



forschen.  
vernetzen.  
anwenden.

# Innovationsreport 2019

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 19146 N

## **Energielabeling für Adsorptionsfilter: Erarbeitung von Kenngrößen zur Einstufung von Adsorptionsfiltern hinsichtlich Energieverbrauch und Abscheideleistung**

**Laufzeit:**

01.01.2017 – 31.12.2018

**Beteiligte Forschungsstelle(n):**

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.,  
Bereich Luftreinhaltung & Filtration

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19146 N

Thema

Energielabeling für Adsorptionsfilter: Erarbeitung von Kenngrößen zur Einstufung von Adsorptionsfiltern hinsichtlich Energieverbrauch und Abscheideleistung

Berichtszeitraum

01.01.2017 - 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.

Duisburg, 28.02.2019

Ort, Datum



Dr.-Ing. Uta Sager

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Ziele	8
2	Bearbeitung und Ergebnisse	10
2.1	Experimentelles	10
2.1.1	Einrichtungen und Versuchsdurchführung zum Test von Raumlufffiltern	10
2.1.2	Einrichtungen und Versuchsdurchführung zum Test von Druckluffiltern	12
2.2	AP 1: Adsorptive RLT-Filter: Auswahl, Versuchsdurchführung, Testergebnisse	14
2.2.1	Auswahl und Beschaffung von RLT-Filtern	14
2.2.2	Druckabfall von RLT-Filtern	17
2.2.3	Ergebnisse der RLT-Filtertests mit Toluol	20
2.2.4	Ergebnisse der RLT-Filtertests mit SO <sub>2</sub>	25
2.2.5	Ergebnisse der RLT-Filtertests mit Ammoniak	28
2.3	AP 2 - Adsorptive Druckluffilter: Auswahl, Evaluierung der Testmethode, Tests und Ergebnisse	32
2.3.1	Auswahl und Beschaffung von Druckluffiltern	32
2.3.2	Weiterentwicklung der Testvorschrift ISO 12500-2 (Öldampf)	33
2.3.3	Evaluierung der ISO 12500-2	38
2.3.4	Druckabfall von Druckluffiltern	43
2.3.5	Testergebnisse Druckluffilter	44
2.4	AP 3 - Klassifizierung – Kennziffern	49
2.4.1	Kennziffern zur Beschreibung der Adsorptionsleistung	49
2.4.2	Kennziffern zur Beschreibung des Energieaufwandes	61
2.4.3	Gesamtkennziffern „Energieeffizienz bei der Adsorption“	65
2.4.4	Vorschläge für ein Klassifizierungssystem als Basis für Produkt - Energie label	69
2.5	AP I - Überprüfung eines einfachen Modells zur Berechnung des Druckverlustes	70
2.6	Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen	72
3	Verwendung der Zuwendung	73
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	73
5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU	73
6	Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	74
7	Literaturverzeichnis	76

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze (links) und Foto (rechts) des RLT-Filter-Prüfstandes .....	10
Abbildung 2: Druckdifferenz-Volumenstrom- und Toluol-Durchbruchskurve eines RLT-Filters (23 °C, 50 % rel. Feuchte, Toluolkonzentration 9 ppm <sub>V</sub> , 3.400 m <sup>3</sup> /h) .....	12
Abbildung 3: Skizze Druckluft-Filter-Prüfstand .....	13
Abbildung 4: Foto Druckluft-Filter-Prüfstand .....	13
Abbildung 5: n-Hexan-Durchbruchskurve (20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , n-Hexan-Beladung 1000 mg/kg) ..	14
Abbildung 6: Bauformen von RLT-Filtern aus Flachfiltermedium .....	15
Abbildung 7: Bauformen von RLT-Filtern mit Sorbensgranulat .....	15
Abbildung 8: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven der getesteten Filtertypen verschiedener Bauformen .....	18
Abbildung 9: Druckdifferenzen der V-Zellen bei Nennvolumenstrom .....	18
Abbildung 10: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven verschiedener Panelfilter .....	19
Abbildung 11: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven verschiedener Kartuschenfilter .....	19
Abbildung 12: Toluol-Durchbruchskurven durch RLT-Filter .....	20
Abbildung 13: Toluol-Durchbruchskurven durch Kartuschenfilter .....	21
Abbildung 14: Rangfolge nach Sofortdurchbruch .....	22
Abbildung 15: Vergleich der Toluol-Durchbruchskurven durch V1 und V2 .....	23
Abbildung 16: Adsorbierte Toluolmassen an RLT-Filtern .....	24
Abbildung 17: Toluol-Durchbruchskurve durch Filter K1 - Experiment und Berechnung mit Yoon-Nelson-Ansatz .....	25
Abbildung 18: SO <sub>2</sub> -Durchbruchskurven durch RLT-Filter .....	26
Abbildung 19: SO <sub>2</sub> -Durchbruchskurve durch Filter K2 (Nennvolumenstrom 425 m <sup>3</sup> /h, Druckdifferenz > 500 Pa) .....	27
Abbildung 20: Abschiedene SO <sub>2</sub> -Massen an RLT-Filtern .....	27
Abbildung 21: NH <sub>3</sub> -Durchbruchskurven durch RLT-Filter bis zu einer Versuchszeit von 2 h ..	29
Abbildung 22: NH <sub>3</sub> -Durchbruchskurven durch RLT-Filter bis zu einer Versuchszeit von 24 h .....	29
Abbildung 23: Adsorbierte Massen NH <sub>3</sub> an RLT-Filtern geringer Kapazität bis zu einer .....	30
Abbildung 24: Adsorbierte Massen NH <sub>3</sub> an RLT-Filtern größerer Kapazität bis zu einer .....	31
Abbildung 25: Sorbensbeladung mit NH <sub>3</sub> der verschiedenen Filter .....	31
Abbildung 26: Prinzipieller Aufbau von Druckluftfiltern .....	32
Abbildung 27: Filterelementtypen .....	33
Abbildung 28: Durchbruchskurve von n-Hexan (Testkonzentration 1000 mg/kg <sub>tr DL</sub> ) .....	33
Abbildung 29: Dosierkonstanz von n-Hexan bei verschiedenen Konzentrationen .....	34
Abbildung 30: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Druckluftfilter verschiedener Bauart (bei 100 mg/kg <sub>tr DL</sub> , 20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , Nennvolumenstrom) .....	35
Abbildung 31: Durchbruchskurven von n-Hexan durch die Druckluftfilter K1 bis K3 (bei 100 mg/kg <sub>tr DL</sub> , 20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , 75 m <sup>3</sup> /h) .....	35
Abbildung 32: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Druckluftfilter K1 bei verschiedenen Testgaskonzentrationen (20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , 75 m <sup>3</sup> /h) .....	36
Abbildung 33: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Druckluftfilter K2 bei zwei verschiedenen Testgaskonzentrationen (20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , 75 m <sup>3</sup> /h) .....	37
Abbildung 34: Durchbruchskurven von n-Hexan durch die Druckluftfilter K4 und K5 .....	38
Abbildung 35: Durchbruchskurven von n-Hexan durch den Druckluftfilter Mg1 .....	39
Abbildung 36: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter Mg2 bei 15, 20 und 25 °C ..	40
Abbildung 37: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter Mp2 bei 15, 20 und 25 °C .....	40

