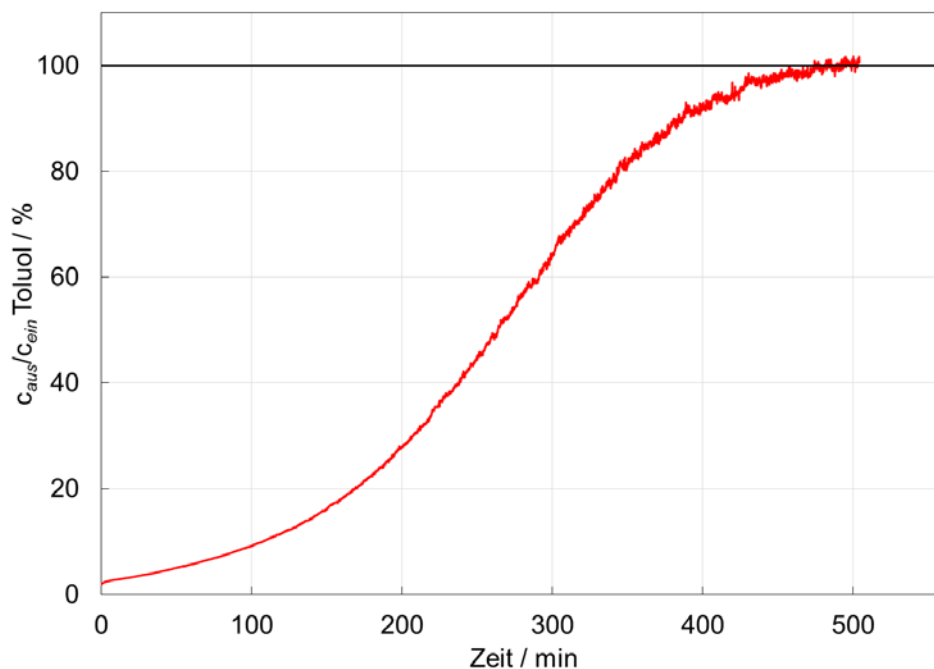


## DIN EN ISO 10121

### Prüfung von Filtermedien und konfektionierten Filtern für raumluftechnische Anlagen Leitfaden zur Nutzung der Testergebnisse

Die DIN EN ISO 10121-1 beschreibt Prüfmethode für Filtermedien, die in Filtern für raumluftechnische Anlagen eingesetzt werden.

Die Prüfung einer Medienprobe besteht hauptsächlich aus einem Durchbruchtest. Dabei wird eine Probe des Mediums in einem Adsorber positioniert und mit einem konditionierten Luftstrom, der eine bestimmte Konzentration einer gasförmigen Testsubstanz enthält, durchströmt. Die Konzentration der Testsubstanz wird während der Versuchszeit vor ( $c_{\text{ein}}$ ) und hinter ( $c_{\text{aus}}$ ) der Medienprobe gemessen und damit die Durchbruchkurve in Abhängigkeit von der Zeit ( $c_{\text{aus}}(t)/c_{\text{ein}}(t)$ ) bestimmt, siehe Abbildung 1. Die Effizienz  $E = 1 - c_{\text{aus}}/c_{\text{ein}}$  bezeichnet den Anteil der abzuscheidenden Substanz, der von der Filterschicht zurückgehalten wird. Mit Hilfe von Massenbilanzen kann auf der Basis der Durchbruchkurve die während des Versuches abgeschiedene Masse berechnet werden. Durch den Bezug der abgeschiedenen Masse auf die Masse des Sorbens in der Medienprobe wird die Beladung des Sorbens ermittelt.



**Abbildung 1:** Durchbruchkurve von Toluol an einem Flachfiltermedium mit Aktivkohle bei 23 °C, 50 % r. F. und Anströmgeschwindigkeit  $v = 0,18$  m/s

In der Norm wird darauf hingewiesen, dass grundsätzlich Tests bei Bedingungen der tatsächlich angestrebten Anwendung (z. B. abzuscheidende Substanz, Konzentration, relative Luftfeuchte) die genauesten Ergebnisse zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Mediums liefern. Da geringe Testgaskonzentrationen jedoch zu langen Versuchszeiten führen können und manche Substanzen als Testgas schwierig zu handhaben sind, wird, um den Testaufwand zu begrenzen, eine normierte Vergleichsprüfung für Medien beschrieben. Das Ziel der normierten Vergleichsprüfung ist, in Versuchszeiten zwischen einer und zwölf Stunden Testergebnisse zu ermitteln, mit denen Filtermedien verglichen werden können.

