Rotoradsorber zur Abluftreinigung und Lösungsmittel-Rückgewinnung

Gerhard Konrad und Gerhart Eigenberger*

Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Hanns Hofmann zum 70. Geburtstag

Adsorber mit rotierenden Adsorbentbetten sind aufgrund ihrer kompakten Bauweise und des niedrigen Strömungsdruckverlusts sowohl für die Nachrüstung zur Abluftreinigung als auch allgemein für die Abtrennung adsorbierbarer Komponenten aus Gasströmen hervorragend geeignet. In Verbindung mit einer einfachen Heißgasdesorption erlauben sie eine nahezu vollständige Abreinigung des Gasstroms bei gleichzeitiger Aufkonzentrierung der abgetrennten Komponenten im Desorbat um den Faktor 10 bis 20. Sie lassen sich auch zweckmäßig mit einer Rückgewinnung der abgetrennten Komponenten durch Teilkondensation des Desorbats koppeln. Wegen der geometriebedingten festen Kopplung von Ad- und Desorptionszeiten unterscheidet sich ihr Verhalten allerdings deutlich von konventionellen, zyklisch betriebenen Mehrbettanlagen. Zu ihrer Analyse bietet sich eine detaillierte Modellbeschreibung und Rechnersimulation des Betriebsverhaltens besonders an. Es wird gezeigt, daß sich damit das Verhalten marktgängiger Rotorkonzepte viel besser verstehen läßt und daß mit ihrer Hilfe neue Konzepte für die Abluftreinigung mit integrierter Lösungsmittel-Rückgewinnung entwickelt werden können, die sich durch einen deutlich reduzierten Energiebedarf für Desorption und Kondensation auszeichnen.

Rotary Adsorbers for Waste Air Purification and Solvent Recovery. Thanks to their compact construction and low pressure drops, adsorbers with rotating adsorbent beds are highly suitable both for retrofitting of waste air purification units and generally for the removal of absorbable components from gas streams. When used in conjunction with straightforward hot gas desorption they permit almost complete purification of gas flows with concomitant concentration of the separated components in the desorbate by a factor of 10 to 20. They can also be used in conjunction with recovery of the separated components by partial condensation of the desorbate. Owing to the fixed coupling of adsorption and desorption times, which is determined by the geometry of the unit, the behaviour of the system is distinctly different from that of conventional multiple bed systems in cyclic operation. A detailed model description and computer simulation of operating behaviour are particularly useful for their analysis. It is shown that the behaviour of commercially available rotor concepts can be much better understood in this way and new concepts for exhaust air purification with integrated solvent recovery can be developed which are characterised by significantly reduced energy requirements for desorption and condensation.

1 Einleitung

Die Adsorption hat sich als Standardverfahren zur Entfernung von adsorbierbaren Bestandteilen aus Gas- und Abluftströmen etabliert. Im Vergleich zu anderen Alternativen erlaubt sie, auch Spurenstoffe in sehr geringen Konzentrationen aufzunehmen und in einem nachfolgenden Desorptionsschritt stark aufzukonzentrieren, so daß z.B. Spuren von Lösungsmitteldämpfen aus Abluftströmen entfernt und die Lösungsmittel anschließend durch Kondensation wiedergewonnen werden können.

Technische Adsorptionsanlagen arbeiten heute noch überwiegend mit körnigen Adsorbentien im klassischen Festbettverfahren. Mehr und mehr drängen aber auch neuere Adsorberbauarten, speziell Rotoradsorber, auf den Markt, die sich besonders durch ihre kleine Baugröße auszeichnen. Sie weisen eine Reihe interessanter Vorteile, aber auch ein zum Teil überraschendes Betriebsverhalten auf. Beides wird im folgenden näher diskutiert.

Die laufenden Kosten beim Betrieb von Adsorptionsanlagen werden vom Energiebedarf für die Durchströmung des Adsorberbetts sowie insbesondere vom Energiebedarf für die Regenerierung des Adsorbers bestimmt. Ist eine Rückgewinnung von Lösungsmitteln aus dem Desorbat vorgesehen, so fallen weitere Energiekosten für die Kondensation der Lösungsmitteldämpfe an. Auf Möglichkeiten, diese Desorptions- und Rückgewinnungskosten durch geeignete verfahrenstechnische Verschaltung zu senken, wird ebenfalls ausführlich eingegangen.

2 Technische Adsorptionsanlagen

2.1 Festbettadsorber

Technisch werden Adsorptionen auch heute noch sehr häufig in zyklisch betriebenen Festbettanlagen (Abb. 1) durchgeführt. Ihr verhältnismäßig großes Adsorbensvolumen führt zu langen Zykluszeiten sowie einer großen Pufferwirkung des Apparats und gewährleistet auch bei stark schwankenden Zulaufkonzentrationen einen sicheren Betrieb.

Während der Adsorptionsphase bilden sich die in Abb. 1 schematisch gezeigten Konzentrationsverläufe aus. Die Konzentration an Adsorptiv wird zu Beginn der Adsorption bereits im Anfangsbereich des Bettes abgebaut. Die gereinigte Luft verläßt den Adsorber mit einer sehr niedrigen Konzentration. Im gleichen Maß, wie die Luft ihre Beladung abgibt, belädt sich der Feststoff. Im Laufe der Zeit wandert die Zone des Stoffübergangs, die sog. Massen-Transfer-Zone, durch die Schüttung, bis sie das Ende des Adsorbers erreicht hat. Dann steigt am Ausgang die Konzentration an. Der Adsorber ist beladen und kann nicht weiter zur Abreicherung des Luftstromes verwendet werden.

Nach der Beladung muß der Adsorber in geeigneter Weise regeneriert werden. Deshalb besteht eine technische Adsorptionsanlage oft aus zwei oder mehr Betten, von denen sich mindestens eines in der Adsorptions-, ein weiteres in der Desorptionsphase befindet. In Abb. 2 ist eine solche Anlage mit Heißgasregenerierung skizziert. Bei der Durchströmung des Festbettes erwärmt das heiße Regeneriergas die Schüttung und desorbiert die angelagerte Komponente. Dabei werden Menge und Temperatur des Regeneriergases so gewählt, daß es das desorbierte Lösungsmittel im Vergleich zur Abluft in deutlich erhöhter Konzentration austrägt.

* Dr.-Ing. G. Konrad und Prof. Dr.-Ing. G. Eigenberger, Universität Stuttgart, Institut für Chemische Verfahrenstechnik, Böblinger Str. 72, 70199 Stuttgart.

Abb. 1. Schematische Darstellung einer Festbett-Adsorbenschüttung.

Abb. 2. Darstellung einer heißgasregenerierten Festbettanlage.

Die mit Heißgasdesorption erreichbaren Aufkonzentrierungsfaktoren liegen üblicherweise bei 10 bis 20.

