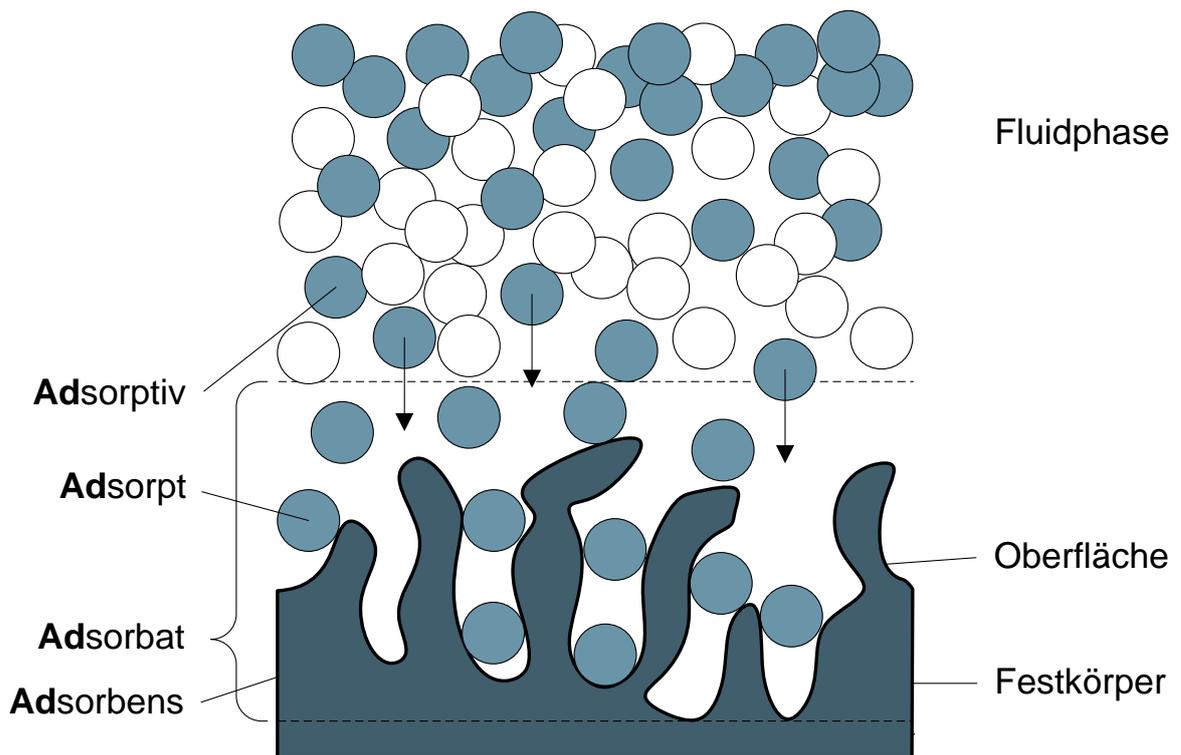




Schlussbericht vom 31.03.2021

# Empfehlungen zum Energieeffizienten Einsatz von Adsorptionsprozessen aus der Gasphase



Quelle: © HSLU 2020



**Datum:** 31.03.2021

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfängerin:**

Hochschule Luzern  
Technikumstrasse 21  
6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

**Autoren:**

Reto Tamburini, HSLU, [reto.tamburini@hslu.ch](mailto:reto.tamburini@hslu.ch)  
Mirko Kleingries, HSLU, [mirko.kleingries@hslu.ch](mailto:mirko.kleingries@hslu.ch)  
Ulf Christian Müller, HSLU, [ulfchristian.mueller@hslu.ch](mailto:ulfchristian.mueller@hslu.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502103-01

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



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines vom Bundesamts für Energie (BFE) kofinanzierten Projektes. ...., bei dem wir uns herzlich bedanken. Insbesondere gilt der Dank Frau Dr. Carina Alles, Bereichsleiterin des Forschungsprogramms «Industrielle Prozesse». Ebenso bedanken wir uns herzlich bei Herrn Florian Brunner des Unternehmens Brunner Energieberatung GmbH, der mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat. Schliesslich danken wir den verschiedenen Mitarbeitenden der Hochschule Luzern – Technik & Architektur, die in unterschiedlichster Weise zum Gelingen des Projekts beigetragen haben.

Horw, im März 2021

Hochschule Luzern – Technik & Architektur

CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik

CC Fluidmechanik & Hydromaschinen



## Zusammenfassung

Innerhalb des umfangreichen BFE-Projektes *SYSKON* (Systematische Konzipierung industrieller Ad- und Desorptionsprozesse) ist von der Hochschule Luzern ein Software-Tool entwickelt worden. Mit diesem Tool lassen sich technische Sorptionsprozesse mithilfe der dynamischen Modellierungsumgebung Modelica® auslegen, modellieren, simulieren und optimieren. Da sich Sorptionsprozesse insbesondere wegen der simultanen Wärme- und Stoffübertragung durch einen hohen Komplexitätsgrad auszeichnen, können viele Sorptionsprozesse nicht das zur Verfügung stehende Potenzial ausschöpfen. In diesem Projekt werden Lösungsansätze erarbeitet und dokumentiert, um systematisch in Bezug auf definierte Zielfunktionen effiziente Prozesse erzielen zu können. Dies wird durch eine Sensitivitätsanalyse einer mit dem genannten Software-Tool modellierten Beispielanwendung mit anschließender Parameterstudie realisiert. Die Empfehlungen wurden schlussendlich in Form eines Leitfadens verfasst.

## Résumé

Un outil logiciel a été développé par la Haute école spécialisée de Lucerne dans le cadre du vaste projet *SYSKON* (Systematic Design of Industrial Adsorption and Desorption Processes) de l'OFEN. Grâce à cet outil, les procédés techniques de sorption peuvent être conçus, modélisés, simulés et optimisés en utilisant l'environnement de modélisation dynamique Modelica®. Comme les processus de sorption sont caractérisés par un haut degré de complexité, notamment en raison du transfert simultané de chaleur et de masse, de nombreux processus de sorption ne sont pas en mesure d'exploiter le potentiel disponible. Dans ce projet, des approches de solutions sont développées et documentées afin de pouvoir réaliser systématiquement des processus efficaces par rapport à des fonctions cibles définies. Ceci est réalisé par une analyse de sensibilité d'un exemple d'application modélisée avec l'outil logiciel mentionné, suivie d'une étude de paramètres. Les recommandations ont finalement été rédigées sous la forme d'une ligne directrice.

## Summary

Within the extensive SFOE project *SYSKON* (Systematic Design of Industrial Adsorption and Desorption Processes), a software tool has been developed by the Lucerne University of Applied Sciences and Arts. With this tool, technical sorption processes can be designed, modeled, simulated and optimized using the dynamic modeling environment Modelica®. Since sorption processes are characterized by a high degree of complexity, in particular due to the simultaneous heat and mass transfer, many sorption processes are not able to exploit the available potential. In this project, solution approaches are developed and documented in order to be able to systematically achieve efficient processes with respect to defined target functions. This is realized by a sensitivity analysis of an example application modeled with the mentioned software tool followed by a parameter study. The recommendations were finally written in the form of a guideline.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>9</b>
1.1	Ausgangslage und Hintergrund .....	9
1.2	Motivation des Projektes .....	9
1.3	Projektziele .....	9
<b>2</b>	<b>Effizienzbewertung eines Sorptionsprozesses</b> .....	<b>10</b>
2.1	Energetischer Trennwirkungsgrad .....	10
2.2	Spezifischer Energiebedarf .....	14
2.3	Spezifische Gestehungskosten .....	14
<b>3</b>	<b>Sensitivitätsanalyse</b> .....	<b>17</b>
3.1	Funktionsweise der Sensitivitätsanalyse .....	17
3.2	Faktoren Sorptionsaufgabe Gasreinigung .....	18
3.3	Faktoren Sorptionsaufgabe Produktgewinnung .....	19
3.4	Sensitivitätsanalyse Sorptionsaufgabe Gasreinigung .....	19
3.5	Sensitivitätsanalyse Sorptionsaufgabe Produktgewinnung .....	20
<b>4</b>	<b>Parameterstudie</b> .....	<b>23</b>
4.1	Parameterstudie Sorptionsaufgabe Gasreinigung .....	24
4.2	Parameterstudie Sorptionsaufgabe Produktgewinnung .....	25
4.3	Pareto-Optimierung .....	27
<b>5</b>	<b>Energetische Analyse</b> .....	<b>32</b>
5.1	Sorptionsaufgabe Gasreinigung .....	32
5.2	Sorptionsaufgabe Produktgewinnung .....	32
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit</b> .....	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung</b> .....	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>36</b>
9.1	Parameterstudien Sorptionsaufgabe Gasreinigung .....	36



## Abkürzungsverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

$A$	Parameter der Kostenfunktion	-
$A$	Beispielfaktor DoE	-
$B$	Parameter der Kostenfunktion	-
$B$	Beispielfaktor DoE	-
$C$	Parameter der Kostenfunktion	-
$C$	Beispielfaktor DoE	-
$C_B$	Base Costs nach Smith	-
$COP_h$	Coefficient of Performance der Heizeinrichtung	-
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/kgK
$c_{p,luft}$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck von Luft	J/kgK
$c_{p,sorbens}$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck des Sorbens	J/kgK
$D$	Parameter der Kostenfunktion	-
$D$	Rotordurchmesser	m
$D$	Beispielfaktor DoE	-
$E$	Beispielfaktor DoE	-
$E_{h1}$	Energie der ersten Heizeinrichtung	J
$E_{real,tot}$	Totale Energie des realen Prozesses	J
$E_{rev,sep}$	Totale Energie des reversiblen Vergleichsprozesses	J
$E_{rev,sep a}$	Reversible molare Trennarbeit bei Teilabtrennung	J
$E_{rev,sep \omega}$	Reversible molare Trennarbeit bei kompletter Abtrennung	J
$E_{rev 400-0}$	Trennarbeit bei Abtrennung von 400 ppm auf 0 ppm	J
$E_{rev 400-200}$	Trennarbeit bei Abtrennung von 400 ppm auf 200 ppm	J
$e_s$	Spezifischer Energiebedarf	kWh/t
$frac_{des}$	Flächenanteil Desorption	-
$H_i$	Heizwert	kWh/kg
$\Delta h_v$	Spezifische Verdampfungsenthalpie	J/kg
$K_{behälter}$	Investitionskosten des Behälters	CHF
$K_{energie,heizung}$	Energiekosten der Heizung	CHF
$K_{energie,lüfter}$	Energiekosten des Lüfters	CHF
$K_{heizregister}$	Investitionskosten des Heizregisters	CHF
$K_{lüfter,ads}$	Investitionskosten des Lüfters der Adsorption	CHF
$K_{lüfter,des}$	Investitionskosten des Lüfters der Desorption	CHF
$K_{platten}$	Investitionskosten der Wärmeübertragerplatten	CHF
$K_{rotor}$	Investitionskosten des Rotors	CHF
$K_{sorbens}$	Investitionskosten des Sorbens	CHF
$K_{vakuum}$	Investitionskosten der Vakuumpumpe	CHF
$k_{el}$	Spezifische Kosten Elektrizität	CHF/kWh
$k_{erdgas}$	Spezifische Kosten Erdgas	CHF/kg
$k_s$	Spezifische Gestehungskosten	CHF/t
$K_{tot}$	Totale Kosten	CHF
$K_{w\&u}$	Kosten Wartung & Unterhalt	CHF
$L$	Rotortiefe	m
$M$	Degressionskoeffizient nach Smith	-
$\dot{m}_{des}$	Massenstrom der Desorptionsluft	kg/s
$\dot{m}_{nutz}$	Massenstrom des gewonnenen Produkts bzw. des gereinigten Gases	kg/s



$\dot{m}_s$	Massenstrom des Wasserdampfs	kg/s
$m_{\text{sorbens}}$	Sorbensmasse	kg
$m_{\text{steam}}$	Dampfmassenstrom	kg/s
$n$	Anzahl Equipment Wechsel	-
$\dot{n}_A$	Stoffstrom der Komponente A	-
$\dot{n}_B$	Stoffstrom der Komponente B	-
$n_y$	Anzahl Jahre	-
$n_{\text{zyk}}$	Zyklenzahl	-
$P_{\text{ads}}$	Leistung des Lüfters der Adsorptionsluft	W
$P_B$	Base Leistung nach Smith	W
$P_{\text{des}}$	Leistung des Lüfters der Desorptionsluft	W
$P_{f1}$	Leistung der ersten Fördereinrichtung	W
$P_{f2}$	Leistung der zweiten Fördereinrichtung	W
$P_{h1}$	Leistung der ersten Heizeinrichtung	W
$P_{h2}$	Leistung der zweiten Heizeinrichtung	W
$P_{h3}$	Leistung der dritten Heizeinrichtung	W
$P_{\text{real,tot}}$	Totale Leistung des realen Prozesses	W
$P_{\text{rev,sep,in}}$	Totale Leistung des reversiblen Prozesses am Eintritt	W
$P_{\text{rev,sep,out}}$	Totale Leistung des reversiblen Prozesses am Austritt	W
$p_{\text{vac}}$	Desorptionsdruck	Pa
$\Delta p_{\text{ads}}$	Druckverlust während der Adsorption	Pa
$\Delta p_{\text{des}}$	Druckverlust während der Desorption	Pa
$R$	Universelle Gaskonstante	J/molK
$T_{\text{amb}}$	Umgebungstemperatur	K
$t_{\text{ads,start}}$	Zeitpunkt des Starts der Adsorption	s
$t_{\text{cyc}}$	Zykluszeit (Ad- und Desorption)	s
$t_{\text{des,end}}$	Zeitpunkt des Endes der Desorption	s
$T_{\text{des}}$	Desorptionstemperatur	K
$t_{\text{steam}}$	Zeitpunkt der Dampfeindüsung	s
$t_1$	Laufzeit der Anlage	s
$T_2$	Austrittstemperatur der Vakuumpumpe	K
$T_{2s}$	Austrittstemperatur einer gedachten isentropen Vakuumpumpe	K
$\dot{V}_{\text{ads}}$	Volumenstrom der Adsorptionsluft	m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}_{\text{des}}$	Volumenstrom der Desorptionsluft	m <sup>3</sup> /s
$V_{\text{gas}}$	Volumenstrom während Adsorption	m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}$	Volumenstrom der Vakuumpumpe	m <sup>3</sup> /s
$x_{\text{in}}$	Stoffmengenanteil am Eintritt	-
$x_{\text{out}}$	Stoffmengenanteil am Austritt	-
$y_A$	Volumenanteil der Komponente A	-
$y_{\text{aus}}$	Volumenanteil am Austritt	-
$y_B$	Volumenanteil der Komponente B	-
$y_{\text{ein}}$	Volumenanteil am Eintritt	-
$Z_1$	Zielfunktion 1	-
$Z_2$	Zielfunktion 2	-
$Z_3$	Zielfunktion 3	-
$Z_4$	Zielfunktion 4	-



### Griechische Buchstaben

$\varepsilon_{wp,real}$	Leistungszahl der realen Wärmepumpe	-
$\varepsilon_{wp,carnot}$	Leistungszahl der Carnot-Wärmepumpe	-
$\zeta_{wp}$	Gütegrad der Wärmepumpe	-
$\eta_{s1}$	Trennwirkungsgrad des ersten hypothetischen Prozesses	-
$\eta_{s2}$	Trennwirkungsgrad des zweiten hypothetischen Prozesses	-
$\kappa$	Isentropenexponent	-



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

In dem umfangreichen und vom BFE geförderten Projekt «*SYSKON* - Systematische Konzipierung industrieller Ad- und Desorptionsprozesse» [1], welches in den Jahren 2017 bis 2020 an der Hochschule Luzern gemeinsam mit zwei Wirtschaftspartnern durchgeführt wurde, konnte ein Software-Programm entwickelt werden, das die systematische Auslegung von Sorptionsprozessen unterstützt. Dieses auf der Modellierungsumgebung Modelica® basierende Programm wurde mit Hilfe einer gut dokumentierten Anwendung validiert und daraufhin für zwei reale Prozesse angewendet. Der erste Prozess hatte das Ziel, ein Produktgas aus einer Gasmischung abzuscheiden. Der zweite Prozess hatte als Aufgabe, verunreinigte Luft zu reinigen, bevor sie in die Umgebung gelangte. Im Projekt *SYSKON* wurden für diese beiden Prozesse Modelle entwickelt und für eine optimale Auslegung dieser Prozesse genutzt.

