

Lebenszyklusbetrachtung in der adsorptiven Abluftreinigung

Je nach Abluftsituation kann eine einfache, in der Anschaffung billige Adsorptionsanlage zur Kostenfalle werden, die an Betriebskosten jährlich ein Vielfaches ihres Anschaffungspreises verschlingt. Eine falsch geplante Adsorptionsanlage kostet während ihrer Abschreibungsdauer das Drei- bis Vierfache der niedrigsten möglichen Ausgaben. Bei der Ermittlung des günstigsten Anlagentypus gibt nur die Betrachtung der Gesamtkosten über mehrere Jahre hinweg ein realistisches Bild.

Die Adsorption als Verfahren der Abluftreinigung hat eine Reihe von attraktiven Eigenschaften. Sie verbraucht kein Wasser, benötigt zunächst keinen Zusatzbrennstoff und erzeugt kein Abwasser. Die vom Gesetzgeber in den meisten Fällen vorgegebenen Grenzwerte – 50 mg C/m³ - lassen sich für viele Stoffe problemlos einhalten.

Adsorptionsanlagen kommen mit schwankenden Eingangskonzentrationen zurecht und beseitigen auch flüchtige organische Verbindungen (VOC), die bei der Verbrennung Probleme bereiten, wie z. B. halogenierte Kohlenwasserstoffe und einige anorganische flüchtige Verbindungen.

Im einfachsten Fall besteht eine Adsorptionsanlage zur Abluftreinigung nur aus einem durchströmten Behälter,

welcher das Adsorbens enthält und im Ganzen ausgetauscht wird, wenn die Reingaswerte über den vorgegebenen Grenzwert steigen. Am anderen Ende des Spektrums stehen vollautomatisch geregelte Adsorptionsanlagen mit mindestens zwei Adsorbern, einer Desorptionsperipherie und einer Vorrichtung zur Beseitigung der gesammelten flüchtigen Verbindungen.

Adsorptionsglossar	
Adsorbens	Adsorptionsmittel, etwa Zeolith oder Aktivkohle
Adsorptionskapazität	Menge an Lösungsmitteln, die das Adsorbens aufnehmen kann, in Gewichtsprozent
Adsorptiv	Substanz, die durch Adsorption aufgenommen werden soll, etwa Lösungsmitteldämpfe
Desorbat Regenerat	desorbiertes bzw. wiedergewonnenes Lösungsmittel
Desorption	Ablösen adsorbierter Substanzen vom Adsorbens
Durchbruch	Zeitpunkt, zu dem im Reingas eine bestimmte Schwellenkonzentration an VOC (etwa nach TA Luft) überschritten wird.
dynamische Kapazität	Menge an VOC, die der Adsorber unter realen Betriebsbedingungen aufnehmen kann, geringer als die statische Kapazität
Heißgasdesorption	Desorption, Wiederaufbereitung des Adsorbens durch Einleiten von heißer Luft oder heißem Stickstoff
<i>in-situ</i> -Regeneration	Regeneration des Adsorbens in der Anlage, ohne es zu entnehmen
Massentransferzone	Bereich in der Schüttung, in dem gerade die Adsorption stattfindet; nicht nützbarer Anteil des Adsorbens
statische Kapazität	Menge an VOC, die das Adsorbens im Gleichgewichtszustand aufnehmen kann
Verdrängungsdesorption	Desorption durch Einleiten großer mengen eines anderen Gases, etwa Wasserdampf



Abb. 1: Adsorptionsanlage zur Abluftreinigung mit integrierter katalytischer Nachverbrennung für 1.500 m³/h

Je nach Abluftsituation können die einfachen, scheinbar günstigen Anlagen durch ihren Verbrauch an Betriebsmitteln und durch Entsorgungskosten so teuer werden, dass sich im Vergleich dazu eine Anlage mit Regenerationsperipherie bereits nach einem bis zwei Jahren amortisiert hätte.