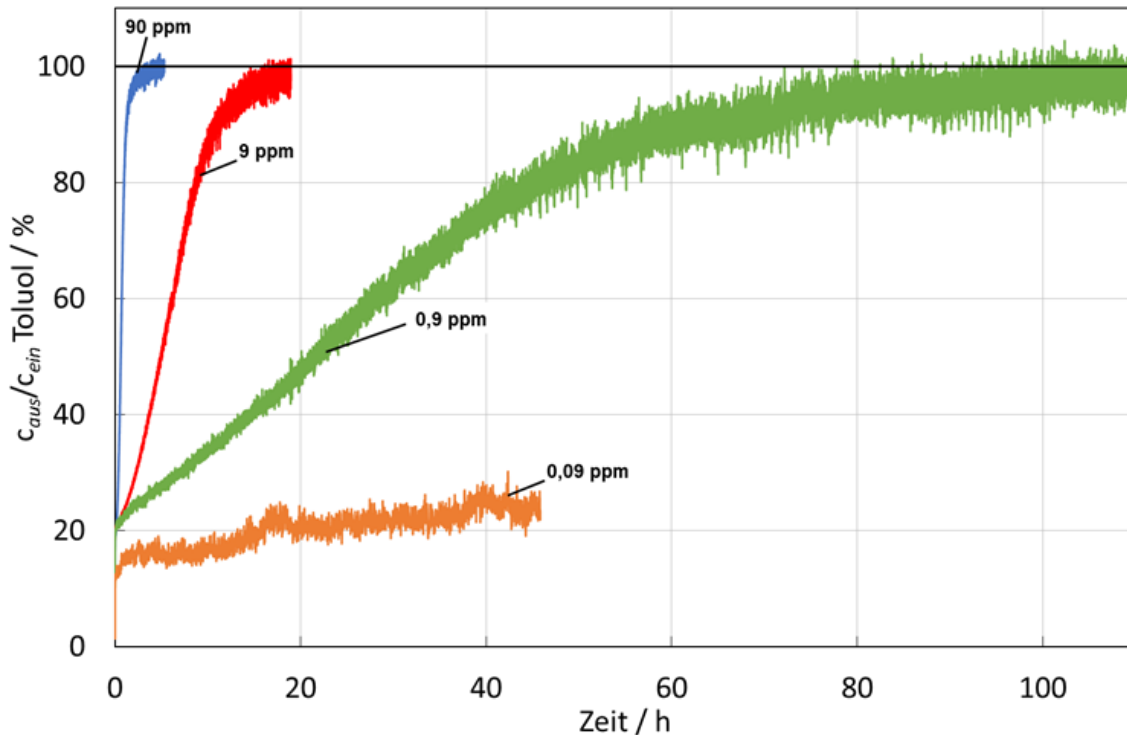
Parameter für die normierte Vergleichsprüfung sind drei Testsubstanzen (Toluol, Schwefeldioxid und Ammoniak), zwei Testgasvolumenanteile (9 ppm, 90 ppm in konditionierter Luft), eine Testgastemperatur von 23 °C, eine relative Luftfeuchte von 50 %, sowie Adsorber-Innendurchmesser und Anströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Sorbensabmessungen. Details sind der Norm zu entnehmen.

Teil 2 der DIN EN ISO 10121 beschreibt die Prüfung konfektionierter Raumlufffilter mit Hilfe von Durchbruchversuchen. Diese laufen prinzipiell genauso ab wie die Versuche an Medien, nur die Abmessungen der Testanlage sind entsprechend größer. Kommerziell erhältliche RLT-Filter haben häufig Abmessungen von ca. 600 mm x 600 mm. Auch in diesem Teil der Norm wird darauf verwiesen, dass die Testparameter idealerweise möglichst nahe bei den tatsächlichen Anwendungsparametern liegen sollten. Für Benchmarktests wird jedoch ebenfalls eine vereinfachte Vergleichsprüfung (drei Testsubstanzen, zwei Testgasvolumenanteile, 23 °C, 50 % r. F., Lufteinströmgeschwindigkeit von 2,5 m/s im freien Kanalquerschnitt) angegeben.

Der Einfluss der Parameter Testsubstanz, Prüfgaskonzentration und relative Luftfeuchte des Trägerluftstroms auf die Ergebnisse von Medien- und Filtertests in Anlehnung an die ISO 10121 wurde im Forschungsvorhaben „Evaluation und Optimierung praxisorientierter Prüfprozeduren für adsorptive Filter für die allgemeine Raumlüftung zur Fortschreibung der DIN EN ISO 10121“ (Kurztitel „RLT-Gasfilter“, FV-Nr. 18516, Laufzeit 01.12.2014-30.11.2017, [http://veu.de/index.php?article\\_id=28&clang=0&show=detail&id=536&search=18516](http://veu.de/index.php?article_id=28&clang=0&show=detail&id=536&search=18516)) untersucht und wird im Folgenden kurz dargestellt. Die ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist dem Abschlussbericht zu entnehmen, der auf der zuvor aufgeführten Internetseite in Kürze abrufbar sein wird.

## Einfluss der Testgaskonzentration

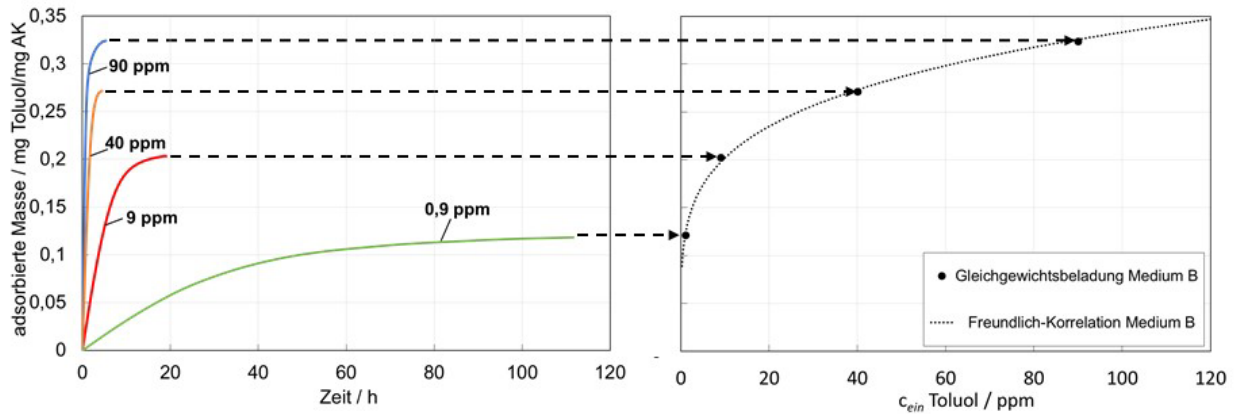
Bei Substanzen, die durch Physisorption abgeschieden werden, ist die Kapazität einer Aktivkohle für den abzuscheidenden Stoff abhängig von dessen Gasphasenkonzentration. Bei Durchbruchkurven ist dieser Zusammenhang daran zu erkennen, dass z. B. der vollständige, hundertprozentige Durchbruch von 90 ppm Toluol nicht zehnmal schneller erfolgt als der von 9 ppm, sondern vielleicht nur viermal so schnell (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Durchbruchkurven von Toluol an einem Flachfiltermedium (Hersteller B) mit Aktivkohle bei 23 °C, 50 % r. F.,  $c_{\text{ein}} = 0,09 - 90$  ppm und  $v = 0,055$  m/s

Der Zusammenhang zwischen der maximalen Beladung  $X$  eines Adsorbens und der Gasphasenkonzentration  $c$  des abzuscheidenden Stoffes wird mit Adsorptionsisothermen beschrieben. Adsorptionsisothermen gelten nicht nur für bestimmte Temperaturen, sie sind darüber hinaus spezifisch für Systeme aus abzuscheidenden Substanzen und Sorbentien. So können beispielsweise aus der Adsorptionsisotherme von n-Butan an einem spezifischen Medium keine quantitativen Aussagen über die Adsorption an einem anderen Medium getroffen werden.