## 1.2 Motivation des Projektes

Sorptionsprozesse zeichnen sich, insbesondere wegen der simultanen Wärme- und Stoffübertragung, durch einen hohen Komplexitätsgrad aus. Dies hat zur Folge, dass bei der Auslegung von Sorptionsprozessen vielfach nicht das Optimum sämtlicher Parameter ermittelt werden kann, sondern nur Teilaspekte der Sorptionsprozesse optimiert werden. Im einfachsten Falle werden auf der Grundlage von Erfahrungen mit ähnlichen Prozessen anderer Grösse, Scale up/down- bzw. Number up/down-Methoden angewendet. Diesem Umstand ist geschuldet, dass vielfach grosse Potenziale für Energieeinsparungen vorliegen, sie jedoch nicht bekannt sind und auch unklar wäre, wie diese Potenziale erschlossen werden könnten.

## 1.3 Projektziele

Ziel dieses Projektes sind Empfehlungen in Form eines Leitfadens, aus dem hervorgeht, wie sich die Energieeffizienz von industriellen Sorptionsprozessen, bei denen Adsorptive aus der Gasphase abgeschieden werden, optimieren lässt. Dies erfolgt in einem ersten Schritt basierend auf den bereits untersuchten Sorptionsprozessen. In einem zweiten Schritt werden diese Erkenntnisse verallgemeinert, um die Empfehlungen auch für andere Sorptionsprozesse nutzbar zu machen. Es werden die folgenden Fragestellungen in Bezug auf industrielle Sorptionsprozesse beantwortet.

- 1) Welche Parameter bei der Auslegung bzw. dem Betrieb der Prozesse haben den grössten Einfluss auf die Energieeffizienz?
- 2) Welche Eigenschaften der Prozesse werden durch eine Variation dieser Parameter auf welche Art beeinflusst und welche Zielkonflikte ergeben sich daraus? (Sensitivitätsanalyse)
- 3) Wie sollten diese Parameter im Kontext der Zielkonflikte für einen energieeffizienten Betrieb gewählt werden und welche Einsparpotenziale ergeben sich daraus?



## 2 Effizienzbewertung eines Sorptionsprozesses

Das folgende Kapitel beinhaltet eine Herleitung zweier unterschiedlicher Grössen zur Bewertung der energetischen Effizienz eines Sorptionsprozesses. Zum einen ist dies der energetische Trennwirkungsgrad und zum anderen der spezifische Energiebedarf in kWh/t. Des Weiteren werden die spezifischen Gestehungskosten in CHF/t<sub>produkt</sub> als zusätzliche Bewertungsgrösse definiert.

### 2.1 Energetischer Trennwirkungsgrad

Die Bewertung der energetischen Effizienz eines Sorptionsprozesses kann im Allgemeinen in Analogie zum Gütegrad einer Wärmepumpe erfolgen. Mit dem *Gütegrad*  $\zeta_{wp}$  wird die Leistungszahl  $\varepsilon_{wp,real}$  des realen Wärmepumpenprozesses mit der Leistungszahl  $\varepsilon_{wp,carnot}$  eines theoretischen, idealisierten Prozesses (Carnot) verglichen.

$$\zeta_{wp} = \frac{\varepsilon_{wp,real}}{\varepsilon_{wp,carnot}} \quad (2-1)$$

Für Sorptionsprozesse kann als Vergleichsprozess ein theoretischer Prozess definiert werden, der für die Trennung eines Gasgemisches die molare Trennleistung  $P_{rev,sep}$  verwendet:

$$P_{rev,sep} = -y_A \cdot R \cdot T \cdot \ln(y_A) \cdot \dot{n}_A - y_B \cdot R \cdot T \cdot \ln(y_B) \cdot \dot{n}_B \quad (2-2)$$

Für konstante Stoffströme gilt zudem für die Definition der reversiblen molaren Trennarbeit  $E_{rev,sep}$ :

$$E_{rev,sep} = -y_A \cdot R \cdot T \cdot \ln(y_A) - y_B \cdot R \cdot T \cdot \ln(y_B) \quad (2-3)$$

Diese Betrachtung gilt nur für stationäre Prozessführung, ideales Gasverhalten und für eine reversible Trennung. Für Sorptionsprozesse, welche in der Regel ausgeprägt instationär verlaufen, muss die Leistung über die Zeit integriert werden:

$$E_{rev,sep} = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} (P_{rev,sep}) dt \quad (2-4)$$

Hinzu kommt, dass nicht nur die Wärme- und Stoffübertragung instationär verlaufen, sondern auch verschiedene Leistungen, die während eines Prozesszyklus (Ad-/Desorption und ggf. Kühlung) nicht konstant bzw. zu gewissen Zeiten null sein können. Auch diesem Sachverhalt lässt sich über eine Integration dieser Leistungen einfach Rechnung tragen. In den nachfolgend erläuterten Formeln ist daher zusätzlich zur Leistung die jeweilige Energie dargestellt.

Wird die molare Trennleistung bzw. Trennarbeit als Funktion des Volumenanteils der abzutrennenden Komponente dargestellt, ergeben sich die Funktionsverläufe gemäss Abbildung 1, dabei ist links die reversible molare Trennarbeit für die Auftrennung eines binären Gasgemisches zusammen mit der reversiblen molaren Trennarbeit für die Abtrennung einer Komponente aus dem binären Gemisch dargestellt. Dabei zeigt die dunkle Kurve, dass für die Auftrennung eines äquimolaren Gemisches die höchste molare Trennarbeit aufgewendet werden muss. Die helle Kurve zeigt, dass die Trennarbeit



mit sinkendem Volumenanteil der abzutrennenden Komponente stark ansteigt. Die Darstellungen gelten für eine Temperatur von 25°C.

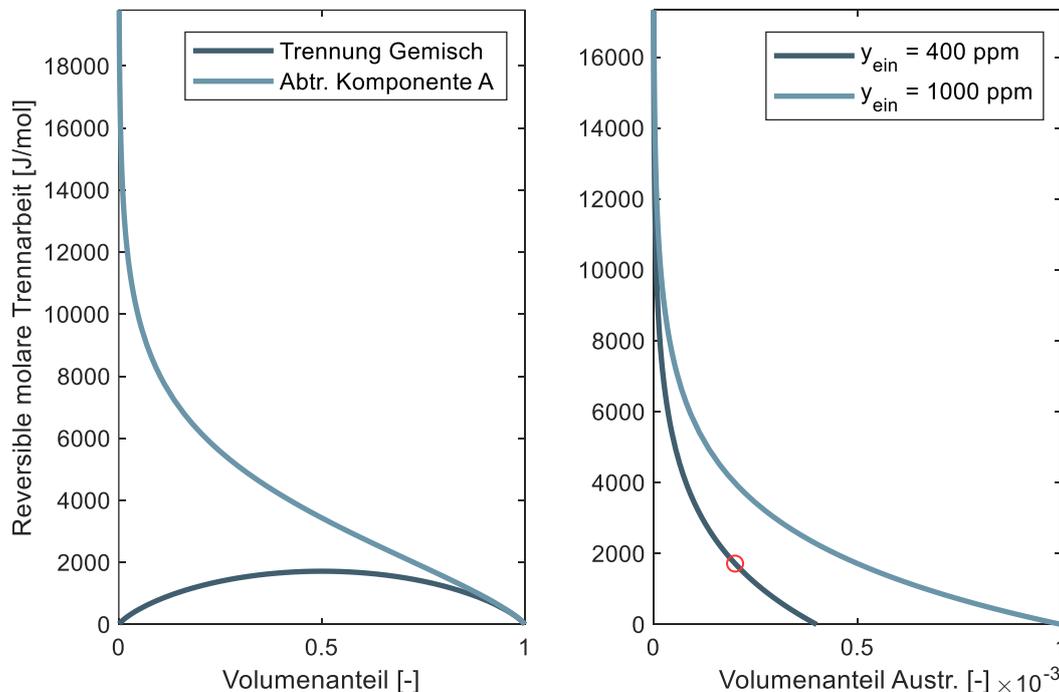


Abbildung 1: Links: Reversible molare Trennarbeit als Funktion des Volumenanteils bei 25°C. Dunkle Kurve: Auftrennung eines binären Gasmisches, helle Kurve: Abtrennung einer gedachten Komponente A. Rechts: Reversible molare Trennarbeit als Funktion des Austrittsvolumenanteils bei 25°C. Helle Kurve: Eintrittskonzentration = 1000 ppm, dunkle Kurve: Eintrittskonzentration = 400 ppm.

Diese Überlegungen bezüglich der reversiblen molaren Trennarbeit können durch eine etwas differenziertere Betrachtung auf eine Abtrennung mit unterschiedlichen Abscheidegraden angewendet werden. Dazu sind in der Abbildung 1 rechts zwei Prozesse definiert worden. Der erste Prozess scheidet eine Komponente aus einer Gasmischung ab, bei welcher die abzuscheidende Komponente am Anfang des Prozesses mit einem Volumenanteil von 400 ppm vorliegt. Der zweite Prozess unterscheidet sich vom ersten lediglich durch einen höheren Anfangsvolumenanteil der abzuscheidenden Komponente von 1000 ppm. Auf der Abszisse ist nun der Volumenanteil am Austritt des Prozesses dargestellt. Die reversible molare Trennarbeit auf der Ordinate bezieht sich nun auf die Abtrennung der Komponente vom genannten Eintrittsvolumenanteil auf den entsprechenden Austrittsvolumenanteil.

$$\Delta E_{rev,sep} = E_{rev,sep,\alpha} - E_{rev,sep,\omega} \quad (2-5)$$

Ist der Austrittsvolumenanteil beispielsweise beim ersten Prozess 400 ppm, erfolgt keine Abtrennung und es gilt:

$$E_{rev,sep,\alpha} = E_{rev,sep,\omega} \quad (2-6)$$



Bzw.:

$$y_{ein} = y_{aus} \quad (2-7)$$

Und entsprechend beträgt die reversible molare Trennarbeit 0 J/mol. Je höher nun der Abscheidegrad gewählt wird, desto grösser wird die aufzuwendende reversible molare Trennarbeit. Für einen realen Trennprozess bedeutet dies, dass es unter Umständen keinen Sinn ergibt, das Gasgemisch möglichst vollständig aufzutrennen. Beispielsweise steigt beim Prozess mit 400 ppm Eintrittskonzentration die reversible molare Trennarbeit stark an, wenn die Austrittskonzentration auf unter 200 ppm (roter Kreis in Abbildung 1) gesenkt wird (dies würde einem Abscheidegrad von 50% entsprechen).

Um nun die aufgewendete Energie des realen Prozesses zu bestimmen, muss eine geeignete Systemgrenze definiert werden. Innerhalb dieses Projektes wird die Systemgrenze gemäss Abbildung 2 definiert, diese bezieht sich auf die beiden betrachteten realen Prozesse aus der Industrie und besitzt keine Allgemeingültigkeit.

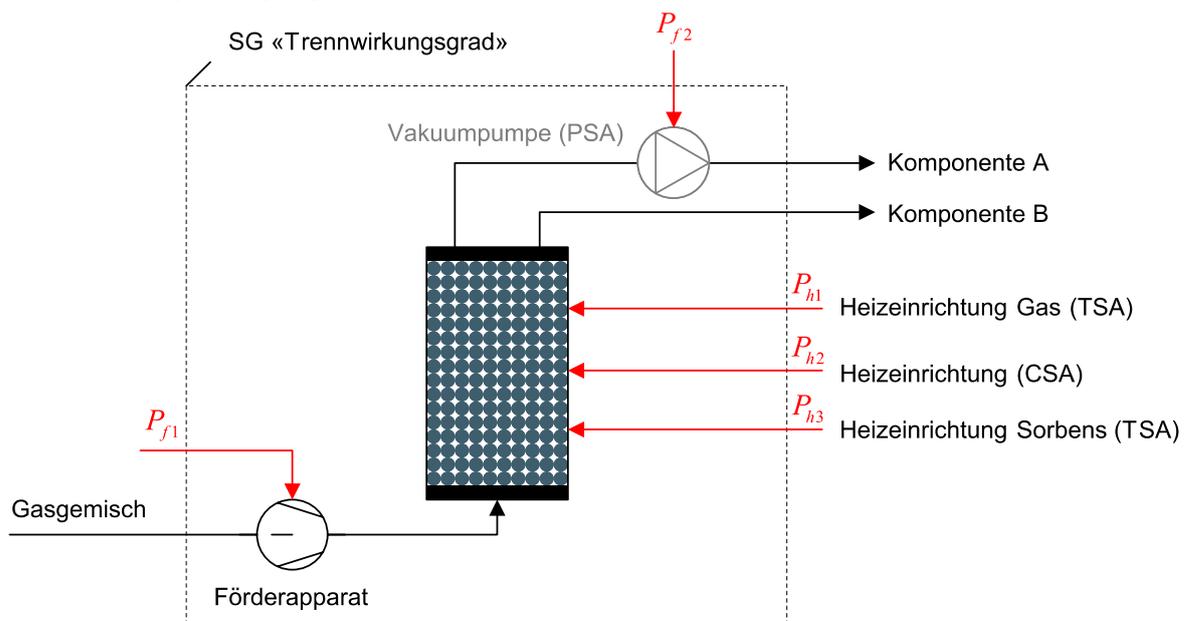


Abbildung 2: Systemgrenze für die Definition der realen Trennarbeit

Die totale reale Trennleistung  $P_{real,tot}$  bzw. die totale reale Trennenergie setzt sich nun aus der Summe der Leistungen des Förderapparates und der Heizeinrichtungen gemäss Formel (2-8) zusammen.

$$P_{real,tot} = \sum P_h, P_f$$

$$E_{real,tot} = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} (\sum P_h, P_f) dt \quad (2-8)$$

Dabei entspricht die Leistung  $P_{h1}$  für eine reine Temperaturwechseldesorption (TSA) der Leistung, die für eine Erhitzung des Gasvolumenstroms von Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  auf Desorptionstemperatur  $T_{des}$  aufgewendet werden muss:



$$P_{h1} = \frac{1}{COP_h} \cdot \dot{m}_{des} \cdot c_p \cdot (T_{des} - T_{amb})$$

$$E_{h1} = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} P_{h1}(t) dt = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} \left[ \frac{1}{COP_h} \cdot \dot{m}_{des} \cdot c_p \cdot (T_{des} - T_{amb}) \right] dt \quad (2-9)$$

$P_{f1}$  entspricht der erforderlichen Leistung, um den Adsorptions- bzw. Desorptionsvolumenstrom zu fördern und den dabei herrschenden Druckverlust zu überwinden.