Kostenarten

Eine Adsorptionsanlage zur Abluftreinigung verursacht Kosten

- bei der Anschaffung
- beim Einbau und der Integration in bestehende Anlagen
- während des Betriebes
- bei notwendigen Umstrukturierungen
- bei ihrer Entsorgung.

Tabelle 1 zeigt einige der Faktoren, welche die tatsächlichen Anlagenkosten beeinflussen.

<u>Phase</u>	<u>Kosten</u>
Anschaffung	Kaufpreis Platzbedarf, Flexibilität der Aufstellung Umfang der On-site-Arbeiten Steuerungstechnische Integration
Betrieb	Betriebsmittel: <ul style="list-style-type: none"> • Adsorbens, Anschaffung und Wechsel • Zusatzbrennstoff • Dampf bzw. Stickstoff zur Desorption • Verschleißteile, Ersatzteile • Kältemittel Energie Entsorgung: <ul style="list-style-type: none"> • Regenerat • Beladenes Adsorbens Zeit: <ul style="list-style-type: none"> • Vorlaufzeiten (Anfahren der Anlage) • Rüstzeiten (Adsorbenswechsel, Entnahme von Regenerat)
Abbau, Entsorgung	Entsorgung der Anlage Entsorgung enthaltener Betriebsmittel <ul style="list-style-type: none"> • Adsorbens • Katalysator • Kältemittel

Tabelle 1: Kostenfaktoren einer Adsorptionsanlage

Anschaffung

Die bei der Anschaffung der Anlage anfallenden Kosten können den größten oder den kleinsten Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Sie sind aber meistens eindeutig vorhersagbar, so dass dabei keine unangenehmen Überraschungen zu erwarten sind.

Möglichkeiten zur Kostenoptimierung – neben dem eigentlichen Kaufpreis – bieten sich am ehesten dem Betreiber, der durch schwierige Aufstellbedingungen behindert ist. Wo z. B. Platzmangel herrscht, wird es einfacher sein, eine aus flexiblen Modulen zusammengestellte Anlage unterzubringen, als einen großen, festen Anlagenblock. Dass die Schnittstellen der Anlagensteuerung der Norm entsprechen sollen und die Anlage sich bei Bedarf komplett von einer übergeordneten Steuerung aus betreiben lassen muss, ist eine selbstverständliche Forderung.

Anlagentypen und Betriebskosten

Adsorptionsanlagen zur Abluftreinigung, die zur *in-situ*-Regeneration eingerichtet sind, regenerieren das Adsorbens entweder thermisch durch Erhitzen des Bettes, durch Verdrängungsdesorption (meistens mit Wasserdampf bei Aktivkohleanlagen), durch Druckwechsel oder eine Kombination der verschiedenen Techniken. Jede dieser Betriebsarten hat ihre Anwendungsbereiche und ihr spezifisches Kostenprofil. Die jeweils verbrauchten Betriebsmittel sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Um eine quantitative Aussage über die beteiligten Stoffe geben zu können, wurden Schätzwerte für die folgende Abgassituation entwickelt:

- $V = 5.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- $C = 300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
- $T = 25 \text{ °C}$
- Stoff: 2-Butanon (MEK), typische Adsorptionskapazität bei der gegebenen Abluftkonzentration auf Zeolith Y: 4,5%; auf Aktivkohle: 15%.

Dynamische Effekte wurden nicht berücksichtigt, da sie zu sehr von der einzelnen Anlage und der Betriebsweise abhängen. Die rechnerisch ermittelten Werte können daher deutlich ungünstiger ausfallen.

