



AiF-Forschungsvereinigung
„Energie- und Umwelttechnik“

2017

Innovationsreport

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF Forschungsvorhabensnummer: 18516 N

Evaluierung und Optimierung praxisorientierter Prüfprozeduren für adsorptive Filtermedien und Einrichtungen zur Reinigung der Gasphase für die allgemeine Raumlüftung

Laufzeit: 01.12.2014 – 30.11.2017

Beteiligte Forschungsstelle(n):

1. Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl für Nanopartikel-Prozeßtechnologie
2. Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.
Bereich Luftreinhaltung & Prozessaerosole

Institut für Energie- und
Umwelttechnik e. V.
Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Bereich Industrielle
Gemeinschaftsforschung
www.iuta.de/igf

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18516 N

Thema

Evaluation und Optimierung praxisorientierter Prüfprozeduren für adsorptive Filter für die allgemeine Raumlüftung zur Fortschreibung der DIN EN ISO 10121

Berichtszeitraum

01.12.2014 - 30.11.2017

Forschungsvereinigung

Energie- und Umwelttechnik

Forschungseinrichtung(en)

Universität Duisburg-Essen, IVG, Lehrstuhl Nanopartikel-Prozesstechnik

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.

Duisburg, 28.02.2018



Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt

Duisburg, 28.02.2018



Ort, Datum

Dr.-Ing. Uta Sager

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	4
1	Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Ziele	5
2	Bearbeitung und Ergebnisse	7
2.1	Experimentelles - Einrichtungen und Versuchsdurchführung	7
2.1.1	Forschungsstelle 1 (Universität Duisburg-Essen)	7
2.1.2	Forschungsstelle 2 (IUTA)	11
2.1.2.1	Medienprüfstand für toxische Testsubstanzen	11
2.1.2.2	Filterprüfstand für RLT-Filter	13
2.2	AP 1 - Ergebnisübertragung Medientests (DIN EN ISO 10121-1) - Filtertests (DIN EN ISO 10121-2)	17
2.2.1	Auswahl geeigneter Medien und Filter	17
2.2.2	Versuche an adsorptiven Filtermedien	21
2.2.2.1	n-Butan	23
2.2.2.2	Toluol	30
2.2.2.3	Schwefeldioxid	37
2.2.2.4	Ammoniak	38
2.2.2.5	Stickstoffdioxid	39
2.2.2.6	Ozon	43
2.2.3	Versuche an adsorptiven Filterelementen	45
2.2.3.1	n-Butan	45
2.2.3.2	Toluol	46
2.2.4	Versuche an konfektionierten Raumlufffiltern	48
2.2.4.1	n-Butan	49
2.2.4.2	Toluol	50
2.2.4.3	Schwefeldioxid	51
2.2.4.4	Ammoniak	52
2.2.4.5	Stickstoffdioxid	53
2.2.4.6	Ozon	54
2.2.5	Übertragbarkeit / Vergleich des Adsorptionsverhaltens von Filtermedien, Filterelementen und konfektionierten raumlufftechnischen Filtern	55
2.2.5.1	n-Butan	55
2.2.5.2	Toluol	58
2.2.5.3	Schwefeldioxid	61
2.2.5.4	Ammoniak	63
2.2.5.5	Stickstoffdioxid	65
2.2.5.6	Ozon	68
2.2.6	Fazit zur Übertragbarkeit der Ergebnisse von Medien auf Filter	71
2.3	AP 2 - Einfluss der relativen Feuchte auf Testergebnisse nach DIN EN ISO 10121	72

2.3.1	Versuche an adsorptiven Filtermedien	72
2.3.1.1	Wasserdampf	72
2.3.1.2	Toluol	74
2.3.1.3	Schwefeldioxid	78
2.3.1.4	Ammoniak	79
2.3.1.5	Ozon	80
2.3.2	Versuche an konfektionierten Raumlufffiltern	82
2.3.2.1	Toluol	82
2.3.2.2	Schwefeldioxid	83
2.3.2.3	Ammoniak	83
2.3.2.4	Ozon	84
2.3.3	Fazit zum Einfluss der relativen Feuchte	85
2.4	AP 3 - Einfluss der Testgaskonzentration auf Testergebnisse nach DIN EN ISO 10121-1	86
2.4.1	n-Butan	87
2.4.2	Toluol	89
2.4.3	Schwefeldioxid	93
2.4.4	Ammoniak	94
2.4.5	Fazit zum Einfluss der Testgaskonzentration	95
2.5	AP4 - Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Naphthalin und Ersatzstoffen	96
2.5.1	Schwefelwasserstoff	96
2.5.2	Formaldehyd	99
2.5.3	Naphthalin	104
2.5.4	Fazit zur Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Naphthalin und Ersatzstoffen	109
2.6	AP I - Modellierung von Durchbruchskurven	110
2.6.1	Modellierung von Durchbruchskurven bei geringeren Konzentrationen mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz	110
2.6.2	Modellierung von Durchbruchskurven ab einem Durchbruch von 50 % mit dem Yoon-Nelson-Ansatz	114
2.6.3	Kopplung des Wheeler-Jonas- und des Yoon-Nelson-Ansatzes	117
2.7	AP II - Validierung der Prüfmethodik nach DIN EN ISO 10121	120
2.8	Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen	122
3	Verwendung der Zuwendung	124
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	124
5	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	125
6	Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	125
7	Literaturverzeichnis	128

Zusammenfassung

Evaluation und Optimierung praxisorientierter Prüfprozeduren für adsorptive Filter für die allgemeine Raumlüftung zur Fortschreibung der DIN EN ISO 10121

Luftaufbereitungsanlagen für die allgemeine Raumlüftung gewinnen immer mehr an Bedeutung und in den vergangenen Jahren stieg die Nachfrage nach Filtern, die nicht nur den Staub abscheiden, sondern auch gasförmige Luftverunreinigungen. Um für diese adsorptiven Filter eine einheitliche Bewertungsgrundlage zu schaffen, wurden in der internationalen Norm DIN EN ISO 10121 Prüfprozeduren zur Bestimmung der Reinigungskapazität festgelegt. Teil 1 beschreibt die Prüfprozeduren für adsorptive Filtermedien und Teil 2 die für daraus hergestellte konfektionierte adsorptive Filter. Die Norm führte bei den Medien- und Filterherstellern jedoch eher zu Verunsicherung.

In dem beschriebenen Forschungsvorhaben wurde die Ausführung der Prüfungen nach Norm mit den ausgewählten Testsubstanzen n-Butan, Toluol, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Ammoniak und Ozon sowohl an Medien als auch an Filtern vor neutralem Hintergrund evaluiert.

Darüber hinaus wurde mit den Testsubstanzen an ausgesuchten Filtern unterschiedlicher Bauform und den zugehörigen Medien geprüft, ob Testergebnisse, die an Medien gewonnen wurden, auf Filter übertragbar sind. Das Ergebnis war, dass Medientests, die bei vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden wie Filtertests, einen relativ guten Eindruck von der Filterleistung für alle Testsubstanzen außer von n-Butan vermitteln können.

Weiterhin wurde der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das Testergebnis bei Medien- und Filtertests mit Toluol, Schwefeldioxid, Ammoniak und Ozon untersucht. Während die Adsorption von Toluol und Ammoniak durch eine höhere Luftfeuchte beeinträchtigt wird, werden Ozon und Schwefeldioxid besser bei höherer Luftfeuchte abgeschieden.

Um den Einfluss der Testgaskonzentration auf die Ergebnisse von Prüfungen nach Norm zu quantifizieren wurden Tests mit n-Butan, Toluol, Schwefeldioxid, und Ammoniak an spezifischen Medien durchgeführt und Adsorptionsisothermen für n-Butan und Toluol abgeleitet.

Weiterhin wurde die Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd und Naphthalin, die alle versuchstechnisch schwierig zu handhaben sind, an verschiedenen Medien untersucht. Die Eignung von weniger gefährlichen bzw. leichter zu handhabenden Ersatzstoffen (Schwefeldioxid für Schwefelwasserstoff, Acetaldehyd für Formaldehyd, Methylnaphthalin und Toluol für Naphthalin) wurde überprüft. Schwefeldioxid wies an den getesteten Medien ein ähnliches Durchbruchverhalten wie Schwefelwasserstoff auf. Die anderen Ersatzstoffe wurden wesentlich schlechter adsorbiert als die zu ersetzenden Stoffe.

Da Durchbruchversuche nach Norm bei geringen Testgaskonzentrationen bis zum vollständigen Durchbruch von 100 % sehr lange dauern können, wurden analytische Ansätze zur Vorausberechnung von Durchbruchkurven überprüft. Für die Berechnung von Toluol-Durchbruchkurven wurde auf dieser Basis ein einfach anzuwendendes Excel-Tool entwickelt, das auf den Internetseiten des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) interessierten Kreisen zur Verfügung steht.

Die zuvor aufgeführten Projektergebnisse wurden in einem Leitfaden für die Nutzung der DIN EN ISO 10121 zusammengestellt, der ebenfalls auf den Internetseiten der Forschungsstelle IUTA abrufbar ist.

1 Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Ziele

Luftaufbereitungsanlagen für die allgemeine Raumluft gewinnen in den letzten Jahren vermehrt an Bedeutung, weil einerseits die Aufenthaltsdauer von Menschen in Gebäuden immer weiter zunimmt, andererseits zur Heizkostenminimierung vermehrt Anlagen zur kontrollierten Raumlüftung sowohl in öffentlichen Gebäuden als auch in Wohngebäuden genutzt werden. Die zunehmende Wahrnehmung von Problemen wie dem Sick-Building-Syndrom [Burge, 2004], die durch gasförmige Luftverunreinigungen ausgelöst werden, ließ im vergangenen Jahrzehnt die Nachfrage nach adsorptiven Filtern in der allgemeinen Raumlufttechnik (RLT) steigen. Das Wissen zu adsorptiven Prozessen bei raumluftechnisch relevanten Prozessbedingungen sowie die Anzahl veröffentlichter Forschungsarbeiten zu diesem Thema waren bis dato gering. Es existierten auch keine normativen Vorgaben zur standardisierten Leistungsprüfung von adsorptiven RLT-Filtern. Mit der DIN EN ISO 10121 wurde erstmals eine internationale Norm erstellt, die Prüfprozeduren zur Bestimmung von Druckabfall, Reinigungskapazität und Restbeladung nach Desorption von adsorptiven Medien und Filtern für RLT-Anlagen festlegt. Das Ziel der Norm war es, Medien- und Filterherstellern sowie Anwendern eine einheitliche Bewertungsgrundlage zur Beurteilung des Verhältnisses von Investitions- und Betriebskosten zu liefern. Zunächst führte die Norm jedoch bei den Medien- und Filterherstellern zu Verunsicherung. Die neue Norm beschreibt in Teil 1 die Prüfprozeduren für adsorptive Filtermedien (im Folgenden als „Medien“ bezeichnet) und in Teil 2 die Prüfmethoden für aus den Medien hergestellte konfektionierte adsorptive RLT-Filter (im Folgenden als „Filter“ bezeichnet). Das ließ Medien- und Filterhersteller einen vermehrten Aufwand befürchten. Weiterhin wird in der Norm auf den Einfluss des Testgases, der Testgaskonzentrationen und der relativen Luftfeuchte zwar hingewiesen, die Auswirkungen konnten aber von Medien- und Filterherstellern nicht immer eingeschätzt werden.

An dieser Stelle setzte das hier beschriebene Forschungsvorhaben mit den nachfolgend kurz beschriebenen Arbeitspaketen (AP) an.

AP 1: Übertragbarkeit von Prüfergebnissen von Medien auf Filter

In diesem Arbeitspaket sollte untersucht werden, inwieweit an Medien nach Teil 1 der Norm ermittelte Leistungsdaten mit denen übereinstimmen, die an Filtern, die aus den gleichen Medien gefertigt waren, nach Teil 2 der Norm bestimmt wurden. Hierzu wurden Durchbruchversuche an Medien und daraus gefertigten Filtern mit den Testsubstanzen n-Butan (C_4H_{10}), Toluol (C_7H_8 , leicht flüchtige organische Substanz), Ammoniak (NH_3 , basische Substanz), Schwefeldioxid (SO_2 , saure Substanz) und Ozon (O_3) bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte durchgeführt und miteinander verglichen. Die Testgasvolumenkonzentration von Ozon betrug 0,9 ppm, die der anderen Substanzen jeweils 9 ppm.

AP 2: Einfluss der relativen Feuchte auf die Testergebnisse

Zur Untersuchung und Quantifizierung des Feuchteinflusses auf die Sorptionsprozesse wurden mit Toluol, SO_2 , NH_3 und O_3 Durchbruchversuche an Medien und Filtern bei unterschiedlichen relativen Feuchten durchgeführt und ausgewertet. Die Untersuchung erfolgte durch die Aufnahme von Durchbruchkurven bei Testgasvolumenkonzentrationen von jeweils 9 ppm (Toluol, SO_2 , NH_3) und 0,9 ppm (Ozon) unter Beibehaltung der Testtemperatur von 23 °C bei 40 %, 70 % und 90 % relativer Luftfeuchte.

AP 3: Einfluss der Testgaskonzentration auf die Testergebnisse

Der Einfluss der Testgaskonzentration auf die Kapazität von verschiedenen Testmedien wurde anhand der Testsubstanzen Toluol, n-Butan, SO₂ und NH₃ untersucht. Hierzu wurden auf der Basis von Durchbruchversuchen Daten zum Adsorptionsgleichgewicht bei 23 °C im Volumen-konzentrationsbereich von 45 ppb bis zu 90 ppm ermittelt.

AP 4: Einfluss der Testsubstanz – Ersatzstoffe für Formaldehyd, Naphthalin, Schwefelwasserstoff

Formaldehyd, Naphthalin und Schwefelwasserstoff (H₂S) sind als Testsubstanzen schwierig im Umgang. Neben Aspekten der Arbeitssicherheit für alle drei Stoffe betrifft das besonders die Dosierung von Formaldehyd und Naphthalin. Deshalb war es ein Ziel, für diese drei Substanzen mögliche Ersatzstoffe zu ermitteln. Diese und die Substanzen, die sie ersetzen sollten, wurden an verschiedenen Adsorbentien getestet, die Ergebnisse miteinander verglichen und bewertet.

AP I: Berechnung von Durchbruchkurven

Die Eignung analytischer Ansätze zur Vorausberechnung von Durchbruchkurven sollte überprüft werden. Dazu wurde untersucht, ob die Ansätze geeignet sind,

- Durchbruchkurven über einen gemessenen Durchbruchverlauf von 50 % hinaus sowie
- Durchbruchkurven bei geringeren Konzentrationen auf der Basis von experimentell bestimmten Durchbruchkurven bei höheren Konzentrationen

angemessen zu beschreiben. Das Ziel war es, als geeignet ermittelte Ansätze den interessierten Kreisen auf den Internetseiten der Forschungsstellen in Form von Berechnungstools zur Verfügung zu stellen.

AP II: Evaluierung der Prüfbedingungen aus der Norm

Durch die Arbeiten in den AP 1 bis 4 sollten die Prüfprozeduren nach DIN EN ISO 10121 durch wissenschaftliche Untersuchungen neutral evaluiert werden. Die Ergebnisse sollten in einem Anwendungsleitfaden zusammengestellt und interessierten Kreisen auf den Internetseiten der Forschungsstellen zur Verfügung gestellt werden.

Das Ziel war es, durch wissenschaftliche Untersuchungen zu Adsorptionsvorgängen Teilaspekte der DIN EN ISO 10121 zu evaluieren und damit Hersteller von adsorptiven Filtermedien und Filtern für die Raumlufttechnik bei der Anwendung der Norm zu unterstützen.

2 Bearbeitung und Ergebnisse

2.1 Experimentelles - Einrichtungen und Versuchsdurchführung

Die experimentellen Arbeiten wurden an drei unterschiedlichen Filterprüfständen an den Forschungsstellen 1 und 2 durchgeführt. Im Folgenden werden jeweils die Versuchseinrichtungen sowie die Versuchsdurchführung detailliert erläutert.

2.1.1 Forschungsstelle 1 (Universität Duisburg-Essen)

Die Versuchsdurchführung an Filtermedienproben und an Filterelementen erfolgte an der Universität Duisburg-Essen an einem modifizierten Kfz-Filterprüfstand der Forschungsstelle 1 (Abbildung 1). Dieser Prüfstand erlaubt es, die Prüfbedingungen bezüglich der Temperatur, der relativen Feuchte, des Volumenstroms sowie des Prüfgasen und dessen Konzentration zu variieren. Die Funktionsweise des Prüfstandes wird anhand der Abbildung 2 verdeutlicht.



Abbildung 1: Kfz-Filterprüfstand

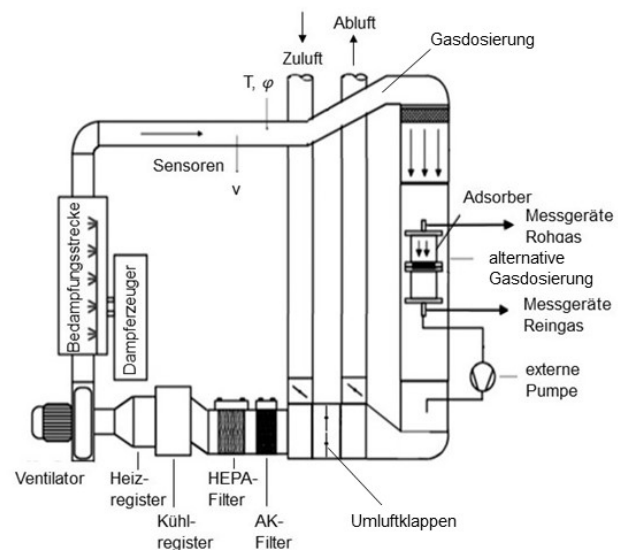


Abbildung 2: Schematische Darstellung des modifizierten Kfz-Filterprüfstands mit Adsorber in der Prüfkammer

Mit Hilfe eines Radialventilators wird Luft aus einer Frischluftleitung angesaugt, optional mit Hilfe von Filtern gereinigt und mittels Wärmeübertragern und eines Dampferzeugers entsprechend der gewählten Prüfbedingungen konditioniert. Anschließend kann das Prüfgas in den Prüfkanal dosiert werden, bevor das Prüfgas-Luft-Gemisch in die Prüfkammer strömt. Als Alternative erfolgt eine Dosierung des Prüfgasen über einen statischen Mischer direkt in den Adsorber. Die Strömungsführung wird unten detailliert erläutert.

Zur Regelung des Volumenstroms im Filterprüfstand wird ein Regelkreis mit einem PID-Regler und einem Frequenzumrichter verwendet. Die Erfassung des vorliegenden Volumenstroms erfolgt dabei über die Strömungsgeschwindigkeit v in einem definierten Rohrquerschnitt mittels eines Vortex-Anemometers. Die Position des Anemometers kann der Abbildung 2 entnommen werden (Sensor v). Die Regelung der relativen Feuchte und der Temperatur erfolgt mit Hilfe zweier Regelkreise unter Verwendung von zwei PID-Reglern. Die Temperatur und die relative Feuchte werden mit Hilfe eines kombinierten Sensors der Firma Vaisala (Vantaa, Finnland) erfasst. Zur Messung der Temperatur wird im Sensor das Pt100 und zur Ermittlung der relativen

Feuchte ein kapazitives Hygrometer eingesetzt. Die Aktoren des Regelkreises sind die Stellglieder des Kühl- und des Heizregisters sowie die Leistungssteuerung des Verdampfers.

In der Prüfkammer des modifizierten Kfz-Filterprüfstandes können neben Filterelementen auch Filtermedien nach der DIN EN ISO 10121-1 geprüft werden. Dazu kann in der Prüfkammer ein Adsorber installiert werden, dessen Geometrie der Empfehlung in der DIN EN ISO 10121-1 entspricht (Abbildung 3). Dieser Adsorber wurde im Rahmen des Projektes konstruiert und in der mechanischen Werkstatt der Universität Duisburg-Essen gefertigt. In dem Medienhalter des Adsorbers wird eine Ronde des zu prüfenden Filtermediums mit einer Fläche von 100 cm² fixiert und der Adsorber dicht verschlossen. Über eine externe Pumpe wird das konditionierte Prüfgas-Luft-Gemisch aus der Prüfkammer durch den Adsorber gesaugt und durchströmt das Filtermedium. Der Absaugvolumenstrom kann mittels eines Nadelventils und eines Schwebekörperdurchflussmessers auf der Saugseite der externen Pumpe eingestellt werden und wird abschließend in den Kfz-Filterprüfstand zurückgeführt. Da der Filterprüfstand in der Regel ausschließlich mit Frischluft betrieben wird, sind die Umluftklappen (Abbildung 2) geschlossen. Somit wird der gesamte Volumenstrom aus der Prüfkammer über die Abgasleitung abgeführt.

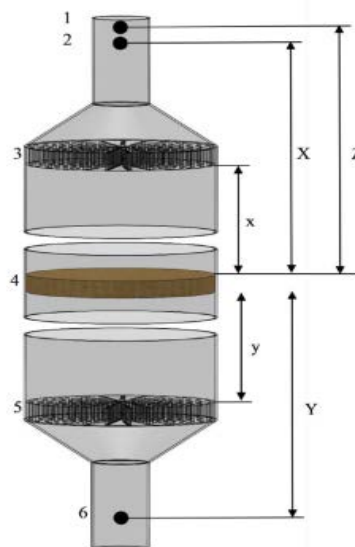


Abbildung 3: Adsorber nach DIN EN ISO 10121-1: fotografische (links) und schematische Darstellung [DIN EN ISO 10121-1:2015] (rechts)

Die Prüfgaszufuhr in die Prüfkammer kann dabei auf zwei Arten erfolgen. Zum einen ist eine Dosierung des Prüfgases in den Kanal an der in Abbildung 2 gekennzeichneten Stelle möglich. Diese Art der Dosierung eignet sich für Tests von Filterelementen (ohne Adsorber) und für Medientests im Adsorber bei geringen Konzentrationen sowie bei Gasen mit geringer Reaktivität bzw. Toxizität (n-Butan, Toluol). Bei Versuchen mit höheren Konzentrationen sowie mit toxischen und reaktiven Gasen (SO₂, NO₂) und Ozon (O₃), erfolgt die Prüfgasdosierung direkt in den Adsorber über einen statischen Mischer. Dies ist schematisch in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

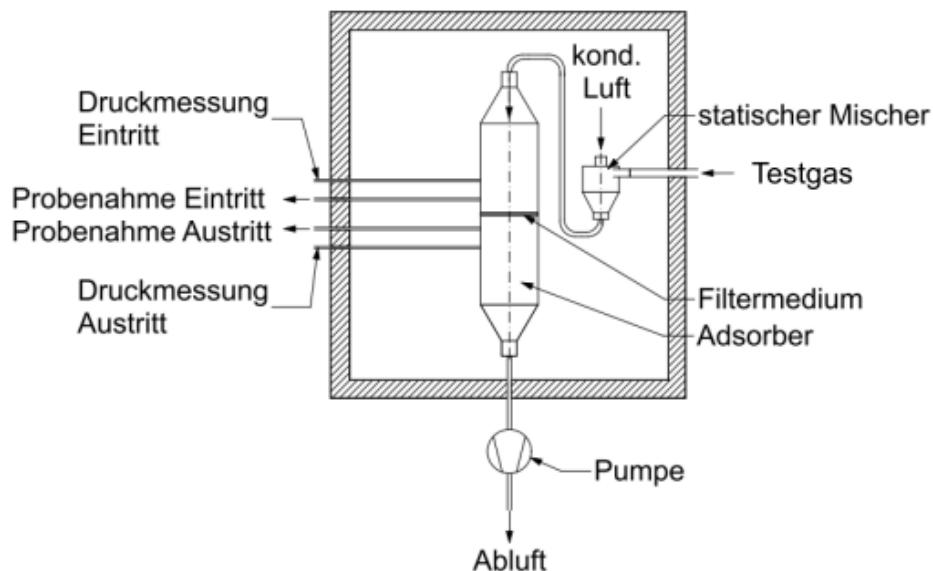


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Aufbaus für Adsorptionsversuche an Filtermedien mit einer Prüfgasdosierung in den Adsorber

Versuche mit n-Butan und Toluol

Die Bereitstellung des Prüfgases erfolgt je nach Gas auf unterschiedliche Weise. Das Prüfgas n-Butan wird einer Gasflasche entnommen und mit Hilfe eines Massenflussreglers (MFR) in definierter Menge dem Luftvolumenstrom des modifizierten Kfz-Filterprüfstands zugeführt. Da das Toluol bei Raumtemperatur in flüssigem Zustand vorliegt, findet die Bereitstellung des Toluols unter Verwendung einer Waschflasche statt, welche von Luft durchströmt wird (Abbildung 5). Die Luft wird dabei einer Druckluftleitung entnommen und der Volumenstrom mittels eines Massenflussreglers reguliert. Um zudem einen konstanten Dampfdruck des Toluols zu gewährleisten, wird die Waschflasche in einem Wasserbad temperiert. Hierzu wird ein Thermostat verwendet, das die Temperatur des Wasserbads auf einen Wert von 21,5 °C regelt. In vorherigen Projekten wurde als Heizung der Waschflasche ein elektrisches Heizband eingesetzt. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurde dieses durch ein Thermostat ersetzt, um im unwahrscheinlichen, aber nicht unmöglichen Fall einer Leckage das Risiko einer Zündquelle durch elektrische Verbindungen des Heizbandes zu minimieren (sekundärer Explosionsschutz).

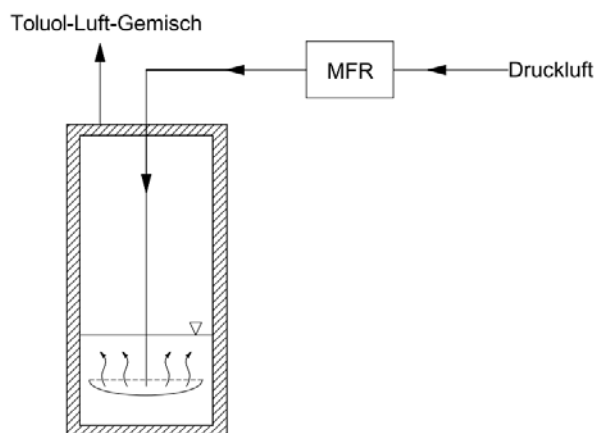


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Toluoldosierung

Wie der Abbildung 4 zu entnehmen ist, werden sowohl in Strömungsrichtung unmittelbar vor (Rohgas) als auch hinter dem Filtermedium (Reingas) jeweils der Druck und die Prüfgaskonzentration erfasst und mittels einer Computersoftware aufgezeichnet. Zudem erfolgt sowohl vor als auch nach dem Medium eine Temperaturmessung. Im Anschluss werden die Messwerte der Konzentrationen im Rahmen der Versuchsauswertung als Durchbruchkurven dargestellt. Die Messung der Konzentrationen erfolgt bei Versuchen mit Kohlenwasserstoffen mit Hilfe zweier Flammenionisationsdetektoren (FID) des Herstellers Bernath Atomic. Beide FID weisen eine extraktive Funktionsweise auf, sodass geringe definierte Mengen des Prüfgas-Luft-Gemisches aus dem Adsorber gesaugt werden.

Versuche mit Ozon

Die Dosierung von Ozon findet mittels eines Ozongenerators der Firma Anseros statt. Dabei wird ein definierter Druckluftvolumenstrom durch eine Kammer geleitet, in welcher durch eine elektrische Spannung Koronaentladungen hervorgerufen werden. Diese führen dazu, dass aus dem Sauerstoff (O_2) der Druckluft Ozon (O_3) generiert wird. Da das Ozon stark reaktiv ist und Bauteile wie Elastomere (Gummidichtungen) schädigen kann, erfolgt die Ozondosierung direkt in den Adsorber. Die Messung der Ozonkonzentration erfolgt mit Hilfe zweier Messgeräte der Firma API (Modell 400) auf der Rohgasseite und eines Messgerätes der Firma Environnement S.A (Typ 42M) auf der Reingasseite. Die Probenahme erfolgt identisch zu den Adsorptionsversuchen mit Kohlenwasserstoffen an den entsprechenden Stutzen des Adsorbers.

Versuche mit SO_2

Die Bereitstellung von SO_2 erfolgt in Analogie zur n-Butandosierung aus einer Gasflasche über einen Massenflussregler. Die Dosierung wird dabei insbesondere bei höheren Konzentrationen (90 ppm) direkt in den Adsorber vorgenommen. Die Messung der Konzentrationen auf der Roh- und Reingasseite findet mit Hilfe zweier extraktiv arbeitender Gasanalysatoren der Firma Environnement S.A (Typ AF 21M) statt.

Versuche mit NO_2

Bei Versuchen mit NO_2 ist die Gasbereitstellung komplizierter. Das NO_2 wird einer beheizten (etwa 35 °C) Gasflasche entnommen. In der Gasflasche befindet sich ein Gemisch aus NO_2 und dem Dimer N_2O_4 . Durch die Erwärmung der Gasflasche verschiebt sich zum einen das Gleichgewicht von NO_2 und N_2O_4 in Richtung des NO_2 . Des Weiteren wird der Dampfdruck des Gemisches infolge der Flaschenbeheizung erhöht. Um eine Kondensation des NO_2 - N_2O_4 -Gemisches in den Rohrleitungen zu vermeiden, sind diese über die gesamte Länge beheizt, ebenso wie der Massenflussregler. Zwischen dem NO_2 -Massenflussregler und der Einspeisung in den Filterprüfstand wird das NO_2 - N_2O_4 -Gemisch mittels Druckluft stark verdünnt. Die Regelung des Druckluftmassenstroms erfolgt ebenfalls über einen Massenflussregler. Infolge der starken Verdünnung ist zum einen davon auszugehen, dass nur noch NO_2 und kein N_2O_4 in dem Prüfgas-Luft-Gemisch vorhanden ist. Zum anderen kann nach der Verdünnung auf eine Beheizung der Rohrleitungen verzichtet werden. Für die Messung der roh- und reingasseitigen NO_x -Konzentrationen werden zwei Messgeräte der Firma Environnement S.A (Typ 31M) verwendet.

Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung

Vor jedem Versuch mit den Kohlenwasserstoffen n-Butan und Toluol erfolgt zunächst die Kalibrierung der FIDs anhand von zwei Punkten. Zum einen wird der Nullpunkt mit Hilfe der kohlenwasserstofffreien Luft (Nullluft) und zum anderen der Konzentrationswert eines

Propankalibriergases mit etwa 8 ppm (in synthetischer Luft) elektrisch festgelegt. Die Bereitstellung des Kalibriergases in definierter Konzentration erfolgt aus einer Gasflasche. Zur Aufbereitung der sogenannten Nullluft aber auch der Verbrennungsluft für die Wasserstoffflamme der FIDs wird Druckluft in einem beheizten Katalysator aufbereitet. Dazu werden im Letzteren die in der Druckluft vorhandenen Kohlenwasserstoffe oxidiert.

Auch vor den Versuchen mit Ozon, SO₂ und NO₂ werden die Messgeräte kalibriert. Die Nullpunktkalibrierung oder -kontrolle erfolgt mit Hilfe von Stickstoff aus der zentralen Leitung der FS1. Die Kalibriergasgemische aus SO₂ in synthetischer Luft und NO in Stickstoff werden den entsprechenden Gasflaschen entnommen. Die Kalibrierung der Messgeräte erfolgt über einen internen Ozongenerator, welcher in dem Messgerät der Firma Environnement S.A (Typ 42M) verbaut ist. Der durch den Generator bereitgestellte Massenstrom des Ozon-Luft-Gemisches mit definierter Ozonkonzentration wird aufgeteilt, sodass ein Teil für die Kalibrierung des Messgerätes des Herstellers MLU genutzt werden kann. Im Anschluss an die Kalibrierung wird jeweils eine Testdosierung vorgenommen, um sowohl die gewünschte Konzentration des Prüfgases einzustellen als auch die Messwerte der Konzentrationen auf der Roh- und Reingasseite zu vergleichen.

Die Voraussetzungen der Versuchsdurchführung sind laut DIN EN ISO 10121 stationäre Bedingungen bezüglich Temperatur ($23 \pm 0,5$ °C) und relativer Feuchte (50 ± 3 % r. F.). Soweit diese gegeben sind, wird der mit einem Filtermedium versehene Adsorber für eine Dauer von 15 Minuten zunächst mit prüfgasfreier, konditionierter Luft durchströmt. Im Anschluss wird mit der Prüfgasdosierung begonnen. Die Versuchsdurchführung erfolgt in der Regel so lange, bis ein vollständiger Durchbruch erreicht wird, also die reingasseitige Prüfgaskonzentration der rohgasseitigen entspricht. Bei der Versuchsdurchführung bis zum Gleichgewichtszustand kann mit Hilfe einer Massenbilanz über dem Filter die Kapazität bei der jeweils untersuchten Konzentration bestimmt werden. Im Anschluss wird bei einigen Versuchen die Testgasdosierung abgeschaltet, um optional das Desorptionsverhalten des untersuchten Mediums zu validieren. Dabei bleiben die übrigen Parameter identisch zu dem Adsorptionsversuch.

2.1.2 Forschungsstelle 2 (IUTA)

An der FS2 (IUTA) wurden für die Versuche an Medien und Filtern zwei Adsorptionsprüfstände genutzt, an denen mit Hilfe der Strömungsmethode Durchbruchkurven verschiedenster Schadgaskomponenten unter definierten Bedingungen ermittelt werden können.

2.1.2.1 Medienprüfstand für toxische Testsubstanzen

An dem Filterprüfstand für toxische Substanzen (Tox-Prüfstand) können Adsorptionsversuche auch mit hochtoxischen Adsorptiven, wie z. B. H₂S oder Formaldehyd, bei Temperaturen von 10 °C bis 50 °C, relativen Feuchten von 0 % bis 90 % und Volumenströmen von 1 - 25 m³/h durchgeführt werden. Die Messungen können an Flachfiltermedien sowie Schüttungen in Adsorbern mit 50 mm oder 100 mm Innendurchmesser stattfinden.

Der eigentliche Prüfstand befindet sich in einer Einhausung, die permanent abgesaugt wird und ihrerseits in einem be- und entlüfteten Systemraum angeordnet ist. Die Be- und Entlüftungsanlage gewährleistet einen zusätzlichen Luftwechsel im Systemraum. Die Gaswarnanlage überwacht sowohl die Reinstgasversorgung als auch den Prüfstand auf Leckagen. Abbildung 6 zeigt das Funktionsschema des Tox-Prüfstandes und Abbildung 7 Fotos des eingehausten Prüfstandes und des Filterhalters.

Der Tox-Prüfstand kann mit Umgebungs- oder Druckluft betrieben werden. Die Konditionierung des Trägergasstroms hinsichtlich der Temperatur erfolgt mit einem Kälteumwälzthermostat, mit dem Wasser oder Thermoöl im Gegenstrom durch die doppelwandigen Rohrleitungen geführt wird. Die Befeuchtung des Trägergasstromes erfolgt mit Wasserdampf. Zum Verdampfen wird Wasser mit einer Mikrozahnradschleuse in eine beheizte Spirale geleitet.

FUNKTIONSSCHEMA Adsorptionsfilterprüfstand

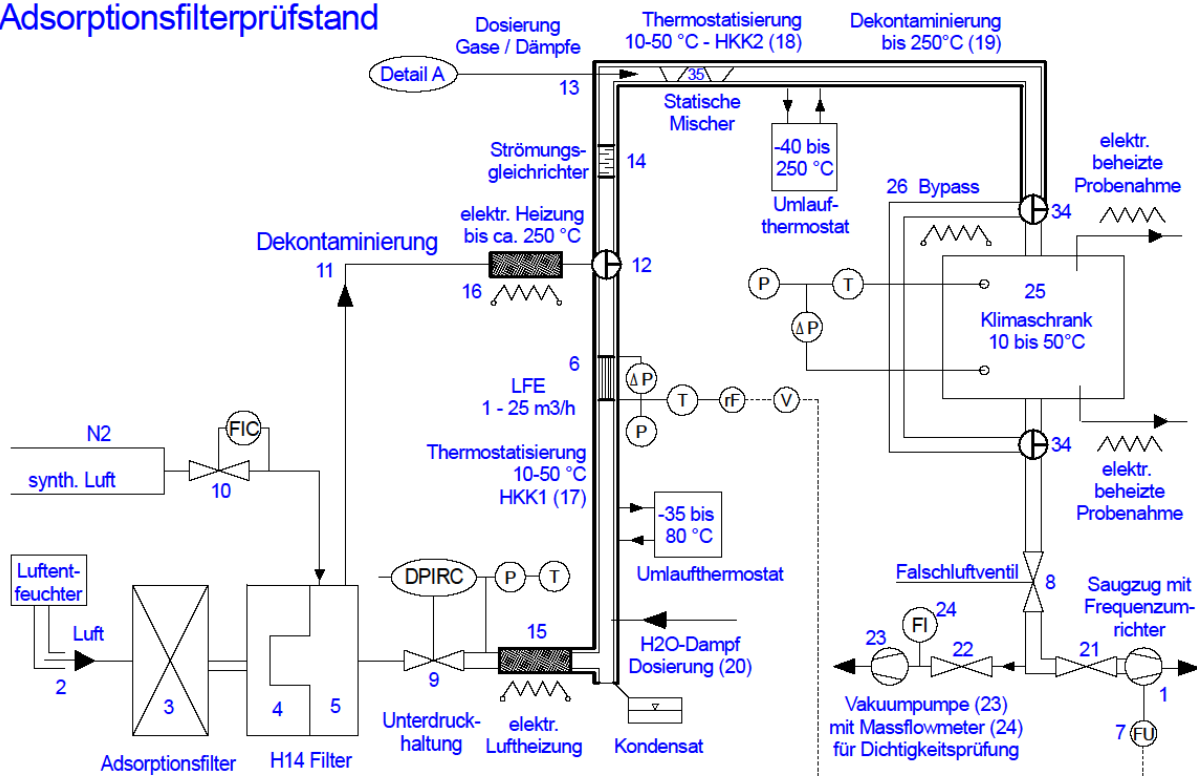


Abbildung 6: Funktionsschema des Tox-Prüfstandes



Abbildung 7: Fotos des eingehausten Prüfstandes (links) und des Filterhalters/Adsorbers (rechts)

Prüfgase können über fünf verschiedene Massenflussregler über einen temperierbaren Gasrechen (Mischstation) dem konditionierten Trägergasstrom zudosiert werden. So können auch Gasgemische zudosiert werden. Prüfsbstanzten, die bei Umgebungstemperatur flüssig

vorliegen, werden verdampft und zusammen mit Stickstoff oder Druckluft über die Mischstation der Teststrecke zugeführt. Die Durchmischung des Trägergasstroms mit dem eingeleiteten Gas erfolgt über einen statischen Mischer. Der jeweilige Adsorber einschließlich der Probenahmestellen auf Roh- und Reingasseite ist in einem temperierbaren Klimaschrank positioniert und über beheizbare Probenahmeleitungen mit den entsprechenden Messgeräten verbunden:

- n-Butan, Toluol: Flammenionisations-Detektoren (FIDs),
- SO₂, H₂S: SO₂-Analysatoren (UV-Lumineszenz), teilweise mit Konverter,
- NH₃, n-Butan, Toluol, Naphthalin, Acetaldehyd: Protonen-Transfer-Reaktions-Massenspektrometer (PTR-MS),
- NO₂: NO_x-Analysatoren (Chemilumineszenz),
- Ozon: Ozon-Messgeräte (UV-Absorption),
- Formaldehyd: Formaldehyd-Monitor (auf Basis der Hantzsch-Reaktion).

Dem Tox-Prüfstand ist eine Abgasbehandlungsanlage nachgeschaltet, die aus einer elektrothermischen Nachverbrennung (ETNV) und einem alkalischen Wäscher besteht. Die Rohrleitungen in Strömungsrichtung hinter der Gasdosierung und die Messkammer können zur Dekontamination bis auf 250 °C aufgeheizt werden.

2.1.2.2 Filterprüfstand für RLT-Filter

Für die Durchführung von Adsorptionstests an konfektionierten Raumlufffiltern mit n-Butan, Toluol, NO₂, NH₃, SO₂ und Ozon nach DIN EN ISO 10121-2 musste ein am IUTA vorhandener Prüfstand zum Test von RLT-Filtern hinsichtlich der Partikelfiltration nach EN 779 (im folgenden Text als EN-779-Prüfstand bezeichnet) um Vorrichtungen zur Gasdosierung und für die Arbeitssicherheit erweitert werden. Eine Prinzipskizze und ein Foto des Prüfstandes zeigt Abbildung 8.

Vor der Planung der Erweiterungsarbeiten wurde zunächst ein Sicherheitskonzept entwickelt und eine Gefährdungsbeurteilung erstellt. Die Beständigkeit und Eignung des im EN-779-Prüfstandes verbauten Materials gegenüber den Testsubstanzen wurde umfangreich, auch im Rahmen einer Masterarbeit, untersucht und bestätigt.

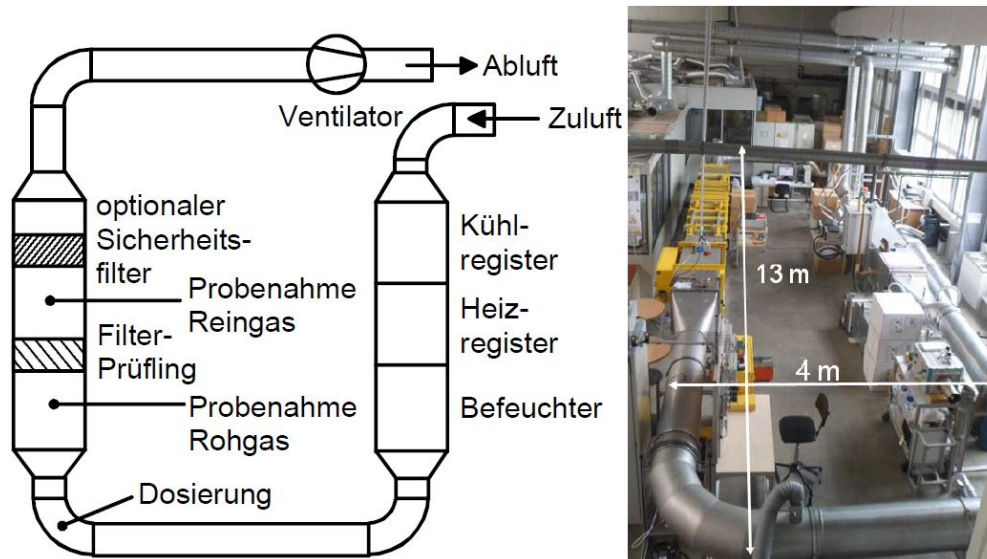


Abbildung 8: Prinzipskizze (links) und Foto (rechts) des modifizierten EN-779-Prüfstandes

Zur Dosierung der Testsubstanzen wurden die im Folgenden beschriebenen Einrichtungen installiert. Die Dosierung von NO_2 , SO_2 und NH_3 erfolgt aus den entsprechenden Druckgasflaschen (Reingas) jeweils mittels Flaschenentnahmeventil mit Spülvorrichtung, Pneumatikventil, Absperrventil, Druckregler und Massenflussregler über fest installierte Edelstahlrohrleitungen, siehe Abbildung 9 und Abbildung 10. Die Aufstellung und der Anschluss der einzelnen Druckgasflaschen in dem Gasflaschenschrank erfolgt jeweils nur für den Zeitraum der Versuchsdurchführung. Vor einem Gasflaschenwechsel werden die Gasentnahmearmaturen und Dosierleitungen mit Stickstoff gespült. Die Pneumatikventile werden mit Stickstoff aus einer Druckgasflasche gesteuert. Die Stickstoffzuführung erfolgt mit Magnetventilen, deren Stromversorgung mit der Gaswarnanlage gekoppelt ist. Die N_2 -Druckgasflasche wird während der Versuche neben dem Gasflaschenschrank mit entsprechenden Vorrichtungen zur Sicherung gegen Umfallen aufgestellt. Die Zuleitung des Stickstoffs in den Gasflaschenschrank erfolgt über fest installierte Rohrleitungen. Die Dosier-Vorrichtungen werden nach Versuchsende mit Stickstoff gespült. Das Spülgas wird der Gasflaschenschrankabluft zugeführt, die mit einem Ventilator über einen separaten Luftkanal aus der Halle abgeführt wird.

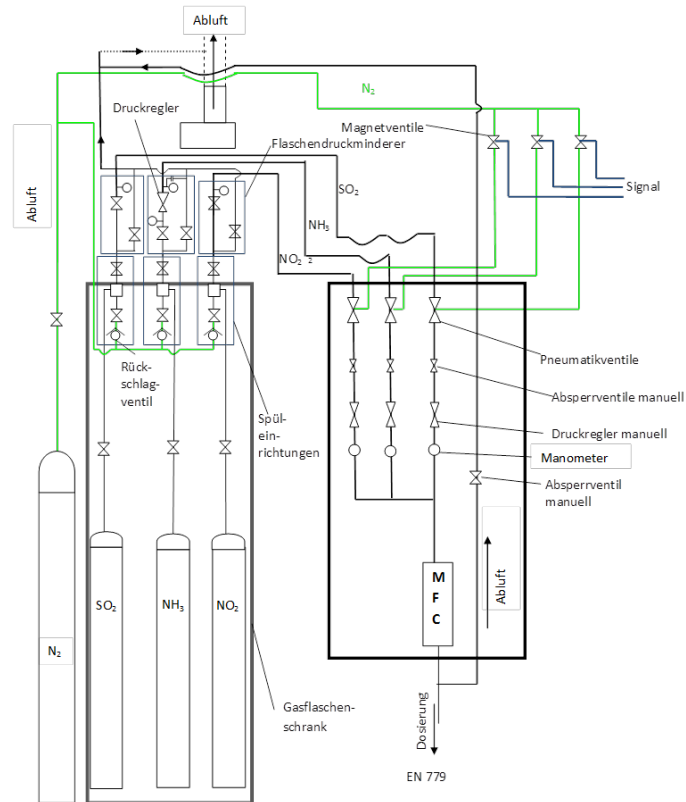


Abbildung 9: Skizze der Einrichtungen zur Dosierung von SO_2 , NO_2 und NH_3

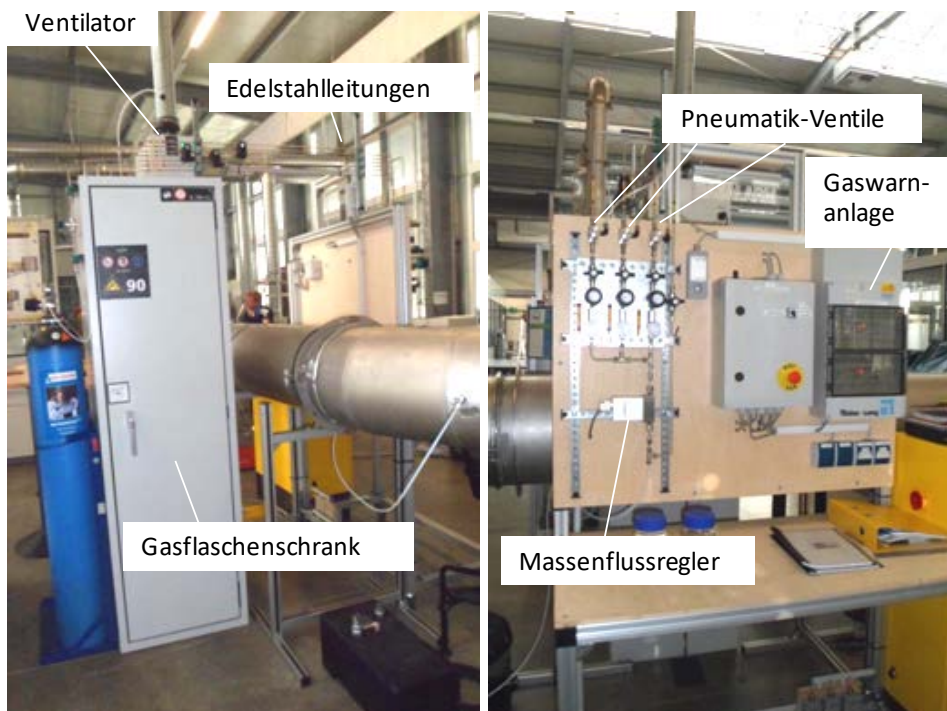


Abbildung 10: Foto der Einrichtungen zur Dosierung von SO_2 , NO_2 und NH_3 sowie der Gaswarnanlage

Ozon wird, abhängig vom Prüfvolumenstrom, mit einem oder zwei elektrischen Ozongeneratoren, die mit Sauerstoff betrieben werden, erzeugt und über Teflon-Schläuche zudosiert. Die Sauerstoff-Druckgasflasche wird unmittelbar neben dem Ozongenerator gesichert aufgestellt.

Die Dosierung der Testsubstanz n-Butan erfolgt mittels Druckminderer und Massenflussregler über einen PTFE-Schlauch aus einer gesichert aufgestellten Druckgasflasche mit n-Butan-Reingas in den Prüfkanal.

Zur Dosierung von Toluol, das bei Raumtemperatur flüssig vorliegt, wird das Toluol in einer Waschflasche die in einem Wasserbad beheizt/gekühlt wird (max. Umgebungstemperatur) vorgelegt, und mit Druckluft, die mit einem Massenflussregler zugeführt wird, durchströmt. In Strömungsrichtung hinter der Waschflasche wird der idealerweise mit dem Toluol gesättigte Druckluftstrom der Versuchsanlage zugeführt.

Die Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten für NO_2 , SO_2 und NH_3 sowie eventuelle Freisetzen von Ozon werden generell durch eine Gaswarnanlage (siehe Abbildung 10 rechts) überwacht. Die jeweiligen Gassensoren sind im Bereich des Gasdosierpanels angebracht. Bei Überschreitung des unteren Alarmwertes werden visuelle und akustische Signale ausgelöst, bei Überschreitung des oberen Alarmwertes wird die Dosierung von NO_2 , SO_2 und NH_3 durch Abschalten der Stromversorgung der Magnetventile, die mittels Stickstoff die Pneumatikventile steuern, automatisch gestoppt. Die Dosierung von Ozon, n-Butan und Toluol wird durch die automatische Abschaltung der Stromzufuhr des Ozongenerators bzw. der Massenflussregler eingestellt. Die gleichen Sicherheitsabschaltungen erfolgen, wenn der Ventilator des EN-779-Prüfstandes zum Stillstand kommt, um eine Anreicherung der Testsubstanzen im EN-779-Prüfstand zu verhindern.

Um die Freisetzung der Testsubstanzen SO_2 , NO_2 , NH_3 und Ozon aus den Anlagenteilen, die nicht unter leichtem Unterdruck stehen, zu verhindern, und Korrosion an nicht beständigen Materialien hinter der eigentlichen Teststrecke zu unterbinden, wird ein zweites Filterelement als Endfilter (siehe Abbildung 8) eingebaut. Für die Arbeitssicherheit werden außerhalb des EN-779-Prüfstandes im Bereich hinter dem Ventilator Gassensoren platziert, die im Falle einer Erschöpfung der Sicherheitsfilter eine mögliche Freisetzung durch Undichtigkeiten bei dem vorherrschenden Überdruck zusätzlich zu den ca. 10 m entfernten Sensoren der Gaswarnanlage detektieren und durch akustische Signale anzeigen.

Als Messgeräte für die Testsubstanzen werden die bereits im Abschnitt 2.1.2.1 beschriebenen Geräte eingesetzt. Temperatur und Luftfeuchte sind an diesem Prüfstand von 15 - 40 °C bzw. von 30 % bis zur Sättigung regelbar. Es sind Volumenströme von ca. 700 bis 4500 m³/h realisierbar.

2.2 AP 1 - Ergebnisübertragung Medientests (DIN EN ISO 10121-1) – Filtertests (DIN EN ISO 10121-2)

Die Übertragbarkeit von an Filtermedien ermittelten Ergebnissen auf das adsorptive Verhalten konfektionierter Filter wurde mit Durchbruchversuchen an Medien und daraus gefertigten Filtern mit den in Abschnitt 1 beschriebenen sechs ausgewählten Prüfgasen unter Standardbedingungen untersucht. Die eingesetzten Prüfgase mit der jeweiligen Prüfgaskonzentration sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Prüfgase und Testvolumenanteile des AP 1

Gas	n-Butan	Toluol	SO ₂	NH ₃	NO ₂	Ozon
Testvolumenanteil in ppm	9	9	9	9	9	0,9

Im Folgenden wird zunächst die Auswahl der verwendeten Filtermaterialien beschrieben. Dann erfolgt, jeweils separat, die Darstellung der Versuchsergebnisse an Filtermedien, -elementen und konfektionierten Filtern. Abschließend wird die Übertragbarkeit der an Medien ermittelten Ergebnisse auf die an Filterelementen sowie konfektionierten Filtern erhaltenen experimentellen Leistungsdaten validiert und diskutiert.

2.2.1 Auswahl geeigneter Medien und Filter

Die Eignung der Filtermedien hängt im Wesentlichen davon ab, ob das Adsorbens zum einen homogen über das Medium verteilt und zum anderen innerhalb des Mediums fixiert ist. Nur in diesem Fall kann eine hinreichend gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse hinsichtlich des Druckverlustes und der adsorptiven Leistung sowie Kapazität gewährleistet werden.

Für die Versuche mit den Adsorptiven n-Butan, Toluol und Ozon wurden Aktivkohlemedien dreier Hersteller beschafft (im Folgenden als Hersteller A, Hersteller B und Hersteller C bezeichnet). Die untersuchten konfektionierten Filter wurden aus den Medien des gleichen Typs gefertigt. Als Sorbens wird überwiegend Aktivkohle eingesetzt, jedoch in unterschiedlicher Form, Menge und Verteilung und mit unterschiedlichen Imprägnierungen. Eine kurze Auflistung der Eigenschaften von drei physisorptiven Medien ist in der folgenden Tabelle 2 dargestellt. Dort sind neben den Herstellerangaben zu der jeweiligen Filterdicke und Grammatur des Adsorbens (Aktivkohle) die mittels Stickstoffadsorption bei 77 K ermittelten BET-Oberflächen aufgeführt. Letztere wurden für die im Rahmen des Projektes verwendeten Filtermedien mit Hilfe einer Apparatur der Firma Quantachrome bestimmt. Dazu wurde das Adsorbensgranulat aus dem Filtermedium separiert und anschließend vermessen.

Tabelle 2: Eigenschaften der Filtermedien A, B und C

Medium	Dicke in mm	Adsorbensgrammatur in g/100 cm ²	BET-Oberfläche in m ² /g Adsorbens
Medium A	6	1,1	584
Medium B	1,5	1,6	864
Medium C	1,3	5,6	842

Im Folgenden sind makroskopische sowie zusätzlich mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommene Bilder der Medien der Hersteller A, B und C zu sehen. Die REM-Aufnahmen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma Jeol vorgenommen.

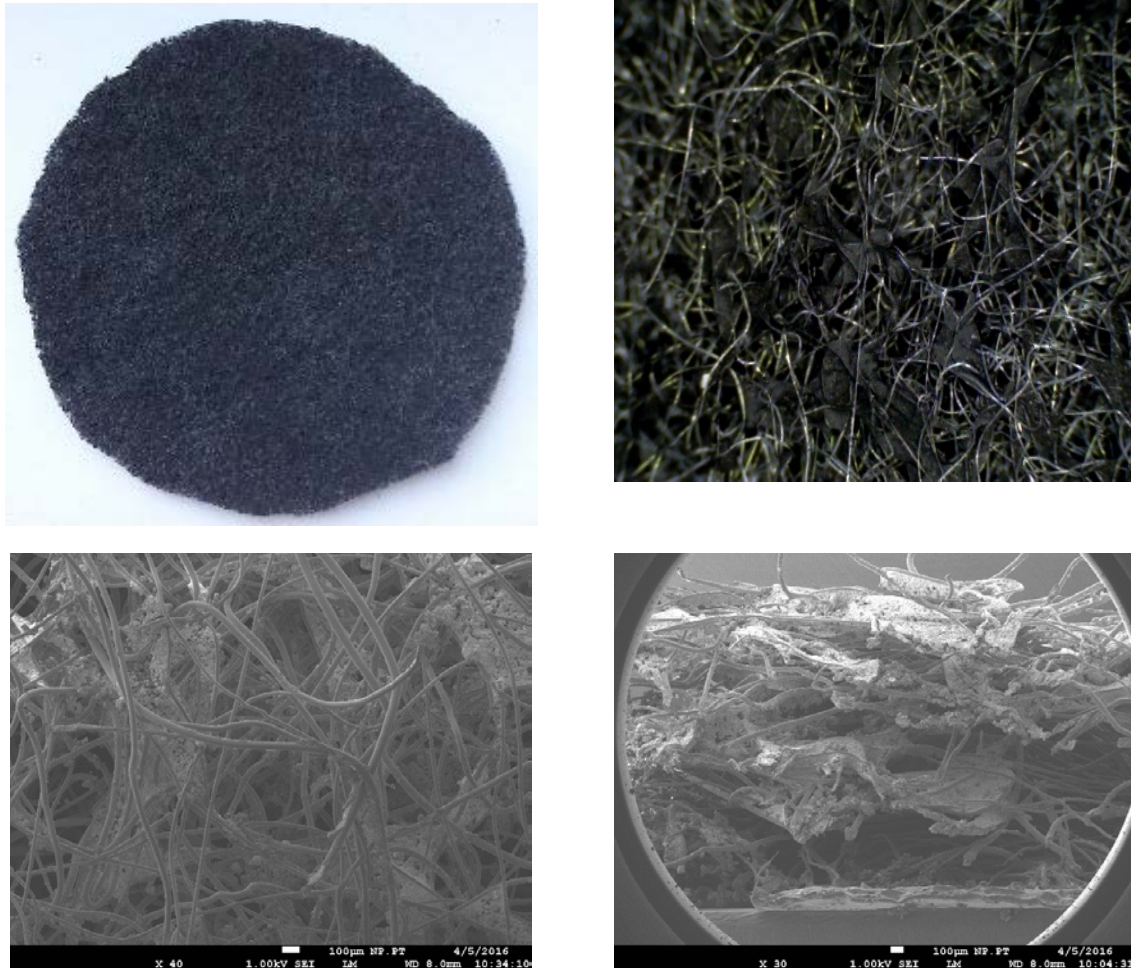


Abbildung 11: Photographische Darstellung der Medien des Herstellers A: Ronde des Mediums (oben links), Aufnahme des Mediums von der Anströmseite, vergrößert (oben rechts), REM-Aufnahme des Mediums von der Anströmseite (unten links) und REM-Aufnahme des Mediums der Schnittkante (unten rechts)

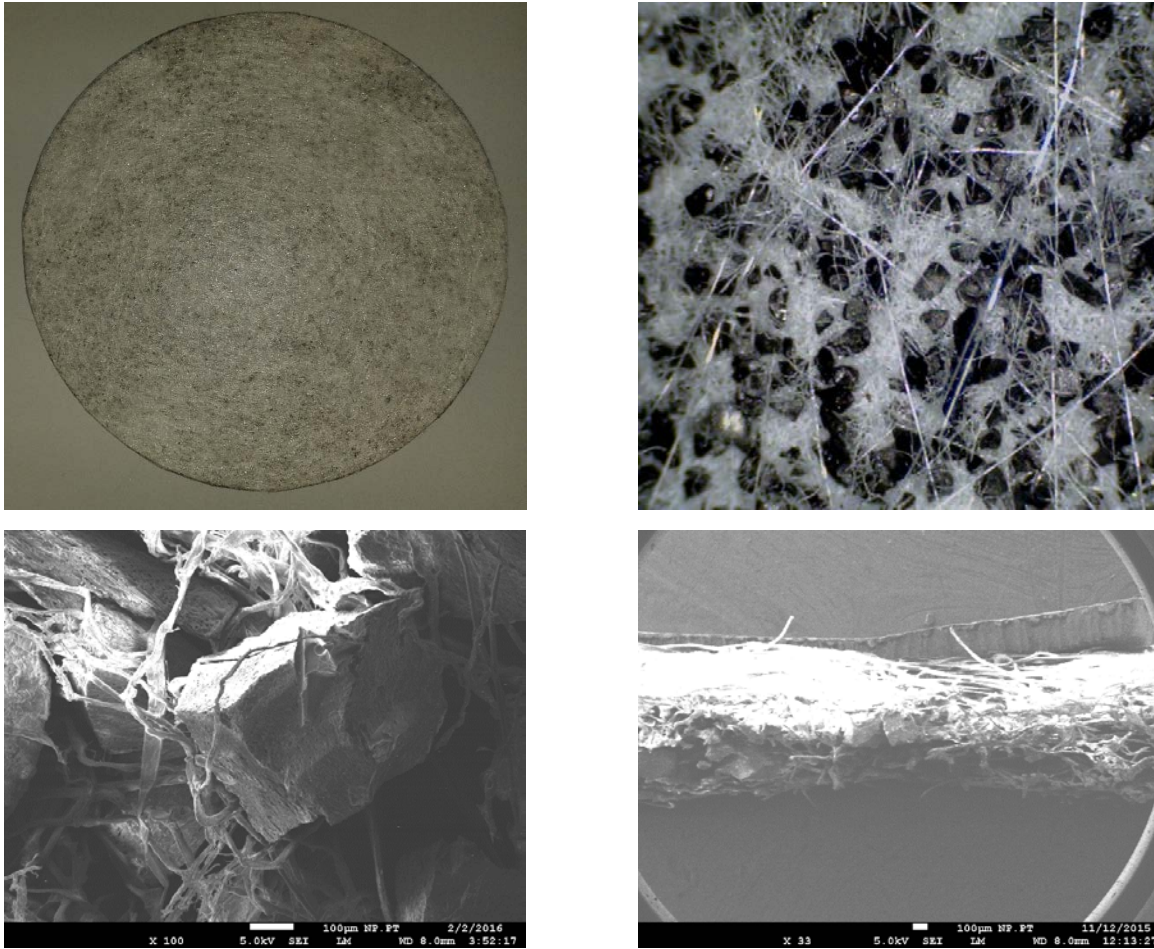


Abbildung 12: Fotografische Darstellung der Medien des Herstellers B: Ronde des Mediums (oben links), Adsorbensschicht (oben rechts), REM-Aufnahme der Adsorbensschicht (unten links) und REM-Aufnahme des Mediums von der Schnittkante (unten rechts)

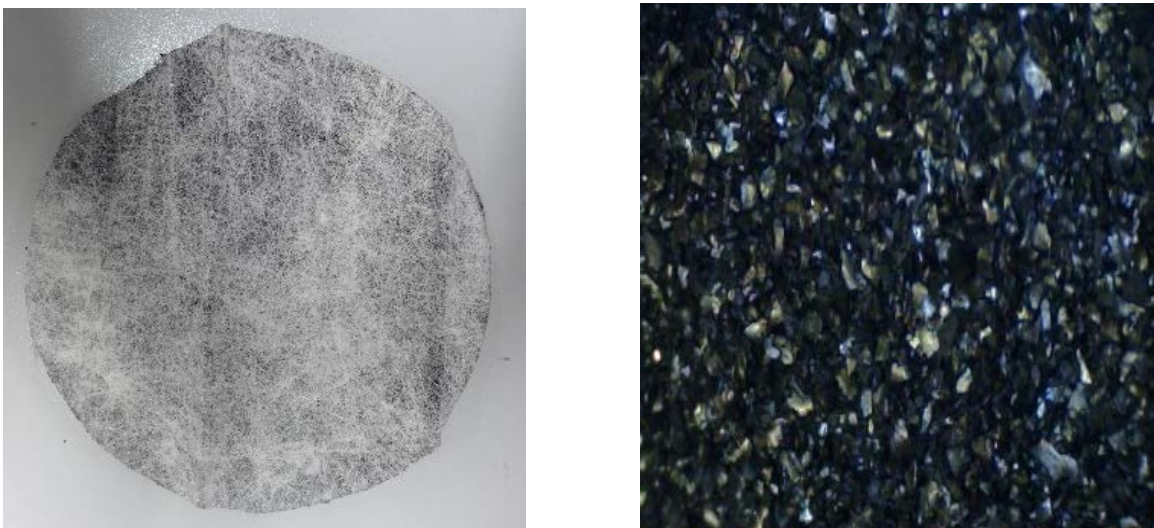


Abbildung 13: Fotografische Darstellung der Medien des Herstellers C: Ronde des Mediums (links), Aufnahme des Mediums von der Anströmseite, vergrößert (rechts)

Da insbesondere in dem betrachteten niedrigen Konzentrationsbereich das Mikroporenvolumen eine wichtige Rolle für die Adsorptionskapazität spielt, wurden neben den BET-Oberflächen auch die Porenweiten der Aktivkohlen der Medien A, B und C bestimmt. In der folgenden Abbildung 14 sind die anhand der experimentellen Daten der Stickstoffadsorption (77 K) und unter Zuhilfenahme der NLDFT (Non Local Density Functional Theory) für Aktivkohlen mit Schlitzporen berechneten differentiellen Porenvolumenverteilungen der Medien A, B und C dargestellt.