Die früher übliche Regenerierung mit Wasserdampf wird heute mehr und mehr durch Heißgasdesorption verdrängt, falls nicht Abfalldampf kostenlos zur Verfügung steht. Neben dem wesentlich größeren Energiebedarf für die Wasserverdampfung muß bei der Dampfdesorption nämlich noch ein Trockenschritt mit Heißgas nachgeschaltet werden.

Der mit Lösungsmittel beladene Regeneriergasstrom verläßt den Adsorber und muß auf praktikable Weise aufbereitet werden. Grundsätzlich gibt es hierfür verschiedene Möglichkeiten. Ist eine Rückgewinnung des Lösungsmittels nicht erwünscht, so kann das Regeneriergas einer katalytischen oder thermischen Verbrennung zugeführt werden. Dies bietet sich besonders dann an, wenn die entstehende Wärme anderweitig genutzt werden kann. Ist dagegen eine Wiedergewinnung des Lösungsmittels vorteilhaft, so muß dieses aus dem Regeneriergasstrom entfernt werden. Die Abtrennung erfolgt letztlich durch Auskondensation, wozu bei niedriger Desorptionsgaskonzentration eine weitere Aufkonzentrierung durch eine zweite Adsorptions-/Desorptionsstufe oder eine Gaspermeation zwischengeschaltet werden kann.

Nach erfolgter Heißgasdesorption ist das Adsorbensbett in der Regel zu kühlen, weil ein heißes Bett eine sehr eingeschränkte Sorptionskapazität besitzt.

2.2 Rotoradsorber

Eine verhältnismäßig neue Entwicklung auf dem Gebiet der Abluftreinigung stellen rotierende Adsorbensysteme dar. Die Funktionsweise eines solchen Rotoradsorbers ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Der Rotor, der das Adsorbens enthält, wird je nach Bauform und Volumenstrom radial oder axial durchströmt. Über den größten Teil des Umfangs strömt Prozessluft durch das rotierende Bett und wird abgereinigt. Ein bestimmter Bereich des Rotors ist ausgespart und wird ständig im Gegenstrom mit Heißgas beaufschlagt. Durch kontinuierliches oder segmentweises Drehen („Takten“) des Rotors wird erreicht, daß jeder Teil des Adsorbens im Laufe einer Umdrehung in diese Desorptionszone kommt und somit regeneriert wird.

Zur Vermeidung von Gasaustausch in Umfangsrichtung muß im Rotor eine geeignete Abtrennung vorgesehen werden. Dies kann bei Füllung mit Adsorbenschüttungen durch Segmentierung des Rotors mit Trennblechen geschehen. Reguläre Adsorbensstrukturen mit geraden, parallelen Kanälen in Monolithform oder in Form von Wickelkörpern aus abwechselnden glatten und gewellten Lagen verhindern bereits durch ihren Aufbau eine Umfangsströmung und zeichnen sich darüber hinaus durch einen besonders günstigen Durchströmungsdruckverlust aus. Sie werden deshalb bei Rotoradsorbern zunehmend eingesetzt.

In seiner einfachsten Bauform ist ein Rotoradsorber ein Apparat, der kontinuierlich einen großen Prozessluftstrom in einen

Abb. 3. Ein einfacher Rotoradsorber.

Reingasstrom mit einer hinreichend niedrigen Ablaufkonzentration sowie einen deutlich kleineren (ca. Faktor 10 bis 20) Desorptionsstrom mit entsprechend höherer Konzentration auftrennt. Diese geringere Luftmenge ist anschließend wesentlich einfacher zu behandeln.

Neben dieser einfachsten Grundschaltung werden in der Praxis bereits Rotorsysteme mit deutlich komplexerem Desorptionsteil eingesetzt, wenn z.B. die Abtrennung und Rückgewinnung eines Lösungsmittels gefordert wird. Darauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

Rotoradsorber sind in ihrer Funktion mit den seit langem bekannten Regenerativwärmeaustauschern vom Ljungström-Typ zu vergleichen. Allerdings findet im Rotoradsorber sowohl ein regenerativer Stoffaustausch wie ein Wärmeaustausch im Desorptionsbereich statt. Die zweckmäßige Kopplung von regenerativem Stoff- und Wärmeaustausch für die Aufgabe der adsorptiven Lösungsmittel-Rückgewinnung wird in Abschnitt 5 näher behandelt.

Eine Sonderform von Rotoradsorbern stellen die in der Klimatechnik gebräuchlichen Lufttrocknungsrotoren dar. Im Gegensatz zu den hier betrachteten Systemen bestehen sie aus zwei Bereichen etwa gleicher Größe. Zu ihrem Verhalten wurden bereits einige Untersuchungen veröffentlicht [1–6].

2.3 Rotoradsorber zur Abluftreinigung

Rotoradsorber für Zwecke der Abluftreinigung zeichnen sich gegenüber Festbettanlagen insbesondere durch kleine Bauvolumina aus. Ein weiterer Vorteil liegt im kontinuierlichen Anfall des Desorbatstroms, wodurch dessen Aufarbeitung leichter wird. Auch

ist es möglich, durch geeignete Wahl der Strömungsführung einen im Vergleich zu konventionellen Apparaten energie günstigen Betrieb zu gewährleisten.

Abb. 4 zeigt schematisch Abwicklungen unterschiedlicher Konzepte für die Verschaltung der einzelnen Bereiche eines Rotoradsorbers. Der Pfeil symbolisiert dabei die Drehrichtung des Rotors. Abb. 4a stellt die Abwicklung des in Abb. 3 gezeigten einfachen Rotoradsorberkonzeptes dar. In der Abwicklung erkennt man, wie die Schritte Adsorption und Desorption aufeinander folgen. Der größte Teil des Adsorbens dient der Abreicherung von Prozeßluft, ein kleiner Teil befindet sich jeweils in der Desorptionszone. Der im Augenblick in der Desorptionszone stehende Abschnitt des Rotors tritt im nächsten Schritt wieder in die Adsorptionszone (in Abb. 4 am oberen Rand) ein, das am Ende der Adsorption befindliche Segment geht in die Desorptionszone über.

In der Desorptionseinheit wird das Bett mit Heißgas regeneriert. Der entstehende hochkonzentrierte Gasstrom wird wie bei Festbettadsorbern entsorgt. Durch die Drehung wird ein luftseitig quasistationärer Betrieb des Adsorbers erreicht. Im Inneren sind die Vorgänge dagegen stets instationär und recht komplex.

Neben diesem einfachsten Konzept sind von verschiedenen Herstellern weitere Verschaltungsarten realisiert worden, die sich in der Art der Desorption unterscheiden. Sie sollen im folgenden kurz vorgestellt werden. Beim zweiten Konzept (Abb. 4b) ist die Regenerierzone mehrstufig aufgebaut: Im ersten Abschnitt wird mit Dampf desorbiert und das Lösungsmittel-/Wasserdampf-Gemisch in einem Kondensator niedergeschlagen. Im zweiten Abschnitt wird das heiße, feuchte Bett mit Kaltluft getrocknet und gekühlt. Eine noch bessere Bettregenerierung wird durch die Trennung von Trocknung und Kühlung erreicht. Dabei wird mit Heiß- und Kaltluft gearbeitet (Abb. 4c).