$$P_{f1} = P_{ads} + P_{des} = \frac{1}{\eta_f} \cdot \dot{V}_{ads} \cdot \Delta p_{ads} + \frac{1}{\eta_f} \cdot \dot{V}_{des} \Delta p_{des}$$

$$E_{f1} = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} P_{f1}(t) dt = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} \left[ \frac{1}{\eta_f} \cdot \dot{V}_{ads} \cdot \Delta p_{ads} + \frac{1}{\eta_f} \cdot \dot{V}_{des} \Delta p_{des} \right] dt \quad (2-10)$$

Kommen zusätzliche Desorptionsverfahren wie CSA oder PSA zum Einsatz, muss die Definition der Leistungen entsprechend angepasst werden. Bei einer zusätzlichen Druckwechseldesorption kommt oftmals eine Vakuumpumpe zum Einsatz, um den Druck unter Atmosphärendruck abzusenken. Dazu kann eine polytrope Verdichtung angenommen werden.

$$P_{f2} = \rho_{gas} \cdot \dot{V}_{aus\ Kenlinie} \cdot c_{p,luft} \cdot \underbrace{(T_2 - T_{amb})}_{Annahme: \eta_{is}=0.6}$$

$$E_{f2} = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} P_{f2}(t) dt = \int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} \left[ \rho_{gas} \cdot \dot{V}_{aus\ Kenlinie} \cdot c_{p,luft} \cdot \underbrace{(T_2 - T_{amb})}_{Annahme: \eta_{is}=0.6} \right] dt \quad (2-11)$$

Dabei berechnet sich die Temperatur  $T_2$  am Eintritt der Vakuumpumpe über die Definition des isentropen Wirkungsgrades:

$$T_2 = \frac{T_{2s} - T_{amb} + \eta_{is} \cdot T_{amb}}{\eta_{is}} \quad (2-12)$$

Mit:

$$T_{2s} = \left( \frac{p_{amb}}{p_2} \right)^{\left( \frac{\kappa-1}{\kappa} \right)} \cdot T_{amb} \quad (2-13)$$

Kommt zusätzlich eine Konzentrationswechseldesorption mit Wasserdampf zum Einsatz, muss die Verdampfungsenthalpie für die Dampferzeugung aufgewendet werden, daraus folgt:

$$E_{h2} = \Delta h_v \cdot \int_0^{t_{des,end}} \dot{m}_s dt \quad (2-14)$$



Und für ein Aufheizen mit Heizwasser entsprechend:

$$E_{h3} = \frac{1}{\eta_h} \cdot n_{cyc} \cdot m_{sorbens} \cdot c_{p,sorbens} \cdot (T_{des} - T_{amb}) \quad (2-15)$$

Aus diesen Energien folgt der energetische Trennwirkungsgrad:

$$\eta_s = \frac{E_{rev,sep}}{E_{real,tot}} = \frac{E_{rev,sep}}{\sum E_h, E_f} = \frac{E_{rev,sep}}{E_{h1} + E_{f1} + E_{h2} + E_{f2} + E_{h3}} \quad (2-16)$$

Dieser energetische Trennwirkungsgrad ermöglicht nun eine Bewertung eines Sorptionsprozesses unter Zuhilfenahme eines Vergleichs mit einer theoretischen, reversiblen Trennarbeit. Dieser Vergleichsprozess kann, genau wie der Carnot-Prozess für Wärmekraftmaschinen, nicht übertroffen werden.

## 2.2 Spezifischer Energiebedarf

Eine alternative Effizienzbewertung für Sorptionsprozesse kann über den spezifischen Energiebedarf erfolgen. Der spezifische Energiebedarf setzt die aufgewendete Energiemenge ins Verhältnis zum durch den Prozess erzeugten Nutzen. Der Nutzen kann anhand von zwei Sorptionsaufgaben unterschiedlich definiert werden:

- Produktgewinnung (Bsp. Lösungsmittel) -> Nutzen: Abgetrennte Gasmenge in t
- Gasreinigung (Bsp. Luftzerlegung, Biogas) -> Nutzen: Gereinigte Gasmenge in t

Der spezifische Energiebedarf in kWh/t lässt sich somit bilden zu:

$$e_s = \frac{E_{h1} + E_{f1} + E_{h2} + E_{f2} + E_{h3}}{\int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} \dot{m}_{nutz} dt} \quad (2-17)$$

Hierbei ist zu beachten, dass der spezifische Energiebedarf, genau wie der energetische Trennwirkungsgrad, von der Adsorptivkonzentration abhängig ist. Je nach übergeordneter Sorptionsaufgabe resultieren dadurch bei niedrigen Adsorptivkonzentrationen spezifische Energiebedarfe, die sich um mehrere Grössenordnungen unterscheiden können.

## 2.3 Spezifische Gestehungskosten

Als dritte Bewertungsgrösse werden die spezifischen Gestehungskosten in CHF/t definiert. Letztere definieren sich zu:

$$k_s = \frac{K_{tot}}{\int_{t_{ads,start}}^{t_{des,end}} \dot{m}_{nutz} dt} \quad (2-18)$$

Die Zusammensetzung der Gesamtkosten  $K_{tot}$  erfolgt gemäss den nachfolgenden Erläuterungen.



Zunächst werden die Kosten in drei Kategorien unterteilt, namentlich: Investitionskosten, Wartung und Unterhalt, Energiekosten. Anschliessend werden sie für die beiden übergeordneten Sorptionsaufgaben definiert.

### 2.3.1 Sorptionsaufgabe Gasreinigung

#### Investitionskosten Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Tabelle 1 beinhaltet die relevanten Komponenten für den Referenzfall zur Sorptionsaufgabe Gasreinigung (Beschreibung im SYSKON Schlussbericht [1]). Die jeweiligen Kosten werden für eine Laufzeit von 30 Jahren auf einen Prozesszyklus aufgeteilt. Dabei werden entsprechend  $n$  Wechsel der jeweiligen Komponente aufgrund von Alterung oder Defekten definiert.

Tabelle 1: Relevante Komponenten der Sorptionsaufgabe Gasreinigung für eine Anlagenlaufzeit von 30 Jahren

Komponente	Parameter	Kostenfunktion $K_i$	Wechsel $n$
Rotor	$A = 7e-11$ $B = 1e-5$ $C = 0.8011$ $D = 282.99$	$K_{rotor} = (A \cdot \dot{V}^3 - B \cdot \dot{V}^2 + C \cdot \dot{V} + D) \cdot n \cdot \frac{t_{cyc} \cdot n_{cyc}}{t_l}$	7
Lüfter Adsorption [2]	$C_B = 1.23e4$ $P_B = 50000$ $M = 0.76$	$K_{lüfter.ads} = C_B \cdot \left(\frac{P_{ads}}{P_B}\right)^M \cdot n \cdot \frac{t_{cyc} \cdot n_{cyc}}{t_l}$	3
Lüfter Desorption [2]	$C_B = 1.23e4$ $P_B = 50000$ $M = 0.76$	$K_{lüfter.des} = C_B \cdot \left(\frac{P_{des}}{P_B}\right)^M \cdot n \cdot \frac{t_{cyc} \cdot n_{cyc}}{t_l}$	3
Heizregister	$A = 5.0115$ $B = 0.6268$	$K_{heizregister} = A \cdot P_{h1}^B \cdot n \cdot \frac{t_{cyc} \cdot n_{cyc}}{t_l}$	3

#### Wartungs- und Unterhaltskosten Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Für die Wartungs- und Unterhaltskosten wird eine Jahrespauschale  $k_{w\&u}$  angenommen.

$$K_{w\&u} = k_{w\&u} \cdot n_y \cdot \frac{t_{cyc} \cdot n_{cyc}}{t_l} \quad (2-19)$$

#### Energiekosten Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Die Energiekosten des Lüfters der Sorptionsaufgabe Gasreinigung  $K_{energie\ lüfter}$  berechnen sich mit den spezifischen Energiekosten für elektrische Energie  $k_{el}$  gemäss:

$$K_{energie\ lüfter} = E_{f1} \cdot k_{el} \quad (2-20)$$

Wobei sich die Lüfterenergie aus den Energien der beiden Lüfter zusammensetzt.

$$E_{f1} = E_{lüfter\ adsorption} + E_{lüfter\ desorption} \quad (2-21)$$

Für die Kosten des Lüfterhitzers  $K_{energie\ heizung}$  wird ein Heizregister mit Erdgasfeuerung angenommen, die Heizkosten setzen sich daher zusammen zu:



$$K_{\text{energie heizung}} = \frac{E_{h1} \cdot 1.3}{H_i} \cdot k_{\text{erdgas}} \quad (2-22)$$

Dabei entspricht dem  $H_i$  Heizwert des Erdgases und  $k_{\text{erdgas}}$  den spezifischen Erdgaskosten.

### 2.3.2 Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

#### Investitionskosten Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Komponenten der Anlage des Referenzfalls Produktgewinnung (Beschreibung im *SYSKON* Schlussbericht [1]), welche signifikante Investitionskosten aufweisen, sind in Tabelle 2 aufgelistet. Auch für den Referenzfall Produktgewinnung werden die Investitionskosten für eine Laufzeit  $t_l$  von 30 Jahren auf einen Zyklus aufgeteilt. Für die Laufzeit von 30 Jahren werden drei Lüfter- bzw. Vakuumpumpenwechsel und sieben Wechsel der Wärmeübertrager vorgesehen. Der Behälter wird nicht gewechselt. Die Investitionskosten setzen sich gemäss Tabelle 2 zusammen.

Tabelle 2: Relevante Komponenten der Sorptionsaufgabe Produktgewinnung für eine Anlagenlaufzeit von 30 Jahren

Komponente	Kostenfunktion $K_i$	Anzahl Wechsel $n$
Sorbens	$K_{\text{sorbens}} = k_{\text{sorbens}} \cdot n \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l}$	7
Lüfter	$K_{\text{lüfter}} = \frac{k_{\text{ref}}}{\dot{V}_{\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_{\text{ads}}}{\Delta p_{\text{ref}}} \cdot \Delta p \cdot n \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l}$	3
Behälter	$K_{\text{behälter}} = k_{\text{behälter}} \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l}$	0
Wärmeübertrager	$K_{\text{wü}} = k_{\text{wü}} \cdot n_{\text{wü}} \cdot n \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l}$	7
Vakuumpumpe [2]	$K_{\text{vakuum}} = K_b \cdot \left( \frac{P_{f2}}{P_b} \right)^{0.44} \cdot n \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l}$	3

#### Wartungs- und Unterhaltskosten Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Für die Wartungs- und Unterhaltskosten wird auch für diese Sorptionsaufgabe eine Jahrespauschale  $k_{w\&u}$  angenommen.

$$K_{w\&u} = k_{w\&u} \cdot n_y \cdot \frac{t_{\text{cyc}} \cdot n_{\text{cyc}}}{t_l} \quad (2-23)$$

#### Energiekosten Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Die Energiekosten setzen sich aus den Energieaufwänden gemäss Kapitel 2.1 zusammen. Diese werden ebenfalls pro Zyklus ausgewertet und mit den spezifischen Energiekosten  $k_{el}$  bzw.  $k_{th}$  multipliziert:

$$K_{\text{energie lüfter}} = E_{f1} \cdot k_{el} \quad (2-24)$$

$$K_{\text{energie heizen}} = (E_{h1} + E_{h2} + E_{h3}) \cdot k_{th} \quad (2-25)$$



Hier ist zu beachten, dass für eine reine Temperaturwechseldesorption lediglich die Energie  $E_{h1}$  nötig ist. Für eine kombinierte Desorption sind entsprechend  $E_{h2}$  (Wasserheizung) und  $E_{h3}$  (Dampferzeugung) nötig.

$$K_{\text{energie vakuum}} = E_{f2} \cdot k_{el} \quad (2-26)$$

## 3 Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität der definierten Parameter (Faktoren) zu bestimmen, wurden die im Projekt SYSKON erstellten Modelica®-Modelle im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung ausgewertet. Die Randbedingungen und die Prozessführung der beiden Sorptionsaufgaben sind im SYSKON-Schlussbericht detailliert beschrieben [1]. Das folgende Kapitel beinhaltet die Definition der Faktoren für die Versuchspläne, sowie die Resultate der Sensitivitätsanalysen der beiden übergeordneten Sorptionsaufgaben.

### 3.1 Funktionsweise der Sensitivitätsanalyse

Bei der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments DoE) werden Experimente in randomisierter Reihenfolge durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein dreistufiger Versuchsplan mit fünf Faktoren ( $A, B, C, D, E$ ) für drei Zielfunktionen ( $Z_1, Z_2, Z_3$ ) erarbeitet. Dies bedeutet:

$$\begin{aligned} Z_1 &= f(A, B, C, D, E) \\ Z_2 &= f(A, B, C, D, E) \\ Z_3 &= f(A, B, C, D, E) \end{aligned} \quad (3-1)$$

Die Zielfunktionen entsprechen den im Kapitel 2 genannten Bewertungsgrößen, für einen allgemeinen Fall können beliebige Zielfunktionen definiert werden. Der Versuchsplan wurde anschliessend vollfaktoriell abgearbeitet, d. h. es wurden alle möglichen Faktorkombinationen berechnet. Bei drei Stufen und fünf Faktoren ergeben sich so  $3^5=243$  Betriebspunkte. Aus den berechneten Daten des Design of Experiments können anschliessend für jede der drei Zielfunktionen zwei Grafiken gemäss Abbildung 3 erstellt werden.

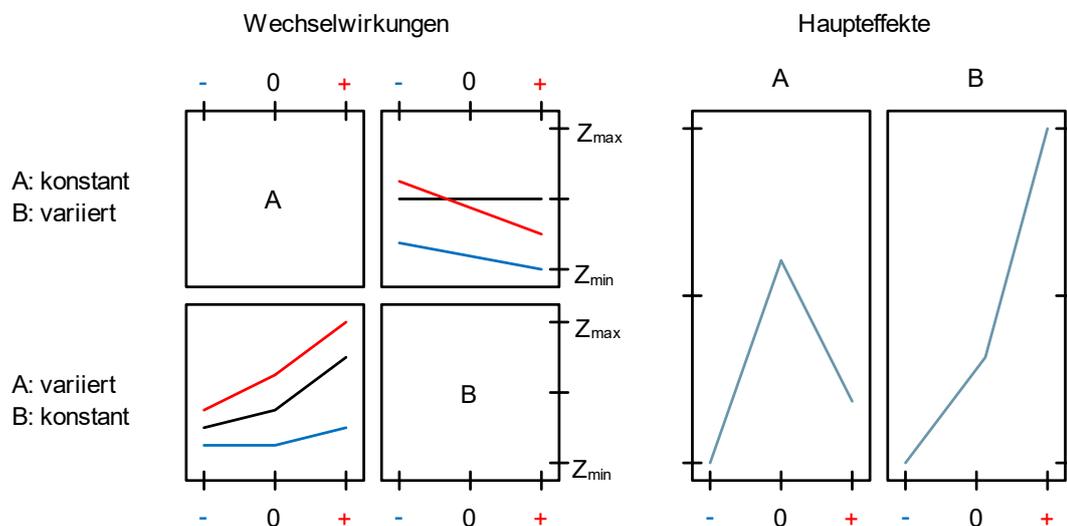


Abbildung 3: Beispiel für Wechselwirkungsplot (links) und Haupteffektplot (rechts) für einen dreistufigen Versuchsplan mit 2 Faktoren (A und B)

In Abbildung 3 ist links der Interaktionsplot zu sehen, in dem jeweils die Zielfunktion in Abhängigkeit der Parameterabstufung dargestellt ist. In der ersten Zeile ist der Faktor A konstant gehalten, während der Faktor B von – bis + variiert wird. In der zweiten Zeile wurde entsprechend Faktor B konstant gehalten und Faktor A variiert. Die Geometrie der Linien lässt nun Schlüsse über das Verhalten des Modells zu. Für die Bewertung wird zwischen Effekten und Wechselwirkungen unterschieden. Als Effekt wird die mittlere registrierte Veränderung der Zielfunktion beim Wechseln der Faktoreinstellungen von – bis + bezeichnet [3]. Diese Effekte werden für die entsprechenden Faktoren als Haupteffekte bezeichnet und sind in Abbildung 3 rechts dargestellt. Wenn nun der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors abhängt, wird dies eine Wechselwirkung genannt. Die Wechselwirkungen sind in Abbildung 3 links unten zu sehen. Dabei entspricht die Wechselwirkung der Steigungsänderung, sind also die eingezeichneten Linien parallel, gibt es keine Wechselwirkung. Es ist jedoch möglich, dass sich die Linien bei starker Wechselwirkung kreuzen. Für die spätere Parameterstudie sind vor allem die Faktorkombinationen interessant, welche eine grosse Wechselwirkung bei gleichzeitig grossen Haupteffekten der beiden Faktoren zeigen.

