Folie 1

Glättungsfilter

Was man von ihnen erwartet und was sie leisten können

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 1

- Die Anfrage nach Glättungsfiltern erhalte ich recht häufig.
- Es herrscht oft eine zu stark vereinfachte Vorstellung der Funktion und Leistungsfähigkeit adsorptiver Glättungsfilter.
- Es ist bei weitem nicht für jeden Rohgasstrom möglich, einen Glättungsfilter zu entwerfen
- Dieser Vortrag bietet eine Einführung in die Vorbetrachtung, die klären soll, ob die Spitzenglättung in einem gegebenen Fall überhaupt möglich ist.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 2

Inhalt

1. Das Konzept des Glättungsfilters
2. Beispiele für einfache Glättungsfilter
3. Adsorptive Glättungsfilter
4. Hindernisse
5. Labortests
6. Nachrüstung

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 2

1.) Was ist ein Glättungsfilter überhaupt? Was soll er leisten?
2.) Beispiele für einfache Glättungsfilter, die gelegentlich eingesetzt werden können.
3.) „Den“ Glättungsfilter stellen sich die meisten als Adsorber vor. Ein Einblick in die adsorptiven Glättungsfilter.
4.) Welche Faktoren verhindern den erfolgreichen Einsatz eines adsorptiven Glättungsfilters?
5.) Welche Vorversuche kann man machen, um die Möglichkeit eines Einsatzes abzuklären?
6.) Einige Vorüberlegungen, wenn ein bestehender und unbefriedigender Glättungsfilter nachgerüstet werden soll.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

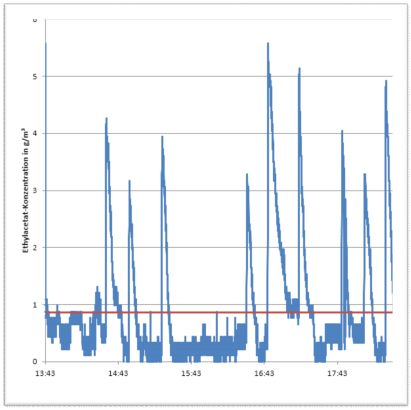
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 3

Das Konzept – was muss ein Glättungsfilter leisten?

- Zurückhalten, zwischenspeichern und freisetzen von VOC
- Einhalten vorgegebener Konzentrationsgrenzen



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 3

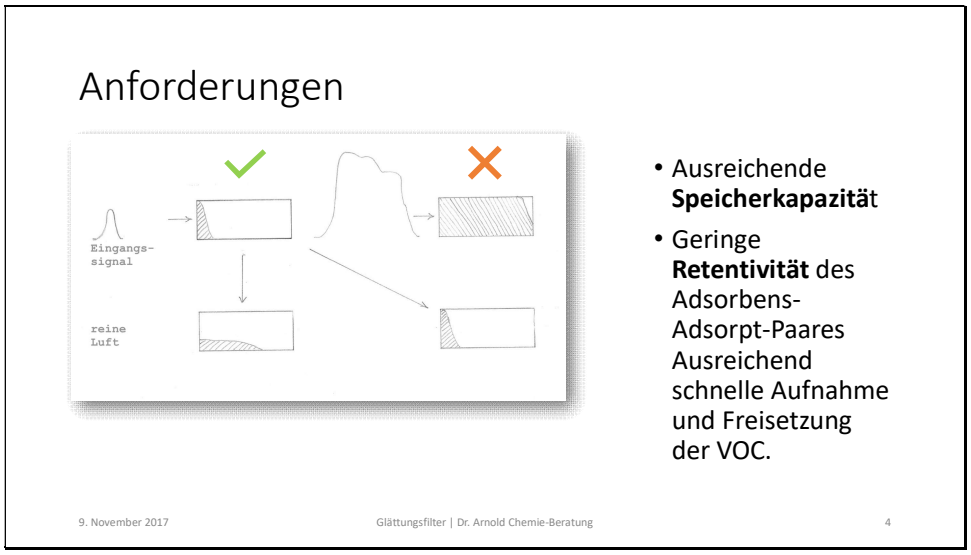
- *Bei jeder Art Glättungsfilter ist die Eingangskonzentration die Größe, die die Aufnahme und die Freisetzung von VOCs bestimmt.*
- Ein Glättungsfilter soll Schadstoffe aus der Abluft zurückhalten und zwischenspeichern, um sie in Phasen niedriger Rohgaskonzentration wieder freizusetzen.
- Die Bezeichnung „Glättungsfilter“ bedeutet nicht, dass hinten eine ganz gleichförmige Konzentration herauskommen soll! Schwankungen sind erlaubt.
- Es muss entweder eine obere Konzentrationsgrenze eingehalten werden, wegen technischer Limitierungen oder zur Vermeidung von Durchbrüchen ...
- ... oder eine untere Konzentrationsgrenze, um z. B. das Verhungern eines Biofilters zu verhindern.
- Beispielmessung im Bild: Rohgaskonzentrationen von Ethylacetat, der 6-Stunden-Durchschnitt (rote Linie) liegt unter 1.000 mg/m³, die Spitzen gehen in diesem Fall bis zu 7.000 mg/m³ und brauchen ca. 15 min bis zum Abklingen.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 4



Ein Glättungsfilter braucht

a) Eine ausreichende Speicherkapazität, um die VOC aus den anfallenden Spitzen aufzunehmen. Links oben ein ausreichend dimensionierter Absorber, rechts oben ist er für den anfallenden Peak zu klein und „läuft über“.
b) Eine geringe Retentivität*, um in Phasen niedriger Konzentration die Adsorpte spontan wieder freizusetzen. Links unten ein Adsorbens-Adsorptivpaar mit geringer Retentivität: Das konzentrierte Adsorbat verdünnt sich beim Durchfließen reiner Luft und breitet sich im Adsorbens aus. Rechts unten: Hohe Retentivität, das Adsorbat bleibt erhalten und Adsorpt wird nicht freigesetzt.