<u>Anlagentyp</u>	<u>Hauptkostenfaktor im Betrieb</u>	<u>Menge in Modellanlage</u>
Aktivkohle ohne Desorptionsperipherie	Wechsel des Adsorbens	10 kg/h
Aktivkohle mit Wasserdampfdesorption	Dampferzeugung Entsorgung bzw. Aufbereitung des Regenerates	15 kg Dampf/h 16,5 kg Regenerat/h
Aktivkohle mit Heißgasdesorption ¹ Zeolith mit Heißgasdesorption Kondensation des Regenerates	Erhitzen und anschließendes Abkühlen des Desorptionsgases bis zur Kondensation des Regenerates Entsorgung bzw. Aufbereitung des Regenerates	Elektrische Anschlussleistung je nach Verhältnissen (Kühlwasser; Stickstoff oder Luft zur Desorption) um 50 - 70 kW 17 kg Regenerat/h
Zeolith mit Heißgasdesorption, anschließende katalytische Nachverbrennung	Erhitzen der Luft, Vorheizen des Katalysators	Elektrische Anschlussleistung 10 kW, Anschaltzeit 40 - 60%

Tabelle 2: Typische Betriebsmittelverbräuche verschiedener Adsorptionsanlagen für einen Modellfall

Entsorgungskosten

In den wenigsten Fällen wird das durch Kondensation gewonnene Regenerat ein brauchbares Lösungsmittel sein, mit dem sich noch etwas anfangen lässt. Der Beispielfall, in dem ein wasserlösliches Lösungsmittel mit großen Mengen Luftfeuchtigkeit vermischt anfällt, ist sicherlich besonders ungünstig, aber nur in seltenen und besonders günstig gelagerten Fällen wird es sich lohnen, das Regenerat aufzubereiten. Das in unserem Beispiel anfallende Gemisch besteht zu mehr als 90% aus Wasser und fällt – bei Einschichtbetrieb – in Mengen von ca. 3 to/Monat an.

Wird statt dessen das Adsorbens – immer Aktivkohle – entsorgt, so beträgt in unserem Beispiel die rechnerisch benötigte Menge 1,7 to/Monat. Dies ist aber ein Idealfall, da eine

¹ Diese Variante kommt nur bei nichtbrennbaren Lösungsmitteln, wie Perchloräthylen, in Frage

Adsorptionsanlage nicht bis zur Ausnützung ihrer gesamten Adsorptionskapazität beladen werden kann. Der Durchbruch auf die zulässige Emissionskonzentration erfolgt meist schon deutlich früher.

Zeitliche Faktoren, Handhabung

Die Adsorption hat den Vorteil, keine Anfahrzeit zu benötigen. Anders ist es mit den Rüstzeiten: Bei Anlagen ohne Desorptionsperipherie muss in regelmäßigen Abständen das Adsorbens ausgetauscht werden, bei üblichen Auslegungen etwa im Monatsrhythmus. Hier sind zwei Variationen möglich: Entweder wird der gesamte Behälter mit dem Adsorbens ausgetauscht, oder der Behälter wird geöffnet, das Adsorbens ausgeschüttet und durch frische Sackware ersetzt.

Neben der Verunreinigung durch Kohlestaub besteht ein Problem der selbstbefüllten Adsorptionsanlage darin, eine brauchbare Schüttung zu erzielen. Die Schüttung sollte gleichförmig und dicht sein, ein minimales Leervolumen zwischen den Körnern und insbesondere keine Kanäle oder Randgängigkeiten enthalten. Je ungleicher die Adsorbenskörner sind, je mehr ihre Form von der Kugelform abweicht, desto schwieriger ist dies ohne Einrütteln zu erzielen.



Abb. 2 Zeolith Y und Aktivkohle zur Abluftbehandlung

Die Schüttdichte kann um 10 – 15% variieren, wovon man sich durch einen Versuch etwa in einem graduierten 10 l-Gefäß überzeugen kann. Die negativen Auswirkungen auf die Kapazität des Adsorbens liegen nicht so sehr in der Verminderung der statischen Gesamtkapazität, weil Adsorbens fehlt, sondern in der Verschlechterung des Massenüberganges: Die Massentransferzone einer losen Schüttung ist naturgemäß immer breiter als die einer kompakten Schüttung. Der Durchbruch wird schneller erreicht, das Adsorbens muss früher ausgewechselt werden. Auch hier kann eine vermeintliche Sparmöglichkeit zum Kostenfaktor werden, vom zeitlichen und hygienischen Aufwand einmal abgesehen.

