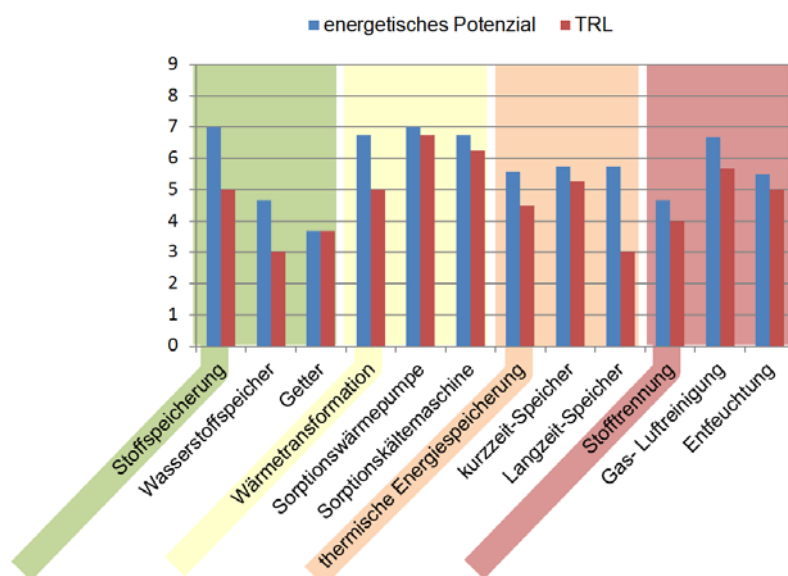


Abbildung 75: Durchschnittliche Bewertungen der Sorptionskategorien und Anwendung in Bezug auf das energetische Potenzial und den TRL im Rahmen der durchgeführten Umfrage

Die im Ampelsystem erstellte farbliche Codierung der Sorptionskategorien gibt von grün nach rot die absteigende Reihenfolge des energetischen Potenzials der Sorptionskategorien wieder, zu denen die Befragten direkte Angaben gemacht haben. Zusätzlich sind zu jeder Sorptionskategorie die Ergebnisse zu den zwei Beispielanwendungen dargestellt. Die Ergebnisse sind in sich nicht schlüssig und stimmen nicht mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein, was auf die Art der Befragung zurückgeführt wird.