*Die Eigenschaft, Adsorpt auch bei Auftreten reiner Luft zurückzuhalten, nennt man Retentivität. Siehe z. B.: *Khan, F. I., & Kr. Ghoshal, A. (2000). Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13(6), 527.*

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 5

Beispiele für einfache Glättungsfilter

Leervolumen, Wäscher

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 5

- Ein Glättungsfilter muss nicht unbedingt ein Absorber sein.
- Unter günstigen Bedingungen geht es gelegentlich auch mit einfacheren Apparaten.

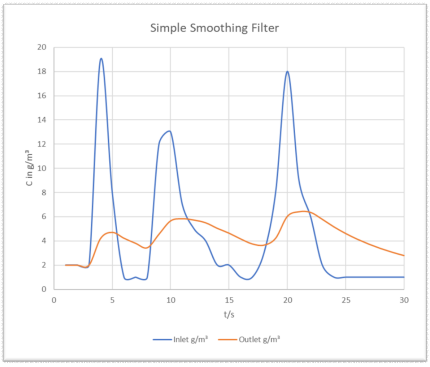
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 6

Leervolumen als Glättungsfilter



- Volumenstrom 1,5 m³/s
- Puffervolumen 10 m³
- Bei guter Durchmischung sofortige Reaktion auf Konzentrations-änderungen
- Temperatur hat keinen Einfluss auf Funktion

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 6

- Der einfachste Glättungsfilter ist ein Leervolumen. Er hat keine Retentivität, keinerlei Temperaturempfindlichkeit, solange es nicht zur Kondensation kommt, und ist unabhängig von der Art der auftretenden VOC. Dafür ist die Kapazität sehr gering.
- Dieses Rechenbeispiel:
  - Einfaches Excel-Modell, sofortige vollständige Durchmischung angenommen
  - 5.400 m³/h, Konzentrationen zwischen 1 und 20 g/m³, Peakdauer wenige Sekunden.
  - Sofortige Reaktion, effektive Glättung der Konzentrationspeaks.
- Begrenzender Faktor ist die Baugröße.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 7

Glättungsfilter an RNV gegen Umschaltspitzen

- Stark vergrößerte Luftkanäle sorgen für eine ausreichende Glättung der Umschaltspitzen

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 7

- Anlage aus den 90er Jahren
- Die stark vergrößerten Luftkanäle im Vordergrund bilden das Puffervolumen.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 8

Wäscher als Glättungsfilter

- Wo Wasserdampfsättigung keine Rolle spielt oder günstig ist
- Für VOC, die nicht mit Wasser reagieren
- Löslichkeit der VOC in Wasser und Aktivität in Lösung bestimmen die Speicherkapazität des Glättungsfilters
- Reagiert träge
- Je konzentrierter die Waschlösung, desto eher drohen Durchbrüche.
- Stark temperaturabhängig
- Beispiel: Glättung des Rohgaskonzentration aus einem fermentativen Prozess der Lebensmittelherstellung vor Biofilter
  - Gleichmäßigere Nährstoffversorgung
  - Vermeidung eines Durchbruchs durch den Biofilter

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 8

- Prozess: Gemischte Abluft, auch aus Halle, erhält regelmäßig beim Öffnen und Reinigen der Fermenter Konzentrationsspitzen, die durch den Biofilter durchbrechen.
- Ein Wäscher als Glättungsfilter ist besser geeignet für gut wasserlösliche Verbindungen als für Lösungsmittel wie Toluol oder Dichlormethan.
- Man erreicht im Betrieb die Löslichkeitsgrenze nicht (diese liegt beim Sättigungsdampfdruck des Lösungsmittels), aber je höher die Konzentration sich einpendelt, desto geringer ist die restliche Glättungskapazität und desto schlechter die Glättungswirkung.
- Dampfdruck der wässrigen Lösung ist temperaturabhängig, die Wärme lässt sich aber schnell ins Medium einbringen.

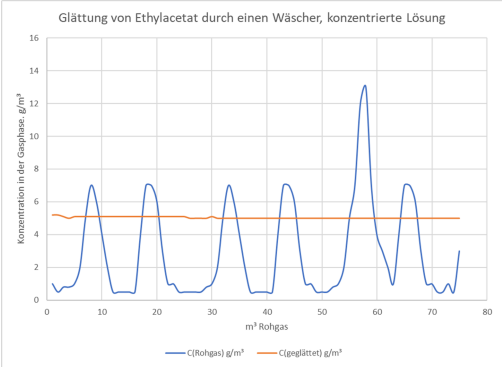
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 9

Konzentrationsspitzen von Ethylacetat, geglättet durch wässrigen Wäscher



- Stark vereinfachte Rechnung
- Chemisches Gleichgewicht und gleichbleibende Temperatur angenommen.
- Wasservolumen: 10 m³
- Löslichkeit: 85.300 g/m³ in Wasser
- „Anfahrverhalten“ bis ca. 700 g/m³

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 9

- Dies ist eine Gleichgewichtsbetrachtung, die Wirksamkeit des Wäschers wurde nicht berücksichtigt.
- Hier ist die Konzentration in der Gasphase gegen die Kubikmeter behandelte Luft aufgetragen.
- Wie ein adsorptiver Glättungsfilter muss auch ein Wäscher zunächst einmal an- bzw. volllaufen, ehe die Glättungswirkung sichtbar wird.
- Zunächst beträgt die Konzentration nach dem Wäscher < 100 mg/m³, während die Konzentration des Waschwassers und später die Konzentration nach dem Wäscher steigen.
- Bei ca. 700 g/m³ Ethylacetat in Waschwasser hat sich die Konzentration eingependelt. Sie steigt und sinkt nicht mehr, sondern pendelt um diesen Wert herum.
- Kleinere Wasservolumina bei sonst unveränderten Daten begännen die Peaks mit einer leichten zeitlichen Verzögerung abzubilden.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

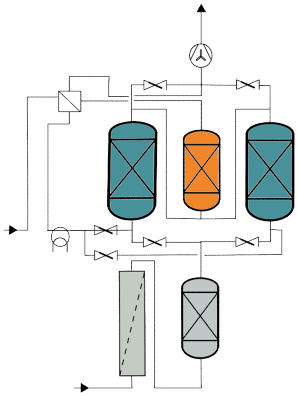
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 10

Adsorptive Glättungsfilter

- Passiv: Ein Behälter mit Adsorbens, keine Desorptionsperipherie
- Aktiv/kontrolliert: Mit Desorptionsperipherie, Desorption der VOC geregelt.