Abb. 4d stellt eine interessante Kombinationsschaltung einer Heißgasdesorption mit direkter Lösungsmittel-Rückgewinnung durch Kondensation dar. Bei dieser von der Firma Janetschek & Scheuchl entwickelten Schaltung wird das in der Desorption befindliche Rotorsegment wie in Abb. 4a mit Heißgas regeneriert. Das Desorptionsgas wird anschließend abgekühlt, so daß ein Teil des Lösungsmittels auskondensiert. Da eine vollständige Auskondensation unwirtschaftlich niedrige Kondensationstemperaturen erfordern würde und außerdem durch Ausfrieren von Hochsiedern (Wasserdampf) zusätzlich erschwert wäre, enthält der Desorptionsstrom nach der Kondensation noch einen relativ hohen Lösungsmittelanteil. Er wird auf das bereits beladene, aus der Adsorption kommende „Aufkonzentriersegment“ geführt, wo er aufgrund seiner niedrigen Temperatur seine Lösungsmittelbeladung nahezu vollständig auf das Adsorbens überträgt. Der Vorteil dieser Strömungsführung ist zweifach: Zum einen verläßt ein weitgehend abgereicherter Desorptionsgasstrom das Aufkonzentriersegment, so daß im nachfolgenden Desorptionsschritt eine weitgehende Desorption erreicht werden kann. Zum anderen gelangt mit dem nächsten Takt das sehr hoch beladene Aufkonzentriersegment in den Desorptionsabschnitt. Das Desorptionsgas, das in den Kühler/Kondensator eintritt, ist daher wesentlich höher konzentriert als ohne den Aufkonzentrierschritt, so daß eine effektive Teilkondensation des Lösungsmittels bei mäßig niedrigen Temperaturen überhaupt erst möglich wird. Die innere Rückkopplung über die Kreisführung des Desorptionsgasstroms bedingt ein nicht einfach durchschaubares Systemverhalten, das in Abschnitt 4.2 anhand von Simulationsrechnungen näher diskutiert wird.

2.4 Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften von Rotoradsorbern

Rotoradsorber weisen gegenüber Festbettadsorbern eine Reihe von positiven Eigenschaften auf, die sie für die Anwendung in der Abluftreinigung prädestinieren. So ist ein großer Vorteil in ihrem schon erwähnten geringen Bauvolumen zu sehen, was ihren Einsatz auch bei geringem Platzangebot ermöglicht. Insbesondere bei der Nachrüstung bestehender Anlagen ist die Frage von Aufstellungsort und -größe von entscheidender Bedeutung.

Weiter handelt es sich um einen kontinuierlichen (bei gleichmäßiger Drehung) bzw. quasikontinuierlichen Prozeß (bei getakteter Drehung) mit den daraus erwachsenden Vorteilen.

Es sind verschiedene Systeme auf dem Markt, die für jeweils unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden können. Entscheidend für die Wahl eines der bestehenden Konzepte ist dabei vor allem, ob das Desorbat stofflich wiederverwendet werden oder ob lediglich eine Abluftreinigung durchgeführt werden soll.

Ein weiterer Vorteil von Rotoradsorbern ist ihr geringer Strömungsdruckverlust infolge der niedrigen Bett Höhe, ggf. weiter vermindert durch den Einsatz von druckverlustarmen Adsorbensstrukturen wie Monolithen, offenporigen Schäumen, Fasermatten u.ä.

Im Gegensatz zu Festbettadsorbern, bei denen große Adsorbensvolumina angestrebt werden, um lange Zykluszeiten für die Beladung zu gewährleisten, erlauben Rotoradsorber kurze Zykluszeiten, die im wesentlichen von der Aufheizzeit des jeweiligen Desorptionssegments bestimmt werden. Die Tatsache, daß das Schüttungsvolumen nicht so limitierend ist, erlaubt auch den Einsatz von Adsorbentien mit geringerer Adsorptionskapazität, wenn sie anderweitige Vorteile bieten. Das gilt insbesondere für die Brandgefahr, die bei der Adsorption brennbarer Lösungsmittel in großvolumigen Aktivkohlebetten nach wie vor ein nur schwer zu beherrschendes Risiko darstellt.

Dem Vorteil des geringeren erforderlichen Adsorbensvolumens steht allerdings der Nachteil einer geringeren Pufferkapazität bei vorübergehend erhöhten Zulaufkonzentrationen und/oder Durchsätzen gegenüber. Darauf wird in Abschnitt 4.2 näher eingegangen.

3 Modellmäßige Beschreibung und Simulation von Rotoradsorbern

Da die experimentelle Untersuchung eines Rotoradsorbers in der Regel nur Pauschalaussagen zum Ein-/Ausgangsverhalten liefert und Änderungen an bestehenden Anlagen nur schwer zu realisieren sind, wurde eine Berechnungsmethode zur detaillierten Beschreibung der Vorgänge in Rotoradsorbern entwickelt, um anhand von Simulationsrechnungen Aussagen über das Verhalten

Abb. 4. Schematische Darstellung verschiedener Konzepte für die innere Verschaltung von Rotoradsorbern.

und die optimale Gestaltung derartiger Apparate machen zu können [7].

3.1 Adsorbermodell

Ein getakteter, in mehrere Segmente unterteilter Rotoradsorber kann grundsätzlich als die Zusammenschaltung mehrerer kleiner Festbettadsorber betrachtet werden. Für die Berechnung der adiabaten Ad- und Desorptionsvorgänge in diesen Festbettadsorbern wurde ein Modell verwendet und erweitert, das in ähnlicher Form bereits von Uhlmann [8, 9] benutzt wurde. Folgende vereinfachende Annahmen wurden getroffen:

- 1) Die Schüttung sei homogen.
- 2) Das Gas ist als inkompressibel zu betrachten.
- 3) Das einströmende Gas enthält nur eine adsorbierbare Komponente. Deren Konzentration ist dabei so gering, daß ihr Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zum Trägergas vernachlässigt werden kann. Unter dieser Voraussetzung erweist es sich als zweckmäßig, als Maß für die Gaskonzentration die Gasbeladung $\xi = \frac{m_{\text{Adsorptiv}}}{m_{\text{Trägergas}}}$ zu benutzen.
- 4) Im Adsorber treten keine Konzentrations-, Temperatur- oder Geschwindigkeitsunterschiede quer zur Strömungsrichtung auf.
- 5) Axiale Dispersion in der Gasphase sowie axiale und radiale Wärmeleitung im Feststoff werden vernachlässigt.
- 6) Der Wärmeaustausch mit der Rohrwand wird nur in der Gasphase berücksichtigt.
- 7) Der Stoff- und Wärmeübergang von Gas- zur Solidphase wird durch einen linearen Triebkraftansatz bestimmt (Linear driving force-Modell). Das heißt, daß das Adsorbens durch seine mittlere Beladung und Temperatur charakterisiert wird.