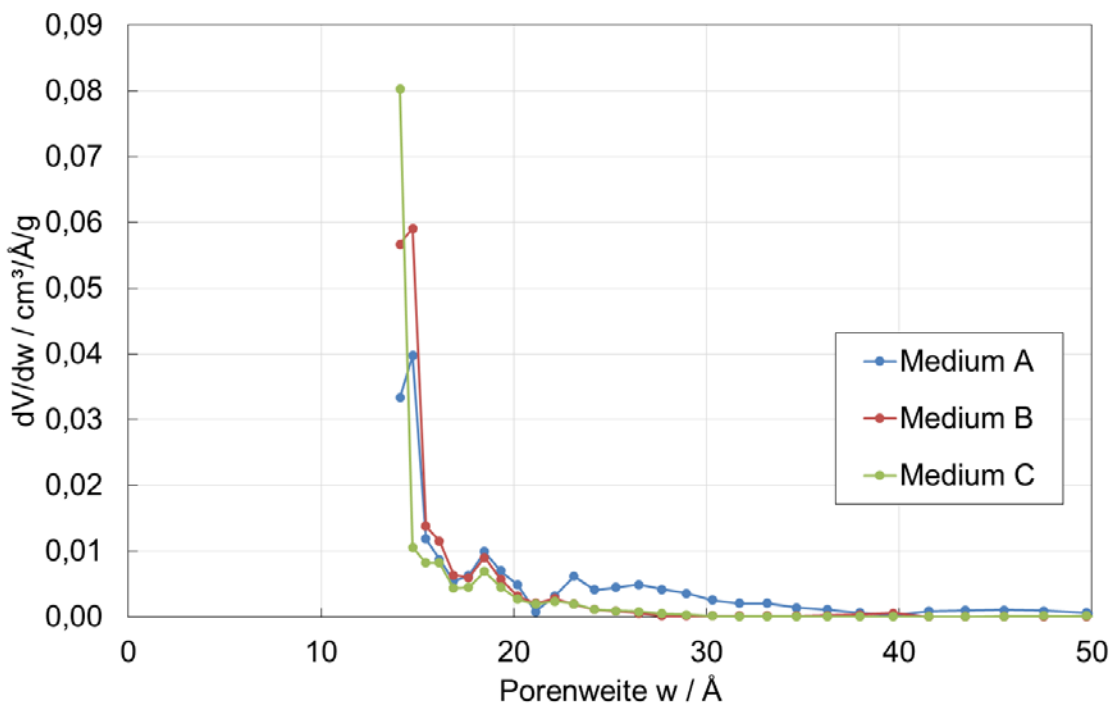


Abbildung 14: Porenvolumenverteilungen als Funktion der Porenweite der Aktivkohlen aus den Medien A, B und C

Wie der Abbildung 14 zu entnehmen ist, unterschieden sich die in den Medien A, B und C verwendeten Aktivkohlen besonders hinsichtlich des Mikroporenvolumens ($w < 2 \text{ nm}$) und geringfügig hinsichtlich des Mesoporenvolumens ($2 \text{ nm} < w < 50 \text{ nm}$). Die Aktivkohlen der Medien B und C weisen einen höheren Volumenanteil an Mikroporen unterhalb von 15 \AA ($1,5 \text{ nm}$) auf als die Aktivkohle des Mediums A. An der Aktivkohle des letzteren Mediums wurde jedoch ein höherer Mesoporenanteil gemessen als an den Kohlen der Medien B und C.

Zusätzlich wurden für Adsorptionsversuche von SO_2 , NH_3 und H_2S speziell ausgerüstete, chemisorptive Filtermedien und konfektionierte Filter durch weitere Hersteller zur Verfügung gestellt (Hersteller D, drei unterschiedlich spezifisch ausgerüstete Medien und Filter). Repräsentativ sind die makroskopischen sowie REM- und EDX-Aufnahmen des Mediums D4 (Hersteller D, Ausrüstung 4) in der folgenden Abbildung 15 zu sehen.

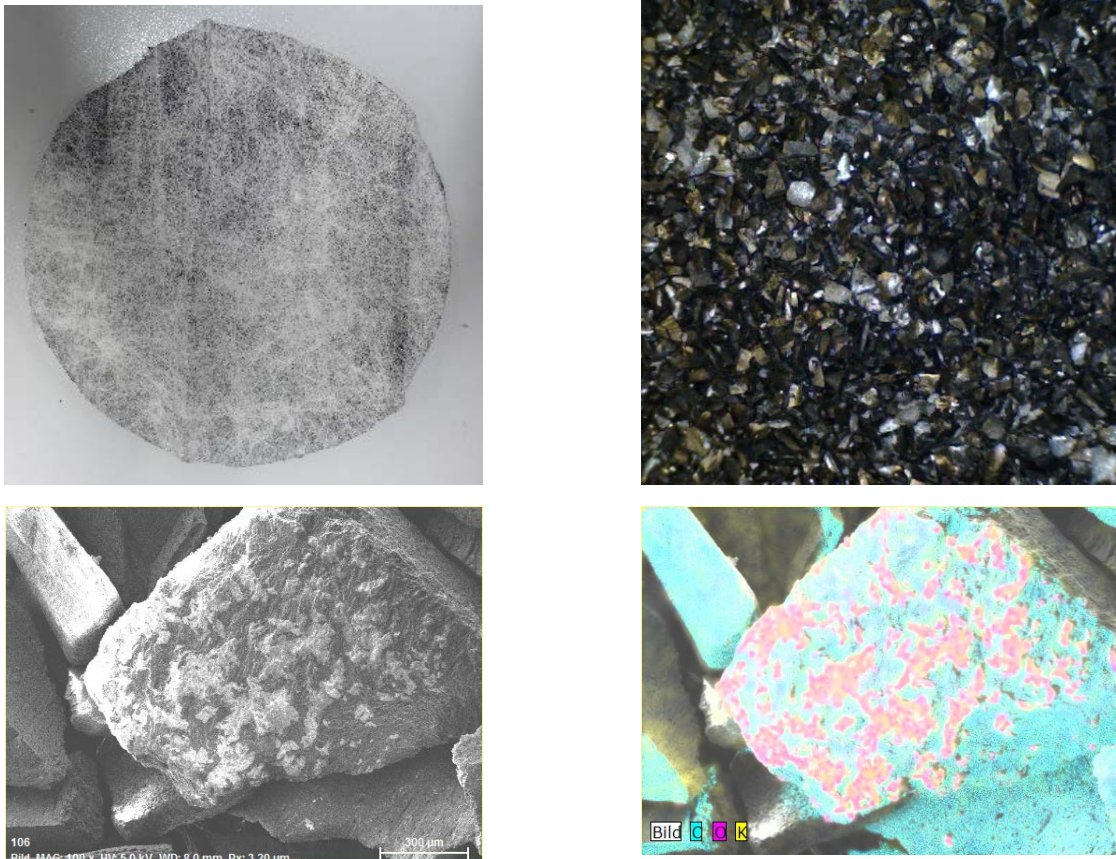


Abbildung 15: Fotografische Darstellung der Medien des Herstellers D: Ronde des Mediums (oben links), Aufnahme des Mediums von der Anströmseite, vergrößert (oben rechts), REM-Aufnahme eines imprägnierten Aktivkohlekorns (Medium D4) von der Anströmseite (unten links) und EDX-Aufnahme desselben Aktivkohlekorns (unten rechts)

In der Abbildung 15 unten links ist das Imprägniermittel zu erkennen, welches über die äußere Oberfläche des repräsentativ dargestellten Aktivkohlekorns verteilt ist. Die EDX-Aufnahme (Abbildung 15 unten rechts) verdeutlicht, dass es sich bei dem Imprägniermittel um eine kalium- und sauerstoffhaltige Substanz handelt, welche auf der Aktivkohleoberfläche fixiert ist.

Neben den hier beispielhaft aufgeführten physi- und chemisorptiven Medien wurden für die vorgesehenen experimentellen Untersuchungen zum einen weitere Materialien auf Aktivkohlebasis beschafft und verwendet. Zum anderen wurden die Adsorptionseigenschaften von Ionentauschern und synthetischen Adsorbentien untersucht. Die Beschreibung der Eigenschaften der weiteren Medien und Adsorbentien erfolgt an dieser Stelle nicht. Die wesentlichen Charakteristika werden jedoch in den entsprechenden Abschnitten im Rahmen der Darstellung von Versuchsergebnissen genannt.

2.2.2 Versuche an adsorptiven Filtermedien

Für die Adsorptionsversuche mit organischen Substanzen wurde vor den Versuchen jeweils eine Testdosierung des Prüfgases durchgeführt. Zum einen dient diese dazu, die Konzentration des dosierten Prüfgases zu überprüfen. Zum anderen erfolgt ein Abgleich der mittels FID, ohne ein eingebautes Filtermedium, erfassten Messwerte. Ohne ein eingebautes Filtermedium sollten die Konzentrationen auf der Roh- (c_{ein}) und der Reingasseite (c_{aus}) nahezu identisch sein. Als

expliziter Wert wird im Anhang der DIN EN ISO 10121-1 eine maximale Abweichung des Verhältnisses c_{aus}/c_{ein} ohne eingebautes Filtermedium von $\pm 0,02$ angeben.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, müssen für die Versuchsdurchführung laut der DIN EN ISO 10121 konstante Bedingungen bezüglich der Temperatur ($23 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) und der relativen Feuchte der konditionierten Luft ($50 \pm 3 \text{ } \%$ r. F.) gewährleistet sein. Diese Bedingungen werden im Folgenden als Standardbedingungen bezeichnet. In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind repräsentative Verläufe der Temperatur und der relativen Feuchte während der Dauer eines Versuches mit den normativen Vorgaben hinsichtlich der zulässigen Abweichung der beiden Parameter dargestellt.

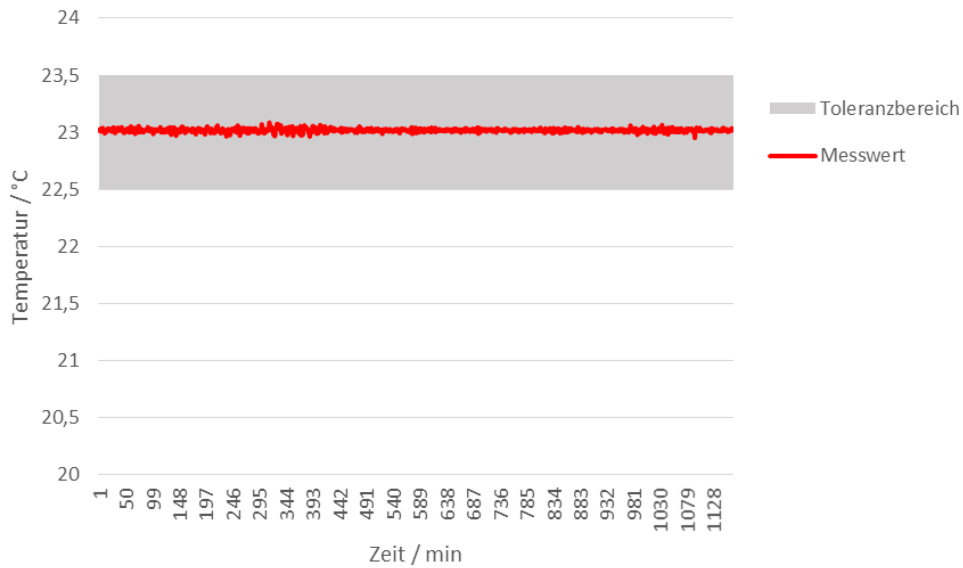


Abbildung 16: Vergleich der Temperatur der konditionierten Luft und dem Toleranzbereich laut DIN EN ISO 10121 während der Versuchsdauer

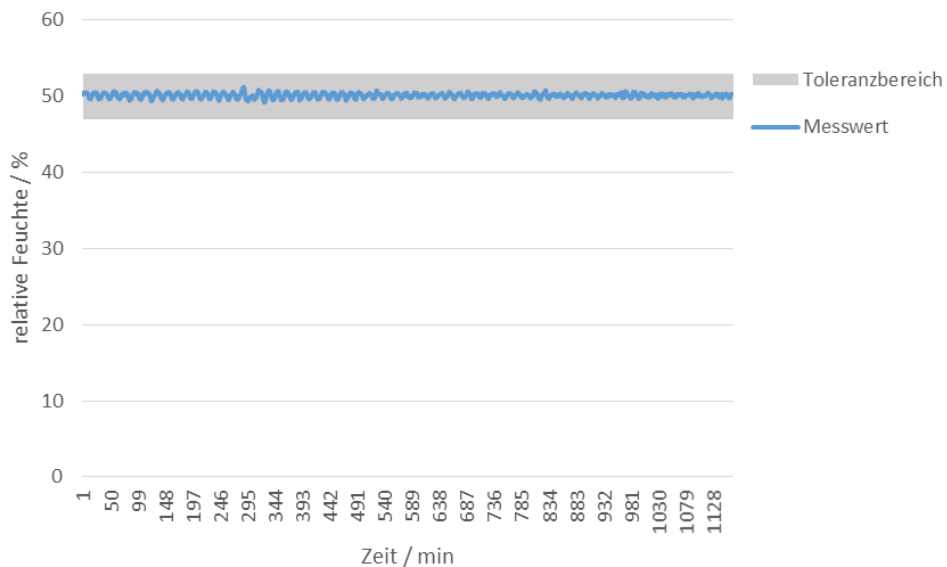


Abbildung 17: Vergleich der relativen Feuchte der konditionierten Luft bei 23 °C und dem Toleranzbereich laut DIN EN ISO 10121

Wie den Abbildung 16 und der Abbildung 17 entnommen werden kann, ist es am modifizierten Prüfstand der Forschungsstelle 1 möglich, eine durch die Norm empfohlene Konstanz der Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte zu gewährleisten.

2.2.2.1 n-Butan

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Adsorptionsversuche mit einer Rohgaskonzentration c_{aus} von 9 ppm des Adsorptivs n-Butan bei Standardbedingungen (23 °C und 50 % r. F.) dargestellt. Die Versuche wurden dabei zunächst mit einem Absaugvolumenstrom durch den Adsorber von 32,8 L/min durchgeführt, um eine Anströmgeschwindigkeit des Filtermediums von etwa 5,5 cm/s zu erhalten. Diese Anströmgeschwindigkeit wurde in Absprache mit einem Hersteller konfektionierter RLT-Filter gewählt und entspricht näherungsweise derjenigen im Anwendungsfall.

Die Abbildung 18 zeigt die typischen Konzentrationsverläufe des n-Butans auf der Roh- und Reingasseite während der Versuchsvorbereitung nach der Kalibrierung und der Versuchsdurchführung. Die bisher beschriebenen charakteristischen Bereiche sind dort entsprechend gekennzeichnet. Nachdem die Testdosierung des n-Butans erfolgt ist, wird die Prüfkammer gespült, um den Filtereinbau zu ermöglichen. Im Anschluss daran erfolgt zunächst eine 15-minütige Konditionierung des Filtermediums ohne eine Prüfgasdosierung, bevor der tatsächliche Adsorptionsversuch beginnt. Nach Erreichen des vollständigen Durchbruchs wird optional das Schadgas in ausgewählten Versuchen, wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, abgeschaltet und optional eine Desorption durchgeführt.

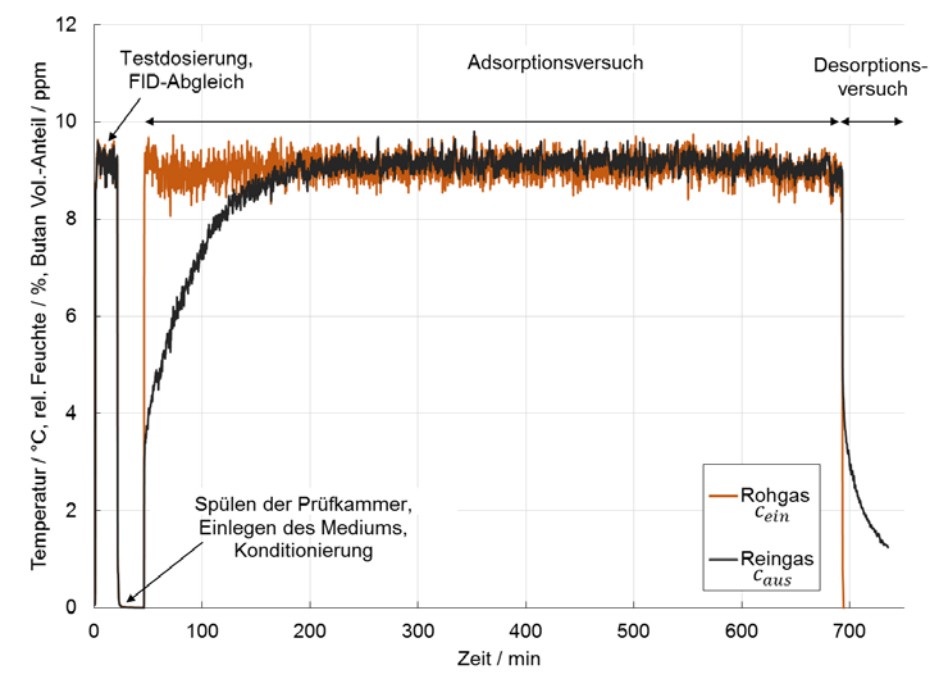


Abbildung 18: Repräsentative Konzentrationsverläufe von n-Butan auf der Roh- und Reingasseite während der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung an Aktivkohlefiltermedien (Versuchsparemeter: 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen)

Nachfolgend ist in Abbildung 19 der Bereich der Testgasdosierung aus Abbildung 18 in zeitlich höherer Auflösung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die mittels der FID gemessenen

Konzentrationen auf der Roh- und Reingasseite ohne ein verbautes Filtermedium im relevanten Konzentrationsbereich von 9 ppm nahezu identisch sind. Dies verdeutlicht auch das Konzentrationsverhältnis der Reingas- zur Rohgasseite c_{aus}/c_{ein} , welches laut Norm $1 \pm 0,02$ ohne ein eingebautes Filtermedium betragen soll. Aus dem dargestellten Diagramm wird deutlich, dass dies gegeben ist.

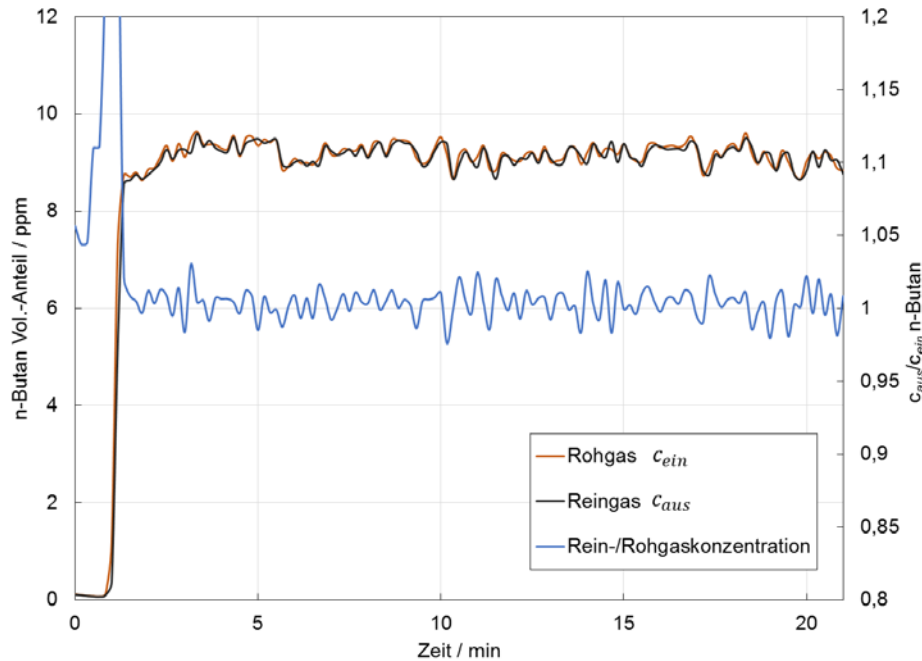


Abbildung 19: Vergleich der Roh- und Reingaskonzentrationen des n-Butans während der Testdosierung

Die Rohgaskonzentration des n-Butans über der Versuchsdauer ist in der nachfolgenden Abbildung 20 dargestellt. Zu erkennen ist dort, dass der normativ vorgegebene Toleranzbereich in manchen Zeitpunkten nicht eingehalten wird. Dieser Bereich wird von der DIN EN ISO 10121 unabhängig von der Konzentration mit $\pm 5\%$ angegeben. Der Mittelwert der Konzentration liegt jedoch innerhalb des normativ vorgeschlagenen Toleranzbereichs.

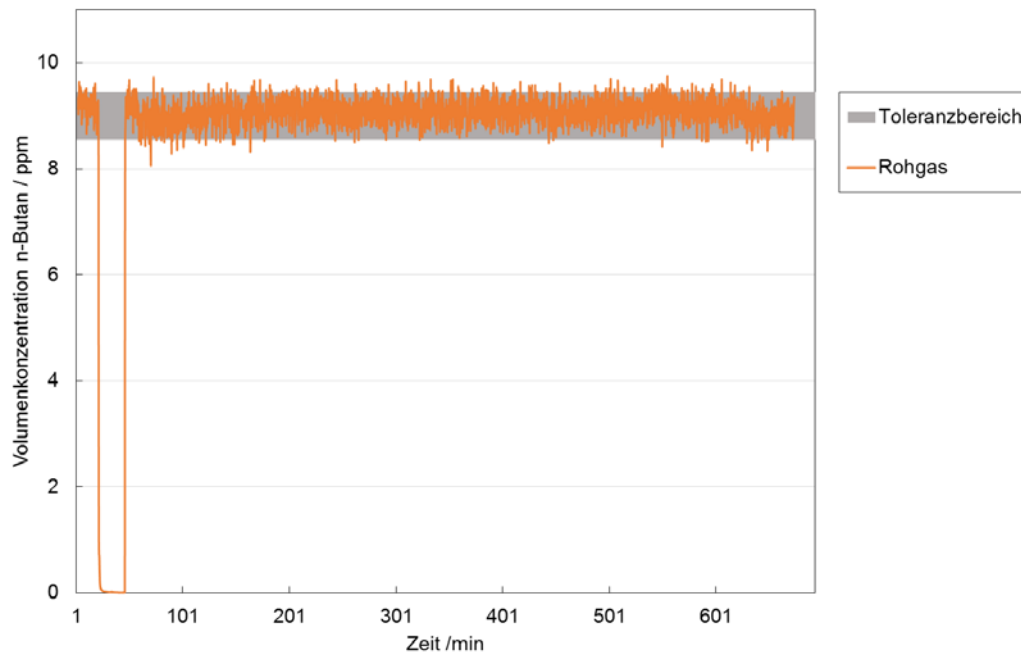


Abbildung 20: Rohgaskonzentration des n-Butans während der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung sowie der Toleranzbereich nach DIN EN ISO 10121

Die Schwankung der Konzentration lässt sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Zum einen können regelungstechnische Aspekte diese Schwankung herbeiführen. So kann die Konstanz der Konzentration infolge zeitlicher Änderungen des Volumenstroms im Prüfstand beeinflusst werden. Zudem weist der eingesetzte Massenflussregler laut Hersteller (MKS) eine Inkonstanz der Dosierung des n-Butans von 1 % auf.

Wie die Abbildung 21 zeigt, konnten mit dem modifizierten Filterprüfstand und der beschriebenen Prüfprozedur reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Dort sind vier Durchbruchkurven der Adsorptionsversuche von n-Butan an Filtermedien des Herstellers B unter Standardbedingungen dargestellt. Diese sollen zudem die folgende Problematik bei der Einstellung der Rohgaskonzentration verdeutlichen: Der Betrieb des Prüfstandes wurde mit Luft aus äußerer Umgebung vorgenommen, welche zentral über die Lüftungsanlage der Universität Duisburg-Essen aufbereitet und bereitgestellt wird. Die Aufbereitung der Luft besteht darin, dass die Luft nach dem Ansaugen aus der Umgebung einen Wärmeübertrager passiert, in welchem sie je nach Wetterlage auf einen gegebenen Wert gekühlt oder erwärmt wird. Die Luft beinhaltet also weiterhin Kohlenwasserstoffe, wobei Methan (CH_4) den wesentlichen Anteil ausmacht. Wenn aus Vereinfachungsgründen keine explizite Abscheidung der Kohlenwasserstoffe aus der Luft vor der Prüfgasdosierung vorgenommen wird, müssen diese bei der Prüfgasdosierung berücksichtigt werden. Der Grund dafür ist, dass bei der Messung der Konzentrationen mit Hilfe der FID alle Kohlenwasserstoffe in dem Messsignal erfasst werden. Das Messprinzip eines Flammenionisationsdetektors beruht nämlich darauf, dass das Messgas einer Wasserstoffflamme zugeführt wird, welche sich zwischen zwei Elektroden befindet. Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in dieser Flamme entsteht als Folge der Verbrennung ein Ionenstrom, welcher messtechnisch erfasst wird. Dieser Strom ändert sich dabei nahezu proportional zu der Anzahl der Kohlenstoffatome des verbrannten Moleküls pro Zeiteinheit [Profos und Pfeifer, 1994]. So wird nicht zwischen n-Butan und Methan differenziert. Die Adsorption des letzteren Gases kann unter den hier verwendeten Bedingungen und Adsorbentien

vernachlässigt werden, was experimentell überprüft wurde (ohne Prüfgasdosierung zeigen die verwendeten Medien unter den raumlufotechnischen Bedingungen keine Abscheidung von Kohlenwasserstoffen aus der konditionierten Luft). Die Konzentration des Methans in der Außenluft liegt jedoch relativ konstant zwischen 1,7 und 1,8 ppm und wird vor dem Versuch durch eine FID-Messung der konditionierten Luft bestimmt bzw. überprüft. Wenn also eine über die FID eingestellte vermeintliche n-Butankonzentration von 9 ppm gewählt wird, liegt die tatsächliche, wie in Abbildung 21 zu sehen, darunter (Graphen „ohne Korrektur“). Da der volumetrische Anteil des Methans jedoch bekannt ist und zeitlich keinen signifikanten Schwankungen unterliegt, kann das Messsignal der FID rechnerisch um den entsprechenden Wert der Methankonzentration korrigiert werden. Somit ist es möglich, eine Prüfgaskonzentration von 9 ppm n-Butan einzustellen (Abbildung 21).

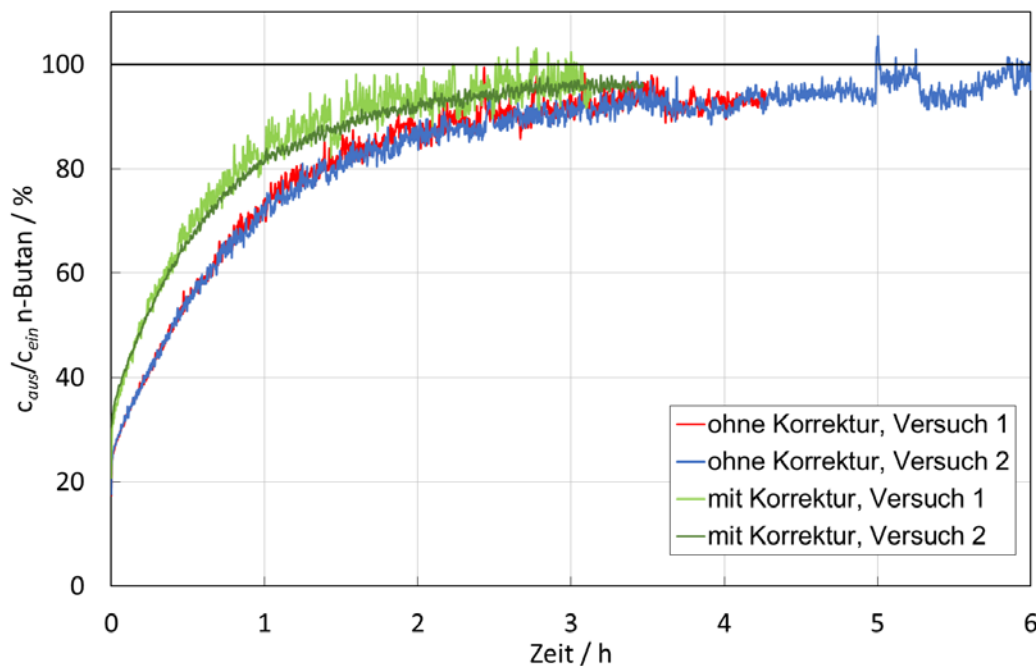


Abbildung 21: Durchbruchkurven n-Butan an Medien des Herstellers B mit und ohne Methankorrektur (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Die Durchbruchkurven aus Abbildung 21 weisen Verläufe mit einer größeren Steigung zu Versuchsbeginn auf, welche mit zunehmender Versuchsdauer und damit steigender Beladung abnimmt. Wie in Abbildung 21 zu erkennen, liegt bei Adsorptionsversuchen mit dem Adsorptiv n-Butan an Filtermedien des Herstellers B ein Initialdurchbruch vor. Dies bedeutet, dass an dem unbeladenen und konditionierten Filtermedium zu Beginn keine vollständige Abscheidung von n-Butan erfolgt. Die Erklärung für dieses Adsorptionsverhalten liegt zum einen in der nur dünnen Adsorbenschicht (Aktivkohle) begründet, wodurch die Verweilzeit der Adsorptivmoleküle innerhalb des Filters sehr gering ist (mittlere Verweilzeit innerhalb des Mediums B bei der Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s: $\tau_B = 0,03$ s). Zum anderen ist die Aktivkohleschicht nicht vollständig geschlossen (Abbildung 12). Es liegen somit Bereiche innerhalb des Filtermediums vor, in denen kein Adsorbens vorhanden ist und folglich Bereiche innerhalb des Filtermediums existieren, in denen die Adsorptivmoleküle nicht in den Kontakt mit dem Adsorbens treten. Infolgedessen kommt es in diesen Bereichen zu Bypassseffekten, weshalb an den adsorbensfreien Stellen keine sorptive Abscheidung des n-Butans stattfindet.

Im Folgenden soll der Einfluss einer nahezu vollständig geschlossenen Adsorbenschicht auf den Initialdurchbruch mit der des Mediums B verglichen werden. Hierzu ist in Abbildung 22 die Aktivkohleschicht des Mediums vom Hersteller B plakativ derjenigen eines untersuchten Kfz-Mediums des Herstellers K gegenübergestellt. Aufgrund der überwiegend geschlossenen Aktivkohleschicht des Mediums K und zusätzlich einer größeren Schütthöhe und Masse der Aktivkohle als bei dem Medium des Herstellers B weist ersteres einen nur geringen Initialdurchbruch in Adsorptionsversuchen mit n-Butan auf (Abbildung 23).

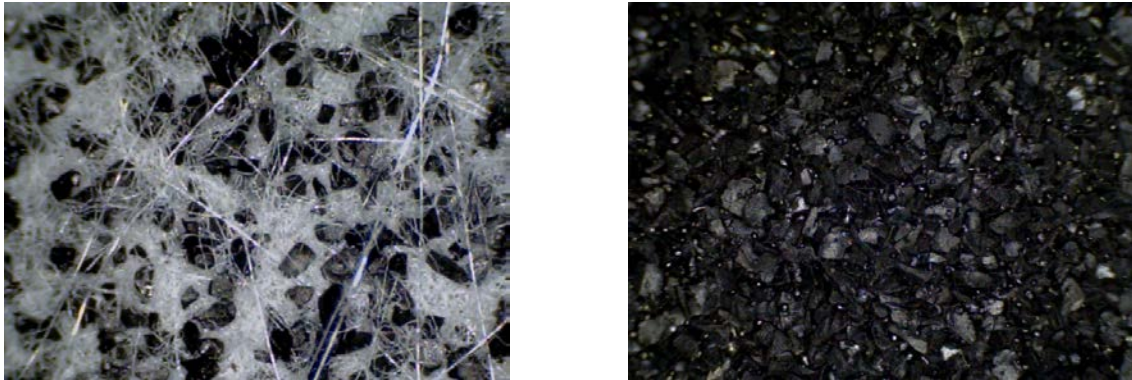


Abbildung 22: Fotografische Darstellung der Aktivkohleschicht eines Mediums des Herstellers B (links) und eines Kfz-Innenraumfiltermediums (rechts)

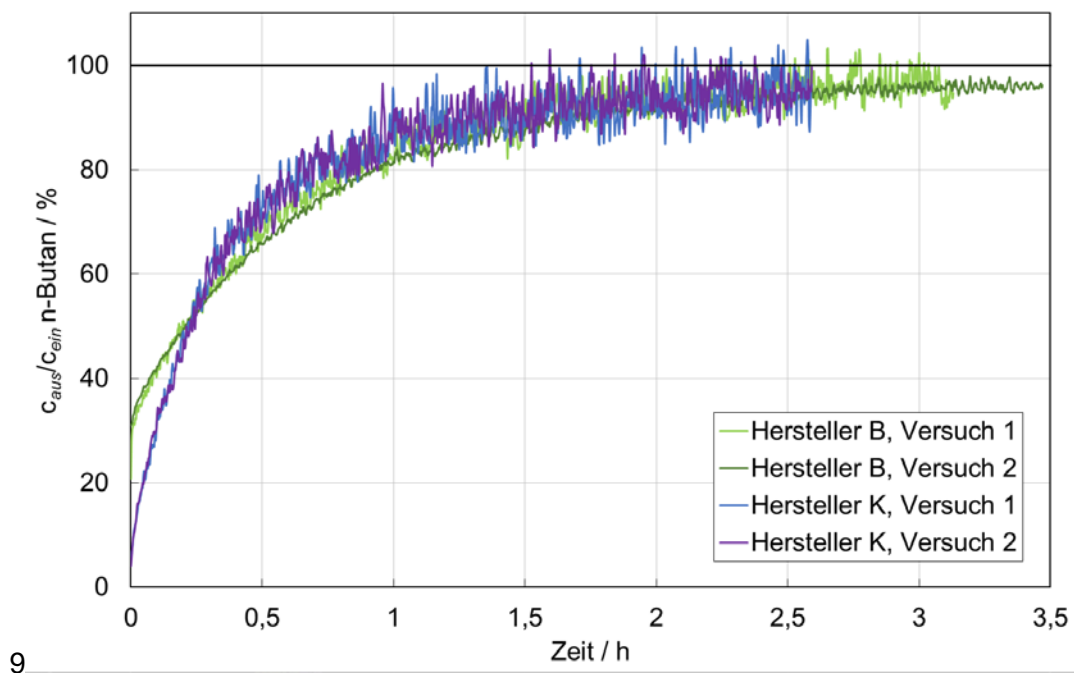


Abbildung 23: Vergleich der Durchbruchkurven von n-Butan an Medien des Herstellers B und Kfz-Medien des Herstellers K (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Zur Untersuchung der Kapazität der Filtermedien des Herstellers B wurde mit Hilfe einer Massenbilanz über dem Filtermedium die adsorbierte Masse nach der folgenden Gleichung rechnerisch bestimmt:

$$m_{i+1} = m_i + \frac{Mp}{RT} \cdot \dot{V} \cdot \frac{(c_{ein,i+1} - c_{aus,i+1}) \cdot \Delta t}{1000} \quad 1$$

Dabei sind m die adsorbierte Masse, M die molare Masse des Adsorptivs, T die absolute Temperatur und R die universelle Gaskonstante. Des Weiteren sind \dot{V} der Volumenstromstrom im Adsorber, c_{ein} die Rohgaskonzentration, c_{aus} die Reingaskonzentration des Adsorptivs und Δt die Zeit zwischen den Messpunkten der Konzentration. Durch i und $i + 1$ wird die zeitliche Diskretisierung indiziert. Damit erfolgt die Berechnung der Adsorbatmasse zum Zeitpunkt $i + 1$ durch Addition der in dem Zeitraum Δt adsorbierten Masse zu der Adsorbatmasse m_i .

Aus den in Abbildung 21 in Form von Durchbruchkurven dargestellten Konzentrationsverläufen bei der Adsorption von 9 ppm n-Butan an den Filtermedien des Herstellers B resultieren mit Hilfe der Gleichung 1 folgende Graphen der adsorbierten Masse des n-Butans (Abbildung 24).

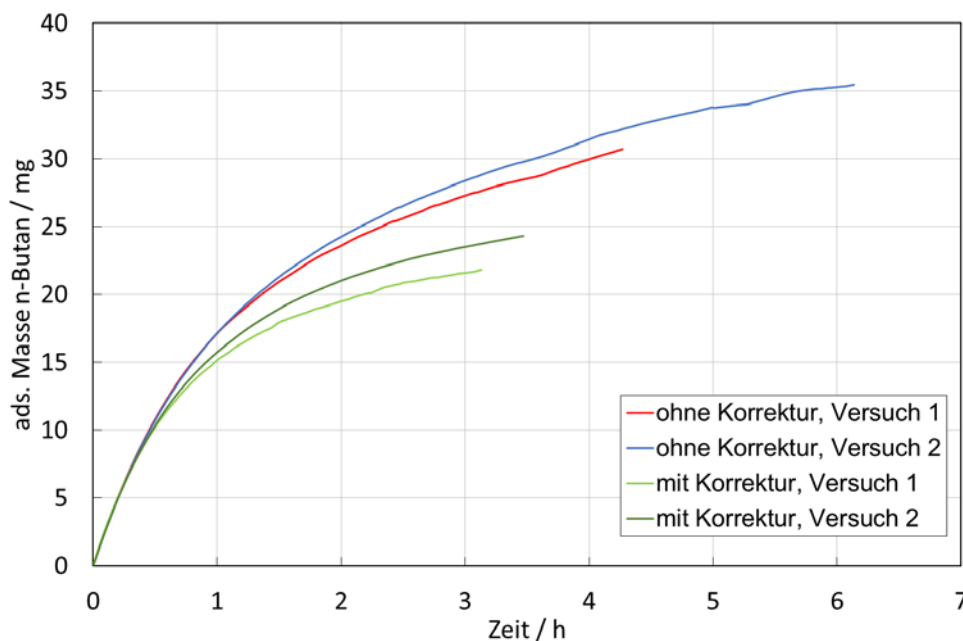


Abbildung 24: Adsorbierte Masse n-Butan bei Versuchen an Medien B mit und ohne Methankorrektur (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Aus Abbildung 24 wird zusätzlich deutlich, dass eine vernachlässigte Methankorrektur bei Adsorptionsversuchen mit unbehandelter Umgebungsluft fälschlicherweise zu der Annahme einer höheren Adsorptionskapazität für n-Butan führen würde. Des Weiteren ist sowohl bei den Versuchen mit als auch bei denen ohne Berücksichtigung des Methananteils des Trägergases Luft eine gute Reproduzierbarkeit erkennbar. Bis zu einem Durchbruch von etwa 80 % sind die Verläufe der adsorbierten Masse über der Versuchsdauer nahezu identisch. Oberhalb des Durchbruches von 80 % ist jeweils eine zeitlich zunehmende Differenz zwischen dem ersten und dem Wiederholungsversuch sowohl bei Versuchen mit als auch ohne Methankorrektur

erkennbar. Diese Differenz kann einerseits auf die höhere Schwankung von c_{aus}/c_{ein} im Bereich oberhalb des 80%-igen Durchbruches zurückgeführt werden. Dieser Effekt kann wiederum mit einem höheren Einfluss einer Schwankung der relativen Feuchte und der Temperatur im Bereich höherer Adsorbensbeladung zusammenhängen. Ferner unterscheiden sich die Proben, welche von einer Rolle des Mediums herauspräpariert werden, hinsichtlich der Adsorbensmenge (hier Aktivkohle), ihrer Verteilung und der Eigenschaften der Aktivkohle voneinander. Diese Unterschiede zeigen womöglich erst im Bereich einer höheren Adsorbensbeladung eine signifikante Auswirkung auf die Kapazität des geprüften Mediums. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich nahe der Gleichgewichtsbeladung die zur Verfügung stehenden Adsorptionsplätze (Oberflächen bzw. Volumina) bereits zu einem großen Teil belegt sind.

Den Verläufen der adsorbierten Masse über der Versuchsdauer in Abbildung 24 ist des Weiteren zu entnehmen, dass die Aufnahme des Adsorptivs mit zunehmender Beladung abnimmt. Dies äußert sich in der Abnahme der Steigungen der Graphen mit der Zeit.

Aufgrund des oben diskutierten signifikanten Initialdurchbruches an Medien des Herstellers B, wurde ein weiteres dickeres Filtermedium durch diesen Hersteller zu Verfügung gestellt (als B2 bezeichnet). Die Durchbruchkurven von n-Butan an den Medien B und B2 unter identischen Versuchsbedingungen sind in der folgenden Abbildung 25 gegenübergestellt.

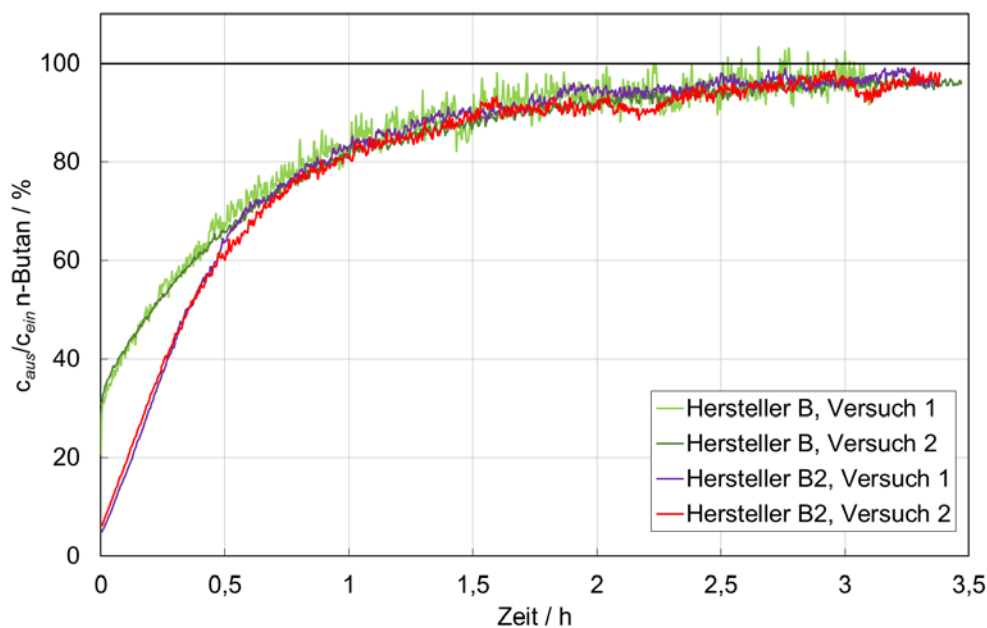


Abbildung 25: Vergleich der Durchbruchkurven von n-Butan an Medien B und B2 (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen, Anström-geschwindigkeit 5,5 cm/s)

Wie der Abbildung 25 zu entnehmen ist, konnte durch die Verwendung des dickeren, durch eine höhere Aktivkohlegrammatur gekennzeichneten Filtermediums B2 der Problematik eines hohen Initialdurchbruches von n-Butan begegnet werden. Dies war jedoch mit einer Erhöhung des Druckverlustes des Mediums B2 im Vergleich zum Medium B verbunden. Der Initialdurchbruch von n-Butan an dem Medium B2 lag im Bereich von etwa 5 %. Eine bessere Adsorptionsleistung des Mediums B2 ist jedoch nur bis zu einer Versuchszeit von ca. 0,75 h (75 %

Durchbruch) festzustellen. Ab diesem Punkt sind die Verläufe der Durchbruchkurven nahezu identisch.

Zusätzlich zu den oben dargestellten Versuchsergebnissen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s wurden Durchbruchkurven bei mehreren höheren Anströmgeschwindigkeiten aufgenommen. Letzteres sollte der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, welche an Medien und Filtern ermittelt wurden, dienen. Die Darstellung und Diskussion dieser Ergebnisse erfolgt entsprechend in dem Abschnitt 2.2.5.

2.2.2.2 Toluol

Mit dem Adsorptiv Toluol wurden Adsorptionsversuche mit einer Toluolkonzentration von 9 ppm bei Standardbedingungen (23 °C, 50 % rel. Feuchte) an adsorptiven Filtermedien der Hersteller A, B und C durchgeführt. In Abschnitt 2.2.5 werden die Leistungsdaten der Filtermedien und der konfektionierten Filter der Hersteller A, B und C jeweils miteinander verglichen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse einer Medienprüfung auf konfektionierte Filter validiert. Die weiteren Versuchsparameter entsprechen denjenigen bei den Adsorptionsversuchen mit n-Butan. Zudem wurde die bereits im oberen Abschnitt beschriebene „Methankorrektur“ in allen Versuchen berücksichtigt.

Zunächst sind in Abbildung 26 repräsentativ die Konzentrationsverläufe des Toluols auf der Roh- (c_{ein}) und Reingasseite (c_{aus}) während der Versuchsvorbereitung nach der Kalibrierung und der Versuchsdurchführung mit Medien des Herstellers B dargestellt.

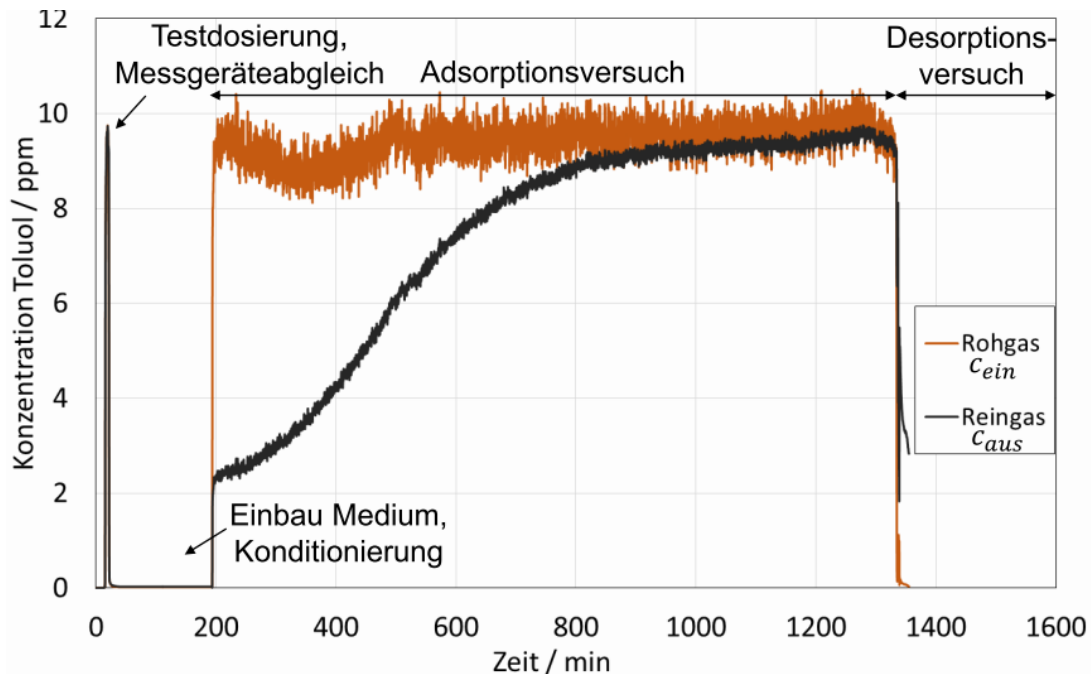


Abbildung 26: Konzentrationsverläufe Toluol auf der Roh- und Reingasseite während der Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung (Versuchsparameter: 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Auffällig in der Abbildung 26 ist vor allem der folgende Sachverhalt. Bei Betrachtung des Verlaufs der Rohgaskonzentration ist zu erkennen, dass diese sowohl hinsichtlich kurzer als auch größerer Zeitspannen einer Schwankung unterliegt. Die genauen Ursachen dieser Schwankungen können auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden. Als Beispiele seien analog zu der Dosierung des n-Butans (Abschnitt 2.2.2.1) die Dosierkonstanz der Massenflussregler und des Volumenstroms im Prüfstand genannt, was sich in einer Schwankung der Rohgaskonzentration über einen geringen Versuchszeitraum äußert. Zudem sind die Messfehler der FIDs ein möglicher Faktor, welcher zu einer Schwankung der Konzentration führt. Um das Messverhalten der FIDs über eine längere Versuchsdauer, welche bei Experimenten mit Toluol im niedrigen Konzentrationsbereich bis zum Gleichgewicht notwendig ist, zu untersuchen und zu vergleichen, wurde der folgende Versuch durchgeführt. Es erfolgte eine Dosierung von 9 ppm Toluol unter Standardbedingungen über einen längeren Zeitraum ohne ein eingebautes Filtermedium. Dabei wurden die Messwerte der Konzentrationen auf der Roh- und Reingasseite aufgezeichnet. Der Vergleich dieser Messwerte ist in Abbildung 27 dargestellt.

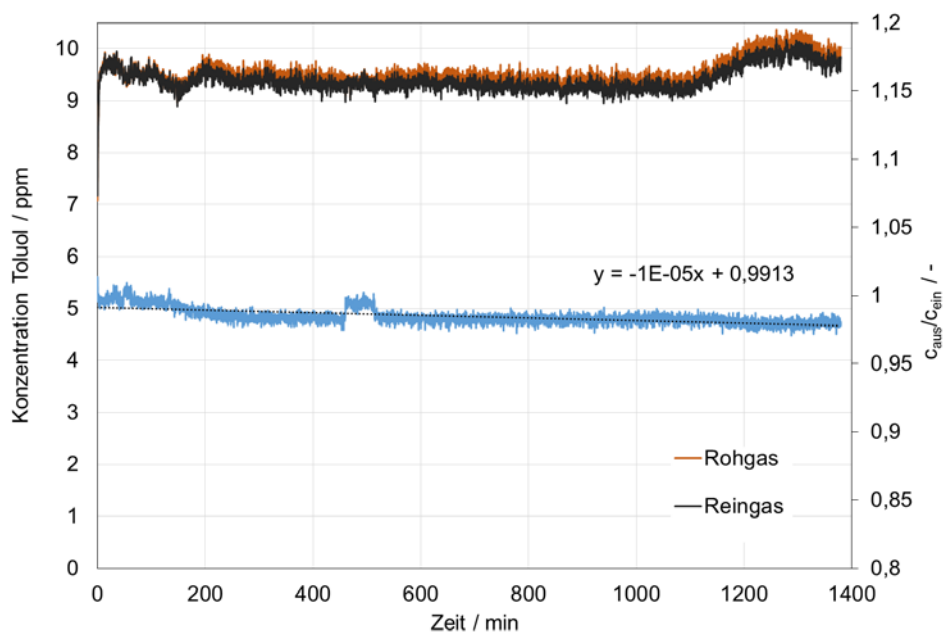


Abbildung 27: Vergleich der Roh- und Reingaskonzentrationen bei einer Sollkonzentration von 9 ppm Toluol ohne ein eingebautes Filtermedium zum Abgleich der FID-Messwerte sowie das Verhältnis der beiden Konzentrationen (c_{aus}/c_{ein}) in Abhängigkeit der Messzeit

Aus Abbildung 27 wird ersichtlich, dass das Verhältnis von c_{aus}/c_{ein} über einen längeren Zeitraum, welcher für einen Adsorptionsversuch mit 9 ppm Toluol an Medien des Herstellers B notwendig ist, unterhalb der normativ empfohlenen Abweichung von $\pm 0,02$ liegt. Jedoch ist eine zeitliche Abnahme von c_{aus}/c_{aus} zu beobachten. Dies wird anhand der linearen Trendlinie deutlich, welche eine negative Steigung aufweist. Als Ursache dieses Verhaltens kann ein unterschiedliches zeitliches Driftverhalten der beiden eingesetzten FIDs genannt werden. Dieses Verhalten ist somit bei längeren Messungen mit zwei Messgeräten detaillierter zu überprüfen, der auftretende Fehler als Wert zu verifizieren und die Messungen möglicherweise mit mathematischen Korrekturen zu versehen.

Da die Norm DIN EN ISO 10121-1 eine Darstellung der Messergebnisse in Form von Verläufen der Reinigungseffizienz E (Gleichung 2) als Funktion der Versuchszeit empfiehlt, sind die Ergebnisse der Durchbruchversuche in der folgenden Abbildung 28 in dieser Form dargestellt.

$$E [\%] = \frac{c_{ein} - c_{aus}}{c_{ein}} \cdot 100$$

2

In Abbildung 29 sind zudem jeweils die analogen Durchbruchkurven aus den Adsorptionsversuchen mit 9 ppm Toluol an den Medien der Hersteller A und B zu sehen.

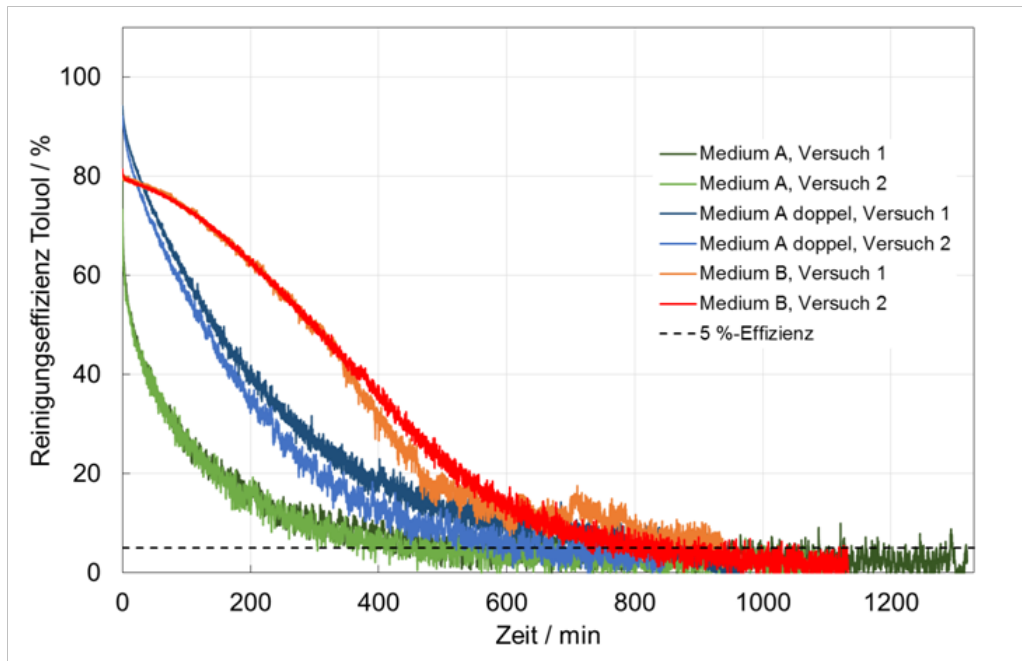


Abbildung 28: Reinigungseffizienz für Toluol an Medien des Herstellers A und des Herstellers B (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

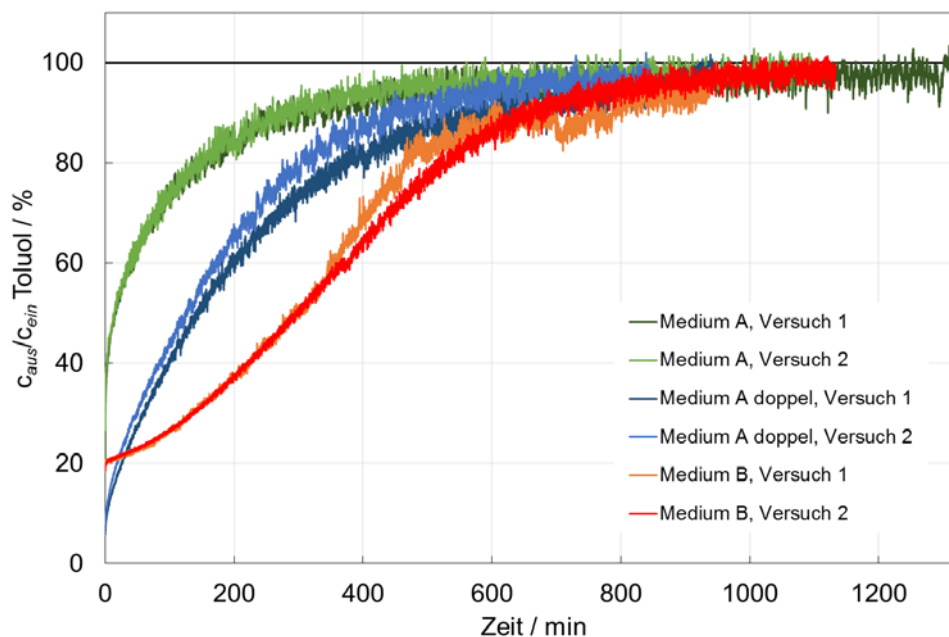


Abbildung 29: Durchbruchkurven Toluol an Medien des Herstellers A und des Herstellers B (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Anhand der Durchbruchkurven in Abbildung 29 wird die gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse deutlich. Insbesondere die Verläufe der Durchbruchs- und Reinigungseffizienzkurven aus den Versuchen an dem adsorptiven Filtermedium des Herstellers B sind nahezu identisch. Im Allgemeinen kann als Einfluss auf die Reproduzierbarkeit ein Unterschied in der Schwankung der relativen Feuchte und Temperatur beziehungsweise eine Differenz des adsorbierten Wassers bei verschiedenen Versuchen genannt werden. Des Weiteren unterscheiden sich die Mittelwerte der Rohgaskonzentration c_{ein} bei der jeweiligen Versuchsdurchführung geringfügig, liegen jedoch innerhalb der normativ vorgegebenen Toleranz. Zudem kommt der Einfluss der Materialprobenahme auf die Reproduzierbarkeit zum Tragen, da die für die Versuche verwendeten Medienronden in der Regel aus einem größeren Stück des Materials herauspräpariert werden. Aus fertigungstechnischen Gründen weist das jeweilige Medium örtliche Inhomogenitäten bezüglich der Adsorbensmenge, Adsorbensverteilung und der Adsorbenseigenschaften auf, was sich auf dessen adsorptive Leistung auswirkt.

Da die Aussagekraft, wie der Vergleich von Reinigungseffizienzverläufen (Abbildung 28) und Durchbruchkurven (Abbildung 29) ergibt, identisch ist, sollen die Versuchsergebnisse in Form von Durchbruchkurven dargestellt werden, was in der Adsorptionstechnik üblicher ist. Auf eine zusätzliche Darstellung der Reinigungseffizienz in Abhängigkeit der Versuchszeit soll im Folgenden verzichtet werden.

Aus Abbildung 29 wird analog zu den Durchbruchkurven aus Versuchen mit n-Butan ein Initialdurchbruch von etwas mehr als 20 % bei Verwendung der Medien des Herstellers B ersichtlich. Der Initialdurchbruch beim Einsatz der Medien des Herstellers A ist annähernd doppelt so hoch. Zurückzuführen ist dieses Adsorptionsverhalten vorwiegend auf die unterschiedliche Beschaffenheit der Medien von Hersteller A und B (Abschnitt 2.2.1). Durch den hohen Lückengrad der Medien des Herstellers A wird die Wahrscheinlichkeit, mit dem Adsorbens in Kontakt zu treten, für viele Toluolmoleküle reduziert. Da der Initialdurchbruch

insbesondere bei dem Medium A in einfacher Lage ausgeprägt ist, wurden zusätzlich Durchbruchversuche mit dem Medium A in Doppellage durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen eine Verbesserung des Initialdurchbruches durch eine Verdoppelung der mittleren Verweilzeit von Toluolmolekülen innerhalb der Filtermediums und eine Verdoppelung der Adsorbensmenge.

Neben den Initialdurchbrüchen sind auch die in Abbildung 29 dargestellten Verläufe der Durchbruchskurven der untersuchten Medien A und B unterschiedlich. Während die Durchbruchskurven des Mediums B einen annähernd s-förmigen Verlauf aufweisen, sind die Durchbruchskurven des Toluols am Medien A konkav zur Zeitachse. Letzteres ist aus Sicht der Adsorptionsleistung nachteilig. Die Unterschiede der Adsorptionsleistung der Medien A und B können durch verschiedene Faktoren begründet werden. Zum einen kann die schlechtere Adsorptionsleistung des Mediums A auf eine langsamere Kinetik zurückgeführt werden. Letztere kann mit einem geringen Stoffübergang an die „Adsorbenscluster“ sowie einem limitierten diffusiven Stofftransport durch das Porennetzwerk des Adsorbens zusammenhängen und die Form der Durchbruchskurve signifikant negativ beeinflussen [Kast, 1988; Sontheimer et al., 1985]. Bei der Adsorptionskinetik spielen ferner die verfügbare Kapazität des Adsorbens, die Form der Adsorptionsisotherme und die Porenweitenverteilung sowie das verfügbare Mikroporenvolumen eine entscheidende Rolle. Das Medium A weist ein niedrigeres Mikroporenvolumen sowie eine niedrigere Kapazität als das Medium B und deshalb auch eine schlechtere Kinetik auf. Zum anderen können neben den makro- und mikrokinetischen Eigenschaften des Adsorbens Strömungseffekte einen Einfluss auf die Form der Durchbruchskurve haben. Innerhalb des Mediums A ist das Adsorbens weniger dicht verteilt als zwischen den zwei Vliesen des Mediums B. Zudem ist die Dichte der Faserstruktur des Mediums B höher. Diese Sachverhalte spiegeln die Druckverluste der beiden Medien wider, welche in der folgenden Tabelle 3 aufgelistet sind.