Einzelne Werte von Adsorptionsisothermen können aus Durchbruchkurven der jeweiligen Substanz durch ein Medium abgeleitet werden, siehe Abbildung 3. Wurde der Versuch bis zu einem Durchbruch von 100 % durchgeführt, kann die bis dahin abgeschiedene Masse mit Hilfe von Massenbilanzen auf der Basis der Durchbruchkurve berechnet werden. Durch den Bezug dieses Wertes auf die Masse des Sorbens in der Medienprobe oder im Filter wird die Kapazität oder Beladung des Sorbens ermittelt, die im Gleichgewicht zu der Konzentration der abzuscheidenden Substanz in der Gasphase steht.



**Abbildung 3:** Prinzipielle Ableitung von Isothermenwerten aus Beladungskurven

In der Regel lässt sich der Zusammenhang zwischen Isothermenwerten von organischen Substanzen an Aktivkohle mathematisch mit Isothermengleichungen nach Langmuir oder Freundlich beschreiben. Beide Gleichungen beinhalten zwei Parameter, die für bestimmte Systeme durch Korrelation mit den aus den Versuchen abgeleiteten Werten berechnet werden können. Die Gleichung der Langmuir-Isotherme lautet

$$X = \frac{X_{\text{mon}} \cdot k_L \cdot c}{1 + k_L c}, \quad [1]$$

die der Freundlich-Isotherme

$$X = k_F \cdot c^n. \quad [2]$$

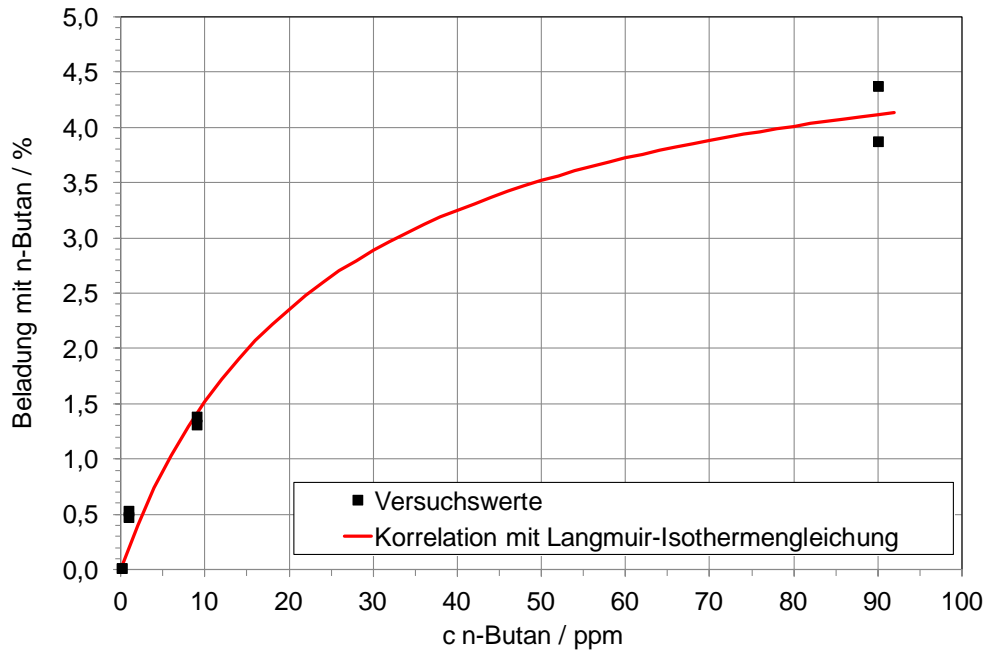
Dabei ist  $X$  die Beladung des Sorbens mit der abgeschiedenen Substanz,  $c$  die Konzentration oder den Volumenanteil des Adsorptivs,  $X_{\text{mon}}$  die Beladung, die einer monomolekularen Bedeckung der inneren Oberfläche des Sorbens entspräche,  $k_L$ ,  $k_F$  sowie  $n$  sind Koeffizienten der Langmuir- bzw. Freundlich-Isotherme.

Im Projekt RLT-Gasfilter wurden aus Durchbruchversuchen an verschiedenen Filtermedien mit den Adsorptiven n-Butan und Toluol bei Konzentrationen bzw. Volumenanteilen von 0,09 ppm bis 90 ppm in feuchter Luft (50 % r. F.) Isothermenwerte bei 23 °C bestimmt. Die ermittelten Isothermenwerte sind, um einen Eindruck davon zu vermitteln, wie groß der Einfluss der Gasphasenkonzentration auf die Kapazität des Sorbens ist, in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Darüber hinaus sind die Isothermengleichungen nach Langmuir- bzw. Freundlich abgebildet, die durch Anpassung an die Isothermenwerte mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt wurden. Für den Fall, dass die Konzentration in der Einheit ppm und die Beladung in % verwendet wurden, lauten die Isothermenparameter für n-Butan:

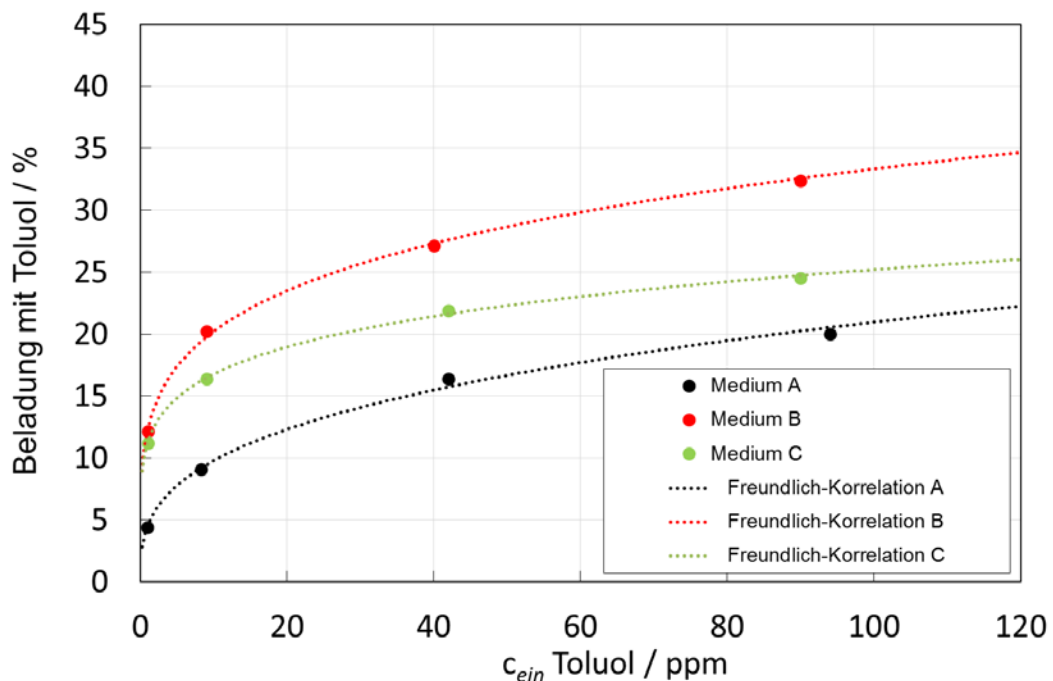
Medium B  $X_{\text{mon}} = 5,24$  und  $k_L = 0,04$

und für Toluol:

Medium A  $k_F = 4,71$ ,  $n = 0,32$ ,  
 Medium B  $k_F = 12,41$ ,  $n = 0,21$ ,  
 Medium C  $k_F = 11,19$ ,  $n = 0,18$ .



**Abbildung 4:** Adsorptionsisotherme von n-Butan in feuchter Luft (50 % r. F.) bei 23 °C an einem Flachfiltermedium (Hersteller B) mit Aktivkohle

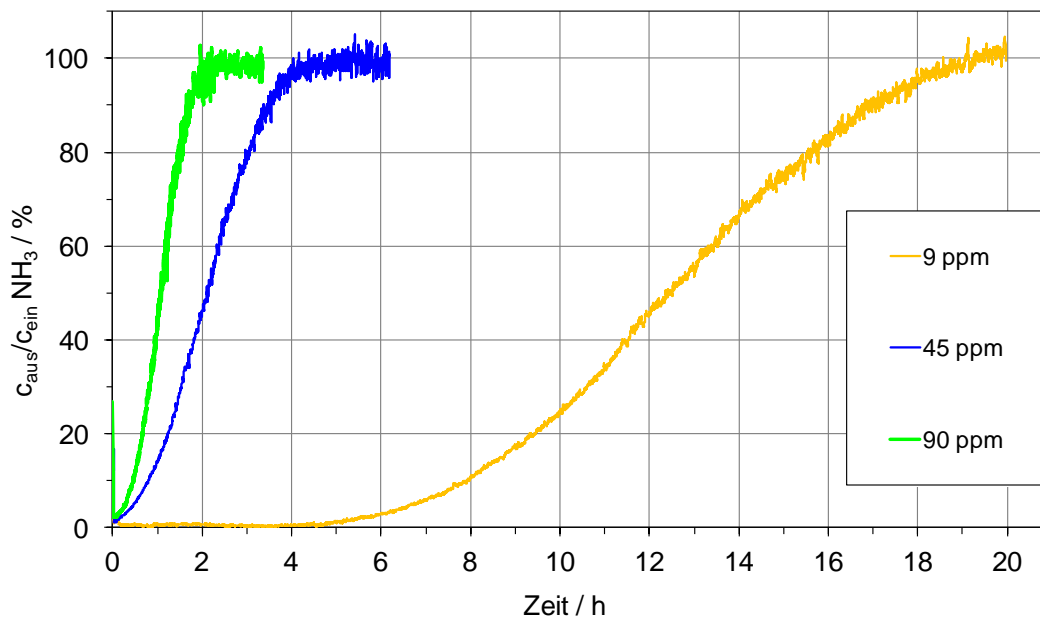


**Abbildung 5:** Adsorptionsisothermen von Toluol in feuchter Luft (50 % r. F.) bei 23 °C an verschiedenen Flachfiltermedien (Hersteller A, B und C) mit Aktivkohle

Bei Substanzen, die chemisorptiv abgeschieden werden, ist der Einfluss der Konzentration auf die Kapazität der Aktivkohle wesentlich geringer als bei physisorbierenden Stoffen. Im Projekt RLT-Gasfilter wurde der Einfluss anhand der Adsorption von Schwefeldioxid und Ammoniak an unterschiedlichen Medien und bei verschiedenen Konzentrationen untersucht.