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 10

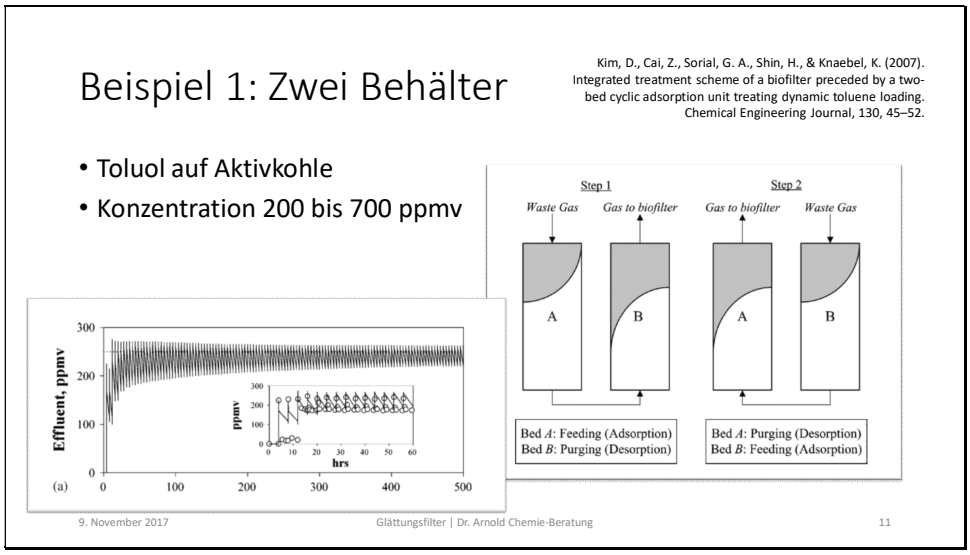
- Bei adsorptiven Glättungsfiltern denkt man zunächst meist an einen einfachen Behälter mit Adsorbens, der in Zeiten hoher Konzentration adsorbiert, um in Zeiten geringerer Konzentration das Adsorpt wieder freizusetzen.
- Abbildung: Der Glättungsfilter vor der KNV mit zwei Konzentratoren diente nur dem Auffangen von Spitzen bei Störfällen – seltener als ein Mal im Monat. Dieser Filter ist stets im Rohgasstrom, also voll beladen. Je nach Situation kann dieses Konzept funktionieren – oder eine Totgeburt sein, das sehen wir später noch.
- Gelegentlich wird das Konzept um eine Desorptionsperipherie oder um weitere Behälter erweitert.
- Literatur: Meistens als Glättung der Zuluft von Biofiltern konzipiert, Lösungsmittel wie Toluol, MEK, Cyclohexen. Geringe Wasserlöslichkeit macht Glättung mit Wäscher schwierig.
- Nur ausnahmsweise handelt es sich dabei um einfache, passive Filter.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 11



- Dies sind Bench-Scale-Versuche
- Die Luft wird im Wechsel über zwei Betten geführt. Dadurch ist immer hoch beladenes Material am Ausgang für die Desorption vorhanden.
- Wenn die Konzentration des Desorbates sinkt, wird umgeschaltet (siehe Kurve der Ergebnisse), in diesem Beispiel ca. 3 Mal in 10 Stunden.
- Toluol auf Aktivkohle ist ein häufig untersuchtes Beispiel und eines, welches bei einer bestimmten Aktivkohle von Calgon Carbon auch zu funktionieren scheint.

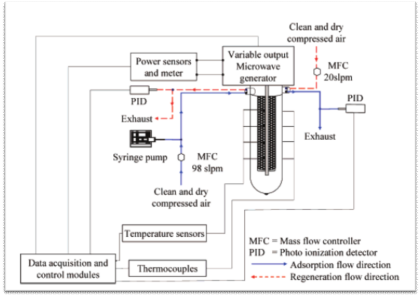
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 12

Beispiel 2: Aktive Desorption



- MEK in trockener Luft
- Desorption durch Mikrowellenstrahlung und einen trockenen Luftstrom
- Ziel der Arbeit: Parameter für geregelte Desorption finden

Kim, D., Cai, Z., Sorial, G. A., Shin, H., & Knaebel, K. (2007). Integrated treatment scheme of a biofilter preceded by a two-bed cyclic adsorption unit treating dynamic toluene loading. Chemical Engineering Journal, 130, 45–52.

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 12

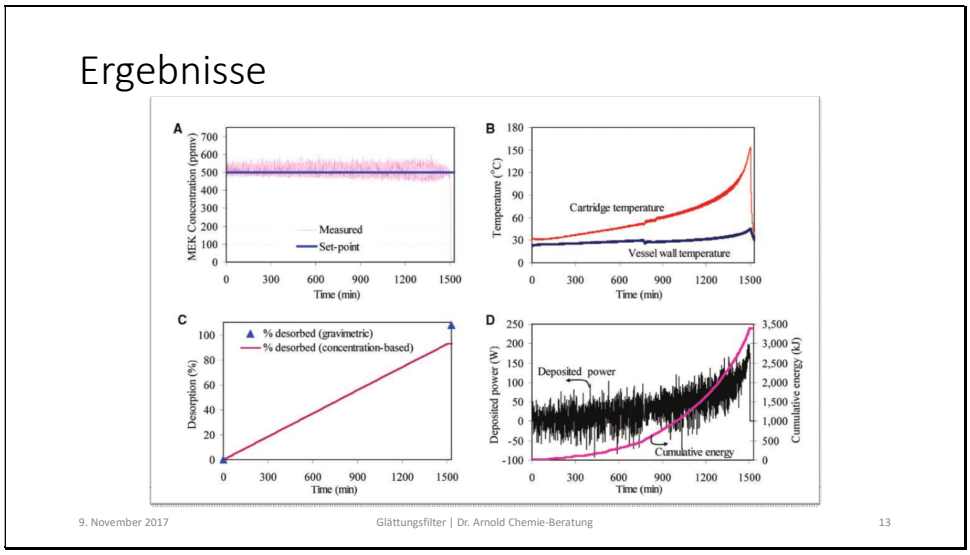
- Adsorptiv ist 2-Butanon (Methyl-Ethyl-Keton). Trägergas ist trockene Luft.
- In die aus Kohlefasergewebe um einen Mikrowellen-Hohlleiter gewickelte Packung wird zur Desorption ein Mikrowellenfeld und reine, trockene Luft geleitet.
- Die Ergebnisse verdeutlichen sehr gut einige oft vergessene Tatsachen rund um die Desorption.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 13