Tabelle 3: Druckverluste der untersuchten adsorptiven Filtermedien bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

Filtermedium	Druckverlust bei 5,5 cm/s in Pa
Medium A	< 5
Medium A doppel	< 5
Medium B	7

Aufgrund der größeren Aktivkohlegrammatur und des dichteren Fasernetzwerk des Mediums B wird auch ein geringfügig höherer Druckverlust (Tabelle 3) gemessen. Des Weiteren ist das innerhalb des Adsorbens vorliegende parabelförmige Strömungsprofil infolge einer laminaren Rohrströmung bei dem Medium A mit geringerem Druckverlust stärker ausgeprägt als dies beim Medium B der Fall ist. Infolgedessen liegen innerhalb des Mediums A wahrscheinlich Bereiche (in der Adsorberrmitte) vor, welche mit einer höheren Geschwindigkeit durchströmt werden, was sich negativ auf die Verweilzeit und somit auf die Adsorptionsleistung des Mediums auswirkt. Ähnliche Einflüsse der laminaren Strömungsform auf die Form der Durchbruchskurve sind beispielsweise auch von JANSEN [2005] beschrieben worden.

Die signifikanten Unterschiede des Adsorptionsverhaltens von Toluol an Medien der Hersteller A und B werden auch aus der Betrachtung der Adsorptionskapazitäten deutlich. In Abbildung 30 sind die gemessenen adsorbierten Massen von Toluol bei den oben genannten Versuchen an Medien der Hersteller A und B dargestellt.

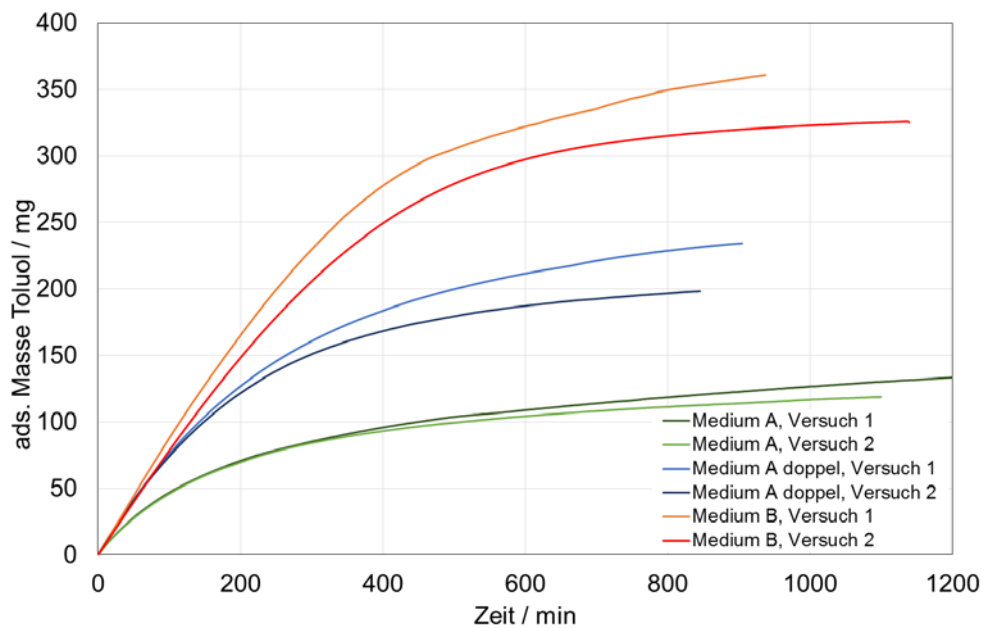


Abbildung 30: Adsorbierte Toluolmasse bei Versuchen an Medien der Hersteller A und B (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Die Verläufe der adsorbierten Toluolmassen in Abbildung 30 wurden analog zu denen von n-Butan mit Hilfe der Gleichung 1 berechnet. Die Beladungsverläufe der Medien B weisen einen längeren steilen Anstieg der adsorbierten Toluolmasse auf, während die Beladungsverläufe der Medien A früher abflachen. Folglich werden mit den Medien B höhere Gleichgewichtsbeladungen erhalten. Zu erkennen ist zudem eine Abweichung der adsorbierten Masse über der Versuchsdauer an Medien des Herstellers A als doppelte Lage und an Medien des Herstellers B. Die Ursachen dafür können, wie oben beschrieben, sowohl versuchstechnischer (Abweichungen der Temperatur, rel. Feuchte und Rohgaskonzentration) als auch materialspezifischer (abweichende Materialeigenschaften innerhalb einer Charge) Natur sein.

Zur Bewertung der Rückhaltefähigkeit von Filtermedien, wie das Desorptionsverhalten in der DIN EN ISO 10121 bezeichnet wird, wurden im Anschluss an die Adsorptionsversuche mit 9 ppm Toluol Experimente zur Desorption vorgenommen. Auf die Ergebnisse der Desorptionsversuche soll im Folgenden eingegangen werden. Dazu sind in der Abbildung 31 die Verläufe der Reingaskonzentrationen c_{aus} für die Medien A und B dargestellt.

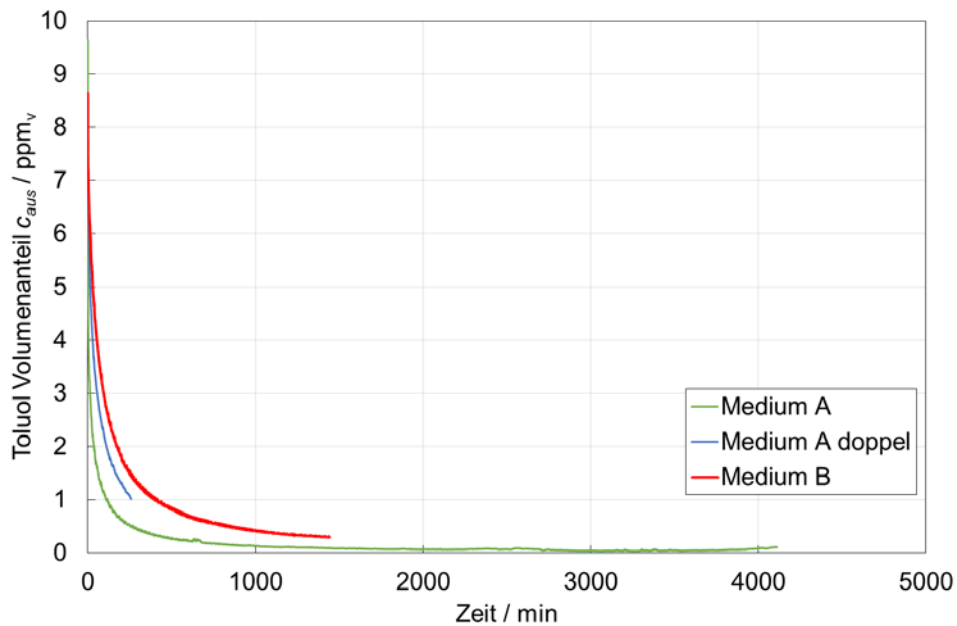


Abbildung 31: Volumenanteile Toluol im Reingas an Medien A und B bei der Desorption (Versuchsparameter: Sollkonzentration des Adsorptionsversuches 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Aus Abbildung 31 wird ersichtlich, dass die Reingaskonzentration des Toluols während der Desorption vom Medium B höher ist als bei der Desorption vom Medium A als einfache und doppelte Lage. Dabei wird von dem Medium B in doppelter Lage über der Versuchsdauer mehr Toluol desorbiert, als dies bei der einlagigen Ausführung der Fall ist. Das beschriebene Verhalten entspricht den in Abbildung 30 dargestellten ermittelten Kapazitäten der drei Medienproben (A, A doppelt und B). Von dem Medium mit der höheren Kapazität und damit größeren aufgenommenen Toluolmenge (Medium B) desorbiert mehr Toluol als von dem Medium mit geringerer Kapazität (Medium A doppelt und einfach).

In der folgenden Abbildung 32 sind die Durchbruchkurven von Versuchen mit 9 ppm Toluol an Medien des Herstellers C bei Standardbedingungen zu sehen. Die Versuche wurden im Vergleich zu den Medien A und B in Absprache mit dem Hersteller bei einer Anströmgeschwindigkeit von 18 cm/s durchgeführt. Letztere entspricht der Anströmgeschwindigkeit des Mediums im konfektionierten Filter.

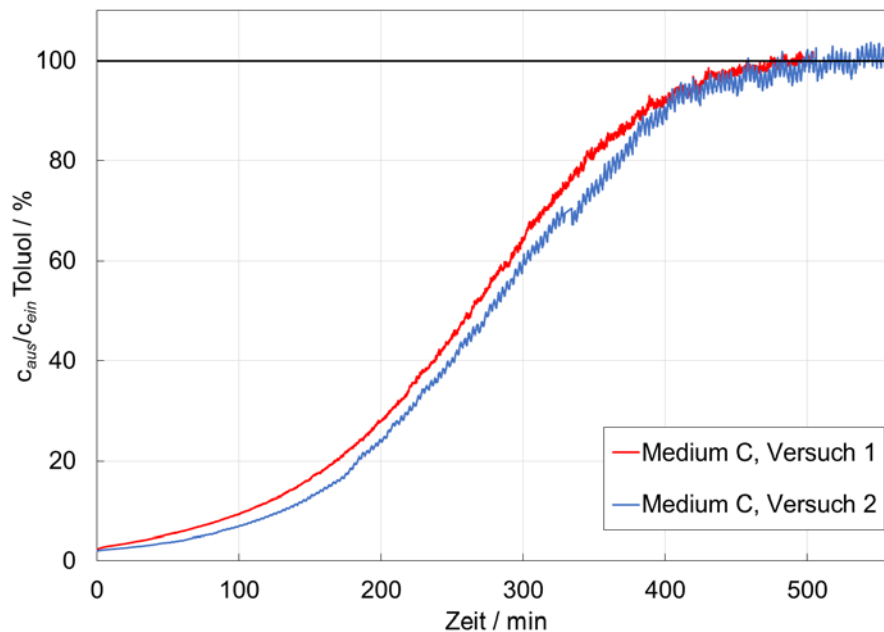


Abbildung 32: Durchbruchkurven Toluol an Medien C (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 18 cm/s)

Die Durchbruchkurven des Toluols am Medium C (Abbildung 32) zeigen einen nur geringen Initialdurchbruch und einen s-förmigen Verlauf. Dieses Verhalten kommt durch eine dichte, nahezu lückenlose Aktivkohleschicht des Mediums C (siehe Abbildung 13) und zudem einem hohen Mikroporenvolumen (Abbildung 14) zustande. Der Druckverlust der Medien liegt etwa bei 20 Pa bei einer Anströmgeschwindigkeit von 18 cm/s (6 Pa bei 5,5 cm/s). Die Abbildung 33 zeigt die adsorbierten Massen des Toluols an Medien des Herstellers C.

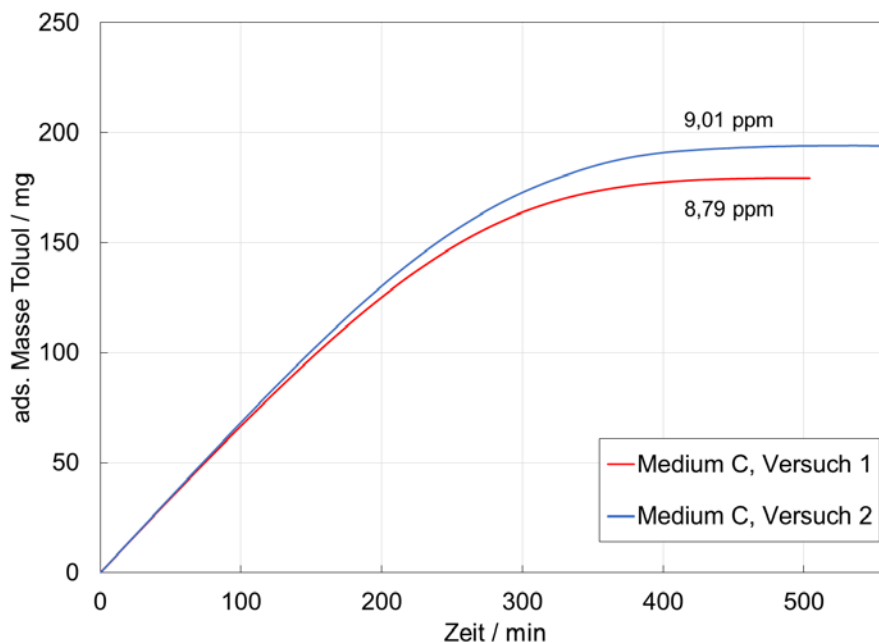


Abbildung 33: Adsorbierte Toluolmassen bei Versuchen an Medien des Hersteller C (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 18 cm/s)

Neben den in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnissen wurde ein weiterer Adsorptionsversuch an dem Aktivkohlemedium des Herstellers G vorgenommen. Dies erfolgte zusätzlich zum Zwecke der Prüfung einer Übertragbarkeit von an Medien und Filtern ermittelten Leistungsdaten. Das Ergebnis ist in dem entsprechenden Abschnitt 2.2.5.2 dargestellt.

2.2.2.3 Schwefeldioxid

Adsorptionsversuche mit SO_2 wurden am Medium D (Aktivkohle mit Kaliumcarbonat K_2CO_3 -Imprägnierung) vorgenommen. Die Versuchsdurchführung erfolgte an den Medien in einfacher und doppelter Lage mit einer SO_2 -Rohgaskonzentration von 9 ppm, bei Standardbedingungen (23 °C und 50 % rel. Feuchte) sowie bei einer Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s. Versuche an Medium D in Doppellage wurden zum Zwecke der Übertragbarkeit von Leistungsdaten von Medien auf Filtern vorgenommen, da das Medium D innerhalb des konfektionierten Filters in doppelter Ausführung verwendet wurde. Abbildung 34 zeigt die in den Versuchen ermittelten Durchbruchkurven.

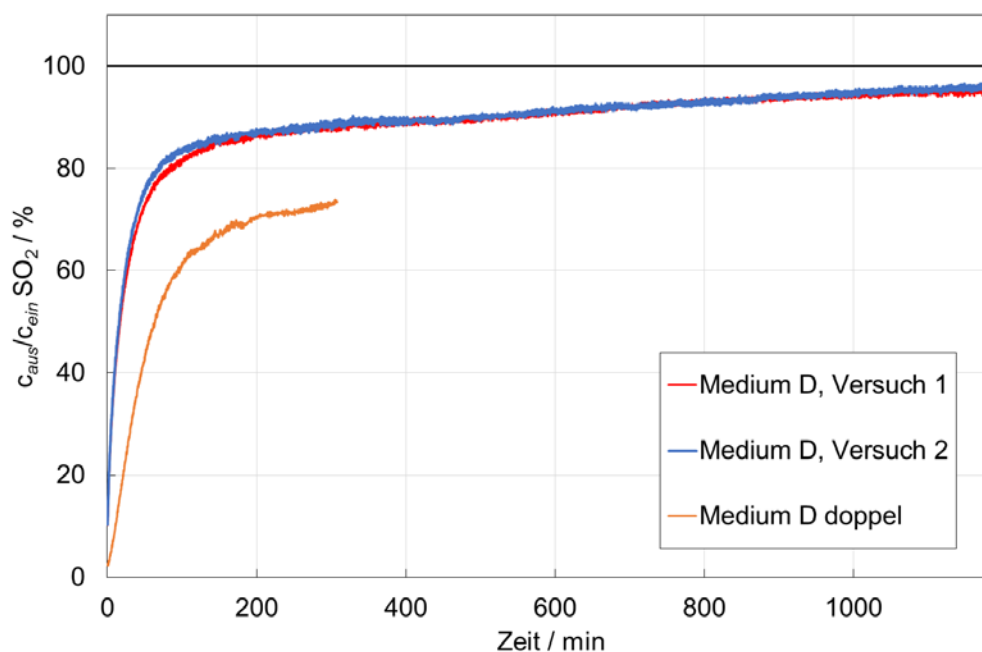


Abbildung 34: Durchbruchkurven SO_2 an chemisorptiven Medien des Herstellers D in einfacher und doppelter Lage (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm SO_2 , Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 20 cm/s)

Die Durchbruchkurven des SO_2 an dem Medium D als einfache Lage weisen einen Initialdurchbruch von ca. 10 % und einen steilen Anstieg bis zu einem Durchbruch von etwa 80 % auf. Hier zeigt sich eine Krümmung der Durchbruchkurve, wonach letztere mit einer deutlich geringeren Steigung verläuft. Die Durchbruchkurve an dem zweilagigen Medium weist qualitativ bzw. in ihrer Form einen ähnlichen Verlauf wie diejenige am einlagigen Medium auf. Sowohl der Initialdurchbruch als auch die Steigung der Durchbruchkurve sind jedoch erwartungsgemäß kleiner als an dem einlagigen Medium. Die Krümmung, nach der die Steigung der Durchbruchkurvensteigung deutlich abnimmt, liegt in Relation zu dem einlagigen Medium bei einem niedrigeren Durchbruch von etwa 65 %.

Die für die Abscheidung von SO_2 an Aktivkohle verantwortlichen Adsorptions- und Reaktionsmechanismen können vielfältig sein und von der Art der Aktivierung, des Imprägniermittels oder von infiltrierten Substanzen im Porensystem der Aktivkohle abhängen. Eine allgemeine Übersicht kann der Dissertation von ZHANG [2009] entnommen werden. Zudem spielt die Anwesenheit von Wasser eine signifikante Rolle bei der Sorption und Reaktion von SO_2 an Adsorbentien. Dieser Aspekt wird in dem Abschnitt 2.3 (Einfluss der relativen Feuchte) betrachtet.

2.2.2.4 Ammoniak

In der folgenden Abbildung 35 werden die Durchbruchkurven von Ammoniak (NH_3) an chemisorptiven Aktivkohlemedien D und dem Ionentauschermedien J miteinander verglichen. Die Versuche wurden unter Standardbedingungen und 9 ppm NH_3 durchgeführt. Zunächst wird aus der Abbildung 35 deutlich, dass in den Versuchen an Aktivkohlemedien eine bessere Reproduzierbarkeit erreicht werden konnte. Die schlechtere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit Ionentauschermedien kann auf die inhomogene Verteilung des Ionentauschers innerhalb des Mediums sowie eine nicht ausreichende Fixierung der Sorbenskörner auf dem Trägervlies zurückgeführt werden. Folglich kam es beim Zuschneiden der Medienronden zum Lösen einiger Körner kommen, was sich in Durchbruchversuchen aufgrund unterschiedlicher Sorbensmengen und -verteilungen in signifikanten Unterschieden der Abscheideleistung äußert.

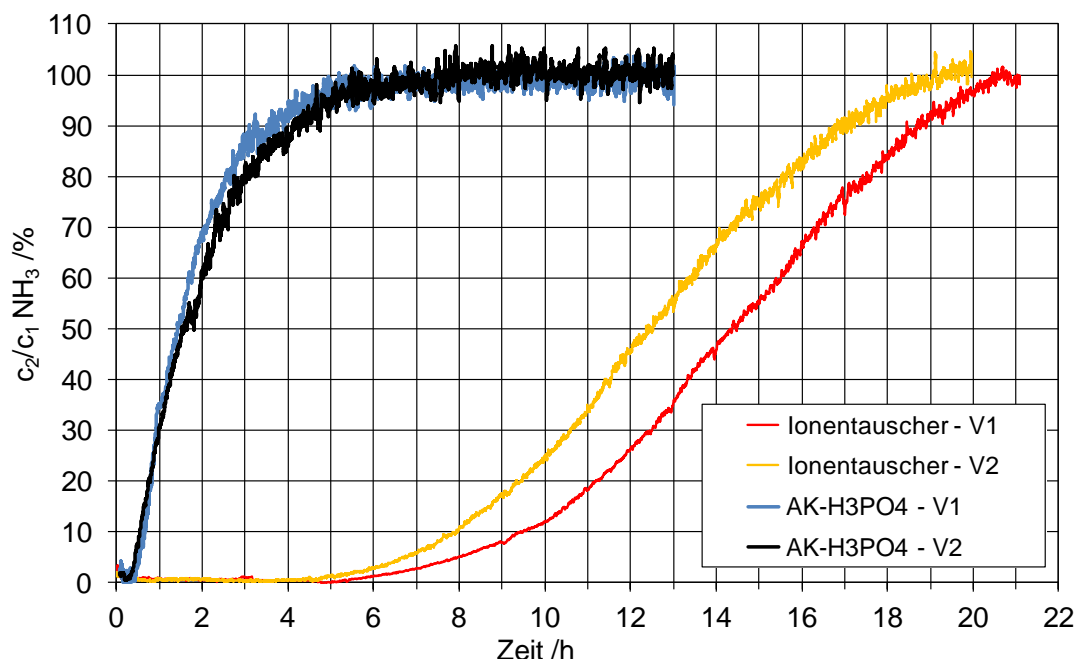


Abbildung 35: Durchbruchkurven NH_3 an chemisorptiven Aktivkohlemedien des Herstellers D und Ionentauschermedien J (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NH_3 , Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 16 cm/s)

Der Vergleich der Durchbruchkurven von Ammoniak an Aktivkohle- und Ionentauschermedien (Abbildung 35) macht deutlich, dass letztere unter den gleichen Versuchsbedingungen nach DIN EN ISO 10121 ein besseres Sorptionsverhalten zeigen. Während es an den untersuchten

Aktivkohlemedien bereits nach einer halben Stunde zu einem Anstieg der Ammoniakkonzentration auf der Reingasseite kommt, wird das Ammoniak durch das Ionenaustauschermedium in den ersten fünf Stunden vollständig abgeschieden. Sowohl bei der Abscheidung von NH_3 auf aktivkohlebasierten Adsorbentien als auch auf Ionenaustauschern kommt der Koadsorption von Wasser eine wichtige Bedeutung zu, was in dem Abschnitt 2.3 (Einfluss der relativen Feuchte) detaillierter diskutiert wird.

2.2.2.5 Stickstoffdioxid

In Abbildung 36 sind zunächst die NO_x -Konzentrationsverläufe auf der Roh- und Reingasseite aus Versuchen an imprägnierten Aktivkohlemedien des Herstellers D dargestellt. Die Experimente wurden mit einer Rohgaskonzentration von 9 ppm NO_2 unter Standardbedingungen (23 °C und 50 % rel. Feuchte) sowie einer Anströmgeschwindigkeit von 20 cm/s durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse wurden an dem Medium D als einfache Lage, in welcher das Material zur Verfügung gestellt wurde, ermittelt. Zur Prüfung der Übertragbarkeit der NO_x -Abscheidung an Medien und Filtern wurde zudem das Medium in doppelter Ausführung untersucht. Die Ergebnisse der letzteren Versuche werden in Abschnitt 2.2.5.5 betrachtet.

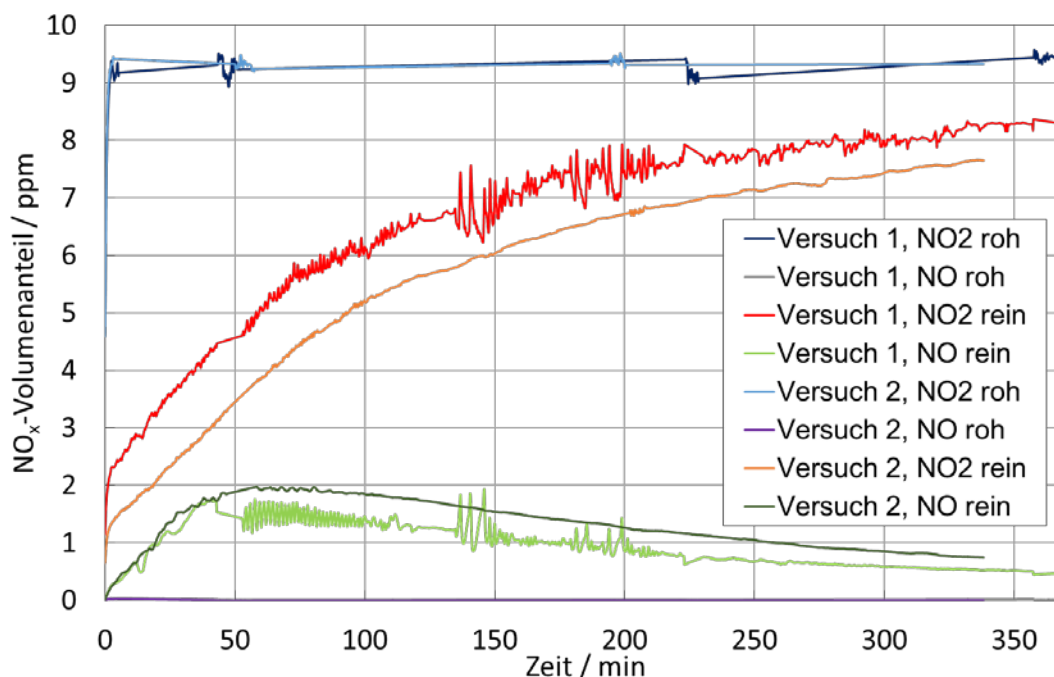


Abbildung 36: NO_x -Konzentrationsverläufe im Roh- und Reingas bei Experimenten an Medien D (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NO_2 , Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 20 cm/s)

Die Ergebnisse in Abbildung 36 zeigen eine Umsetzung eines Teils des NO_2 zu NO an der Aktivkohleoberfläche. Bis zu einer Versuchszeit von etwa 60 Minuten, nimmt neben der NO_2 -Konzentration im Reingas auch die Konzentration des NO zu. Nach 60 Minuten liegt ein Maximum der NO-Konzentration vor, woraufhin die NO-Reingaskonzentration mit zunehmender Versuchsdauer sinkt. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die für die Umsetzung bzw. Dissoziation verantwortlichen Bestandteile der Aktivkohleoberfläche abgebaut werden oder aufgrund höherer Beladung nicht mehr zugänglich sind. Das beschriebene Verhalten der

Adsorption und Umsetzung von NO_2 zu NO wurde auch in vorangegangenen Arbeiten beobachtet [Sager et al., 2009]. Die dafür verantwortlichen Mechanismen können vielfältiger Natur sein. Eine Übersicht der möglichen physi- und chemisorptiven sowie der katalytischen Prozesse kann der Dissertation von BUSCH [2014] entnommen werden.

Der Vergleich der NO_x -Konzentrationsverläufe der beiden durchgeführten Versuche (Abbildung 36) zeigt eine quantitative Abweichung der reingasseitigen NO_x -Konzentrationsverläufe zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch auf. Diese Differenz kann zum einen auf herstellungsspezifische Inhomogenitäten der Medien zurückgeführt werden. Zum anderen lässt sich die Abweichung durch geringfügige Unterschiede der Versuchsbedingungen wie Temperatur und relative Feuchte erklären. Eine stärkere Feuchteschwankung in Versuch 1 als in Versuch 2, welche jedoch noch innerhalb der normativen Vorgaben lag, äußerte sich in Fluktuationen der NO - und NO_2 -Konzentrationen im Reingas.

Im Vergleich zu den oben diskutierten Ergebnissen am Medium D sind in der folgenden Abbildung 37 die roh- und reingasseitigen NO_x -Konzentrationsverläufe aus Versuchen an Aktivkohlemedien des Herstellers E, welche keine Imprägnierung aufweisen, dargestellt. Die Versuche erfolgten bei einer Rohgaskonzentration c_{ein} von 9 ppm NO_2 , bei Standardbedingungen und einer Anströmgeschwindigkeit von 15 cm/s. Die Medien des Herstellers E verfügen über einen hohen Lückengrad bei einer geringen Mediendicke sowie eine geringe Aktivkohlegrammatur. Dieser Sachverhalt äußert sich in dem stark ausgeprägten Initialdurchbruch von etwa 50 % sowie einem relativ schnellen Durchbruch von 95 %. Des Weiteren findet auf dem Medium E eine im Vergleich zu dem Medium D (Abbildung 36) geringere Umsetzung des NO_2 zu NO statt, was aus der geringen NO -Konzentration über der Versuchszeit ($< 0,5$ ppm NO) abgeleitet werden kann.

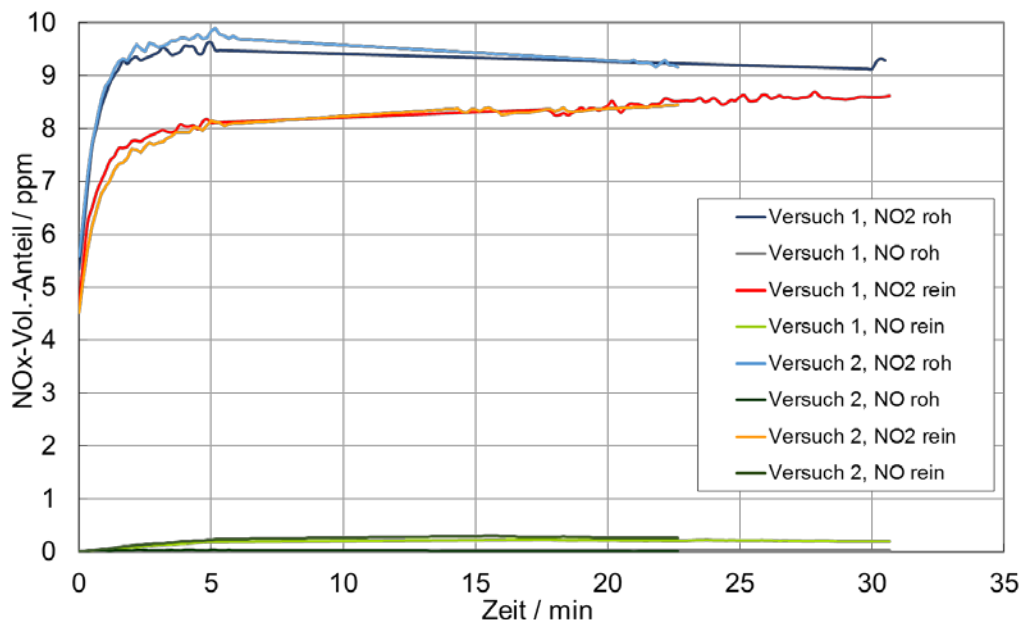


Abbildung 37: NO_x -Konzentrationsverläufe im Roh- und Reingas an Medium E (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NO_2 , Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 20 cm/s)

Die Abbildung 38 zeigt NO_x -Konzentrationsverläufe aus Versuchen an Aktivkohleschüttungen des Herstellers F, wobei die pelletförmige Aktivkohle zuvor aus Kartuschenfiltern herauspräpariert wurde. Die Durchführung der Experimente erfolgte in Analogie zu den oben

dargestellten Ergebnissen mit 9 ppm NO₂ und bei Standardbedingungen jedoch mit einer Anströmgeschwindigkeit von 32 cm/s an einer Schüttung mit einer Höhe von etwa 30 mm.

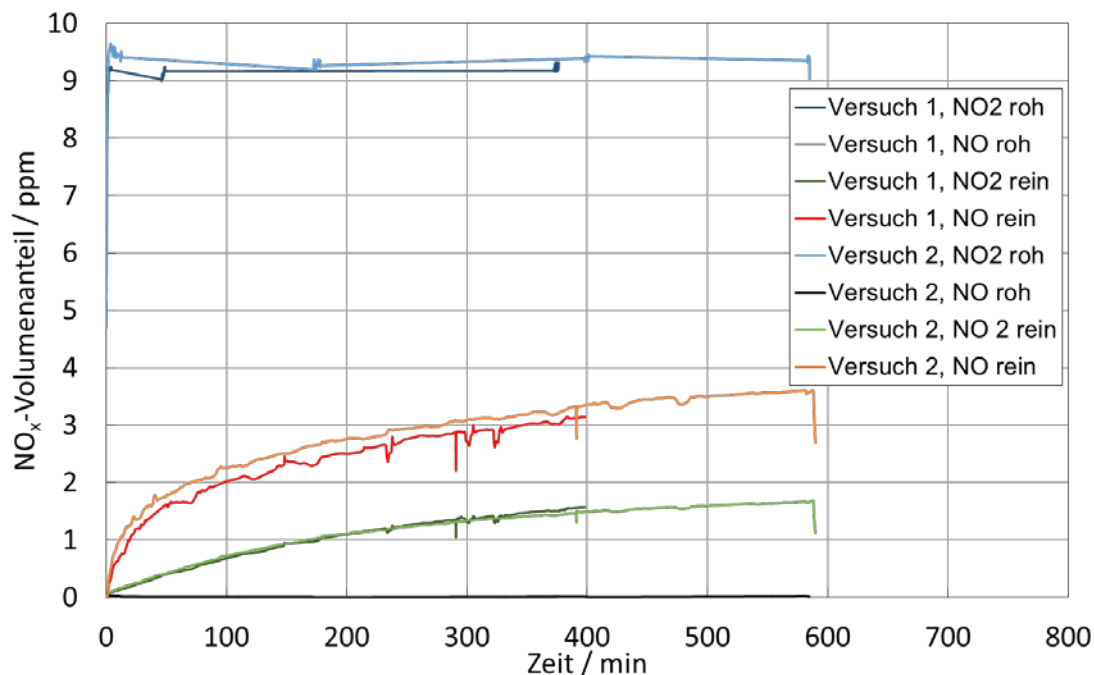


Abbildung 38: NO_x-Konzentrationsverläufe im Roh- und Reingas bei Experimenten an Aktivkohleschüttungen F (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NO₂, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 32 cm/s)

Die NO_x-Konzentrationsverläufe an den Schüttungen des Herstellers F in Abbildung 38 illustrieren äquivalent zu den bereits oben diskutierten Ergebnissen mit NO₂ eine partielle Umsetzung des NO₂ zu NO. Letztere ist an der hier betrachteten Schüttung des Herstellers F stärker ausgeprägt als an den dünnen Medien des Herstellers E. Zurückzuführen ist dies im Wesentlichen auf eine deutlich höhere Aktivkohlemasse der Schüttung in Relation zum dünnen Medium E mit hohem Lückengrad. Aufgrund der um ein Vielfaches größeren Adsorbensbettdicke im Vergleich zu den Medien D und E ist kein Initialbruch detektiert worden. Zudem ist davon auszugehen, dass die in den jeweiligen Medien verwendeten Aktivkohlen sowie deren jeweilige Ausrüstungen (Aktivierung, Imprägnierung oder Infiltration) verschieden sind, was sich entsprechend in der unterschiedlichen Quantität des katalytisch umgesetzten NO₂ zu NO äußert. Der Abbildung 38 ist ferner zu entnehmen, dass die reingasseitige NO-Konzentration innerhalb des Versuchszeitraums an der Aktivkohleschüttung F kein Maximum aufweist, auf welches eine Abnahme der NO-Konzentration folgt, wie dies deutlich am Medium D vorliegt (Abbildung 36) und sich auch am Medium E andeutet (Abbildung 37, bei etwa 15 Minuten). Da die Aktivkohlemenge innerhalb der untersuchten Schüttung des Herstellers F groß im Vergleich zu den Flachfiltermedien ist, würde das beschriebene Maximum der NO-Konzentration im Reingas möglicherweise nach einer längeren Versuchszeit auftreten, welche jedoch zur Zeit der Versuchsdurchführung aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten nicht realisiert werden konnte (Versuche über Nacht mit NO_x nicht möglich).

Neben experimentellen Untersuchungen an Aktivkohlemedien wurde ein Einzelversuch zur Adsorption von NO₂ an einer dünnen Schüttung (3 mm) eines pulverförmigen synthetischen Adsorbens durchgeführt. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung 39 zu sehen.

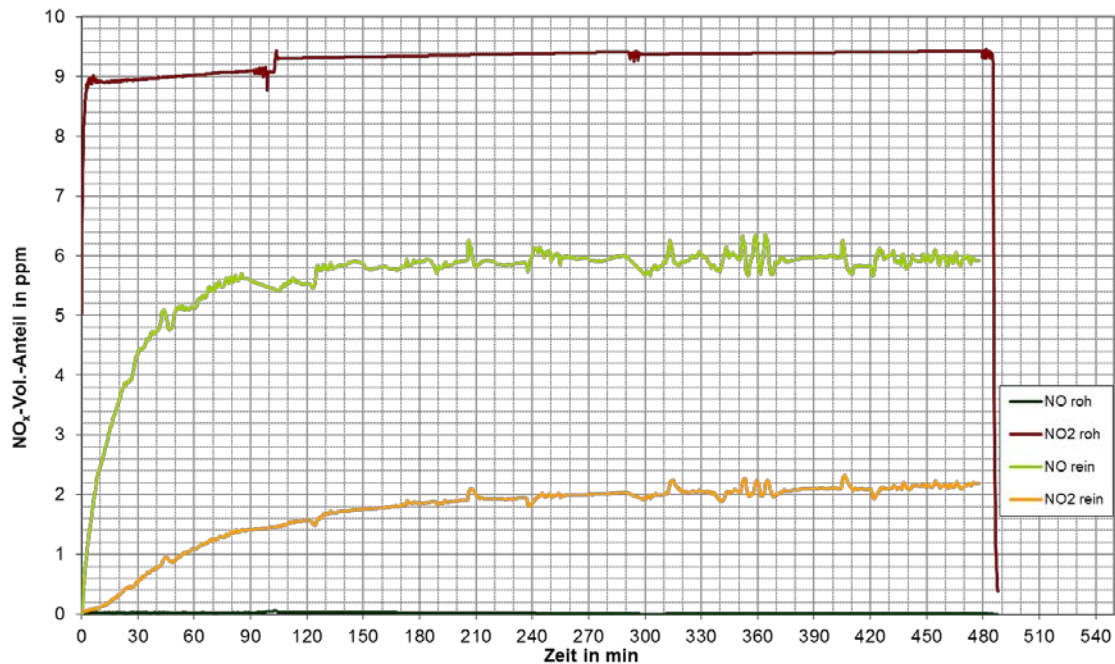


Abbildung 39: NO_x-Konzentrationsverläufe im Roh- und Reingas bei einem Experiment an einer Schüttung eines synthetischen Adsorbens des Herstellers G (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NO₂, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Die Konzentrationsverläufe von NO und NO₂ auf der Reingasseite aus Adsorptionsversuchen mit 9 ppm NO₂ an dem synthetischen Adsorbens des Herstellers G (Abbildung 39) verdeutlichen ein von der Adsorption und Katalyse des NO₂ an aktivkohlebasierten Adsorbentien differierendes Verhalten. Zum einen wird durch das synthetische Adsorbens eine deutlich größere Menge des NO₂ zu NO umgesetzt als auf der Aktivkohle. Dies resultiert in einer reingasseitigen NO-Konzentration, welche während des gesamten Versuches höher ist als die NO₂-Konzentration im Reingas. Bei der Adsorption von NO₂ an Aktivkohle wurde das Gegenteil beobachtet (Abbildung 36 bis Abbildung 38), die reingasseitige NO-Konzentration war jeweils geringer als die des NO₂. Zum anderen zeigen die reingasseitigen NO_x-Konzentrationsverläufe eine abnehmende Steigung über der Versuchszeit bis die Konzentrationsverläufe nach einer Versuchszeit von etwa 200 Minuten annähernd konstant bleiben. Dieses Verhalten suggeriert eine katalytische Umsetzung des NO₂ zu NO, wobei der Katalysator infolge der Reaktion nicht verändert wird. Folglich resultiert vermutlich ein Gleichgewichtszustand, in welchem pro Zeiteinheit eine konstante Menge NO₂ adsorbiert, zu NO umgesetzt wird und das NO anschließend desorbiert.

Da nicht nur das NO₂ sondern auch NO im Reingas bei einer raumluftechnischen Anwendung nicht erwünscht ist, wurde von dem Hersteller G der Versuch unternommen, ein synthetisches Adsorbens durch eine darauf aufgebrauchte Substanz so zu modifizieren, dass das entstehende NO mit Hilfe von Wasser abgeschieden werden kann. Die an dem modifizierten synthetischen Adsorbens ermittelten Ergebnisse der NO₂-Adsorption sind in der folgenden Abbildung 40 zu sehen.

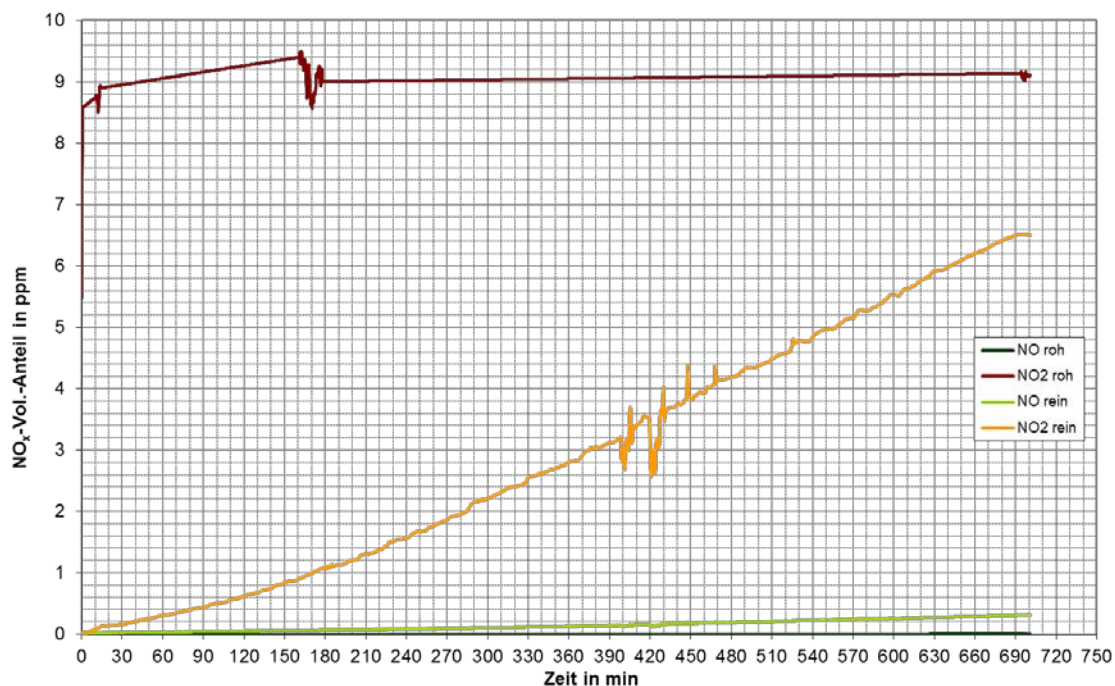


Abbildung 40: NO_x-Konzentrationsverläufe im Roh- und Reingas bei einem Experiment an einer Schüttung eines synthetischen Adsorbens des Herstellers G mit Modifikation (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm NO₂, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s

Anhand der reingasseitigen NO_x-Konzentrationsverläufe in Abbildung 40 ist zu erkennen, dass die aus der Schüttung freigesetzte Menge an NO gering ist. Die Konzentration des NO₂ steigt jedoch annähernd linear mit der Versuchszeit an.

2.2.2.6 Ozon

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Adsorptionsversuche an Medien des Herstellers B aufgeführt. Die Versuche erfolgten dreifach. Aus den in Abbildung 41 dargestellten Durchbruchkurven des Ozons bei 9 ppm und 0,9 ppm Rohgaskonzentration, bei Standardbedingungen sowie einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s ist zunächst zu erkennen, dass die Durchbruchkurven qualitativ ähnliche Verläufe aufweisen. Bei der Wahl einer höheren Konzentration ist der Durchbruch jedoch größer. Die Durchbruchkurven bei beiden untersuchten Ozonkonzentrationen zeigen zunächst einen kurzen steilen Anstieg und einen anschließenden flachen Verlauf mit geringer Steigung nach jeweils etwa 50 Minuten. Der Bereich einer flacheren Steigung kann ein Indiz für eine katalytische Umsetzung oder eine chemische Reaktion des Ozons auf der Aktivkohle sein. Dabei kann das Ozon mit dem adsorbierten Wasser reagieren. Die detailliertere Betrachtung der Reaktion des Ozons mit Wasser erfolgt in Abschnitt 2.3 (Einfluss der relativen Feuchte). Die aus den Durchbruchkurven (Abbildung 41) berechneten abgeschiedenen Ozonmassen als Funktion der Zeit sind in Abbildung 42 zu sehen.

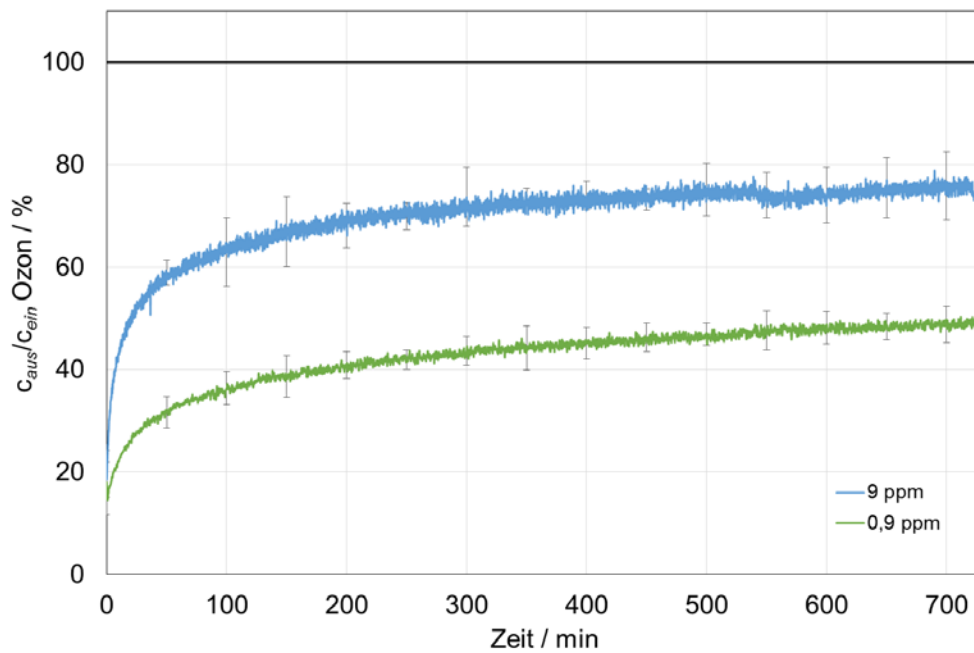


Abbildung 41: Durchbruchkurven Ozon an Medien B (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm und 0,9 ppm , Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

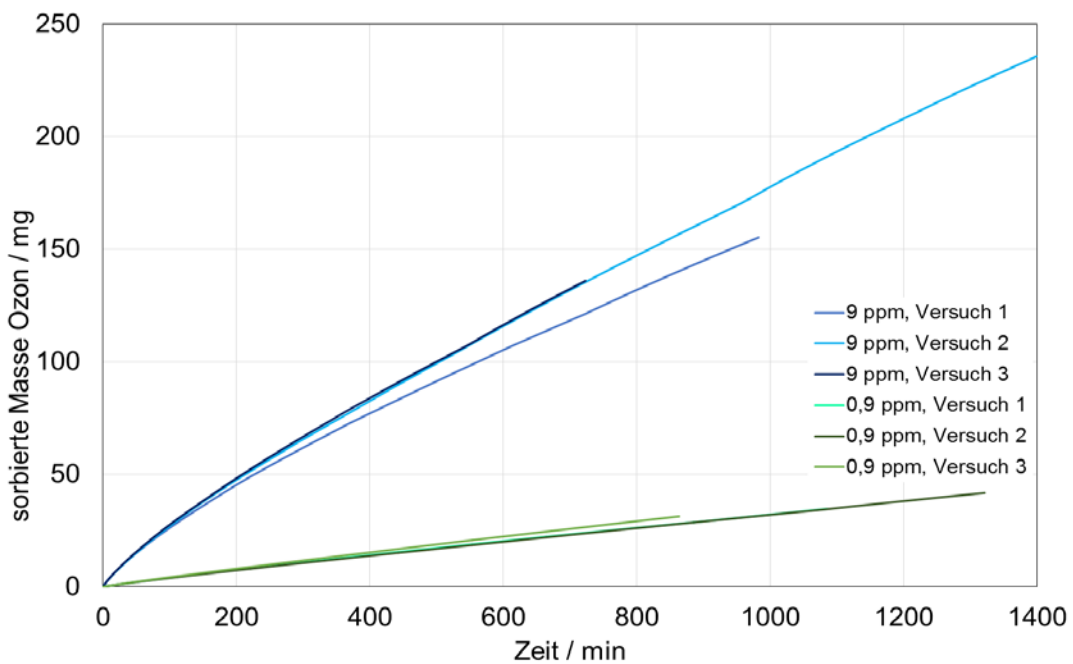


Abbildung 42: Massen des abgeschiedenen Ozons an adsorptiven Filtermedien B bei 9 ppm und 0,9 ppm, Standardbedingungen und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s)

Es zeigt sich zum einen eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse. Zum anderen ist zu erkennen, dass bei einer höheren Ozonkonzentration erwartungsgemäß eine größere Ozonmasse abgeschieden wird. Bei der Verzehnfachung der Ozonkonzentration von 0,9 auf 9 ppm wird die Kapazität etwa um den Faktor 5 erhöht.

Neben den hier dargestellten Ergebnissen aus Ozonversuchen am Medium B wurden zur Vergleichbarkeit der Ozonabscheidung an Medien und Filtern die Flachfiltermedien zweier weiterer Hersteller (E und H) sowie eine Aktivkohleschüttung des Herstellers F untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in Abschnitt 2.2.5.6 mit den an Filtern generierten experimentellen Daten verglichen.

2.2.3 Versuche an adsorptiven Filterelementen

Zur Validierung der Vergleichbarkeit adsorptiver Leistungsdaten, welche an Medien und plissierten Filterelementen ermittelt wurden, erfolgten folgende Untersuchungen:

- Vergleich der Ergebnisse aus Versuchen mit n-Butan an Kfz-Filtermedien und -Filtern,
- Vergleich der Ergebnisse aus Versuchen mit Toluol an Kfz-Filtermedien und -Filtern,
- Vergleich der Ergebnisse aus Versuchen mit Toluol an RLT-Filtermedien und Filterelementen.

Die Wahl von Kfz-Filtern und -Medien für die in diesem Arbeitsschritt durchgeführten Versuche wurde aus verschiedenen Gründen getroffen. Da eine Untersuchung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Filter und Medien beabsichtigt war, wurden mehrere Filterelemente benötigt. Diejenigen Hersteller von RLT-Filtern, welche die Materialien zur Verfügung stellten, konnten nur eine limitierte Anzahl an Filtern und Medien aus derselben Charge liefern. Die erhaltenen konfektionierten Filter wurden überwiegend für den folgenden Arbeitsschritt (Abschnitt 2.2.4: Versuche an adsorptiven konfektionierten Filtern) gebraucht. Lediglich vom Hersteller C wurden genügend Filter zur Verfügung gestellt, um aus einem konfektionierten Filter Elemente herauspräparieren zu können. Da eine Bewertung des Einflusses einer Plissierung auf das Adsorptionsverhalten auch an Kfz-Filtern und -Medien möglich ist, wurden letztere als zusätzliche Alternative gewählt.

2.2.3.1 n-Butan

In der folgenden Abbildung 43 sind Durchbruchskurven von n-Butan an adsorptiven Kfz-Innenraumfiltern und -Medien der Hersteller K und L miteinander verglichen. Die Versuche wurden jeweils dreifach mit 9 ppm n-Butan, bei Standardbedingungen sowie bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s durchgeführt.

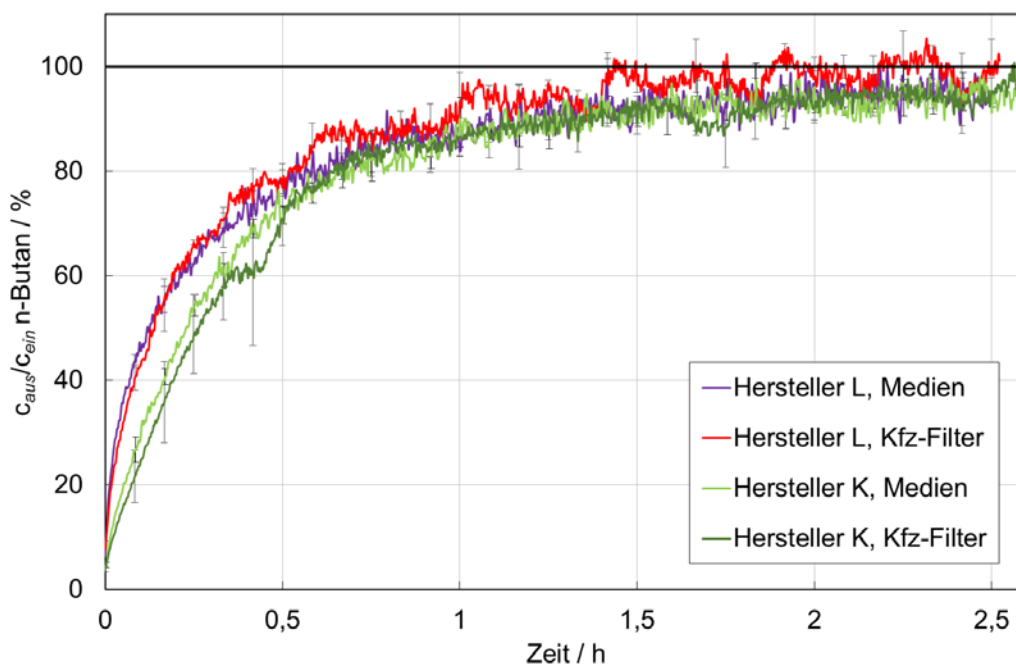


Abbildung 43: Durchbruchkurven von n-Butan an Kfz-Innenraumfiltern und daraus präparierten Medien der Hersteller K und L (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm n-Butan, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Der Abbildung 43 ist zu entnehmen, dass die an Kfz-Innenraumfiltern ermittelten Durchbruchkurven von n-Butan jeweils mit den an Medien gemessenen vergleichbar sind. Diese Übereinstimmung ist sowohl im Initialdurchbruch als auch im weiteren Verlauf der Durchbruchkurven gegeben.

2.2.3.2 Toluol

Die an RLT-Filtermedien und den daraus gefertigten Filterelementen (gleiche Charge) ermittelten Durchbruchkurven sind in der Abbildung 44 miteinander verglichen. Durchgeführt wurden die Versuche bei Standardbedingungen, 9 ppm Toluol und einer Anströmgeschwindigkeit von 18 cm/s. Die dargestellten Durchbruchkurven an RLT-Medien und den daraus gefertigten Filterelementen zeigen eine gute Vergleichbarkeit. Sowohl die Initialdurchbrüche an Medien und Filterelementen als auch die Verläufe der Durchbruchkurven stimmen weitestgehend überein. Eine Abweichung der Durchbruchkurven an Medien und Filterelementen ist ab einem Durchbruch von etwa 80 % als nennenswert zu bezeichnen. Die an Filterelementen ermittelten Durchbruchkurven verlaufen ab einem Durchbruch von 80 % etwas flacher als die an Filtermedien gemessenen. Die Gleichgewichtseinstellung an Medien erfolgt somit schneller als an Filterelementen.

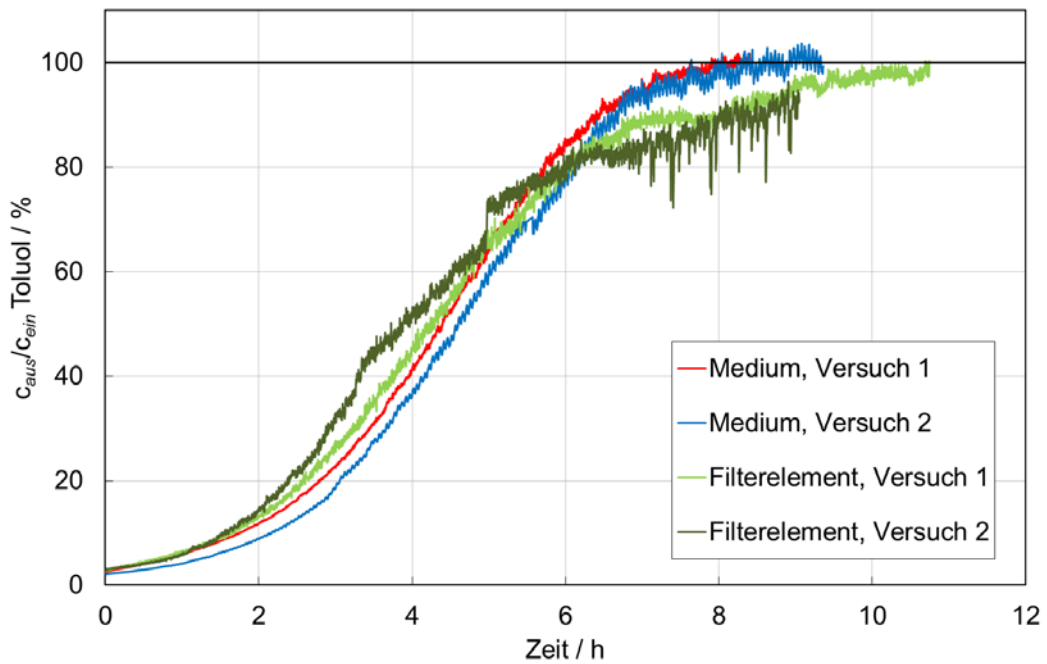


Abbildung 44: Durchbruchkurven von Toluol an Filterelementen und daraus präparierten Medien des Herstellers C (Versuchsparameter: Sollkonzentration 9 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 18 cm/s)

Abbildung 45 zeigt den Vergleich von Durchbruchkurven, die an Kfz-Innenraumfiltern der Hersteller Y und Z sowie an daraus präparierten Filterelementen mit 90 ppm Toluol, bei Standardbedingungen und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s experimentell ermittelt wurden.

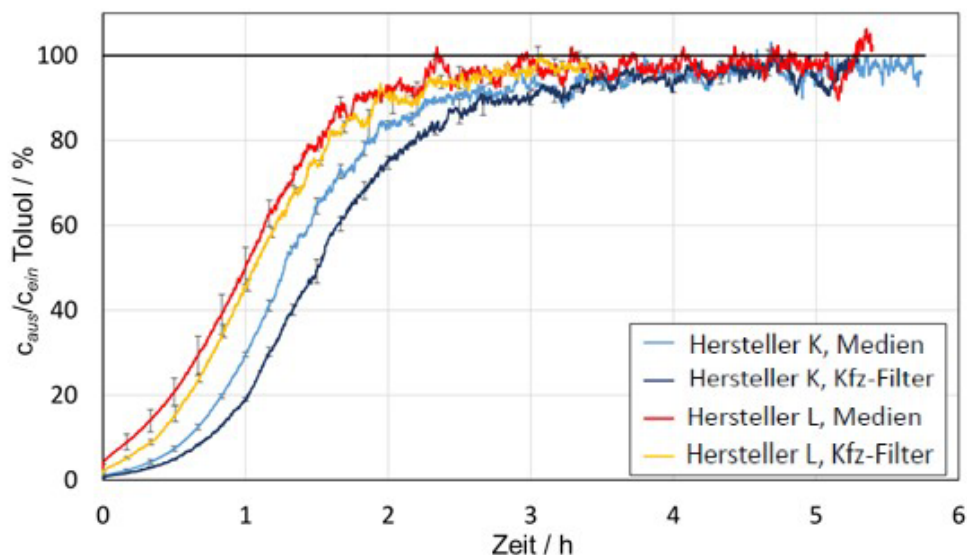


Abbildung 45: Durchbruchkurven von Toluol an Kfz-Innenraumfiltern und daraus präparierten Medien der Hersteller K und L (Versuchsparameter: Sollkonzentration 90 ppm Toluol, Standardbedingungen, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Ein Vergleich der Durchbruchkurven an Medien und Filtern des Herstellers L veranschaulicht ein nahezu identisches Abscheideverhalten von 90 ppm Toluol durch Filter und Medien. Die Durchbruchkurven an Medien und Filtern des zweiten Herstellers (Hersteller K) zeigen eine gute Übereinstimmung bezüglich der Initialdurchbrüche. Bei Betrachtung der Durchbruchkurvenverläufe wird jedoch deutlich, dass eine geringfügig bessere Abscheidung des Toluols an Filtern als an Medien erfolgt. Dies ist sicherlich teilweise der Tatsache geschuldet, dass die Medien des Herstellers K beim Glätten der plissierten Struktur im Rahmen der Medienpräparation an einigen Stellen beschädigt wurden. Bei der Präparation der Medien aus Filtern des Herstellers L war dies nicht gegeben. So hat sich beim Glätten der Kanten der Filter des Herstellers K ein Teil der Aktivkohle gelöst, was in der folgenden Abbildung 46 (fotographische Abbildung der Schadstelle in der Aktivkohleschüttung an der Kante) erkennbar wird.

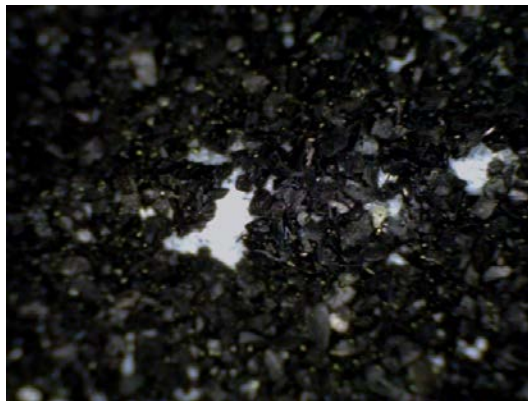


Abbildung 46: Schadstelle in der Aktivkohleschüttung nach dem Glätten der plissierten Struktur eines Kfz-Innenraumfilters des Herstellers K

2.2.4 Versuche an konfektionierten Raumlufffiltern

Die Versuche zur Adsorption von n-Butan, Toluol, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Ammoniak und Ozon an konfektionierten Filtern wurden an dem in Abschnitt 2.1.2.2 beschriebenen Prüfstand für Raumlufffilter durchgeführt. Bis auf eine Ausnahme wurden kommerziell verfügbare RLT-Filter der Bauformen Panel-Filter, V-Zellen, Kartuschenfilter und Taschenfilter (siehe Abbildung 47) untersucht. Am häufigsten werden RLT-Filter der Bauform V-Zelle angeboten. In der Regel handelt es sich bei adsorptiven RLT-Filtern um reine Adsorptionsfilter, die in der Lüftungsanlage in Strömungsrichtung hinter Partikelfiltern eingesetzt werden. Bei den untersuchten RLT-Filtern handelte es sich nur bei dem Taschenfilter um einen Kombinationsfilter zur Partikel- und Gasabscheidung. Für die gezielte Abscheidung bestimmter Stoffe oder Stoffgruppen werden adsorptive RLT-Filter mit spezifischen Sorbentien, z. B. mit Kaliumjodid imprägnierte Aktivkohle zur Abscheidung saurer Gase wie SO_2 , ausgestattet. Soweit möglich, wurden Filter mit spezifischen Sorbentien für die Tests mit den verschiedenen Substanzen verwendet.