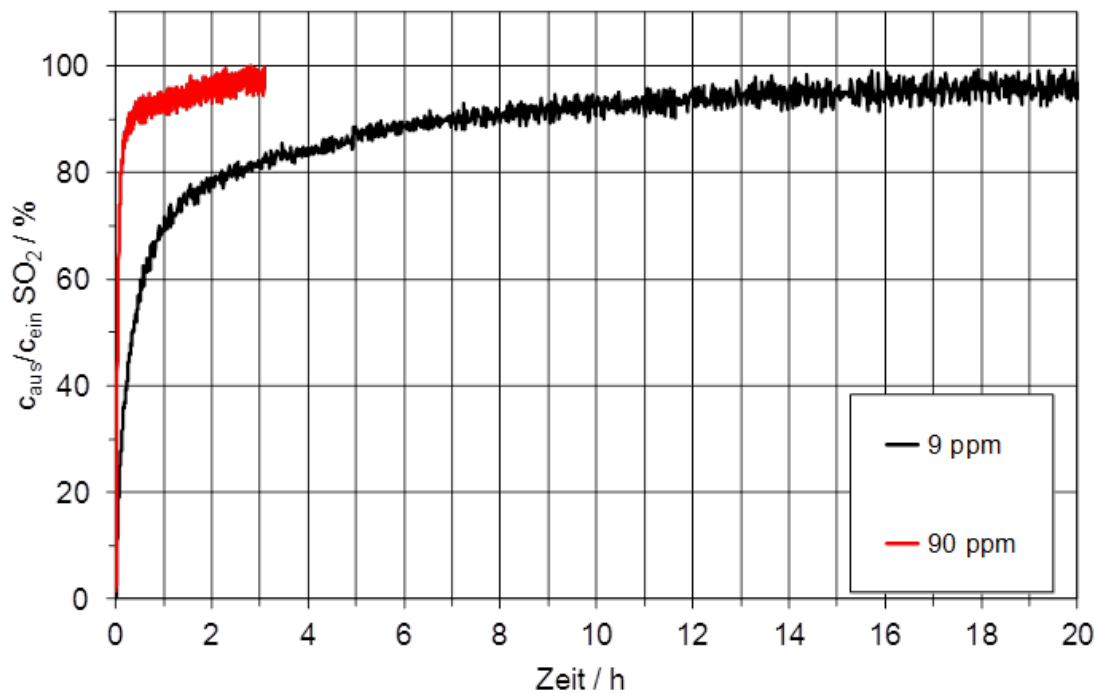
In Filtern, die speziell für die Abscheidung von Ammoniak vorgesehen sind, werden häufig Ionentauscher oder imprägnierte Aktivkohlen eingesetzt, weil die Leistungsfähigkeit von herkömmlicher, nicht imprägnierter Aktivkohle zur Abscheidung von Ammoniak gering ist. Hier

erfolgten die Untersuchungen mit Ammoniak an einem Medium mit Ionentauscher als Sorbens, die Durchbruchkurven sind in Abbildung 6 dargestellt. Die bei den verschiedenen Testgaskonzentrationen erzielten Kapazitäten unterschieden sich nur wenig.



**Abbildung 6:** Durchbruchkurven von Ammoniak an einem Flachfiltermedium mit Ionentauscher (Hersteller J) bei 23 °C, 50 % r. F.,  $c_{\text{ein}} = 9\text{--}90$  ppm und  $v = 0,16$  m/s

Ein vergleichbares Ergebnis ergaben Untersuchungen mit 9 ppm und 90 ppm Schwefeldioxid an einem Medium mit  $\text{K}_2\text{CO}_3$ -imprägnierter Aktivkohle bei 23 °C, 50 % r. F. und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s. Die ermittelten Durchbruchkurven zeigt Abbildung 7. Der Kurvenverlauf, Anstieg, Erreichen eines Plateaus und nahezu konstante Verharren auf diesem Wert während der Versuchszeit, beruht auf den Sorptionsmechanismen von Schwefeldioxid. Physisorbiertes Schwefeldioxid wird in Anwesenheit von sorbiertem Wasser durch chemische Reaktionen umgewandelt und so das Sorptionspotenzial immer wieder erneuert bis die Sättigung erreicht ist. Die Zeit bis zum Erreichen der Sättigung ist jedoch lang. In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass der Durchbruch bei dem um den Faktor 10 kleineren Testgasvolumenanteil von 9 ppm ungefähr um den Zeitfaktor 10 später erfolgt als bei 90 ppm. Bei Versuchsende beträgt die Beladung des Sorbens mit  $\text{SO}_2$  bei beiden Testgasvolumenanteilen ungefähr 10 %. Es ist kein Einfluss der Konzentration auf die Kapazität festzustellen.



**Abbildung 7:** Durchbruchskurven von Schwefeldioxid an einem Flachfiltermedium mit Ionentauscher (Hersteller J) bei 23 °C, 50 % r. F.,  $c_{\text{ein}} = 9$  und 90 ppm,  $v = 0,2$  m/s

#### Fazit:

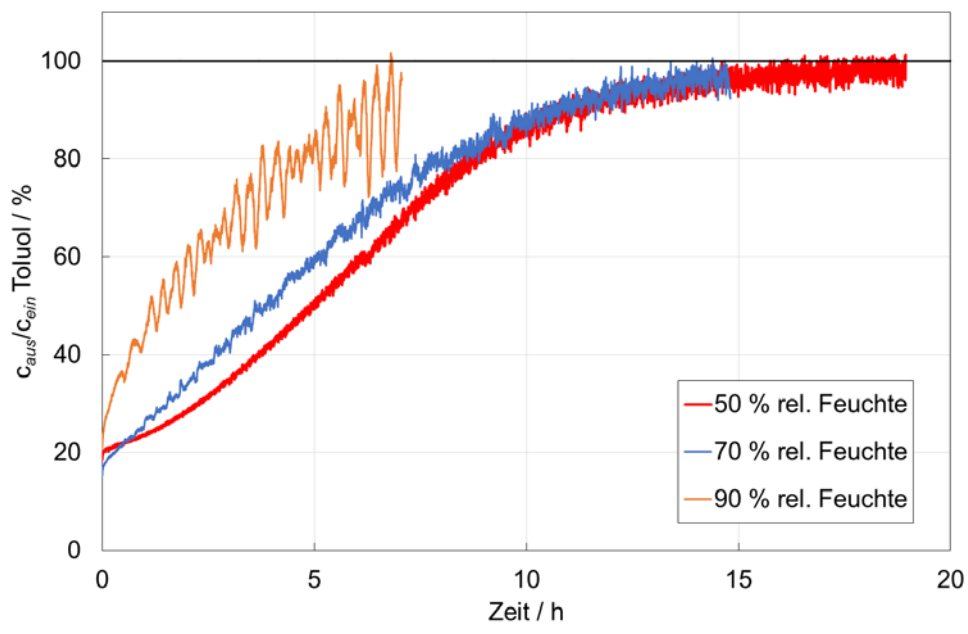
Bei Testsubstanzen wie Toluol und n-Butan, die überwiegend durch Physisorption abgetrennt werden, hat die Testgaskonzentration in dem untersuchten Konzentrationsbereich von 0,09 bzw. 0,9 bis zu 90 ppm einen entscheidenden Einfluss auf die Adsorptionskapazitäten. Testergebnisse, die bei unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen gewonnen wurden, sind nicht miteinander vergleichbar. Für Tests nach der DIN EN ISO 10121 ist daher abzuwägen, mit welcher Testgaskonzentration die Durchbruchversuche durchgeführt werden und die ermittelten Kapazitäten sind in Abhängigkeit von diesen zu beurteilen.