### 3.2 Faktoren Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Für die Sorptionsaufgabe Gasreinigung wurden die fünf Faktoren gemäss der Tabelle 3 definiert. Die Abstufung der Faktoren erfolgte mit einer Variationsbreite von +- 25%. Eine Begründung der Wahl der Faktoren sowie der Variationsbreite findet sich im SYSKON-Schlussbericht [1]. Der ausgewählte Faktorraum gilt für die betrachtete Sorptionsaufgabe und besitzt keine Allgemeingültigkeit.

Tabelle 3: Faktoren für die Sorptionsaufgabe Gasreinigung mit Stufenfestlegung

Faktor	Formelzeichen	Stufe -	Stufe 0	Stufe +	Einheit
Temperatur Desorptionsluft Eintritt	$T_{des}$	150	200	300	°C
Rotordurchmesser	$D$	1.5	2	2.5	m
Rotortiefe	$L$	0.25	0.5	0.75	m
Zykluszeit	$t_{cyc}$	10	20	40	min
Flächenanteil Desorptionsluft	$frac_{des}$	0.125	0.1875	0.25	-



### 3.3 Faktoren Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Für die Sorptionsaufgabe Produktgewinnung wurden ebenfalls fünf Faktoren gemäss der Tabelle 4 definiert. Auch hier erfolgte die Abstufung der Faktoren mit einer Variationsbreite von +/- 25%. Auch für diesen Fall findet sich die Begründung für die Wahl der Faktoren sowie der Variationsbreite im SYSKON-Schlussbericht [1]. Der ausgewählte Faktorraum gilt auch hier nur für die betrachtete Sorptionsaufgabe und besitzt keine Allgemeingültigkeit.

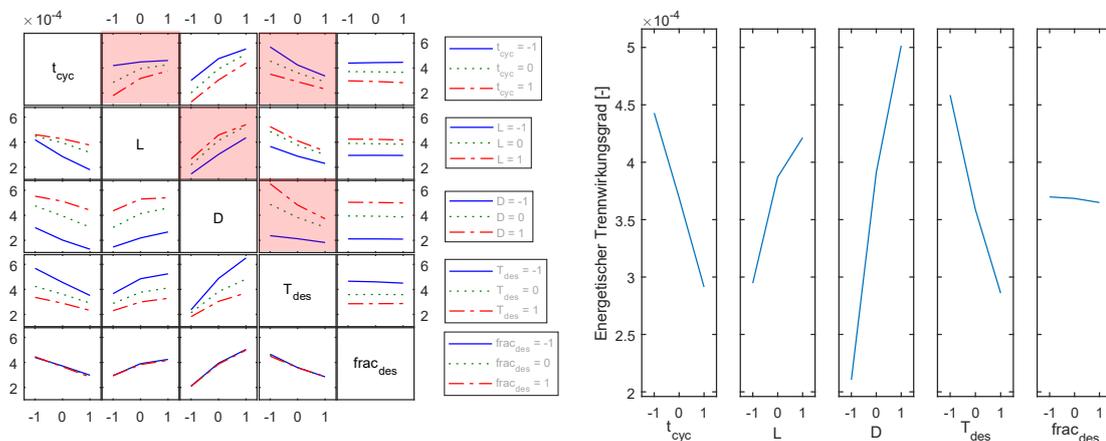
Tabelle 4: Faktoren für die Sorptionsaufgabe Produktgewinnung mit Stufenfestlegung

Faktor	Formelzeichen	Stufe -	Stufe 0	Stufe +	Einheit
Volumenstrom Adsorption	$V_{gas}$	0.75	1	1.25	-
Desorptionsdruck	$p_{vac}$	0.75	1	1.25	-
Zeitpunkt Dampfeindüsung	$t_{steam}$	0.75	1	1.25	-
Dampfmassenstrom	$m_{steam}$	0.75	1	1.25	-
Desorptionstemperatur	$T_{des}$	0.75	1	1.25	-

### 3.4 Sensitivitätsanalyse Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Nachfolgend sind die Interaktionen und Haupteffekte der Sorptionsaufgabe Gasreinigung für die drei Zielfunktionen energetischer Trennwirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten dargestellt. Die für die anschliessende Parametervariation vorgeschlagenen Parameterkombinationen sind jeweils rot hinterlegt.

Die Sensitivitätsanalyse dieser Sorptionsaufgabe zeigt, dass der Haupteffekt des Rotordurchmessers für alle drei Zielfunktionen am grössten ist.



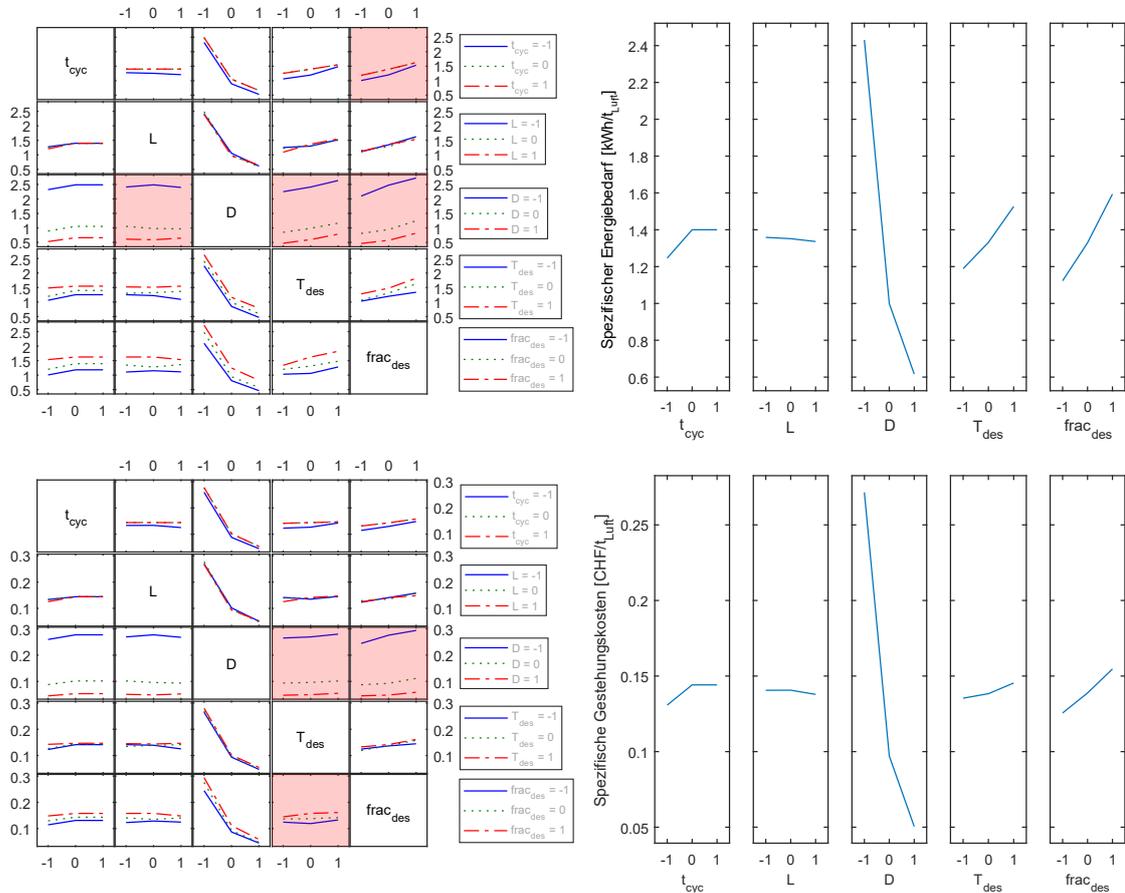


Abbildung 4: Sorptionsaufgabe Gasreinigung, Links: Interaktionsplot, rechts Haupteffektplot mit 5 Faktoren für die Zielfunktionen energetischer Trennwirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten.

Für die Sorptionsaufgabe Gasreinigung werden, aufgrund der resultierenden Haupteffekte und Wechselwirkungen, die folgenden Faktorkombinationen für die Parametervariation definiert:

Tabelle 5: Faktorkombinationen für die Parameterstudie der Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Zielfunktion		
<b>Energetischer Trennwirkungsgrad</b>	<b>Spezifischer Energiebedarf</b>	<b>Spezifische Gesteungskosten</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>D - T_{des}</math></li> <li>• <math>D - t_{cyc}</math></li> <li>• <math>L - t_{cyc}</math></li> <li>• <math>T_{des} - t_{cyc}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>D - frac_{des}</math></li> <li>• <math>D - L</math></li> <li>• <math>T_{cyc} - frac_{des}</math></li> <li>• <math>D - T_{des}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>D - frac_{des}</math></li> <li>• <math>D - T_{des}</math></li> <li>• <math>T_{des} - frac_{des}</math></li> </ul>

### 3.5 Sensitivitätsanalyse Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Dieser Abschnitt beinhaltet die Interaktionen und Haupteffekte der Sorptionsaufgabe Produktgewinnung für die drei Zielfunktionen Energetischer Trennwirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten. Auch hier wurden die für die anschließende Parametervariation vorgeschlagenen Parameterkombinationen jeweils rot hinterlegt. Diese



Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Haupteffekt der Desorptionstemperatur für alle drei Zielfunktionen am grössten ist. Die Zielfunktionen sind hierbei dimensionslos dargestellt.

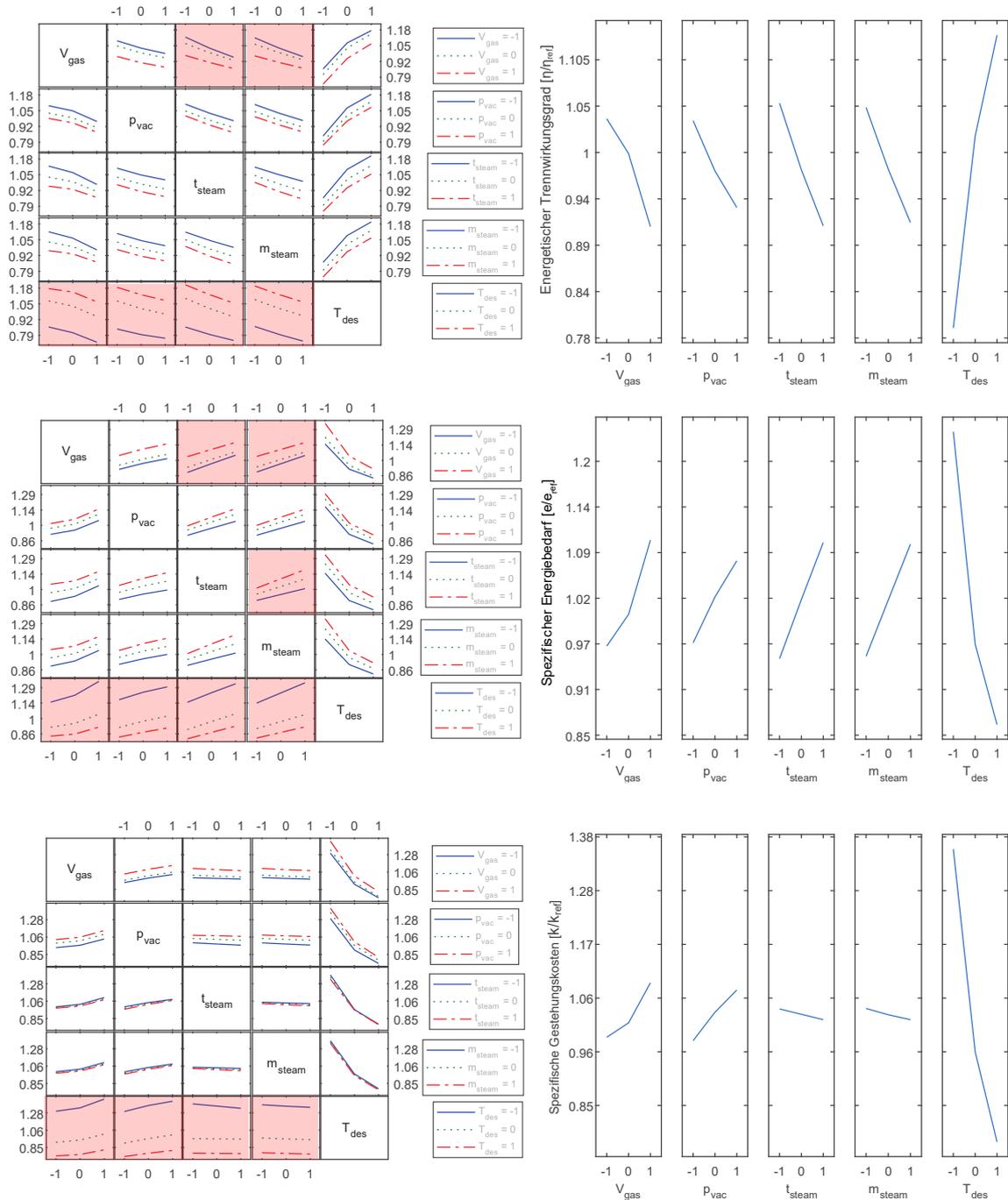


Abbildung 5: Sorptionsaufgabe Produktgewinnung, Links: Interaktionsplot, rechts Haupteffektplot mit 5 Faktoren für die Zielfunktionen energetischer Trennwirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten.