Es wurden insgesamt 15 verschiedene Filtertypen der unterschiedlichen Bauformen getestet, wobei die einzelnen Filtertypen in der Mehrheit der Fälle mit mehreren Substanzen geprüft wurden. Der überwiegende Anteil der Filter wurde als Sachleistung von den interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Die Filter werden in diesem Bericht mit einem Buchstaben für die Bauform (P für Panel-Filter, V für V-Zelle, T für Taschenfilter und K für Kartuschenfilter) und einer laufenden Nummer

bezeichnet. Filter mit gleicher Bauform und gleichem Medium, aber unterschiedlicher verbauter Medienfläche und unterschiedlichen Abmessungen, erhalten zur weiteren Unterscheidung eine mit einem Bindestrich angefügte Ziffer für die Ausführungsart.

Die Versuche wurden bei 23 °C und 50 % relativer Feuchte durchgeführt. Der Testvolumenanteil der Versuche mit n-Butan, Toluol, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Ammoniak betrug 9 ppm und der mit Ozon 0,9 ppm. Die kommerziell erhältlichen Filter wurden mit dem Nennvolumenstrom getestet.

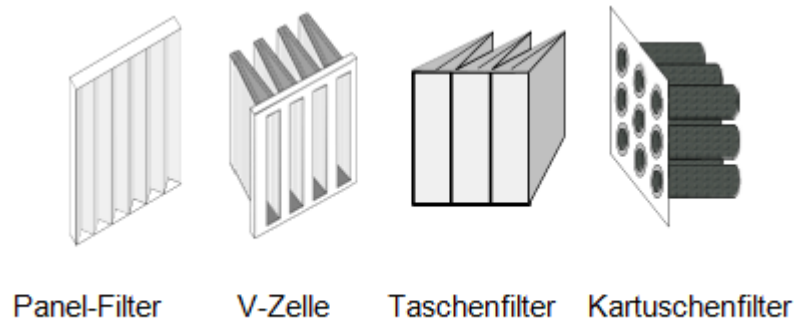


Abbildung 47: Bauformen von RLT-Filtern

2.2.4.1 n-Butan

Die Testsubstanz n-Butan hat zwar wenig Relevanz im Hinblick auf Innenraumbelastungen, wird aber häufig für Filtertests zur Charakterisierung der Kapazität für organische Stoffe verwendet, weil die versuchstechnische Handhabbarkeit insbesondere im Hinblick auf die Durchbruchzeiten günstig ist. Im beschriebenen Forschungsvorhaben wurden drei verschiedene V-Zellen mit n-Butan getestet. Bei den Sorbentien der Filter handelt es sich um Aktivkohle ohne zusätzliche Imprägnierungen oder Modifikationen (im Folgenden vereinfachend als „herkömmliche Aktivkohle“ bezeichnet). In den V-Zellen V1-1 und V1-2 ist das gleiche Flachfiltermedium B verbaut, die Medienfläche von V1-2 ist aber ungefähr 50 % und die Einbautiefe ca. 40 % größer als bei V1-1. Da sowohl von V1-1 als auch von V1-2 der Nennvolumenstrom mit 3400 m³/h angegeben ist, ist die mittlere Anströmgeschwindigkeit des Mediums im Filter V1-2 entsprechend geringer. Die V-Zelle V2 ist mit dem Medium B2 ausgestattet, das gegenüber dem Medium B der V-Zellen V1 eine 60 % größere Aktivkohleflächenaufgabe besitzt. Bei dem Filter V2 handelt es sich um einen Prototyp im verkleinerten Maßstab, dessen Einbauquerschnitt $\frac{3}{4}$ des Querschnittes der V-Zellen V1 ausmacht. Um eine zu den anderen beiden V-Zellen vergleichbare Anströmgeschwindigkeit im Anströmquerschnitt des Filters zu erhalten, wurde der Filter V2 mit einem Volumenstrom von 2550 m³/h getestet. Die ermittelten Durchbruchkurven sind in Abbildung 48 dargestellt. Bei den V-Zellen V1-1 und V1-2 sind die aus zwei Versuchen gemittelten Durchbruchkurven abgebildet. Die Abweichungen der einzelnen Durchbruchkurven vom Mittelwert betragen weniger als 2,5 %. Die Durchbruchkurve der V-Zelle V2 stammt aus einem Einzelversuch.

In Abbildung 48 ist erkennbar, dass die Zeit bis zum vollständigen Durchbruch von n-Butan selbst bei den Filtern mit größerer Medienfläche oder höherer Aktivkohleaufgabe unter drei Stunden beträgt. Der Filter V1-2 weist trotz der größeren Medienfläche und Sorbensmenge gegenüber Filter V1-1 ungefähr Initialdurchbruch und nur eine etwas flachere Durchbruchkurve auf. Der Initialdurchbruch bei Filter V2, mit der deutlich höheren Sorbensaufgabe, ist dagegen

um den Faktor drei geringer. Auch die Durchbruchswerte der V-Zelle V2 sind im relevanten Durchbruchsbereich, d. h. bis ca. 60 %, niedriger. An den Filtern V1-1, V1-2 und V2 stellten sich n-Butan-Gleichgewichtsbeladungen (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) von 0,5 %, 0,6 % und 1,7 % ein.

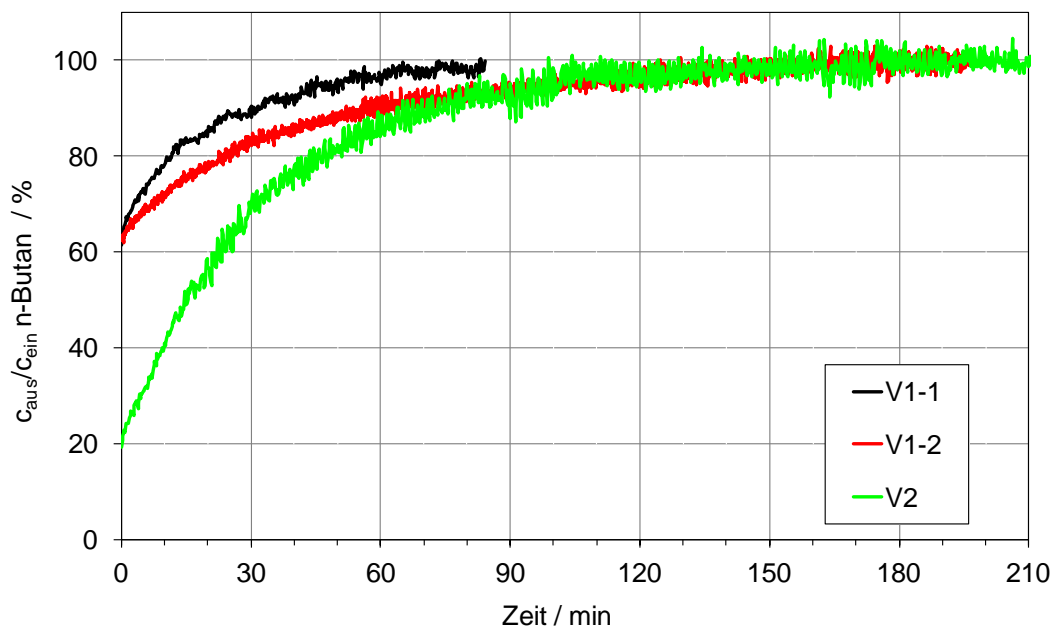


Abbildung 48: Durchbruchkurven von 9 ppm n-Butan durch drei verschiedene V-Zellen (23 °C, 50 % r. F., Anströmgeschwindigkeit im Filter-Einbauquerschnitt 0,94 m/s)

2.2.4.2 Toluol

Mit der Testsubstanz Toluol wurden ein Panel-Filter P1 und vier verschiedene V-Zellen V3 - V6 geprüft. Bis auf die V-Zelle V6 waren die Filter mit herkömmlicher, nicht imprägnierter Aktivkohle ausgestattet. V6 enthielt ein Mischadsorbens aus imprägnierter Aktivkohle und Ionentauscher. Der Nennvolumenstrom aller V-Zellen war 3400 m³/h, der des Panel-Filters 2000 m³/h. Die Medienflächen und die Aktivkohleauflagen der einzelnen Filter sind in Tabelle 4 bezogen auf die entsprechenden Werte des Panel-Filters dargestellt, um zu vermeiden, dass über Filtermedienfläche und Aktivkohleaufgabe Rückschlüsse auf den genauen Filtertyp gezogen werden können.

Tabelle 4: Verhältnis der Medienflächen der mit Toluol getesteten Filter

	P1	V3	V4	V5	V6
Medienfläche / Medienfläche P1	1	2,3	2,6	2,5	2,5
Aktivkohleaufgabe / Aktivkohleaufgabe P1	1	5	3	3,5	ca. 3,5

In Abbildung 49, in der die Toluol-Durchbruchkurven der verschiedenen Filter dargestellt sind, ist das Leistungsspektrum der verschiedenen Filter zu erkennen. Weiterhin kann daraus abgeleitet werden, dass neben der Medienfläche und der Aktivkohleaufgabe die Eigenschaften des Sorbens einen erheblichen Einfluss auf das unterschiedliche Durchbruchverhalten haben. So

ist z. B. der Durchbruch von Toluol durch Filter V4 deutlich geringer als der durch Filter V5, obwohl beide V-Zellen ähnliche Medienflächen und Aktivkohleauflagen besitzen.

Generell besitzen Aktivkohlefilter größere Adsorptionskapazitäten und dementsprechend längere Standzeiten gegenüber dem höhersiedenden Toluol als für das leichtersiedende n-Butan. Die Beladungen der mit herkömmlicher Aktivkohle ausgestatteten V-Zellen V3 bis V5 (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) zu den Zeitpunkten, bei denen jeweils ein Durchbruch von 60 % Toluol vorliegt, reichen von 12 % bis 18 %.

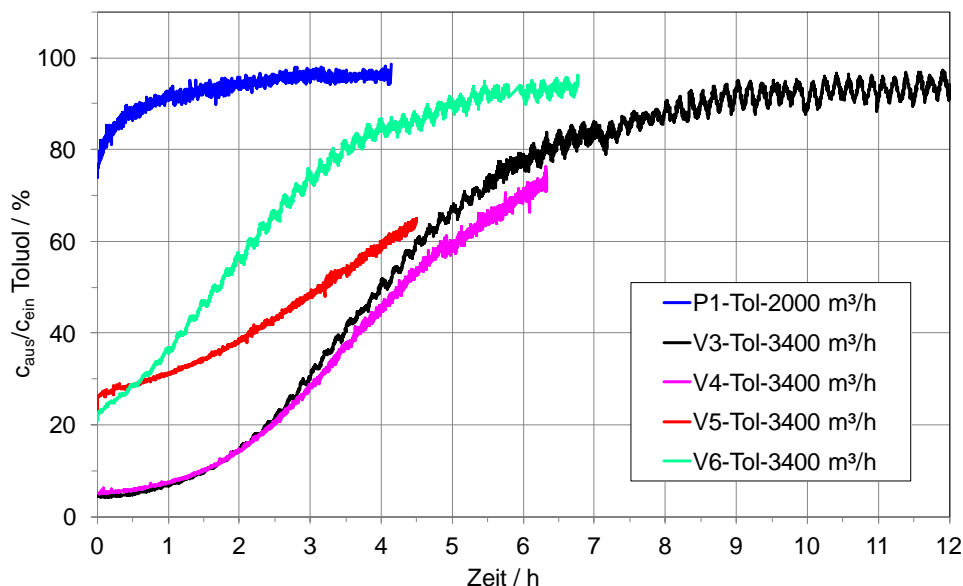


Abbildung 49: Durchbruchkurven von 9 ppm Toluol durch einen Panel-Filter und vier verschiedene V-Zellen (23 °C, 50 % r. F, Nennvolumenstrom)

2.2.4.3 Schwefeldioxid

Die Adsorption von Schwefeldioxid wurde an dem Taschenfilter T1, den V-Zellen V6 und V7 und dem Kartuschenfilter K1 geprüft. Die V-Zellen enthielten beide K_2CO_3 -imprägnierte, die anderen Filter herkömmliche Aktivkohle. Die V-Zelle V6 enthielt neben der Aktivkohle zusätzlich noch Ionentauscher als Sorbens. Der Nennvolumenstrom der V-Zellen und des Taschenfilters war $3400 \text{ m}^3/\text{h}$, der des Kartuschenfilters $800 \text{ m}^3/\text{h}$. Neben dem Testvolumenstrom ist bei der Beurteilung der in Abbildung 50 abgebildeten SO_2 -Durchbruchkurven (außer bei V7 aus zwei Versuchen gemittelte Kurven) der verschiedenen Filter zu berücksichtigen, dass die Aktivkohlemengen in den Filtern je nach Bauform erheblich voneinander abweichen. In den V-Zellen ist ca. achtmal und im Kartuschenfilter ca. 34mal so viel Aktivkohle wie in dem Taschenfilter enthalten.

Anders als bei n-Butan oder Toluol wird Schwefeldioxid nur zu einem geringen Anteil durch Physisorption abgeschieden. So ist auch der Verlauf der Durchbruchkurven von SO_2 anders als bei den organischen Stoffen. In praktikablen Versuchszeiten wird kein vollständiger Durchbruch erreicht. Die Durchbruchswerte steigen zunächst an und bleiben dann bis Versuchsende nahezu konstant auf einer Art Plateau. Erklärungsansätze für dieses Verhalten beschreiben z. B. ZHANG et al. [2006]. Zunächst physikalisch gebundenes SO_2 wird durch chemische Reaktionen insbesondere in Anwesenheit von Wasserdampf bzw. abgeschiedenem Wasser umgewandelt und angelagert. Dadurch wird das Sorptionspotenzial immer wieder erneuert und

die Annäherung der Durchbruchkurve an die Sättigungskonzentration erfolgt in einem sehr langen Prozess.

Bei Versuchsende wies das Sorbens des Taschenfilters eine Beladung von 2,5 % auf, bei den andern drei Filtern betrug die Beladung (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) nach ca. 3,5 h: V6 3 %, V7 5 % und K1 0,7 %.

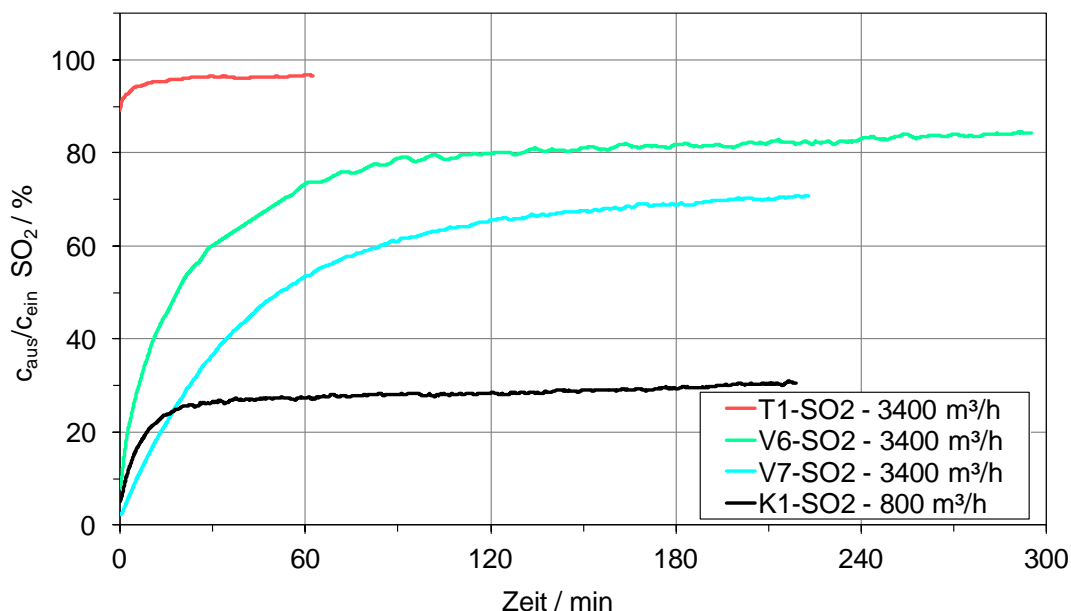


Abbildung 50: Durchbruchkurven von 9 ppm SO₂ durch einen Taschenfilter, zwei V-Zellen und einen Kartuschenfilter (23 °C, 50 % r. F, Nennvolumenstrom)

2.2.4.4 Ammoniak

Mit Ammoniak wurden Versuche an dem Taschenfilter T1 und den V-Zellen V6, V8 und V9 durchgeführt. Alle Filter enthielten ungefähr gleiche Medienflächen und hatten den gleichen Nennvolumenstrom von 3400 m³/h. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Sorbentien in den Filtern und das Verhältnis der Aktivkohlemengen (AK) in Bezug auf T1 und der Ionentauscher-Menge (IT) in Bezug auf V6.

Tabelle 5: Art und Menge der Sorbentien in den mit NH₃ getesteten Filtern

	T1	V6	V8	V9
Sorbens	AK	AK+K ₂ CO ₃ /		AK+H ₃ PO ₄
		IT	IT	
bezogene Sorbensmenge AK	1	7,5		7,5
		IT	2	

Die in Abbildung 51 dargestellten NH₃-Durchbruchkurven von T1, V6 und V8 stammen aus Einzelversuchen, die Durchbruchkurve von V9 wurde aus zwei Versuchen gemittelt. Die Durchbruchkurven der V-Zellen bis zu einer Versuchszeit von ca. 1 h wurden dadurch beeinflusst, dass nach der Probedosierung die Spülzeit des Systems zu gering war. Es kam

offensichtlich zur Verschleppung von Ammoniak in den Probenahmeleitungen oder den Messgeräten. Der schnelle Durchbruch von NH_3 durch den Taschenfilter ist plausibel aufgrund der Tatsache, dass der Taschenfilter T1 wenig Aktivkohle enthält und die Adsorptionskapazität von herkömmlicher Aktivkohle gegenüber Ammoniak gering ist. Bei einem Durchbruch von 50 % des Ammoniaks wies die imprägnierte Aktivkohle der V-Zelle V9 eine Beladung (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) von 2,5 % auf.

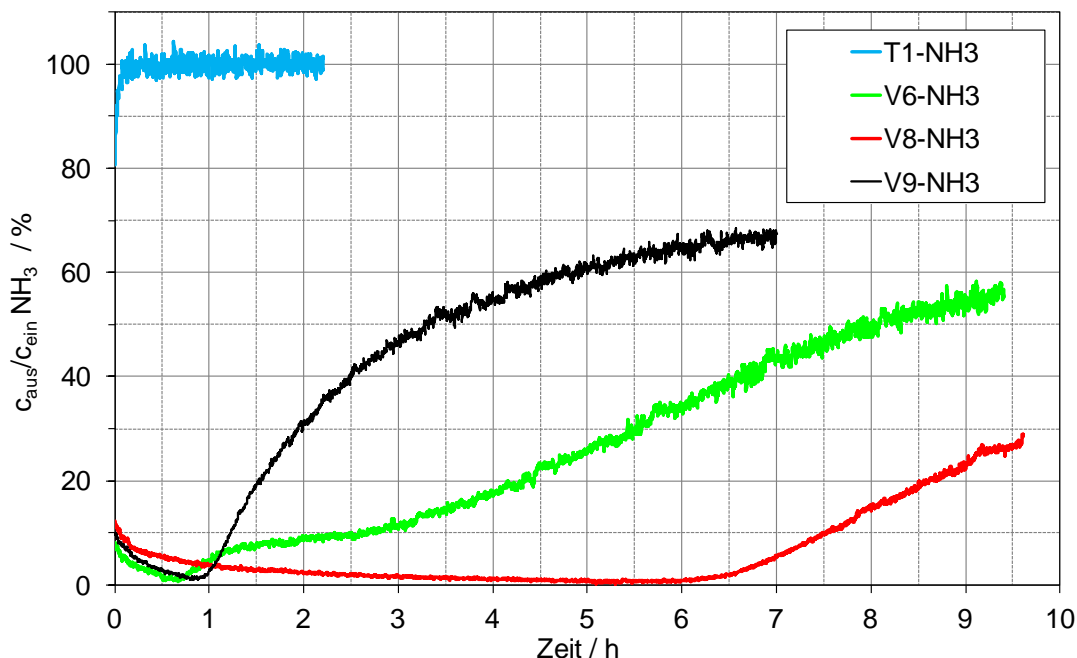


Abbildung 51: Durchbruchkurven von 9 ppm NH_3 durch einen Taschenfilter und vier verschiedene V-Zellen (23 °C, 50 % r. F, Testvolumenstrom 3400 m³/h)

2.2.4.5 Stickstoffdioxid

Bei Versuchen mit Stickstoffdioxid an aktivkohlehaltigen Sorbentien ist zu beachten, dass immer ein Teil des Stickstoffdioxids durch die Aktivkohle katalytisch zu Stickstoffmonoxid reduziert wird. Diese Reaktion ist in hohem Maße unerwünscht, weil die Kapazitäten von Aktivkohle für NO äußerst gering sind. Bei der Auswertung von Versuchsergebnissen ist der Anteil von NO im Reingas zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Versuche an Filtern werden daher anhand der Durchbruchkurven von NO_2 und dem Summenparameter $\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$ dargestellt.

Mit NO_2 wurden der Taschenfilter T1, die V-Zelle V7 und der Kartuschenfilter K1 mit jeweils einer Wiederholung geprüft. Taschen- und Kartuschenfilter waren mit herkömmlicher, die V-Zelle mit K_2CO_3 -imprägnierter Aktivkohle bestückt. Der Nennvolumenstrom des Taschenfilters und der V-Zelle war 3400 m³/h, der des Kartuschenfilters 800 m³/h. Die V-Zelle enthielt ca. achtmal und der Kartuschenfilter ca. 34mal so viel Aktivkohle wie der Taschenfilter. Die unterschiedlichen Sorbensmassen der Filter spiegeln sich in den Durchbruchkurven (siehe Abbildung 52) wider. Die größere Sorbensmasse und die damit größere Kapazität des Kartuschenfilters führt jedoch erst nach ca. drei Stunden Versuchszeit zu geringeren Durchbrüchen im Vergleich zu der V-Zelle. Das verdeutlicht den Einfluss der Sorbensqualität auf das Abscheideergebnis. Die Durchbruchkurven in Abbildung 52 zeigen auch die

Notwendigkeit, die NO-Erzeugung (Differenz der NO_x - und NO_2 -Durchbruchswerte) in die Bewertung von Filtern hinsichtlich der NO_2 -Abscheidung einfließen zu lassen.

Die Beladung des Sorbens (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) bei Versuchsende machte bei der V-Zelle V7 11 % und beim Kartuschenfilter 0,6 % aus.

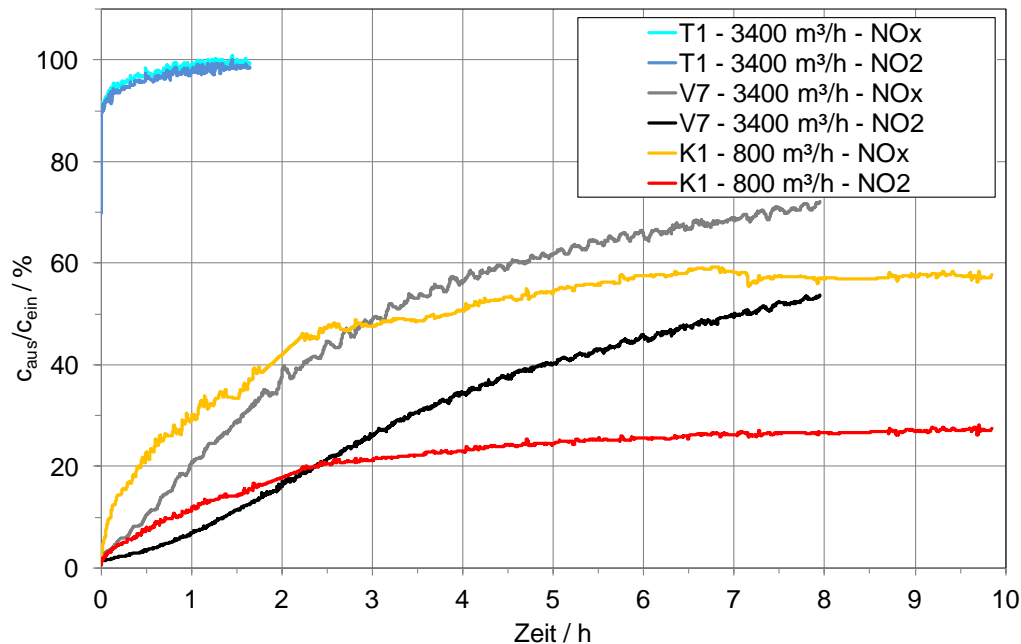


Abbildung 52: Durchbruchkurven von NO_2 und NO_x durch einen Taschenfilter, eine V-Zelle und eine Kartuschenfilter (23 °C, 50 % r. F, $c_{\text{ein NO}_2} = 9$ ppm, Nennvolumenstrom)

2.2.4.6 Ozon

Mit der Testsubstanz Ozon wurden Versuche an dem Taschenfilter T1, den V-Zellen V3 und V10 und dem Kartuschenfilter K1 mit einem Testgasvolumenanteil von 0,9 ppm durchgeführt. Außer der V-Zelle V10, die mit KI-impregnierter Aktivkohle ausgerüstet war, kam bei allen anderen Filtern herkömmliche Aktivkohle zum Einsatz. Der Taschenfilter und die V-Zellen wurden mit dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h, der Kartuschenfilter mit dem Nennvolumenstrom von 800 m³/h getestet. Das Verhältnis der Aktivkohlemassen in den V-Zellen im Vergleich zum Taschenfilter war ungefähr 8, das des Kartuschenfilters ca. 34.

Die in Abbildung 53 dargestellten Durchbruchkurven von Ozon an den verschiedenen Filtern wurden jeweils aus zwei Versuchen gemittelt. Die Abscheidung von Ozon an den V-Zellen und dem Kartuschenfilter über die Versuchszeit von sechs Stunden ist erfolgreich, es wird ein maximaler Durchbruch von ca. 12 % ermittelt. Bei dem Taschenfilter stellt sich bereits in den ersten Minuten ein Durchbruch von ungefähr 80 % ein, der dann annähernd konstant auf diesem Niveau verharrt.

Während der Versuchszeit wurden am Taschenfilter 2 g, an der V-Zelle V3 30 g, an der V-Zelle V10 46 g und am Kartuschenfilter 8 g Ozon abgeschieden.

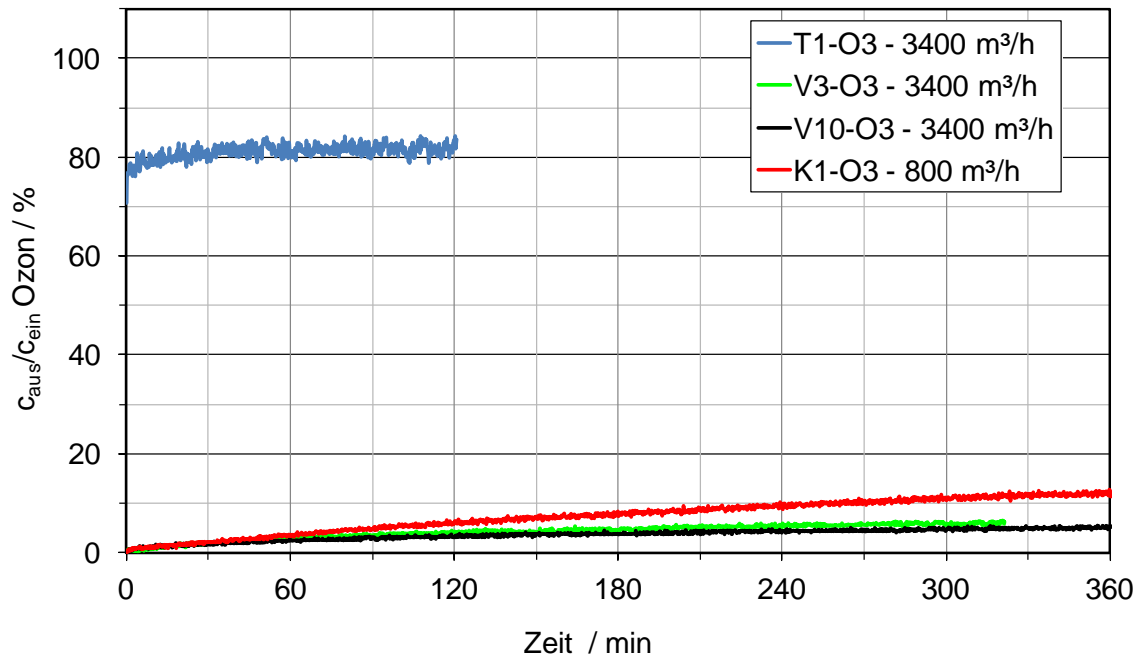


Abbildung 53: Durchbruchkurven von 0,9 ppm Ozon durch einen Taschenfilter, zwei V-Zellen und einen Kartuschenfilter (23 °C, 50 % r. F, Nennvolumenstrom)

2.2.5 Übertragbarkeit / Vergleich des Adsorptionsverhaltens von Medien, Filterelementen und konfektionierten raumlufttechnischen Filtern

Um die Übertragbarkeit von Testergebnissen, die an Medien gewonnen wurden, auf Filter zu untersuchen, wurden Durchbruchkurven durch Filter und Medien, die bei vergleichbaren Bedingungen ermittelt worden waren, miteinander verglichen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Vergleiche für die einzelnen Testsubstanzen sowie Filter und Medien in entsprechenden Abbildungen dargestellt.

2.2.5.1 n-Butan

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Durchbruchversuchen mit n-Butan an Medien auf Filter wurde an den drei verschiedenen V-Zellen V1-1, V1-2 und V2 überprüft. In der V-Zelle V1-2 war das gleiche Medium B verbaut wie in V1-1, jedoch war die Medienfläche von V1-2 größer. Das Medium B2 der V-Zelle V2 hatte eine wesentlich höhere Aktivkohleauflage. Die Medien waren mit herkömmlicher Aktivkohle ausgerüstet.

In Abbildung 54 sind die Durchbruchkurven von 9 ppm n-Butan durch die V-Zelle V1-1 bei dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und das Medium B bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,08 m/s, 0,10 m/s und 0,16 m/s abgebildet. Alle Durchbruchkurven sind Mittelwerte aus zwei Versuchen. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit des im Filter verbauten Mediums wird mit Hilfe des Nennvolumenstroms und der Filtermedienfläche berechnet. Bei der V-Zelle V1-1 hatte die mittlere Anströmgeschwindigkeit den Wert 0,08 m/s.

Der Vergleich zeigt jedoch, dass die Durchbruchkurve durch das Medium bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,08 m/s nicht das Durchbruchverhalten des Filters in den ersten zwanzig Minuten der Versuchszeit wiedergibt. Auch die Steigerung der Anströmgeschwindigkeit auf 0,10 m/s führte nicht zu einer verbesserten Übereinstimmung. Erst bei einer Anströmung von

0,16 m/s weisen die n-Butan-Durchbruchskurven von Filter und Medium einen ähnlichen Verlauf auf.

Zurückgeführt wird der beobachtete Sachverhalt darauf, dass in der V-Zelle die Strömungsverteilung ungleichmäßig ist. Diese Erklärung wird unterstützt durch die Ergebnisse von CFD-Berechnungen für die V-Zelle V1-2, die sich von der V-Zelle V1-1 nur durch eine größere Medienfläche und Einbautiefe unterscheidet.

Die mit CFD - Computational Fluid Dynamics - (Ansys Fluent 14.5, Ansys, Inc., Canonsburg, USA) berechnete Geschwindigkeitsverteilung in einem Schnitt durch die im Prüfkanal eingebaute V-Zelle ist in Abbildung 55 abgebildet. Die acht Filter-Panels mit dem plissierten Medium, die in V-Zelle V1-2 in vier Paaren verbaut sind, werden bei der Berechnung als homogene, poröse Elemente angenommen. Die einzelnen Falten werden nicht im Detail abgebildet. Anhand der Farben wird deutlich, dass der spitz zulaufende Teil der V-förmigen Anordnungen mit einer deutlich niedrigeren Geschwindigkeit durchströmt wird als der Einströmbereich. Aufgrund der Einschnürung im Einströmbereich kommt es dort zu sehr hohen Geschwindigkeiten und einem Abschnitt, in dem ein Teil der Filtermedienfläche gar nicht durchströmt wird. Das führt in Summe zu deutlich höheren mittleren Anströmgeschwindigkeiten der restlichen Medienfläche.

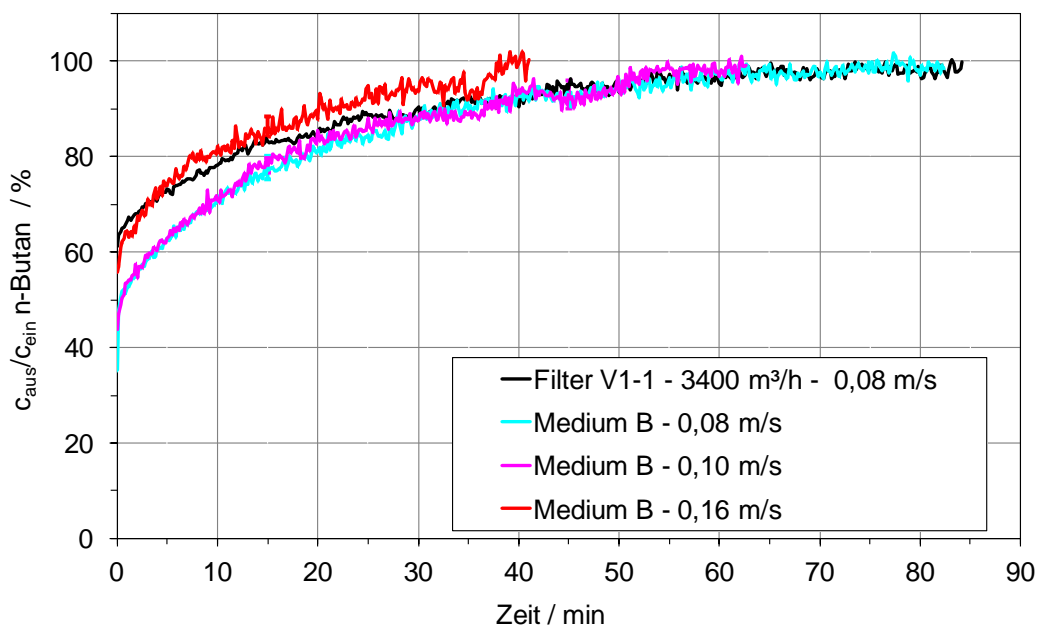


Abbildung 54: Vergleich der n-Butan-Durchbruchskurven von V-Zelle V1-1 und Medium B (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein n-Butan}} = 9 \text{ ppm}$)

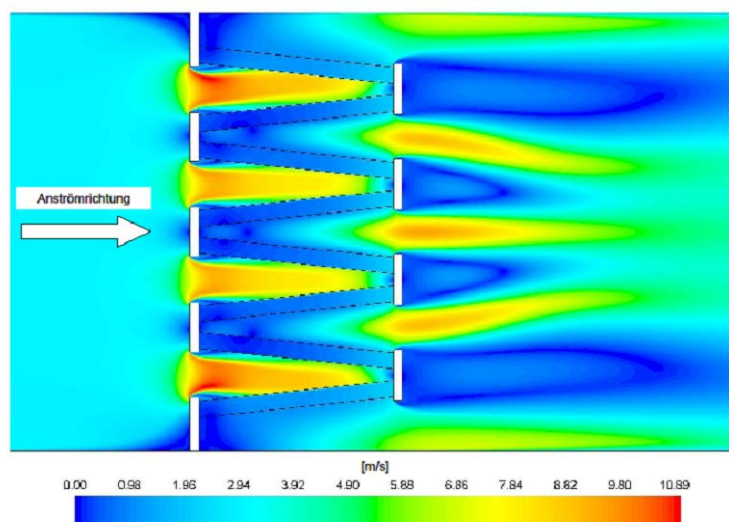


Abbildung 55: Berechnete Strömungsverteilung in der V-Zelle V1-2

Der zweite Filter-Medien-Vergleich hinsichtlich der n-Butan-Abscheidung erfolgte an der V-Zelle V1-2 und ebenfalls an Medium B. In Abbildung 56 sind die Durchbruchkurven von 9 ppm n-Butan durch die V-Zelle V1-2 bei dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und das Medium B bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s, 0,10 m/s und 0,16 m/s abgebildet. Alle Durchbruchkurven sind Mittelwerte aus mindestens zwei Versuchen. Die mittlere Anströmgeschwindigkeit der V-Zelle V1-2 beträgt 0,055 m/s.

Der Vergleich zeigt wie schon für die V-Zelle V1-1, dass die Durchbruchkurve durch das Medium bei annähernd mittlerer Anströmgeschwindigkeit das Durchbruchverhalten des Filters nicht wiedergibt. Die Steigerung der Anströmgeschwindigkeit auf 0,10 m/s führt zwar zu einer verbesserten Übereinstimmung, jedoch sind Initialdurchbruch und Kurvensteigung weiterhin verschieden. Bei einer Anströmung von 0,16 m/s weisen die n-Butan-Durchbruchskurven von Filter und Medium eine bessere Übereinstimmung beim Initialdurchbruch auf, der Durchbruch durch das Medium ist dann aber wesentlich ausgeprägter.

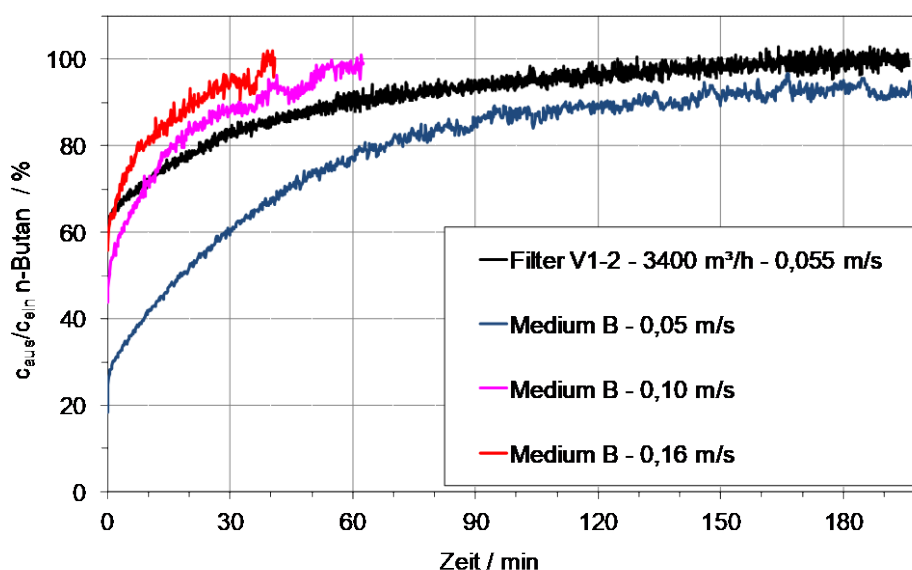


Abbildung 56: Vergleich der n-Butan-Durchbruchskurven von V-Zelle V1-2 und Medium B (23 °C, 50 % r. F., c_{ein Butan}=9 ppm)

Der letzte Filter-Medien-Vergleich hinsichtlich der n-Butan-Adsorption wurde an der V-Zelle V2 und Medium B2 durchgeführt. In Abbildung 57 sind die Durchbruchkurven von 9 ppm n-Butan durch die V-Zelle V2 bei dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h (mittlere Anströmgeschwindigkeit 0,126 m/s) und das Medium B bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,12 m/s abgebildet. Die Durchbruchkurven stammen aus Einzelversuchen. Der Durchbruch durch das Medium erfolgt zu Beginn des Versuches anders als bei den V-Zellen V1-1 und V1-2 schon bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit schneller als durch den Filter.

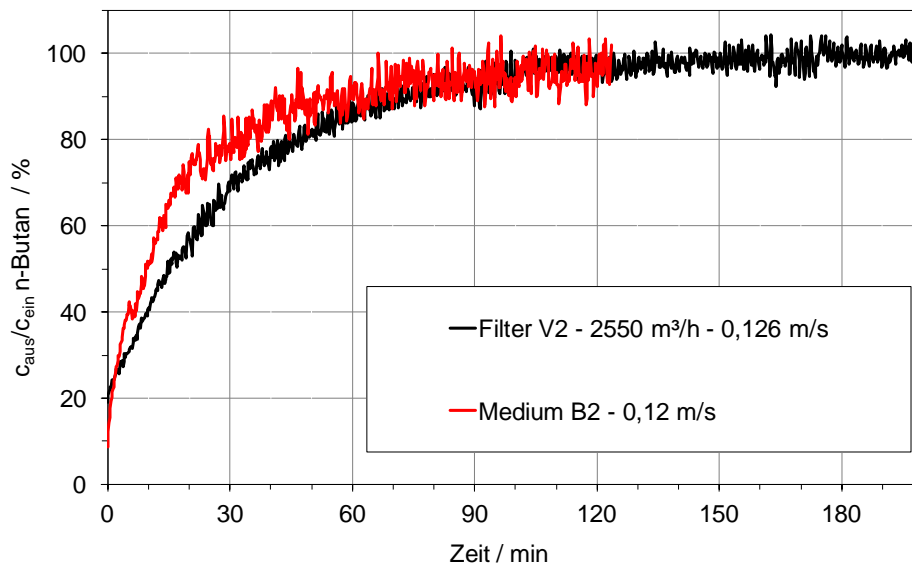


Abbildung 57: Vergleich der n-Butan-Durchbruchkurven von V-Zelle V2 und Medium B2 (23 °C, 50 % r. F., c_{ein} Butan=9 ppm)

2.2.5.2 Toluol

Die Übereinstimmung der Toluol-Durchbruchkurven von Medien und Filtern wurde an dem Panel-Filter P1, den zwei verschiedenen V-Zellen V3 und V4 sowie den zugehörigen Medien A, C und G überprüft. Die Medien A, C und G enthalten herkömmliche Aktivkohlen als Sorbentien.

In Abbildung 58 sind die Durchbruchkurven von 9 ppm Toluol durch den Panel-Filter P1 bei dem Nennvolumenstrom von 2000 m³/h und das Medium A bei der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,24 m/s abgebildet. Alle Durchbruchkurven sind Mittelwerte aus mindestens zwei Versuchen. Die Durchbruchkurven durch das Medium und den Filter stimmen sehr gut überein. Zurückgeführt wird das darauf, dass die Strömung in dem geometrisch einfach aufgebauten Panel-Filter relativ gleichmäßig ist. Diese Annahme wird unterstützt durch die in Abbildung 59 dargestellten Ergebnisse der CFD-Berechnungen für den Panel-Filter. Diese zeigen, dass beim Panel-Filter P1 die gesamte Filterfläche durchströmt wird. Des Weiteren sind die Geschwindigkeitsgradienten über der Filtertiefe weniger stark ausgeprägt als in den V-Zellen V1-1 und V1-2 (Abbildung 55).

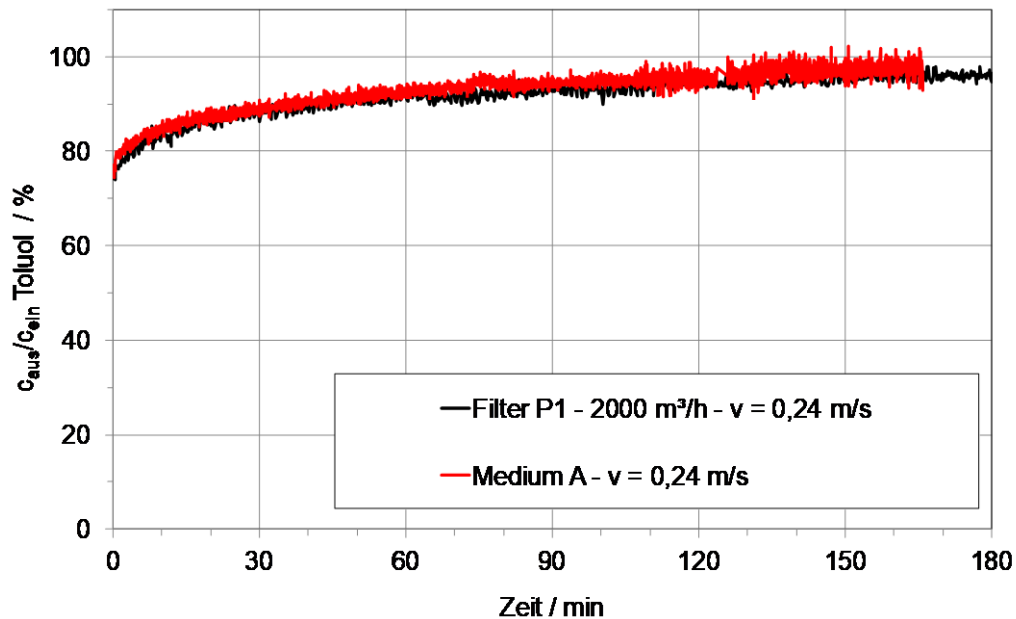


Abbildung 58: Vergleich der Toluol-Durchbruchkurven von Panel-Filter P1 und Medium A (23 °C, 50 % r. F., $c_{ein\ Toluol}=9\ ppm$)

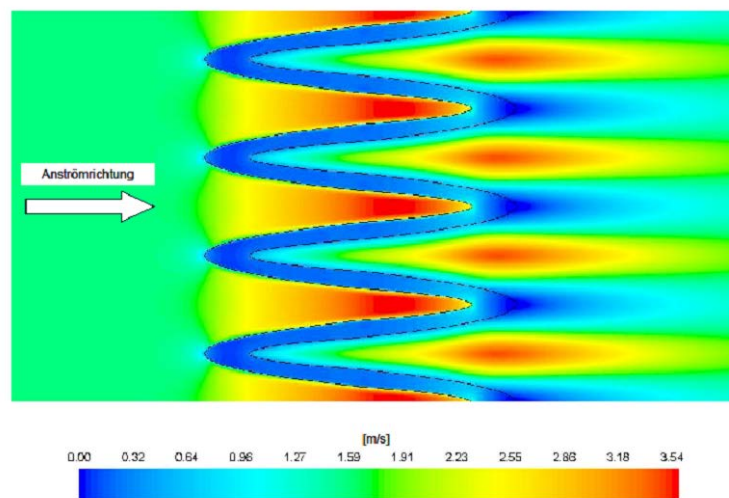


Abbildung 59: Berechnete Strömungsverteilung im Panel-Filter P1

Der zweite Filter-Medien-Vergleich zur Toluol-Abscheidung erfolgte an der V-Zelle V3 und dem Medium C. In Abbildung 60 sind die Durchbruchkurven von 9 ppm Toluol durch die V-Zelle V3 bei dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und das Medium C bei der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,18 m/s abgebildet. Die Durchbruchkurven sind Mittelwerte aus jeweils zwei Versuchen. Der Vergleich zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Durchbruchkurven von der V-Zelle V3 und dem Medium C. Aufgrund der Strömungsverteilung in V-Zellen ist es plausibel, dass der Durchbruch durch das Medium geringer ist als durch den Filter. Die Adsorption von Toluol wird dadurch aber nicht so stark beeinflusst wie die von n-Butan. Es ist anzunehmen, dass die wesentlich höhere Kapazität von Aktivkohle für Toluol der Grund hierfür

ist. Die Kapazität von Aktivkohle für n-Butan ist insgesamt so gering, dass sich Abweichungen der Versuchsbedingungen stärker auswirken.

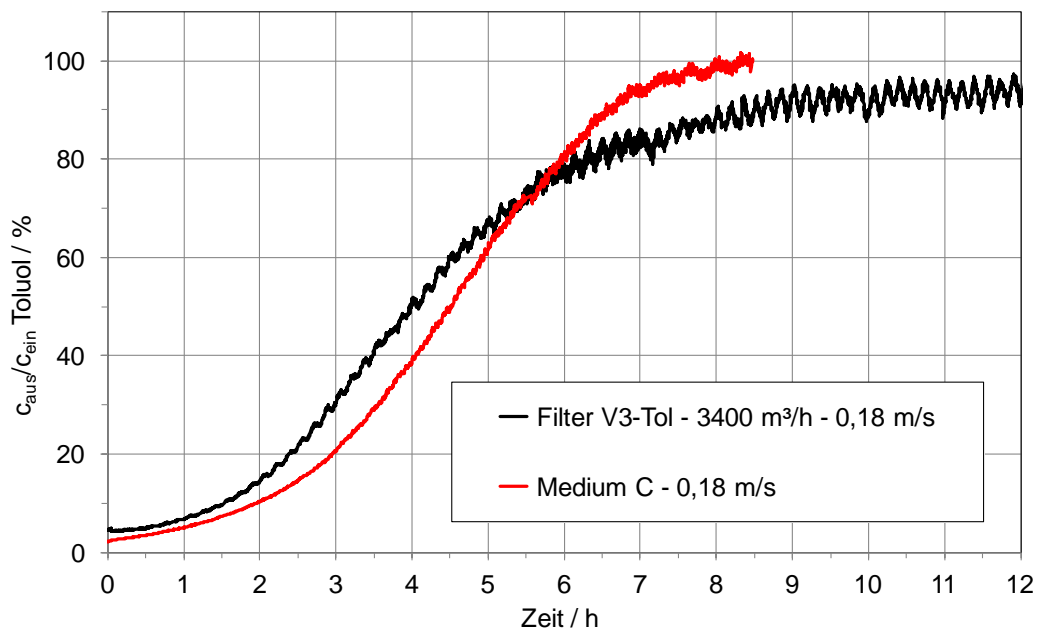


Abbildung 60: Vergleich der Toluol-Durchbruchskurven von V-Zelle V3 und Medium C (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 9 \text{ ppm}$)

Weiterhin wurde die Übertragbarkeit von Toluol-Durchbruchskurven (9 ppm) an der V-Zelle V4 und dem Medium G untersucht. Abbildung 61 zeigt die Versuchsergebnisse, die am Filter mit dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und an einer Doppellage des Mediums mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,18 m/s gewonnen wurden. Im Filter ist das Medium doppellagig verbaut. Die Durchbruchskurve des Filters wurde aus zwei Versuchen gemittelt, die des Mediums stammt aus einem Einzelversuch. Die Darstellung der Medienkurve wurde bei einer Versuchszeit von ca. 6 h ausgesetzt, weil sehr starke Feuchteschwankungen in einem Zeitraum von ca. 30 min zu extremen Durchbruchsschwankungen geführt hatten. Abbildung 61 zeigt, dass auch bei dieser V-Zelle die Durchbruchskurven von Filter und Medium relativ gut übereinstimmen. Es gelten die gleichen Überlegungen wie für V-Zelle V3. Durch die Strömungsverteilung in der V-Zelle wird das Adsorptionsvermögen des Filters für Toluol gegenüber dem Medium etwas reduziert.

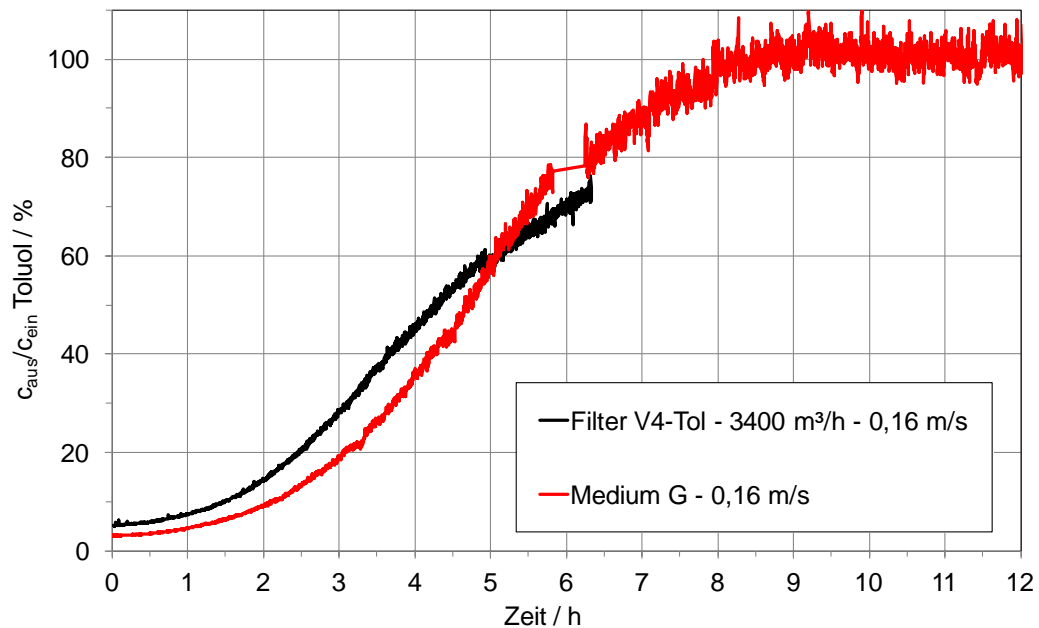


Abbildung 61: Vergleich der Toluol-Durchbruchskurven von V-Zelle V4 und Medium G (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 9 \text{ ppm}$)

2.2.5.3 Schwefeldioxid

Die Vergleichbarkeit der SO_2 -Abscheidung an Filtern und Medien wurde an dem Taschenfilter T1, der V-Zelle V7, dem Kartuschenfilter K1 und den zugehörigen Medien E, D und F überprüft. Das Medium D der V-Zelle V7 enthielt mit K_2CO_3 -imprägnierte Aktivkohle, die anderen Filter waren mit herkömmlicher Aktivkohle ausgestattet.

In Abbildung 62 sind die Durchbruchskurven von 9 ppm SO_2 durch die V-Zelle V7 bei dem Nennvolumenstrom von $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ und das Medium D bei der mittleren Anströmgeschwindigkeit von $0,16 \text{ m/s}$ abgebildet. Beide Durchbruchskurven stammen aus Einzelversuchen. Das Medium D wurde in Doppellage getestet, da es in dieser Form auch innerhalb des Filters verarbeitet ist. Die Durchbruchskurven durch Filter und Medium stimmen recht gut überein. Der Durchbruch durch das Medium ist in den ersten beiden Stunden der Versuchszeit etwas geringer als der durch den Filter. Die größtenteils auf Chemisorption basierende Abscheidung von Schwefeldioxid wird durch die Strömungsverteilung in der V-Zelle nicht wesentlich beeinflusst.

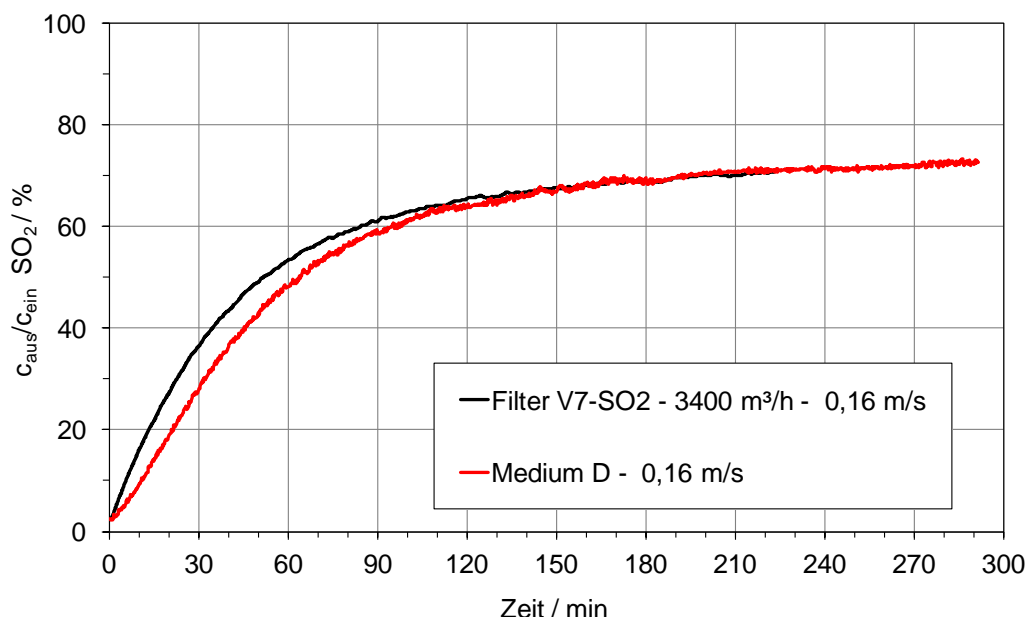


Abbildung 62: Vergleich der SO₂-Durchbruchkurven von V-Zelle V7 und Medium D (23 °C, 50 % r. F., c_{ein SO2} = 9 ppm)

Die Ergebnisse des zweiten Filter-Medien-Vergleichs zur SO₂-Abscheidung am Taschenfilter T1 und dem Medium E sind in Abbildung 63 dargestellt. Getestet wurde mit 9 ppm Schwefeldioxid und dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h bzw. der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,18 m/s. Beide Durchbruchkurven sind Mittelwerte aus jeweils zwei Versuchen. Die Kapazitäten von Filter und Medium sind wegen der sehr geringen Aktivkohleauflage insgesamt klein. Das Medium E weist bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit zwar einen geringeren Durchbruch und Initialdurchbruch als der Filter T1 auf, unter Berücksichtigung des hohen Durchbruchsniveaus ist die Übereinstimmung der Durchbruchkurven aber durchaus passabel.

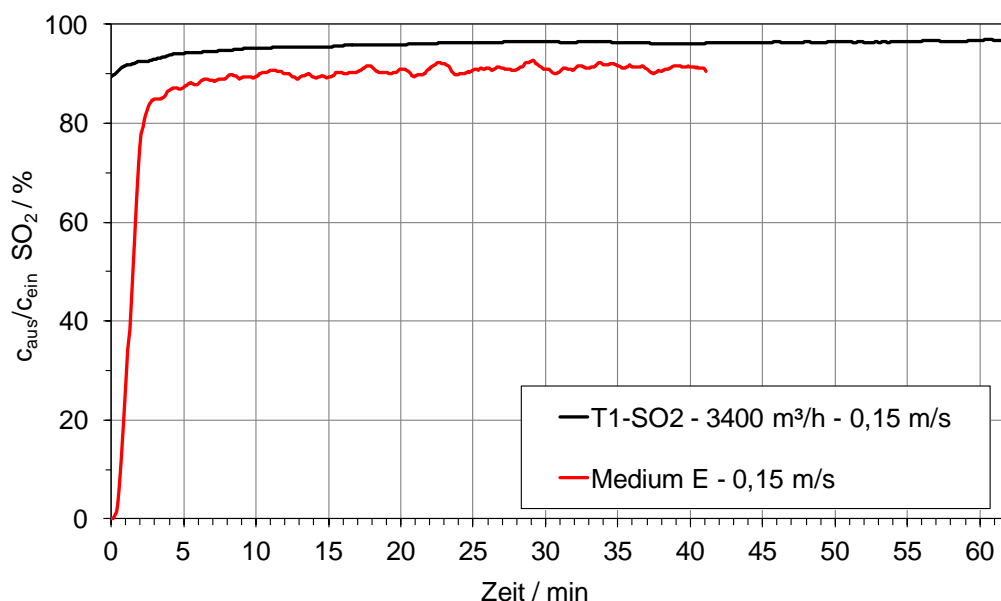


Abbildung 63: Vergleich der SO₂-Durchbruchkurven des Taschenfilters T1 und Medium E (23 °C, 50 % r. F., c_{ein SO2} = 9 ppm)

Abbildung 64 zeigt die Ergebnisse des Filter-Medien-Vergleichs zur SO_2 -Abscheidung am Kartuschenfilter K1 und dem Medium F, das granulärförmig vorliegt und als Schüttung mit einer Schütthöhe von ca. 30 mm getestet wird. Die Versuche wurden mit 9 ppm Schwefeldioxid und dem Nennvolumenstrom von $800 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. der mittleren Anströmgeschwindigkeit von $0,32 \text{ m/s}$ durchgeführt. Die Durchbruchkurven sind jeweils aus zwei Versuchen gemittelt. Die Übereinstimmung der Durchbruchkurven des Filters und des zugehörigen Mediums ist gut.

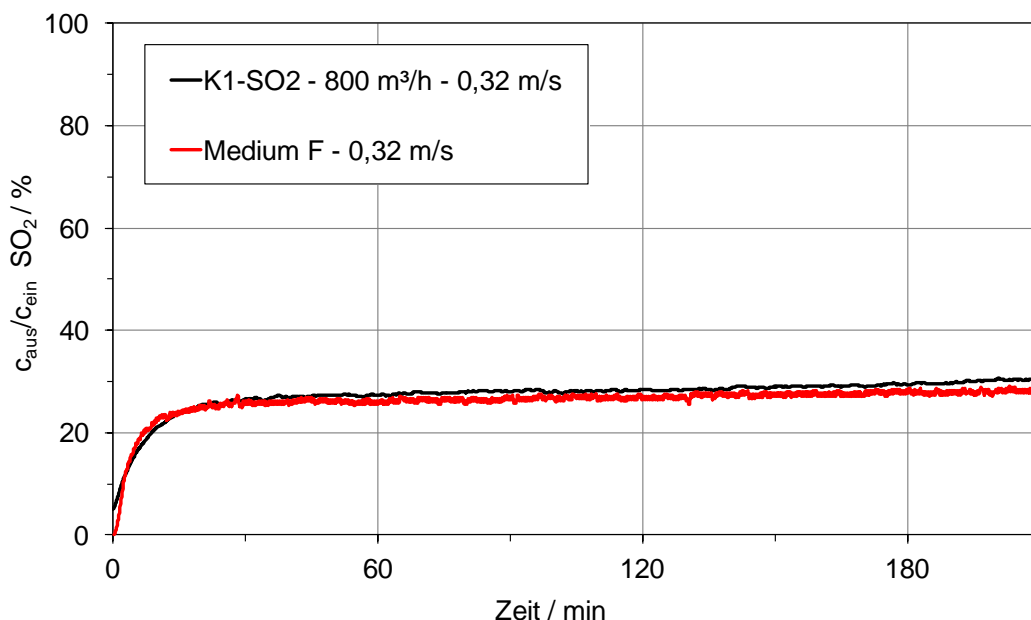


Abbildung 64: Vergleich der SO_2 -Durchbruchkurven des Kartuschenfilters K1 und Medium F (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein SO}_2} = 9 \text{ ppm}$)

2.2.5.4 Ammoniak

Die Übereinstimmung der Ammoniak-Durchbruchkurven von Medien und Filtern wurde an dem Taschenfilter T1 und den zwei V-Zellen V8 und V9 sowie den zugehörigen Medien E, J und I überprüft. Als Sorbens enthält Medium E herkömmliche Aktivkohle, J Ionentauscher und I mit Phosphorsäure (H_3PO_4) imprägnierte Aktivkohle. Alle Filter haben einen Nennvolumenstrom von $3400 \text{ m}^3/\text{h}$.

