

Grundlagen der Adsorption

Teil 2: Durchbruch, Koadsorption und Aktivkohle

T. Loeck & L. Michalak | Rinke GmbH

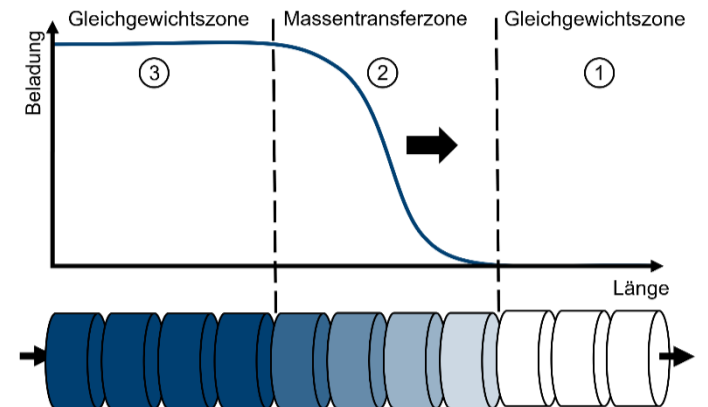


RINKE

Durchbruch

Die Adsorption hat eine endliche Aufnahmekapazität der umliegenden Stoffe. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Zeitpunkt zu erkennen, ab wann der Filter erschöpft ist. Das Phänomen wird Durchbruch genannt, sobald bestimmte Stoffe einen vorgegebenen Wert im Nachgang des Filters erreichen. Oft wird ein Durchbruch bereits ab 5 % Ausgangskonzentration im Verhältnis zur Eingangskonzentration definiert oder bis bestimmte Grenzwerte aus der TA-Luft auf der Reingasseite erreicht sind.

Innerhalb der Schüttung des Adsorbens bewegt sich eine Massentransferzone, welche angereichert ist mit den Stoffen aus der Umgebung. Der Adsorber wird im laufenden Betrieb in drei Zonen eingeteilt. Die erste ist die unbeladene Gleichgewichtszone, in der noch keine Adsorptionsprozesse stattfinden. Sie befindet sich im Gleichgewicht, kann aber noch mit Stoffen angereichert werden. Die zweite Zone wird von der Massentransferzone beschrieben, in der der Hauptadsorptionsprozess stattfindet. Die dritte Zone ist die beladene Gleichgewichtszone, in der die Adsorption und Desorption den gleichen Betrag haben. Die Massentransferzone verschiebt sich mit fortschreitender Zeit in Strömungsrichtung, bis der Filter durchbricht und keine Kapazitäten hat, die Stoffe aufzunehmen (die Massentransferzone hat das Ende des Adsorbens erreicht). Dieser Zustand wird als Durchbruch bezeichnet. Nachdem der Durchbruch stattgefunden hat, kann das Adsorbens regeneriert oder ausgetauscht werden.

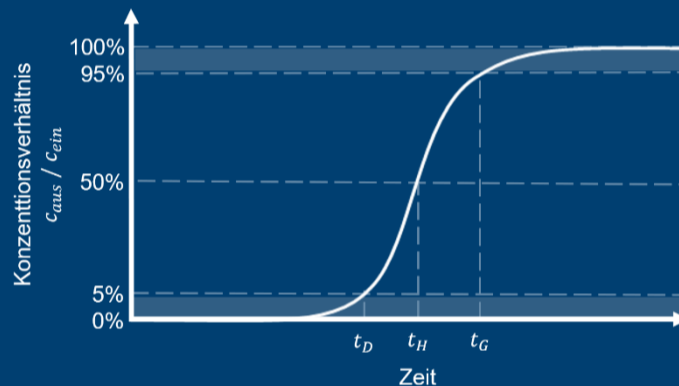


Darstellung der lokalen Konzentrationsänderung über die Zeit

Durchbruchskurve

Die Durchbruchskurve weist einen s-förmigen Verlauf auf. Als Annäherung kann eine Sigmoidfunktion verwendet werden, speziell eine logistische Funktion, um die Durchbruchskurve zu visualisieren. Die grafisch dargestellte Variante ist ein idealisierter Verlauf, der nur bei konstanten Randbedingungen zutrifft. Auf der y-Achse wird das Verhältnis zwischen Ausgangs- zu Eingangskonzentration gebildet, auf der x-Achse wird die Zeit geplottet. Dabei gibt es drei charakteristische Punkte:

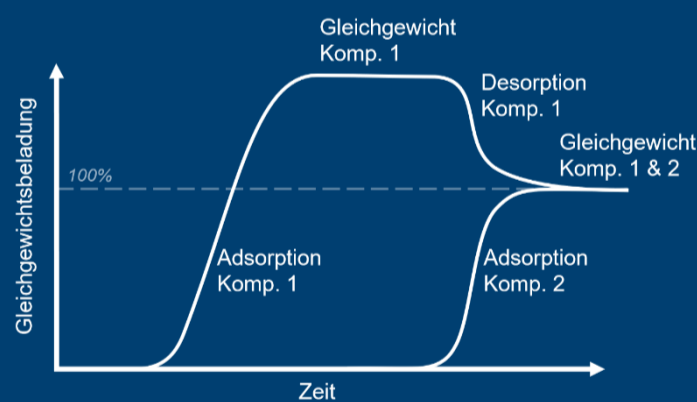
- t_D – Durchbruchzeit
- t_H – Halbwertszeit
- t_G – Gesamtzeit