Wie ein Vergleich mit einer Vielzahl gemessener Ad- und Desorptionsverläufe für unterschiedliche Lösungsmittel zeigt, erlauben die obigen Annahmen eine zutreffende Beschreibung der maßgeblichen Vorgänge. Gegenüber einer genaueren Berücksichtigung der Einzelkornadsorption ist der Vorteil der kurzen Rechenzeit für das nachstehende Modell hervorzuheben, wodurch die Berechnung komplexer Verschaltungen bei Rotoradsorbern überhaupt erst möglich wird.

Das sich ergebende Differentialgleichungssystem besteht aus den nachfolgenden Material- und Energiebilanzen für Gasphase und Feststoff¹⁾:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{v_1}{\varepsilon} \frac{\partial \xi}{\partial z} = - \frac{\beta a_v}{\varepsilon} (\xi - \xi_{\text{OB}}^*) , \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{\beta a_v \rho_g}{(1 - \varepsilon) \rho_s} (\xi - \xi_{\text{OB}}^*) , \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{v_1}{\varepsilon} \frac{\partial T_g}{\partial z} = - \frac{\alpha a_v}{\varepsilon \rho_g c_{pg}} (T_g - T_s) - \frac{4 \alpha_{w,i}}{d_i \varepsilon \rho_g c_{pg}} (T_g - T_w) , \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha a_v}{(1 - \varepsilon) \rho_s c_s} (T_g - T_s) + \frac{\Delta H_{\text{Ads}}}{c_s} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} , \quad (4)$$

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluß des Beitrags.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{4 \alpha_{w,i} d_i}{(d_a^2 - d_i^2) \rho_w c_w} (T_g - T_w) - \frac{4 \alpha_{w,a} d_a}{(d_a^2 - d_i^2) \rho_w c_w} (T_w - T_{\text{Amb}}) . \quad (5)$$

Die mittlere Adsorbensbeladung $\bar{X}$ und die an der (inneren) Oberfläche des Korns herrschende Gasbeladung ξ_{OB}^* stehen miteinander im Gleichgewicht. Dieser Zusammenhang wird durch die Sorptionsisotherme

$$\bar{X} = f(\xi_{\text{OB}}^*, T_s) \quad (6)$$

beschrieben. Als Anfangs- und Randbedingungen gelten:

Anfangsbedingungen für $t = 0$ und $0 \leq z \leq l_{\text{ges}}$:

$$\bar{X}(z, 0) = \bar{X}_0(z) , \quad (7)$$

$$\xi(z, 0) = \xi_0(z) , \quad (8)$$

$$T_g(z, 0) = T_{g0}(z) , \quad (9)$$

$$T_s(z, 0) = T_{s0}(z) , \quad (10)$$

$$T_w(z, 0) = T_{w0}(z) ; \quad (11)$$

Randbedingungen für $t > 0$ und $z = 0$:

$$\xi(0, t) = \xi_{\text{Zulauf}}(t) , \quad (12)$$

$$T_g(0, t) = T_{g, \text{Zulauf}}(t) . \quad (13)$$

Die im folgenden diskutierten Simulationsergebnisse beziehen sich auf das System Aktivkohle/Trichlorethen. Die in [7] vollständig aufgeführten Stoff-, Geometrie- und Betriebsdaten beschreiben einen typischen Rotoradsorber. Die Stoffdaten wurden durch Vergleich mit Ad- und Desorptionsversuchen in einer Laboranlage verifiziert.

Die hyperbolischen Differentialgleichungen des Systems Gln. (1) bis (5) können mit Hilfe des Charakteristiken-Verfahrens gelöst werden. Ausführliche Herleitungen hierfür finden sich in [7, 10–12].

3.2 Erweiterung der Vorgehensweise auf Rotoradsorber

Für die modellmäßige Beschreibung der Zustände im Rotoradsorber wurden das oben erläuterte Modell eingesetzt und die folgenden Annahmen getroffen:

- 1) Die Segmente eines Rotoradsorbers werden betrachtet als voneinander unabhängige Festbettadsorber, die sich für eine definierte Zeitspanne an einer bestimmten Stelle in Adsorption, Desorption oder Kühlung befinden. Diese Zeitspanne wird als Taktzeit bezeichnet.
- 2) Werden Abluftströme unterschiedlicher Segmente zusammengeführt, so werden die Mischungswerte entsprechend berechnet. Sie dienen ggf. als Randbedingungen (Zulaufwerte) für andere Segmente.
- 3) Nach Ende eines Taktes werden alle Segmente um einen Platz in Umdrehungsrichtung weiterverschoben. Die im Festbett berechneten Temperatur- und Beladungsverläufe bleiben dabei erhalten und sind die Anfangsbedingungen für den folgenden Takt.
- 4) Ändert sich nach dem Weitertakten für einzelne Segmente die Durchströmungsrichtung, so wird dies dadurch berücksichtigt, daß die Feststoffzustände gespiegelt werden, so daß die Strö-

mungscharakteristiken formal weiterhin vom linken Rand ($z = 0$) aus nach rechts verlaufen.

Eine vollständige Berechnung des dynamischen Verhaltens des Rotoradsorbers mit den obigen Annahmen erfordert es, daß das Verhalten aller Segmente für einen kurzen Zeitschritt berechnet wird und danach alle Ab- und Zulaufwerte neu bestimmt werden. Die Taktzeit wird dazu in viele (typischerweise 50) Zeitschritte unterteilt. Nach jedem Takt wird die Verschaltung und ggf. die Durchströmungsrichtung entsprechend der neuen Segmentposition verändert. Dieser Rechengang wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Umdrehungszahl bzw. der eingeschwungene Zustand erreicht ist.

Ist nur der eingeschwungene Zustand und nicht das genaue Übergangsverhalten dorthin gefragt, so läßt sich die Rechnung durch ein iteratives Einsetzverfahren wesentlich beschleunigen. Dazu wird nur ein einziges Segment betrachtet und sein Verhalten während einer Umdrehung verfolgt. Da die Zulaufbedingungen an einigen Positionen zunächst unbekannt sind, werden sie zuerst willkürlich geschätzt und in folgenden Umläufen aus den entsprechenden früheren Ablaufwerten des betrachteten Segments berechnet. Es werden so viele Umläufe berechnet, bis sich die Zu- und Ablaufwerte an den verschiedenen Positionen nicht mehr ändern.