Der Taschenfilter T1 mit dem Medium E und herkömmlicher Aktivkohle als Sorbens hat nur eine sehr geringe Kapazität zur Abscheidung von NH_3 . In Abbildung 65 sind die in einzelnen Versuchen ermittelten Durchbruchkurven von 9 ppm Ammoniak dargestellt. Der Filter wurde mit dem Nennvolumenstrom $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ geprüft, das Medium mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit von $0,15 \text{ m/s}$. Zunächst einmal ist festzustellen, dass die Durchbruchkurven der zwei Medientests gut übereinstimmen. Darüber hinaus ähneln sich auch die Durchbruchkurven der zwei Medientests und die des Filters. Unter Berücksichtigung des schnellen Gesamtdurchbruchs ist die Übereinstimmung des Durchbruchsverhaltens von Filter und Medium durchaus gut.

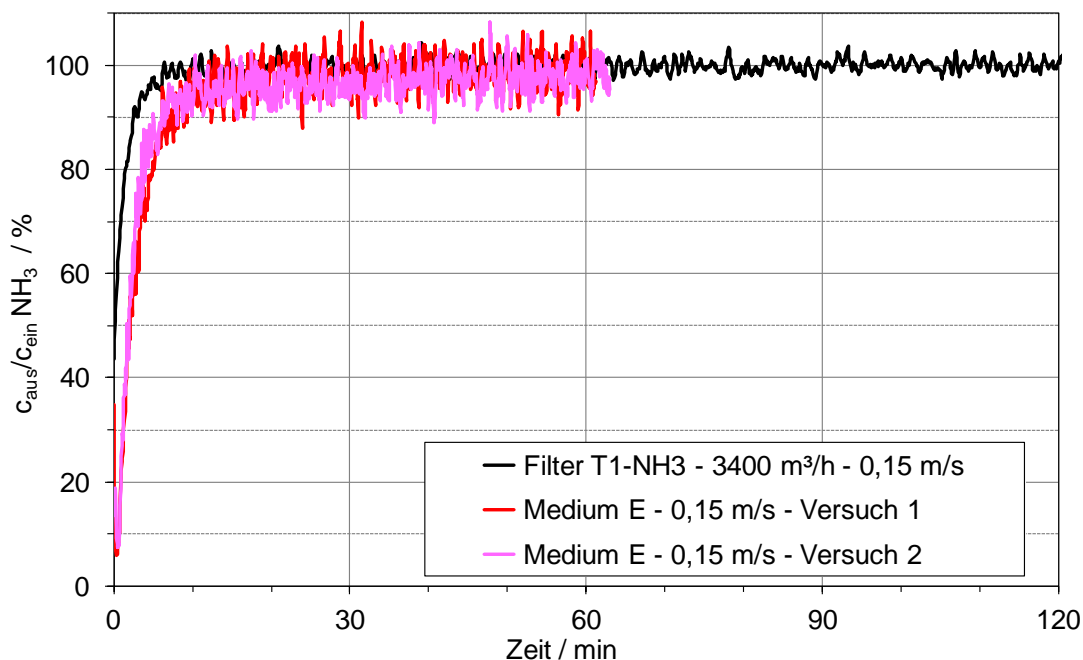


Abbildung 65: Vergleich der NH₃-Durchbruchskurven von Taschenfilter T1 und Medium E (23 °C, 50 % r. F., c_{ein NH₃} = 9 ppm)

Der Filter V8 mit Medium J und Ionentauscher als Sorbens hat mit Abstand die höchste Kapazität zur Abscheidung von NH₃. Abbildung 66 zeigt in einzelnen Versuchen ermittelte Durchbruchskurven von 9 ppm Ammoniak beim Nennvolumenstrom (3400 m³/h) bzw. mittlerer Anströmgeschwindigkeit (0,16 m/s). Die Verteilung des Ionentauschers auf der Fläche der Medienproben war sichtbar inhomogen. Darauf wird die Abweichung zwischen den Durchbruchskurven der Medientests zurückgeführt. Die Übereinstimmung der Durchbruchskurven der Medientests mit derjenigen des Filters ist unter diesen Gegebenheiten annehmbar.

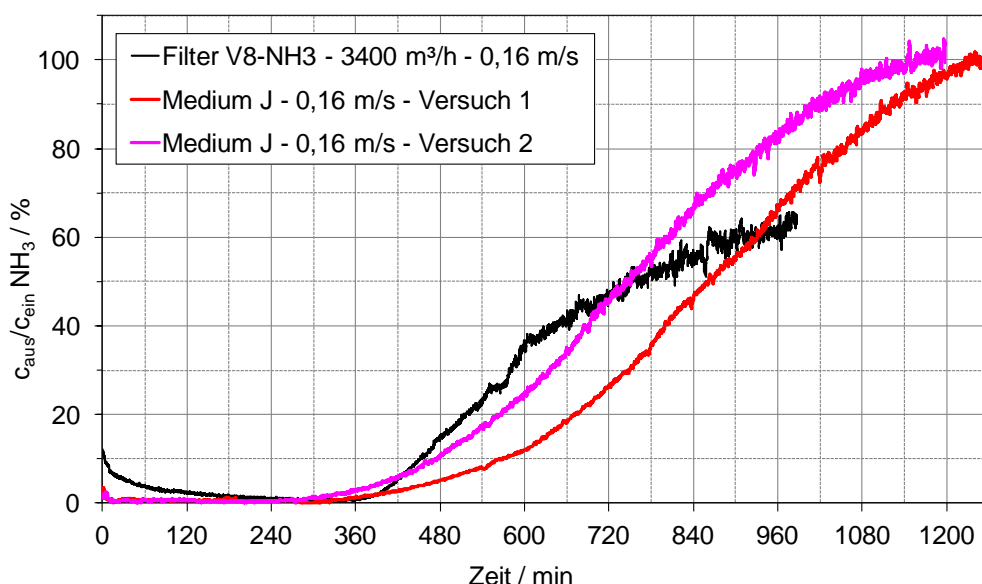


Abbildung 66: Vergleich der NH₃-Durchbruchskurven von V-Zelle V8 und Medium J (23 °C, 50 % r. F., c_{ein NH₃} = 9 ppm)

Das Ergebnis des dritten Vergleichs der Durchbruchversuchen mit 9 ppm Ammoniak an einem Filter und dem zugehörigen Medium zeigt Abbildung 67. Getestet wurde die V-Zelle V9 mit dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und das Medium I in Doppellage mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,16 m/s. Alle dargestellten Durchbruchkurven stammen aus Einzelversuchen. Es ist zu erkennen, dass die Wiederholbarkeit sowohl der Filter- als auch der Medientests gut war. Die Durchbruchkurven von Medien und Filtern liegen dennoch weit auseinander. Darüber hinaus ist es nicht plausibel, dass der Durchbruch durch das Medium deutlich früher erfolgt und die Medienkapazität im Verhältnis zur Filterkapazität wesentlich geringer ist.

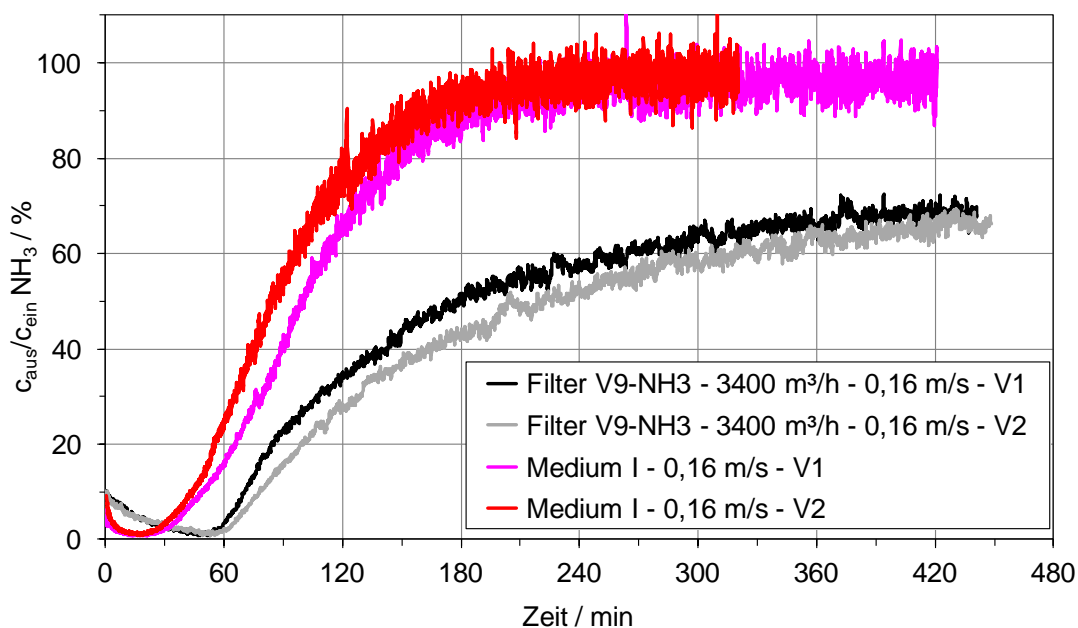


Abbildung 67: Vergleich der NH₃-Durchbruchkurven von V-Zelle V9 und Medium I (23 °C, 50 % r. F., c_{ein} NH₃ = 9 ppm)

2.2.5.5 Stickstoffdioxid

Die Übereinstimmung der NO₂- bzw. der NO_x-Durchbruchkurven von Medien und Filtern wurde an dem Taschenfilter T1, der V-Zelle V7, dem Kartuschenfilter K1 und den zugehörigen Medien E, D und F überprüft. Die Medien E und F enthalten herkömmliche Aktivkohle, das Medium D mit Kaliumcarbonat imprägnierte Aktivkohle als Sorbentien. Wie bereits in den Abschnitten 2.2.2.5 und 2.2.4.5 dargestellt, wurde bei den Durchbruchversuchen nur NO₂ dosiert, durch Reaktionen an der Aktivkohleoberfläche entsteht jedoch NO, so dass zur Bewertung von Medien und Filtern nicht nur die NO₂- sondern auch die NO_x-Durchbruchkurven betrachtet werden müssen.

In Abbildung 68 sind die Durchbruchkurven von NO₂ und NO_x durch den Taschenfilter T1 bei Nennvolumenstrom (3400 m³/h) und das Medium E bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit (0,15 m/s) und einem Testvolumenanteil von 9 ppm Stickstoffdioxid abgebildet. Alle Durchbruchkurven wurden aus zwei Versuchen gemittelt. Die Durchbrüche durch das Medium sind etwas geringer als durch den Filter und liegen in der gleichen Größenordnung. Beim Vergleich der Durchbruchkurven ist zu berücksichtigen, dass das Medium eine geringe Aktivkohle-

auflage besitzt und die Gesamtkapazität zur NO_x -Abscheidung entsprechend gering ist. Durch die geringe Aktivkohlemenge wird auch wenig NO_2 zu NO umgesetzt, die Durchbruchkurven von NO_2 und NO_x unterscheiden sich entsprechend nur wenig.

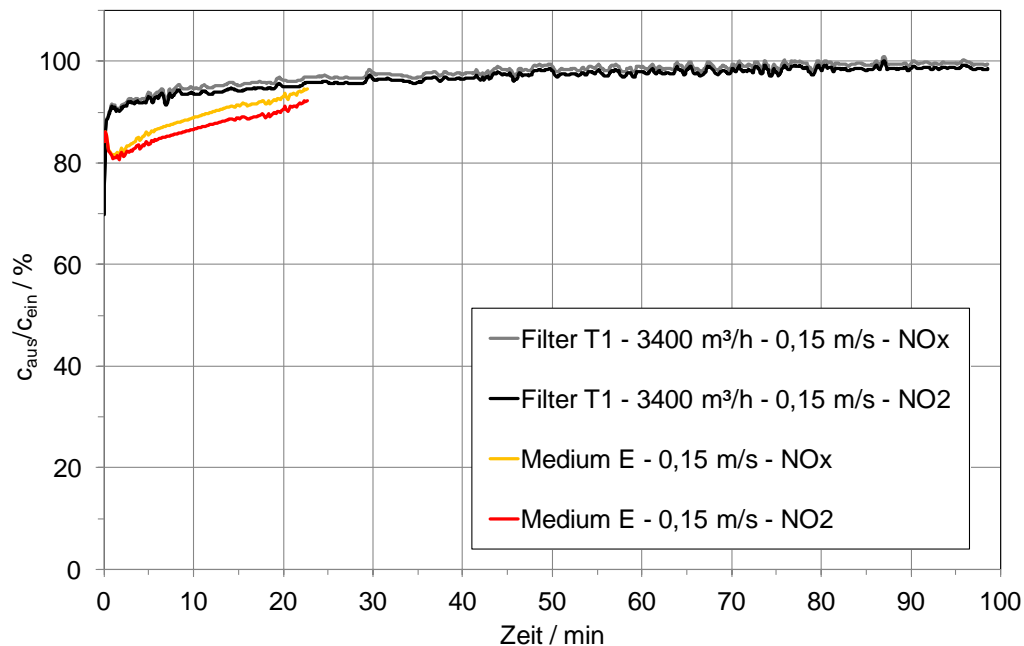


Abbildung 68: Vergleich der NO_x - und NO_2 -Durchbruchkurven von Taschenfilter T1 und Medium E (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein NO}_2} = 9 \text{ ppm}$)

Abbildung 69 zeigt die Durchbruchkurven von NO_x und NO_2 der V-Zelle V7 und des Mediums D bei einer Beaufschlagung mit dem Nennvolumenstrom ($3400 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. mittlerer Anströmgeschwindigkeit ($0,16 \text{ m/s}$) und 9 ppm Stickstoffdioxid. Die Durchbruchkurven des Mediums stammen aus einem Einzelversuch an dem Medium D in doppelter Lage, die des Filters ist aus zwei Versuchen gemittelt. Die Ergebnisse an dem Medium D in einfacher Lage, in der das Medium bereitgestellt wurde, sind in Abschnitt 2.2.2.5 dargestellt und werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

Der Durchbruch von NO_2 durch Filter und Medium stimmt nur während der ersten achtzig Minuten der Versuchszeit gut überein. Anschließend bricht NO_2 schneller durch das Medium als durch den Filter durch. Der NO_x -Durchbruch durch das Medium ist quasi ab Versuchsbeginn höher als durch den Filter. Die Gründe für die höheren Durchbrüche durch das Medium konnten nicht erschlossen werden.

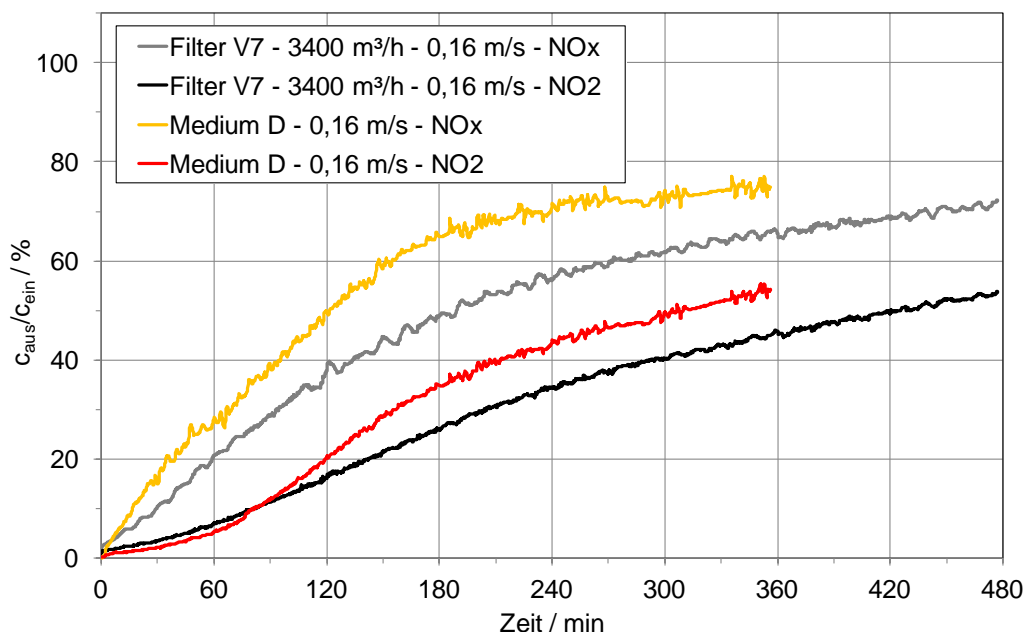


Abbildung 69: Vergleich der NO_x- und NO₂-Durchbruchkurven der V-Zelle V7 und des Mediums D (23 °C, 50 % r. F., c_{ein NO2} = 9 ppm)

Weiterhin wurde die Übereinstimmung von Stickoxid-Durchbruchkurven an dem Kartuschenfilter K1 und einer Schüttung des Mediums F, einem Aktivkohlegranulat, untersucht. Die Durchbruchkurven von NO_x und NO₂, aufgenommen bei Nennvolumenstrom (800 m³/h) bzw. mittlerer Anströmgeschwindigkeit (0,32 m/s) und einem Testvolumenanteil von 9 ppm NO₂, werden in Abbildung 70 gezeigt. Die Durchbruchkurven des Mediums sind aus zwei Versuchen gemittelt, die des Filters stammen aus einem Einzelversuch. Ein zweiter Versuch mit einem Filter des Typs K1 bestätigte prinzipiell den dargestellten Durchbruchsverlauf. Aufgrund der während des Versuches herrschenden Außentemperatur und Luftfeuchte kam es jedoch zu Problemen bei der Entfeuchtung mit der Folge, dass die Luftfeuchte des Testvolumenstromes und dadurch die Durchbruchswerte so stark schwankten, dass sie nicht mehr zur Mittelwertbildung geeignet waren. Die in Abbildung 70 dargestellten Durchbrüche der Stickoxide durch den Kartuschenfilter K1 und Schüttungen des Aktivkohlegranulates F weisen aber, obwohl sie merklich voneinander abweichen, zumindest ein plausibles Verhalten auf. Die Abscheidung durch das Medium ist etwas besser als durch den Filter, der aus mehreren zylindrischen Kartuschen besteht, die jeweils von innen nach außen durchströmt werden.

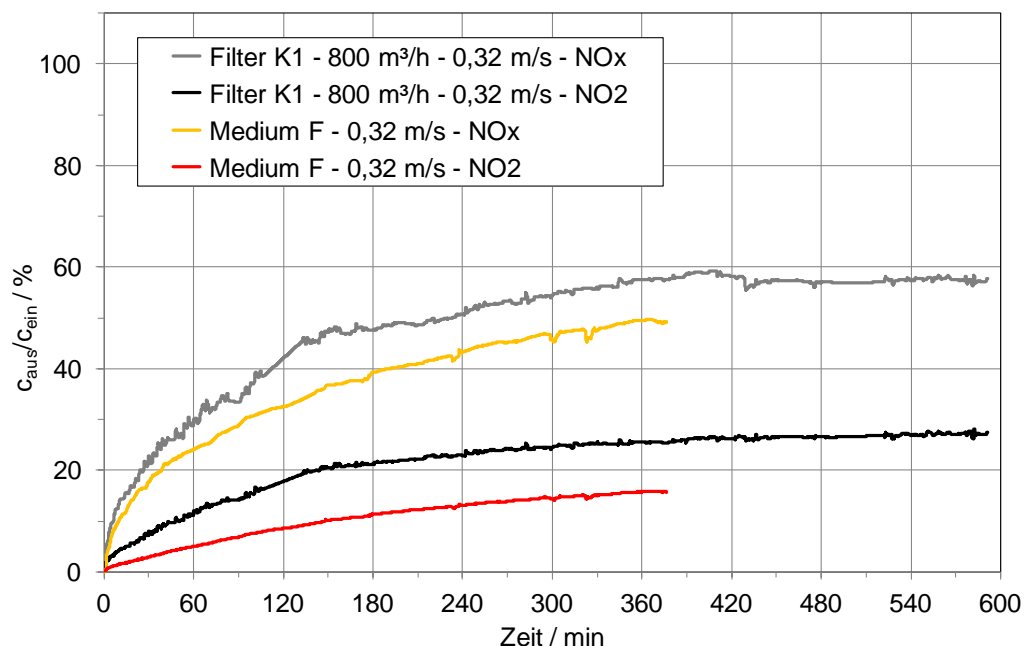


Abbildung 70: Vergleich der NO_x- und NO₂-Durchbruchkurven von Kartuschenfilter K1 und Medium F (23 °C, 50 % r. F., c_{ein NO2} = 9 ppm)

2.2.5.6 Ozon

Die Übereinstimmung der Ozon-Durchbruchkurven an Medien und Filtern wurde an dem Taschenfilter T1, der V-Zelle V10, dem Kartuschenfilter K1 sowie den zugehörigen Medien E, H und F überprüft. Die Sorbentien der Medien E und F sind herkömmliche Aktivkohlen, das Medium H enthält Aktivkohle, die mit Kaliumiodid imprägniert ist.

In Abbildung 71 sind die Durchbruchkurven von 0,9 ppm Ozon durch den Taschenfilter T1 bei dem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h und das Medium E bei der mittleren Anströmgeschwindigkeit von 0,15 m/s dargestellt. Die Filter-Durchbruchskurve wurde aus zwei Versuchen gemittelt, die Medien-Durchbruchskurve stammt aus einem Einzelversuch. Trotz geringer Kapazitäten und hoher Initialdurchbrüche ist die Übereinstimmung der Durchbruchkurven gut.

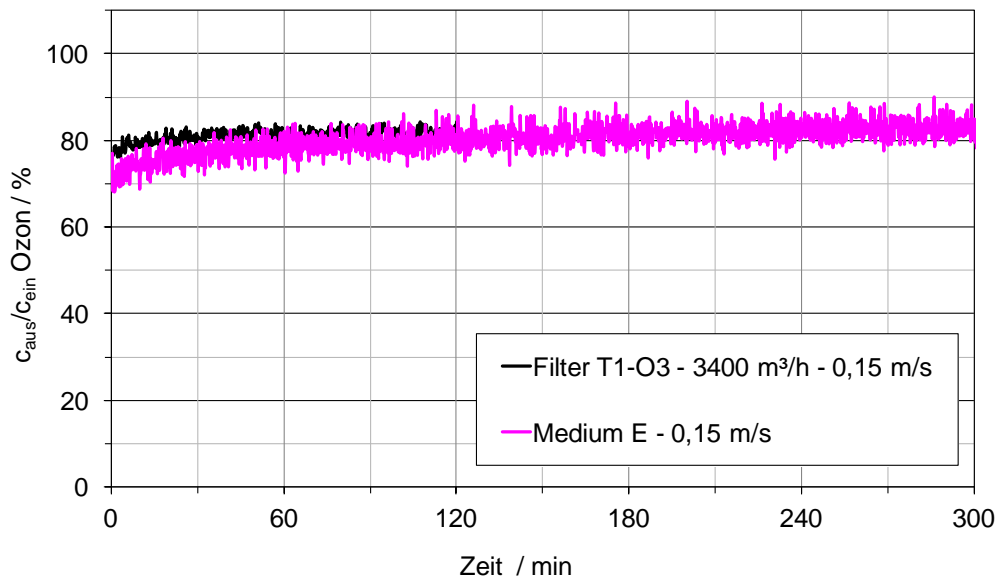


Abbildung 71: Vergleich der Ozon-Durchbruchskurven von Taschenfilter T1 und Medium E (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Ozon}} = 9 \text{ ppm}$)

Zum Vergleich der Versuchsergebnisse der V-Zelle V10 und des Mediums H werden in Abbildung 72 die Durchbruchskurven von 0,9 ppm Ozon bei Nennvolumenstrom (3400 m³/h) bzw. mittlerer Anströmgeschwindigkeit (0,16 m/s) dargestellt. Bei der Filter-Durchbruchskurve handelt es sich um eine aus zwei Versuchen gemittelte Kurve, die Medien-Durchbruchskurve stammt aus einem Einzelversuch am Medium H in Doppellage. Die Leistungsfähigkeit des Mediums H und der V-Zelle V10 zur Abscheidung von Ozon ist groß. Nach fünf Stunden Versuchszeit brachen maximal 5 % Ozon durch. Der stufenförmige Verlauf der Durchbruchskurve des Mediums wird auf die Grenzen des Messgerätes zurückgeführt, da der im Reingas gemessene Volumenanteil von Ozon nur bei 18 ppb lag. Die untere Nachweisgrenze des Ozonanalysators wird zwar mit 1 ppb angegeben, jedoch beträgt der obere Messbereichsendwert 10000 ppb. Bei Berücksichtigung der sehr geringen absoluten Durchbruchswerte ist die Übereinstimmung der Durchbruchskurven von Filter und Medien gut.

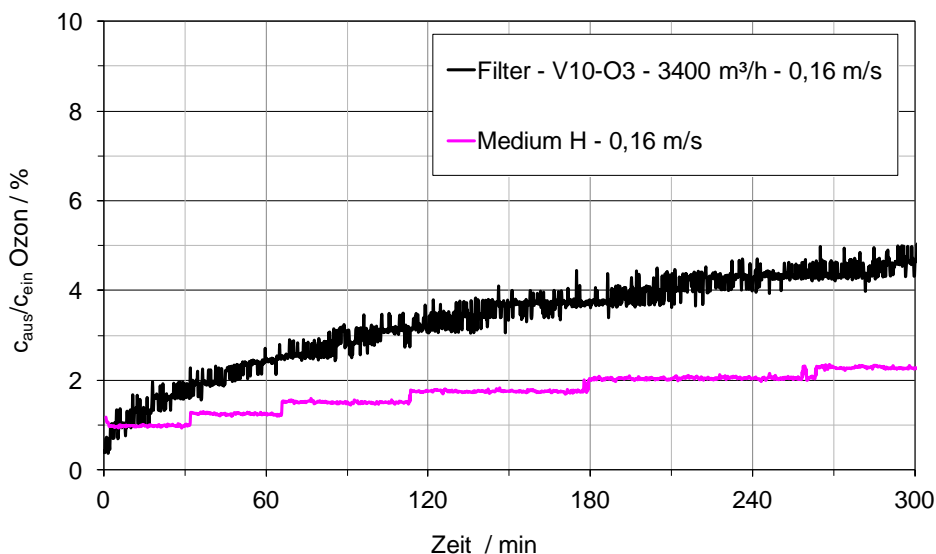


Abbildung 72: Vergleich der Ozon-Durchbruchskurven von V-Zelle V10 und Medium H (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Ozon}}=9$ ppm)

Der dritte Filtertyp, an dem die Vergleichbarkeit der Ozonabscheidung an Filter und Medium geprüft wurde, war von der Bauform ein Kartuschenfilter (vgl. Abbildung 47). Die Abbildung 73 zeigt die Durchbruchskurven von 0,9 ppm Ozon durch den Kartuschenfilter K1 und das zugehörige Medium F. Die Filter-Durchbruchskurve wurde aus zwei Versuchen gemittelt, die Medien-Durchbruchskurve stammt aus einem Einzelversuch. Die Übereinstimmung der Durchbruchskurven von Filter und Medium ist bis zu einer Versuchszeit von ungefähr neunzig Minuten sehr gut, danach ist der Durchbruch von Ozon durch das Medium etwas höher als durch den Filter. Für den leichten Einbruch in der Medien-Durchbruchskurve bei ca. 240 Minuten Versuchszeit gab es keinen nachvollziehbaren Grund, da die Werte von Temperatur, relativer Feuchte und Rohgaskonzentration stabil waren.

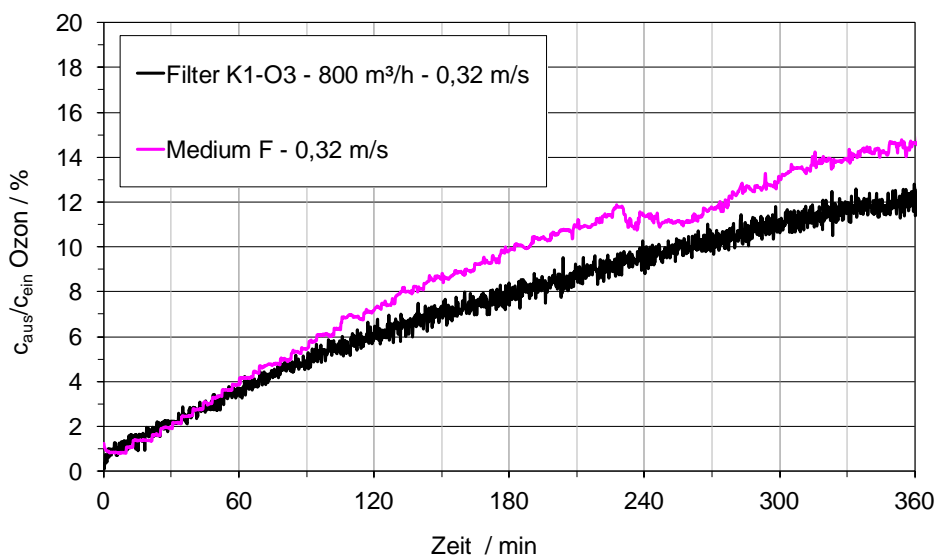


Abbildung 73: Vergleich der Ozon-Durchbruchskurven von Kartuschenfilter K1 und Medium F (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Ozon}} = 9$ ppm)

2.2.6 Fazit zur Übertragbarkeit der Ergebnisse von Medien auf Filter

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Durchbruchversuchen an Medien und daraus gefertigten Filtern wurde mit den sechs Testsubstanzen n-Butan, Toluol, Ammoniak, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Ozon überprüft.

Mit n-Butan wurde die Abscheidung an drei verschiedenen konfektionierten V-Zellen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Adsorption des sehr leicht flüchtigen n-Butans stark beeinflusst wird durch die Strömungsverteilung in der V-Zelle. Die Durchbruchkurven von n-Butan durch die Medien, die mit der mittleren Anströmgeschwindigkeit der V-Zellen getestet wurden, gaben nicht das Durchbruchverhalten der Filter wieder.

Die Durchbruchkurven des schwerer siedenden Toluols an Filtern der Bauformen Panel-Filter und V-Zelle waren dagegen durchaus mit denen an den Medien bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit vergleichbar.

Für die schwieriger zu handhabende Testsubstanz Ammoniak wurde an einem Taschenfilter und einer V-Zelle eine zufriedenstellende Übertragbarkeit festgestellt. Tests an einer weiteren V-Zelle bestätigten diese Beobachtung jedoch nicht.

Bei der Testsubstanz Stickstoffdioxid ist die katalytische Reduktion zu Stickstoffmonoxid an Aktivkohle ein zusätzlicher Parameter, der die Auswertung von Versuchen erschwert. Der Vergleich der Ergebnisse von Tests an den drei Filterbauformen V-Zelle sowie Taschen- und Kartuschenfilter und den entsprechenden Medien zeigt, dass Medientests zur ersten Abschätzung der Filterleistung verwendbar sind.

Die Vergleichbarkeit der Abscheidung von Schwefeldioxid und Ozon wurde jeweils an den drei Filterbauformen V-Zelle sowie Taschen- und Kartuschenfilter und den zugrundeliegenden Medien mit zufriedenstellendem Ergebnis überprüft. Die an den Medien bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit ermittelten Durchbruchkurven stimmten gut mit denen der Filter überein.

2.3 AP 2 - Einfluss der relativen Feuchte auf Testergebnisse nach DIN EN ISO 10121

2.3.1 Versuche an adsorptiven Filtermedien

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der relativen Feuchte auf das Abscheideverhalten von Toluol, SO₂, NH₃ und Ozon an adsorptiven Filtermedien für raumluftechnische Anwendungen untersucht.

2.3.1.1 Wasserdampf

Um die Auswirkung einer Variation der relativen Feuchte auf die Abscheideleistung und -kapazität unterschiedlicher Medien zu untersuchen, wurden zunächst Wasserdampfisothermen aufgenommen. Die Ermittlung der Isothermen erfolgte dabei gravimetrisch. Hierzu wurde das Medium mit konditionierter Luft bei konstanter relativer Feuchte sowie 23 °C durchströmt, das Medium nach definierten Zeitintervallen dem Adsorber entnommen und auf einer Feinwaage gewogen. Im Anschluss wurde das Medium wieder in den Adsorber eingelegt und der Versuch fortgesetzt. In der folgenden Abbildung 74 sind exemplarisch die an den Medien des Herstellers B ermittelten Massen des adsorbierten Wassers bezogen auf die Aktivkohlemasse des Mediums als Funktion der Versuchszeit dargestellt.

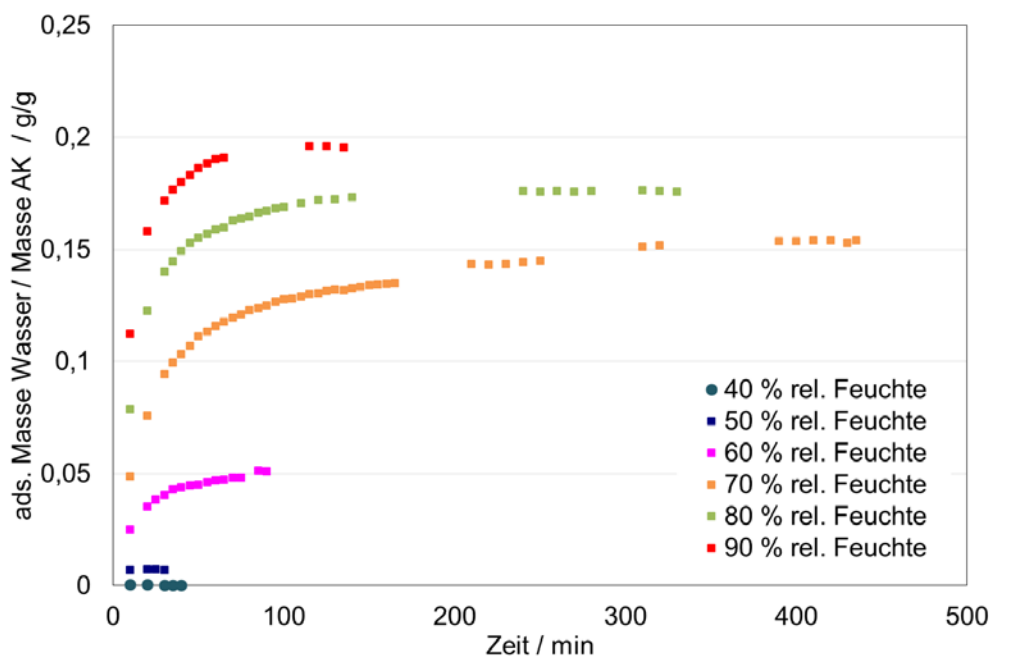


Abbildung 74: Gravimetrisch bestimmte adsorbierte Wassermassen pro Aktivkohlemasse bei unterschiedlichen relativen Feuchten und 23 °C an Medien des Herstellers B

In der nachfolgenden Abbildung 75 sind die Temperaturdifferenzen zwischen der Roh- und Reingasseite als Funktion der Versuchszeit dargestellt, welche bei der Adsorption von Wasserdampf auf Medien des Herstellers B bei relativen Feuchten von 50 %, 70 % und 90 % und 23 °C mit Hilfe von Thermoelementen vom Typ T aufgezeichnet wurden. Da bei der Adsorption von Wasser Wärme freigesetzt wird, steigt analog zu der Zunahme der adsorbierten Wassermasse (bei 90 % > 70 % > 50 % r. F.) die Temperatur auf der Reingasseite. Bei der Annäherung an den adsorptiven Gleichgewichtszustand geht die Temperaturdifferenz zwischen der Roh- und Reingasseite gegen Null.

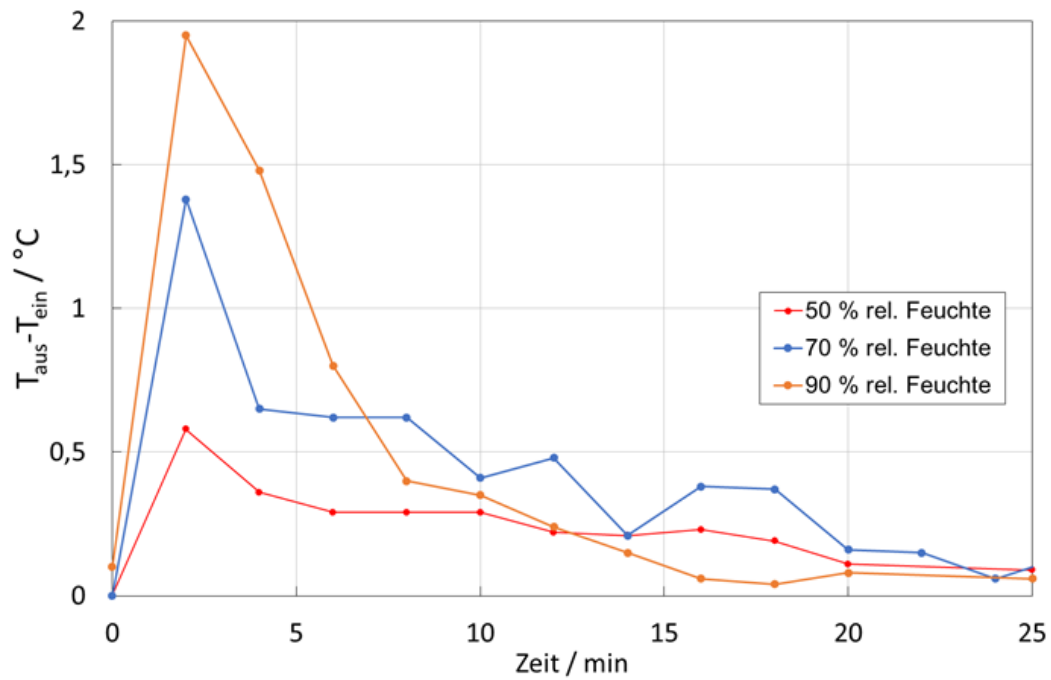


Abbildung 75: Temperaturdifferenz zwischen der Roh- und Reingasseite bei der Einkomponentenadsorption von Wasser bei unterschiedlichen relativen Feuchten und 23 °C an Medien des Herstellers B

Die gravimetrische Bestimmung des adsorbierten Wassers wurde an drei Medien vorgenommen, welche im Rahmen der Validierung des Feuchteinflusses auf das Abscheideverhalten zum Einsatz kamen (Medien der Hersteller A, B und C). In der Abbildung 76 sind die gemessenen Wasserdampfisothermen dargestellt.

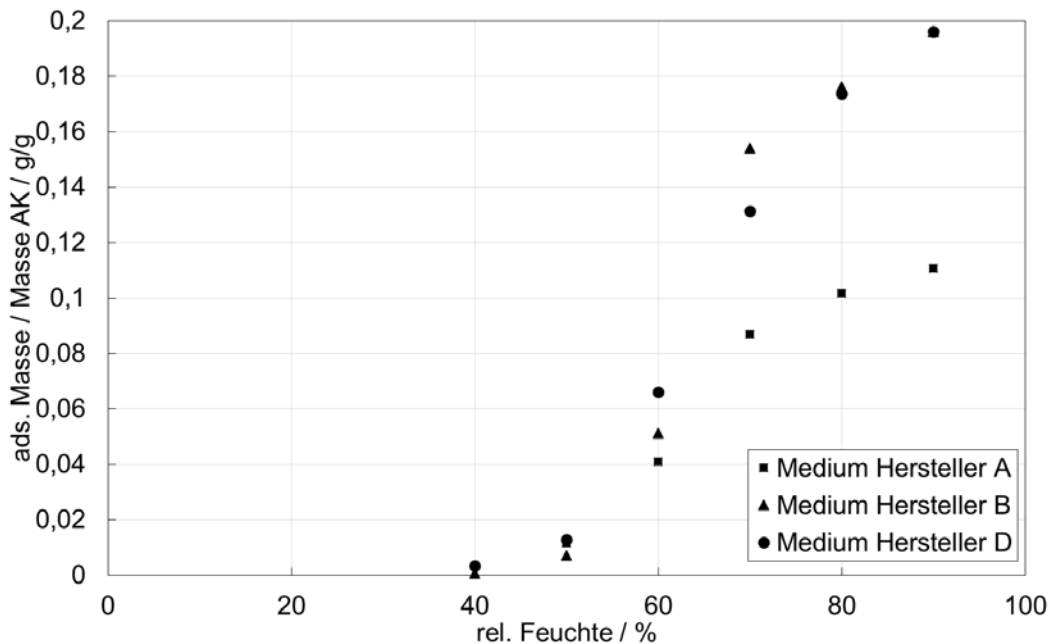


Abbildung 76: Adsorptionsisothermen von Wasserdampf bei 23 °C an Medien der Hersteller A, B und D

Die ermittelten Wasserdampfisothermen in Abbildung 76 weisen die Form der Isothermen vom Typ V nach IUPAC auf [Thommes et al., 2015]. Dieses Adsorptionsverhalten in Abhängigkeit der relativen Feuchte stimmt mit den Literaturwerten für die Adsorption von Wasser an hydrophoben Aktivkohlen überein [Thommes et al., 2015]. Die Form der Isothermen kommt dadurch zustande, dass es bei relativen Feuchten oberhalb von etwa 50 % zunächst verstärkt zur Bildung von Wassermolekülclustern über Wasserstoffbrückenbindungen an funktionellen Oberflächengruppen kommt. Bei weiterer Zunahme der relativen Feuchte findet je nach Porenweitenverteilung in mehr oder weniger starker Ausprägung eine Kapillarkondensation statt [Bandosz, 2006; Do und Do, 2000; Thommes et al., 2015].

2.3.1.2 Toluol

In Abbildung 77 sind die Durchbruchskurven von Toluol bei 9 ppm Rohgaskonzentration an Ausschnitten des Mediums B bei 23 °C und unterschiedlicher relativer Feuchte zu sehen. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit mindestens einer Wiederholung. Die Abnahme der Abscheideleistung gegenüber Toluol bei zunehmender relativer Feuchte wird deutlich. Das beobachtete Verhalten ist die Folge einer konkurrierenden Adsorption des Wassers und des schlecht wasserlöslichen Toluols (0,52 g/L bei 20 °C [GESTIS, 2017]). Da die adsorbierte Wassermenge, wie aus der Wasserdampfisotherme in Abbildung 76 ersichtlich, in dem Bereich zwischen 50 und 90 % relativer Feuchte deutlich zunimmt, nimmt die Kapazität der Aktivkohle gegenüber Toluol ab. Obwohl laut einiger wissenschaftlicher Veröffentlichungen davon auszugehen ist, dass die Adsorption von Aromaten wie Toluol überwiegend an anderen Oberflächenanteilen der Aktivkohle stattfindet als die Adsorption von Wasser, werden durch das adsorbierte Wasser Bereiche der Aktivkohleoberfläche für das Toluol versperrt [Müller und Gubbins, 1998; Bandosz, 2006].

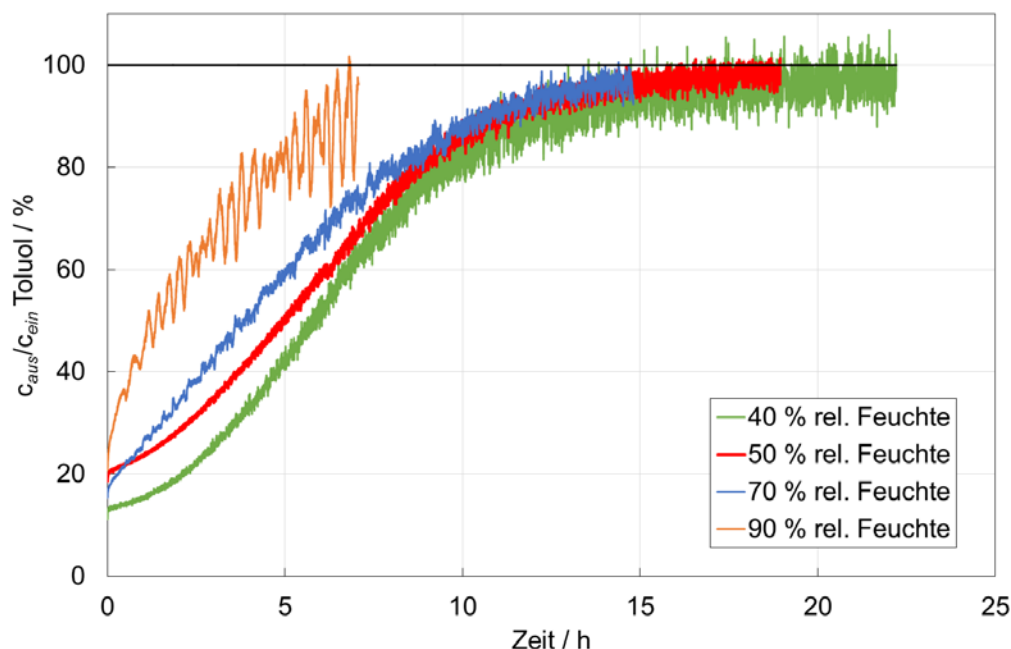


Abbildung 77: Durchbruchskurven von Toluol an adsorptiven Filtermedien B bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

Die Durchbruchkurvenform bei 70 % und 23 °C in Abbildung 77 ändert sich im Vergleich zu denen bei 40 % und 50 % r. F. geringfügig. Zwischen den Durchbruchkurven bei 90 % r. F. und denen bei niedrigeren relativen Feuchten ist der Unterschied in der Durchbruchkurvenform jedoch signifikant. Erstere hat einen zur Zeitachse konvexen Verlauf. Ferner sind innerhalb der Durchbruchkurve bei 90 % r. F. im Vergleich zu den Durchbruchkurven bei niedrigerer Feuchte eine deutliche Fluktuation erkennbar. Letztere ist wahrscheinlich auf eine leichte regelungstechnisch bedingte Feuchteschwankung von etwa ± 1 % relativer Feuchte zurückzuführen. Zwar lag die Feuchteschwankung in allen dargestellten Versuchen in dem genannten Bereich, doch ist der Einfluss auf das Ad- und Desorptionsverhalten bei 90 % relativer Feuchte besonders stark ausgeprägt. Als Ursache dieses Sachverhaltes werden sowohl Verdrängungs- als auch Kondensations- bzw. Kapillarkondensationseffekte vermutet. Da die Fluktuationen mit zunehmendem Durchbruch und somit höherer Beladung stärker werden, ist davon auszugehen, dass die Verdrängungseffekte von Toluol infolge der Wasseradsorption bei höheren Beladungen stärker ausgeprägt sind als bei niedrigeren Beladungen.

Die Abnahme der Adsorptionskapazität für Toluol des aktivkohlebasierten Mediums B mit zunehmender relativer Feuchte wird in der Abbildung 78 anhand der Beladungsverläufe bei Feuchtevariation veranschaulicht.

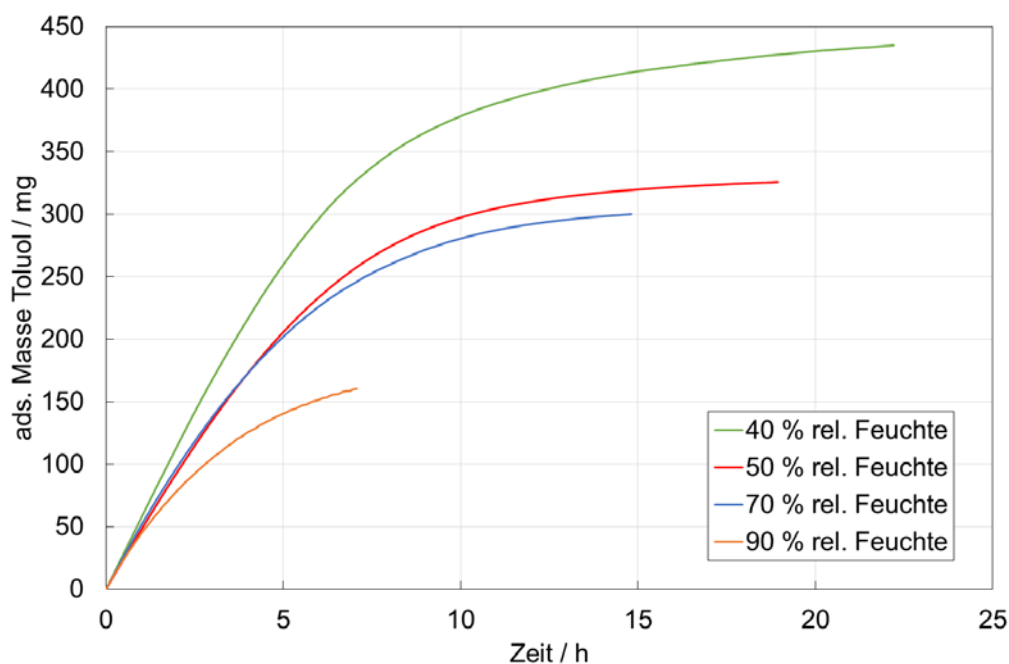


Abbildung 78: Beladungsverläufe von Toluol an adsorptiven Filtermedien B bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

Die Verläufe der Reingaskonzentration des Toluols aus Desorptionsversuchen bei unterschiedlichen Konzentrationen, welche im Anschluss an die oben dargestellten Adsorptionsversuche bei 9 ppm erfolgten, sind in Abbildung 79 dargestellt. Bei dem Vergleich dieser Verläufe wird ersichtlich, dass bei 90 % relativer Feuchte die geringste Toluolkonzentration auf der Reingasseite detektiert wird. Dies hängt mit der oben beschriebenen, geringeren Adsorptionskapazität gegenüber Toluol bei steigender relativer Feuchte zusammen (Abbildung 78). Des Weiteren weist der Konzentrationsverlauf während der Desorption bei 90 % r. F. analog zu der

entsprechenden Durchbruchskurve die oben diskutierten Fluktuationen auf, welche mit abnehmender Beladung kleiner werden.

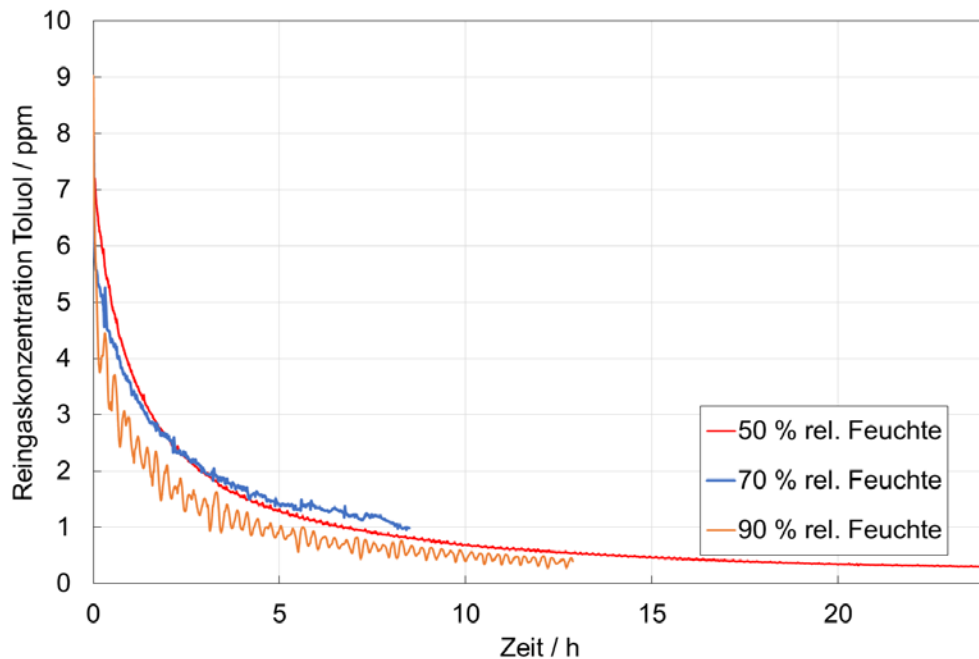


Abbildung 79: Konzentrationen von Toluol auf der Reingasseite bei Desorptionsversuchen an Filtermedien B nach einer Adsorption bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

Die Variation der relativen Feuchte bei 23 °C wurde zudem an den Filtermedien des Herstellers A vorgenommen. Zunächst sind in der folgenden Abbildung 80 die Durchbruchskurven von Toluol an Medien des Herstellers A bei 50 %, 70 % und 90 % relativer Feuchte und 23 °C zu sehen. Analog zu den am Medium B ermittelten Ergebnissen, erfolgte der Durchbruch bei höherer relativer Feuchte schneller als bei niedrigerer. Auch nahm die Fluktuation innerhalb der Durchbruchskurve mit zunehmender relativer Feuchte zu. Jedoch ist im Vergleich zu den oben dargestellten Durchbruchskurven am Medium B keine solch signifikante Veränderung der Durchbruchkurvenform mit zunehmender relativer Feuchte zu sehen. Folglich war die Verschlechterung der Abscheideleistung des Toluols am Medium A bei einer Feuchteerhöhung von 70 % auf 90 % weniger stark ausgeprägt als dies am Medium B der Fall war. Diesen Sachverhalt spiegelt auch die Wasserdampfisotherme des Mediums A im Vergleich zu dem Medium B (Abbildung 76) wider. Bei den relativen Feuchten von 70 % und 90 % bei 23 °C adsorbiert das Medium A weniger Wasser als das Medium B.

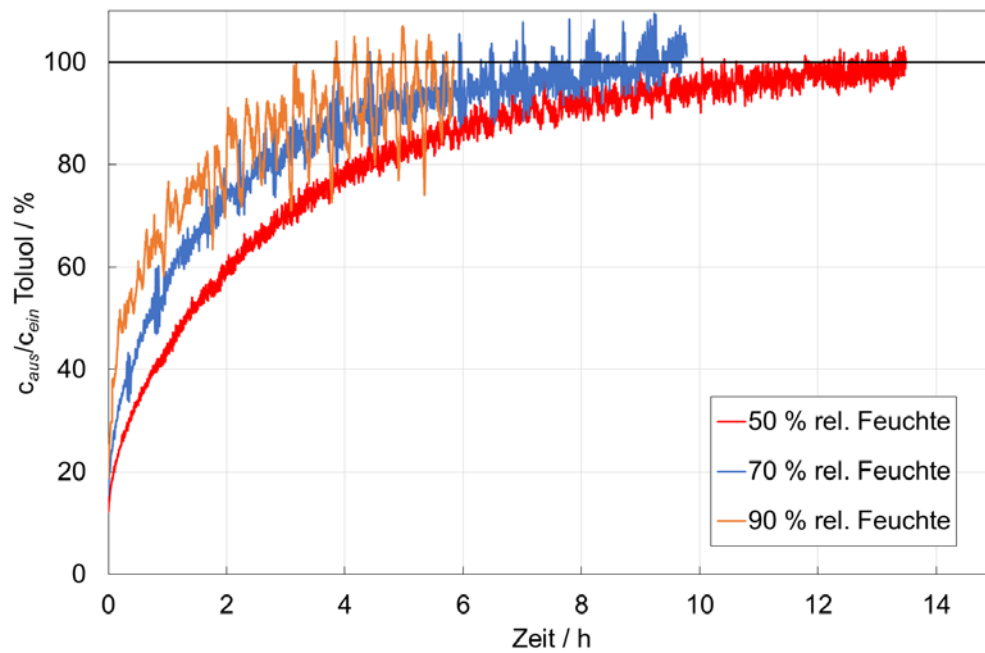


Abbildung 80: Durchbruchkurven von Toluol an adsorptiven Filtermedien A bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

In Abbildung 81 sind die aus den Durchbruchkurven am Medium A (Abbildung 80) berechneten Beladungsverläufe dargestellt. Wie auch am Medium B nimmt die Kapazität des Adsorbens gegenüber Toluol mit zunehmender relativer Feuchte ab.

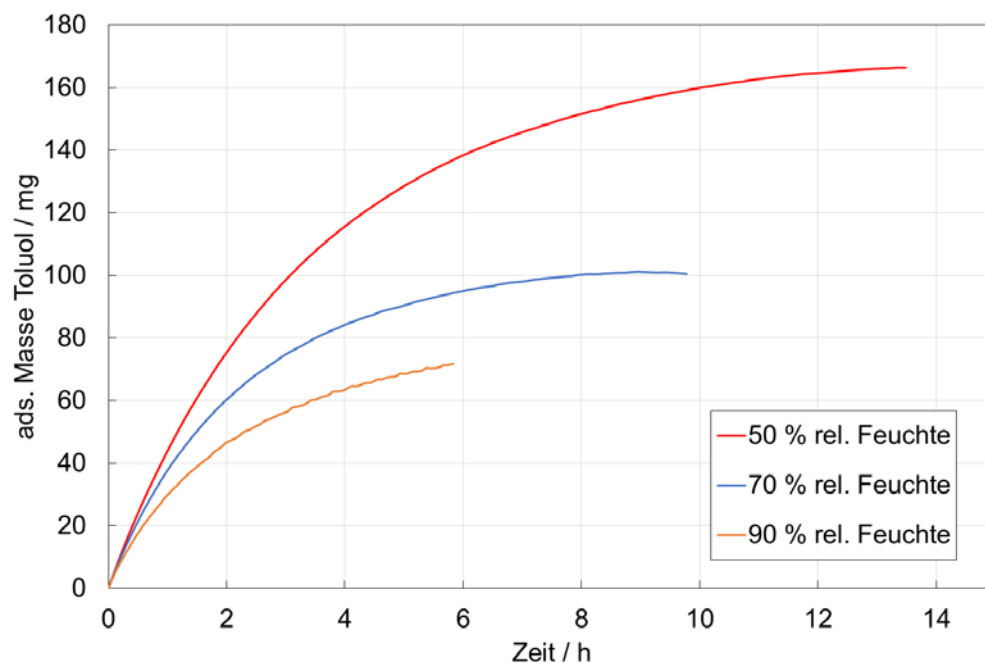


Abbildung 81: Beladungsverläufe von Toluol an adsorptiven Filtermedien A bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

2.3.1.3 Schwefeldioxid

Die folgende Abbildung 82 zeigt Durchbruchkurven von SO_2 an chemisorptiven Medien des Herstellers D bis zu einem Durchbruch von etwa 85 % bei den relativen Feuchten von 50 %, 70 % und 85 % und 23 °C (Mittelwerte aus zwei Versuchen). Letztere FeuchteEinstellung wurde anstelle eines Wertes von 90 % r. F. gewählt, da der verwendete Gasanalysator nur unterhalb dieses Wertes betrieben werden darf, um Schäden der Analyseeinheit infolge von Kondensation zu vermeiden. Die Versuchsparameter waren ferner eine SO_2 -Konzentration von 9 ppm und eine Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s.

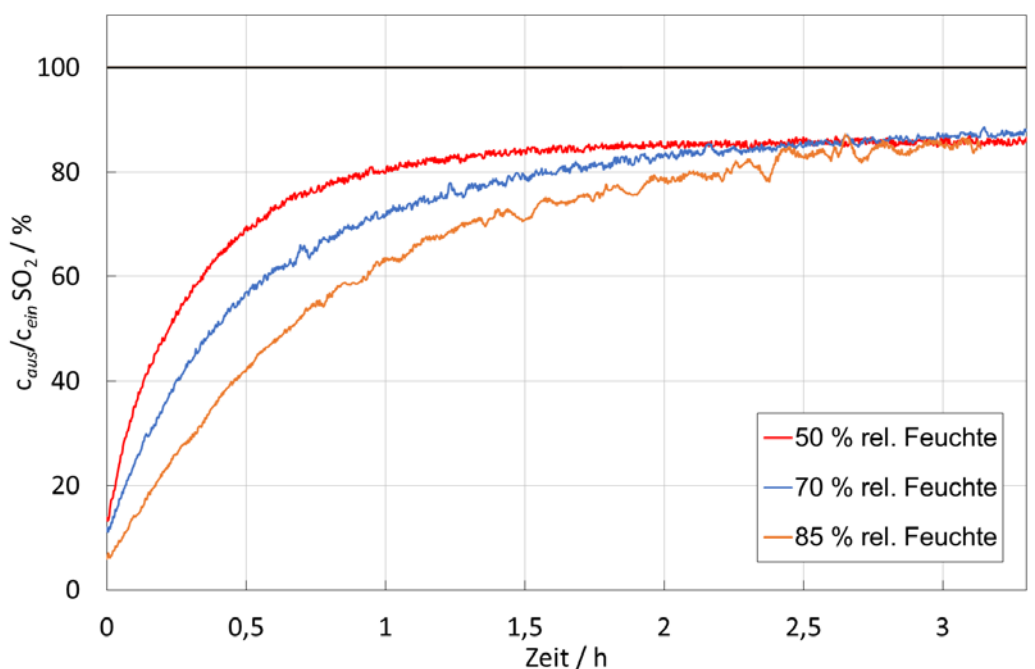


Abbildung 82: Durchbruchkurven von SO_2 an chemisorptiven Filtermedien des Herstellers D bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s

Die Untersuchung des Einflusses der relativen Feuchte auf das Abscheideverhalten von SO_2 anhand der in Abbildung 82 dargestellten Messdaten ergibt, dass die Abscheideleistung des SO_2 mit zunehmender relativer Feuchte von 50 % r. F. zu 85 % r. F. verbessert wird. Ein äquivalentes Verhalten wurde auch von ZHANG [2009] bei der Sorption von SO_2 bei einer Konzentration von 30 ppm an Aktivkohle beobachtet und kann auf eine Reaktion des gut wasserlöslichen SO_2 (112,7 g/L bei 20 °C [GESTIS, 2017] in Anwesenheit von Sauerstoff mit dem adsorbierten Wasser zu schwefliger Säure (H_2SO_3) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) zurückgeführt werden. Da, wie der Wasserdampfisotherme in Abbildung 76 entnommen werden kann, oberhalb von 50 % r. F. mit zunehmender Feuchte eine deutliche Zunahme der adsorbierten Masse Wasser zu verzeichnen ist, steht bei höherer relativer Feuchte eine größere Menge Wasser für eine Reaktion des SO_2 zur Verfügung. Die Verbesserung der SO_2 -Abscheidung mit zunehmender relativer Feuchte wird zudem an der Erhöhung der SO_2 -Kapazität der Medien des Herstellers D (Abbildung 83) deutlich.