Abbildung 38: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter Mp3 bei 15, 20 und 25 °C .....	41
Abbildung 39: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter K4 bei 15, 20 und 25 °C.....	41
Abbildung 40: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter Mg2 bei 3, 5 und 7 bar <sub>Ü</sub> .....	42
Abbildung 41: Druckdifferenzen verschiedener Druckluftfilter unterschiedlicher Bauart ..	43
Abbildung 42: Durchbruchskurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluft-Medienfilter	44
Abbildung 43: Durchbruchskurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluft-Kartuschenfilter	45
Abbildung 44: Adsorbierte n-Hexan-Massen während der Durchbruchversuche mit verschiedenen Druckluft-Medienfiltern (100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , V <sub>N</sub> ) .....	46
Abbildung 45: Adsorbierte n-Hexan-Massen während der Durchbruchversuche mit verschiedenen Druckluft-Kartuschenfiltern (1000 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , V <sub>N</sub> ) .....	46
Abbildung 46: Durchbruchskurve von 100 mg/kg n-Hexan durch Filter K2 - Experiment und Berechnung mit Yoon-Nelson-Ansatz (100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar <sub>Ü</sub> , 75 m <sup>3</sup> /h) .....	47
Abbildung 47: Gleichgewichtsbeladung der verschiedenen Druckluftfilter n-Hexan bei einer Belastung mit 100 mg/kg n-Hexan .....	48
Abbildung 48: Gleichgewichtsbeladung der verschiedenen Druckluftfilter n-Hexan bei einer Belastung mit 1000 mg/kg n-Hexan .....	48
Abbildung 49: Leistungsparameter eines Adsorptionsfilters (Durchbruchskurve: schwarz, adsorbierte Masse: blau) .....	50
Abbildung 50: Toluol-Durchbruchskurven von RLT-Filtern (c <sub>1</sub> = 9 ppm, 23 °C, 50 % r. F., V <sub>N</sub> ) .....	52
Abbildung 51: Kennziffer $K_{ads\ 2}$ der verschiedenen RLT-Filter und Toluol als Testsubstanz mit Vergleichzeiten $t_V$ von 60 und 120 min.....	54
Abbildung 52: NH <sub>3</sub> -Durchbruchskurven von RLT-Filtern (9 ppm NH <sub>3</sub> , 23 °C, 50 % r. F., V <sub>N</sub> )	55
Abbildung 53: Kennziffer $K_{ads\ 2}$ der verschiedenen RLT-Filter und NH <sub>3</sub> als Testsubstanz mit Vergleichzeiten $t_V$ von 60 und 120 min.....	56
Abbildung 54: SO <sub>2</sub> -Durchbruchskurven von RLT-Filtern (9 ppm SO <sub>2</sub> , 23 °C, 50 % r. F., V <sub>N</sub> )	57
Abbildung 55: Kennziffern $K_{ads\ 2}$ für RLT-Filter und die Testsubstanz SO <sub>2</sub> und unterschiedliche Vergleichszeiten .....	58
Abbildung 56: Durchbruchskurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluftfilter .....	59
Abbildung 57: Kennziffern $K_{ads\ 1}$ für Druckluftfilter und die Testsubstanz n-Hexan .....	60
Abbildung 58: Druckdifferenz und Volumenstrom der untersuchten RLT-Filter .....	61
Abbildung 59: Leistungsbedarf aufgrund von RLT-Filtern - Kennziffer $K_{en\ 1}$ der untersuchten RLT-Filter .....	62
Abbildung 60: Kennziffer $K_{en\ 2}$ der untersuchten RLT-Filter .....	63
<b>Abbildung 61: Druckdifferenz und Volumenstrom der untersuchten Druckluftfilter.....</b>	<b>64</b>
Abbildung 62: Kennziffer $K_{en\ 1}$ der untersuchten Druckluftfilter .....	64
Abbildung 63: Gesamtkennziffer $K_{ges}$ und Teilkennziffern $K_{ads}$ und $K_{en}$ der mit Toluol getesteten RLT-Filter.....	65
Abbildung 64: Gesamtkennziffer $K_{ges}$ und Teilkennziffern $K_{ads}$ und $K_{en}$ der mit Ammoniak getesteten RLT-Filter.....	66
Abbildung 65: Gesamtkennziffer $K_{ges}$ und Teilkennziffern $K_{ads}$ und $K_{en}$ der mit Schwefeldioxid getesteten RLT-Filter.....	67
Abbildung 66: Gesamtkennziffer $K_{ges}$ und Teilkennziffern $K_{ads}$ und $K_{en}$ der mit 100 mg/kg n-Hexan getesteten Druckluftfilter .....	68
Abbildung 67: Gesamtkennziffer $K_{ges}$ und Teilkennziffern $K_{ads}$ und $K_{en}$ der mit 1000 mg/kg n-Hexan getesteten Druckluftfilter .....	68