Der Vorteil der letztgenannten Methode ist ihre ausgesprochen kurze Rechenzeit. So liegt der typische Zeitaufwand für die Berechnung des eingeschwungenen Zustandes auch eines komplexen Rotoradsorbers mit dem Einsetzverfahren im Minutenbereich, während das parallele Verfahren hierzu Stunden benötigt (Workstation Typ SUN Sparcstation 1+).

4 Simulationsergebnisse

Im folgenden soll zunächst ein einfaches Rotorkonzept untersucht werden, wie es in Abb. 5 schematisch dargestellt ist. Der Rotor mit insgesamt 10 Sektoren ist unterteilt in einen parallel durchströmten Adsorptionsbereich, bestehend aus 8 Sektoren, sowie je einen Sektor im Desorptions- und Kühlbereich.

Nach Ablauf der Taktzeit wird das Adsorptionssegment mit der Bezeichnung **A** an die Stelle **B** verschoben, das von Stelle **B** an Stelle **C** und so weiter.

Das Gesamtverhalten eines Rotoradsorbers drückt sich in der Änderung der Zustandsgrößen über der Bettlänge und über der Zeit aus. Zur Beurteilung aller inneren Vorgänge wurde deshalb eine Darstellung gemäß Abb. 6 gewählt, in der alle interessierenden Zustandsgrößen aufgetragen sind. Für die Beurteilung einer Einstoffadsorption sind dies

- die Konzentration in der Gasphase,
- die Temperatur der Gasphase,
- die Beladung des Feststoffs,
- die Temperatur des Feststoffes.

Der in Abb. 5 gezeigte Rotationsadsorber besteht aus den drei Bereichen

Abb. 5. Schema eines einfachen Rotoradsorbers ohne innere Verschaltung.

- Adsorption (Segmente **A** bis **H**),
- Desorption (Segment **I**),
- Kühlung (Segment **J**).

Die Veränderungen in diesen drei Abschnitten sind in Abb. 6 in den drei Zeilen von unten nach oben gezeigt. Es wird jeweils nur derjenige Verlauf in jedem Segment aufgetragen, der sich zum Ende der Taktzeit einstellt. Jede Kurve stellt somit den Endzustand eines Segments dar und ist gleichzeitig Ausgangszustand für das darauffolgende Segment. Da der Adsorptionsbereich aus insgesamt 8 Segmenten, Desorptions- und Kühlabschnitt dagegen nur aus je einem Segment bestehen, sind in den Darstellungen des Adsorptionsbereichs 8, im Desorptions- und Kühlschnitt dagegen nur je eine Kurve gezeigt. Alle Verläufe sind so aufgetragen, daß der linke Rand jeweils der Rohgasseite, d.h. der Unterseite des in Abb. 5 gezeigten Rotoradsorbers entspricht. Da gemäß Abb. 5 die Desorption sowie die Kühlung des Rotors im Gegenstrom erfolgen, ändert sich dort die Durchströmungsrichtung. Dies wird in Abb. 6 durch die Pfeile markiert.

Die untere Zeile in Abb. 6 gibt die Profile aus den Abschnitten **A** bis **H** in Abb. 5 und somit den Adsorptionsbereich wieder. Als wesentliches Ergebnis folgt, daß in allen Segmenten der Adsorption die Eintrittskonzentration über der Bettlänge bis annähernd Null abgebaut wird. Im gleichen Maß, wie der Abbau der Konzentration erfolgt, belädt sich das Adsorbens mit dem Adsorptiv. Dies ist in Abb. 6 bei der Feststoffbeladung im Adsorptionsbereich gut zu erkennen.

Der Desorptionsbereich (Abb. 5, Abschnitt **I**) wird in der mittleren Zeile wiedergegeben. Wie die Pfeile zeigen, erfolgt die Durchströmung im Gegenstrom zur Adsorption. Dabei wird aufgrund der Aufheizung mit Heißluft ein Teil der Beladung des Adsorbens entfernt.

Abschließend erfolgt im Abschnitt **J** die Kühlung des heißen Bettes durch Kaltluft (obere Zeile in Abb. 6). Da dabei die Temperatur zu Beginn der Kühlphase besonders im linken Teil der Schüttung noch recht hoch ist, wird noch ein Teil des Lösungsmittels desorbiert. Daher sinkt die Beladung noch etwas unter die Werte am Ende der Desorptionszone (mittlere Zeile). Gegen Ende der Kühlzeit haben sich die Temperaturprofile von Gas und Feststoff angeglichen und liegen nur wenig über der Umgebungstemperatur (unterschiedliche Maßstäbe in jeder Zeile beachten).

Bemerkenswert ist, daß im Desorptions- und Kühlschnitt keineswegs eine vollständige Desorption des Bettes erreicht wird. Vielmehr bleibt auf der linken Seite eine erhebliche Restbeladung bestehen. Da sie aber nach rechts (entsprechend der Austrittsseite in der Adsorption) bis auf sehr kleine Werte abnimmt, wird in den folgenden Adsorptionsschritten trotzdem eine nahezu vollständige Abreinigung der Abluft erzielt.

4.1 Berechnung und Beurteilung komplexer Verschaltungen

Im folgenden soll das stationäre Verhalten komplexer Rotoradsorberverschaltungen näher betrachtet werden. Ausgegangen wird dabei von dem in Abb. 4d gezeigten System in einer Konfiguration gemäß Abb. 10a. Es weist ein deutlich komplexeres Verhalten als ein einfacher Rotor ohne innere Verschaltungen auf. Dies ist leicht einzusehen, wenn man berücksichtigt, welche starke Rückwirkungen einzelne Teile des Adsorbers auf andere haben. So bestimmt etwa die Kondensatortemperatur nicht nur die aus dem Kreislauf entfernte Lösungsmittelmenge, sondern auch, wieviel von der verbleibenden Konzentration in der Aufkonzentrierstufe an die Schüttung abgegeben werden kann. Das Verhalten eines solchen Apparates ist daher in seiner Reaktion auf äußere Einflüsse nicht leicht vorauszusehen.

Der Adsorber wird gemäß Abb. 10a für die Simulation in folgende Abschnitte und Segmente unterteilt:

- Adsorptionsbereich (19 parallel durchströmte Segmente),
- Aufkonzentrierbereich (2 parallel im Gleichstrom zur Adsorption durchströmte Segmente),
- Desorptionsbereich (ein Segment, Gegenstrom zur Adsorption),
- Kühlbereich (ein Segment, Gegenstrom zur Adsorption).

Abb. 7 zeigt die relevanten Größen für das gezeigte Rotorkonzept. Dabei ist zunächst festzustellen, daß die Hauptaufgabe der Abreinigung der Prozeßluft auf niedrige Konzentrationen gut erfüllt wird. Die entscheidenden Unterschiede gegenüber dem vorher vorgestellten Konzept zeigen sich besonders im Beladungsverlauf. Er wird im folgenden während einer Umdrehung betrachtet (dritte Spalte in Abb. 7).