Fällt Regenerat in flüssiger Form an, muss es regelmäßig in einem Auffangbehälter entnommen und bis zur Entsorgung zwischengelagert werden.

Umrüstung, Erweiterung, Reparatur

Veränderungen der Produktionsmenge bzw. der Produktpalette sind in einem herstellenden Betrieb eher die Ausnahme als die Regel. Bei einer bedeutenden Veränderung der Abluftmenge müssen zusätzliche Adsorber geschaltet oder es müssen Adsorber aus dem Rohgasstrom genommen werden. Die Adsorption funktioniert am besten in einem ziemlich schmalen Bereich der Strömungsgeschwindigkeit. Betreibt man die selbe Anlage bei veränderten Volumenströmen, verschlechtert sich der Wirkungsgrad.

Auch ein Wechsel des Adsorbens gibt dem Anlagenbetreiber die Möglichkeit, sich an veränderte Produktionsbedingungen anzupassen. Stärkere Veränderungen in der Feuchte des Abluftstromes, Beimischungen von Säuren oder Basen und andere Veränderungen können oft durch einen Wechsel des Adsorbens ausgeglichen werden. Zudem hat das Adsorbens eine begrenzte Lebensdauer, auch wenn es regeneriert wird: Bei Zeolithen ist z. B. eine maximale Standzeit von 5 – 7 Jahren realistisch.

In allen diesen Fällen ist es günstig, wenn die Anlage flexibel, modular aufgebaut und gut zugänglich ist. Erweiterungen der Anlage werden durch Anbringen weiterer Module und eine Veränderung der Steuerung vorgenommen. Einen besonderen Vorteil bietet es, wenn die Behälter mit dem Adsorbens im Ganzen entnommen werden können, wie jeder bestätigen kann, der schon einmal durch ein Handloch eine Schüttung ausgewechselt hat. Der Austausch des Adsorbens kann in kürzester Zeit durchgeführt werden, so dass es nicht nötig ist, die Produktion anzuhalten.