Abbildung 68: Klassifizierungsfeld.....	69
Abbildung 69: Faltenabbildung nach Lücke & Fissan 1995 .....	70
Abbildung 70: Experimentell bestimmte und nach Lücke & Fissan 1995 berechnete Werte der Druckdifferenz eines Panelfilters.....	71

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchte Filtertypen	17
Tabelle 2: SO <sub>2</sub> -Abscheideraten nach 10 h und 20 h Beaufschlagung	28
Tabelle 3: Kennziffer $K_{ads\ 1}$ für RLT-Filter der Bauform V-Zelle und die Testsubstanz Toluol	52
Tabelle 4: Kennziffer $K_{ads\ 2}$ für RLT-Filter und die Testsubstanz Toluol und zwei unterschiedliche Vergleichszeiten	53
Tabelle 5: Kennziffer $K_{ads\ 2}$ für RLT-Filter und die Testsubstanz NH <sub>3</sub> und zwei unterschiedliche Vergleichszeiten	56
Tabelle 6: Kennziffern $K_{ads\ 2}$ für RLT-Filter und die Testsubstanz SO <sub>2</sub> und unterschiedliche Vergleichszeiten	58
Tabelle 7: Kennziffern $K_{ads\ 1}$ für Druckluftfilter und die Testsubstanz n-Hexan	60
Tabelle 8: Maximale Gesamtkennziffern der Testfilter	69

## **Zusammenfassung**

Die Nutzung von Luftfiltern, die gasförmige Verunreinigungen durch Adsorption an Aktivkohle abscheiden, in raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) und in der Druckluftaufbereitung hat in den vergangenen Jahren aus vielfältigen Gründen zugenommen. Daher sind RLT- und Druckluft-Adsorptions-Filter im Hinblick auf das Energieeinsparpotenzial bei ihrem Betrieb von Bedeutung.

Vor dem hier beschriebenen Forschungsprojekt war der Wissens- und Erkenntnisstand zu den Zusammenhängen zwischen Energiebedarf und spezifischen Leistungsparametern adsorptiver RLT- und Druckluftfilter bei Filterherstellern aber auch in Wissenschaft und Forschung gering. Deshalb gehörte es zu den Zielen des Projektes diese Zusammenhänge zu erforschen und Kennziffern zur Beschreibung abzuleiten.

Dazu wurden für eine große Anzahl von am Markt verfügbaren RLT- und Druckluft-Filtern verschiedenster Bauformen und Ausführungen die Adsorptionseigenschaften mit Durchbruchversuchen ermittelt und die Druckverluste gemessen. Mit Hilfe der Ergebnisse wurden zunächst Teilkennziffern zur separaten Beschreibung der Adsorptionsleistung und des Leistungsbedarfes zum Betrieb der Filter abgeleitet. Diese wurden anschließend so zueinander ins Verhältnis gesetzt, dass sie Adsorptionsleistung und Druckverlust geeignet kombinieren und gewichten. Für alle untersuchten Adsorptionssysteme konnten plausible Gesamtkennziffern abgeleitet werden, die die Adsorptionsleistung ins Verhältnis setzten zu dem Leistungsbedarf. Wie bereits in der Antragsphase vermutet, war es jedoch notwendig, für die einzelnen Adsorptionssysteme angepasste Kennziffern zu entwickeln.

Wie geplant wurden Möglichkeiten für anwendungsspezifische Klassifizierungssysteme der ermittelten Kennziffern aufgezeigt. Diese können eine Grundlage für die Ableitung von Energielabeln durch die Industrie darstellen.

Projektbegleitend wurde eine analytische Methode zur Berechnung des Druckverlustes plissierter Filter auf ihre Anwendbarkeit auf RLT-Filter überprüft, jedoch mit negativem Ergebnis. Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes die ISO 12500-2, die ein Prüfverfahren für adsorptive Druckluftfilter vorgibt, evaluiert und Optimierungsvorschläge erarbeitet.

## 1 Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Ziele

Die Nutzung von Luftfiltern, die gasförmige Verunreinigungen durch Adsorption an Aktivkohle abscheiden, in raumlufttechnischen (RLT) Anlagen und zur Druckluftaufbereitung hat in den vergangenen Jahren zugenommen.