Bei eher chemisorbierenden Substanzen wie  $\text{SO}_2$  und  $\text{NH}_3$  beeinflusst die Testgaskonzentration die Sorbenskapazität weniger. Um den Aufwand für Vergleichstests zu verringern, können diese bei höheren Testgaskonzentrationen durchgeführt werden.

## Einfluss der relativen Feuchte

Neben der Konzentration kann die relative Feuchte einen Effekt auf die Kapazität und die Abscheideleistung von gasförmigen Substanzen haben. Die Norm empfiehlt deshalb Tests bei höherer Feuchte durchzuführen, insbesondere wenn im Anwendungsfall relative Feuchten von deutlich größer als 50 % r. F. erwartet werden. Im Folgenden wird der unterschiedliche Einfluss der relativen Feuchte beispielhaft anhand der Durchbruchkurven von Toluol, Schwefeldioxid und Ozon veranschaulicht.

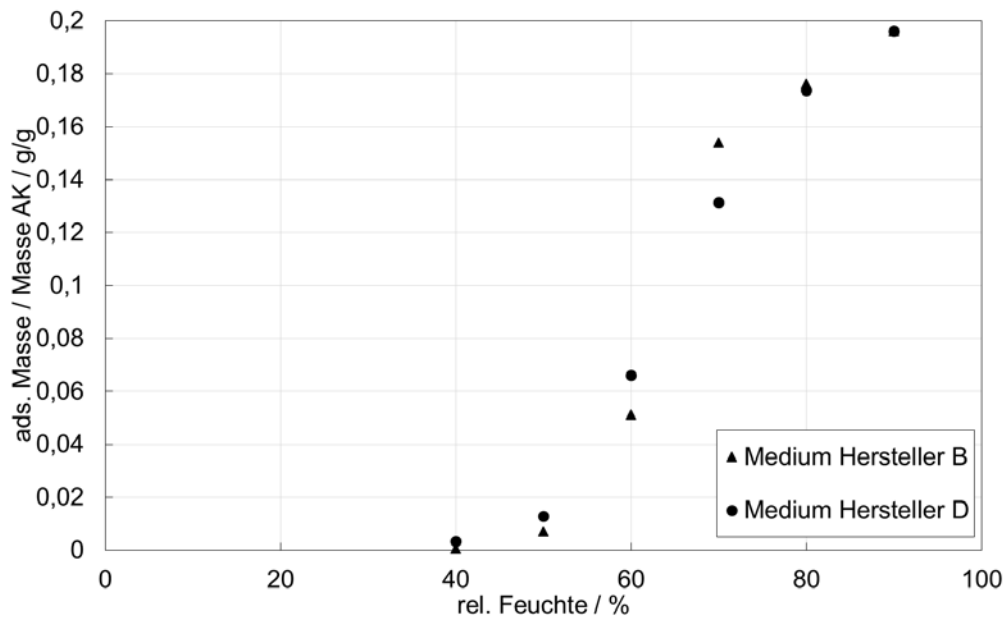
Bei der Physisorption des schlecht wasserlöslichen Toluols bewirkt eine Erhöhung der relativen Feuchte auf Werte oberhalb von ca. 50 % eine Verschlechterung der Abscheideleistung. Dies wird anhand von Abbildung 8 am Beispiel der Adsorption von 9 ppm Toluol an einem adsorptiven Medium (Hersteller B) mit nicht-imprägnierter Aktivkohle bei 23 °C und relativen Feuchten von 50 % bis 90 % deutlich.



**Abbildung 8:** Durchbruchkurven von Toluol an einem Flachfiltermedium (Hersteller B) mit Aktivkohle bei  $c_{\text{ein}} = 9 \text{ ppm}$ ,  $v = 0,055 \text{ m/s}$ ,  $23 \text{ °C}$  und unterschiedlichen relativen Feuchten