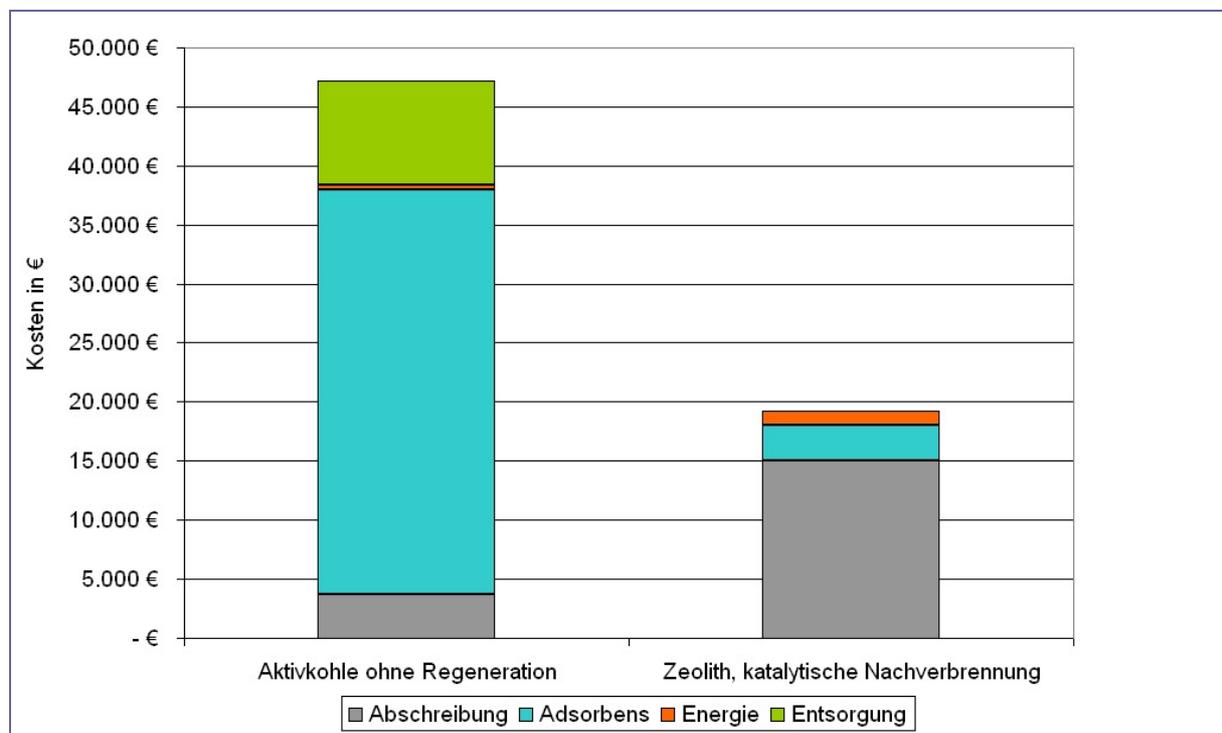
Fazit

Die größten Kosten verursacht eine Adsorptionsanlage bei der Anschaffung und durch den Verbrauch von Betriebsmitteln, nicht so sehr durch großen Aufwand bei der Handhabung.

Bei einer einfachen Anlage ohne Regeneration sind die Betriebskosten linear abhängig von der Menge des Adsorptivs, also der Menge der zu adsorbierenden Substanzen, weil sich direkt danach der Verbrauch des Adsorbens bemisst. Diese Form der adsorptiven Abluftreinigung kann dennoch rentabel sein, wenn die Betriebszeiten kurz und/oder die zu adsorbierenden Mengen gering sind. Dann gleicht der geringe Anschaffungspreis den stetigen Verbrauch und der Entsorgung von Adsorbens aus.

Im entgegengesetzten Fall – lange Betriebszeiten und/oder mittlere bis hohe Adsorptivmengen – wird die Adsorption mit integrierter katalytischer Nachverbrennung zur kostengünstigsten Methode. Sie hat einen geringen Energieverbrauch und Entsorgungskosten fallen überhaupt nicht an. Die relativ hohen Investitionskosten amortisieren sich in einem bis zwei Jahren.

Die dritte Möglichkeit – Adsorption mit anschließender Kondensation des Desorbates – ist sozusagen der „saure Apfel“ der Adsorptionstechnik. Wenn aber die Adsorptivmenge hoch ist und in der Stoffliste halogenierte Kohlenwasserstoffe auftauchen, kann sie zur einzigen verbleibenden Möglichkeit werden. Der Energieverbrauch des Verfahrens ist groß, die Anschaffungskosten durch die integrierte Kältetechnik ähnlich hoch wie die der Adsorption mit katalytischer Nachverbrennung. Regenerat, das zum größten Teil aus Wasser besteht, aber dennoch entsorgt werden muss, fällt an.



(Abb. 3) Vergleich der Jahreskosten zweier Anlagentypen für die betrachtete Modellabluft

Von besonderer Wichtigkeit ist somit eine ausführliche Datenerhebung und Beratung vor der Anschaffung einer Anlage, will man es vermeiden, einem scheinbaren Kostenvorteil aufzusitzen. Erst durch eine Bilanzierung aller Posten über mindestens drei Jahre werden die wirklichen Kosten offenbar, wie Abb. 3 in stark vereinfachter Form für den bereits betrachteten Musterfall und 1-Schicht-Betrieb zeigt.

Autoren:

Dipl.-Ing. Ronald Krippendorf, Jenoptik Katasorb GmbH,
ronald.krippendorf@jenoptik.com, Tel.: (03641) 653-168
www.katasorb.de

Dr. Dipl. Chem. Claudia Arnold, Dr. Arnold Chemie-Beratung,
ca@arnold-chemie.de, Tel.: (07347) 920-233
www.arnold-chemie.de