Gründe für den vermehrten Einsatz adsorptiv wirkender RLT-Filter sind die zunehmende Anzahl von RLT-Anlagen, der steigende Einsatz kontrollierter Raumlüftung zur Heizkostenminimierung, die kontinuierliche Zunahme der Aufenthaltsdauer von Menschen in Gebäuden und deren gesteigertes Komfortbedürfnis. Kennzeichen von adsorptiven RLT-Filtern sind große zu reinigende Luftvolumenströme, Betrieb bei Umgebungstemperatur und -druck sowie geringe Konzentrationen der abzuscheidenden gasförmigen Kontaminationen.

In Druckluftanlagen werden Adsorptionsfilter maßgeblich eingesetzt, um Öldämpfe aus der Druckluft abzuscheiden. Diese gehen hauptsächlich auf die Schmiermittel der Kompressoren zurück, die zur Luftverdichtung eingesetzt werden. Weitere gasförmige Verunreinigungen stammen aus der von den Kompressoren angesaugten und dann verdichteten Luft. Adsorptive Druckluftfilter werden häufig bei Betriebsdrücken von ca. 10 bar betrieben. Bei Sonderanwendungen können jedoch Betriebsdrücke von bis zu 400 bar erreicht werden. Druckluftfilter werden weltweit genutzt.

Die aktuelle und die zu erwartende Verbreitung von RLT- und Druckluft-Adsorptions-Filtern sind im Hinblick auf das Energieeinsparpotenzial bei ihrem Betrieb von Bedeutung. Der Energiebedarf von Adsorptionsfiltern wird bestimmt durch die Druckdifferenz über dem Filter und den Volumenstrom. Anders als bei Partikelfiltern steigt die Druckdifferenz bei Adsorptionsfiltern während des Betriebes nicht an. Sie wird beeinflusst durch die Geometrien von Filtergehäuse und Filterschicht, die Strömungsgeschwindigkeit und die Menge an Adsorbens, die gleichzeitig die Leistungsfähigkeit festlegt.

Zur Beurteilung eines Filters hinsichtlich seiner Energieeffizienz ist der Zusammenhang zwischen dem absoluten Energiebedarf und der Leistungsfähigkeit zu betrachten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Leistungsfähigkeit von Adsorptionsfiltern je nach Anwendung unterschiedlich definiert werden kann.

Vor dem hier beschriebenen Forschungsprojekt gab es weder für RLT- noch für Druckluft-Adsorptions-Filter Klassifizierungssysteme, die den Zusammenhang zwischen Energiebedarf und spezifischen Leistungsparametern wiedergeben. Für Druckluft-Filter gab es darüber hinaus quasi keine veröffentlichten Forschungsergebnisse zu den Adsorptionsvorgängen bei den spezifischen Bedingungen. Außerdem war ein Resultat des IGF-Projektes „Carbon Management bei der Druckluftfiltration (FV-Nr. 17992 N)“, dass die in ISO 12500-2 beschriebene Testmethode zur Ermittlung der Adsorptionskapazität von Druckluft-Filtern für Öldämpfe dringend überarbeitet werden müsste.

Hier setzte das im Weiteren beschriebene Vorhaben an. Eine Aufgabe war es, die Methode zur Ermittlung der Leistungsparameter von Druckluftfiltern zu evaluieren. Weiterhin sollte für eine große Anzahl von am Markt verfügbaren RLT- und Druckluft-Filtern verschiedenster Bauformen und Ausführungen die Adsorptionseigenschaften mit Durchbruchversuchen ermittelt und der Druckverlust gemessen werden. Auf Basis der gewonnenen Daten galt es Kennziffern abzuleiten, die Adsorptionsleistung und Energiebedarf zueinander ins Verhältnis

setzen. Der Anspruch an die Kennziffern war, dass sie Adsorptionsleistung und Druckverlust geeignet kombinieren und gewichten. Mit ihrer Hilfe sollten Effizienzklassen abgegrenzt und anwendungsspezifische Klassifizierungssysteme erstellt werden. Diese sollten eine Grundlage für die Ableitung von Energielabeln durch die Industrie bilden. Energielabel bieten Zwischenhändlern, Planern und Nutzern eine Möglichkeit, verschiedene Filter hinsichtlich Energieeffizienz und Adsorptionsleistung objektiv miteinander zu vergleichen. Projektbegleitend war es weiterhin die Aufgabe, analytische Berechnungsmodelle zur überschlägigen Berechnung des Druckverlustes auf ihre Anwendbarkeit auf RLT-Filter zu überprüfen.

Die Aufgaben waren in folgende Arbeitspakete (AP) und -schritte (AS) gegliedert:

- AP 1 Adsorptive RLT-Filter: Auswahl, Durchführung von Tests und Auswertung
  - AS 1.1 Auswahl und Beschaffung
  - AS 1.2 Tests an RLT-Filtern verschiedener Bauform gemäß DIN EN ISO 10121 mit Toluol, SO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub>
  - AS 1.3 Auswertung
- AP 2 Adsorptive Druckluft-Filter: Auswahl, Evaluierung der Testmethode, Durchführung von Tests und Auswertung
  - AS 2.1 Auswahl und Beschaffung
  - AS 2.2 Evaluierung und Weiterentwicklung der Testvorschrift ISO 12500-2 (Öldampf)
  - AS 2.3 Tests an Druckluft-Filtern verschiedener Bauform mit n-Hexan gemäß optimierter Testmethode
  - AS 2.4 Auswertung
- AP 3 Klassifizierung
  - AS 3.1 Ermittlung von Kennziffern
  - AS 3.2 Ermittlung eines Klassifizierungssystems
  - AS 3.3 Entwicklung von Vorschlägen für ein Produkt-Energielabel
- AP I Überprüfung eines einfachen Modells zur Berechnung des Druckverlustes