- Ziel der Versuche war, ein gleichmäßiges Desorbat von 500 ppmv zu erzielen (oben links)
- Die Desorption wurde vervollständigt (unten links). Im Fall eines Glättungsfilters hätte man nicht so ehrgeizige Vorgaben wie vollständige Desorption, hier sollte es aber so gemacht werden.
- Die Temperatur musste dazu stetig von 30 auf 154 °C angehoben werden, sonst wäre die Desorption bei ca. 20 – 30% stehengeblieben (oben rechts).
  - Rote Kurve: Temperatur in der Packung
  - Blaue Kurve: Temperatur der Behälterwand (Aktivkohle leitet die Wärme nur sehr schlecht)
- Eine Adsorption ist immer exotherm, da die Entropie des Gesamtsystems während der Adsorption sinkt (eine Folge aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik). Die Adsorptionsenthalpie ist aber abhängig von der Belegung des Adsorbens – je weniger es beladen ist, desto fester sind die verbleibenden Moleküle gebunden.
- Die Desorption ist somit immer endotherm, die ersten paar Prozent Beladung (schwach gebunden) desorbieren relativ leicht, je weiter die Desorption fortschreitet, desto mehr Energie wird benötigt.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

- Je nach Retentivität des Adsorbens-Adsorptiv-Pares bleibt also in einem passiven Glättungsfilter der überwiegende Teil des Adsorbates hängen, auch in Zeiten, in denen sehr verdünntes Rohgas fließt.

Folie 14

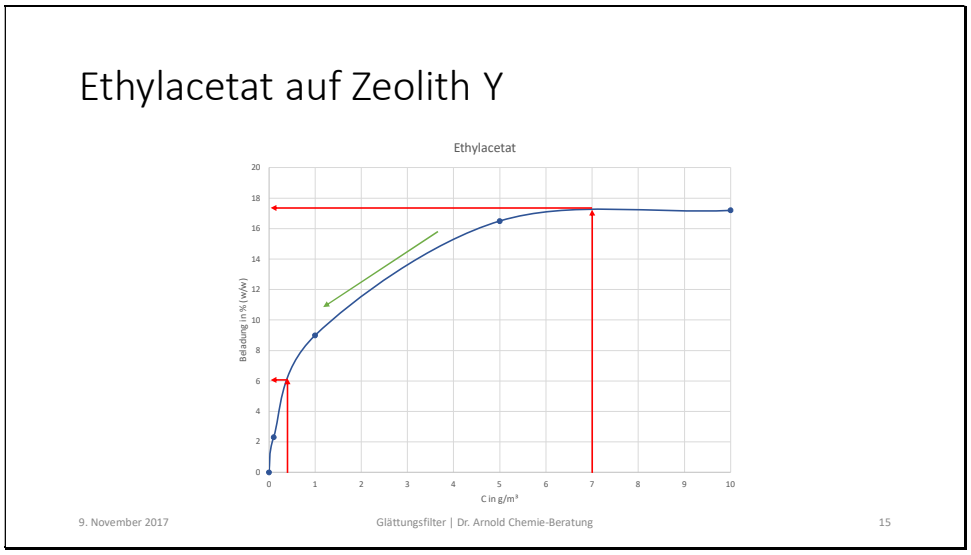
- Die Betrachtung der Adsorptionsisotherme kann den maximalen, nach dem chemischen Gleichgewicht möglichen Arbeitshub eines Glättungsfilters zeigen.
- Das chemische Gleichgewicht wird nicht ohne weiteres erreicht. Diese Werte sind somit eine absolute Obergrenze.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 15



- Zeolith Y („Wessalith“ der Degussa, 1992)
- Für die Abluft von Folie 3 – Ethylacetat mit Konzentrationsspitzen von 7 g/m³ und einer Grundkonzentration von 0,5 g/m³ - hätten wir theoretisch einen Arbeitshub von > 110 g/kg Zeolith.
- Beim Auftreten der Spitzenkonzentration wird der Zeolith bis zu ca. 16 Gew.-% beladen. Wenn sich beim Auftreten verdünnten Rohgases das Adsorptionsgleichgewicht einstellt, beträgt die Beladung nur noch 6%.

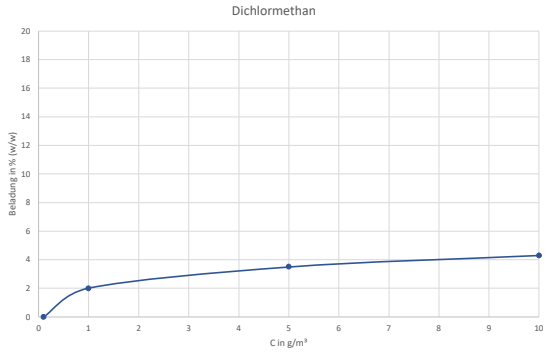
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 16

Schwach adsorbierend: CH_2Cl_2 (Dichlormethan)



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 16

- Diese Ergebnisse stammen von einem Absorber, der gelegentlich unfreiwillig zum Glättungsfilter mutierte.
- Entfettungsbäder. Sporadische Konzentrationsspitzen brachen in abgeschwächter Form durch.
- Flache Kurve: Geringe Adsorptionskapazität, Glättungsfilter muss größer ausfallen
- Geringe Adsorptionswärme: Geringe Retentivität, spontane Desorption, erkennbar an der flachen Kurve ohne ausgeprägte anfängliche Steigung.
- CAVE: Geringe Retentivität und geringe Adsorptionskapazität sind nicht das Gleiche, obwohl sie in der Praxis meist gleichzeitig auftreten.