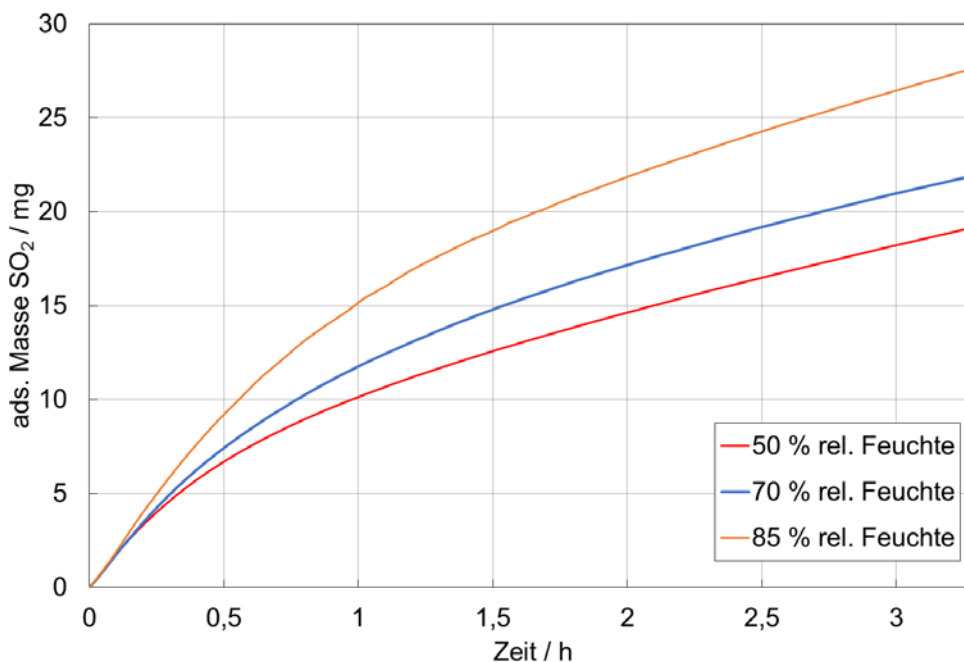


Abbildung 83: Beladungsverläufe von SO₂ an chemisorptiven Filtermedien D bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s

Analog zu den Durchbruchkurven ist an den SO₂-Beladungsverläufen der Medien D in Abbildung 83 erkennbar, dass die Kapazität der Medien gegenüber SO₂ mit einer Erhöhung der relativen Feuchte zunimmt. Des Weiteren ist Abbildung 83 eine stärkere Zunahme der Kapazität bei einer Feuchteerhöhung von 70 % r. F. auf 90 % r. F. zu erkennen, als bei 50 % r. F. auf 70 % r. F.

2.3.1.4 Ammoniak

In Abbildung 84 sind die Durchbruchkurven durch das Medium J mit 9 ppm Ammoniak bei 23 °C, einer Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s und verschiedener relativer Luftfeuchte dargestellt, die in einzelnen Versuchen aufgenommen wurden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven bei gleichen Bedingungen zeigen größere Abweichungen voneinander, was, wie bereits in Abschnitt 2.2.2.4 beschrieben, auf die Inhomogenität des Mediums zurückzuführen ist. Ersichtlich ist aber, dass mit steigender Feuchte weniger NH₃ auf dem Medium abgeschieden wird. Die mit den Messwerten und einer Massenbilanz berechneten adsorbierten Massen führen nach Bezug auf die Sorbensmasse zu folgenden erzielten mittleren Gleichgewichtsbeladungen (Tabelle 6):

Tabelle 6: Gleichgewichtsbeladungen bei 9ppm NH₃ am Medium D bei unterschiedlichen relativen Feuchten und 23 °C

	50 % r. F.	70 % r. F.	90 % r. F.
Beladung / %	10,44	7,8	7,07

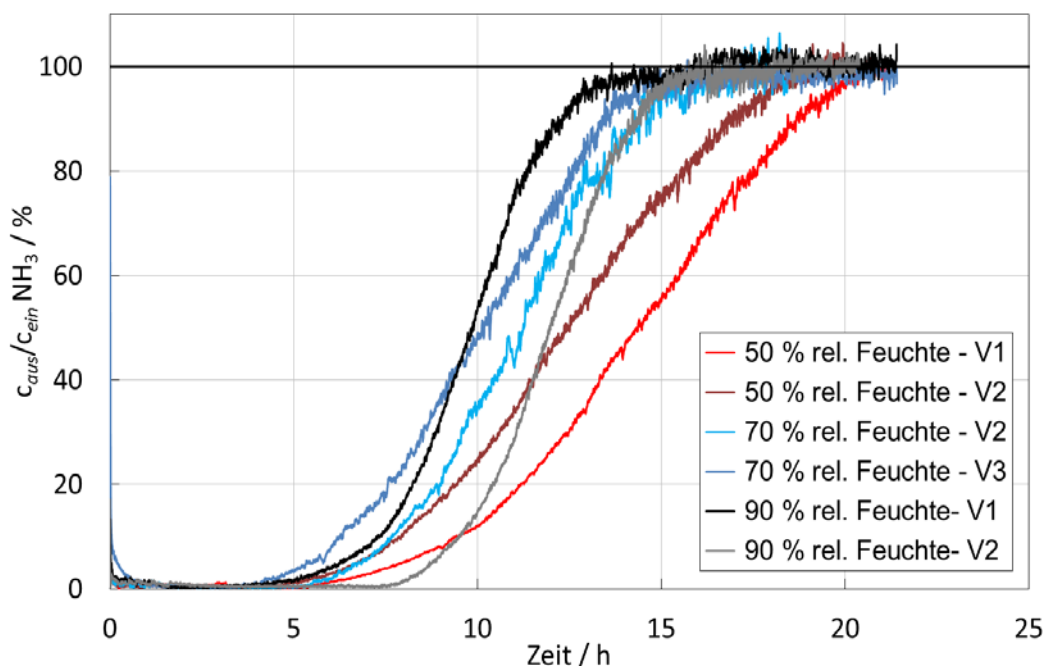
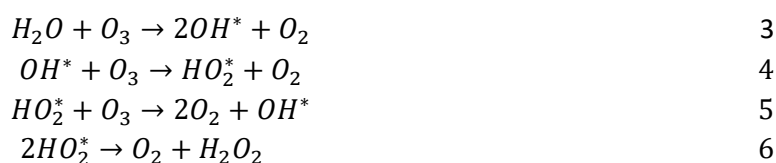


Abbildung 84: Durchbruchkurven von NH₃ am Ionenauschermedium J bei 9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s

Zur Abscheidung des NH₃ mit Hilfe eines Ionenauschers ist das Vorliegen einer Wasserphase auf dem Ionenauscher notwendig, innerhalb welcher das gut wasserlösliche Ammoniak (541 g/L bei 20 °C [GESTIS, 2017] zunächst gelöst wird, sodass anschließend ein Ionentausch zwischen den in der sorbierten Wasserphase gelösten Ionen und denjenigen an der Feststoffoberfläche stattfinden kann. Mit zunehmender relativer Feuchte wird eine Erhöhung der Wasserfilmdicke auf dem Ionenauscher angenommen. Diese könnte zum Anstieg des Stofftransportwiderstandes des gelösten NH₃ in der Wasserphase oder zur Verschlechterung des Stoffüberganges aus der Gas- in die Flüssigphase führen.

2.3.1.5 Ozon

Abbildung 85 zeigt die Durchbruchkurven von Ozon an Filtermedien B und Abbildung 86 die aus den Durchbruchkurven berechneten Massen des abgeschiedenen Ozons bei einer Variation der relativen Feuchte bei 23 °C, 0,9 ppm Ozon und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s. Aus beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass die Abscheideleistung des Mediums gegenüber Ozon bei einer Feuchteerhöhung von 50 % r. F auf 70 % r. F. wesentlich verbessert wird, was auf eine Reaktion des Ozons mit dem adsorbierten Wasser zurückgeführt wird. Dieses Verhalten wurde auch von anderen Arbeitsgruppen beobachtet, wobei der folgende mehrstufige Reaktionsmechanismus der Dekomposition des Ozons mit Wasser vorgeschlagen wurde [Kasprzyk-Hordern et al., 2003; Lee und Davidson, 1999; Viner et al., 1992]:



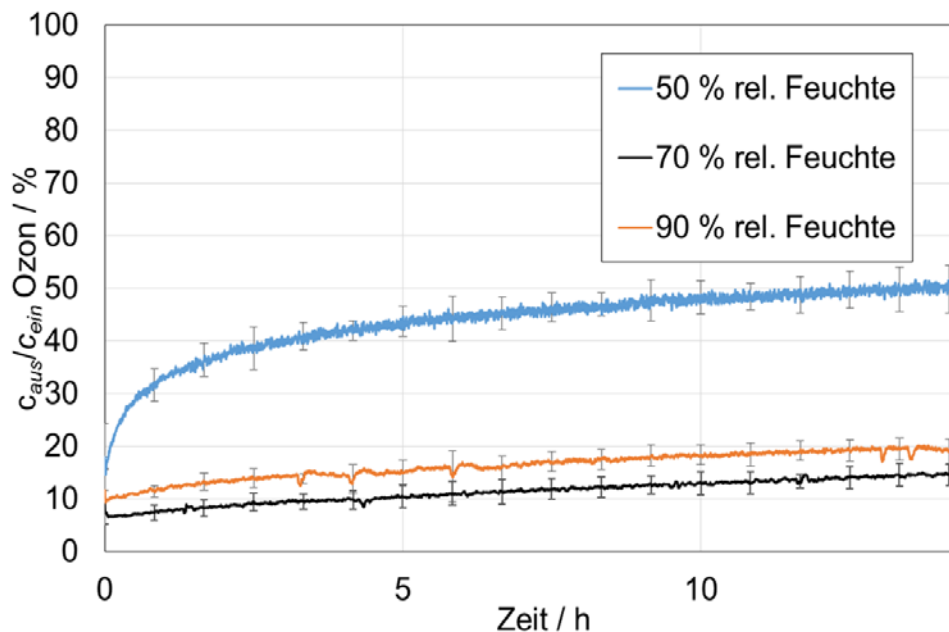


Abbildung 85: Durchbruchkurven von Ozon an Medien des Herstellers B bei 0,9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

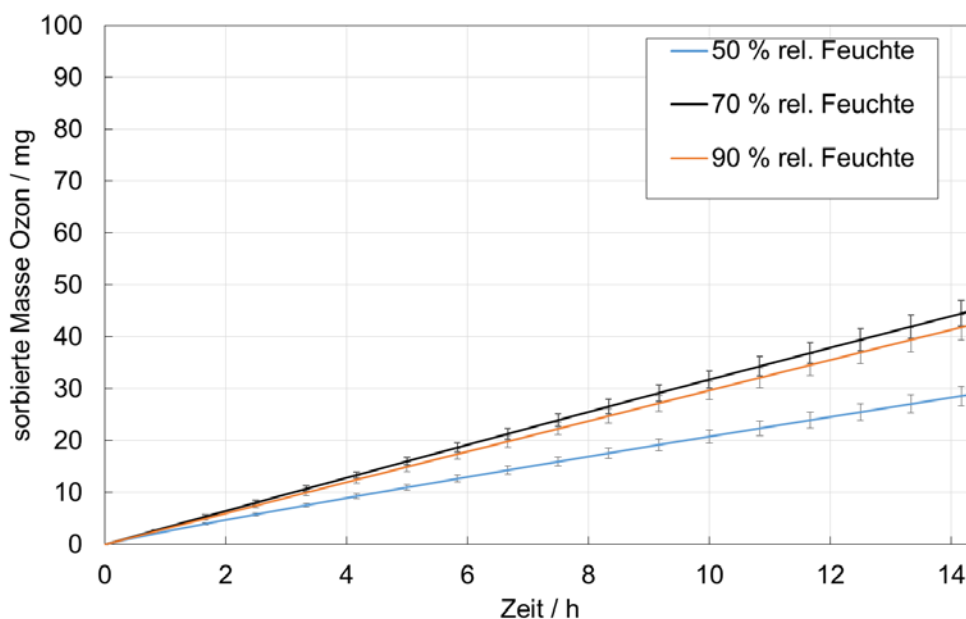


Abbildung 86: Massen des abgeschiedenen Ozons an adsorptiven Filtermedien B bei 0,9 ppm, 23 °C, unterschiedlichen relativen Feuchten und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s

Die geringfügige Verschlechterung der Abscheideleistung bei 90 % relativer Feuchte im Vergleich zu 70 % relativer Feuchte ist vermutlich die Folge einer verstärkten Kapillarkondensation bei der höheren Feuchte. Infolge einer Kapillarkondensation in Porenverengungen können Teile des Porensystems blockiert werden, sodass eine kleinere Oberfläche für die Abscheidung des Ozons zur Verfügung steht und folglich die Effizienz der Ozonabscheidung abnimmt. Dieser Sachverhalt wurde auch von LEE und DAVIDSON [1999] vermutet.

2.3.2 Versuche an konfektionierten Raumluftfiltern

Der Einfluss der Luftfeuchte auf die Adsorption von Toluol, Schwefeldioxid, Ammoniak und Ozon wurde mit Einzelversuchen in Anlehnung an die DIN EN ISO 10121-2 bei 50 % r. F. und 70 % r. F. auch an Filtern untersucht. Wie im Folgenden für die einzelnen Testsubstanzen dargestellt wird, unterstützen die Ergebnisse, die an Filtern gewonnen wurden, diejenigen, die an Medien ermittelt wurden.

2.3.2.1 Toluol

Die Versuche mit Toluol wurden an V-Zellen des Typs V4 mit herkömmlicher, nicht imprägnierter Aktivkohle (Medium G) und einem Nennvolumenstrom von 3400 m³/h durchgeführt. Die weiteren Versuchsbedingungen waren ein Testvolumenanteil von 9 ppm Toluol, 23 °C sowie 50 % und 70 % r. F. Abbildung 87 zeigt die Durchbruchskurven. Genau wie bei den Medientests erfolgt der Durchbruch von Toluol bei höherer relativer Feuchte früher und der Verlauf der Durchbruchskurve ist nicht mehr s-förmig. Die starken, periodisch auftretenden Schwankungen in der Durchbruchskurve bei 70 % r. F. sind auf Schwankungen der relativen Feuchte um ± 5 % zurückzuführen, die durch die Betriebsführung des Befeuchters bedingt werden. Die Schwankungen verdeutlichen den Einfluss der Feuchte auf die Adsorption des physisorbierten Toluols.

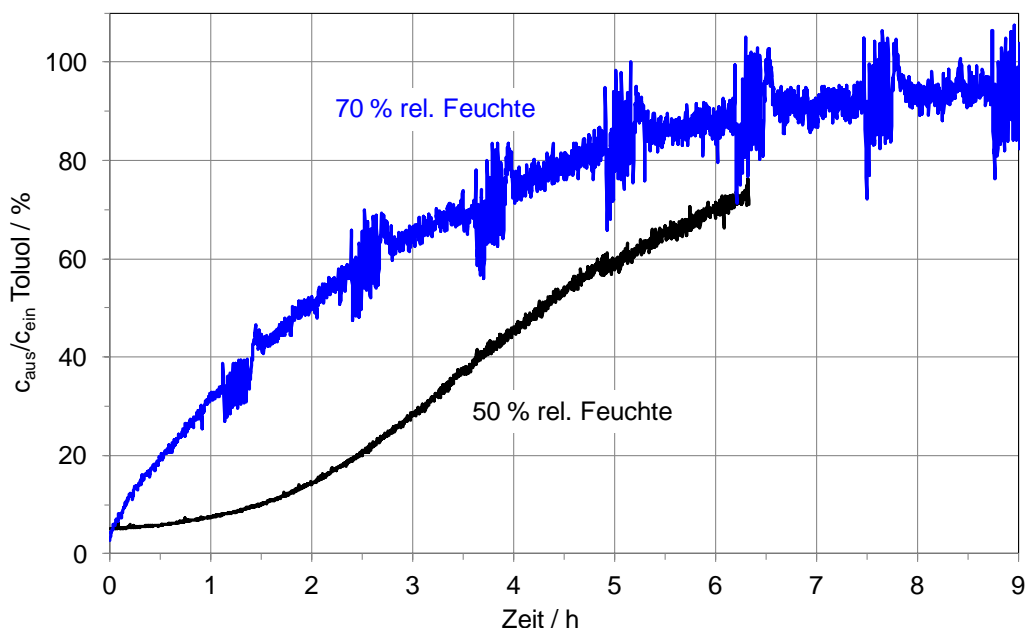


Abbildung 87: Durchbruchskurven von Toluol an V-Zelle V4 bei 50 % r. F. und 70 % r. F. und 23 °C ($c_{\text{ein}} = 9 \text{ ppm}$, 3400 m³/h)

2.3.2.2 Schwefeldioxid

Die Versuche mit Schwefeldioxid wurden an V-Zellen des Typs V7 (Medium D mit K_2CO_3 -imprägnierter Aktivkohle) mit einem Nennvolumenstrom von $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Die weiteren Versuchsbedingungen waren ein Testvolumenanteil von 9 ppm SO_2 , 23 °C sowie 50% und 70% r. F. Abbildung 88 zeigt die Durchbruchkurven. Genau wie bei den Medientests ist die Abscheidung von SO_2 bei höherer relativer Feuchte besser und der Durchbruch von SO_2 geringer. Wie bei den Medientests wird das darauf zurückgeführt, dass es bei höherer Feuchte gemäß dem s-förmigen Verlauf der Wasserdampfisotherme zu einer stärkeren Abscheidung von Wasser in den Poren der Aktivkohle kommt, wodurch u. a. durch die Bildung von schwefliger Säure bzw. Schwefelsäure vermehrt SO_2 abgeschieden wird.

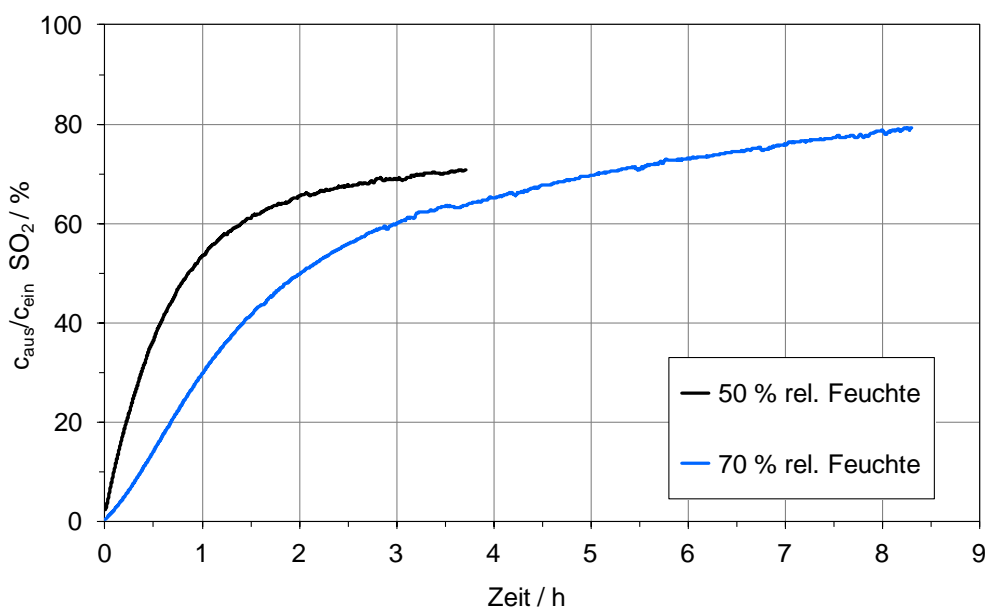


Abbildung 88: Durchbruchkurven von SO_2 an V-Zelle V7 bei 50% r. F. und 70% r. F. und 23 °C ($c_{\text{ein}} = 9 \text{ ppm}$, $3400 \text{ m}^3/\text{h}$)

2.3.2.3 Ammoniak

Die Versuche mit Ammoniak wurden an V-Zellen des Typs V8 (Medium J, Ionentauscher) und einem Nennvolumenstrom von $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Die weiteren Versuchsbedingungen waren ein Testvolumenanteil von 9 ppm NH_3 , 23 °C sowie 50% und 70% r. F. Abbildung 89 zeigt die Durchbruchkurven. Das scheinbare Ergebnis ist, dass die Abscheidung von NH_3 bei höherer relativer Feuchte besser ist und der Durchbruch von NH_3 später erfolgt. Das steht zunächst im Widerspruch zu dem in Abschnitt 2.3.1.4 dargestellten Ergebnis, das aus den mittleren Beladungen abgeleitet wurde, die bei unterschiedlichen Feuchten an Medienproben ermittelt wurden. Die Betrachtung der einzelnen Medien-Durchbruchkurven in Abbildung 84 zeigt jedoch, dass bei gleicher Feuchte getestete Medien sehr große Abweichungen aufweisen und z. B. eine Durchbruchkurve bei 90% r. F. auch günstiger verläuft als eine bei 50% r. F. aufgenommene. Bei den Medientests wurde die Streuung auf die sichtbar inhomogene Verteilung des Ionentauscher auf den einzelnen Medienausschnitten zurückgeführt. Es ist zu vermuten, dass auch das in den Filtern verbaute Medium Inhomogenitäten aufweist. Die Aussagekraft der Ergebnisse aus einzelnen Filtertests bei verschiedener Feuchte sollte in diesem Kontext kritisch betrachtet werden.

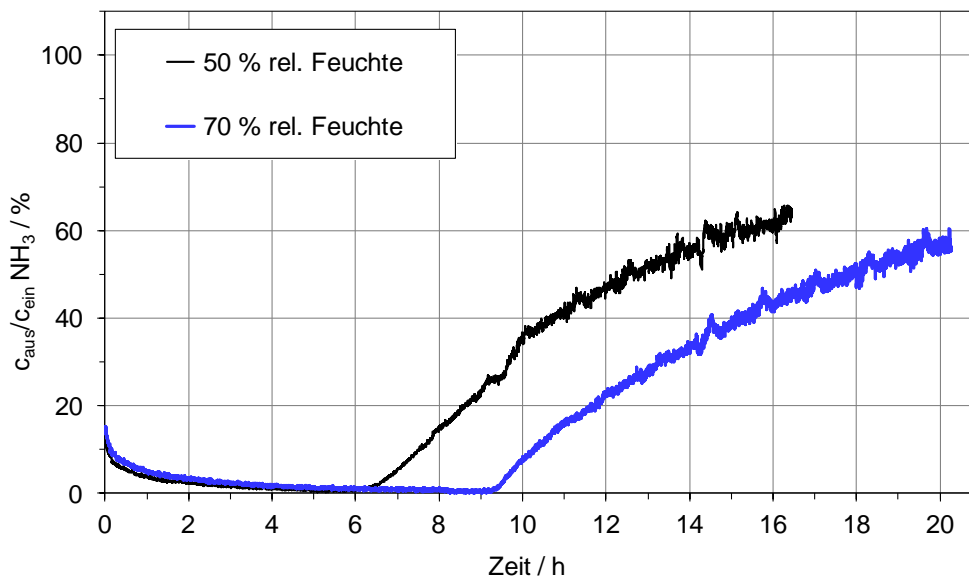


Abbildung 89: Durchbruchkurven von NH_3 an V-Zelle V8 bei 50 % r. F. und 70 % r. F. und 23 °C, ($c_{\text{ein}} = 9 \text{ ppm}$, 3400 m^3/h)

2.3.2.4 Ozon

Die Versuche mit Ozon wurden an V-Zellen des Typs V10 (Medium H mit KI-imprägnierter Aktivkohle) und einem Nennvolumenstrom von 3400 m^3/h durchgeführt. Die weiteren Versuchsbedingungen waren ein Testvolumenanteil von 0,9 ppm O_3 , 23 °C sowie 50 % und 70 % r. F. Die Abbildung 90 zeigt die Durchbruchkurven. Die Abscheidung von O_3 ist bei höherer relativer Feuchte besser und der Durchbruch geringer, was auf eine Reaktion des Ozons mit dem adsorbierten Wasser zurückgeführt wird. Dieses Ergebnis geht in die gleiche Richtung wie das der Medientests (siehe Abbildung 85), die allerdings an Medium B durchgeführt wurden.

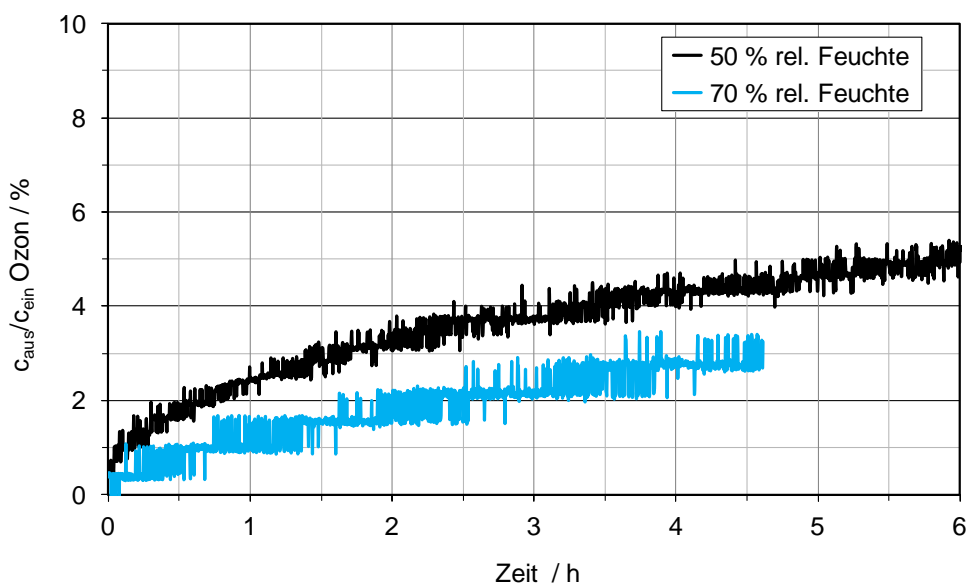


Abbildung 90: Durchbruchkurven von O_3 durch die V-Zelle V10 bei 50 % r. F. und 70 % r. F. ($c_{\text{ein}}=0,9 \text{ ppm}$, 23 °C, 3400 m^3/h)

2.3.3 Fazit zum Einfluss der relativen Feuchte

Zusammenfassend können hinsichtlich des Einflusses der relativen Feuchte auf die Physi- und Chemisorption der untersuchten Adsorptive folgende Aussagen gemacht werden:

- Bei zunehmender relativer Feuchte wird die Physisorption von Toluol beeinträchtigt. Gründe hierfür sind die sprunghaft ansteigende Adsorption von Wasser an Aktivkohle ab ca. 50 % relativer Feuchte, die damit verbundene geringere innere Oberfläche der Aktivkohle, die der Adsorption von Toluol zur Verfügung steht und die geringe Wasserlöslichkeit von Toluol.
- Die Adsorption von Schwefeldioxid wird von zunehmender relativer Luftfeuchte begünstigt, weil das abgeschiedene Wasser in den Poren die Reaktion von zunächst physisorbiertem SO_2 zur Bildung von schwefliger Säure (H_2SO_3) bzw. Schwefelsäure (H_2SO_4) fördert.
- Der Einfluss der relativen Feuchte auf die Abscheidung von Ammoniak an einem Medium und Filtern, die Ionentauscher als Sorbens enthielten, konnte nicht mit Bestimmtheit ermittelt werden. Die Medientests deuten darauf hin, dass erhöhte Luftfeuchte eher zu einer sinkenden Abscheideleistung des untersuchten Ionentauschers für Ammoniak führt. Der Einfluss der Feuchte auf die Ammoniakabscheidung sollte systematisch an verschiedenen Sorbentien untersucht werden.
- Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Adsorption von Ozon bei einer Feuchteerhöhung von 50 % auf 70 % r. F. verbessert wird, jedoch bei weiterer Steigerung der Feuchte auf 90 % eine geringfügige Verschlechterung gegenüber der Situation bei 70 % auftritt. Zurückgeführt wird das darauf, dass es durch die erste Feuchteerhöhung zur gesteigerten Adsorption von Wasser kommt, mit dem das Ozon reagieren kann. Bei weiterer Feuchteerhöhung setzt jedoch verstärkt Kapillarkondensation des Wassers ein und reduziert die innere Oberfläche der Aktivkohle für Interaktionen mit Ozon.

2.4 AP 3 - Einfluss der Testgaskonzentration auf Testergebnisse nach DIN EN ISO 10121-1

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Testgaskonzentration auf das Adsorptions- bzw. Abscheideverhalten adsorptiver Filtermedien für raumluftechnische Anwendungen untersucht. Dazu wurden Durchbruchversuche an verschiedenen Filtermedien mit den vier Adsorptiven (n-Butan, Toluol, SO₂ und NH₃) durchgeführt. Die maximale untersuchte Konzentration betrug dabei 90 ppm (höherer Wert aus der DIN EN ISO 10121), welche deutlich oberhalb der bei raumluftechnischen Anwendungen zu erwartenden Konzentrationen liegt. Die Variation der Adsorptivkonzentration erfolgte in Zehnerpotenzschritten, wobei die minimale untersuchte Konzentration durch die Nachweisgrenzen der jeweiligen Messgeräte festgelegt wurde. Die Versuche mit n-Butan, Toluol und SO₂ im Konzentrationsbereich zwischen 90 ppm und einschließlich 0,9 ppm wurden an der FS1 (modifizierter Kfz-Filterprüfstand) vorgenommen. Messungen bei niedrigeren Konzentrationen als 0,9 ppm erfolgten an der FS2 (Tox-Prüfstand) ebenso wie alle Versuche mit NH₃.

Auf der Basis der Durchbruchkurven wurden mit Hilfe von Massenbilanzen die an den Medienproben abgeschiedenen Massen der einzelnen Testsubstanzen berechnet. Durch Bezug auf die Sorbensmasse in der jeweiligen Medienprobe wurde die Beladung ermittelt. Bei den Versuchen, bei denen der Gleichgewichtszustand (Durchbruch von 100 %) erreicht wurde, erfolgte mit Hilfe der Massenbilanz über dem Filtermedium (Gleichung 1) die Berechnung Isothermenwerte bei 23 °C. Weiterhin wurde überprüft, ob die Isothermenwerte mit gebräuchlichen Isothermengleichungen nach Langmuir oder Freundlich beschrieben werden können. Die Gleichung der Langmuir-Isotherme lautet

$$X = \frac{X_{mon} \cdot K_L \cdot c}{1 + K_L \cdot c} \quad 7$$

die der Freundlich-Isotherme

$$X = K_F \cdot c^n \quad 8$$

Dabei ist X die Beladung des Sorbens mit der abgeschiedenen Substanz, c die Konzentration oder der Volumenanteil des Adsorptivs, X_{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.

Beide Isothermengleichungen besitzen zwei Parameter, die durch Korrelation der Gleichung mit Isothermenwerten, die aus Versuchsergebnissen abgeleitet wurden, ermittelt werden können. Bei den hier dargestellten Ergebnissen wurde zur Korrelation die Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Verbindung mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet. Die Anpassungsgüte wurde mit dem reduzierten Chi-Quadrat bewertet, je kleiner dieser Wert ist, desto besser ist die Korrelation.

2.4.1 n-Butan

Bevor Durchbruchversuche bei verschiedenen Konzentrationen an den Prüfständen der FS1 und der FS2 durchgeführt wurden, wurde überprüft, ob Versuche, die unter gleichen Bedingungen an den beiden Prüfständen stattfanden, vergleichbare Ergebnisse lieferten. In der Abbildung 91 sind die an den beiden Prüfständen gemessenen Durchbruchkurven von n-Butan am Medium B bei 9 ppm, 23 °C, 50 % r. F. und 5,5 cm/s gegenübergestellt. Zu erkennen ist eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse an den zwei eingesetzten Prüfständen.

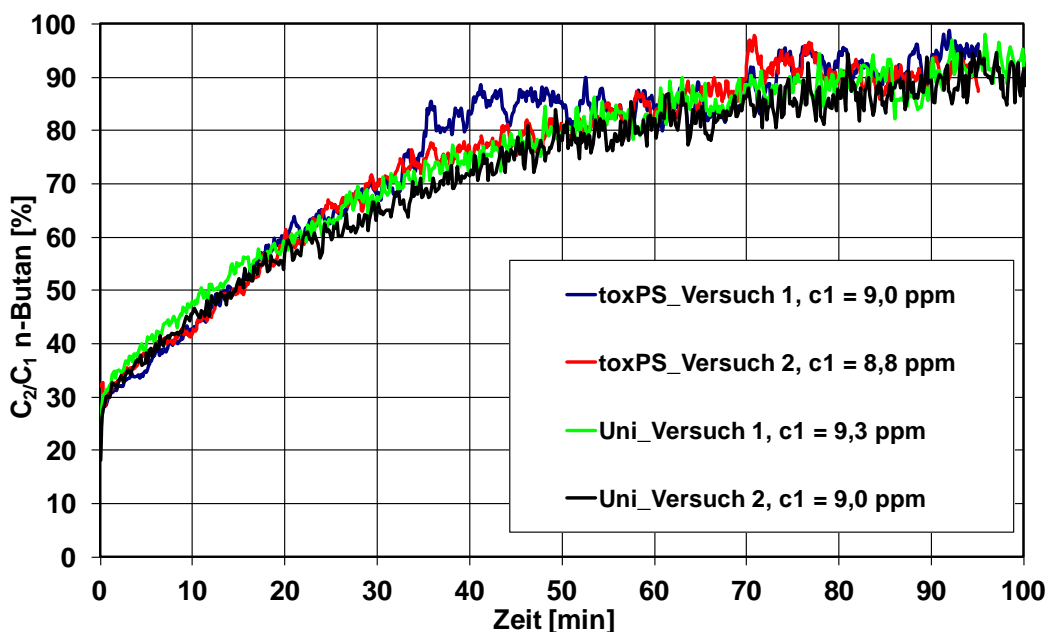


Abbildung 91: Durchbruchkurven von n-Butan an Medium B (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein n-Butan}} = 9 \text{ ppm}$, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Der Einfluss der Konzentration von n-Butan auf die Adsorptionskapazität wurde an Medium B untersucht, das als Adsorbens herkömmliche Aktivkohle enthält. In Abbildung 92 sind die Durchbruchkurven von n-Butan bei den Konzentrationen von 0,09 ppm, 0,9 ppm, 9 ppm und 90 ppm bei den oben beschriebenen Prüfbedingungen (Abbildung 91) dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Durchbruch bei niedrigeren Rohgaskonzentrationen langsamer erfolgt als bei höheren Konzentrationen und die Zeit bis zum Erreichen des Adsorptionsgleichgewichts mit abnehmender Konzentration zunimmt.

Abbildung 93 zeigt die mit Hilfe von Massenbilanzen auf der Basis der Durchbruchkurven ermittelten Isothermenwerte von n-Butan für das Medium B bei 23 °C und 50 % relativer Feuchte. Bei Volumenanteilen von 90 ppm n-Butan werden Gleichgewichtsbeladungen (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) von ca. 4 % erreicht. Ähnliche Werte für erzielbare Beladungen bei n-Butanvolumenanteilen von vergleichbarer Größe an herkömmlicher Aktivkohle wurden von SAGER [2013] berichtet. Die aus den Durchbruchversuchen abgeleiteten Isothermenwerte von n-Butan können gut mit der Isothermen-Gleichung nach Langmuir korreliert werden. Als Parameter für die Langmuir-Gleichung, bei Verwendung des Volumensanteils in der Einheit ppm und der Beladung in % (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) wurden $X_{\text{mon}} = 5,24$ und $K_L = 0,04$ ermittelt. Der Wert des reduzierten Chi-Quadrates lag bei 0,06. Die Isothermengleichung ist in Abbildung 93 als rote Kurve dargestellt.

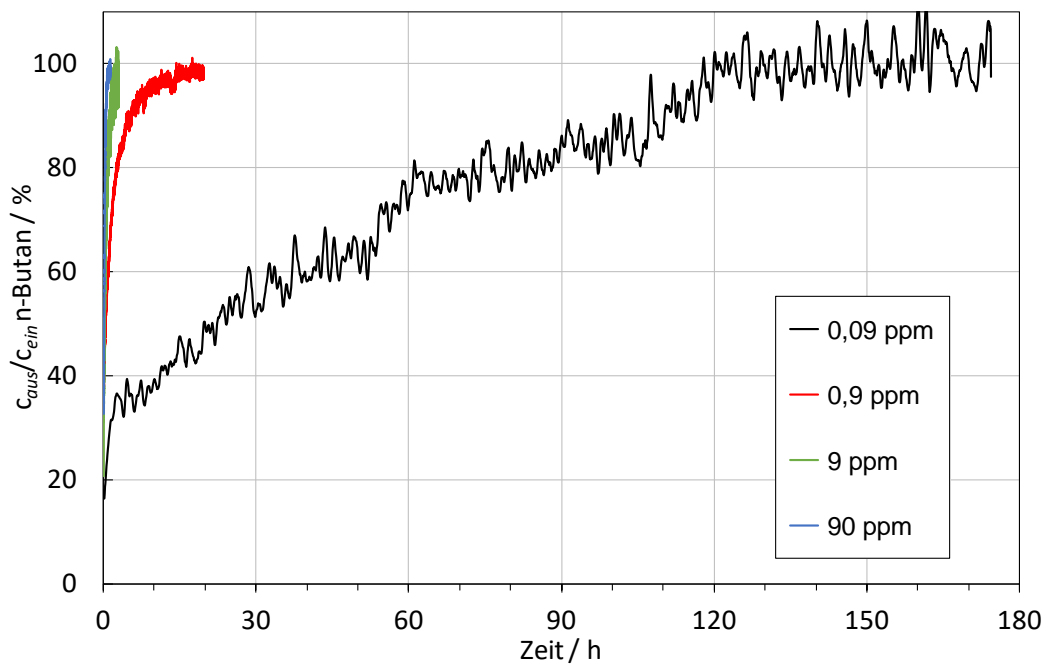


Abbildung 92: Durchbruchkurven von n-Butan an Medium B (23 °C, 50 % r. F., Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

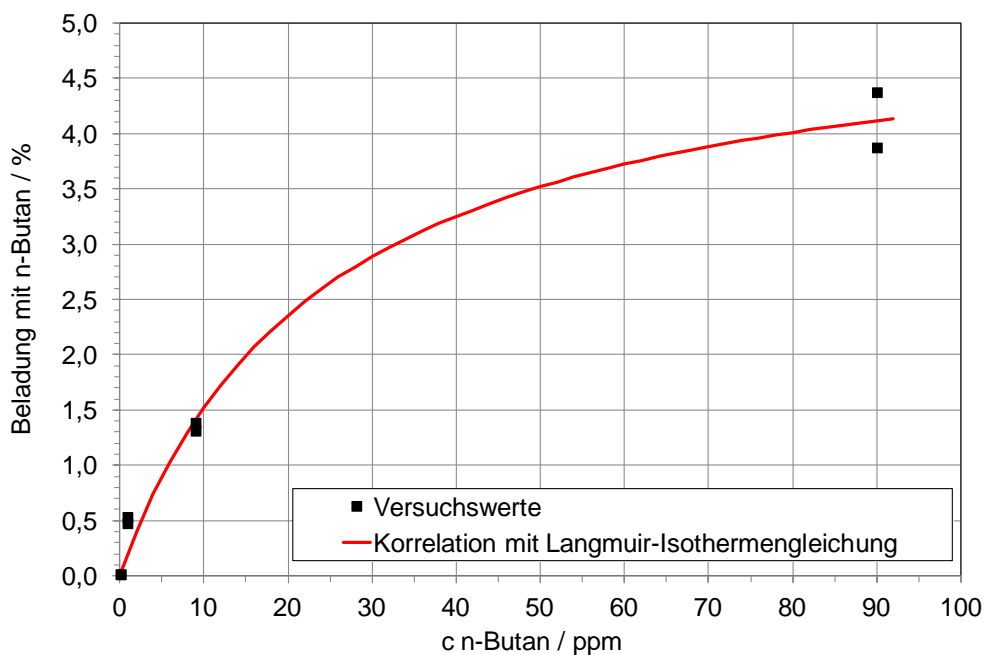


Abbildung 93: Adsorptionsisotherme von n-Butan an Medium B bei 23 °C und 50 % r. F.

2.4.2 Toluol

Die Vergleichbarkeit der Durchbruchtests mit Toluol, die an den verschiedenen Versuchsständen der FS1 und FS2 ermittelt wurden, wurde ebenfalls vorab überprüft. Das Ergebnis ist in Abbildung 94 dargestellt und bestätigt eine gute Vergleichbarkeit.

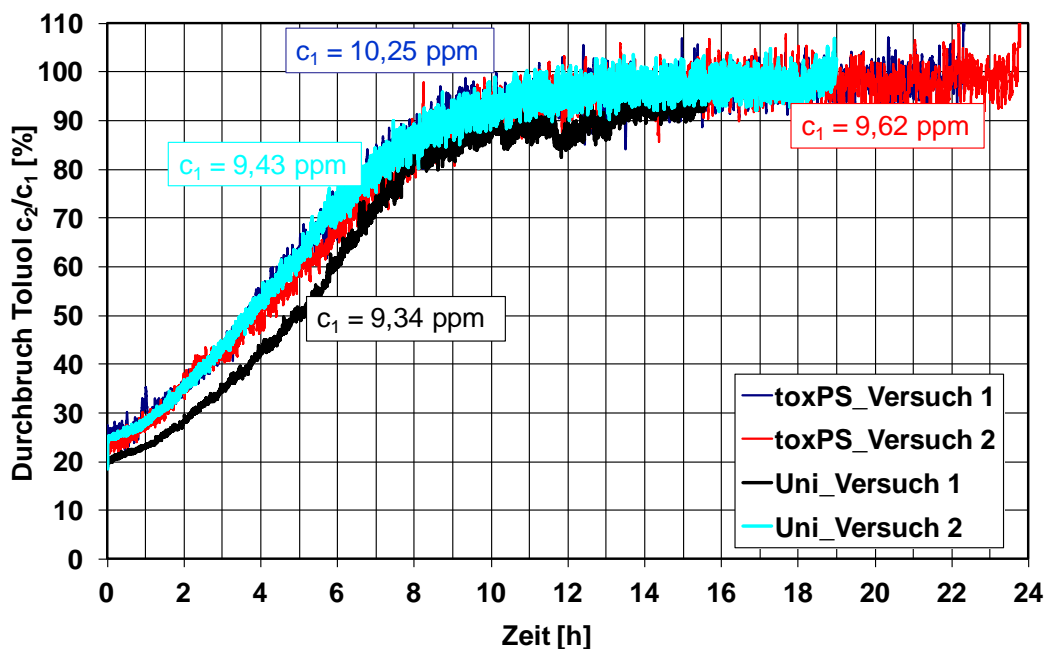


Abbildung 94: Durchbruchkurven von Toluol an Medium B (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 9 \text{ ppm}$, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Die Untersuchungen zum Adsorptionsgleichgewicht von Toluol wurden an den drei Flachfiltermedien A, B und C durchgeführt, die alle mit Aktivkohle als Sorbens ausgerüstet sind.

In Abbildung 95 sind die Durchbruchkurven bei unterschiedlichen Toluolkonzentrationen am Filtermedium B (Doppellage) dargestellt. Die Versuche erfolgten unter Standardbedingungen und bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s. Versuche bei 90 ppm und 9 ppm wurden zweifach durchgeführt, bei niedrigeren Konzentrationen bis zum Gleichgewicht nur einfach. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei 0,9 ppm wurde jedoch anhand einer Wiederholungsmessung mit kürzerer Zeitdauer überprüft. Dargestellt sind Durchbruchkurven aus Einzelversuchen. Die Durchbruchkurven verlaufen bei niedrigerer Rohgaskonzentration flacher als bei höherer. Im Vergleich zu der Adsorption von n-Butan an dem typgleichen Medium (Abbildung 92) sind die Versuchszeiten, bis das Adsorptionsgleichgewicht erreicht wird, bei Toluol jedoch deutlich länger. Es dauert bei einer Toluol-Rohgaskonzentration von 0,9 ppm über 100 Stunden, bis 100 % Durchbruch und damit der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Bei einer Toluol-Rohgaskonzentration von 0,09 ppm stiege die Versuchszeit um ein Vielfaches. Mit Hilfe der in Abschnitt 2.6 dargestellten Modellierung wurde berechnet, dass sie annähernd 900 h betragen würde.

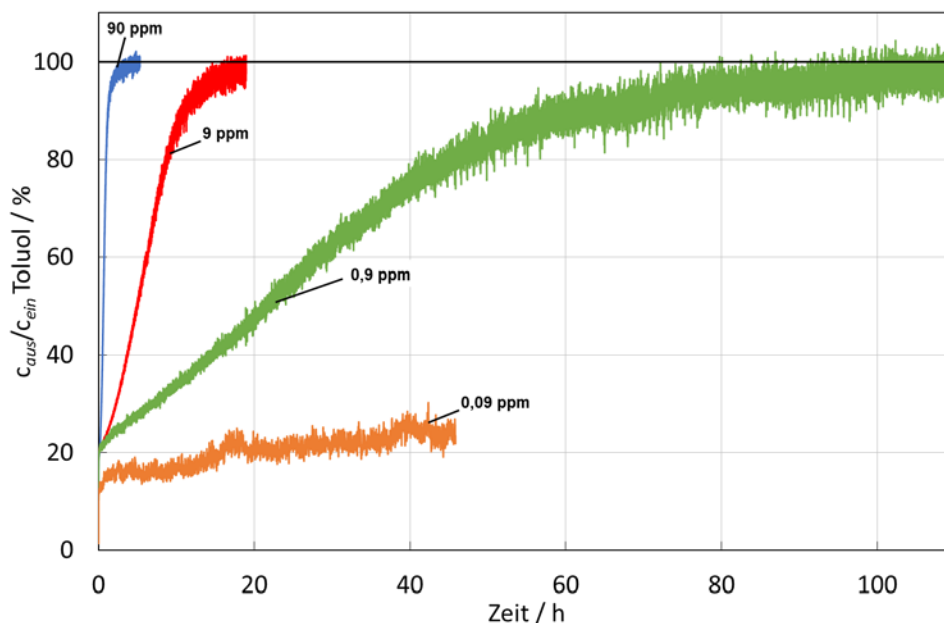


Abbildung 95: Durchbruchkurven von Toluol an Medium B (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 0,09 - 90$ ppm, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

In Abbildung 96 sind die an dem Filtermedium A (einfache Lage) gemessenen Durchbruchkurven bei unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen des Toluols bei 23 °C, 50 % r. F. und einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s dargestellt. Die Versuche wurden zwar zweifach durchgeführt, der Übersichtlichkeit halber sind jedoch mit Verweis auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse einzelne Durchbruchkurven gegenübergestellt. Zu erkennen ist in Abbildung 96, dass mit sinkender Rohgaskonzentration der Durchbruch langsamer erfolgt, die Steigung der Durchbruchkurven sich verringert und die Krümmung der zur Zeitachse konvexen Durchbruchkurven abnimmt. Vollständige Durchbrüche von 100 % wurden bei den Konzentrationen 90, 9 und 0,9 ppm erreicht.

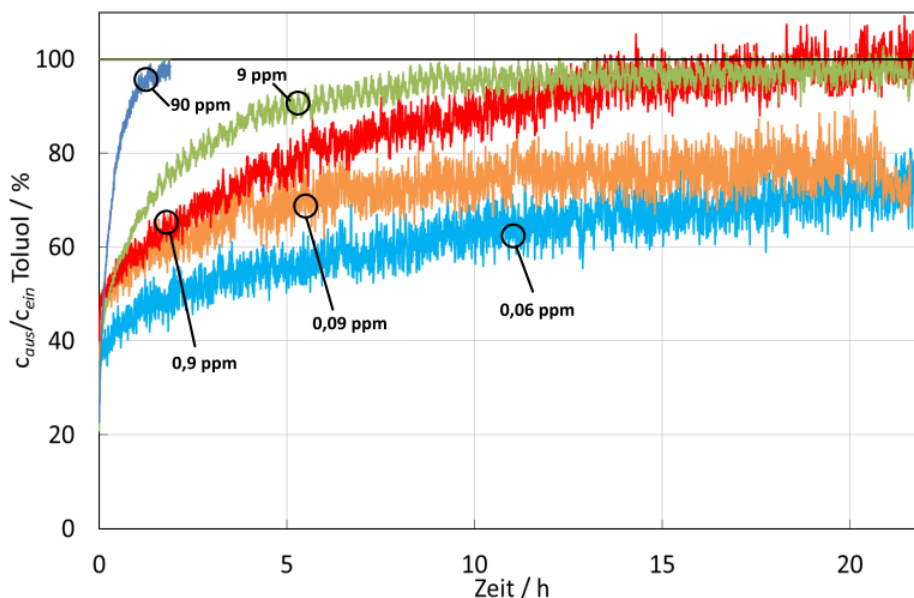


Abbildung 96: Durchbruchkurven Toluol an Medium A (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 0,06 - 90$ ppm, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Bei den in Abbildung 96 dargestellten Durchbruchskurven von Toluol lagen die Werte für den Durchbruch schon zu Beginn der Versuche trotz der geringen Anströmgeschwindigkeit bei ungefähr 40 % und die Durchbruchskurven wiesen keinen s-förmigen Verlauf auf. Die Versuche wurden mit dem Medium A in doppelter Lage wiederholt. In Abbildung 97 werden die Durchbruchskurven von Toluol durch das Medium A in doppelter Lage bei den unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen, 23 °C, 50 % r. F. und 5,5 cm/s Anströmgeschwindigkeit gezeigt. Die Durchbruchswerte zu Versuchsbeginn (Initialdurchbruch) wurden deutlich gesenkt, die Kurvenform änderte sich jedoch nicht nennenswert.

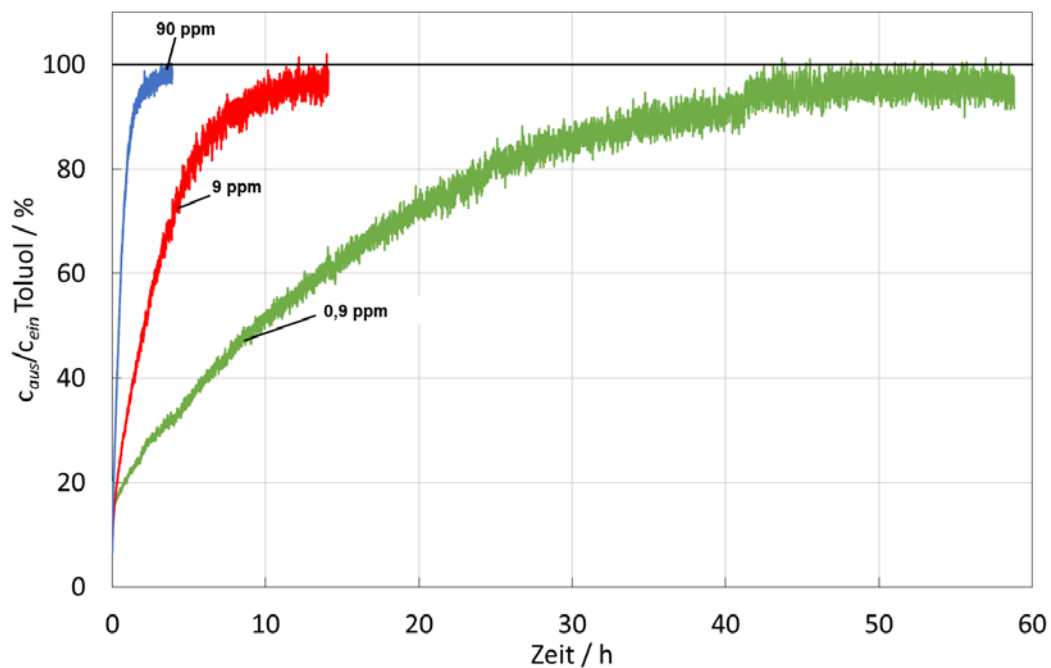


Abbildung 97: Durchbruchskurven von Toluol an Medium A in doppelter Lage (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 0,9\text{-}90$ ppm, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Der Einfluss der Adsorptivkonzentration auf die Kapazität von Medium C wird in Abbildung 98 deutlich. Dargestellt sind darin die Durchbruchskurven von Toluol an Medium C bei den unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen, 23 °C, 50 % r. F. und einer Anströmgeschwindigkeit von 18 cm/s. Wie bei den zuvor getesteten Medien auch, erfolgt der Durchbruch bei abnehmender Rohgaskonzentration später und die Steigung der Durchbruchskurven nimmt ab.

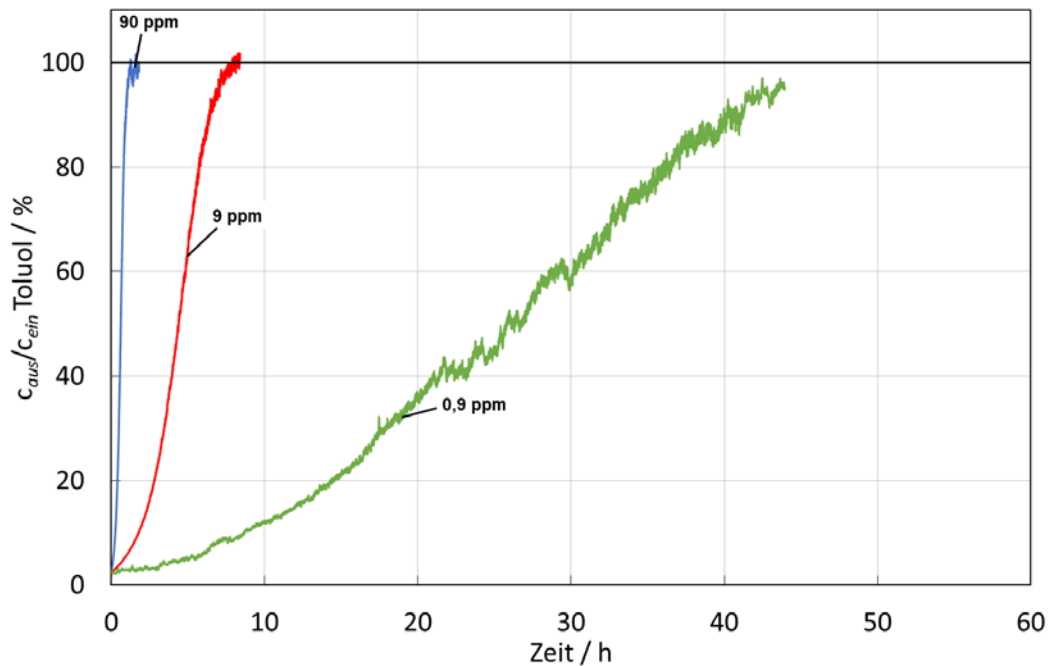


Abbildung 98: Durchbruchkurven von Toluol an Medien des Herstellers C (23 °C, 50 % r. F., $c_{\text{ein Toluol}} = 0,9\text{-}90$ ppm, Anströmgeschwindigkeit 5,5 cm/s)

Die Abbildung 99 zeigt die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Isothermenwerte von Toluol an den Medien A, B und C bei 23 °C und 50 % relativer Feuchte. Es ist zu erkennen, dass die Kapazität des Mediums B größer ist als die der Medien C und A. Außerdem wird deutlich, dass die Kapazitäten von Aktivkohlen für Toluol deutlich höher sind als für n-Butan. Bei 90 ppm Toluol in der Gasphase werden am Medium B Beladungen (abgeschiedene Masse pro Sorbensmasse) von größer als 30 % erreicht. Die Isothermen weisen eine Form von Typ 1 nach IUPAC auf [Thommes et al., 2015] und lassen sich in dem betrachteten Konzentrationsbereich mit der Freundlich-Gleichung beschreiben. Die ermittelten Parameter für die Freundlich-Gleichung, wenn der Volumanteil in der Einheit ppm und die Beladung in % verwendet wurden, und die Chi-Quadrat-Werte sind:

Medium A:	$K_F = 4,71$, $n = 0,32$, Chi-Quadrat = 0,317,
Medium B:	$K_F = 12,41$, $n = 0,21$, Chi-Quadrat = 0,138,
Medium C:	$K_F = 11,19$, $n = 0,18$, Chi-Quadrat = 0,065.

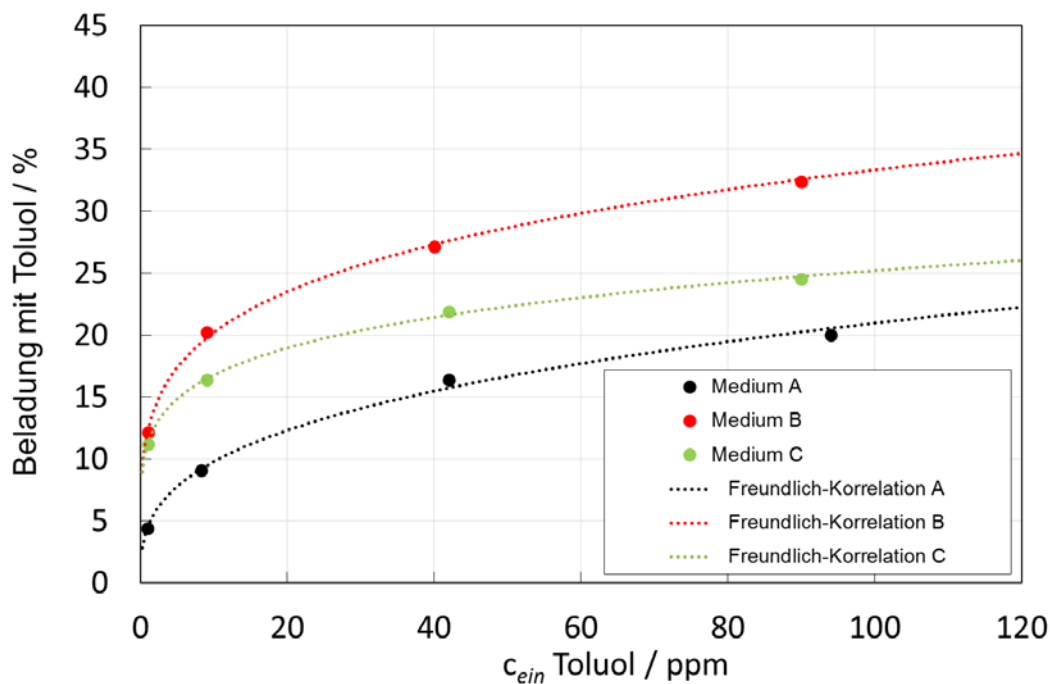


Abbildung 99: Adsorptionsisothermen von Toluol an Medien A, B und C bei 23 °C und 50 % r. F.

2.4.3 Schwefeldioxid

Schwefeldioxid wird nur zu einem geringen Teil durch reine Physisorption an Aktivkohle abgeschieden. In Anwesenheit von sorbiertem Wasser wird physisorbiertes Schwefeldioxid jedoch durch chemische Reaktionen umgewandelt und so das Sorptionspotenzial immer wieder erneuert bis eine Art Sättigung erreicht ist.

Dieses Verhalten spiegeln auch die Durchbruchkurven wider, die mit 9 ppm und 90 ppm Schwefeldioxid bei 23 °C, 50 % r. F. und einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s an dem Medium D mit K_2CO_3 -imprägnierter Aktivkohle ermittelt wurden und in Abbildung 100 dargestellt sind. Zunächst steigen die Durchbruchkurven an, nach einiger Zeit erreichen sie eine Art Plateau, auf dem sie dann in der Versuchszeit nahezu konstant verharren, ohne einen vollständigen Durchbruch zu erreichen. Die ebenfalls dargestellten Durchbruchkurven mit 0,09 ppm und 0,9 ppm Schwefeldioxid erreichen in der Versuchszeit noch nicht die Sättigungsphase.

Weiterhin ist an den Durchbruchkurven mit 9 ppm und 90 ppm Schwefeldioxid in der Abbildung 100 zu erkennen, dass bei der Chemisorption von SO_2 der Einfluss der SO_2 -Konzentration keine bedeutende Rolle spielt. Bei dem um den Faktor 10 kleineren Testgasvolumenanteil von 9 ppm erfolgt der Durchbruch ungefähr um den Zeitfaktor 10 später. Bei Versuchsende beträgt die Beladung des Sorbens mit SO_2 sowohl bei einem Testgasvolumenanteil von 9 ppm als auch von 90 ppm ungefähr 10 %.

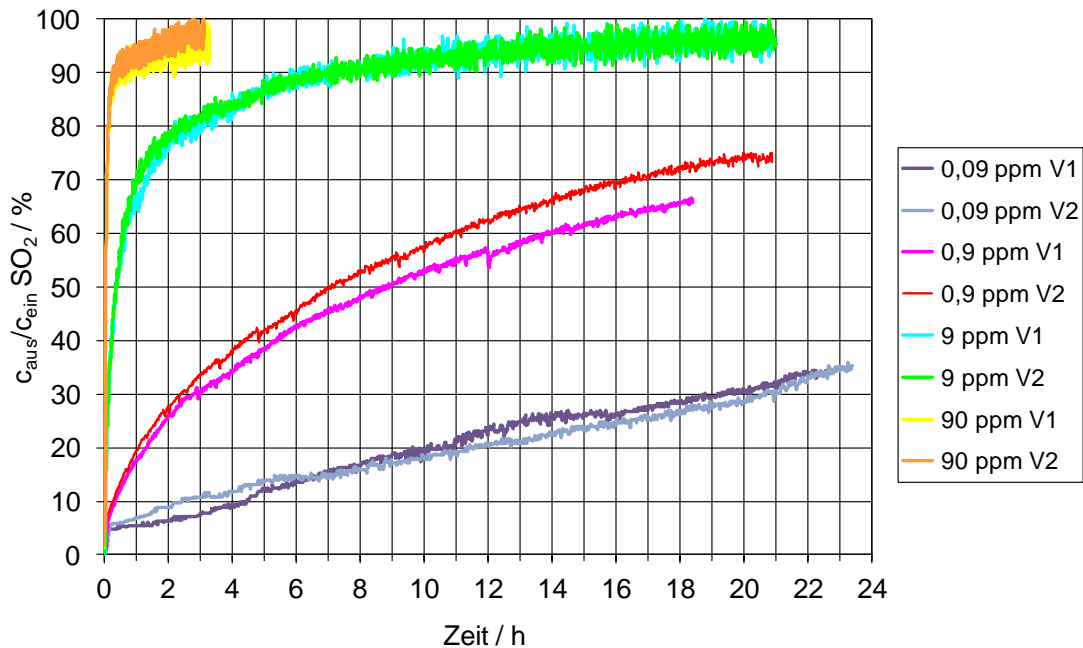


Abbildung 100: Durchbruchkurven von SO₂ an Medium D mit K₂CO₃-imprägnierter Aktivkohle (23 °C, 50 % r. F., c_{ein SO₂} = 0,09-90 ppm, Anströmgeschwindigkeit 0,2 m/s)

2.4.4 Ammoniak

Die Adsorption von Ammoniak wurde an dem Medium J getestet, das Ionentauscher als Sorbens enthält. Am Ionentauscher wird Ammoniak wirkungsvoller als an normaler Aktivkohle abgeschieden. Aus diesem Grund werden Ionentauscher häufig in RLT-Filtern eingesetzt, die speziell für die Abscheidung von Ammoniak angeboten werden. Die Abbildung 101 zeigt die Durchbruchkurven von 0,9, 9, 45 und 90 ppm Ammoniak durch das Medium bei 23 °C, 50 % r. F. und einer Anströmgeschwindigkeit von 16 cm/s. Dargestellt sind die Durchbruchkurven aus Einzelversuchen. Die Abweichungen der Kurven, die unter gleichen Bedingungen gewonnen wurden, sind eine Folge der starken Inhomogenität des Mediums, über die bereits in Abschnitt 2.2.2.4 berichtet wurde. Steigende Ammoniakkonzentrationen im Rohgas führen bei gleicher Anströmgeschwindigkeit zu einem schnelleren Durchbruch und einem steileren Anstieg der Durchbruchkurven. Während bei den Versuchen mit 45 und 90 ppm bereits kurz nach Versuchsbeginn ein Durchbruch zu beobachten ist, wurde bei den Versuchen mit 9 ppm in den ersten 5 Stunden kein Durchbruch gemessen. Bei einem Testgasvolumenanteil von 0,9 ppm blieb der Durchbruch nahezu konstant gering (ca. 10 %) während der 22 Stunden Versuchszeit. Anhand der durchgeführten Versuche konnte kein nennenswerter Einfluss der Ammoniakkonzentration auf die ermittelte Kapazität festgestellt werden.