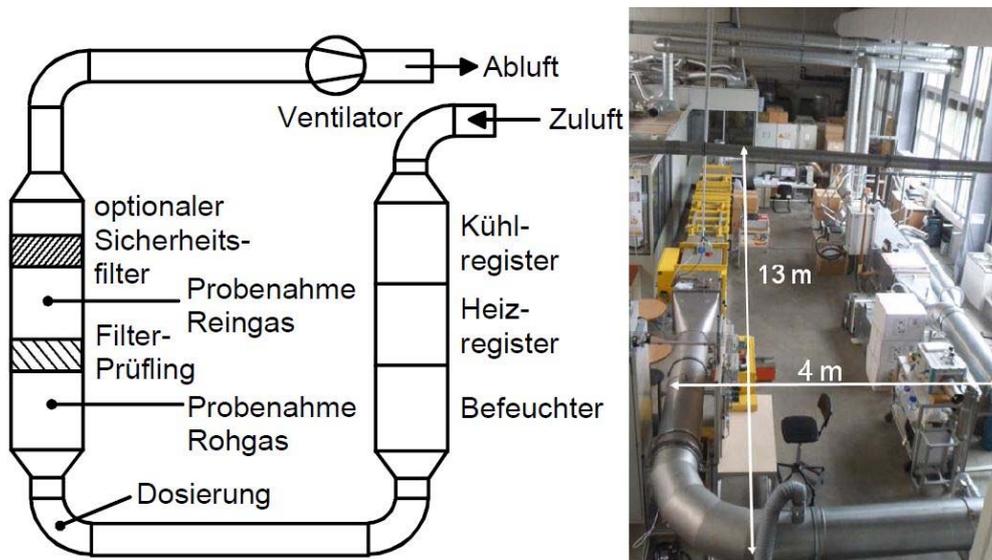
## 2 Bearbeitung und Ergebnisse

### 2.1 Experimentelles

Die experimentellen Arbeiten wurden an zwei unterschiedlichen Filterprüfständen am Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) durchgeführt. Im Folgenden werden jeweils die Versuchseinrichtungen sowie die Versuchsdurchführung detailliert erläutert.

#### 2.1.1 Einrichtungen und Versuchsdurchführung zum Test von Raumlufffiltern

Die Adsorptionstests mit Toluol,  $\text{NH}_3$  und  $\text{SO}_2$  an konfektionierten Raumlufffiltern wurden an dem am IUTA vorhandenen Prüfstand zum Test von RLT-Filtern nach DIN EN ISO 10121-2 durchgeführt. Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze und ein Foto des Prüfstandes.



**Abbildung 1: Prinzipskizze (links) und Foto (rechts) des RLT-Filter-Prüfstandes**

Der prinzipielle Ablauf eines Durchbruchversuches nach DIN EN ISO 10121-2 ist wie folgt.

Der zu testende Filter wird in den Kanal eingebaut und der entsprechende Nennvolumenstrom wird dem Ventilator (DCAS-852-2T-10, Dassler, Bad Gandersheim, D) vorgegeben und auf Basis der Volumenstrommessung geregelt. Diese erfolgt mit einem Wilson-Staugitter (Flowgrid 400 dia Typ A, Airflow Lufttechnik, Rheinbach, D). Mit dem Ventilator sind Volumenströme von 400 bis 5000  $\text{m}^3/\text{h}$  realisierbar. Die Unsicherheit bei der Bestimmung des Volumenstroms ist abhängig von der Höhe des Volumenstroms. Bei 3.400  $\text{m}^3/\text{h}$  liegt sie unterhalb von 2 %.

Der angesaugte Außenluftvolumenstrom wird mithilfe der klimatechnischen Komponenten Kühl- und Heizregister sowie Befeuchter auf 23 °C und 50 % relative Luftfeuchte klimatisiert. Die Heizleistung und die Befeuchtung werden geregelt, die Kühlleistung wird gesteuert. Die Temperatur- und Feuchtemessungen erfolgen mit Messaufnehmern des Typs DKRF400, Driesen+Kern, Bad Bramsted, D.

Vor dem Durchbruchversuch wird der Filter mit dem klimatisierten Volumenstrom ohne Testsubstanz zur Konditionierung mindestens 20 Minuten lang durchströmt. Weiterhin wird vor dem Durchbruchversuch eine Volumenstrom-Druckverlust-Kurve aufgenommen. Sofern

anlagentechnisch realisierbar wird dazu die Druckdifferenz über den Filter bei 50 %, 75 %, 100 % und 125 % des Nennvolumenstroms ermittelt. Die Druckdifferenz und der Absolutdruck werden mit piezoresistiven Druckaufnehmern (DS2, Kalinsky Sensor Elektronik, Erfurt, D) gemessen.

Für den anschließenden Durchbruchversuch wird vor der Filterteststrecke die jeweilige Testsubstanz dosiert, so dass sich der angestrebte Testvolumenanteil einstellt.