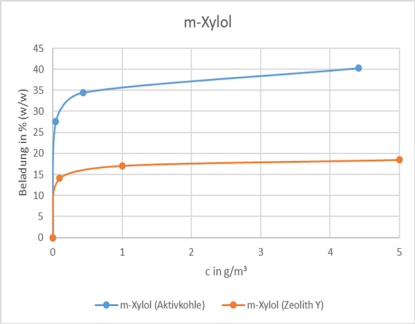
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 17

Stark adsorbierend: Xylol



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 17

- Auf den ersten Blick ist zu sehen, dass man hier mit einem Glättungsfilter wenig Chancen haben wird.
- Zunächst werden die Moleküle sehr stark gebunden, was daran zu erkennen ist, dass schon bei geringen Konzentrationen in der Luft (< 100 mg/m³) sich hohe Beladungen von 15 bzw. fast 30% ausbilden. Dann ist Sättigung, oder beinahe-Sättigung erreicht, und ein in diesem Bereich operierender Glättungsfilter hätte bei Aktivkohle nur eine geringe, bei Zeolith so gut wie keine Kapazität.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 18

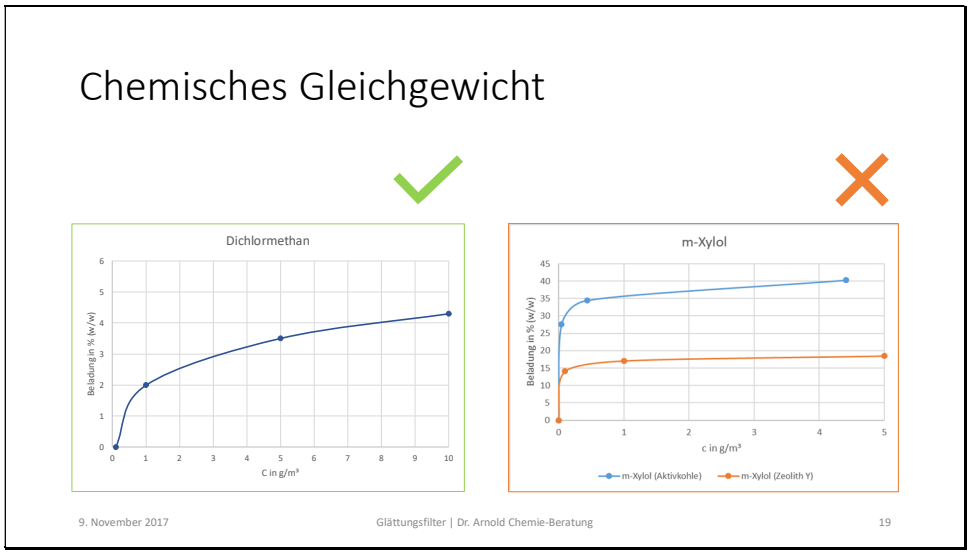
Nachdem man festgestellt hat, ob ein Glättungsfilter im selten erreichten Idealfall „Chemisches Gleichgewicht“ funktionieren würde, gilt es noch andere Faktoren zu überprüfen, die die spontane, flüssige Ad- und Desorption behindern.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 19



- Günstig: Geringe Retentivität = Langsamer oder schnellerer, aber stetiger Anstieg der Isotherme. Stoffe, die sich auf Zeolith Y so verhalten, sind z. B. Methanol, Ethanol und etliche flüchtige HKWs.
- Ungünstig: Starke Retentivität = Ausgeprägte Typ I-Adsorption, also mit starkem Anstieg zu Beginn und dann einem flachen Sättigungsbereich. Typisch für Aromaten außer Benzol, mittelkettigen Ketonen wie Butanon und Amine (welche man aber generell nicht auf hydrophoben Zeolithen adsorbieren sollte).

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

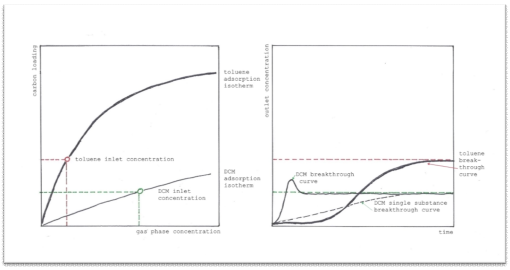
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 20

Coadsorptionseffekte

- Teilweise Trennung der Adsorpte in der Schüttung
- Veränderung der Durchbruchkurven, roll-up-Phänomen
- Verkürzung der Zykluszeiten
- Vergessenes Co-Adsorpt: Wasser



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 20

- Zeichnung aus einem Beratungsprojekt für einen Notfall-Aktivkohleadsorber in der organischen Wirkstoffsynthese.
- Links: Einzelstoffisothermen
- Das stärker bindende Adsorpt (hier Toluol) wird am Anfang der Schüttung abgelagert, das schwächer bindende (Methylenchlorid) weiter stromabwärts.
- Rechts, gestrichelt: Durchbruchkurve von Methylenchlorid als Einzelstoff
- Nachströmendes Toluol verdrängt (desorbiert) Methylenchlorid aus seinem Adsorbat, es wird in der Gasphase u. U. bis auf über den Konzentrationswert im Rohgas angereichert („Roll-up-Phänomen“).
- Rechts, durchgezogen: Durchbruchkurven von Toluol (fast unverändert) und Methylenchlorid (stark verkürzt, überkonzentriert) im Gemisch.
- Adsorptionswärme, falls ausgeprägt, verstärkt den Effekt.
- Auch Wasser kann einen starken Einfluss auf die Adsorption auf Aktivkohle nehmen, welcher in beide Richtungen gehen kann (Abstumpfung der Adsorptionswärme – günstig - oder Verdrängungsdesorption - ungünstig).

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

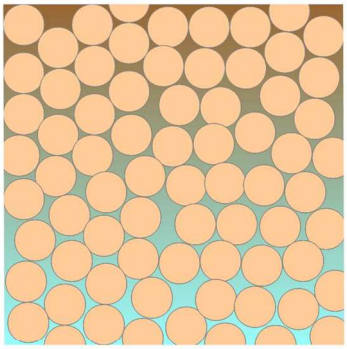
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 21

Wärmeleitung in der Schüttung – λ-Werte

- Wärmeleitfähigkeit Zeolith (trocken):
  λ = 0,15 – 0,18 W/(m*K)
- Wärmeleitfähigkeit Aktivkohle (trocken):
  λ = 0,65 W/(m*K)



B. Dawoud, M. Imroz Sohel, A. Freni, S. Vasta, G. Restuccia. On the effective thermal conductivity of wetted zeolite under the working conditions of an adsorption chiller. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2011, 31 (14-15), pp.2241.