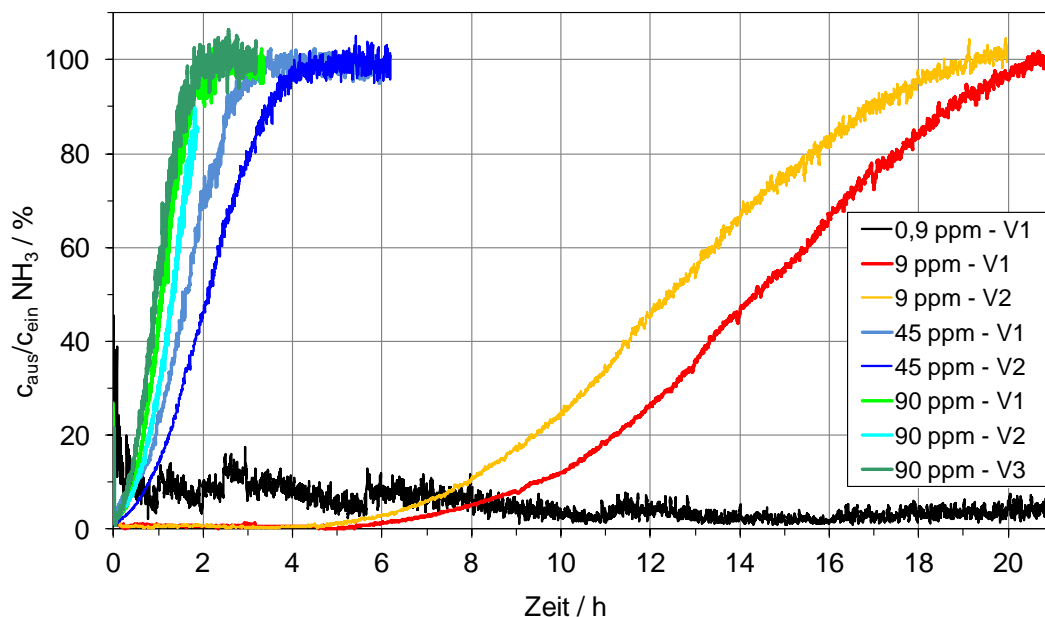


Abbildung 101: Durchbruchkurven von NH₃ an Medium J (23 °C, 50 % r. F., c_{ein} NH₃ = 0,9-90 ppm, Anströmgeschwindigkeit 0,16 m/s)

2.4.5 Fazit zum Einfluss der Testgaskonzentration

Die durchgeführten Untersuchungen mit den physisorptiven Substanzen n-Butan und Toluol in Luft mit 50 % r. F. und Testvolumenanteilen zwischen 0,09 ppm und 90 ppm verdeutlichten den Einfluss der Testgaskonzentration auf deren Adsorptionskapazität an Aktivkohle. Für diese Substanzen wurde gezeigt, dass Testergebnisse, die bei unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen gewonnen wurden, nicht miteinander vergleichbar sind. 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.

Für die weitgehend chemisorptiven Substanzen SO₂ und NH₃ wurde bestätigt, dass die Testgaskonzentration die Sorbenskapazität weniger beeinflusst. Um den Aufwand für Vergleichstests verringern, können diese bei höheren Testgaskonzentrationen durchgeführt werden.

2.5 AP4 - Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Naphthalin und Ersatzstoffen

Die Arbeitsaufgabe bestand zunächst darin, die Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd und Naphthalin an Testmedien für RLT-Filter in Durchbruchtests bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte zu untersuchen. Vorab war es notwendig, für die Testsubstanzen Formaldehyd und Naphthalin geeignete Dosiermethoden in Kombination mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten zu erarbeiten. Darüber hinaus sollten weniger gefährliche bzw. versuchstechnisch leichter handzuhabende Ersatzstoffe für die drei Testsubstanzen ermittelt werden, die beispielsweise aufgrund ihrer Struktur vergleichbare Adsorptionseigenschaften erwarten lassen. Die Vergleichbarkeit sollte mit Durchbruchtests von Testsubstanz und Ersatzstoff an verschiedenen Medien untersucht und bewertet werden. Die Durchführung des AP 4 war Aufgabe der FS2. Der experimentelle Teil wurde am Tox-Prüfstand ausgeführt.

2.5.1 Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff (H_2S) ist ein giftiges (MAK ca. 7 mg/m³ oder 5 ppm) Gas, das hochentzündlich ist und bei entsprechender Konzentration mit Luft explosionsfähige Gemische bilden kann. Es riecht sehr stark und kann von Menschen bereits bei Volumenanteilen von 0,1 ppm wahrgenommen werden, bei Konzentrationen ab 150 ppm setzt die Wahrnehmung jedoch aus. Außerdem wird schon nach kurzer Kontaktzeit mit H_2S die Wahrnehmung durch Gewöhnungseffekte herabgesetzt. In Innenräumen liegen saure Gase, wie H_2S , durch Körperausdünstungen in Spurenkonzentrationen vor, können aber z. B. in Museen problematisch sein. Die Abscheidung von H_2S durch Physisorption an herkömmlicher Aktivkohle ist nur begrenzt erfolgreich [Rossow, 2011]. Stand der Technik ist daher, die Kapazität von Aktivkohle durch Imprägnierung oder Dotierung zu erhöhen. Dabei werden aktive Substanzen in das Porensystem der Aktivkohle eingeschleust, die eine Kombination von physikalischer und chemischer Adsorption sowie katalytischer Oxidation bewirken. Kaliumiodid (KI), das häufig zum Imprägnieren von Aktivkohlen für die H_2S -Abscheidung verwendet wird, wirkt katalytisch und fördert die Oxidation von H_2S u. a. zu elementarem Schwefel. Eine weitere Imprägnier-substanz ist Kaliumcarbonat (K_2CO_3), das als basische Substanz den pH-Wert des Feuchtigkeitsfilms im Porensystem der Aktivkohle verschiebt und so die Löslichkeit von H_2S darin erhöht. Im beschriebenen Vorhaben wurde die Adsorption von H_2S an zwei Filtermedien mit imprägnierten Aktivkohlen - eine mit KI, die andere mit K_2CO_3 - bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte untersucht. H_2S wurde aus einer Gasmischung (10 Vol-% H_2S in Stickstoff) mit einem Massenflussregler mit entsprechendem Durchfluss in den Filterprüfstand dosiert.

An dem Medium mit der KI-imprägnierten Aktivkohle wurde die Adsorption bei vier verschiedenen Volumenanteilen H_2S (0,8 ppm - 4,5 ppm - 9 ppm - 18 ppm) durchgeführt. Abbildung 102 zeigt die Durchbruchkurven. Da die Versuche aus praktischen versuchstechnischen Gründen teilweise bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten erfolgten, können die Durchbruchkurven nur hinsichtlich des generellen Verlaufs miteinander verglichen werden. In der Versuchszeit erfolgt kein vollständiger Durchbruch, sondern es wurde jeweils näherungsweise ein Plateau erreicht, das auf eine Art Gleichgewichtszustand bei den gekoppelten Prozessen von chemischer Adsorption und katalytischer Oxidation hinweist. SITTHIKHANKAEW et al. 2014 beschreiben Versuchsergebnisse bei 3000 ppm H_2S und 30 °C an KI- und KOH-imprägnierter Aktivkohle, bei denen sich ein vergleichbares Plateau einstellt.

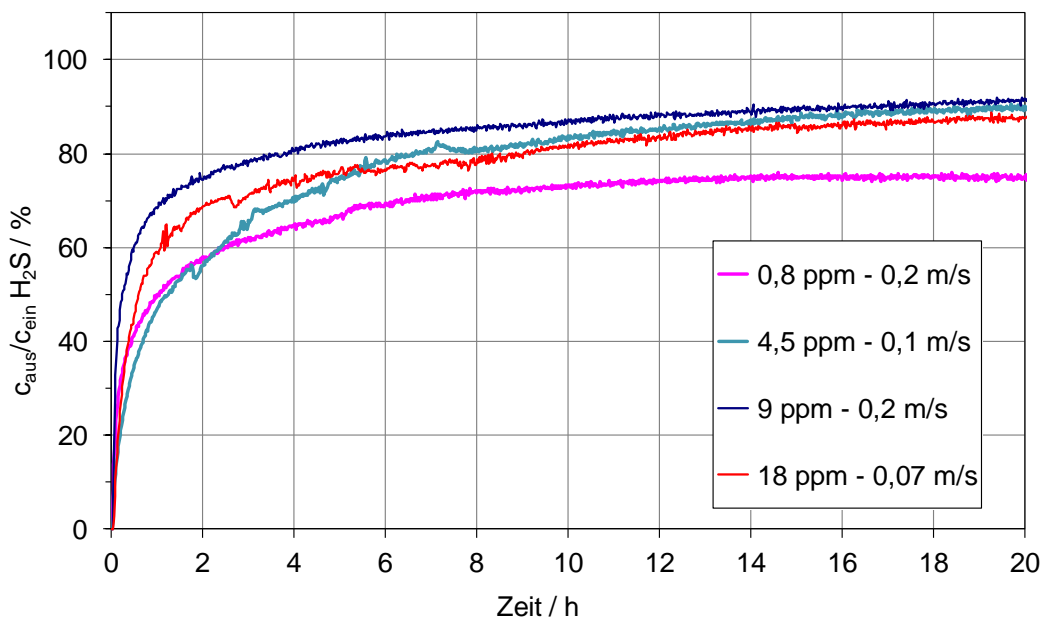


Abbildung 102: Durchbruchkurven von H₂S am Medium H (KI-impregnierte Aktivkohle, 23 °C, 50 % r. F.)

Das Medium D mit K₂CO₃-impregnierte Aktivkohle wurde nur mit einem H₂S-Volumenanteil von 9 ppm mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s getestet. In Abbildung 103 ist die entsprechende Durchbruchkurve dargestellt. Zusätzlich zeigt Abbildung 103 die Durchbruchkurve von 9 ppm H₂S durch das Medium H mit KI-impregnierte Aktivkohle bei gleicher Anströmgeschwindigkeit.

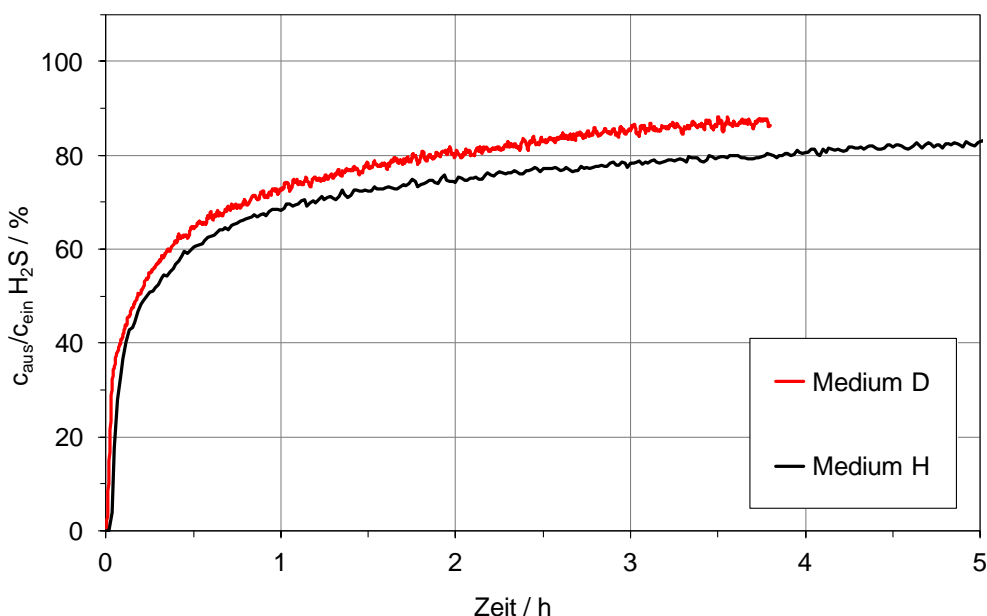


Abbildung 103: Durchbruchkurven von 9 ppm H₂S an Medien D (K₂CO₃) und H (KI) bei 23 °C, 50 % r. F. und v = 0,2 m/s)

Für anorganische Stoffe wie H₂S ist es schwieriger als für organische Stoffe, ähnliche Substanzen als mögliche Ersatzstoffe zu finden, da man nicht auf die anderen Vertreter der

homologen Reihe zurückgreifen kann. Als einzig möglicher Ersatzstoff wurde deshalb SO_2 ermittelt, das ebenfalls aus einem drei-atomigen gewinkelten Molekül mit einem Schwefelatom besteht. Einige Eigenschaften von SO_2 und H_2S sind zum Vergleich in Tabelle 7 dargestellt. Obwohl der Arbeitsplatzgrenzwert von H_2S höher ist als der von SO_2 , wird Schwefeldioxid im Allgemeinen als weniger gefährlich im Umgang bewertet. Die akute Toxizität beim Einatmen von H_2S ist in Kategorie 2 (Lebensgefahr), die von SO_2 in Kategorie 3 (giftig) eingestuft. Ein Vorteil von SO_2 gegenüber H_2S ist, dass ersteres weit weniger riecht. Darüber hinaus ist die Messtechnik für SO_2 einfacher. Für beide Substanzen werden Messgeräte, die auf UV-Absorption beruhen, eingesetzt, für H_2S -Messungen ist jedoch ein zusätzlicher Konverter notwendig. Dieser führt zu einem erhöhten Arbeitsaufwand bei der Kalibrierung des Messgerätes für H_2S -Messungen.

Tabelle 7: Eigenschaften von H_2S und SO_2

	H_2S	SO_2
Molekülmasse in g/mol	34,08	64,06
Dampfdruck bei 20 °C in MPa	1,82	0,33
Wasserlöslichkeit bei 0 °C in g/l	6,72	228,3
MAK in ppm	5	1

Um die Eignung von SO_2 als Ersatzstoff für H_2S zu testen, wurden an den gleichen Medien, die mit H_2S geprüft wurden, ebenfalls Durchbruchversuche durchgeführt. Die Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen den Vergleich der Durchbruchkurven beider Substanzen jeweils an dem gleichen Medium. In beiden Abbildungen sind die Durchbruchkurven der Einzelversuche dargestellt. Obwohl der Durchbruch von SO_2 durch die beiden getesteten Medien etwas geringer ist als der von H_2S , weisen die Durchbruchkurven einen ähnlichen Verlauf auf.

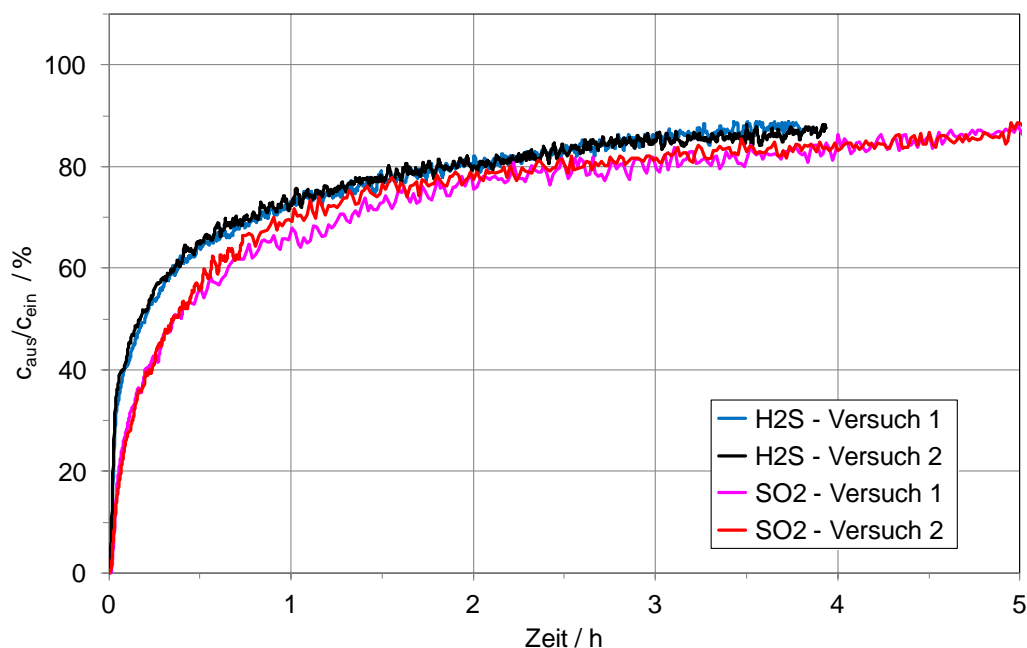


Abbildung 104: Durchbruchkurven von 9 ppm H_2S oder SO_2 am Medium D (K_2CO_3) bei 23 °C, 50 % r. F. und $v = 0,2$ m/s

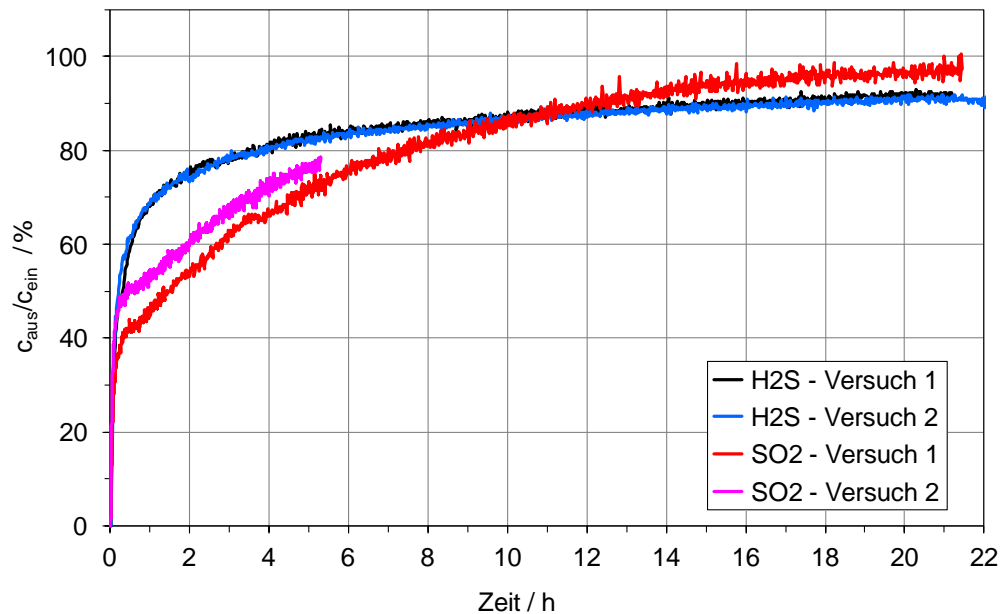


Abbildung 105: Durchbruchkurven von 9 ppm H₂S oder SO₂ am Medium H (KI) bei 23 °C, 50 % r. F. und v = 0,2 m/s

2.5.2 Formaldehyd

Formaldehyd ist als Schadstoff in der Innenraumluft, insbesondere im asiatischen Raum, immer noch sehr relevant. Aus diesem Grund ist es auch als abzuscheidende Komponente für adsorptive RLT-Filter bedeutsam. Bei Tests von adsorptiven Medien und Filtern mit Formaldehyd gibt es jedoch folgende Schwierigkeiten:

- Beim Umgang ist zu beachten, dass Formaldehyd akut toxisch beim Einatmen, Verschlucken und bei Hautkontakt (jeweils Kat. 3) sowie karzinogen (Kat. 1B) ist. Sowohl der TRGS 900-Arbeitsplatzgrenzwert als auch der MAK-Wert liegen bei 0,3 ppm.
- Die Messtechnik zur Erfassung von Formaldehyd-Konzentrationen ist anspruchsvoll und entsprechend teuer. Zur Messung der Formaldehyd-Konzentrationen bei den geplanten Durchbruchversuchen waren zunächst zwei vorhandene Protonen-Transfer-Reaktions-Massenspektrometer PTR-MS (Compact-PTR-MS, Ionicon) vorgesehen, mit einem Messbereich für Formaldehyd zwischen 0,2 ppm und 40 ppm. Im Verlauf des Projektes wurde ein Formaldehyd-Analysator für Immissionsmessungen (AL 4021, Aerolaser) mit einem Messbereich zwischen 0,1 ppb und 3 ppm angeschafft, bei dem die Analyse auf Basis der Hantzsch-Reaktion von Acetylaceton und Ammoniumacetat mit Formaldehyd und der Fluoreszenzmessung des Farbkomplexes bei 510 nm stattfindet.
- Die Dosierung von Formaldehyd ist schwierig. Gasmischungen aus Formaldehyd und Stickstoff sind nur bis ca. 20 ppm stabil, daher ist die kommerzielle Verfügbarkeit gering und der Preis entsprechend hoch. Je nach Testgaskonzentration, die durch das zur Verfügung stehende Messgerät festgelegt ist, und Variationsmöglichkeit des Testvolumenstroms ist die Dosierung von Formaldehyd in einer Gasmischung mit maximal 20 ppm aus einer Druckgasflasche nicht immer durchführbar. Eine zweite

Variante zur Dosierung ist die Verdampfung von festem, methanolfreiem Paraformaldehyd durch Überströmen mit Druckluft. Das Paraformaldehyd wird in einer Gaswaschflasche vorgelegt, die in einem Thermostaten temperiert wird. Der Volumenstrom der Druckluft wird mit einem Massenflussregler eingestellt. Mit Versuchen wurde überprüft, ob mit dieser Methode eine stabile Formaldehyd-Dosierung von ca. 3 ppm in einem Volumenstrom von 1,41 m³/h Luft über mehrere Stunden realisierbar ist. In Vorversuchen konnten zwar geeignete Werte für die Thermostattemperatur und den Druckluftvolumenstrom ermittelt werden, es gelang jedoch nicht, mit den zur Verfügung stehenden Mess- und Regelungsmöglichkeiten den Formaldehyd-Volumenanteil über mehrere Stunden konstant zu halten. Während der Versuchsdauer von 18 h stieg der Volumenanteil kontinuierlich um 30 % an. Als geeignetere Methode zur Formaldehyd-Dosierung erwies sich das Durchströmen einer temperierten, methanolfreien, 30-prozentigen Formaldehyd-Lösung in Wasser mit Druckluft. Die Lösung wird ebenfalls in einer Gaswaschflasche vorgelegt, die in einem Thermostaten temperiert wird, und der Druckluft-Volumenstrom wird in gleicher Weise über einen Massenflussregler zugeführt. Obwohl die Konzentration des Formaldehyds in der Lösung mit der Zeit abnimmt, konnte mit dieser Methode eine über mehrere Stunden konstante Formaldehyddosierung von 2 ppm erzielt werden. Die Dosierung deutlich höherer Konzentrationen birgt die Gefahr, dass in den Zuleitungen des Dosiervolumenstroms zum Hauptvolumenstrom Paraformaldehyd ausfällt und der Prüfstand kontaminiert wird.

Da die Durchführung von Adsorptionstests mit Formaldehyd, wie oben beschrieben, aufwendig ist und nur wenige Forschungsarbeiten zur Adsorption von Formaldehyd an Aktivkohlemedien unter raumluftechnischen Bedingungen veröffentlicht wurden, sollten im Rahmen des Projektes Adsorptionstests mit Formaldehyd an handelsüblichen Medien durchgeführt werden.

Die Adsorption von Formaldehyd wurde an den fünf verschiedenen, in Tabelle 8 aufgelisteten, Medien getestet. Die Flachfiltermedien Y1 und Y2 sind beide mit der gleichen Aktivkohle ausgerüstet, die Aktivkohleauflage ist bei Medium Y2 jedoch fast doppelt so hoch. Bei den Flachfiltermedien Y1-i und Y2-i ist die Aktivkohle zusätzlich imprägniert. Bei dem Medium Z handelt es sich um Aktivkohlegranulat, das als Schüttung mit einer Betthöhe von 30 mm getestet wurde.

Tabelle 8: Mit Formaldehyd getestete Medien

Medium	Typ	AK-Auflage g/m ²	Mediendicke mm
Y1	Flachflächenmedium	ca. 200	ca. 1
Y1-i	Flachflächenmedium	ca. 200	ca. 1
Y2	Flachflächenmedium	ca. 400	ca. 1,5
Y2-i	Flachflächenmedium	ca. 400	ca. 1,5
Z	Granulat/Schüttung	ca. 14.000	30 mm

Getestet wurden die Ausschnitte aus den Flachfiltermedien und die Schüttung in einem Adsorber mit 100 mm Innendurchmesser im Tox-Prüfstand, mit einer Anströmgeschwindigkeit

der Medienfläche von 0,05 m/s (Testvolumenstrom 1,41 m³/h) bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte und mit einem Testgasvolumenanteil von 2 ppm.

Formaldehyd wurde als Gasmischung (mit 20 ppm) mit Stickstoff aus einer Druckgasflasche mittels eines Massenflussreglers dosiert. Die Erprobung der anderen oben genannten Dosierungsmethoden erfolgte erst im Anschluss an die hier beschriebene Versuchsreihe. Als Messgerät wurde der Formaldehyd-Analysator für Immissionsmessungen (AL 4021, Aerolaser) verwendet. Zur Konditionierung wurden die Medienproben unmittelbar vor dem Durchbruchversuch jeweils 15 min. bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte durchströmt. Alle Tests wurden in Doppelbestimmung durchgeführt, in den nachfolgenden Abbildungen sind die gemittelten Werte dargestellt.

Abbildung 106 zeigt die ermittelten Durchbruchkurven von Formaldehyd. Sie weisen plausible Verläufe auf. Bei den Medien mit gleichem Sorbens ist der Durchbruch durch die Proben mit höherer Sorbensauflage geringer als bei den dünneren Medien. Bei den Medien mit ungefähr gleicher Aktivkohleauflage ist der Durchbruch durch die Proben mit imprägnierter Aktivkohle geringer als bei denen mit unbehandelter Aktivkohle. Der Durchbruch durch die 30 mm starke Schüttung des Mediums Z ist erheblich geringer als durch die Flachfiltermedien mit weniger als 2 mm Dicke.

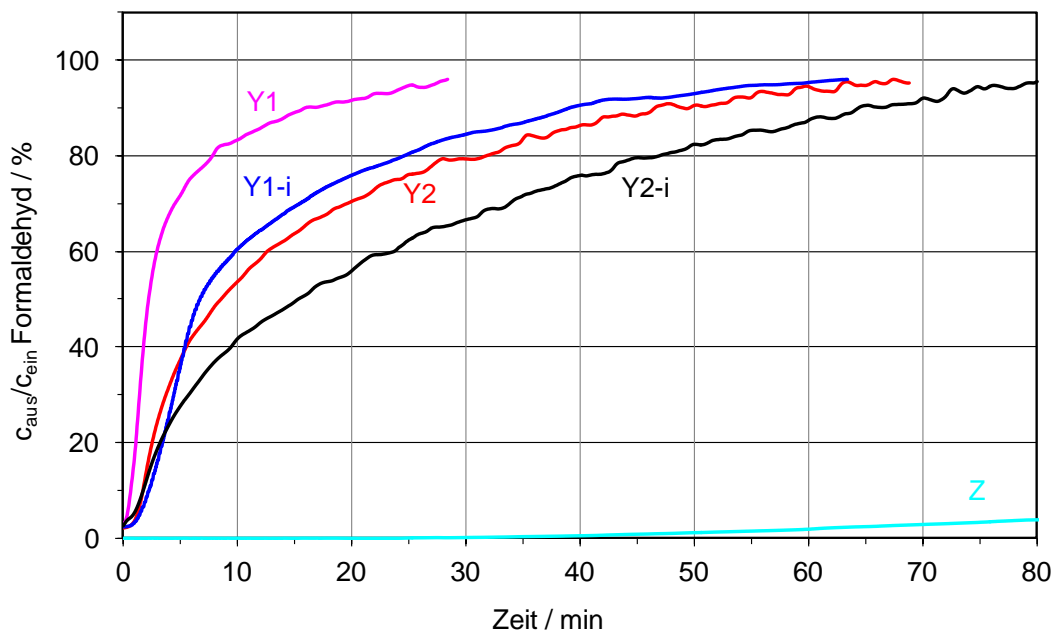


Abbildung 106: Durchbruchkurven von Formaldehyd durch fünf verschiedene Medien (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{\text{ein}} = 2$ ppm)

In Abbildung 107 sind die Beladungsverläufe von den Sorbentien mit Formaldehyd während des Versuchs dargestellt. Da die Sorbentien in Medium Y1 und Y2 sowie Y1-i und Y2-i die gleichen sind und die Medien sich lediglich durch die Menge der Aktivkohleauflage unterscheiden, sollte die massenspezifische Beladung im Gleichgewichtszustand vergleichbar sein. Da bei keinem Medium während der Versuche der Gleichgewichtszustand, d. h. ein Durchbruch von 100 %, erreicht wurde, kann eine abschließende Beurteilung nicht durchgeführt werden. Erkennbar ist jedoch, dass die absoluten Werte der Beladung bei den Flachfiltermedien sehr gering sind.

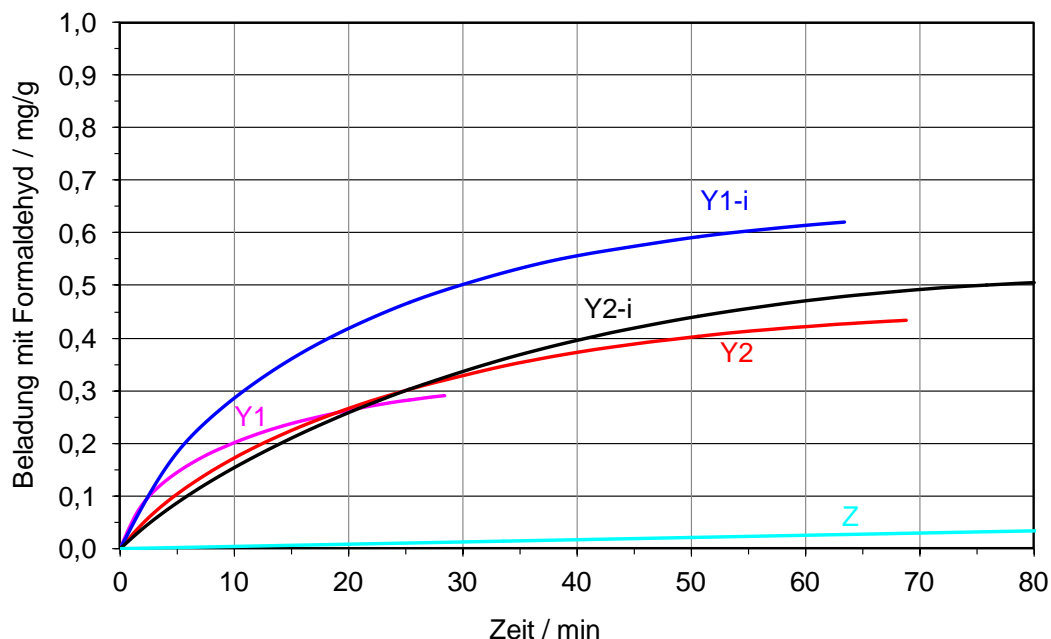


Abbildung 107: Beladung der Sorbentien mit Formaldehyd während des Durchbruchversuches (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{ein} = 2$ ppm)

Acetaldehyd ist das zu Formaldehyd nächst höhere Aldehyd in der homologen Reihe mit einer zusätzlichen Methylgruppe und weist dementsprechend auch Aldehyd-Eigenschaften auf. Somit könnte es ein möglicher Ersatzstoff für Formaldehyd sein. Aufgrund seiner weiteren Charakteristika ist Acetaldehyd versuchstechnisch wesentlich einfacher handzuhaben. Es hat einen Siedepunkt von 20 °C und ist als Prüfgasmischung auch in höheren Konzentrationen kommerziell verfügbar. Wenn Acetaldehyd in Konzentrationen > 1 ppm vorliegt, kann die Konzentrationsbestimmung mit Flammenionisationsdetektoren erfolgen. Mit dem PTR-MS sind Acetaldehyd-Konzentrationen von 10 ppb bis 1000 ppm bestimmbar. Der Messbereich des PTR-MS ist von der Protonisierbarkeit der zu bestimmenden Substanz abhängig. In Tabelle 9 sind einige Einstufungen von Acetaldehyd und Formaldehyd hinsichtlich der Arbeitssicherheit aufgeführt, die zeigen, dass Acetaldehyd als Testsubstanz wesentlich unproblematischer ist.

Tabelle 9: Vergleich der Eigenschaften von Formaldehyd und Acetaldehyd

Eigenschaft	Formaldehyd	Acetaldehyd
MAK in ppm	0,3	50
Karzinogenität	Kat. 1B	Kat. 2
akute Toxizität	Kat. 3	-

Die Eignung von Acetaldehyd als Ersatzstoff für Formaldehyd wurde untersucht, indem mit Acetaldehyd unter den gleichen Bedingungen (23 °C, 50 % rel. Feuchte, $c_{ein}=2$ ppm, Anströmgeschwindigkeit 0,05 m/s) Durchbruchversuche an den gleichen Medien (Y1, Y2, Y1-i, Y2-i, Z) durchgeführt wurden. Acetaldehyd wurde aus einer Prüfgasmischung mit 5000 ppm Acetaldehyd in Stickstoff mit Hilfe eines Massenflussreglers dosiert. Als Messgeräte wurden zwei PTR-MS verwendet.

Die Abbildung 108 und Abbildung 109 zeigen die Durchbruchkurven von Acetaldehyd und Formaldehyd im Vergleich und für die einzelnen Medien. Es ist klar erkennbar, dass der Durchbruch von Acetaldehyd viel schneller erfolgt als der von Formaldehyd. Das lässt darauf schließen, dass die Kapazität der Medien für Acetaldehyd generell geringer ist. Die Werte des Verhältnisses der adsorbierten Massen von Acetaldehyd zu Formaldehyd bis zu einem bestimmten Durchbruch sowie dem Verhältnis der Versuchszeiten bis zu einem bestimmten Durchbruch wurden für alle fünf Medien ermittelt. Es konnte aber kein für alle Medien zutreffender Faktor ermittelt werden, mit dem die Kapazität eines Mediums für Formaldehyd aus dem Wert für Acetaldehyd zu berechnen ist.

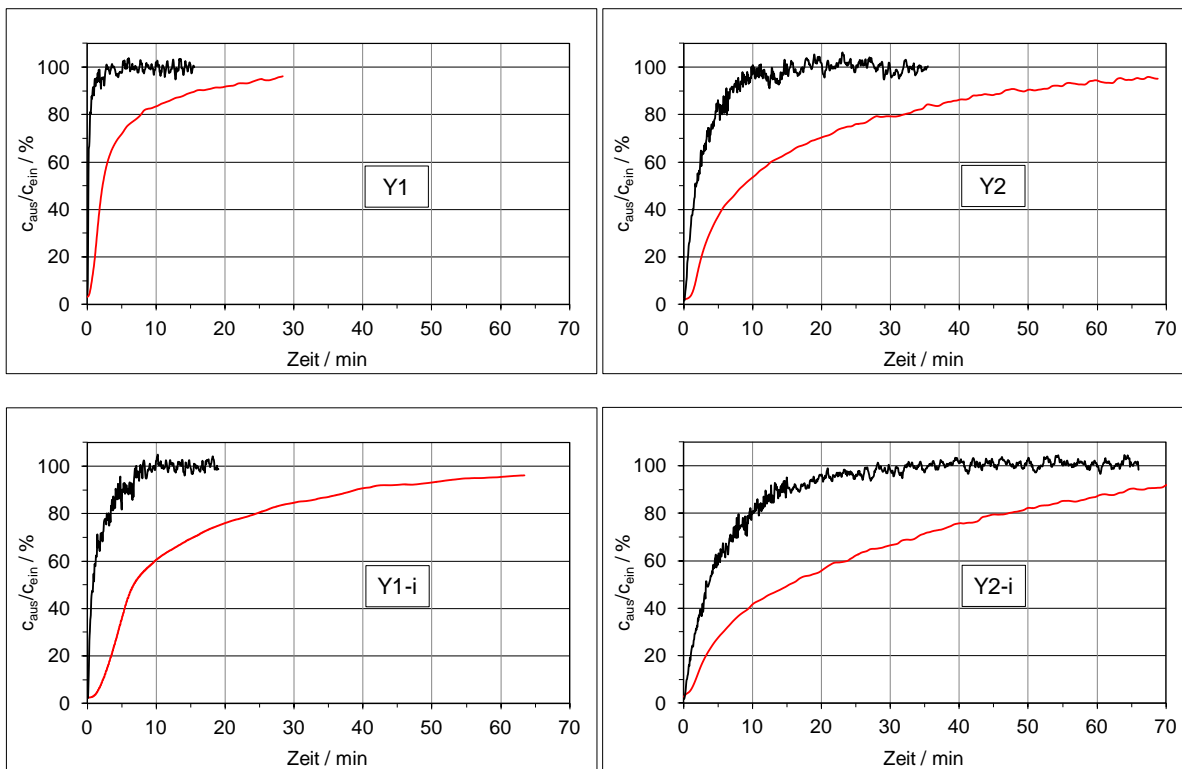


Abbildung 108: Vergleich der Durchbruchkurven von Formaldehyd (rote Graphen) und Acetaldehyd (schwarze Graphen) an vier Flachfiltermedien der Medientypen Y1, Y2, Y1-i und Y2-i (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{ein} = 2$ ppm)

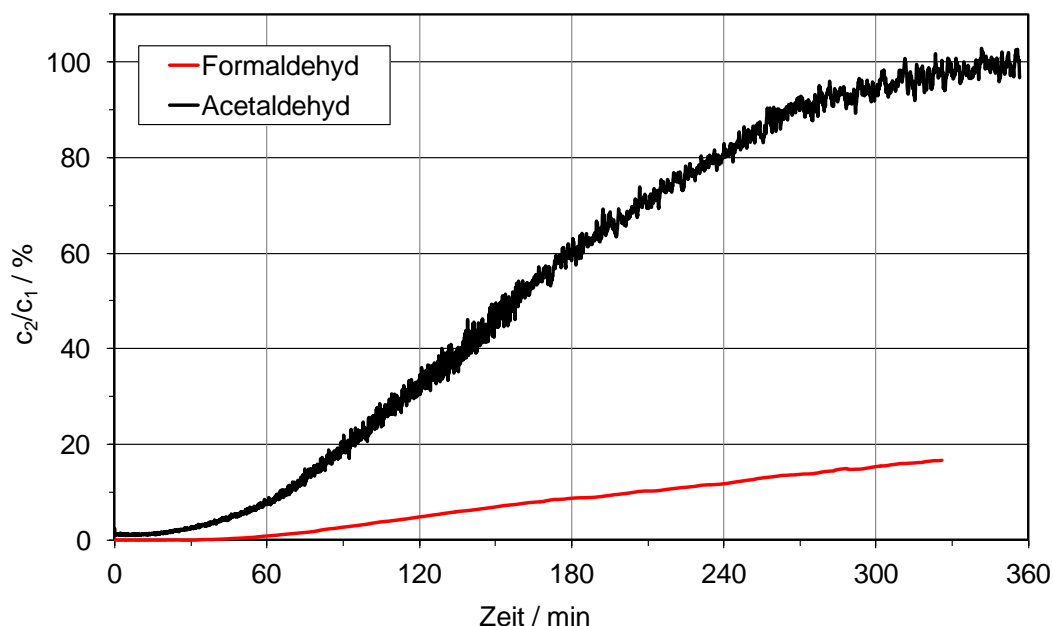


Abbildung 109: Vergleich der Durchbruchkurven von Formaldehyd und Acetaldehyd an einer Aktivkohleschüttung des Mediums Z (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{\text{ein}} = 2$ ppm)

2.5.3 Naphthalin

Naphthalin ist ein bityklischer aromatischer Kohlenwasserstoff, der als Feststoff vorliegt, aber schon bei Raumtemperatur sublimiert. Naphthalin ist gesundheitsschädlich und für die Innenraumluft insofern von Belang, als es im asiatischen Raum trotz seines Geruches und der geringen insektiziden Wirkung immer noch als Bestandteil von Mottenkugeln eingesetzt wird.

Die Verwendung von Naphthalin als Testsubstanz wird dadurch erschwert, dass bei der Dosierung der Feststoff in die gasförmige Phase überführt werden muss. Weiterhin liegen für die Messung von Naphthalin-Konzentrationen mit einem Flammenionisationsdetektor keine herstellerspezifischen Response-Faktoren vor und es gibt keine kommerziell verfügbaren Kalibriergasmischungen. Außerdem neigt Naphthalin, besonders in höherer Konzentration, wie in den Zuleitungen zum Prüfstand, dazu sich an den Oberflächen niederzuschlagen.

Zur Dosierung von Naphthalin wurde es als Feststoff in einer temperierten Gaswaschflasche vorgelegt und mit Druckluft, die mittels eines Massenflussreglers zugeführt wurde, überströmt. Die erforderlichen Einstellungen für den Thermostaten und den Massenflussregler zum Erreichen des gewünschten Testvolumenanteils von 9 ppm wurden in Vorversuchen ermittelt. Mit dieser Testanordnung ließen sich über mehrere Stunden stabile Naphthalinkonzentrationen erzielen.

Zur Bestimmung der Naphthalinkonzentrationen wurden die bereits beschriebenen zwei PTR-MS eingesetzt. Da der Dampfdruck von Naphthalin zu gering ist, können keine Naphthalin-Kalibriergasmischungen hergestellt werden. Aus diesem Grund wurden die PTR-MS mittels Transmissionslinie mit einem Kalibriergasgemisch von Molmasse 21 bis Molmasse 141 kalibriert. Zur Überprüfung der PTR-MS-Messwerte wurden bei den durchgeführten Versuchen Proben aus dem Prüfstand auf Aktivkohle gezogen und über Thermodesorption mittels GC-MS (Kopplung eines Gas-Chromatographen und eines Massenspektrometers) analysiert. Der

Vergleich ergab eine Abweichung von ca. 15 %. Diese Abweichung war in der vorliegenden Situation tolerierbar, da der Fokus der Untersuchungen zunächst nur darauf lag, dass ein Eindruck von den erzielbaren Kapazitäten von Filtermedien für die Raumlufttechnik für Naphthalin gewonnen werden sollte, und außerdem für die Berechnung der Kapazität die Differenz von Ausgangs- und Eingangskonzentration verwendet wird.

Die Adsorption von Naphthalin wurde an den zwei verschiedenen Flachfiltermedien A und B und einer 30-mm-Schüttung des granulatförmigen Mediums Z untersucht. Bei den Sorbentien handelte es sich bei allen Medien um herkömmliche Aktivkohle. Die Ausschnitte aus den Flachfiltermedien und die Schüttung wurden in einem Adsorber mit 100 mm Innendurchmesser mit einer Anströmgeschwindigkeit der Medienfläche von 0,05 m/s (Testvolumenstrom 1,41 m³/h) bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte und mit einem Testgasvolumenanteil von 9 ppm getestet.

Abbildung 110 zeigt die ermittelten Durchbruchkurven von Naphthalin durch die drei verschiedenen Medien über eine Versuchszeit von 21 Stunden. Alle Medien weisen lange Durchbruchszeiten auf. Der vollständige Durchbruch von 100 % Naphthalin dauert bei den beiden Flachfiltermedien ca. 20 Stunden. Der Durchbruch durch die 30 mm starke Schüttung des Mediums Z ist noch wesentlich geringer als durch die Flachfiltermedien. Die Schüttung wurde 44 Stunden lang mit Naphthalin beaufschlagt und am Ende der Versuchszeit lag der ermittelte Durchbruch bei 0,8 %.

In Abbildung 111 sind die Beladungsverläufe der Sorbentien der Medien A, B und Z mit Naphthalin während des Versuchs dargestellt. Die Gleichgewichtsbeladungen der Medien A und B betragen ca. 45 % und 55 %. Bei der Schüttung aus Medium Z lag die Sorbensbeladung (abgeschiedene Masse/Sorbensmasse) nach 44 Stunden Versuchszeit und einem Durchbruch von 0,8 % bei 9 %.

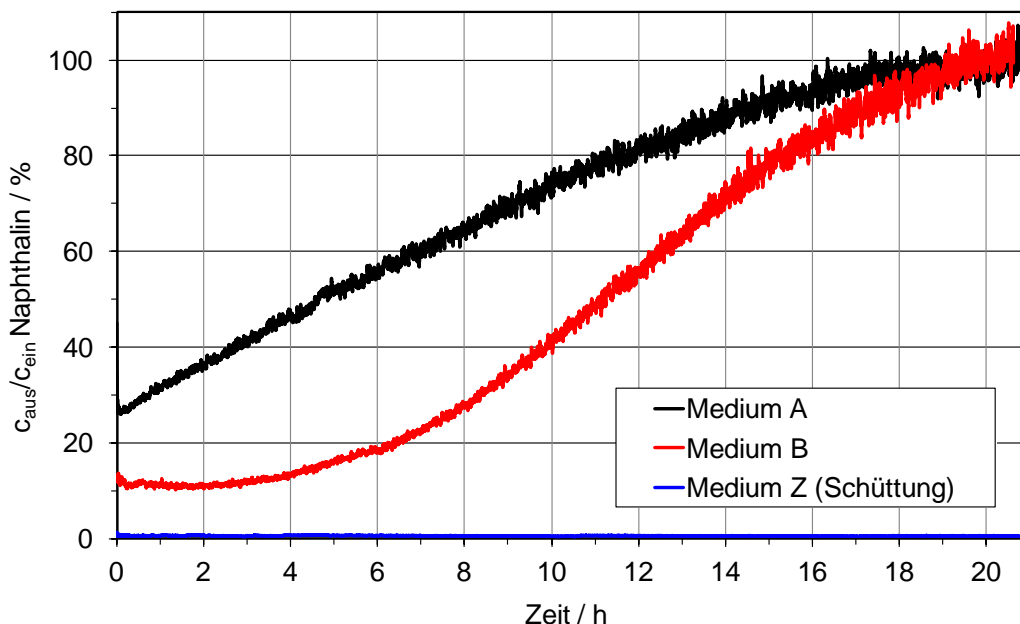


Abbildung 110: Durchbruchkurven von Naphthalin an drei verschiedenen Medien (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{\text{ein}} = 9$ ppm)

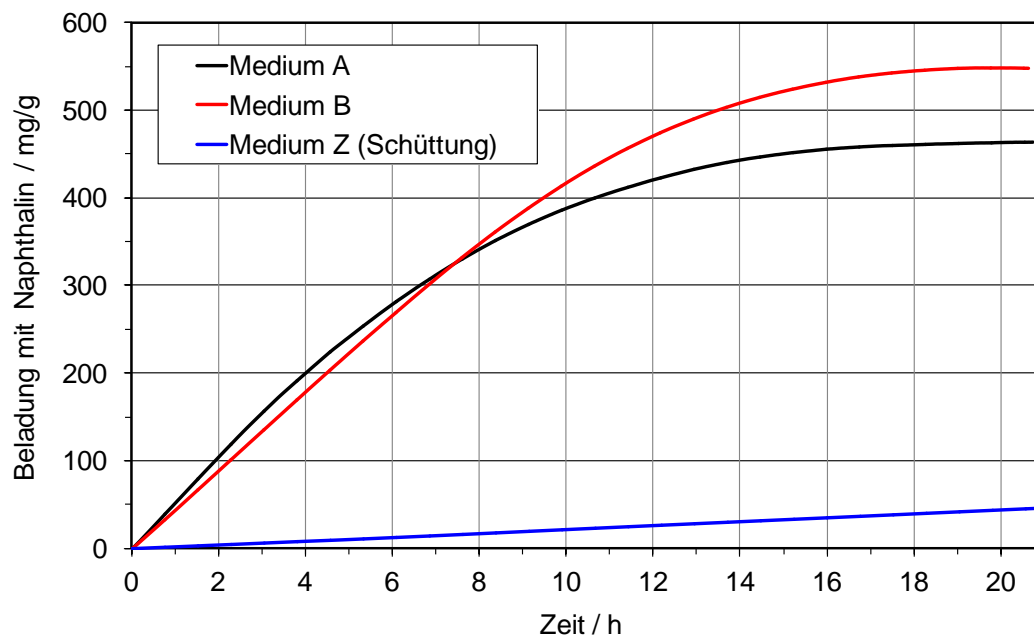


Abbildung 111: Beladung der Sorbentien mit Naphthalin während des Durchbruchversuches (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{\text{ein}} = 9$ ppm)

Als Ersatztestsubstanz für Naphthalin wurde zunächst Methylnaphthalin ausgewählt. Das Methylnaphthalinmolekül besitzt zusätzlich zu den zwei aromatischen Kohlenstoffringen von Naphthalin eine Methylgruppe. Die Auswahl erfolgte in Analogie zu Toluol als Ersatztestsubstanz für Benzol. Darüber hinaus wurde Toluol, das als organische Testsubstanz für Sorbentien etabliert ist, als weiterer möglicher Ersatzstoff für Naphthalin ausgewählt. In Tabelle 10 sind einige Einstufungen von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol hinsichtlich der Arbeitssicherheit aufgeführt, die zeigen, dass 1-Methylnaphthalin und Toluol als Testsubstanzen im diesem Sinne unproblematischer sind.

Tabelle 10: Vergleich der Eigenschaften von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol

Eigenschaft	Naphthalin	Methylnaphthalin	Toluol
AGW / TRGS 9000 in ppm	0,1	-	50
Karzinogenität	Kat. 2	keine Angaben verfügbar	-
akute Toxizität/Verschlucken	Kat. 4	Kat. 4	kann bei Verschlucken tödlich sein
Keimzellenmutagenität	Kat. 3B	keine Angaben verfügbar	nicht bei Einhaltung des AGW

Die Eignung von 1-Methylnaphthalin und Toluol als Ersatzstoff für Naphthalin wurde mit Durchbruchversuchen (23 °C, 50 % rel. Feuchte, $c_{\text{ein}} = 9$ ppm, Anströmgeschwindigkeit

0,05 m/s) an den gleichen Medien (A, B, Z) getestet. Zur Dosierung sowohl von 1-Methylnaphthalin als auch von Toluol wurden die bei Raumtemperatur flüssigen Substanzen jeweils in einem temperierten Behälter vorgelegt und mit Druckluft durchströmt. Als Messgeräte wurden erneut die zwei PTR-MS verwendet. Da auch für 1-Methylnaphthalin keine Kalibriergase verfügbar sind, wurden die Messgeräte mit der für Naphthalin beschriebenen Methode kalibriert. Von einer Überprüfung der Messwerte mit Probenahme und GC-MS-Analyse wurde abgesehen.

Die Abbildung 112 bis Abbildung 114 zeigen die Durchbruchskurven von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol durch die drei verschiedenen Medien A, B und Z. Die Durchbruchskurven an den Medien A und B wurden jeweils aus zwei Versuchen gemittelt, die an Medium Z stammen aus Einzelversuchen.

Die Medien A und B, siehe Abbildung 112 und 113, weisen ähnliche Durchbruchzeiten aller drei Substanzen bis zum vollständigen Durchbruch auf. Anhand der günstigeren Kurvenverläufe an Medium B im Vergleich zu Medium A kann jedoch auf dessen größere Kapazität gegenüber den drei Substanzen geschlossen werden. An beiden Medien ist der Rückhalt von Naphthalin am stärksten, der von 1-Methylnaphthalin etwas schwächer, und Toluol bricht deutlich schneller durch.

Ein vergleichbares Verhalten zeigt prinzipiell auch das Medium Z, siehe Abbildung 114. Der Verlauf der Durchbruchskurve von 1-Methylnaphthalin weist jedoch einen ungewöhnlichen Verlauf auf. Der Durchbruch sinkt von ca. 6 % zu Beginn des Versuches innerhalb von ca. 22 Stunden ab auf ca. 1 %. Zurückgeführt wird dieses Durchbruchsverhalten auf Verschleppung und Kondensation des 1-Methylnaphthalins an den Rohrwandungen während der zuvor durchgeführten Versuche an den Medien A und B. Bei dem um ein Vielfaches geringeren Durchbruch an Medium Z beeinflusst die Freisetzung des an den Rohrwandungen abgeschiedenen 1-Methylnaphthalins aufgrund des Konzentrationsunterschiedes auf der Reingasseite den Durchbruch erheblich. Es wird davon ausgegangen, dass das Durchbruchsniveau, das sich nach ca. 20 Stunden Versuchszeit einstellt, den tatsächlichen Initialdurchbruch von 1-Methylnaphthalin an Medium Z beschreibt.

Die Werte der adsorbierten Massen von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol bis zu einem bestimmten Durchbruch sowie die Durchbruchzeiten an den drei Medien stehen in keinem konstanten Verhältnis zueinander. Die Dosierung von 1-Methylnaphthalin ist einfacher durchzuführen als die von Naphthalin, es neigt aber ebenso wie Naphthalin zum Auskondensieren im Prüfstand.

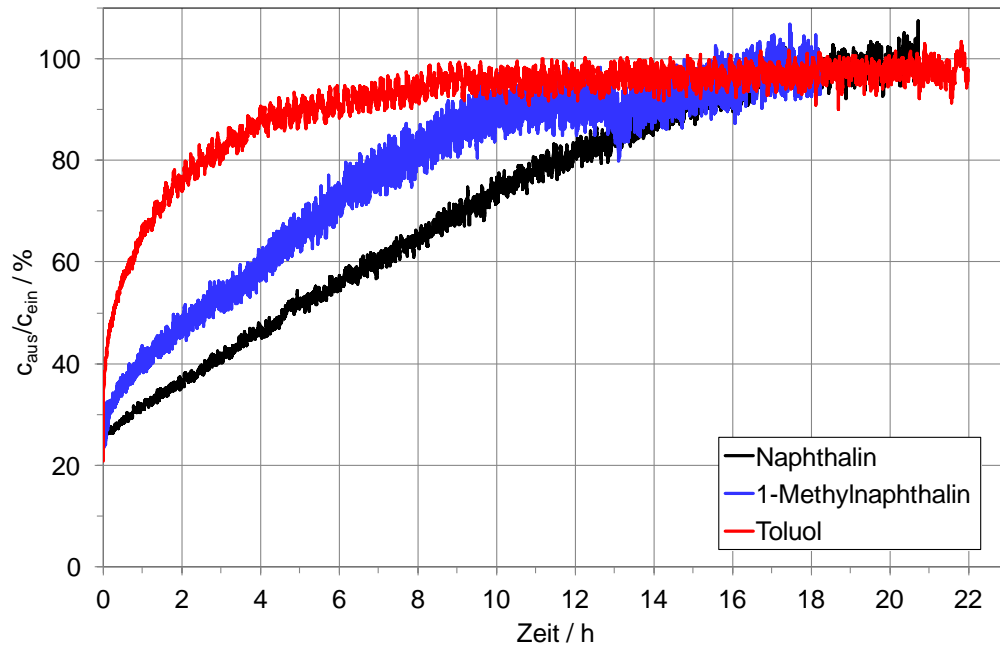


Abbildung 112: Vergleich der Durchbruchskurven von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol an dem Medium A (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{ein} = 9$ ppm)

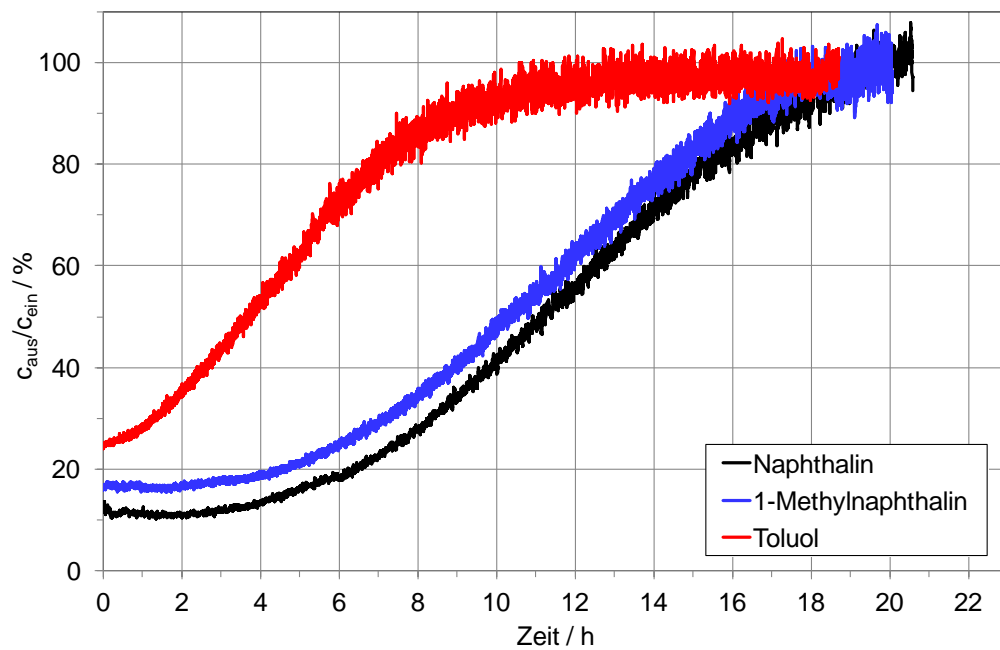


Abbildung 113: Vergleich der Durchbruchskurven von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol an dem Medium B (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{ein} = 9$ ppm)

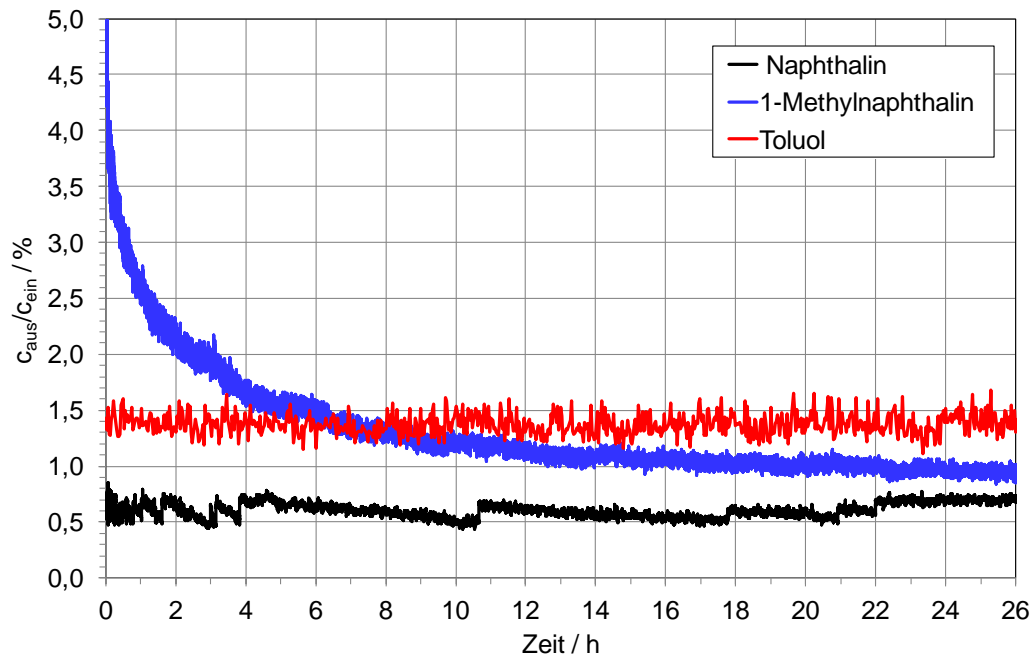


Abbildung 114: Vergleich der Durchbruchkurven von Naphthalin, 1-Methylnaphthalin und Toluol an einer Aktivkohleschüttung des Mediums Z (23 °C, 50 % r. F., $v = 0,05$ m/s, $c_{ein} = 9$ ppm)

2.5.4 Fazit zur Adsorption von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Naphthalin und Ersatzstoffen

Als mögliche Ersatzstoffe wurden Schwefeldioxid für Schwefelwasserstoff, Acetaldehyd für Formaldehyd und Methylnaphthalin sowie Toluol für Naphthalin ermittelt. Die Untersuchungen zum Durchbruchverhalten von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd, Naphthalin und ihren ausgewählten Ersatzstoffen an ausgesuchten adsorptiven Medien haben ergeben, dass

- H_2S und SO_2 ein ähnliches Adsorptionsverhalten hinsichtlich des Durchbruchverlaufes aufweisen,
- der Durchbruch von Formaldehyd im Vergleich zu Acetaldehyd wesentlich geringer ist und die Standzeiten der Medien bis zu einem bestimmten Durchbruch für Formaldehyd um Faktoren von 3 - 10 höher waren als für Acetaldehyd,
- der Durchbruch von Naphthalin im Vergleich zu 1-Methylnaphthalin etwas und zu Toluol deutlich geringer ist und die Standzeiten der Medien bis zu einem bestimmten Durchbruch für Naphthalin dementsprechend höher sind als für 1-Methylnaphthalin und Toluol.

Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten und Grenzen einer Beurteilung von adsorptiven Medien hinsichtlich der Abscheidung von Schwefelwasserstoff, Formaldehyd und Naphthalin anhand von Testergebnissen, die mit Ersatzsubstanzen ermittelt wurden.