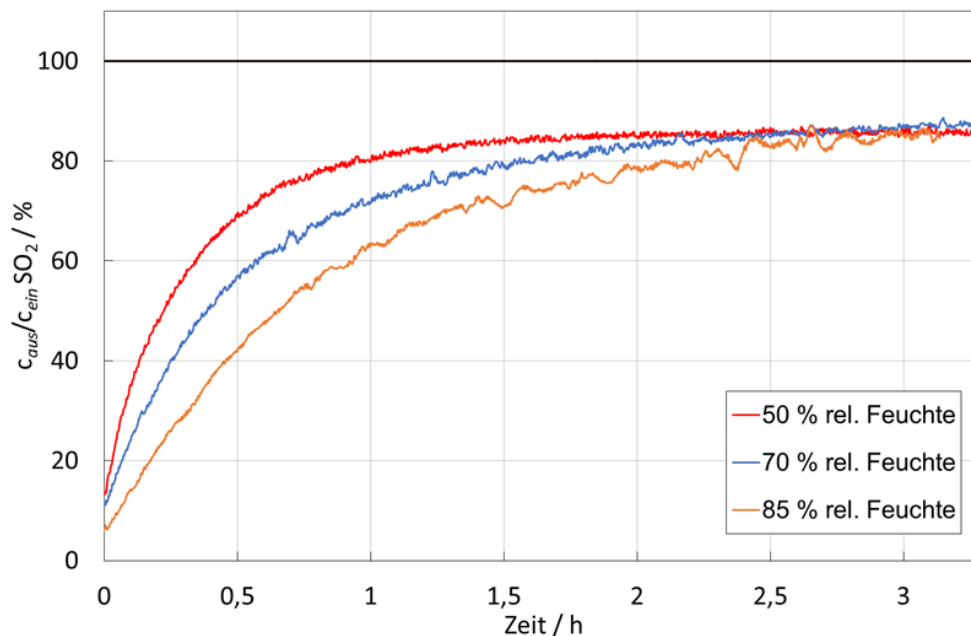
Wie der Abbildung 8 zu entnehmen ist, wirken sich vor allem relative Feuchten von 90 % negativ auf die Adsorptionsleistung von Toluol aus. Dies hängt mit einer höheren Wasseraufnahmekapazität von Aktivkohlen im Bereich höherer relativer Feuchte zusammen (Clusterbildung an polaren Oberflächengruppen und Kapillarkondensation), wie die Wasserdampfisotherme des Mediums B (siehe Abbildung 9) verdeutlicht. Infolge einer verstärkten Wasseraufnahme werden Bereiche des Porensystems der Aktivkohle belegt oder blockiert und stehen somit nicht für die Adsorption von Toluol zur Verfügung.





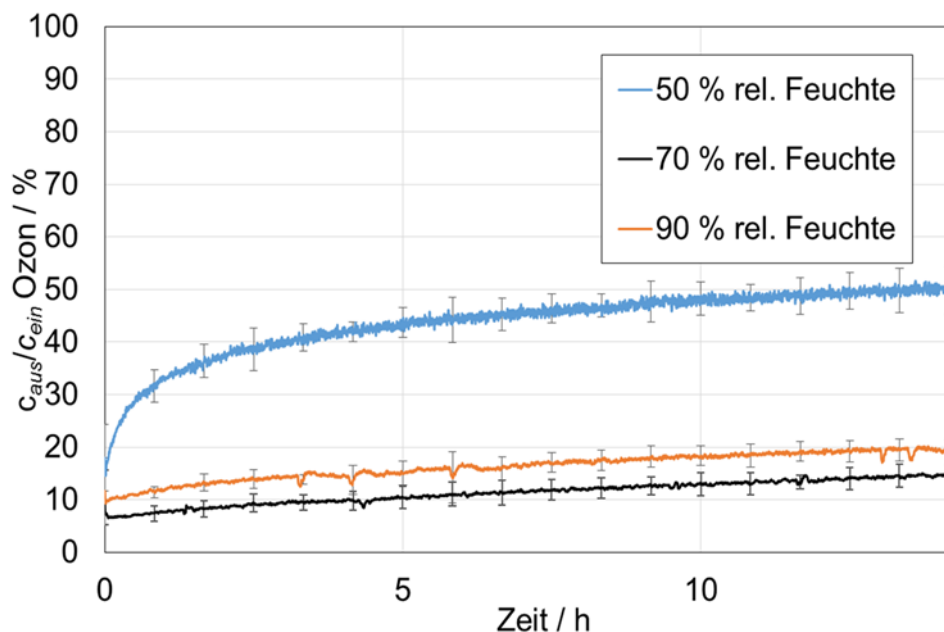
**Abbildung 9:** Adsorptionsisothermen von Wasserdampf bei 23 °C an Medien der Hersteller B und D

Bei der überwiegend chemisorptiven Abscheidung von Schwefeldioxid (9 ppm, 23 °C) an imprägnierten Aktivkohlemedien des Herstellers D führt eine Erhöhung der relativen Feuchte dagegen zu einer Verbesserung der Abscheideleistung (Abbildung 10). Das gut wasserlösliche Schwefeldioxid reagiert mit dem auf der Aktivkohle adsorbierten Wasser zu schwefliger Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) und Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Durch eine Zunahme des adsorbierten Wassers mit höherer relativer Feuchte (siehe Abbildung 9) steht mit steigender Feuchte eine größere Wassermenge für eine Reaktion mit Schwefeldioxid zur Verfügung.



**Abbildung 10:** Durchbruchkurven von Schwefeldioxid an einem chemisorptiven Flachfiltermedium (Hersteller D) mit imprägnierter Aktivkohle bei  $c_{\text{ein}} = 9$  ppm,  $v = 0,16$  m/s, 23 °C und unterschiedlichen relativen Feuchten

Auch bei der Abscheidung von Ozon führt eine Erhöhung der relativen Feuchte auf Werte oberhalb von 50 % zu einer Verbesserung der Abscheideleistung. Dies ist aus der Abbildung 11 anhand der Abscheidung von 0,9 ppm Ozon an Medien des Herstellers B bei 23 °C bei relativen Feuchten von 50 bis 90 % ersichtlich. Die bessere Ozonabscheideleistung bei einer Erhöhung der relativen Feuchte ist auf eine mehrstufige Reaktion (detaillierte Erläuterung siehe Schlussbericht) des Ozons mit adsorbiertem Wasser zu Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) zurückzuführen. Bei einer relativen Feuchte von 90 % wurde im Vergleich zu 50 % r. F. zwar eine wesentlich bessere Abscheidung des Ozons beobachtet, diese war jedoch geringfügig schlechter als bei 70 % r. F. Letzteres Ergebnis lässt sich durch eine verstärkte Kapillarkondensation im Bereich höherer relativer Feuchte (70 bis 90 %) erklären, wodurch es zu einer Verblockung von Poren durch Wasser kommt, so dass Teile des Porensystems nicht mehr zugänglich sind und dadurch kleinere Oberflächen mit adsorbiertem Wasser für eine Reaktion mit Ozon zur Verfügung stehen.