Toluol, das bei Raumtemperatur flüssig vorliegt, wird in einer Waschflasche vorgelegt, die in einem Wasserbad maximal auf Umgebungstemperatur thermostatisiert wird. Zur Zerstäubung des Toluols wird der Waschflasche unterhalb des Flüssigkeitsspiegels mit einem Massenflussregler Druckluft zugeführt. In Strömungsrichtung hinter der Waschflasche wird der idealerweise mit dem Toluol gesättigte Druckluftstrom über eine Schlauchverbindung der Versuchsanlage zugeführt.

Die Dosierung der Testsubstanzen  $\text{SO}_2$  und  $\text{NH}_3$  erfolgt aus den entsprechenden Druckgasflaschen (Reingas) jeweils mittels Massenflussregler über Edelstahlrohrleitungen und Schläuche in den Prüfkanal.

Vor dem Einbau des zu untersuchenden Filters in den Prüfkanal wird jeweils eine Probedosierung bei dem Nennvolumenstrom des Filters vorgenommen. Dabei werden die für die Einstellung der angestrebten Testsubstanzkonzentrationen erforderlichen Einstellungen an den Massenflussreglern ermittelt. Darüber hinaus wird, wenn nur ein Analysegerät zur Verfügung steht, wie im vorliegenden Fall für  $\text{SO}_2$ , die Verzögerungszeit der Konzentrationsänderung im System bestimmt. Gemessen wird die Zeitdauer zwischen Beginn der  $\text{SO}_2$ -Dosierung und dem Erreichen von 95 % der angestrebten Prüfkonzentration an der stromabwärts gelegenen Messstelle.

Bei einem Durchbruchversuch werden, wenn zwei Messgeräte vorhanden sind, vor und hinter dem Testfilter Probenahmevolumenströme entnommen und den Messgeräten zugeführt. Steht nur ein Messgerät zur Verfügung wird in der Regel an der reingasseitigen Messstelle gemessen. Die Dosierstabilität wird jedoch durch zwischenzeitliche Messungen an der vor dem Filter liegenden Messstelle überprüft.

Zur Ermittlung der jeweiligen Konzentrationen werden folgende Messgeräte eingesetzt:

- Toluol - zwei Flammenionisations-Detektoren (FIDs, Modell 2010T, Testa, München, D),
- $\text{SO}_2$  - ein  $\text{SO}_2$ -Analysator (UV-Lumineszenz-basiert, Modell APSA-370, Horiba Europe, Leichlingen, D),
- $\text{NH}_3$  - zwei Protonen-Transfer-Reaktions-Massenspektrometer (Compact-PTR-MS, Ionicon, Innsbruck, A).

Da der Volumenstrom hinter dem Testfilter im Versuchsverlauf zunehmende Volumenanteile der Testsubstanzen enthält, ist in Strömungsrichtung hinter dem Testfilter noch ein Sicherheitsfilter mit hoher spezifischer Adsorptionskapazität eingebaut.

Testergebnisse eines Filtertests nach DIN EN ISO 10121-2 sind u. a. die Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurve und die Durchbruchkurve der jeweiligen Testsubstanz, die in Abbildung 2 exemplarisch für einen adsorptiven RLT-Filter mit einem Nennvolumenstrom von  $3400 \text{ m}^3/\text{h}$  und Toluol als Testsubstanz dargestellt sind. Die Druckdifferenzen der getesteten

adsorptiven RLT-Filter liegen bei der Belastung mit dem Nennvolumenstrom im Bereich zwischen 40 und 160 Pa.

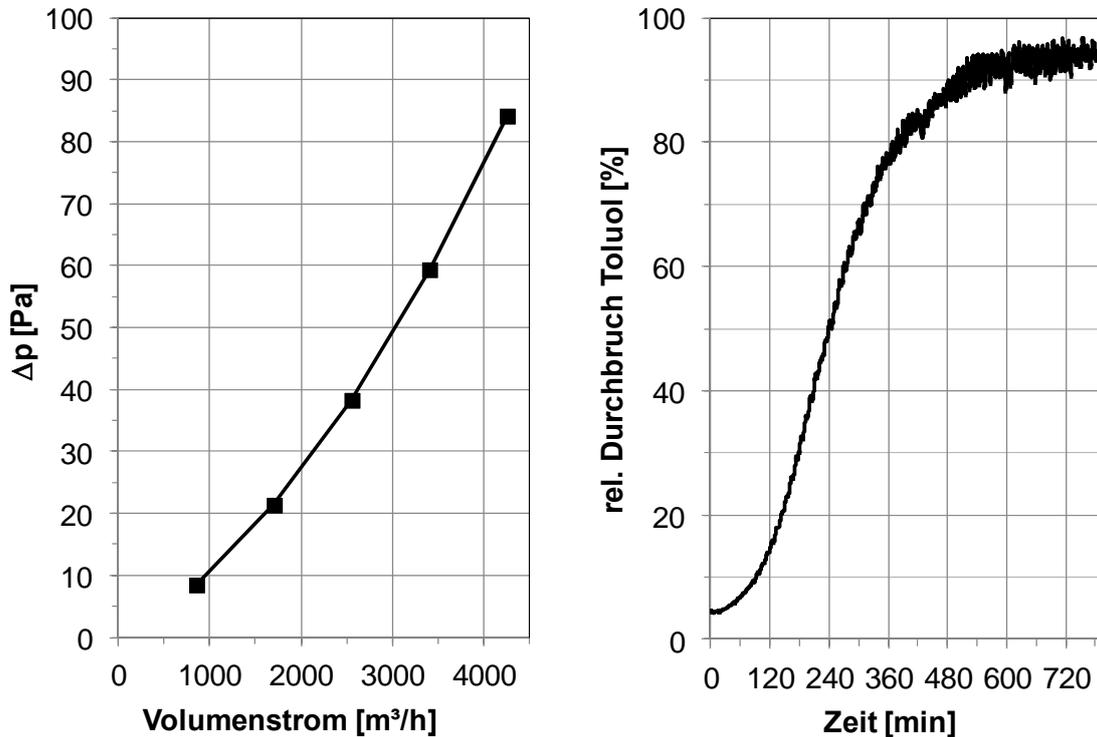


Abbildung 2: Druckdifferenz-Volumenstrom- und Toluol-Durchbruchskurve eines RLT-Filters (23 °C, 50 % rel. Feuchte, Toluolkonzentration 9 ppm<sub>v</sub>, 3.400 m<sup>3</sup>/h)