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 21

- Zeolith und Aktivkohle sind beide schlechte Wärmeleiter. Zum Vergleich: Die Wärmeleitfähigkeit der Luft beträgt 0,026 W/(m*K)
- Die Wärmeleitung in der Schüttung findet nur über kleine Berührungsflächen statt, der stationäre Grenzfilm erschwert den Wärmeübergang von der mobilen Phase zum Feststoff.
- Bei Adsorption bleibt der Hauptteil der Adsorptionswärme im Feststoff, bei der Desorption wird der Großteil der Desorptionswärme ebenfalls dem Korn entzogen.
- Erst bei großen Temperatursprüngen (Zeolith in Wärmespeicheranwendungen, bei Gastrocknung etc.) kommt es zu einer signifikanten Erwärmung der Gasphase.
- Auswirkungen der schlechten Wärmeleitung:
  - Es kann zur Bildung von Hotspots kommen.
  - Prozessintensivierung in der Adsorption geht nur über eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung. Bester Ansatz hierzu ist das Aufbringen von Zeolith auf Wärmetauscherbleche.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

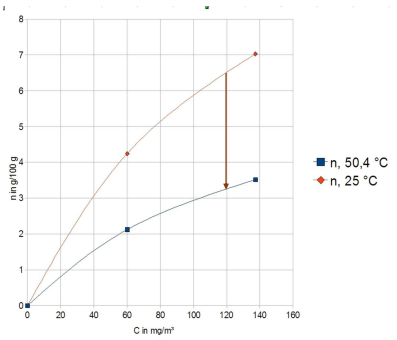
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 22

Wärmeeffekte in der Schüttung – Beispiel R134a

- Bei Erwärmung des Bettes sinkt die Gleichgewichtsbeladung.
- Adsorbat breitet sich über einen längeren Bereich des Bettes aus.



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 22

- Ein Beispiel für thermische Effekte bei der Adsorption und ihre Auswirkungen:
- Zwei Adsorptionsisothermen für R134a auf Zeolith Y, bei 25 und bei 50 °C. Diese wurden für das Design eines Lebenserhaltungssystems aufgenommen. Spuren von Kältemitteln müssen aus der ständig regenerierten Atmosphäre etwa eines U-Bootes oder Raumstation entfernt werden.
- Wenn eine Konzentrationsspitze in Festbett ankommt, erwärmt sich das Adsorbens durch die Adsorptionsenthalpie und die Adsorptionskapazität sinkt. Als Folge breitet sich das Adsorbat über einen weiteren Bereich der Schüttung aus.
- Als Folge davon erreicht man nicht die Peakbeladung, die möglich wäre, wenn man die Adsorptionswärme vollständig aus dem Festbett abführen könnte. Dadurch ist die Arbeitskapazität verkleinert.
- Weil die Adsorptionsenthalpie bei R134a nicht sehr hoch ist, würde ein solch ausgeprägter Temperatureffekt nicht beobachtet. Die tatsächliche Erwärmung wäre, je nach Konzentration, eher im Bereich von ca. 10 °C.

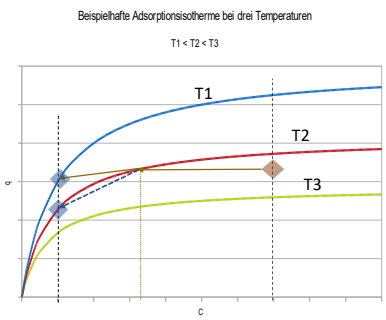
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 23

Temperatureffekte bei der Desorption



- Durch die Abkühlung während der Desorption wird die ursprüngliche Beladung nur sehr langsam erreicht.
- Schlechte Wärmeleitung im Adsorbenskorn kann diesen Zustand über Stunden einfrieren.

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 23

- Beispielhafte Adsorptionsisotherme, drei Temperaturen, Basiskonzentration und Spitzenkonzentration. T2 sei die normale Temperatur, T1 kälter und T3 wärmer als die normale Temperatur. Es herrscht eine von C und T abhängige Gleichgewichtsbeladung (blaues Symbol auf Isotherme T2).
- Nach einem Konzentrationspeak herrscht ein gewisser Beladungszustand. Welcher sich einstellt, hängt von den Mengenverhältnissen und den erreichten Temperaturen ab (rotes Symbol zwischen T2 und T3).
- Beim Abkühlen auf T2 steht das Adsorbat mit einer bestimmten Gasphasenkonzentration im Gleichgewicht.
- Beim Absenkend der Gasphasenkonzentration auf die Basiskonzentration würden wir erwarten, dass sich wieder der Ursprungszustand einstellt (blaues Symbol auf T2). Dies dauert aber oft extrem lange. Tatsächlich stellt sich durch die eintretende Abkühlung zunächst die Beladung entsprechend dem blauen Symbol auf T3 ein. Somit ist der Arbeitshub des Spitzenglätters quasi verschwunden.
- Temperaturwechseldesorption ist immer ein langsamer Prozess, das Erwärmen und Desorbieren eines Adsorbers mit mehreren Tonnen Adsorbens kann mehrere Stunden dauern. Ohne von außen zugeführte Wärme dauert es nochmals länger.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

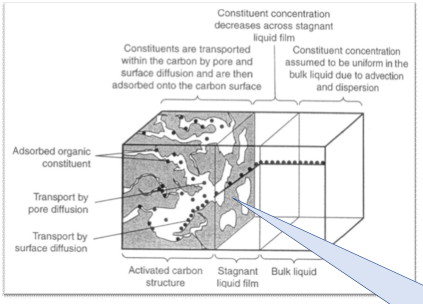
Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

- Die Wärmeleitfähigkeit von Zeolith beträgt nur 25% der von Aktivkohle, das isst einer der Gründe, aus denen Aktivkohle generell schneller desorbiert.