Von einem anfänglich niedrigen Niveau erfolgt in der Adsorptionszone bei gleichzeitiger Abreicherung des Prozeßgases eine stetige Erhöhung der Feststoffbeladung bis zu einem Maximalwert. Die Beladungskurve schiebt sich dadurch immer weiter in das Bett hinein. Anschließend verläßt das Segment den Adsorptionsbereich des Rotors. Es kommt nun in den Aufkonzentrierbereich, wo es mit einem hochkonzentrierten Gasstrom niedriger Temperatur beaufschlagt wird. Die Folge hiervon ist eine zusätzliche Aufnahme von Lösungsmittel besonders im vorderen Bereich der Schüttung (anderen Maßstab beachten). Im nachfolgenden Desorptionsschritt wird diese Beladung wieder entfernt. Ein kleiner Teil wird noch in der Kühleinheit desorbiert und der Adsorption wieder zugeführt.

Die Simulationsergebnisse unterstreichen die bereits in Abschnitt 2.3 getroffene Aussage, daß im Aufkonzentrierschritt eine wesentliche Erhöhung der Adsorbensbeladung stattfindet

und daß diese im folgenden Desorptionsschritt zu hohen, für die Auskondensation günstigen Desorptionsgaskonzentrationen führt.

4.2 Reaktion auf Änderungen der Betriebsbedingungen

Ein wichtiger Gesichtspunkt für den praktischen Einsatz eines rotierenden Adsorbens ist sein Verhalten auf Änderungen der Betriebsbedingungen. Bei einem gegebenen Rotor können die vier Parameter Drehzahl, Desorptionsgasmenge, Desorptionstemperatur und Kondensationstemperatur geändert werden. Die wichtigste Eingriffsmöglichkeit in die Betriebsweise eines rotierenden Adsorptionssystems ist die Änderung der Taktzeit bzw. der Drehzahl. Im folgenden soll deshalb dargestellt werden, wie sich ein Rotoradsorber nach Abb. 10a bei Veränderung der Drehzahl verhält.

In Abb. 8 ist die Abhängigkeit der Reingaskonzentration von der Drehzahl dargestellt. Als Parameter ist die Zuluftkonzentration aufgetragen. Es zeigt sich, daß die Reingaskonzentration eine starke Funktion der Drehzahl ist, mit einem Minimum, das im betrachteten Beispiel bei etwa 0,5 Umdrehungen/h liegt.

Für kleine Prozeßgaskonzentrationen (bis ca 5 g/m^3) verläuft der Bereich um das Minimum ausgesprochen flach. Erst bei höheren Konzentrationen wird das Minimum ausgeprägter. Daraus ergibt sich umgekehrt, daß für niedrige Zuluftkonzentrationen durch eine Änderung der Drehzahl keine wesentliche Verbesserung der Reingaswerte erreicht werden kann, wenn der Apparat bereits in einem günstigen Bereich arbeitet.

Abb. 6. Simulationsergebnisse des zyklisch-stationären Zustandes für das vorgestellte einfache Rotoradsorbensystem ohne innere Verschaltung.

Abb. 7. Simulationsergebnisse des zyklisch-stationären Zustandes für das beschriebene Rotoradsorbersystem mit Aufkonzentrierkreislauf (Abb. 10a).

Abb. 8. Abhängigkeit der Reingaskonzentration von der Drehzahl bzw. der Taktzeit.

Für sehr kleine Drehzahlen streben die Reingaswerte steil gegen die Zuluftkonzentrationen. Dieses Verhalten ist auf das „Überfahren“ der Schüttung zurückzuführen. Das Adsorbens ist nach einer langen Desorption und Kühlung sehr gut regeneriert, kann aber die während der Adsorptionsphase ankommende Lösungsmittelfracht nicht mehr vollständig aufnehmen. Folglich bricht die Konzentrationsfront durch.

Im Bereich großer Drehzahlen wachsen die Reingaswerte ebenfalls stark an. Hierbei wäre das Adsorbens während der

Adsorptionsphase in der Lage, die gesamte Lösungsmittelfracht aufzunehmen, nun erfolgt aber keine ausreichende Desorption mehr, da die hierfür zur Verfügung stehende Zeit zur Erwärmung des Bettes zu kurz ist. Die Frage, ob ein Durchbruch des Systems erfolgt, kann also nicht allein anhand der Adsorptionsbedingungen geklärt werden, vielmehr sind auch die Desorptionsbedingungen zu berücksichtigen. Beide sind über Drehzahl und Segmentierung miteinander gekoppelt und können somit im Gegensatz zur zyklischen Ad- und Desorption in Festbetten nicht mehr unabhängig voneinander gewählt werden.

Die vorliegende Drehzahl hat auch einen deutlichen Einfluß auf den Leistungsbedarf der Desorption. Abb. 9 zeigt den Verlauf. Die im Lufterhitzer aufzubringende Wärmeleistung ist über einen großen Bereich nahezu unabhängig von Drehzahl und Adsorptionskonzentration. Erst bei sehr großen Taktzeiten wächst sie langsam an. Die benötigte Kälteleistung des Kondensators fällt dagegen mit steigender Drehzahl.

Auffallend ist die starke Differenz zwischen Wärme- und Kälteleistung besonders im Bereich hoher Drehzahlen. Dieser Effekt soll im folgenden kurz erläutert werden.

Bei sehr kleiner Drehzahl wird die Schüttung sowohl im Aufkonzentrier- als auch im Desorptionssegment vollständig kalt bzw. heiß geblasen, so daß Ein- und Austrittstemperatur aus den Bereichen jeweils gleich hoch sind. Somit sind auch die erforderlichen Kälte- und Wärmeleistungen annähernd gleich groß, da im Lufterhitzer und im Kondensator die gleiche Temperaturdifferenz überwunden werden muß und die Ad- bzw. Desorptionswärme demgegenüber vernachlässigt werden kann.

Abb. 9. Abhängigkeit des Leistungsbedarfs von der Drehzahl bzw. der Taktzeit.