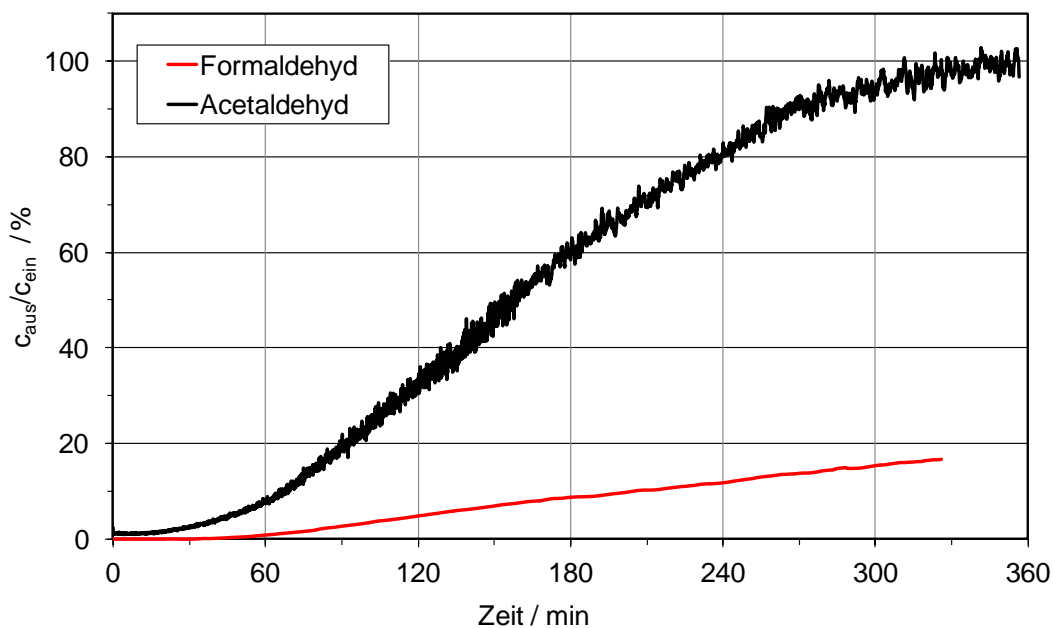
**Abbildung 11:** Durchbruchkurven von Ozon an einem Flachfiltermedium (Hersteller B) mit Aktivkohle bei  $c_{\text{ein}} = 0,9$  ppm,  $v = 0,055$  m/s, 23 °C und unterschiedlichen relativen Feuchten

Fazit:

Bei der physisorptiven Abscheidung von Toluol an nicht imprägnierten Aktivkohlemedien kommt es bei einer Erhöhung der relativen Feuchte von 50 auf 90 % zu einer Verschlechterung der Adsorptionsleistung. Die überwiegend chemisorptive Abscheidung von Schwefeldioxid an imprägnierten und die Reaktion von Ozon an nicht-imprägnierten Aktivkohlemedien wird dagegen durch eine Erhöhung der relativen Feuchte auf Werte von  $> 50$  % r. F. begünstigt.

## Einfluss der Testsubstanz

Ein Vergleich der Adsorption von verschiedenen Substanzen an einem adsorptiven Medium ist anhand von Durchbruchkurven möglich, wenn die Durchbruchversuche bei gleicher Anströmgeschwindigkeit und auch sonst gleichen Bedingungen (Temperatur, Feuchte, Konzentration) durchgeführt wurden. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Sorbenskapazitäten für die verschiedenen Substanzen zum Vergleich zu nutzen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Adsorption organischer Substanzen, die durch Physisorption abgeschieden werden, wie z. B. Toluol, Formaldehyd oder Acetaldehyd durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. So kann sich auch das Adsorptionsverhalten von Substanzen, die sich nur durch eine zusätzliche Methylgruppe unterscheiden, wie z. B. Formaldehyd und Acetaldehyd, deutlich unterscheiden, siehe Abbildung 12. Da Unterschiede bei der Adsorption verschiedener Substanzen darüber hinaus medienspezifisch sind, kann z. B. aus den Testergebnissen für Formaldehyd und Acetaldehyd an der Aktivkohleschüttung in Abbildung 12 nicht das Verhalten an einem anderen Sorbens quantifiziert werden. Vergleichbares gilt für Substanzen, die durch Chemisorption abgeschieden werden. Die chemischen Reaktionen, die an der inneren Oberfläche des Sorbens bzw. im Porensystem stattfinden, sind in der Regel hochgradig substanz- und sorbensspezifisch.



**Abbildung 12:** Durchbruchkurven von Formaldehyd und Acetaldehyd an einer Aktivkohleschüttung bei 23 °C, 50 % r. F.,  $c_{\text{ein}} = 2$  ppm und  $v = 0,05$  m/s

Im Rahmen des Projektes wurde der Einfluss der Testsubstanz unter dem Aspekt untersucht, Ersatzteststoffe für Schwefelwasserstoff, Formaldehyd und Naphthalin zu ermitteln, die weniger gefährlich bzw. leichter zu handhaben sind. Als mögliche Ersatzstoffe wurden Schwefeldioxid für Schwefelwasserstoff, Acetaldehyd für Formaldehyd sowie 1-Methylnaphthalin und Toluol für Naphthalin überprüft. Schwefeldioxid wies an den getesteten Medien ein ähnliches Durchbruchverhalten wie Schwefelwasserstoff auf. Die anderen Ersatzstoffe wurden an den getesteten Medien wesentlich, jedoch nicht um einen konstanten Faktor, schlechter adsorbiert als die zu ersetzenden Stoffe, so dass sie nur sehr bedingt zur quantitativen Abschätzung des Durchbruchverhaltens geeignet sind.