Folie 24

Stofftransport bei der Adsorption



- Advektion durch die mobile Phase ist der schnellste Schritt
- Diffusion im Inneren des Porensystems ist der Langsamste Schritt.
- Thermische Effekte entstehen im Inneren des Partikels, nicht in der Bulkphase oder im Grenzfilm.

"Carbon Adsorption Department of Civil and Environmental Engineering CEEN 330 – Environmental Field Session." Online-Präsentation von Marcia Maxwell, http://slideplayer.com/slide/5788393/

9. November 2017 Glättungs 24

Bei der Desorption würde umgekehrt die Konzentration im Grenzfilm sinken, während sie bei der Adsorption steigt.

- Die schematische Darstellung der Verhältnisse bei der Adsorption zeigt, warum die thermischen Effekte so starke Wirkung haben.
- Der Stofftransport zum Grenzfilm findet schnell durch Advektion statt, der Stofftransport durch den Grenzfilm durch Diffusion und der Stofftransport innerhalb des Porensystems durch Diffusion und wiederholte Ad- und Desorptionsschritte. Dies ist der langsamste Teilschritt im Stofftransport.
- Adsorptions- bzw. Desorptionswärme fällt im Inneren der Adsorbenspartikel an. Die Temperaturdifferenz zur mobilen Phase muss durch Wärmeleitung durch den stationären Grenzfilm stattfinden (zur Erinnerung: $\lambda_{(Luft)}$ = 0,026 W/m*K).

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 25

Vorschläge für Proof-of-Principle-Tests im Labormaßstab

Einfache und günstige Tests im Labormaßstab können zeigen, ob ein Glättungsfilter in technischer Größe funktionieren kann.

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 25

- Ob Labortests gemacht werden können, hängt davon ab, wie gut die Verhältnisse der Abluft sich nachstellen lassen.
- Oft muss mit einer Modellabluft gearbeitet werden.
- Die Tests dauern ein paar Tage und kosten n * 1.000,- €, n ist einstellig. Typischer Preis 2.000,- - 3.000,- €.
- Das sind Versuche, die ich selbst in Auftrag gebe.
- <VENT>Es ist Unsinn, gleich von der Theorie ins Technikum überzugehen: Wenn es nicht funktioniert, weiß man nicht, warum nicht, und ob es eine Möglichkeit gibt, den Prozess doch zum Laufen zu bringen. Wenn es funktioniert, weiß man nicht, welches die kritischen Größen sind, und was in der Praxis den Prozess stören könnte.</VENT>

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 26

Erweiterte Durchbruchkurven

- Durchbruchkurve messen, mit Trägergas das Wiederauftauchen des Adsorptives beobachten.

https://hidenisochema.com/hiden-products/abr/

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 26

- Wie normale Durchbruchkurve, nur wird nach vollständigem Durchbruch mit reinem Trägergas weitergespült.
- Versuch muss adiabatisch durchgeführt werden (isolierte Adsorbensprobe, keine Thermostatisierung des Adsorbens).
- Kann für verschiedene Adsorbens-Adsorpt-Paare durchgeführt werden.

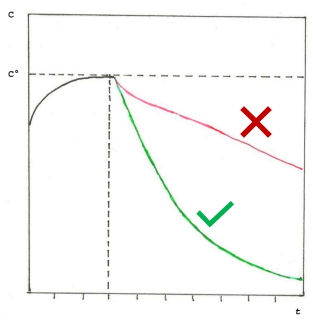
Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 27

Erweiterte Durchbruchkurven



- Nach erfolgtem vollständigen Durchbruch wird weiter mit reinem Trägergas gefahren.
- Grün: Schnellere Desorption, Zeit für Regeneration auf Basiswert in der Größenordnung der Zeit für Adsorption
- Rot: Langsame Desorption, dauert > 10 mal so lange wie Adsorption.

9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 27

Folie 28

Prüfung der Coadsorptionseffekte

- Ähnlich wie Durchbruchkurven, jedoch mit periodischer Auftrennung und Bestimmung des Desorbates (GC-MS)
  - Ergebnis: Coadsorptionseffekte direkt beobachtbar.
  - Nachteil: Aufwändig durch zahlreiche Gasprobennahmen.
- Vereinfachte Variante (statisch): Beladung über Lösemittelgemisch, Bestimmung des Desorbates nach thermischer Desorption mit GC-MS.
  - Ergebnis: Vorhandensein von Caoadsorptionseffekten und ihre Größenordnung können abgeschätzt werden.
  - Nachteil: Nur ein Gleichgewichtspunkt.

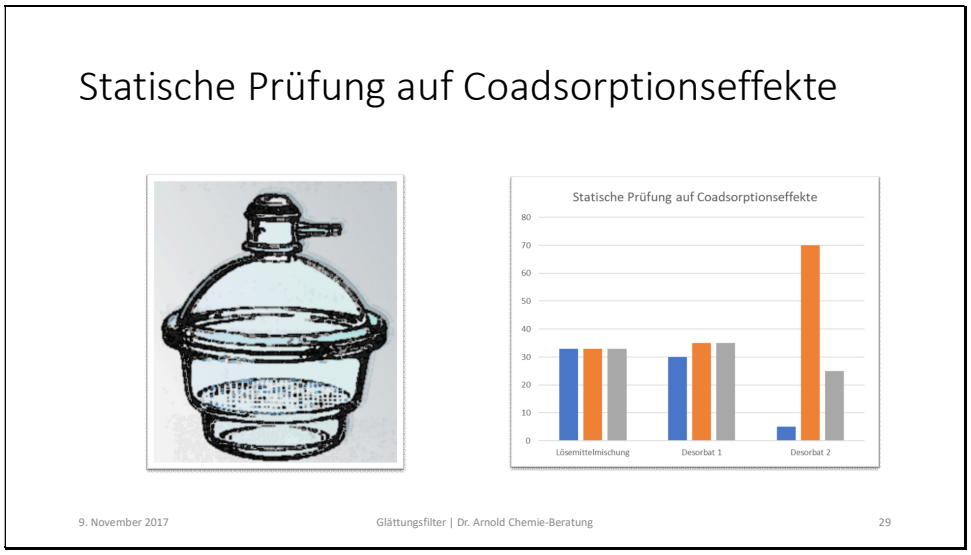
9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung 28