Für die Sorptionsaufgabe Produktgewinnung werden, aufgrund der resultierenden Haupteffekte und Wechselwirkungen, die folgenden Faktorkombinationen für die Parametervariation definiert:

Tabelle 6: Faktorkombinationen für die Parameterstudie der Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Zielfunktion		
<b>Energetischer Trennwirkungsgrad</b>	<b>Spezifischer Energiebedarf</b>	<b>Spezifische Gestehungskosten</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_{des} - m_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - p_{vac}</math></li> <li>• <math>T_{des} - t_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - V_{ads}</math></li> <li>• <math>V_{ads} - m_{steam}</math></li> <li>• <math>V_{ads} - t_{steam}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_{des} - m_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - p_{vac}</math></li> <li>• <math>T_{des} - t_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - V_{ads}</math></li> <li>• <math>t_{steam} - m_{steam}</math></li> <li>• <math>t_{steam} - V_{ads}</math></li> <li>• <math>V_{ads} - m_{steam}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_{des} - m_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - p_{vac}</math></li> <li>• <math>T_{des} - t_{steam}</math></li> <li>• <math>T_{des} - V_{ads}</math></li> </ul>



## 4 Parameterstudie

In diesem Kapitel wird für die beiden Sorptionsaufgaben beispielhaft eine Parameterstudie gezeigt und diskutiert. Die Ergebnisse der restlichen Parameterstudien befinden sich im Anhang. Die Auswertung dazu wurde innerhalb derselben Stufengrenzen (- bis +) wie das Design of Experiments durchgeführt. Allerdings wurde die Stufenzahl auf sechs erhöht. Für die Darstellungen mit jeweils zwei Parametern resultieren so  $6^2 = 36$  Betriebspunkte. Diese Betriebspunkte sind in den Abbildungen jeweils als blaue Punkte dargestellt. Für die Punktwolke wurde anschliessend mittels polynomischer Regression ein Metamodell erstellt. Dieses ist als Fläche dargestellt. Zur besseren Visualisierung einerseits und andererseits zur Ermöglichung einfacher Optimierungen sind die Höhenlinien der Zielfunktionen als schwarze Linien dargestellt.

In Abbildung 6 ist das Ablaufdiagramm der Parameterstudie dargestellt. Im Preprocessing-Schritt wird dabei der Parameterraum mit den zuvor mittels Design of Experiments ermittelten, für die Energieeffizienz relevanten Parameter, definiert. Zusätzlich benötigt das Programm in diesem Schritt die Eingabe der Stufenzahl. Mit dieser Sequenz werden anschliessend im Processing-Schritt das Modelica<sup>®</sup>-Programm automatisiert gestartet und die definierten Betriebspunkte berechnet. Die Resultate der einzelnen Betriebspunkte werden anschliessend als Datasets abgespeichert. Im Postprocessing-Schritt erfolgt schliesslich die Bestimmung des Metamodells. Für zwei definierte Zielfunktionen kann anschliessend eine Paretofront ausgegeben werden. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in Kapitel 4.3.

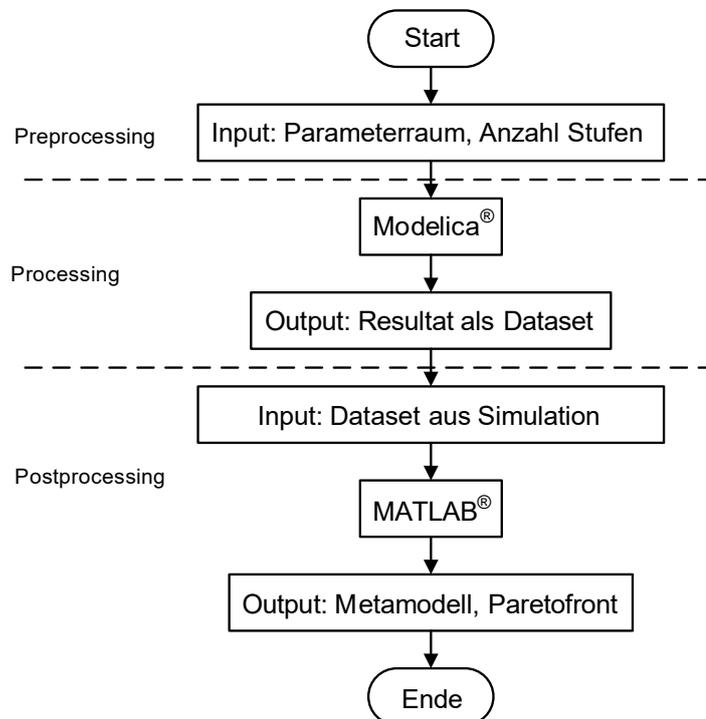


Abbildung 6: Ablaufdiagramm der Parameterstudie



## 4.1 Parameterstudie Sorptionsaufgabe Gasreinigung

Die Abhängigkeit des energetischen Trennwirkungsgrads der Sorptionsaufgabe Gasreinigung ist in Abhängigkeit der Zyklusdauer und des Rotordurchmessers in Abbildung 7 dargestellt. Aus dieser Grafik lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- soll der energetische Trennwirkungsgrad für den betrachteten Parameterraum möglichst hoch sein, muss der Rotordurchmesser am oberen Ende des Parameterraums liegen.
- eine Erhöhung des Rotordurchmessers von 1.5 auf 2.5 m, bei Fixierung der Zyklusdauer, führt zu einer Erhöhung des energetischen Trennwirkungsgrades um nahezu 100%.
- eine Absenkung der Zykluszeit von 2500 auf 600 s, bei Fixierung des Rotordurchmessers, führt zu einer Erhöhung des energetischen Trennwirkungsgrades um ebenfalls ca. 100%. Dies gilt allerdings nur für den Fall eines Rotordurchmessers von 1.5 m.
- die Zyklusdauer sollte möglichst klein sein (600 s).
- ausgehend vom Referenzzustand des Prozesses bei 2 m Rotordurchmesser und einer Zykluszeit von 1200 s, resultiert ein Einsparpotenzial von ca. 30%.
- der Einfluss des Rotordurchmessers auf die Zielfunktion ist dominierend.
- für beide Abhängigkeiten lassen sich nur kleine Nichtlinearitäten feststellen.

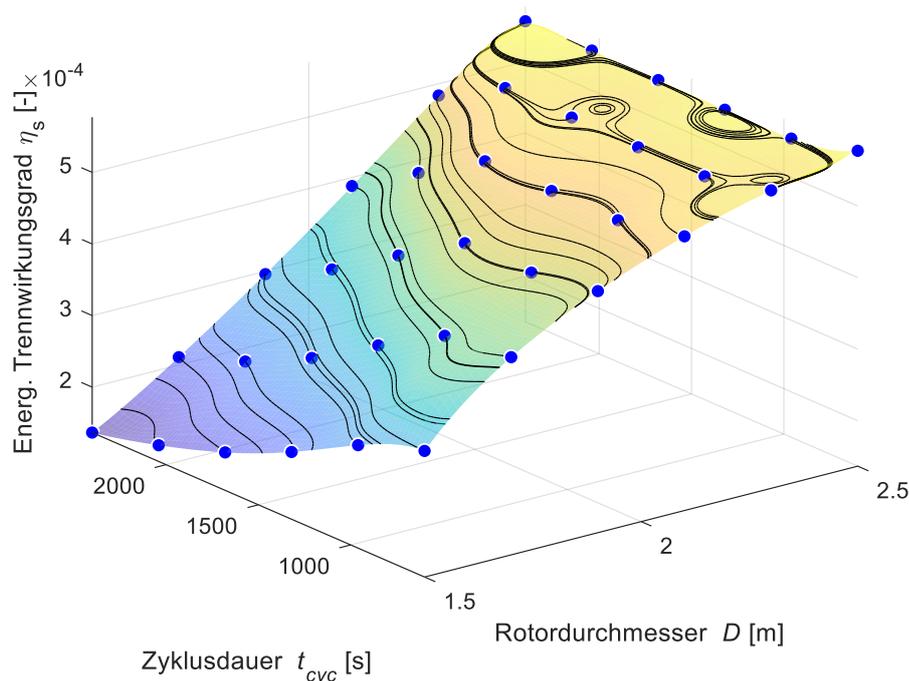


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den energetischen Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Zyklusdauer und des Rotordurchmessers. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

Eine beispielhafte Darstellung für den spezifischen Energiebedarf ist in Abbildung 8 zu sehen. Aus dieser Grafik lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- soll der spezifische Energiebedarf für den betrachteten Parameterraum möglichst niedrig sein, muss der Rotordurchmesser 2.5 m betragen.



- eine Erhöhung des Rotordurchmessers von 1.5 auf 2.5 m, bei Fixierung der Desorptionstemperatur, führt zu einer Absenkung des spezifischen Energiebedarfs um ca. 1.5 kWh/t<sub>Luft</sub>.
- eine Absenkung der Desorptionstemperatur von 300 auf 150°C, bei Fixierung des Rotordurchmessers führt lediglich zu einer marginalen Senkung des spezifischen Energiebedarfs.
- ausgehend vom Referenzzustand des Prozesses bei 2 m Rotordurchmesser und einer Desorptionstemperatur von 200°C, resultiert ein Einsparpotenzial von ca. 1kWh/t<sub>Luft</sub>. Für ein Jahr Betriebszeit entspricht dies einer Einsparung von ca. 232 MWh.
- der Einfluss des Rotordurchmessers auf die Zielfunktion ist auch hier dominierend.
- für die Abhängigkeit vom Rotordurchmesser lässt sich eine Nichtlinearität feststellen.

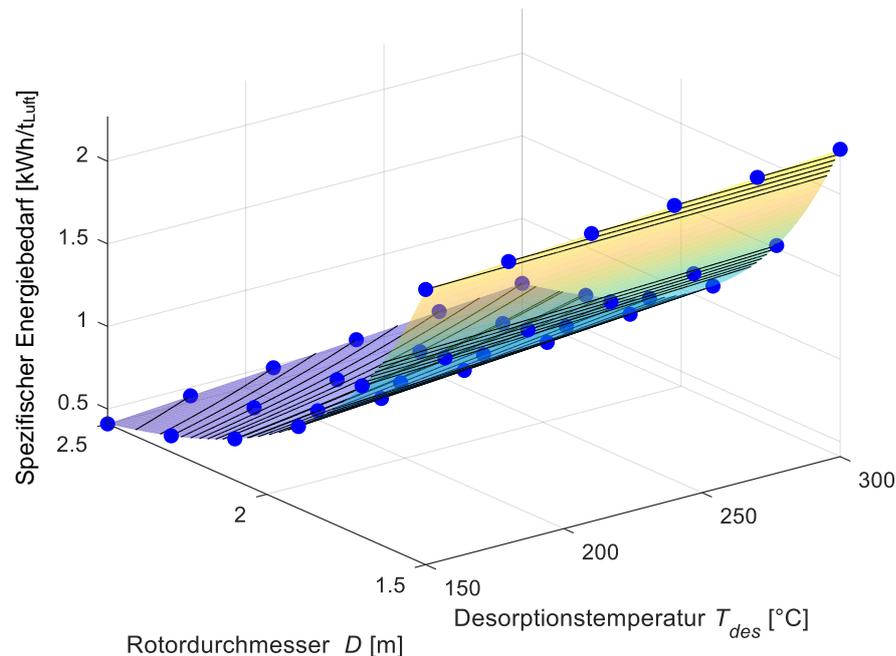


Abbildung 8: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den spezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit des Rotordurchmessers und der Desorptionstemperatur. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

## 4.2 Parameterstudie Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Für die Sorptionsaufgabe Produktgewinnung ist in Abbildung 9 der energetische Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Desorptionstemperatur und des Dampfmassenstroms dargestellt. Für diese Betrachtung lassen sich ebenfalls einige Schlüsse ziehen:

- soll der energetische Trennwirkungsgrad für den betrachteten Parameterraum möglichst hoch sein, muss das Verhältnis  $T_{des}/T_{ref}$  1.22 betragen.
- gleichzeitig sollte das Verhältnis  $m_{steam}/m_{ref}$  mit 0.78 möglichst klein sein.
- eine Erhöhung des Verhältnisses  $T_{des}/T_{ref}$  von 0.78 auf 1.22, bei Fixierung des Dampfmassenstromverhältnisses, führt zu einer Erhöhung des energetischen Trennwirkungsgrades um ca. 35%.



- eine Absenkung des Verhältnisses  $m_{\text{steam}}/m_{\text{ref}}$  von 1.22 auf 0.78, bei Fixierung des Desorptionstemperaturverhältnisses führt nur zu einer kleinen Erhöhung des energetischen Trennwirkungsgrades um ca. 12%.
- ausgehend vom Referenzzustand des Prozesses bei  $m_{\text{steam}}/m_{\text{ref}} = 1$  und einem Verhältnis  $T_{\text{des}}/T_{\text{ref}} = 1$ , resultiert ein Einsparpotenzial von ca. 23%.
- bei dieser Betrachtung ist der Einfluss der Desorptionstemperatur auf die Zielfunktion dominierend.
- es lassen sich für beide Abhängigkeiten nur kleine Nichtlinearitäten feststellen.

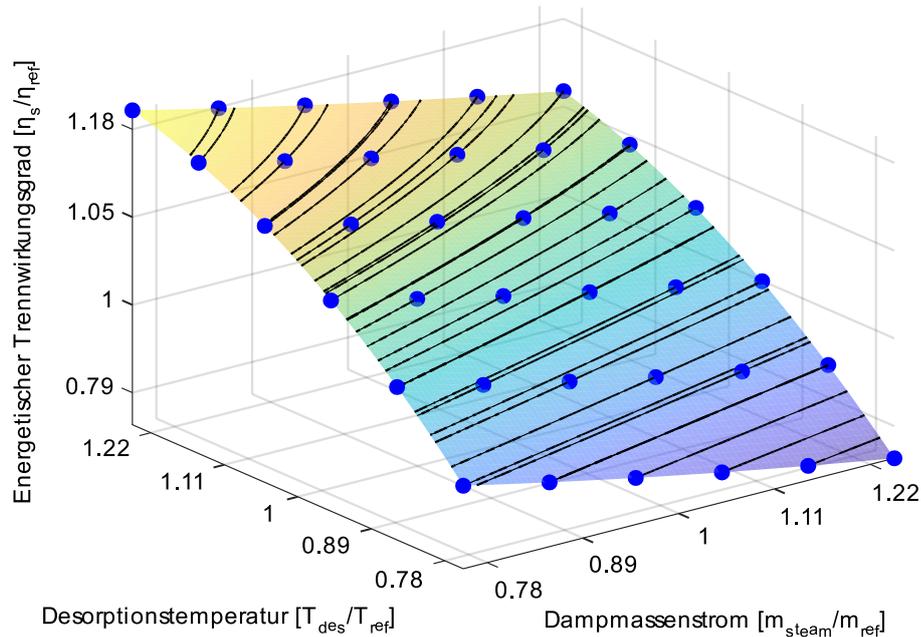


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den energetischen Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Desorptionstemperatur und des Dampfmassenstroms. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomialisch gefittetes Metamodell

Auch für diese Sorptionsaufgabe ist eine weitere Zielfunktion in Abhängigkeit zweier Parameter dargestellt, siehe Abbildung 10. Aus dieser Darstellung lassen sich wiederum Schlüsse ziehen:

- soll der spezifische Energiebedarf für den betrachteten Parameterraum möglichst niedrig sein, muss das Verhältnis  $T_{\text{des}}/T_{\text{ref}}$  1.22 betragen.
- gleichzeitig sollte das Dampfmassenstromverhältnis möglichst klein sein (0.78).
- eine Erhöhung des Verhältnisses  $T_{\text{des}}/T_{\text{ref}}$  von 0.78 auf 1.22, bei Fixierung des Dampfmassenstroms, führt zu einer Absenkung des Verhältnisses  $\eta_s/\eta_{\text{ref}}$  um ca. 43%.
- eine Absenkung des Verhältnisses  $m_{\text{steam}}/m_{\text{ref}}$  von 1.22 auf 0.78 führt nur zu einer kleinen Absenkung des Verhältnisses  $e/e_{\text{ref}}$  um ca. 5%.
- ausgehend vom Referenzzustand des Prozesses bei  $m_{\text{steam}}/m_{\text{ref}} = 1$  und einem Verhältnis  $T_{\text{des}}/T_{\text{ref}} = 1$ , resultiert ein Einsparpotenzial von ca. 14%.