Im Bereich sehr großer Drehzahlen ist dagegen die Verweilzeit der Schüttung sowohl im Aufkonzentrier- als auch im Desorptionssegment des Rotoradsorbers so kurz, daß sich die Temperaturen und Beladungen über der Bettlänge kaum ändern, weil das Regeneriergas nicht die Gelegenheit hat, das Bett vollständig zu erwärmen bzw. abzukühlen. Somit liegen die Austrittstemperaturen sowohl aus dem Aufkonzentrier- als auch aus dem Desorptionsbereich bei ungefähr 20 °C. Folglich beträgt das Verhältnis von Wärme- zu Kälteleistung etwa

$$\frac{\dot{m}_{DG} c_{pg} \Delta T_{LE}}{\dot{m}_{DG} c_{pg} \Delta T_{KO}} \approx \frac{\dot{m}_{DG} c_{pg} (20^\circ\text{C} - (-15^\circ\text{C}))}{\dot{m}_{DG} c_{pg} (145^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} \approx \frac{2}{7}$$

Messungen an kommerziell eingesetzten Rotorsystemen [13–15] zeigen, daß die vorstehend diskutierten Modellrechnungen das Verhalten technischer Rotorsysteme qualitativ zutreffend wiedergeben. Das gilt sowohl für die einfachen Rotorvarianten (Abb. 4a, Abb. 5) wie für komplexe Schaltungen mit Kondensation gemäß Abb. 4d. Quantitative Abweichungen betreffen die erzielbare Reingaskonzentration, die in der Praxis stets höher liegt. Ursache sind offensichtlich die im Modell nicht berücksichtigten Undichtigkeiten zwischen benachbarten Segmenten sowie Ungleichförmigkeiten bei der Strömungsverteilung im Rotor. Sie machen die Notwendigkeit deutlich, diesen Punkten bei Neukonstruktionen noch stärkeres Gewicht zu geben, da insbesondere kleinste Leckagen zwischen der Reingasseite und der Prozeßgasseite bzw. dem Austritt des hochkonzentrierten Desorptionsgases bereits zu einer deutlichen Verschlechterung der Reinigungswirkung führen.

Die vollständigen dynamischen Modellrechnungen erlauben darüber hinaus eine gute Abschätzung, wie sich Änderungen in den Betriebsbedingungen auf das Reinigungsverhalten auswirken. Wie in [7] näher ausgeführt, kann ein Rotoradsorber auf eine Änderung einer Betriebsgröße (Zulaufkonzentration, Durchsatz, Drehzahl) zunächst durchaus mit einem gegenläufigen Verhalten der Reingaskonzentration reagieren, bevor sich nach etwa 5 bis 10 Umdrehungen der neue stationäre Zustand einstellt. Da 5 bis 10 Umdrehungen einem Zeitraum von ca. 5 bis 20 h entsprechen, können Ursache und Wirkung vom Bedienpersonal fehlinterpretiert werden. Mit wenigen dynamischen Simulationsrechnungen läßt sich demgegenüber leicht feststellen, welcher Eingriff der richtige ist und in welchem Maße er zu erfolgen hat.

Mit Hilfe von stationären Auslegungsrechnungen läßt sich zudem viel einfacher und schneller als im Experiment ermitteln, wie der Desorptionsbereich im Falle der Lösungsmittelkondensation zu verschalten ist, so daß die für Desorption und Kondensation erforderliche Energie minimiert wird. Das soll anschließend diskutiert werden.

5 Energieoptimale Verschaltung des Desorptionsteils bei Lösungsmittel-Rückgewinnung

Die Untersuchung geht von der in Abb. 4d bzw. Abb. 10a skizzierten Schaltung mit Auskondensation des Lösungsmittels und dem in Abb. 7 dargestellten Verhalten während einer Umdrehung aus. Diese Schaltung ist durch einen relativ hohen Energiebedarf gekennzeichnet, denn das Desorptionsgas wird auf seinem Kreislauf abwechselnd auf Desorptionstemperatur aufgeheizt und auf Kondensationstemperatur abgekühlt. Außerdem wird ein Desorptionssegment zunächst in der Aufkonzentrierstufe auf nahe Kondensationstemperatur abgekühlt, bevor es in der Desorptionsstufe auf Desorptionstemperatur erwärmt und anschließend in der Kühlung wieder auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Der Energiebedarf kann zwar teilweise durch externe Wärmeaustauscher verringert werden, jedoch ist der Temperaturwechsel für die Funktion von Aufkonzentrierung und Desorption essentiell.

Die Grundidee, auf der die im folgenden untersuchte Wärmeintegration im Rotoradsorber basiert, besteht darin, die in einem Segment im Laufe eines Taktes gespeicherte Wärme oder Kälte zur Vorheizung oder -kühlung benachbarter Segmente zu nutzen. Dem regenerativen Stoffaustausch soll also ein regenerativer Wärmeaustausch überlagert werden. Dieses Ziel kann auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden. Von mehreren untersuchten Varianten erwies sich in [7] eine Schaltung als geeignet, bei der Kühl- und Desorptionsgas identisch sind und das Desorptionsgas im Kreuz-Gegenstrom zu den von links nach rechts wandernden Adsorbersegmenten geführt wird. Abb. 10b zeigt eine entspre-

Abb. 10. Untersuchte Varianten zweier Rotoradsorber; a) Rotoradsorber mit Aufkonzentrierkreislauf, b) energieoptimierte Verschaltung mit zwei hintereinander durchströmten Desorptionssegmenten.

chende Verschaltung, die etwa den gleichen apparativen Aufwand wie die Ausgangsschaltung Abb. 10a erfordert.

Abb. 11 stellt den zyklisch-stationären Zustand dieser Variante dar. Dabei wurden die Zuströmbedingungen, die geometrischen Größen, die Adsorbensmasse sowie alle Stoffwerte konstant gehalten. Geändert wurden lediglich die Segmenteinteilung (2 Desorptionssegmente statt 2 Aufkonzentriersegmenten), die Verschaltung der Bereiche und der Desorptionsgasvolumenstrom. Letzterer ergibt sich daraus, daß beide Verschaltungsarten die gleiche Reingaskonzentration liefern sollten.

Wie die Rechnung zeigt, führt diese Forderung zu einem etwa halb so großen Desorptionsgasstrom wie in Abb. 10a. Da mit diesem Gasstrom die gleiche Beladung entfernt wird, bedeutet dies, daß seine Konzentration bei Eintritt in die Kondensation im zeitlichen Mittel um den Faktor 2 erhöht ist, so daß sich wesentlich günstigere Kondensationsbedingungen ergeben. Ursächlich für dieses günstige Verhalten ist zum einen die Tatsache, daß nur ein Gasstrom für Kühlung und Desorption genutzt wird. Dadurch wird die in der Kühlung desorbierte Beladung ebenfalls direkt der Kondensation zugeführt. Außerdem stehen für die Desorption jetzt zwei Segmente zur Verfügung, wodurch sich das heiße Desorptionsgas noch stärker mit Lösungsmittel belädt und gleichzeitig abkühlt, bevor es in die Kondensation eintritt. Konzentrations-, Temperatur- und Beladungsverlauf in den beiden Desorptionssegmenten lassen sich in Abb. 11 gut verfolgen. Dabei ist zu beachten, daß gemäß der Hintereinanderschaltung der beiden Desorptionssegmente der Ablauf des einen dem Zulauf des anderen Segments entspricht.