### 2.1.2 Einrichtungen und Versuchsdurchführung zum Test von Druckluftfiltern

Für Adsorptionstests an Druckluftfiltern steht am IUTA ein Prüfstand zur Verfügung, dessen Aufbau schematisch in Abbildung 3 dargestellt ist. Abbildung 4 zeigt ein Foto des Prüfstandes.

Der Versuchsablauf bei der Durchführung von Filtertests an Druckluft-Filtern ist prinzipiell derselbe wie bei RLT-Filtern. Nach dem Kalibrieren der Messgeräte, einer Probedosierung und der Konditionierung des Druckluftfilters wird dem konditionierten Testvolumenstrom das Testgas zudosiert, die Konzentrationen des Testgases werden in Strömungsrichtung vor und hinter dem Testfilter bestimmt und die Druckdifferenz über den Filter wird ermittelt. Die spezifischen Versuchsparameter werden in der aktuellen Fassung der ISO 12500-2 folgendermaßen vorgegeben. Das Trägergas ist trockene Druckluft, deren Eigenschaften in ISO 8573-1 weiter spezifiziert werden. Die Test werden bei 7 bar<sub>ü</sub> und 20 °C durchgeführt. Druckluft-Filter werden mit ihrem Nennvolumenstrom getestet. Das Testgas ist n-Hexan. Als Testgasbeladung sind 1000 mg/kg<sub>tr. DL</sub> vorgesehen. Anders als bei dem Test von RLT-Filtern ist für Druckluft-Filter nach ISO 12500-2 keine Aufnahme einer Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurve vorgesehen.

Die verwendete Druckluft stammt aus einem Druckluftnetz mit ca. 10 bar<sub>ü</sub>, dass von einem riemengetriebenen Schraubenkompressor (Modell S50, BOGE KOMPRESSOREN, Biele-

feld, D) gespeist wird. Der Testvolumenstrom wird mit Hilfe eines Druckminderers und eines Schwebekörper-Durchflussmesser (Modell VA40, KROHNE Messtechnik, Duisburg, D) auf 8 bar Absolutdruck eingestellt. Die Temperierung erfolgt in einem Rohrkühler mit Kühlwasser, das von einem Kryostaten bereitgestellt wird. Das n-Hexan wird in einem druckfesten Behälter vorgelegt, der in einem Thermostaten auf 15 °C temperiert wird, und mit Druckluft von ca. 12 bar<sub>ü</sub> durchströmt. Diese stammt aus einem Druckluftnetz mit ca. 13 bar<sub>ü</sub>, bereitgestellt von einem Schraubenkompressor (SM 12 SFC 15, Kaeser Kompressoren, Coburg, D). Der idealerweise mit gasförmigem n-Hexan gesättigte Druckluftteilvolumenstrom wird mit Hilfe eines Nadelventils dem Hauptvolumenstrom zugeführt. In Strömungsrichtung vor und hinter dem Testfilter werden Probenahmevolumenströme über Entspannungsventile den Messgeräten, zwei Flammenionisationsdetektoren (Modell 2010T, Testa, München, D) zugeführt. Die Messung der Druckdifferenz erfolgt mit einem Druck-Messumformer (Modell 265DS, ABB, Minden, D).