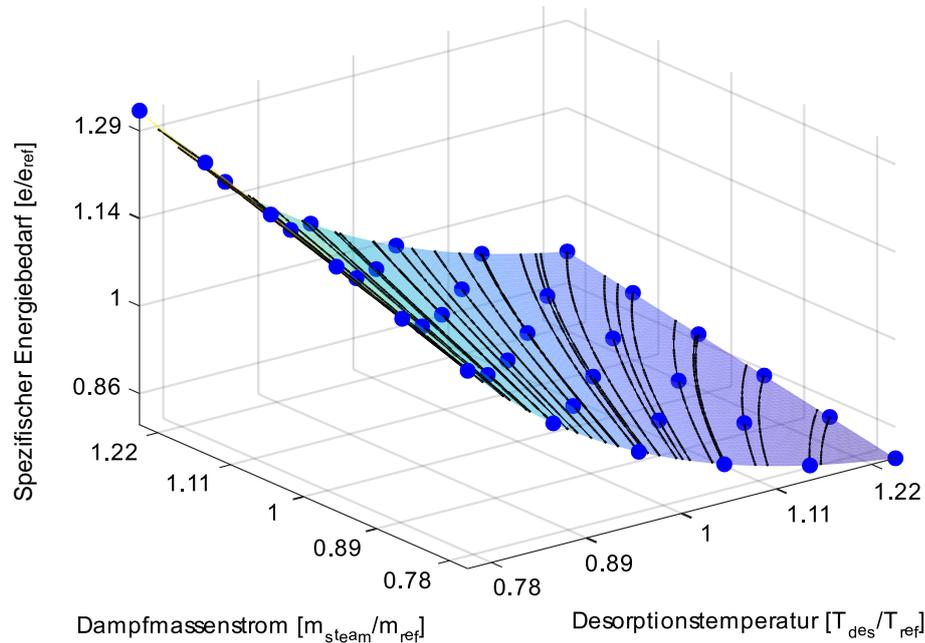


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den spezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit der Desorptionstemperatur und des Dampfmassenstroms. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

Diese Grafiken sind für sämtliche in den Kapiteln 3.4 und 3.5 rot hinterlegten Parameterkombinationen berechnet und dargestellt worden, siehe Anhang.

Für die drei Zielfunktionen sind innerhalb einer multikriteriellen Analyse für beide Sorptionsaufgaben keine Zielkonflikte gefunden worden.

## 4.3 Pareto-Optimierung

### 4.3.1 Funktionsweise der Pareto-Optimierung

Im Falle von nur einer Zielfunktion wird bei der Lösung eines Optimierungsproblems nur ein Extremwert, wie in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben, bestimmt. In einem multikriteriellen Fall, also einem Fall mit mehreren, widersprüchlichen Zielfunktionen ergeben sich keine Extremwerte, sondern eine Menge an Kompromisslösungen (Pareto-Menge) [3]. Für die Visualisierung dieser Kompromisslösungen bietet sich im Allgemeinen die Darstellung als Paretofront gemäss Abbildung 11 an. Diese optimalen Lösungen (Pareto-Lösungen) befinden sich dabei auf der Paretofront. Lösungen oberhalb der Paretofront sind nicht realisierbar und Lösungen unterhalb der Paretofront sind nicht optimal. Ausgehend von einer Pareto-Lösung kann eine Verbesserung einer Zielfunktion nur auf Kosten von mindestens einer anderen Zielfunktion erhalten werden [4]. In Abbildung 11 rechts hat beispielsweise eine Erhöhung von  $f_2$  unter Beibehaltung einer optimalen Lösung, also einer Verschiebung entlang der Paretofront, zwingend eine Absenkung bzw. Verschlechterung von  $f_1$  zur Folge.

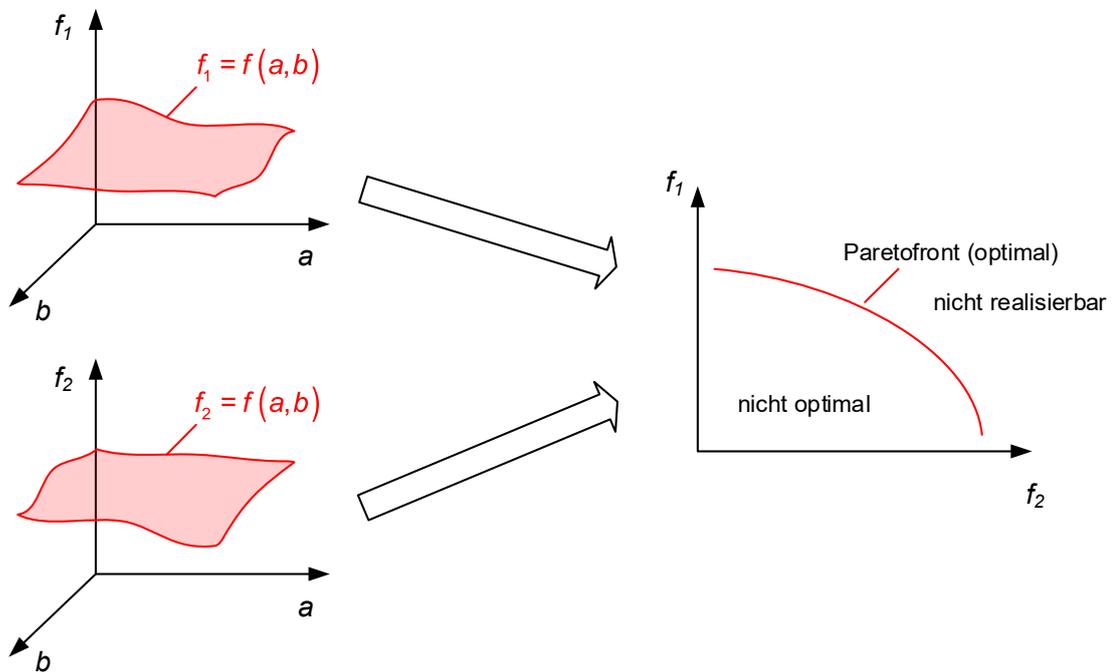


Abbildung 11: Links: Multikriterieller Optimierungsfall mit zwei widersprüchlichen Zielfunktionen in Abhängigkeit der Parameter a und b. Rechts: Darstellung aller Kompromisslösungen für die Zielfunktionen  $f_1$  und  $f_2$  als Paretofront.

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen der beiden Sorptionsaufgaben mit den definierten Parameterräumen sind keine widersprüchlichen Zielfunktionen gefunden worden. Dass solche Zielfunktionen jedoch widersprüchlich vorliegen können, kann durch die Überlegungen im nächsten Unterkapitel gezeigt werden.

#### 4.3.2 Identifikation von konkurrierenden Zielfunktionen

Um konkurrierende Zielfunktionen zu identifizieren wird zunächst ein hypothetischer Prozess definiert. Dieser Prozess scheidet eine Komponente aus einer binären Gasmischung ab, in welcher die Komponente mit einer Konzentration von 400 ppm vorliegt. Nun wird der Prozess auf zwei unterschiedliche Arten betrieben. Die erste Prozessführung scheidet die gesamte Komponente ab, während bei der zweiten Prozessführung die Komponente lediglich bis auf 200 ppm entfernt wird. Entsprechend können nun gemäss Kapitel 2.1 die nötigen reversiblen molaren Trennarbeiten berechnet werden. Durch eine Division mit der molaren Masse der Komponente resultieren die etwas anschaulicheren Trennarbeiten bezogen auf 1 kg abgetrennte Komponente:

$$\begin{aligned} E_{rev400-0} &= 0.138 \text{ kWh/kg} \\ E_{rev400-200} &= 0.0108 \text{ kWh/kg} \end{aligned} \quad (4-1)$$

Für den realen Prozess wird nun eine reale Trennarbeit  $E_{real400-0}$  von 7 kWh/kg für den ersten Prozess angenommen. Damit kann der energetische Trennwirkungsgrad  $\eta_{s1}$  für Prozess 1 berechnet werden:

$$\eta_{s1} = \frac{E_{rev400-0}}{E_{real400-0}} = 1.97\% \quad (4-2)$$



Nun kann für die zweite reale Trennarbeit folgende Überlegung gemacht werden: Die kleinstmögliche reale Trennarbeit für den zweiten Prozess entspricht der reversiblen Trennarbeit von 0.0108 kWh/kg. Wäre sie noch kleiner würde der Prozess den reversiblen Fall übertreffen, was dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widersprechen würde. Nun können für den zweiten Prozess sämtliche möglichen Betriebspunkte berechnet werden. Die Betriebspunkte weisen reale Trennarbeiten  $E_{real\ 400-0}$  von 7 kWh/kg (gleicher Energiebedarf wie Prozess 1) bis 0.0108 kWh/kg (minimal möglicher Energiebedarf) auf. Werden für jede dieser realen Trennarbeiten die Trennwirkungsgrade  $\eta_{s2}$  berechnet, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 12. Dabei zeigt sich, dass der energetische Trennwirkungsgrad umso grösser wird, je kleiner die reale Trennarbeit ist. Der rot eingezeichnete Kreis entspricht dem Betriebspunkt des zweiten Prozesses, welcher denselben energetischen Trennwirkungsgrad aufweist wie der erste Prozess (1.97%). Bei dem roten Kreis findet nun ein Umschlag statt. Für diejenigen Betriebspunkte, welche sich in diesem Diagramm rechts vom roten Kreis befinden, ist der energetische Trennwirkungsgrad des zweiten Prozesses kleiner als der des ersten Prozesses. Für die Punkte links von der roten Markierung ist der energetische Trennwirkungsgrad entsprechend grösser. Da die reale Trennarbeit von Prozess 1 nach Prozess 2 in jedem Fall sinkt, jedoch der Trennwirkungsgrad für die Betriebspunkte rechts des roten Kreises ebenfalls sinkt, ist eine konkurrierende Zielfunktion aufgezeigt worden.

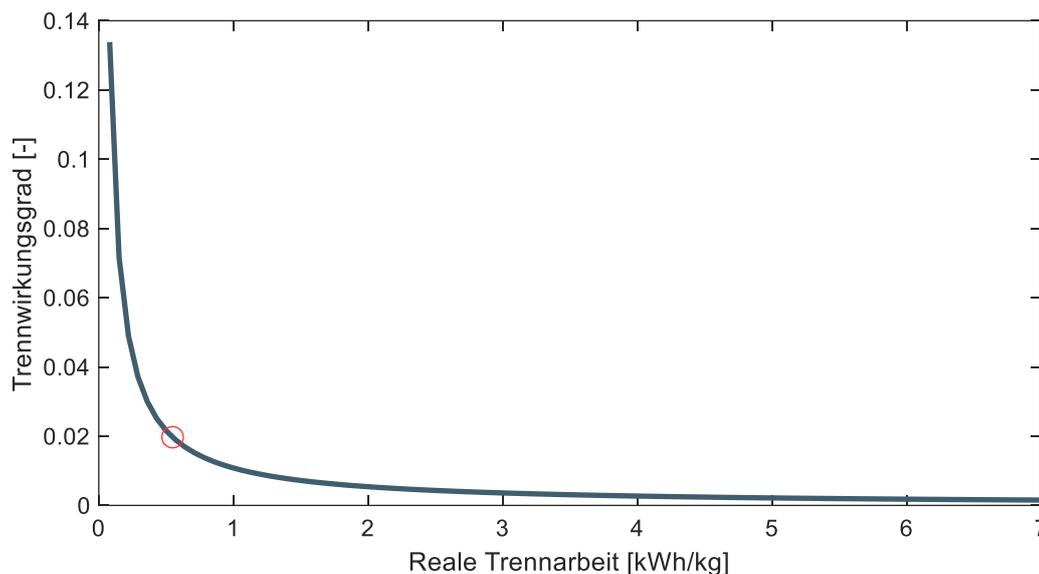


Abbildung 12: Energetischer Trennwirkungsgrad als Funktion der realen Trennarbeit für den hypothetischen Prozess 2, welcher ein Produkt von 400 ppm auf 200 ppm abscheidet.

#### 4.3.3 Beispielrechnung

Um ein reales Beispiel mit zwei konkurrierenden Zielfunktionen zu finden, wurden zwei weitere Eingangsparameter für eine Parameterstudie definiert, die Adsorptions- und die Desorptionszeit  $t_{ads}$  bzw.  $t_{des}$ . Anschliessend wurden Parameterstudien für die Zielfunktionen aus Kapitel 2 durchgeführt. Zusätzlich wurde noch der Abscheidegrad in  $\text{kg}_{\text{Produkt}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$  definiert und dafür ebenfalls eine Parameterstudie durchgeführt. Die Resultate sind in Abbildung 13 dargestellt. Wird nun das Diagramm für die Adsorptionszeit betrachtet, kann folgendes festgestellt werden:

1. ...dass der Trennwirkungsgrad mit steigender Adsorptionszeit steigt
2. ...dass der spez. Energiebedarf mit steigender Adsorptionszeit abnimmt
3. ...dass die spez. Gestehungskosten mit steigender Adsorptionszeit zunehmen



4. ...dass der Abscheidegrad mit steigender Adsorptionszeit abnimmt

Die Punkte 1 und 2 widersprechen sich nicht. Jedoch können die Punkte 3 und 4 verglichen mit den Punkten 1 und 2 irritierend wirken: der spezifische Energiebedarf nimmt ab, wobei die spezifischen Gesteungskosten steigen, der spezifische Energiebedarf nimmt ab, wobei der Abscheidegrad sinkt, der Trennwirkungsgrad steigt, während der Abscheidegrad abnimmt. Daher sind die Zielfunktionen spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten bzw. spezifischer Energiebedarf und Abscheidegrad bzw. Trennwirkungsgrad und Abscheidegrad konkurrierende Zielfunktionen.

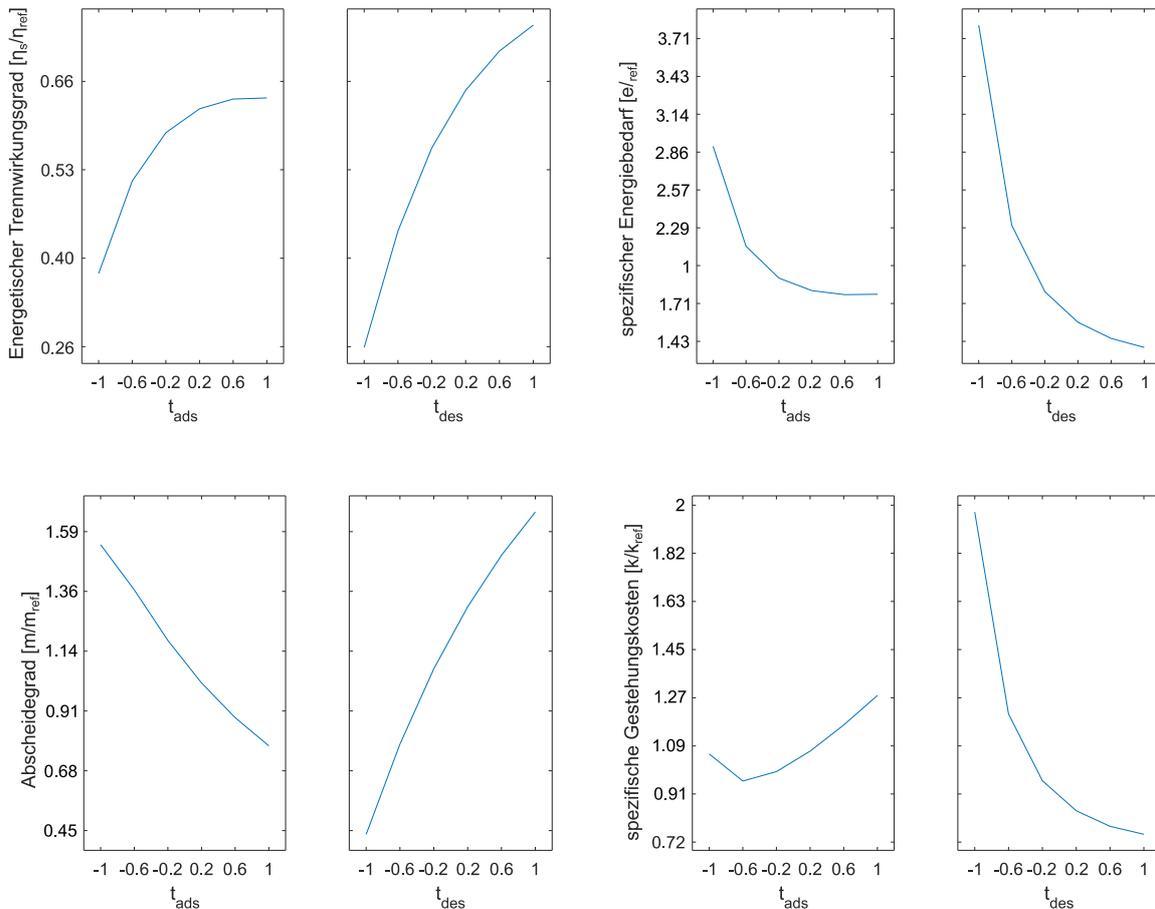


Abbildung 13: Haupteffekte der Parameterstudien für definierte Zielfunktionen mit den Parametern Adsorptions- bzw. Desorptionszeit

Anhand dieser drei Beispiele kann nun eine Pareto-Optimierung durchgeführt werden.