Konvektiver Haftwassertrockner

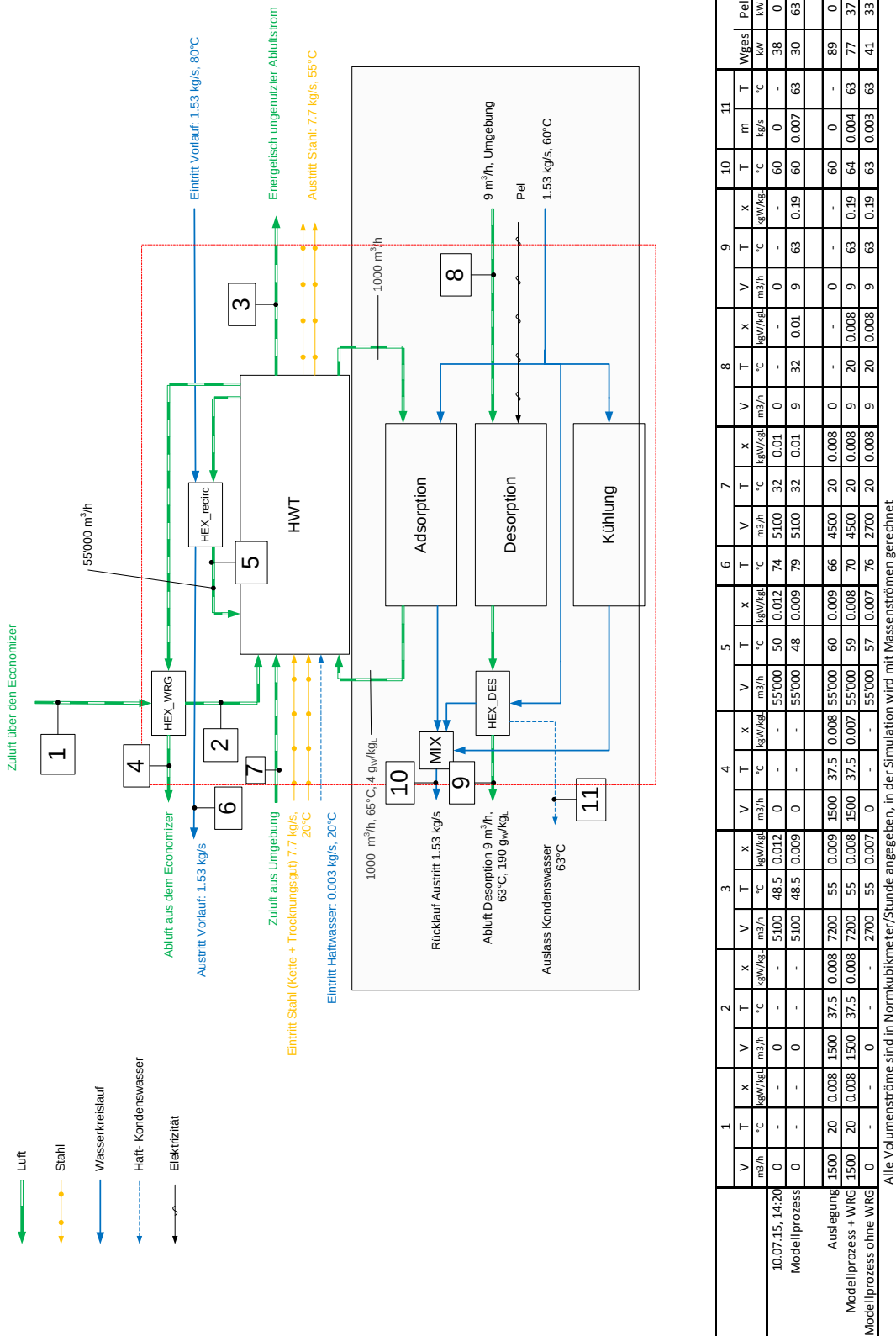


Abbildung 76: Fließbild eines beispielhaften Sorptionsprozesses im Haftwassertrockner mit modellierten energetischen Kennwerten und Zustände der Stoffströme

Vereinfachtes Anlagenschema der Papiertrocknung

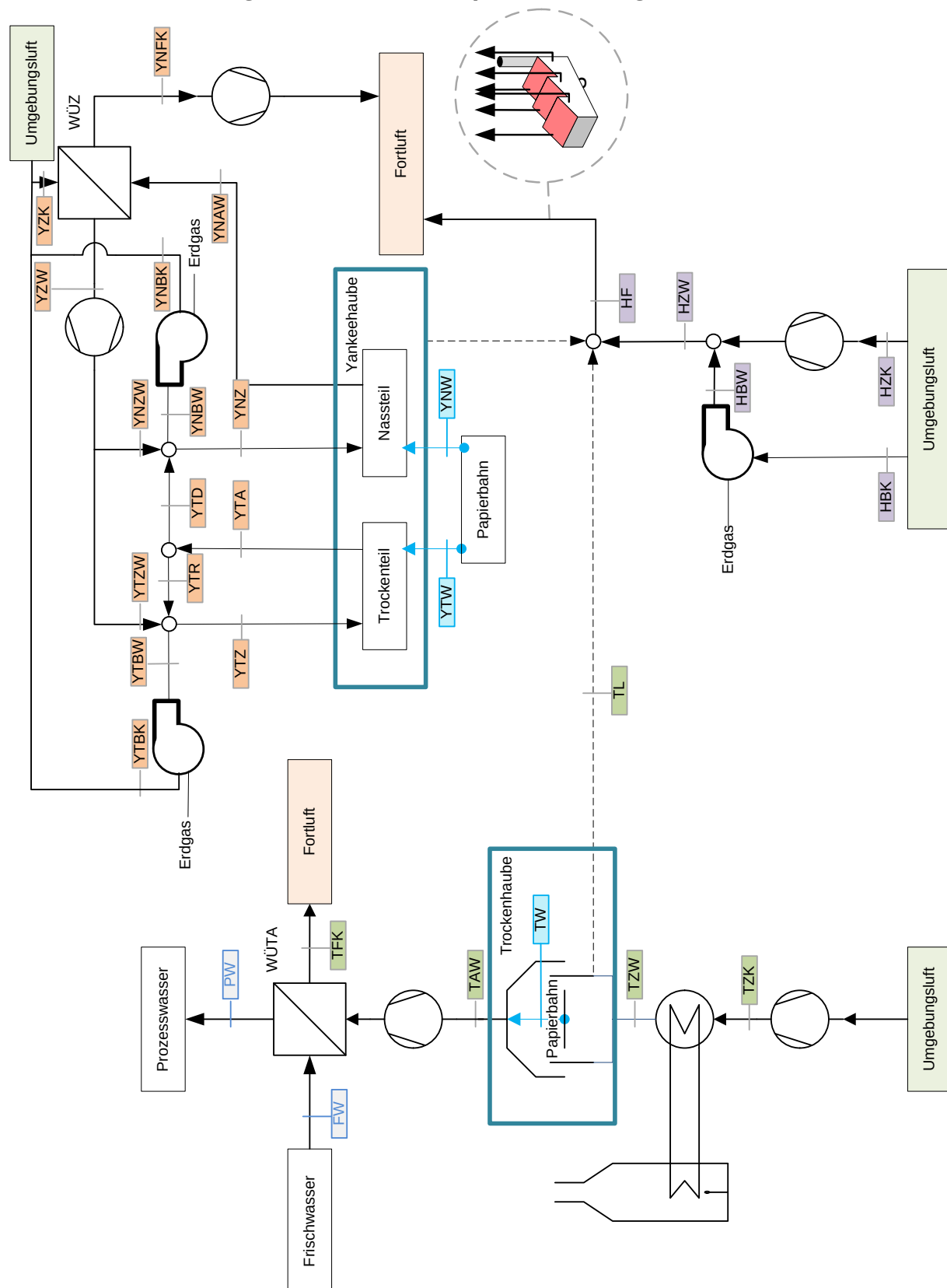


Abbildung 77: Vereinfachtes Schema der betrachteten Anlagenkomponenten bei der Analyse des Papiertrocknungsprozesses (mit internen Bezeichnungen der Stoffströme)