Durchbruchskurve

Durchbruchskurve

Bei der Adsorption von mehreren Stoffkomponenten kommt es zur Koadsorption. Je nachdem welche Moleküle sich schneller durch das Festbett bewegen, werden diese eher adsorbiert. Sobald die nachfolgende Gruppe kommt, wird ein Teil der ersten Komponente desorbiert und die zweite Komponente wird bis zu einem gewissen Grad aufgenommen. Dies ist jedoch nicht das Maximalverhältnis, wie bei der Einkomponentenadsorption. Für die Koadsorption ergibt sich ein Verlauf der Durchbruchskurve, wie er rechts skizziert ist. Es stellt sich eine Gleichgewichtsbeladung des Gemisches ein.



Durchbruchverhalten einer Adsorption mit zwei Komponenten

Energiebilanzen

Um eine korrekte Erfassung der Adsorption zu erhalten, werden neben den bereits erwähnten Massenbilanzen ebenfalls die Energien, die während des gesamten Prozesses umgewandelt werden, bilanziert und berechnet. Diese Differentialgleichungen müssen numerisch gelöst werden und sind abhängig von Stoffeigenschaften und Adsorbens. Wie die Massenbilanzen werden die Energien über die feste und über die fluide Phase bilanziert. Aufgrund der Temperaturdifferenzen kann die Betrachtung der Energien nicht als isotherm angenommen werden. Die Energiebilanzen sehen wie folgt aus:

- Energiebilanz der festen Phase:

$$\frac{\partial T_F}{\partial t} - \frac{\Delta h_A}{M_A \cdot \left(c_{pS} + X c_{pA} + \frac{m_{Wand} c_{pWand}}{\rho_S A L (1 - \epsilon_L)} \right)} \frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{\alpha_p A_{Sp}}{\rho_S (1 - \epsilon_L) \left(c_{pS} + X c_{pA} + \frac{m_{Wand} c_{pWand}}{\rho_S A L (1 - \epsilon_L)} \right)} (T_F - T_G)$$

- Energiebilanz der fluiden Phase:

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\lambda_D}{\rho_G c_{pG}} \frac{\partial^2 T_G}{\partial z^2} - \frac{\dot{V}_G}{A \epsilon_L} \frac{\partial T_G}{\partial z} - \frac{T_G}{A \epsilon_L} \frac{\partial \dot{V}_G}{\partial z} - \frac{\dot{V}_G T_G}{\rho_G A \epsilon_L} \frac{\partial \rho_G}{\partial z} + \frac{\alpha_p A_{Sp} (1 - \epsilon_L)}{\rho_G \epsilon_L c_{pG}} (T_S - T_G) + \frac{4k_{Wand}}{\rho_G \epsilon_L c_{pG} D} (T_G - T_U)$$

Adsorbentien

Für eine Adsorption von VOC müssen die Adsorbentien bestimmte Eigenschaften aufweisen, um ein hohes Adsorptionsvermögen zu haben. Dabei spielt es eine Rolle, ob die Adsorbentien für eine Separation, Rückgewinnung oder einer Zersetzung Verwendung finden. Die wichtigsten Eigenschaften und relevantesten Adsorbentien sind nachfolgend aufgelistet.

Eigenschaften verschiedener Adsorbentien

- Hohe Adsorptionsfähigkeit
- Schnelles Diffusionsvermögen
- Hydrophobizität
- Einfache Regeneration
- Hohe thermische und hydrothermische Stabilität

Verschiedene Adsorbentien

- Aktivkohle
- Silica Gel
- Zeolithe
- Graphit
- Metallorganische Gerüstverbindungen

Aktivkohle - Modifizierung

Für die Bindung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wird meist Aktivkohle genutzt, da diese eine große spezifische Oberfläche von ca. 1.200 m²/g hat. In der Lufttechnik wird oft pelletförmige Kohle verwendet, damit der Strömungswiderstand und damit die Druckverluste geringer werden. In anderen Anwendungsgebieten wie bspw. der Müllverbrennung wird pulverförmige Aktivkohle benutzt, die anschließend verbrannt wird.

Für eine Aufbereitung und Erhöhung der Adsorptionskapazität an den Adsorbentien, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Um diese Eigenschaft zu verbessern, werden physikalische und chemische Verfahren angewandt. Physikalische Modifikationen wie bspw. die CO₂- oder Wasserdampf-Aktivierung sind kostengünstige Methoden, die für eine erhöhte Adsorptionsoberfläche sorgen. Chemische Modifikationen können durch säure- oder laugenhaltige Behandlungen, Stickstoff- oder Metalloxidbehandlungen sowie organische Polymerbeschichtungen durchgeführt werden. Die Adsorptionskapazität wird ebenfalls von der Zeitspanne, der Temperatur und dem Imprägnierungsverhältnis geprägt.

Abschließend lässt sich sagen, dass physikalische Modifikationen aufgrund der hohen Temperaturen hohe Energien benötigen und das Produkt teurer machen. Die Verwendung von chemischen Stoffen kann zu Umweltbelastungen führen. Nachfolgend soll in umweltfreundliche und hocheffiziente Chemikalien für eine große Bandbreite an Modifikationen geforscht werden sowie in der Modifikation aus chemisch/physikalischen Kombinationen.