Die Verringerung der Desorptionsgasmenge geht mit einer Verringerung des Energiebedarfs einher, denn es muß weniger Desorptionsgas auf Desorptionstemperatur aufgeheizt und anschließend abgekühlt werden. Hinzu kommt, daß durch die konsequente Kreuz-Gegenstromführung des Desorptionsgases relativ zum Adsorbens die im Adsorbens gespeicherte Desorptionswärme zurückgewonnen wird, so daß ein abgekühltes Segment den Kühlabschnitt verläßt. In gleicher Weise wird die fühlbare Kälte des Kondensatorabgases zur Vorkühlung (und Überladung) der in die Desorption eintretenden Segmente genutzt. Im Vergleich zur Ausgangsschaltung ergibt sich dadurch die in Abb. 12 gezeigte Reduktion des Wärmebedarfs in Abhängigkeit von der Reingaskonzentration. Man erkennt den entscheidenden Vorteil der neuartigen Strömungsführung, wenn niedrige Reingaskonzentrationen erreicht werden müssen. So sind Reingaswerte unter 40 mg/m^3 mit der ursprünglichen Anordnung unter den gegebenen Bedingungen nicht mehr sinnvoll zu erreichen.

Eine weitere Verbesserung des Gegenstromwärmeaustauschs mit weiterer Reduzierung des Desorptions- und Kondensationsenergiebedarfs ist möglich, wenn das Verhältnis von Wärmespeicherkapazität zu Stoffspeicherkapazität des Adsorbens besser angeglichen wird. Wie in [7] gezeigt, gelingt dies im betrachteten Beispiel sehr einfach dadurch, daß dem Adsorbens Aktivkohle ein inerter Träger zugemischt wird. Die damit erzielbare Verbesserung sowie der Einfluß weiterer, allerdings apparativ wesentlich aufwendiger Verschaltungsarten ist in Abb. 12 ebenfalls aufgeführt und in [7] ausführlicher erläutert.

Abb. 11. Simulationsergebnisse des zyklisch-stationären Zustandes für das beschriebene Rotoradsorbensystem mit Wärmeintegration (Abb. 10b).

Abb. 12. Zusammenfassung der Ergebnisse für die verschiedenen vorgestellten Rotoradsorptionskonzepte.

Zusammenfassend lassen sich drei wesentliche Verbesserungen durch die neuartige Strömungsführung feststellen:

- Die Kühlluft wird als Zuluft zur Desorption benutzt und führt somit sowohl Wärme als auch Stoff in die Desorption zurück, anstatt die in der Kühlung desorbierte Beladung der Prozeßluft zuzumischen.
- Die Desorptionsluft wird über mehrere Segmente geführt, bevor die Auskondensation erfolgt. Dadurch wird ebenfalls Stoff und Wärme zurückgeführt, wodurch eine maximale Konzentration in der Kondensation erreicht wird.
- Das Kondensationsabgas kann durch weitere Segmente geleitet werden, wodurch Kälte und Stoff gespeichert und das Gas selbst abgereinigt wird, bevor es der Adsorptionszuluft zugemischt wird. Alternativ kann das Desorptionsgas auch im Kreis gefahren werden. Das bietet sich insbesondere dann an, wenn aus Brand- oder Explosionsschutzgründen ein Inertgas zur Desorption eingesetzt werden muß.

Eingegangen am 14. Juni 1993 [B 5788]

Formelzeichen

a_v	[m ² /m ³]	spezifische äußere Oberfläche des Adsorbens
c_{pg}	[J/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität des Gases
c_s	[J/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität des Feststoffs
c_w	[J/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität des Wandmaterials
d_a	[m]	Außendurchmesser Adsorber
d_i	[m]	Innendurchmesser Adsorber
ΔH_{Ads}	[J/kg]	Adsorptionsenthalpie
l_{ges}	[m]	Gesamtlänge des Adsorbens
$\dot{m}_{DG}$	[kg/s]	Massenstrom Desorptionsgas
T_{Amb}	[K]	Umgebungstemperatur
T_g	[K]	Gastemperatur
T_s	[K]	Feststofftemperatur
T_w	[K]	Wandtemperatur
ΔT_{LE}	[K]	Temperaturdifferenz am Lufterhitzer
ΔT_{Ko}	[K]	Temperaturdifferenz am Kondensator

t	[s]	Zeit
v_l	[m/s]	Leerrohrgeschwindigkeit
$\bar{X}$	[kg/kg]	mittlere Beladung des Adsorbens
z	[m]	Ortskoordinate
α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{w,a}$	[W/(m ² K)]	äußerer Wandwärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{w,i}$	[W/(m ² K)]	innerer Wandwärmeübergangskoeffizient
β	[m/s]	Stoffübergangskoeffizient
ε	[–]	Hohlraumanteil, Porosität
ξ	[kg/kg]	Trägergasbeladung
ξ_{OB}^*	[kg/kg]	Beladung des Trägergases im Gleichgewicht zur herrschenden Beladung des Adsorbens $\bar{X}$
ϱ_g	[kg/m ³]	Gasdichte
ϱ_s	[kg/m ³]	Feststoffdichte
ϱ_w	[kg/m ³]	Dichte des Wandmaterials

Indices

Zulauf	Randbedingung
0	Anfangsbedingung

Literatur

- [1] Holmberg, R. B.: J. Heat Transfer 101 (Mai 1979) S. 205/210.
- [2] Gutermuth, W.: Dissertation, Univ. Darmstadt 1980.
- [3] Jurinak, J. J.: Ph. D. Thesis, University of Wisconsin, Madison 1982.
- [4] van den Bulck, E.; Mitchell, J. W.; Klein, S. A.: Int. J. Heat Mass Transfer 28 (1985) Nr. 8, S. 1575/1586.
- [5] van den Bulck, E.; Mitchell, J. W.; Klein, S. A.: Int. J. Heat Mass Transfer 28 (1985) Nr. 8, S. 1587/1595.
- [6] Schultz, K. J.; Mitchell, J. W.: ASME Winter Annual Meeting of Combined Heat and Mass transfer in Porous Media, Boston 1987.
- [7] Konrad, G.: Dissertation, Univ. Stuttgart 1993.
- [8] Uhlmann, H.-J.; Krückels, W.: Verfahrenstechnik (Mainz) 9 (1975) Nr. 1, S. 19/23.
- [9] Uhlmann, H.-J.: Dissertation, Univ. Stuttgart 1976.
- [10] Smith, G. D.: Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1970.
- [11] Marsal, D.: Finite Differenzen und Elemente, Springer-Verlag, Berlin 1989.
- [12] Eigenberger, G.: Dissertation, Univ. Stuttgart 1973.
- [13] Fetzer, G.: Studienarbeit am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Univ. Stuttgart, in Zusammenarbeit mit Fa. Daimler-Benz, Sindelfingen 1988.
- [14] Maier, U.: Studienarbeit am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Univ. Stuttgart, in Zusammenarbeit mit Fa. Daimler-Benz, Sindelfingen 1989.
- [15] Herzog, G.: Diplomarbeit am Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Univ. Stuttgart, in Zusammenarbeit mit Fa. Daimler-Benz, Sindelfingen 1989.