Für das Bestimmen der Paretofront ist das auf MATLAB® basierende Tool der Parameterstudie erweitert worden. Dazu kommt ein genetischer Algorithmus zum Einsatz. In diesem Programm können die beiden zu untersuchenden Metamodelle der zwei konkurrierenden Zielfunktionen eingelesen werden. Nötig sind dazu lediglich die Flächenfunktionen in der Form:

$$f_{Ziel} = f(a, b) = C_1 + C_2 a + C_3 b + C_4 a^2 + C_5 b^2 + C_6 ab + C_7 a^2 b \dots C_n a^n b^n \quad (4-3)$$

$n = 5$

Und zusätzlich die Parameterräume der beiden Parameter a und b in der Form:



$$\begin{aligned} - &\leq a \leq + \\ - &\leq b \leq + \end{aligned} \quad (4-4)$$

Dabei entsprechen – und + der Unter- bzw. Obergrenze gemäss Kapitel 3. Weiter muss vom Benutzer angegeben werden, welche Extremwerte bestimmt werden sollen. Dabei ist ebenfalls anzugeben ob Maxima oder Minima gesucht werden sollen. Ein Beispiel für eine Grösse, bei der ein Maximum von Interesse ist, ist der energetische Trennwirkungsgrad. Hingegen ist z. B. bei dem spezifischen Energiebedarf ein Minimum von Interesse. Der Solver berechnet nun die Paretofront der beiden Flächenfunktionen und gibt diese als Grafik aus. In Abbildung 14 ist die Paretofront für die beiden konkurrierenden Zielfunktionen «spezifische Gestehungskosten» und «spezifischer Energiebedarf» dargestellt.

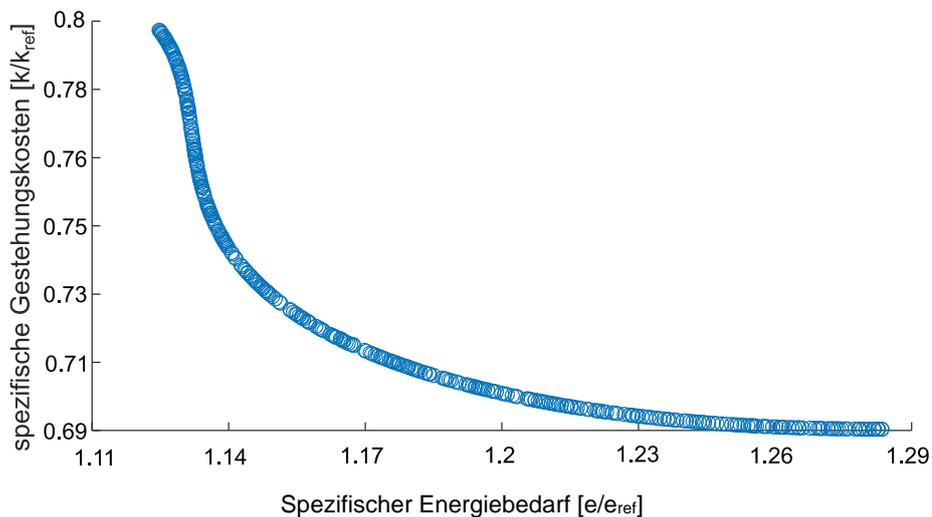


Abbildung 14: Paretofront für die Zielfunktionen «spezifische Gestehungskosten» und «spezifischer Energiebedarf»

#### 4.4 Fazit

Dieses Beispiel zeigt, dass das Durchführen einer Pareto-Optimierung zur Lösung eines multikriteriellen Zielkonfliktes gut geeignet ist. Mit vertretbarem Rechenaufwand lassen sich so die Zielkonflikte lösen.



## 5 Energetische Analyse

Dieses Kapitel beinhaltet eine aus den Parameterstudien abgeleitete energetische Analyse. Dabei werden für beide betrachteten Sorptionsaufgaben die Energieaufteilungen dargestellt und Hebelarme zur Verringerung des Energiebedarfs aufgezeigt.

### 5.1 Sorptionsaufgabe Gasreinigung

In Abbildung 15 ist der Energiebedarf von 15 Ad- und Desorptionszyklen der Referenzanlage für die Sorptionsaufgabe Gasreinigung dargestellt. Dabei entfallen knapp drei Viertel der benötigten Energie auf den Lüfter der Adsorptionsluft. Gut ein Drittel werden als Wärmeenergie für die Heizung der Desorptionsluft aufgewendet und ein kleiner Teil entfällt auf den Lüfter für die Desorptionsluft. Hierbei wird klar, dass der Lüfter der Adsorptionsluft für eine energetische Optimierung grosses Potenzial birgt.

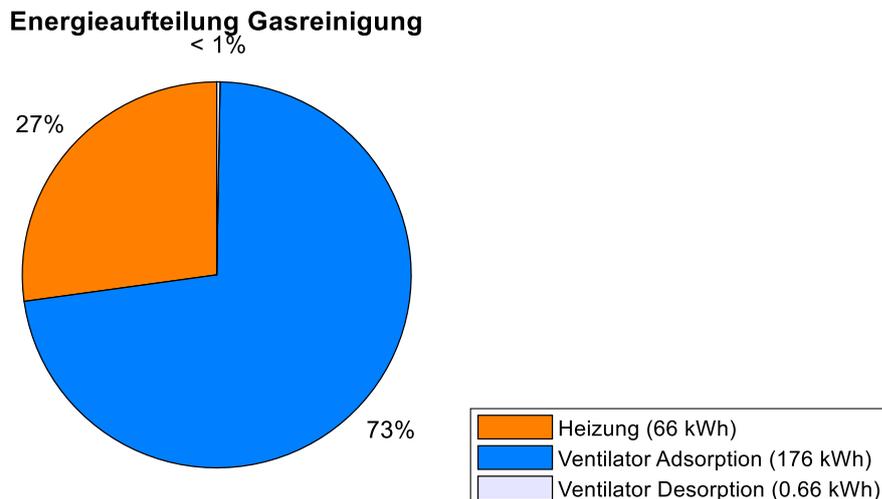


Abbildung 15: Einteilung der aufgewendeten Energien für die Sorptionsaufgabe Gasreinigung, Berechnung für 15 Ad- bzw. Desorptionszyklen

### 5.2 Sorptionsaufgabe Produktgewinnung

Die Sorptionsaufgabe Produktgewinnung beinhaltet aufgrund der kombinierten Desorptionsverfahren eine komplexere Energieaufteilung. Diese ist in Abbildung 16 dargestellt. Der dominierende Anteil besteht hierbei aus Wärmeenergie. Die Wärmeenergie besteht aus zwei etwa gleich grossen Anteilen für Heizwasser und Dampf. Den verbleibenden Anteil (elektrische Energie) teilen sich der Ventilator und die Vakuumpumpe. Aufgrund des dominierenden Anteils der Wärmeenergie besteht hierbei das grösste Optimierungspotenzial. In diesem Kontext sind Überlegungen zu Wärmerückgewinnung bzw. Prozessintegration unbedingt anzustellen.

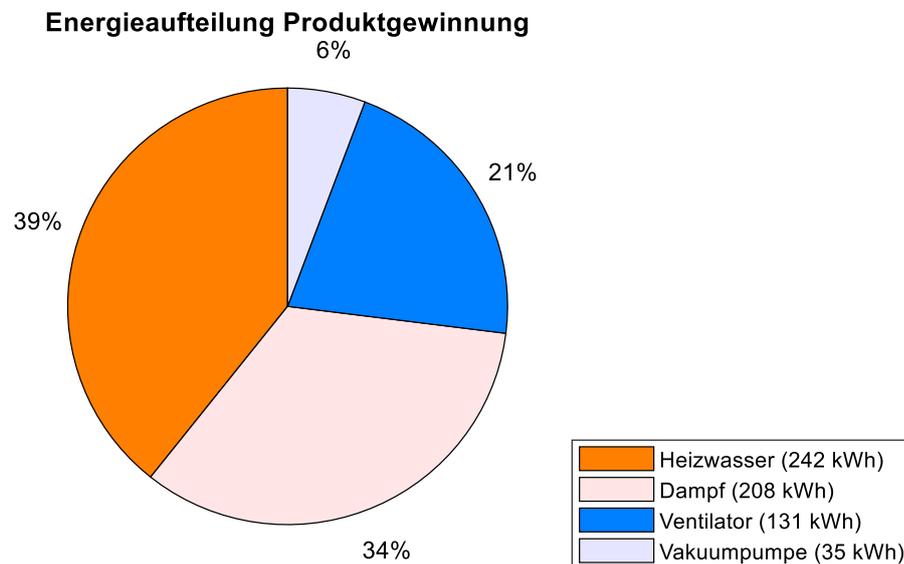


Abbildung 16: Einteilung der aufgewendeten Energien für den Referenzfall Produktgewinnung

### 5.3 Fazit

Die energetische Analyse zeigt, dass das energetische Optimierungspotenzial stark von der Art der aufgewendeten Energieformen abhängt. Daher sollten der Fokus bei einem Sorptionsrotor vor allem auf einer effizienten Förderung des Gasvolumenstromes liegen. Kommen allerdings aufwändige Desorptionsverfahren zum Einsatz, wird deren Einfluss auf den Energiebedarf dominierend. Deshalb muss der Fokus in solchen Fällen auf die Optimierung der Desorptionsverfahren gelegt werden.



## 6 Schlussfolgerungen und Fazit

Durch die systematische Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit den Anwendungsfällen aus dem Projekt *SYSKON* konnten sämtliche eingehend gestellten Fragen für die beiden Sorptionsaufgaben beantwortet werden. Für die drei definierten Zielfunktionen energetischer Trennwirkungsgrad, spezifischer Energiebedarf und spezifische Gesteungskosten konnten diejenigen Parameter mit dem grössten Einfluss auf die definierten Zielfunktionen (Energieeffizienz) ermittelt werden. Dadurch wurden die resultierenden Einsparpotenziale aufgezeigt. Berechnungen für weitere Zielfunktionen sind möglich. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Berechnungen für allgemeine Anwendungen ebenfalls möglich sind. Jedoch ist hier eine individuelle Modellerstellung wie im *SYSKON*-Schlussbericht [1] erläutert, nötig.

Diese Erkenntnisse sind in einem Leitfaden niedergeschrieben worden, welcher nun Entscheidungsträger\*innen von Industrieunternehmen und Ingenieurbüros bei der systematischen Auslegung von Adsorptionsprozessen aus der Gasphase unterstützt.

## 7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zeigen auf, dass durch die systematische Auslegung technischer Adsorptionsprozesse aus der Gasphase mit anschliessender Parameterstudie Einsparpotenziale identifiziert und genutzt werden können. Mit dem Leitfaden zur Auslegung technischer Adsorptionsprozesse aus der Gasphase ist ein Dokument geschaffen worden, welches genau diese methodische Herangehensweise beschreibt und ermöglicht.

Es ist erstrebenswert, die Funktionalitäten des *SYSKON*-Werkzeugs durch einen stetigen Einsatz zu erweitern. Es soll mittelfristig beispielsweise möglich werden, auch die bei einer Dampfdesorption häufig auftretende Kondensation bzw. Partialkondensation am Sorbens zu erfassen und zu modellieren. Des Weiteren wird angestrebt, mit dem *SYSKON*-Werkzeug zukünftig die Auslegung von Sorptionsprozessen bis zur Feinauslegung zu begleiten.



## 8 Literaturverzeichnis

- [1] R. Tamburini, M. Kleingries und U. C. Müller, «SYSKON - Systematische Konzipierung industrieller Ad- und Desorptionsprozesse - Schlussbericht,» BFE Bundesamt für Energie, Bern, 2020.
- [2] R. Smith, Chemical Process: Design and Integration, Wiley, 2005.
- [3] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen, Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE), Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [4] M. Altendorfner, «Pareto-Optimierung komplexer thermo-fluiddynamischer Systeme auf der Basis numerischer Berechnungen,» Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.