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 29



- Die Beschriftung „Lösemittelmischung“ bezieht sich auf die Gasphase im Exsiccator.
- Beladung der Probe im gesättigten Dampf im Exsikkator, der eine Lösemittelmischung enthält, deren Dampfdrücke die gewünschte VOC-Mischung erzeugen.
- Proben werden desorbiert und die Mengenverhältnisse im Desorbat bestimmt.
- Das Ergebnis auf der rechten Seite – Desorbat unterscheidet sich stark von der Zusammensetzung der ursprünglichen Gasphase – ist ein Hinweis darauf, dass man mit Coadsorptionseffekten zu kämpfen haben wird.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

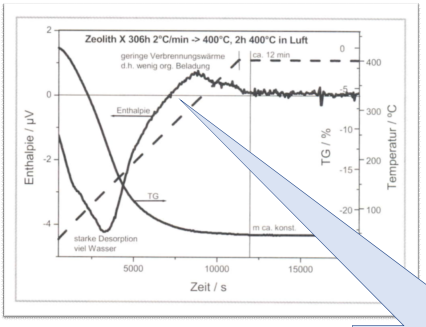
E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 30

Katalytische Aktivität

- Mit Toluol und Butylacetat vorbeladener Zeolith
- Kombination aus Thermogravmetrie und Differential-Thermoanalyse
- Ab 150 °C spontan (katalysiert) einsetzende Oxidation

Noack, M., & Schwake, M. (2007). Thermische Regenerierung von Zeolithpulver Typ X aus der VOC-Luftreinigung. Chemie Ingenieur Technik, 79(6), 883–889.



9. November 2017 Glättungsfilter | Dr. Arnold Chemie-Beratung

Enthalpiepeak: Spontan auftretende Oxidation

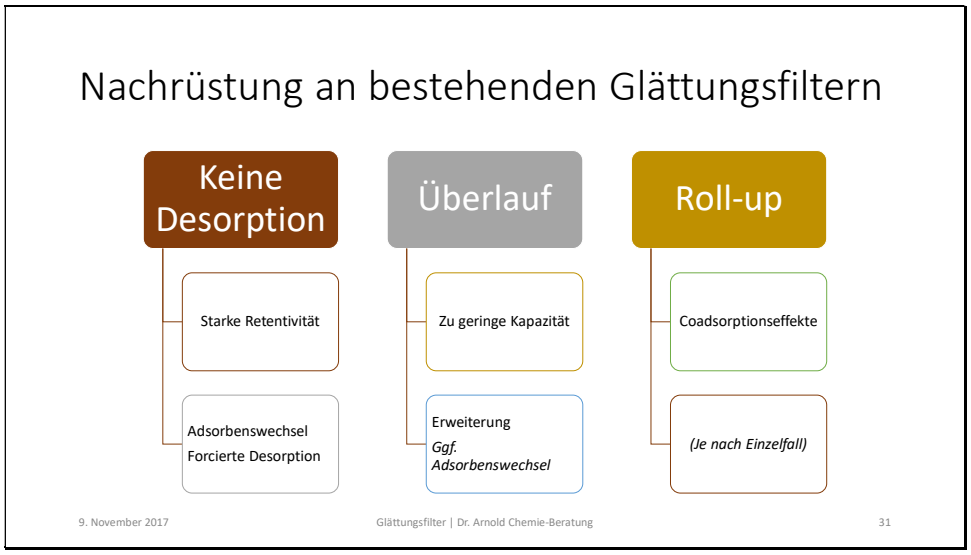
- Die katalytische Aktivität des Adsorbens hat keinen direkten Einfluss auf die Glättungswirkung, ist aber ein entscheidender Parameter für die Abschätzung des Risikos für thermisches Durchgehen. Dies ist wichtig, falls gelegentlich thermisch regeneriert werden soll.
- Zeolithe und Aktivkohlen unterscheiden sich, je nach Typ, Hersteller und Charge, recht stark in ihren katalytischen Eigenschaften.
- Je kleiner der Enthalpiepeak, und je später er auftritt (bei gleicher Beladung!), desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung von Hotspots und Thermal Runaways.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 31



- Beobachtet: Keine Desorption aus dem Glättungsfilter, nach einiger Zeit ungehinderter Durchbruch aller Peaks. Wenn das Adsorbat zu stark festgehalten wird, muss man entweder ein anderes Adsorbens wählen (womit sich auch die Kapazität des Filters ändert), oder man muss dem Filter Energie zuführen, um die Desorption zu erzwingen.
- Wenn der Filter zwar desorbiert, aber leicht überläuft, ist er zu klein für die anfallende Stofffracht. Er kann um ein zweites Bett erweitert werden, ggf. in wechselnder Richtung betrieben wie auf Folie 11, was dem Betreiber die Möglichkeit gibt, flexibler auf Variationen in der VOC-Fracht zu reagieren.
- Roll-up-Phänomene, Trennung von VOC auf dem Glättungsfilter und andere Folgen ausgeprägter Coadsorptionseffekte lassen sich nicht mit einer einzelnen Empfehlung abhandeln. Wenn nur eine bestimmte Komponente gelegentlich zu stark durchbricht, der Filter aber sonst funktioniert, kann man eine Erweiterung hinzufügen. Der schlimmste Fall ist vermutlich, dass eine Komponente kaum, die andere aber zu stark zurückgehalten wird. Möglicherweise kann man mit häufiger forcierter Regeneration die Situation verbessern, es ist aber im Einzelfall zu prüfen.

Dr. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

Fon 07347 920 233
Fax 07347 920 597
Mobil 0175 928 12 91

E-Mail ca@arnold-chemie.de
www.arnold-chemie.de
USt-IdNr. DE210204914

Folie 32

Kontakt:

Dr. Arnold Chemie-Beratung
Planung - Beratung - Information
Dienstleistung rund um die Chemie

Dr. Dipl.-Chem. Claudia Arnold
Hinterm Ließ 13
88481 Balzheim

ca@arnold-chemie.de
http://www.arnold-chemie.de

Tel.: 07347/920 233
Fax: 07347/920 597
Mobil: 0175/928 12 91

linkedIn
google
Twitter
Pinterest: Die poröse Galerie

Blog