2.6 AP I - Modellierung von Durchbruchkurven

Wie die Variation der Rohgaskonzentration in Abschnitt 2.4.2 gezeigt hat, steigt der Messaufwand, wenn Durchbruchkurven bei niedrigeren Konzentrationen als den normativ vorgegebenen 90 und 9 ppm durchgeführt werden. Zum einen steigt die Zeit zur Aufnahme einer vollständigen Durchbruchkurve bis zum Gleichgewichtszustand. Zum anderen ist für eine Messung bei niedrigerer Konzentration entsprechende Messtechnik mit geeigneten Nachweisgrenzen erforderlich. Für die Adsorption von Toluol an verschiedenen Filtermedien wurden mit dem Ziel einer Reduktion des Messaufwandes Durchbruchkurven ausgehend von experimentellen Daten berechnet. Mit den Ansätzen von Wheeler-Jonas und Yoon-Nelson wurden dabei Durchbruchkurven bei geringer Konzentration (0,9 ppm sowie 0,09 ppm) anhand von Messergebnissen aus Versuchen bei höheren Konzentrationen (9 ppm und 90 ppm sowie zusätzlich bei 40 ppm, um einen dritten Messpunkt für eine Berechnung zu erhalten) vorhergesagt. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.4 experimentell ermittelten Durchbruchkurven verglichen.

2.6.1 Modellierung von Durchbruchkurven bei geringeren Konzentrationen mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz

In der Abbildung 115 ist plakativ die Vorgehensweise zur Vorhersage der Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium des Herstellers B anhand der Messdaten, welche bei höheren Konzentrationen ermittelt wurden, schematisch dargestellt. Dazu wurde der modifizierte Wheeler-Jonas-Ansatz verwendet [Wheeler und Robell, 1969; Jonas und Rehrmann, 1972]:

$$t_{DB} = \frac{m \cdot X_{GGW}}{\dot{V} \cdot c_{ein}} - \frac{\rho_b \cdot X_{GGW}}{k_v \cdot c_{ein}} \cdot \ln \left(\frac{1 - \frac{c_{aus}}{c_{ein}}}{\frac{c_{aus}}{c_{ein}}} \right) \quad 9$$

Mit diesem Ansatz kann die Durchbruchzeit t_{DB} eines definierten Durchbruches (c_{aus}/c_{ein}) mit Hilfe zweier Terme berechnet werden. Der erste Term der rechten Seite dieser Gleichung beschreibt das Verhältnis aus der Kapazität eines Festbettes gegenüber einer bestimmten Konzentration der betrachteten Substanz (m : Adsorbensmasse, X_{GGW} : Gleichgewichtsbeladung pro Adsorbensmasse) und der pro Zeiteinheit zugeführten Adsorptivmasse (\dot{V} : Volumenstrom). Der erste Term wird in der Literatur auch als stöchiometrische Zeit t_s bezeichnet und ist ausgehend von einer idealen Kinetik die Zeit bis zu einem Durchbruch von 50 %. In dem zweiten Term der rechten Seite wird der limitierende Einfluss der Kinetik über den Massentransferkoeffizienten k_v sowie die Dichte des Festbettes bzw. des adsorptiven Mediums ρ_b berücksichtigt.

Zur Vorhersage der Durchbruchkurve wird zum einen, wie die Abbildung 115 repräsentativ für die Ermittlung einer Durchbruchkurve bei 0,9 ppm am Medium B zeigt, die Gleichgewichtsbeladung bei 0,9 ppm mit Hilfe der Freundlich-Gleichung aus den Gleichgewichtsbeladungen bei 90 ppm, 40 ppm und 9 ppm bestimmt. Zum anderen erfolgt die Vorhersage des Massentransferkoeffizienten bei 0,9 ppm über eine lineare Funktion aus den mittleren Massentransferkoeffizienten bei 90 ppm, 40 ppm und 9 ppm. Die Vorhersage der Durchbruchkurve bei 0,09 ppm Toluol erfolgt nach analoger Vorgehensweise.

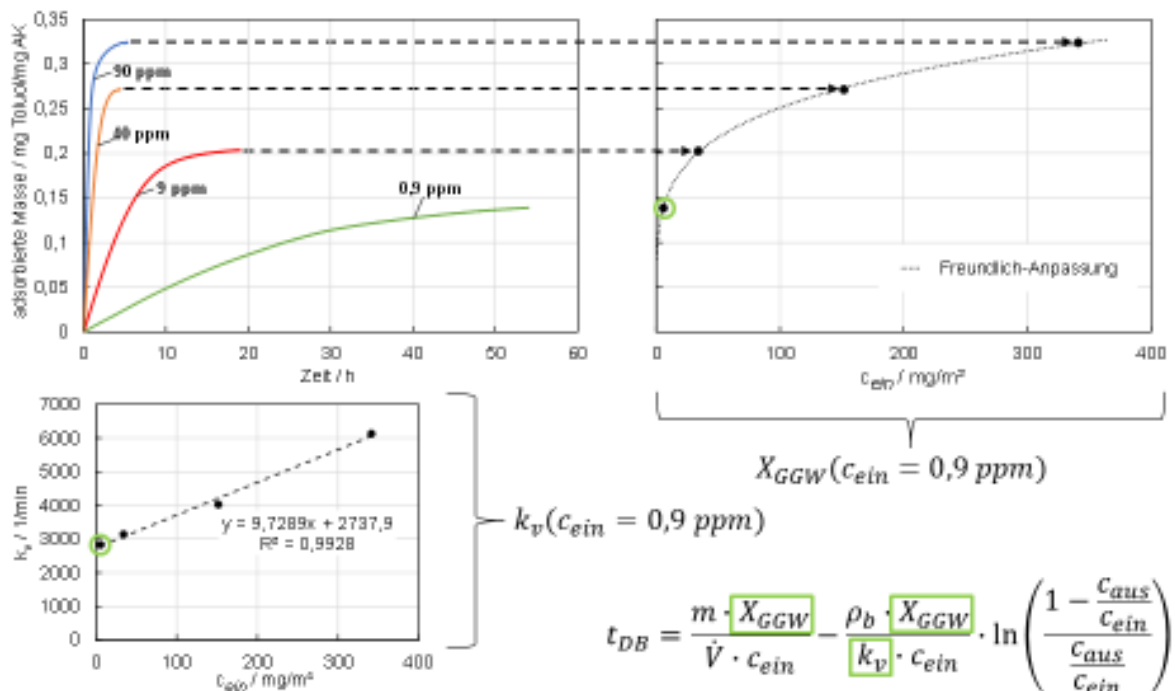


Abbildung 115: Schema zur Vorhersage von Durchbruchkurven bei niedrigen Konzentrationen mit Hilfe der Wheeler-Jonas-Gleichung

Die Abbildung 116 zeigt den Vergleich zwischen den experimentell ermittelten und den berechneten Durchbruchkurven am Medium B bei 0,9 ppm und 0,1 ppm Toluol, 23 °C, 50 % r. F. sowie einer Anströmgeschwindigkeit von 5,5 cm/s. Der Versuch bei 0,09 ppm wurde für 45 h durchgeführt. Der Abbildung 116 ist zu entnehmen, dass mit dem oben beschriebenen Berechnungsschema eine zufriedenstellende Vorhersage der Durchbruchkurven bei 0,9 ppm und 0,09 ppm Toluol am Filtermedium B erhalten wurde. Ferner ist in Abbildung 117 die gesamte modellierte Durchbruchkurve bei 0,09 ppm Toluol zu sehen. Ausgehend von der Annahme, dass eine zufriedenstellende Vorhersage durch das Modellierungsschema möglich ist (in den ersten 45 h ist eine akzeptable Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Durchbruchkurven gegeben), würde der Gleichgewichtszustand nach etwa 900 h erreicht werden. Die Versuchs- oder die Standzeit des Mediums bis zu einem Durchbruch von 50 % würde bei 0,09 ppm Toluol laut der Berechnung bereits ungefähr 250 h dauern.

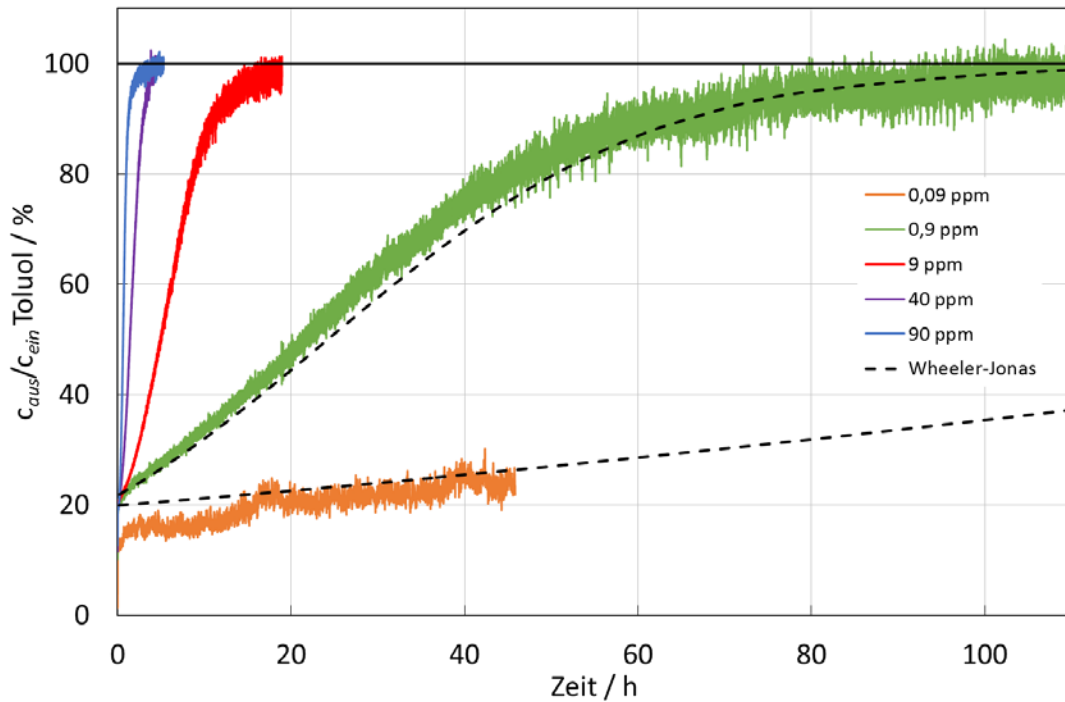


Abbildung 116: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 5,5$ cm/s) und mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz berechneten Durchbruchkurven bei 0,9 ppm und 0,09 ppm (Anfangsbereich) Toluol am Medium B

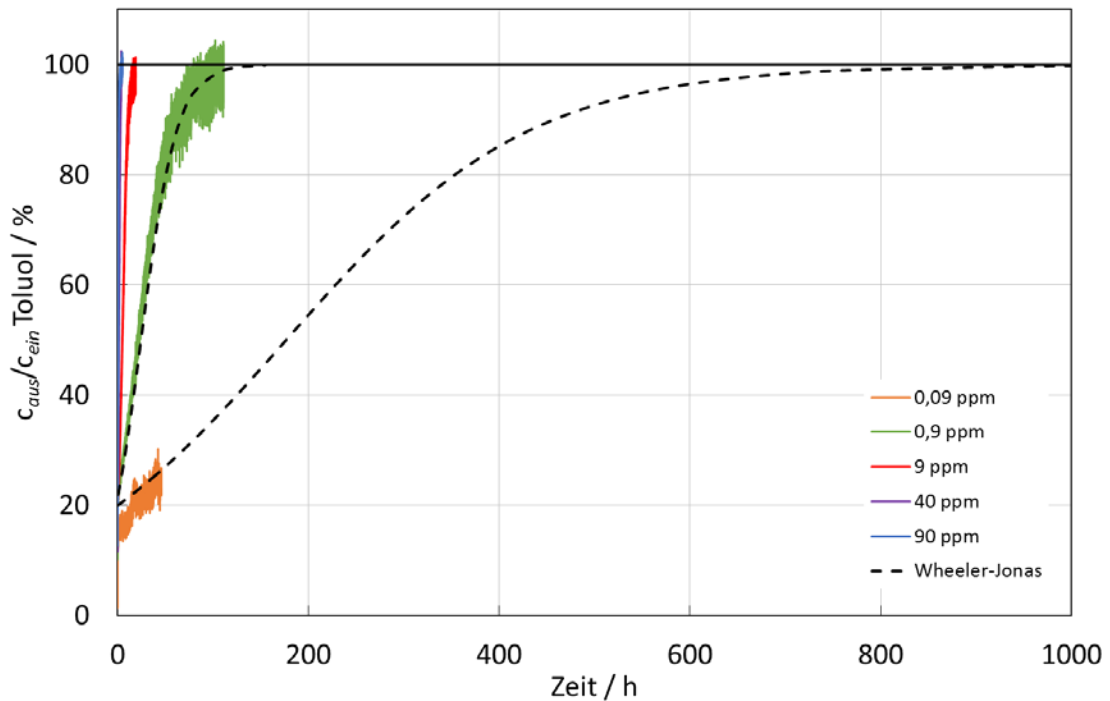


Abbildung 117: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 5,5$ cm/s) und mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz berechneten Durchbruchkurven bei 0,9 ppm und 0,09 ppm Toluol am Medium B

In der Abbildung 118 ist die mit Hilfe des Wheeler-Jonas-Ansatzes berechnete Durchbruchskurve bei 0,9 ppm am Medium A als Doppellage mit der experimentell ermittelten verglichen (identische Versuchsbedingungen wie bei dem Medium B). Hier zeigt sich eine Abweichung zwischen der berechneten und der experimentellen Durchbruchskurve im unteren Bereich. Dieser Sachverhalt kann dadurch erklärt werden, dass mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz symmetrische Durchbruchskurven mit einem Wendepunkt bei 50 % Durchbruch modelliert werden. Diese symmetrische Form liegt jedoch im Experiment am Medium A (Doppellage) nicht vor. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben, sind die am Medium A (Doppellage) ermittelten Durchbruchskurven nicht symmetrisch sondern konkav zur Zeitachse und weisen keinen Wendepunkt auf.

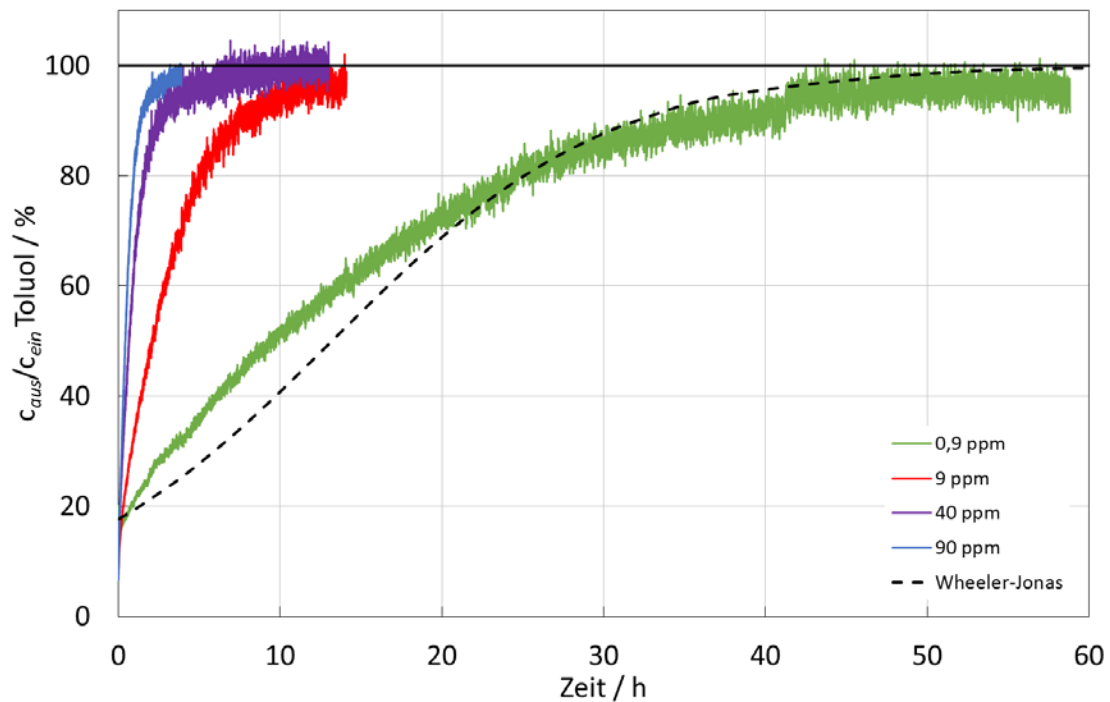


Abbildung 118: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 5,5$ cm/s) und mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz berechneten Durchbruchskurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium A als Doppellage

Die Validierung des oben erläuterten Modellierungsschemas wurde zudem anhand eines dritten Systems vorgenommen. Dazu sind in der folgenden Abbildung 119 die experimentell ermittelten Durchbruchskurven des Toluols am Medium C dargestellt und die gemessene Durchbruchskurve bei 0,9 ppm mit der berechneten verglichen. Aufgrund des symmetrischen Verlaufs der Durchbruchskurve lässt sich bei 0,9 ppm eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Vorhersage erhalten.

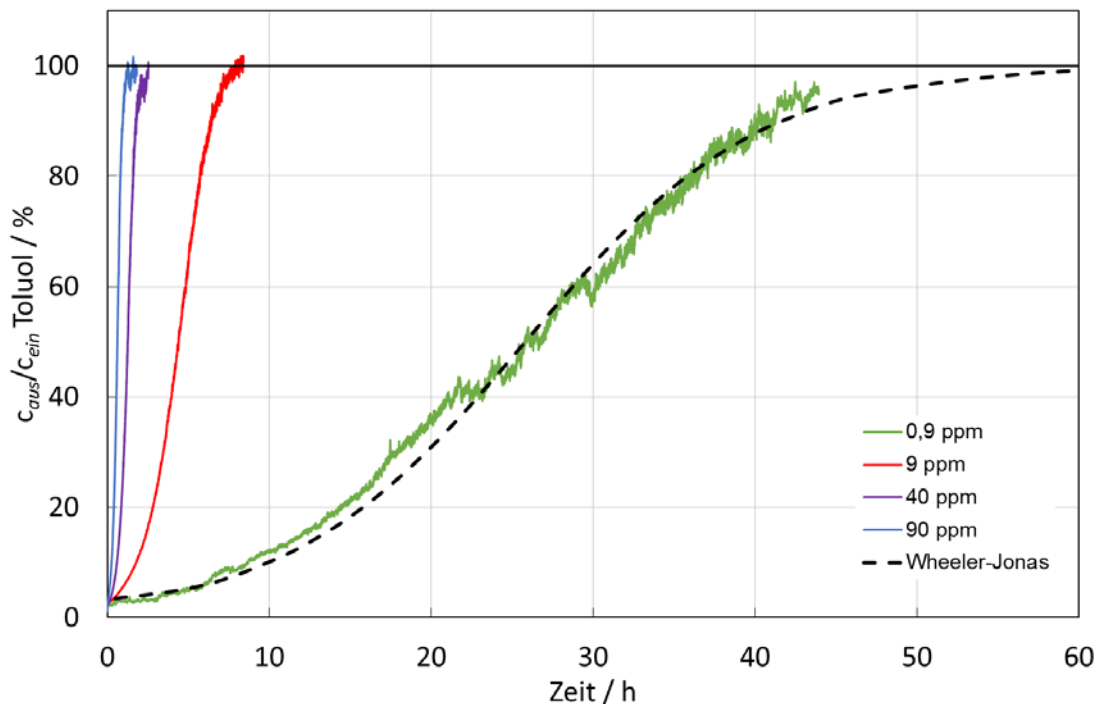


Abbildung 119: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 18$ cm/s) und mit dem Wheeler-Jonas-Ansatz berechneten Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium C

2.6.2 Modellierung von Durchbruchkurven ab einem Durchbruch von 50 % mit dem Yoon-Nelson-Ansatz

Als zweite Möglichkeit, den Messaufwand zu verringern, wurde das Konzept untersucht, Durchbruchkurven nur bis zu einem Durchbruch von 50 % aufzunehmen und anschließend den weiteren Verlauf bis zum Gleichgewicht vorherzusagen. Dazu wurde der Ansatz von Yoon-Nelson verwendet [Yoon und Nelson, 1984]:

$$t_{DB} = t_s - \frac{1}{k^*} \cdot \ln \left(\frac{1 - \frac{c_{aus}}{c_{ein}}}{\frac{c_{aus}}{c_{ein}}} \right) \quad 10$$

Dieser Ansatz entspricht in seiner mathematischen Form dem von Wheeler und Jonas. Der erste Term ist analog zum Wheeler-Jonas-Ansatz die stöchiometrische Zeit t_s (Zeit bis zu einem Durchbruch von 50 %). Der vorlogarithmische Faktor ist im Vergleich zu der Gleichung von Wheeler und Jonas ein reziproker Geschwindigkeitskoeffizient k^* .

Anhand der Abbildung 120 wird die Vorgehensweise bei der Vorhersage der Durchbruchkurven bei 90 ppm, 40 ppm, 9 ppm und 0,9 ppm Toluol bei 23 °C und 50 % r. F. am Medium B veranschaulicht. Aus den Messungen bis zu einem Durchbruch von 50 % wird sowohl die stöchiometrische Zeit t_s als auch der Geschwindigkeitskoeffizient k^* bestimmt. Mit dem mittleren Geschwindigkeitskoeffizienten sowie der stöchiometrischen Zeit erfolgt anschließend die Berechnung der weiteren Verläufe der Durchbruchkurven bis zum Gleichgewicht.

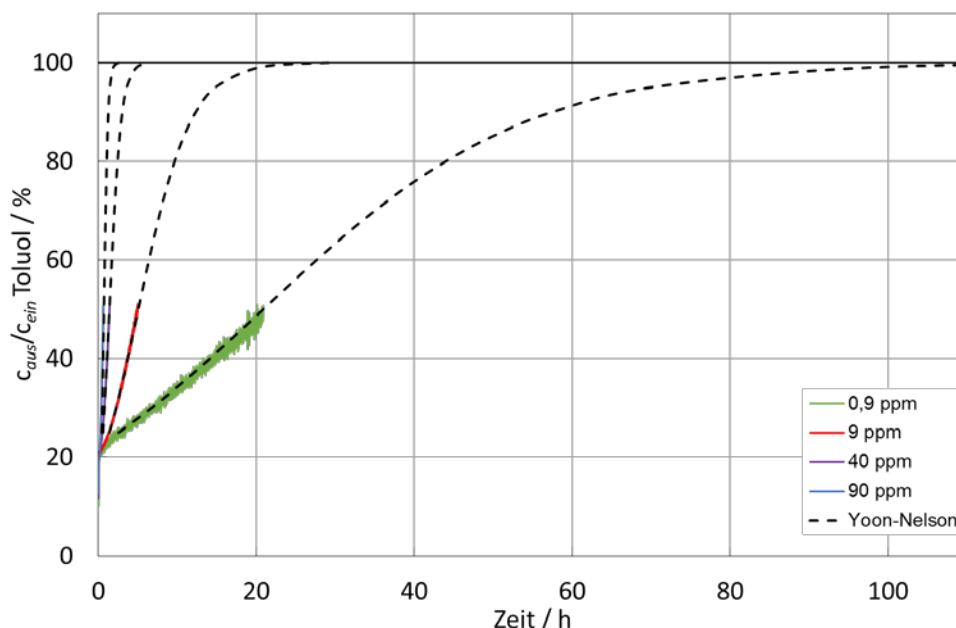


Abbildung 120: Veranschaulichende Darstellung zur Vorhersage von Durchbruchkurven mit Hilfe der Yoon-Nelson-Gleichung

Der Vergleich der nach dem Yoon-Nelson-Ansatz berechneten Durchbruchkurven mit den am Filtermedium B (Abbildung 121) und C (Abbildung 123) experimentell ermittelten zeigt eine gute Übereinstimmung. Eine zufriedenstellende, jedoch etwas schlechtere Vorhersage liegt am Filtermedium A (Doppellage) vor, was wie oben beschrieben auf die unsymmetrische Durchbruchkurvenform von Toluol am Filtermedium A in doppelter Lage zurückzuführen ist (Abbildung 122). So ist insbesondere im oberen Bereich der Durchbruchkurven eine nennenswerte Abweichung zwischen den experimentellen Daten und der Berechnung zu erkennen.

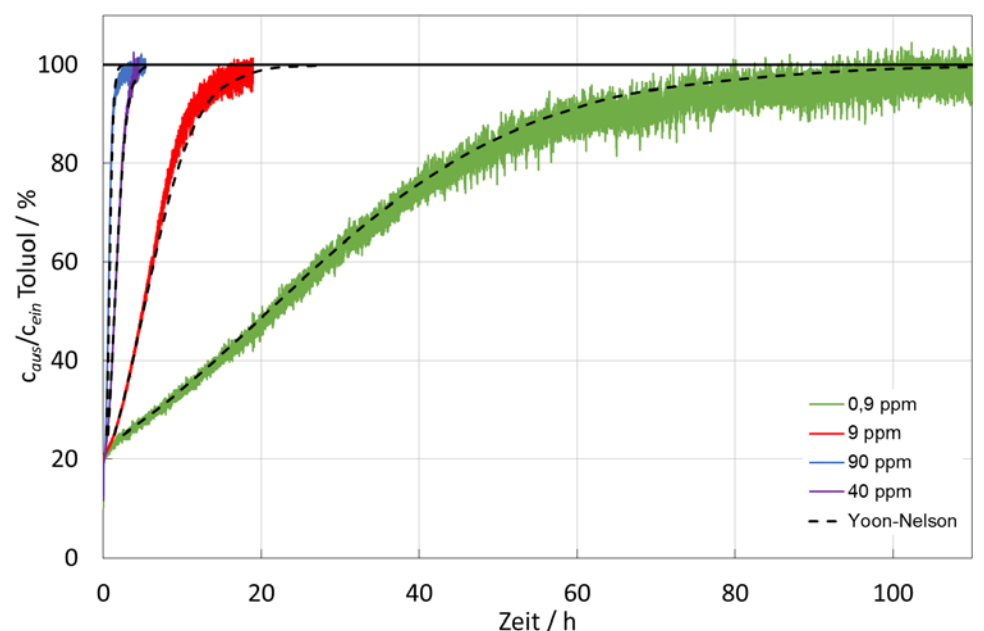


Abbildung 121: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., v = 5,5 cm/s) und mit dem Yoon-Nelson-Ansatz berechneten Durchbruchkurven von Toluol am Medium B

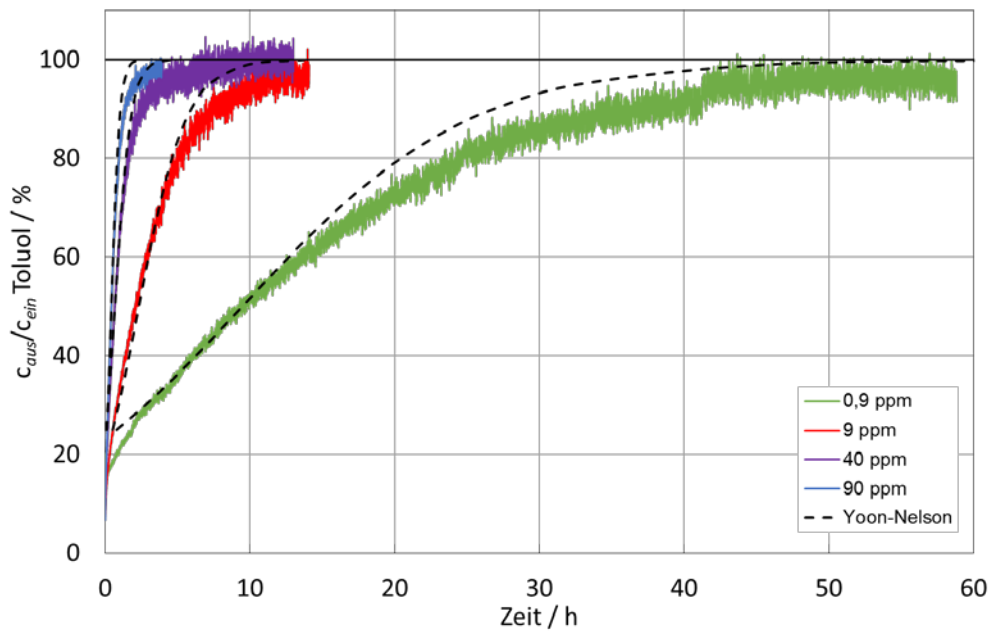


Abbildung 122: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 5,5$ cm/s) und mit dem Yoon-Nelson-Ansatz berechneten Durchbruchkurven von Toluol am Medium A als Doppellage

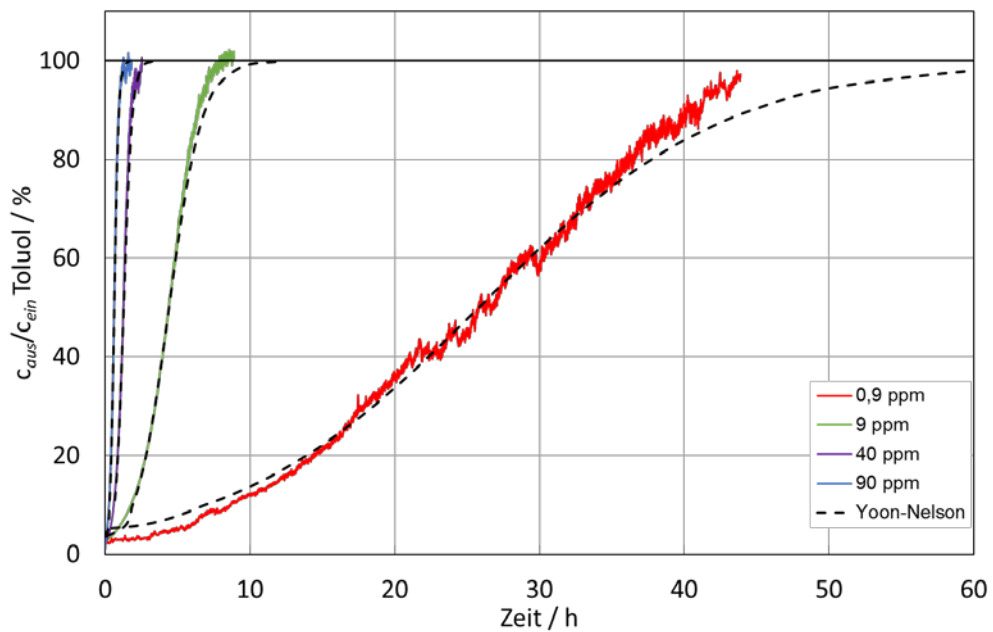


Abbildung 123: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., $v = 18$ cm/s) und mit dem Yoon-Nelson-Ansatz berechneten Durchbruchkurven von Toluol am Medium C

2.6.3 Kopplung des Wheeler-Jonas- und des Yoon-Nelson-Ansatzes

Als eine dritte Möglichkeit, den Messaufwand zur Bestimmung von Durchbruchkurven bei niedrigen Konzentrationen zu verringern, wurde eine Kombination der Ansätze von Yoon-Nelson und Wheeler-Jonas untersucht. Im Rahmen der Kombination der Berechnungsverfahren wurden Durchbruchkurven bei höheren Konzentrationen (90, 40 und 9 ppm) zunächst nur bis zu einem Durchbruch von 50 % betrachtet. Mit Hilfe der Yoon-Nelson-Gleichung wurde der weitere Verlauf der Durchbruchkurven vorhergesagt, aus dem über eine Massenbilanz die Kapazität bei der jeweiligen Konzentration berechnet werden konnte. Die daraus bestimmten Kapazitäten können anschließend in Form von Isothermen aufgetragen und daraus die Kapazität bei beispielsweise 0,9 ppm berechnet werden (Äquivalent zu Abbildung 115, oben). Aus den nach dem Yoon-Nelson-Ansatz berechneten Durchbruchkurven wurden zudem die mittleren Massentransferkoeffizienten k_p der Wheeler-Jonas-Gleichung bestimmt. Aus der Darstellung der Massentransferkoeffizienten in Abhängigkeit der Toluolkonzentration kann eine Vorhersage des Massentransferkoeffizienten bei 0,9 ppm vorgenommen werden (Abbildung 115, unten links). Ein Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Durchbruchkurven bei 0,9 ppm Toluol ist für die Medien A, B und C in den folgenden drei Abbildungen zu sehen. Ferner können dort die drei Vorhersageschemata in Relation zueinander betrachtet werden.

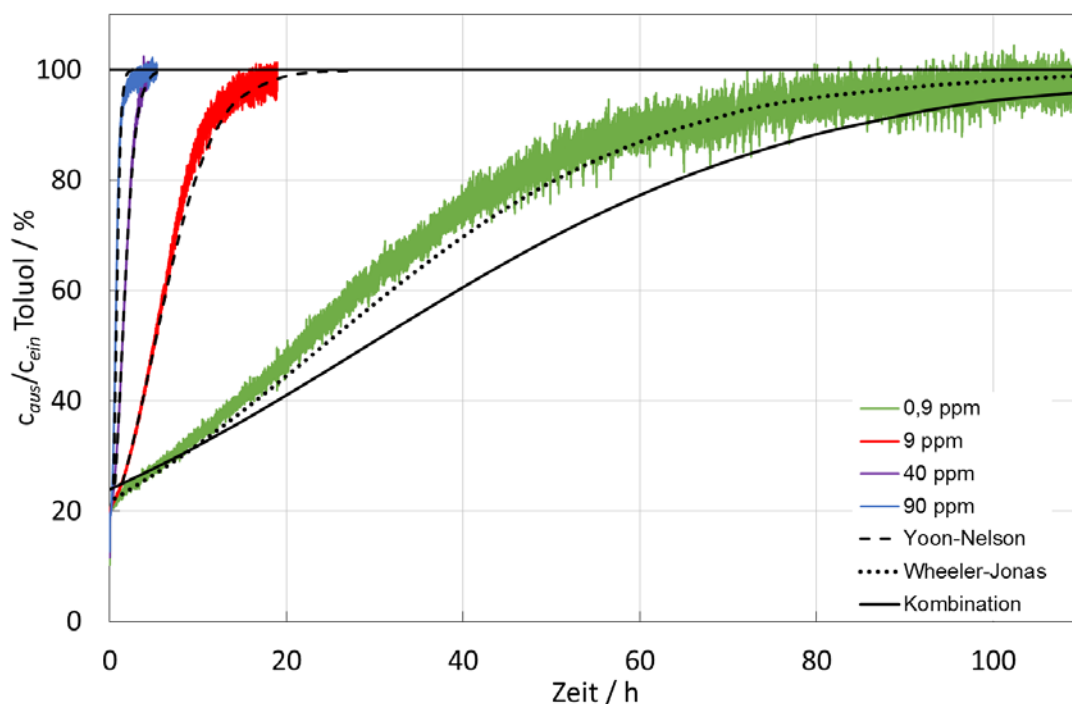


Abbildung 124: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., 5,5 cm/s) und mit der Kombination des Yoon-Nelson- und des Wheeler-Jonas-Ansatzes berechneten Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium B

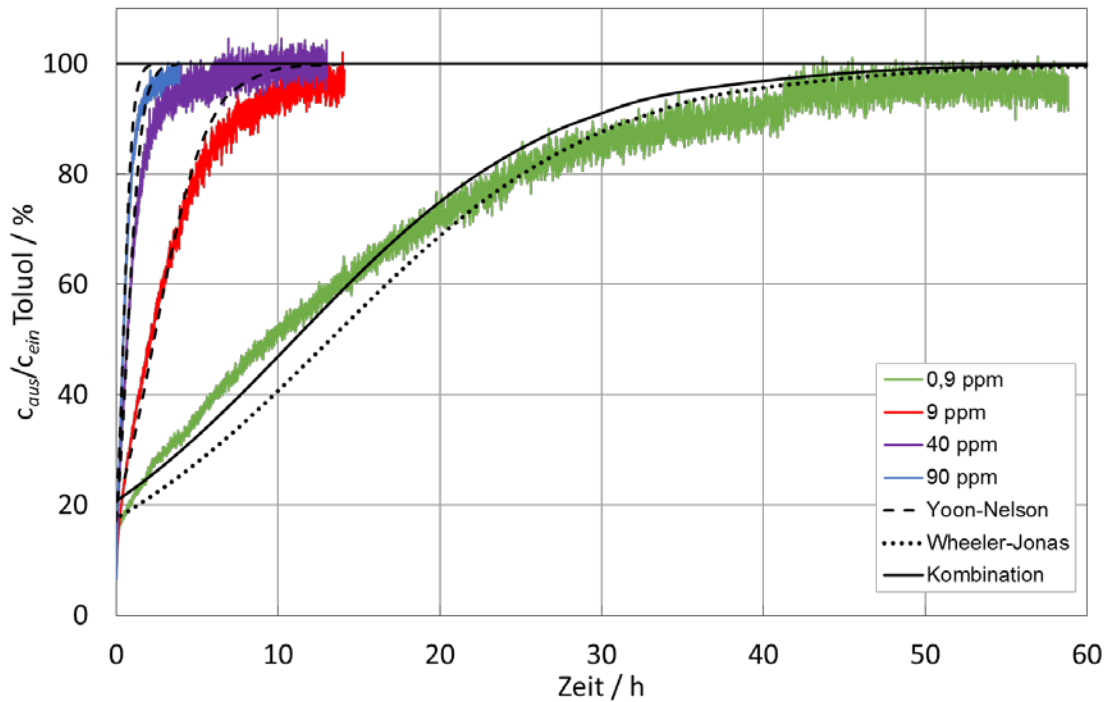


Abbildung 125: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., 5,5 cm/s) und mit der Kombination des Yoon-Nelson- und des Wheeler-Jonas-Ansatzes berechneten Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium A als Doppellage

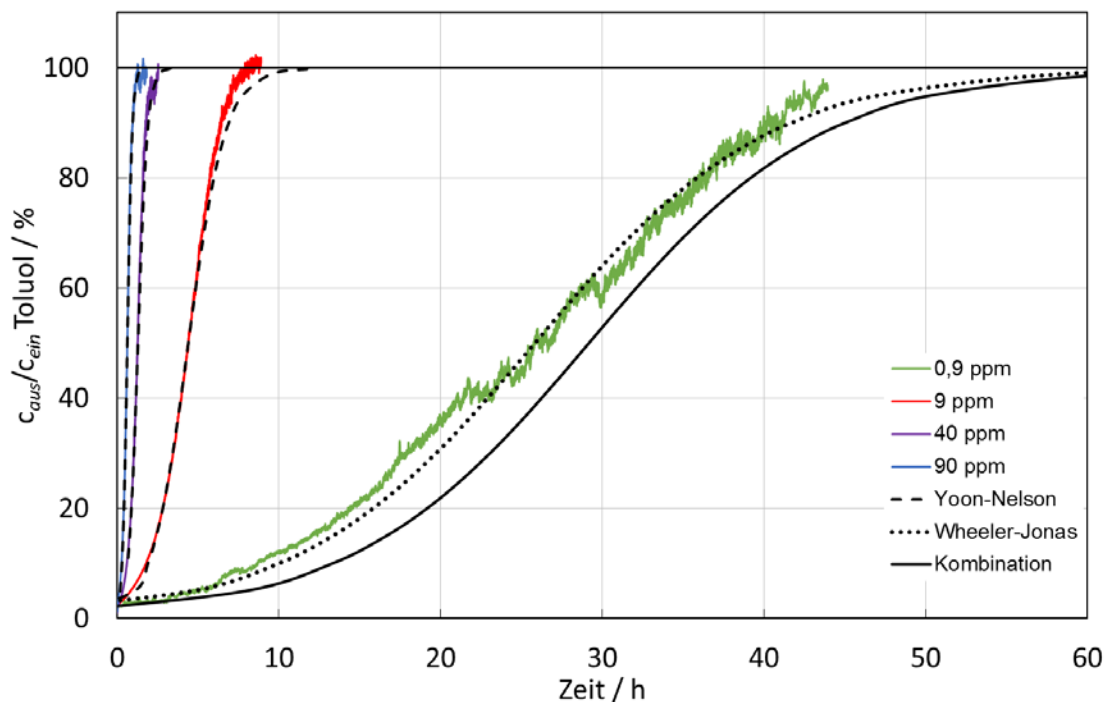


Abbildung 126: Vergleich der experimentellen (23 °C, 50 % r. F., v =18 cm/s) und mit der Kombination des Yoon-Nelson- und des Wheeler-Jonas-Ansatzes berechneten Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium B

Der Vergleich des kombinierten Berechnungsverfahrens mit den experimentell ermittelten Durchbruchkurven zeigt für die Medien B und C eine Überschätzung der Adsorptionsleistung durch die Berechnung (Abbildung 124 und Abbildung 126). Die wesentliche Begründung dafür ist folgende und kann den jeweiligen Abbildungen entnommen werden: Der Wendepunkt der berechneten Durchbruchkurve bzw. die stöchiometrische Zeit t_s wird durch die Kapazität des Filtermediums bestimmt. Bei einer höheren Kapazität wird entsprechend eine höhere stöchiometrische Zeit bei Annahme eines konstanten Volumenstromes berechnet und vice versa. Wie in den Abbildungen zu sehen (Medium B und C) ist, wird durch das Yoon-Nelson-Verfahren eine bessere Adsorptionsleistung vorhergesagt, was in einer höheren berechneten Kapazität resultiert. Aufgrund dessen hat die berechnete Zeit t_s einen höheren Wert als dies im Versuch der Fall ist und die vorhergesagte Durchbruchkurve ist in Relation zu der experimentellen und derjenigen nach Wheeler-Jonas (Medien B und C) nach rechts verschoben. Bei Betrachtung der Vorhersage der Durchbruchkurve bei 0,9 ppm Toluol am Medium A als Doppellage (Abbildung 125) ist zu erkennen, dass durch das Yoon-Nelson-Verfahren rechnerisch eine schlechtere Adsorptionsleistung vorhergesagt wird als tatsächlich vorliegt. Die daraus resultierende geringere Kapazität, welche aus der Berechnung hervorgeht, führt zu einer geringfügigen Verschiebung der berechneten Durchbruchkurve nach links im Vergleich zu der experimentellen und der nach dem Wheeler-Jonas-Ansatz vorhergesagten.

2.7 AP II - Validierung der Prüfmethode nach DIN EN ISO 10121

Die DIN EN ISO 10121-1 beschreibt Prüfmethode für Filtermedien, die in Filtern für raumluftechnische Anlagen eingesetzt werden. Es wird eine normierte Vergleichsprüfung für Medien beschrieben, in der drei Testsubstanzen (Toluol, Schwefeldioxid und Ammoniak) zwei Testgasvolumenanteile (9 ppm, 90 ppm), die Testgastemperatur von 23 °C, die relative Luftfeuchte von 50 %, der Adsorberinnendurchmesser und die Anströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Sorbensabmessungen vorgegeben werden. Das Ziel der normierten Vergleichsprüfung ist, innerhalb von zwölf Stunden Versuchszeit Testergebnisse zu ermitteln, mit denen Filtermedien verglichen werden können. Bei allen Testparametern wird jedoch darauf hingewiesen, dass es am besten ist, die tatsächlichen Anwendungsparameter zu verwenden. Der Einfluss der Testsubstanz, des Testvolumenanteils, der Temperatur und der relativen Feuchte wird thematisiert. Wie die Ergebnisse in diesem Bericht zeigen, kann beispielsweise eine Prüfung der Filtermedien bei realistischeren Prüfgaskonzentrationen einen hohen Messaufwand erfordern. Deshalb kann, wenn seitens des Anwenders bzw. Kunden des Filtermediums eine Prüfung bei niedriger Konzentration und ggf. mit einer spezifischen Substanz erwünscht ist, eine Messzeit von mehreren Tagen oder Wochen erforderlich sein. Die Norm empfiehlt somit eine Prüfmethode, die auf einem Kompromiss zwischen Machbarkeit und Aussagekraft basiert, weist jedoch darauf hin, dass die in der Realität zu erwartenden Bedingungen (Konzentration, Temperatur, relative Feuchte) einen wesentlichen Einfluss auf das Adsorptionsverhalten haben können und bei starken Abweichungen experimentell zu validieren sind. Für Prüfungen nach DIN EN ISO 10121-1 ist ein Adsorptionsprüfstand inklusive der Vorrichtungen zur Dosierung und der entsprechenden Messgeräte notwendig, in dem Medienproben bis zu einem Durchmesser von 113 mm mit Anströmgeschwindigkeiten bis 0,52 m/s geprüft werden können. Weitere Anforderungen betreffen die Materialbeständigkeit und die Dichtheit der Anlage. In Deutschland gibt es mehrere Institute, die Tests nach DIN EN ISO 10121-1 durchführen können und diese Tests auch kommerziell anbieten.

Teil 2 der DIN EN ISO 10121 beschreibt Prüfmethode für konfektionierte Raumlufffilter. 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) festgelegt. Für Filtertests gemäß DIN 10121-2 ist ein Prüfstand mit einer Querschnittsfläche von 600 mm x 600 mm und mit einem Ventilator, mit dem Volumenströme bis mindestens 3400 m³/h realisiert werden können, erforderlich. Es gelten die gleichen Anforderungen an Materialbeständigkeit und Dichtigkeit wie für den Prüfstand für Medien. Die großen Volumenströme können ein Problem bei der Klimatisierung darstellen. An dem Prüfstand für RLT-Filter an der FS2 war es bei sehr hohen Außentemperaturen und hoher Luftfeuchte nicht immer möglich, über mehrere Stunden Versuchszeit die in der Norm vorgegebenen Toleranzbereiche für Temperatur und Luftfeuchte einzuhalten. Testgasvolumenanteile von mehr als 1 ppm Ozon waren bei Testvolumenströmen von 3400 m³/h auch mit zwei Ozongeneratoren nicht zu realisieren. Von Testgasvolumenanteilen größer als 9 ppm wurde auch bei den anderen Testsubstanzen abgesehen. Bei Toluol ist die Dosierung von 90 ppm schwierig, bei den anderen Substanzen ist der Sicherheitsfilter, der hinter der Teststrecke bei den Durchbruchversuchen durchgebrochene Testsubstanz abscheidet, ein limitierender Faktor. Die Errichtung eines Prüfstandes gemäß DIN EN ISO 10121-2 und der Betrieb sind sehr aufwändig. In Deutschland gibt es daher auch nur sehr begrenzte Möglichkeiten Adsorptionstests an RLT-Filtern in Anlehnung an DIN EN ISO 10121-2 durchführen zu lassen.

Da die Validierung von Filtermedien nach DIN EN ISO 10121-1 in kleinerem Maßstab erfolgt, als dies bei konfektionierten Filtern (nach DIN EN ISO 10121-2) der Fall ist, kann es aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, durch Medientests möglichst viele Leistungsdaten zu generieren. Die Medienprüfung kann also nicht nur für Vergleichstests von Materialien sondern auch zur Untersuchung des Adsorptionsverhaltens bei von der Norm abweichenden Bedingungen genutzt werden. So kann das Verhalten bei niedrigen raumluftechnisch relevanten Konzentrationen beispielsweise anhand einer Kombination aus Messdaten und Berechnungen abgeschätzt werden. Des Weiteren ist es möglich, an Medien den Einfluss der relativen Feuchte auf das Adsorptionsverhalten zu untersuchen. Je nach Filterform lassen sich Leistungsdaten von Filtermedien teilweise relativ gut auf Filter übertragen, was durch Ergebnisse mit verschiedenen Substanzen gezeigt wurde. Im Falle einer nicht zufriedenstellenden Übertragbarkeit lassen sich dennoch Tendenzen beispielsweise hinsichtlich des Einflusses der relativen Feuchte an Filtermedien erkennen.

2.8 Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen

In Tabelle 11 werden die angestrebten Ziele des Forschungsvorhabens aufgeführt. In der rechten Spalte wird auf die Abschnitte verwiesen, in denen die erarbeiteten Ergebnisse detailliert beschrieben werden. Zu jedem Ziel wurden Ergebnisse erarbeitet.

Tabelle 11: Ziele und Ergebnisse des Forschungsvorhabens 18516 N

AP	Ziele	Ergebnisse
1	Aussagen zur Vergleichbarkeit von Testergebnissen nach DIN EN ISO 10121-1 (Medien) und DIN EN ISO 10121-2 (Filtern)	2.2.6
	für die Testsubstanz n-Butan	2.2.5.1
	für die Testsubstanz Toluol	2.2.5.2
	für die Testsubstanz SO ₂	2.2.5.3
	für die Testsubstanz NH ₃	2.2.5.4
	für die Testsubstanz NO ₂	2.2.5.5
	für die Testsubstanz Ozon	2.2.5.6
2	Erkenntnisse zum Einfluss der relativen Luftfeuchte auf Adsorptionstests nach DIN EN ISO 10121-1	2.3.3
	für die Testsubstanz Toluol	2.3.2.1
	für die Testsubstanz SO ₂	2.3.2.2
	für die Testsubstanz NH ₃	2.3.2.3
	für die Testsubstanz Ozon	2.3.2.4
3	Informationen zum Einfluss der Testgaskonzentration auf Adsorptionstests nach DIN EN ISO 10121-1	2.4.5
	für die Testsubstanz n-Butan	2.4.1
	für die Testsubstanz Toluol	2.4.2
	für die Testsubstanz SO ₂	2.4.3
	für die Testsubstanz NH ₃	2.4.4
4-1	Basiswissen zur Durchführung von Adsorptionstests nach DIN EN ISO 10121-1 mit	
	Formaldehyd	2.5.2
	Naphthalin	2.5.3
4-2	Erfahrungswerte zur Adsorption an Filtermedien für die Raumlufttechnik von	
	Schwefelwasserstoff	2.5.1
	Formaldehyd	2.5.2
	Naphthalin	2.5.3

	Prüfung von Ersatztestsubstanzen für	2.5.4
	Schwefelwasserstoff	2.5.1
	Formaldehyd	2.5.2
	Naphthalin	2.5.3
I	Weiterentwicklung analytischer Ansätze zur Berechnung von Durchbruchkurven	2.6
	über bestimmte experimentell ermittelte Werte hinaus	2.6.1
	bei geringeren Konzentrationen	2.6.2
II	Evaluierung der DIN EN ISO 10121	2.7

3 Verwendung der Zuwendung

FS1 Universität Duisburg-Essen

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA-A	18	Personenmonate
HPA-B	23	Personenmonate
in Summe zu	41	Personenmonate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) entfällt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) entfällt

FS2 IUTA

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

HPA-A	18	Personenmonate
-------	----	----------------
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) entfällt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) entfällt

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

FS1 Universität Duisburg-Essen

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem Antrag. Es wurden, im beabsichtigten Umfang, Durchbruchversuche mit den vorgesehenen Substanzen an Filterelementen und den zugehörigen Medien bei unterschiedlichen Bedingungen hinsichtlich Prüfgaskonzentration und relativer Feuchte durchgeführt und ausgewertet. Anhand der Ergebnisse wurde die DIN EN ISO 10121 evaluiert. Des Weiteren erfolgte die Erstellung und Validierung von Modellierungsschemata zur Vorhersage von Durchbruchkurven, mit dem Ziel, den Messaufwand bei der Ermittlung adsorptiver Leistungsdaten zu reduzieren. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

FS2 IUTA

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem Antrag. Wie vorgesehen, wurde der Prüfstand für Raumlufffilter modifiziert und die Dosierung von Formaldehyd und Naphthalin erfolgreich erprobt und ausgeführt. Es wurden Durchbruchversuche an Raumlufffiltern und den zugehörigen Medien im beabsichtigten Umfang durchgeführt und ausgewertet. Anhand der Ergebnisse wurde die DIN EN ISO 10121 evaluiert. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

5 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Evaluierung der DIN EN ISO 10121 sind für Filter- und Medienhersteller auf vielfältige Weise von Nutzen. Durch die Anwendung der Norm auf eine große Auswahl von kommerziell erhältlichen Filtern und die Veröffentlichung der Ergebnisse in neutraler Form, wurde die Bandbreite der Leistungsfähigkeit adsorptiver Filter für die Raumlufttechnik klarer. Das kann Herstellern die Einschätzung der eigenen Produkte erleichtern und zu einer besseren Vermarktung führen. Die Ergebnisse zum Einfluss der Testgaskonzentration und der Feuchte stärken darüber hinaus die Produktkompetenz der Hersteller. Weiterhin können die Ergebnisse zur Übertragbarkeit von Testergebnissen, die an Medien gewonnen wurden, auf Filter dazu beitragen, die Kosten während der Entwicklungsphase von Filtern zu senken. Das Interesse an den Forschungsarbeiten seitens der Industrie wurde belegt durch die rege Beteiligung an den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses.

In technischer Hinsicht wurden in dem Forschungsvorhaben Methoden zur Durchführung von Adsorptionstests mit den Testsubstanzen Formaldehyd und Naphthalin erarbeitet, die weitere Forschungsarbeiten ermöglichen. Zu wissenschaftlichem Nutzen führten neben den Untersuchungen zum Adsorptionsgleichgewicht und der Gemischadsorption mit feuchter Luft insbesondere die Arbeiten zur Vorausberechnung von Durchbruchkurven auf der Basis von semi-empirischen Ansätzen.

6 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Datum / Zeitraum
Veröffentlichung aktueller Aktivitäten und Ergebnisse auf den Internetseiten der FS: http://www.iuta.de/index.php?article_id=735&clang=0	fortlaufend
Information von Unternehmen bei den Sitzungen des PA im IUTA in Duisburg	09.12.2014 05.11.2015 03.11.2016 26.09.2017
Vorträge bei Tagungen / Seminaren: 29. Palas ATS-Seminar, Karlsruhe 7. Doktorandenseminar „Adsorption“, TU Kaiserslautern 8. Filtrationstag, IUTA e.V., Duisburg ProcessNet, Jahrestreffen Fachgruppe „Adsorption“, Köln Sitzung des AK Luftfilter im VDMA, Weinheim	29.09.2015 7./8.09.2016 03.11.2016 07.-08.03.2017 14.11.2017
Poster bei Tagungen: ProcessNet, Jahrestreffen Fachgruppe „Gasreinigung“ in Frankfurt	21.-23.03.2017
Veröffentlichung in Fachzeitschrift: Sager et al. (2017): Qualifizierung von Adsorptionsfiltern und -medien für die Raumlufttechnik gemäß DIN EN ISO 10121. In: <i>GI</i> –	12/2017

<i>Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis</i> 138(6), 490-498.	
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre an der Universität Duisburg-Essen: „Aerosolprozesstechnik“ und „Reaktionstechnik“ Prof. Dr. F. Schmidt „Adsorptionstechnik / Therm. Verfahrenstechnik“ Prof. Dr. D. Bathen „Air pollution control“ Dr. S. Haep „Umweltmesstechnik“ Dr. C. Asbach	fortlaufend
Mitwirkung bei der Erstellung von Richtlinien: Prof. Dr.-Ing. F. Schmidt: <ul style="list-style-type: none"> • NAM im DIN, FB: Allgemeine Lufttechnik (NA 060) • Normenausschuss Kraftfahrzeuge des Verbandes der Automobilindustrie Arbeitskreis „Kabinenluftfilter“ • Richtlinienausschuss VDI 6032 Bl. 2 Prof. Dr.-Ing. D. Bathen: <ul style="list-style-type: none"> • Richtlinienausschuss der VDI 3928 	fortlaufend
Besuche von Vertretern verschiedener Firmen des PA an den FS1 und FS2	mehrfach während der Projektlaufzeit

Geplante Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Datum / Zeitraum	Realisierbarkeit
Vorträge bei Tagungen / Seminaren: Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe „Gasreinigung“ und des TAK „Aerosoltechnik“, Erlangen	19.-20.02.2018	durchgeführt
Poster bei Tagungen: InterPore 2018, New Orleans, USA	14.-17.05.2018	angenommener Beitrag
Veröffentlichung in Fachzeitschrift: Adsorption Science & Technology Filtrieren und Separieren	Mai 2018 Juli 2018	hoch hoch

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Der Transfer der im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse in die Wirtschaft soll durch Präsentationen sowie Diskussionen auf relevanten Tagungen, in Form von Veröffentlichungen

in Fachzeitschriften und durch Bereitstellung eines Leitfadens zur Norm sowie eines Berechnungstools auf den Internetseiten der FS realisiert werden. Der oben genannte Vortrag bei dem Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe „Gasreinigung“ und des TAK „Aerosoltechnik“ wurde bereits umgesetzt. Im Rahmen dieser Veranstaltung, in welcher Vertreter akademischer Einrichtungen sowie der Industrie mit einem Anteil an KMU anwesend waren, wurden Teile der Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Durch die Präsentation der Erkenntnisse anhand eines Posters auf der Konferenz „InterPore 2018“ in New Orleans wird ein Austausch mit einem breiten, internationalen Fachpublikum erwartet. Des Weiteren werden für die Veröffentlichung der Ergebnisse in schriftlicher Form die Fachzeitschriften „Adsorption Science & Technology“ sowie „Filtrieren und Separieren“ gewählt, welche erfahrungsgemäß von KMU aus dem Bereich der Filtration vielfach als Informationsquelle genutzt werden. Die Realisierbarkeit des Transfers über die genannten Zeitschriften wird deshalb als hoch eingeschätzt. Des Weiteren wird die Nutzung des auf den Internetseiten bereitgestellten Leitfadens zur Norm sowie des Berechnungstools als sehr realistisch eingeschätzt, da sowohl im Rahmen von Sitzungen des PA sowie in Diskussionen auf Tagungen mehrere Firmenvertreter ein Interesse zeigten und auf die Internetseiten der FS verwiesen wurden.

7 Literaturverzeichnis

- Bandosz, 2006 Bandosz, T.J. (2006): Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation. Elsevier, Amsterdam/London
- Burge, 2004 Burge, P.S. (2004): Sick building syndrome. In: *Occupational and Environmental Medicine* 61 (2), S. 185–190
DOI: 10.1136/oem.2003.008813
- Busch, 2014 Busch, M.I. (2014): Catalysts for low temperature conversion of nitrogen oxides. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
- Do und Do, 2000 Do, D. D.; Do, H. D. (2000): A model for water adsorption in activated carbon. In: *Carbon* 38 (5), S. 767–773
DOI: 10.1016/S0008-6223(99)00159-1
- Jansen, 2005 Jansen, J. (2005): Steuerung der sorptiven Stofftrennung durch Wirkung hoher Drücke. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr, Hamburg
- Jonas und Rehrmann, 1972 Jonas, L. A.; Rehrmann, J. A. (1972): The kinetics of adsorption of organo-phosphorus vapors from air mixtures by activated carbons. In: *Carbon* 10 (6), S. 657–663. DOI: 10.1016/0008-6223(72)90073-5
- Kasprzyk-Hordern et al., 2003 Kasprzyk-Hordern, B.; Ziólek M.; Nawrocki; J. (2003): Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. In: *Applied Catalysis B: Environmental* 46 (4), S. 639–669. DOI: 10.1016/S0926-3373(03)00326-6
- Kast, 1988 Kast, W. (1988): Adsorption aus der Gasphase. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim
- Lee und Davidson, 1999 Lee, P.; Davidson, J. (1999): Evaluation of activated carbon filters for removal of ozone at the PPB level. In: *American Industrial Hygiene Association journal* 60 (5), S. 589-600.
DOI: 10.1080/00028899908984478
- Müller und Gubbins, 1998 Müller, E.A.; Gubbins, K.E. (1998): Molecular simulation study of hydrophilic and hydrophobic behavior of activated carbon surfaces. In: *Carbon* 36 (10), S. 1433–1438.
DOI: 10.1016/S0008-6223(98)00135-3
- Profos und Pfeifer, 1994 Profos, P.; Pfeifer, T. (1994): Handbuch der industriellen Meßtechnik, R. Oldenbourg Verlag, München
- Rossow, 2011 Rossow, S. (2011): Entwicklung einer speziellen Entschwefelungskohle zum Einsatz in der Biogasentschwefelung. Dissertation, Universität Rostock, Rostock
- Sager et al., 2009 Sager, U.; Schmidt, F. (2009): Adsorption of Nitrogen Oxides, Water Vapour and Ozone onto Activated Carbon. In: *Adsorption Science & Technology* 27 (2), S. 135–145. DOI: 10.1260/026361709789625243
- Sager, 2013 Sager U (2013): Untersuchung der dynamischen Adsorption an Kfz-Innenraumfiltern. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg
- Sitthikhankaew et al., 2014 Sitthikhankaew R, Chadwick D, Assabumrungrat S, Laosiripojana N (2014): Effect of KI and KOH impregnations over activated carbon on H₂S adsorption at low and high temperatures. *Separation Science & Technology* 49:354-366. DOI: 10.1080/01496395.2013.841240

- Sontheimer et al., 1985 Sontheimer, H.; Frick, B.R.; Fettig, J.; Hörner, G.; Hubele, C.; Zimmer, G. (1985): Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH)
- Thommes et al., 2015 Thommes, M.; Kaneko, K.; Neimark, A.V.; Olivier, J.P.; Rodriguez-Reinoso, F.; Rouquerol, J.; Sing, K.S.W. (2015): Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). In: *Pure and Applied Chemistry* 87 (9-10), S. 113. DOI: 10.1515/pac-2014-1117
- Viner et al., 1992 Viner, A.S.; Lawless, P.A.; Ensor, D.S.; Sparks, L.E. (1992): Ozone generation in DC-energized electrostatic precipitators. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 28 (3), S. 504–512. DOI: 10.1109/28.137427
- Wheeler und Robell, 1969 Wheeler, A.; Robell, A.J. (1969): Performance of fixed-bed catalytic reactors with poison in the feed. In: *Journal of Catalysis* 13 (3), S. 299-305. DOI: 10.1016/0021-9517(69)90404-7
- Yoon und Nelson, 1984 Yoon, Y.H.; Nelson, J.H. (1984): Application of Gas Adsorption Kinetics I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life. In: *American Industrial Hygiene Association Journal* 45 (8), S. 509–516. DOI: 10.1080/15298668491400197
- Zhang et al., 2006 Zhang, P.; Sager, U.; Schmidt, F.; Wanko, H.; Ulrich, J. (2006): Untersuchung des Adsorptionsverhaltens von Dünnschichtfiltern am Beispiel der Kfz-Innenraumfilter. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (12), S. 1837–1844. DOI: 10.1002/cite.200600071
- Zhang, 2009 Zhang, P. (2009): SO₂ Adsorption an Aktivkohle mit geringer Konzentration in Luft. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- DIN EN ISO 10121-1:2015 Methode zur Leistungsermittlung von Medien und Vorrichtungen zur Reinigung der Gasphase für die allgemeine Lüftung - Teil 1: Medien zur Reinigung der Gasphase
- DIN EN ISO 10121-2:2013 Methode zur Leistungsermittlung von Medien und Vorrichtungen zur Reinigung der Gasphase für die allgemeine Lüftung - Teil 2: Einrichtungen zur Reinigung der Gasphase (GPACD)
- GESTIS, 2017 GESTIS-Datenbank: Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
<http://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>