## 9 Anhang

### 9.1 Parameterstudien Sorptionsaufgabe Gasreinigung

#### 9.1.1 Zielfunktion energetischer Trennwirkungsgrad

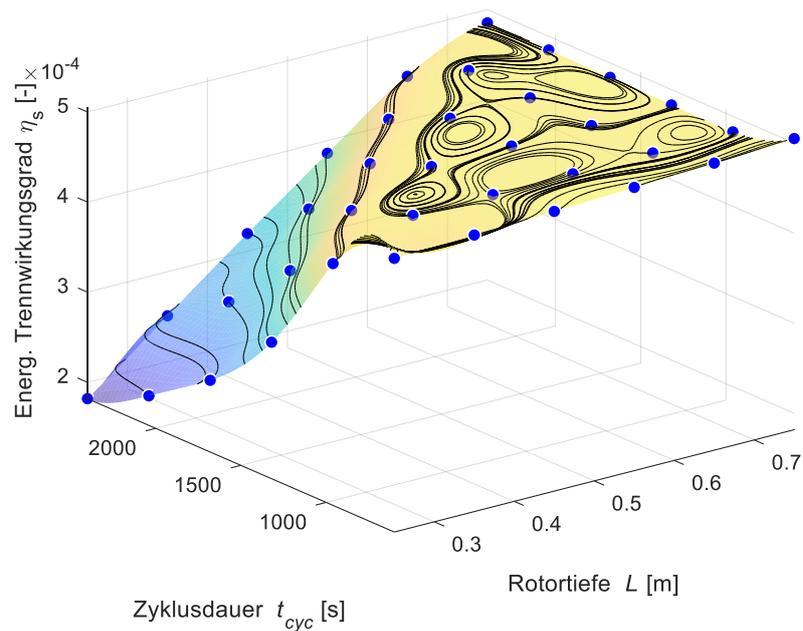


Abbildung 17: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den energetischen Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Zyklusdauer und der Rotortiefe. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

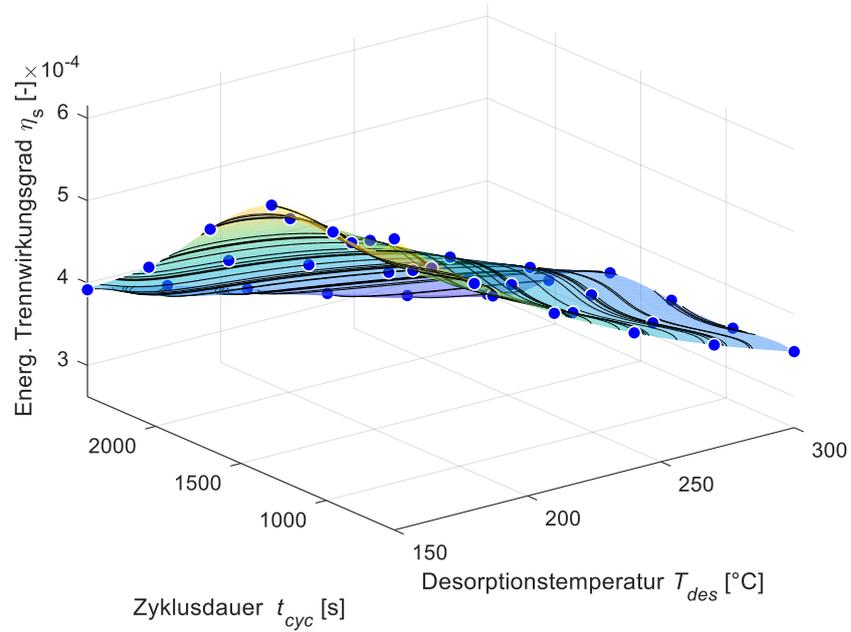


Abbildung 18: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den energetischen Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Zyklusdauer und der Desorptionstemperatur. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

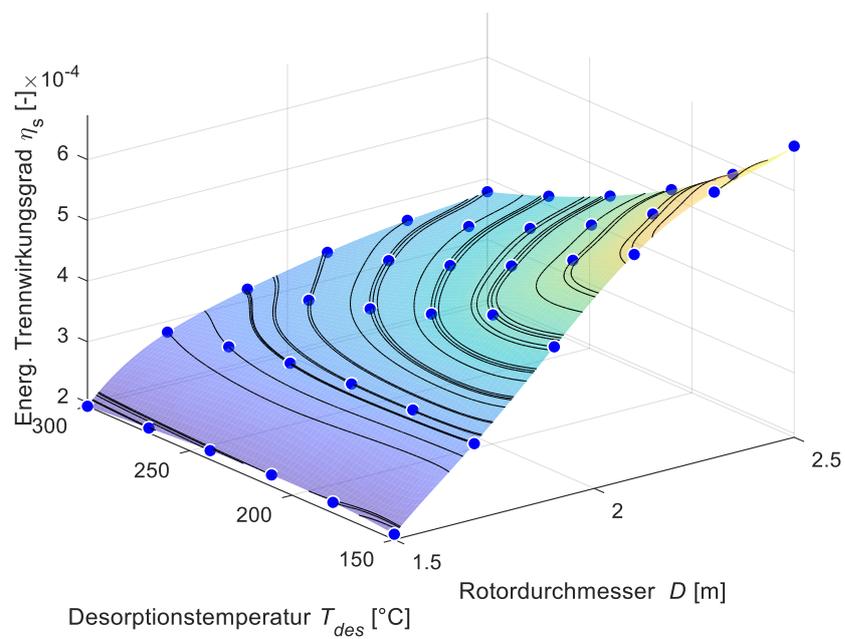


Abbildung 19: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den energetischen Trennwirkungsgrad in Abhängigkeit der Desorptionstemperatur und des Rotordurchmessers. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell



### 9.1.2 Zielfunktion spezifischer Energiebedarf

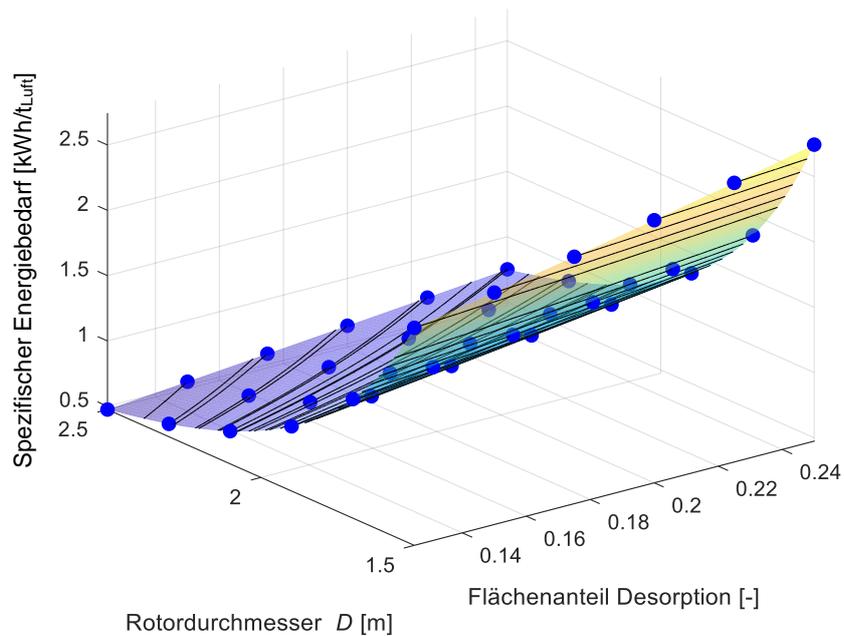


Abbildung 20: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den spezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit des Rotordurchmessers und des Flächenanteils der Desorption. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

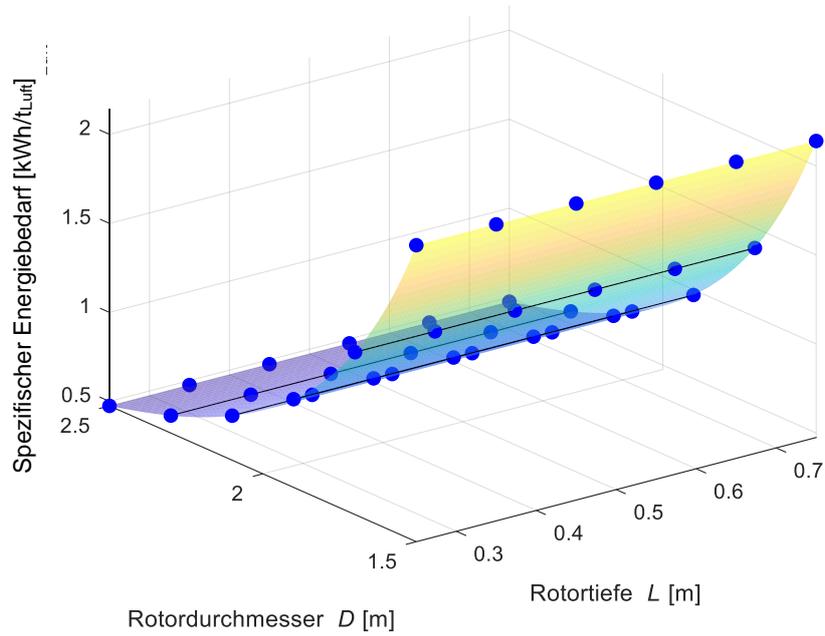


Abbildung 21: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den spezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit des Rotordurchmessers und der Rotortiefe. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell

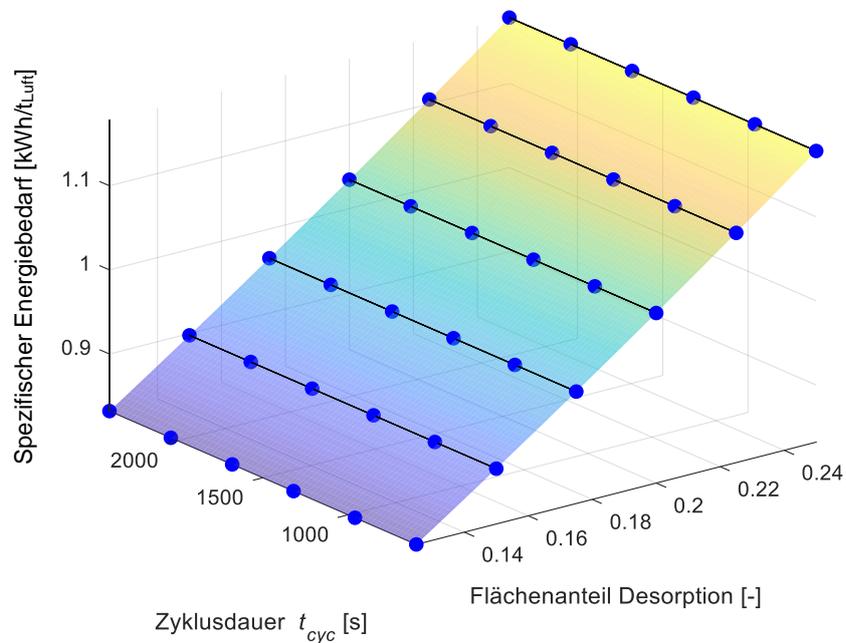


Abbildung 22: Grafische Darstellung der Parameterstudie für den spezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit der Zyklusdauer und des Flächenanteils der Desorption. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell



### 9.1.3 Zielfunktion spezifische Gestehungskosten

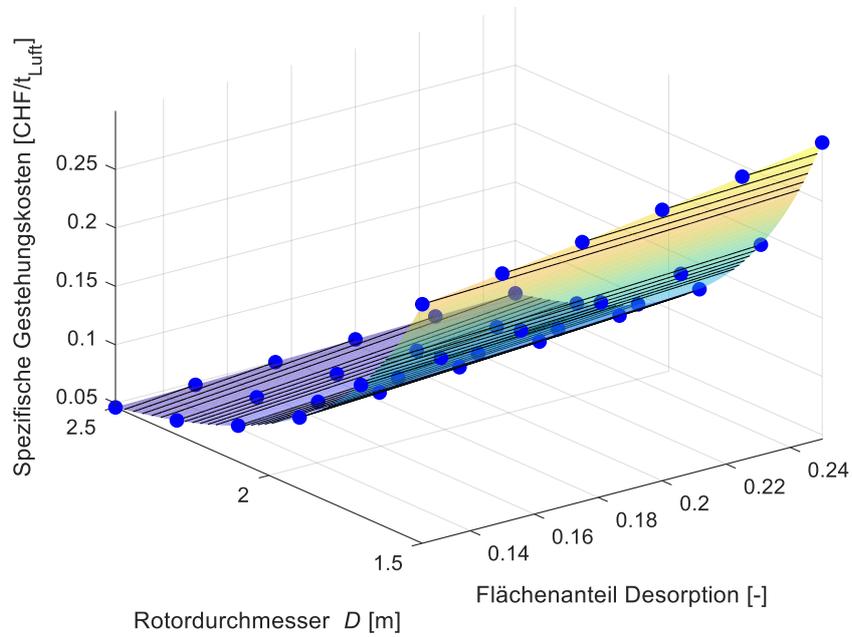


Abbildung 23: Grafische Darstellung der Parameterstudie für die spezifischen Gestehungskosten in Abhängigkeit des Rotordurchmessers und des Flächenanteils der Desorption. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomialisch gefittetes Metamodell

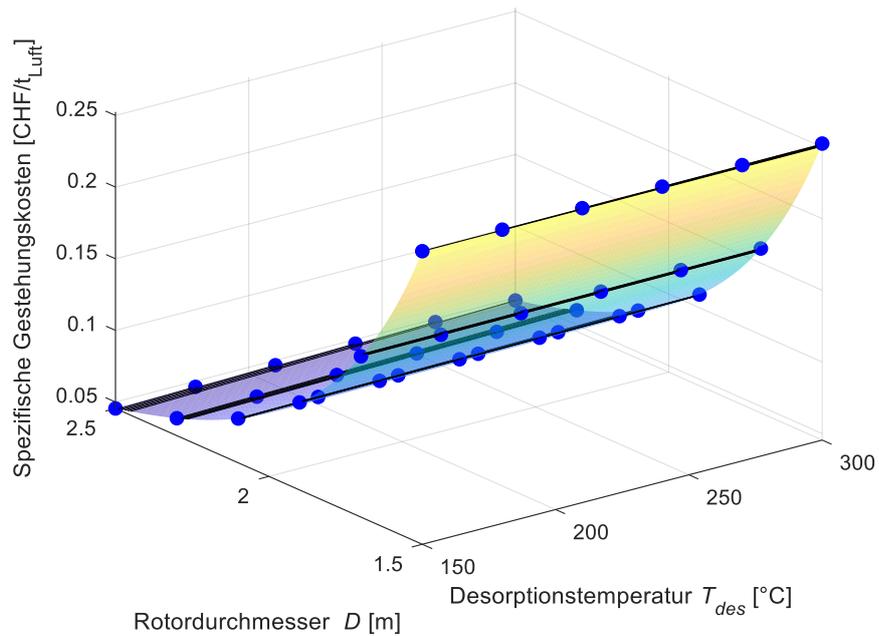


Abbildung 24: Grafische Darstellung der Parameterstudie für die spezifischen Gestehungskosten in Abhängigkeit des Rotordurchmessers und der Desorptionstemperatur. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomialisch gefittetes Metamodell

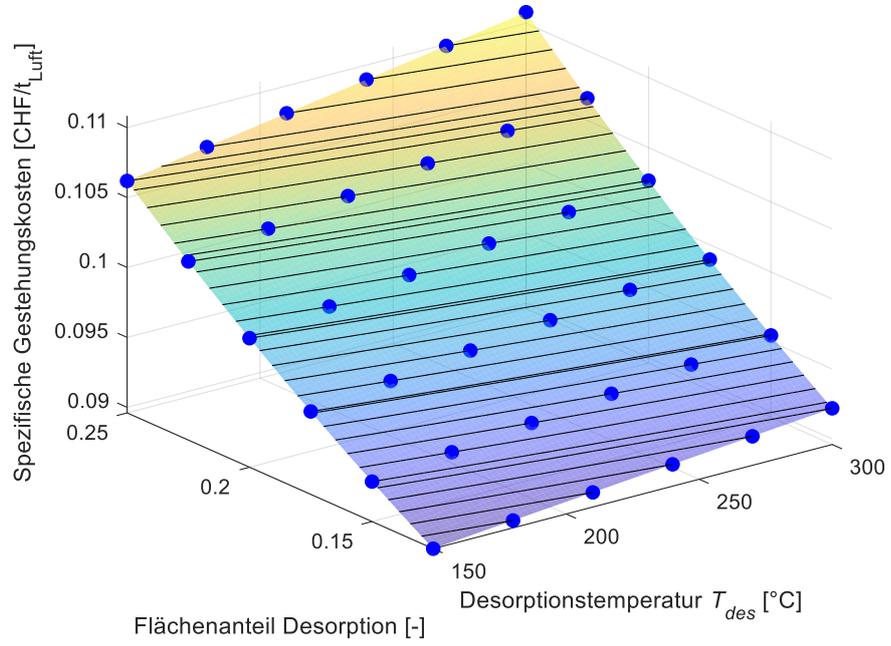


Abbildung 25: Grafische Darstellung der Parameterstudie für die spezifischen Gestehungskosten in Abhängigkeit des Flächenanteils der Desorption und der Desorptionstemperatur. Blaue Punkte: Berechnete Betriebspunkte des Modelica®-Modells, Fläche: polynomisch gefittetes Metamodell