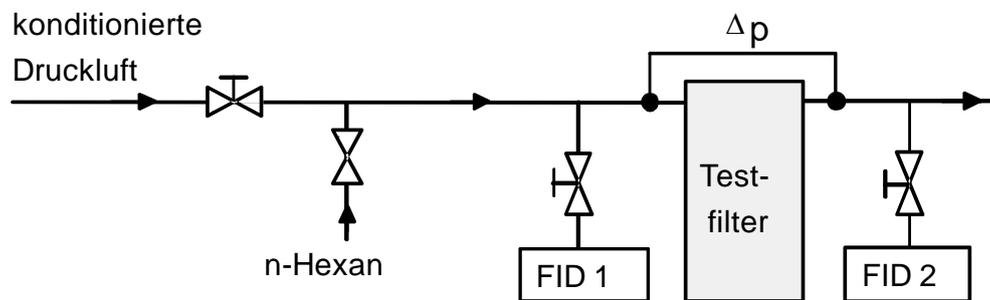


Abbildung 3: Skizze Druckluft-Filter-Prüfstand

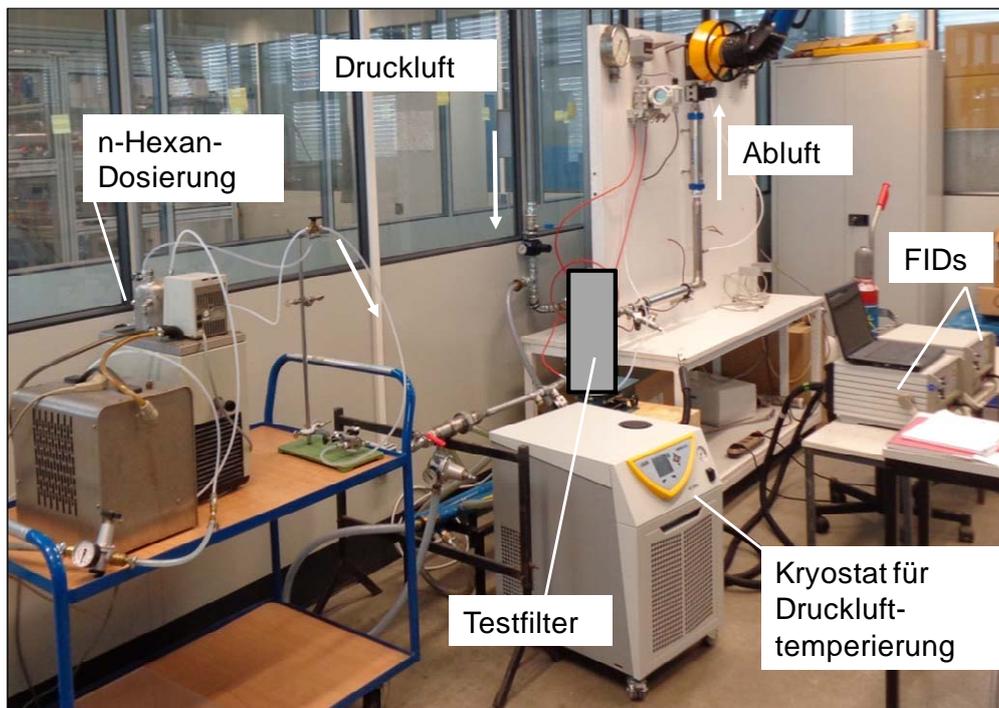


Abbildung 4: Foto Druckluft-Filter-Prüfstand

Ergebnisse einer Druckluft-Filter-Prüfung nach ISO 12500-2 sind eine n-Hexan-Durchbruchskurve und die während des Durchbruchversuches gemessene Druckdifferenz über den Testfilter, siehe beispielsweise Abbildung 5. Bei n-Hexan-Beladungen von 1000 mg/kg kann die Durchbruchzeit von Druckluft-Filtern mit geringer Aktivkohlemenge nur wenige Minuten betragen. Die Druckdifferenz von Druckluft-Filtern liegt im Millibar-Bereich.

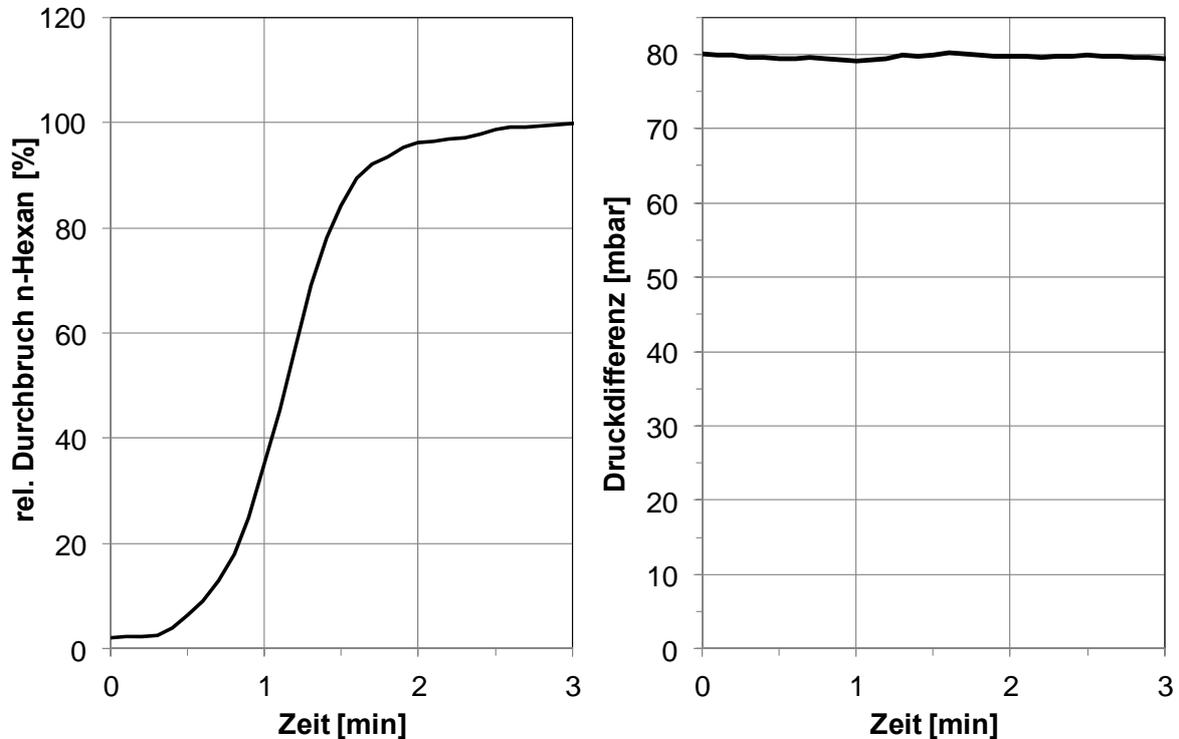


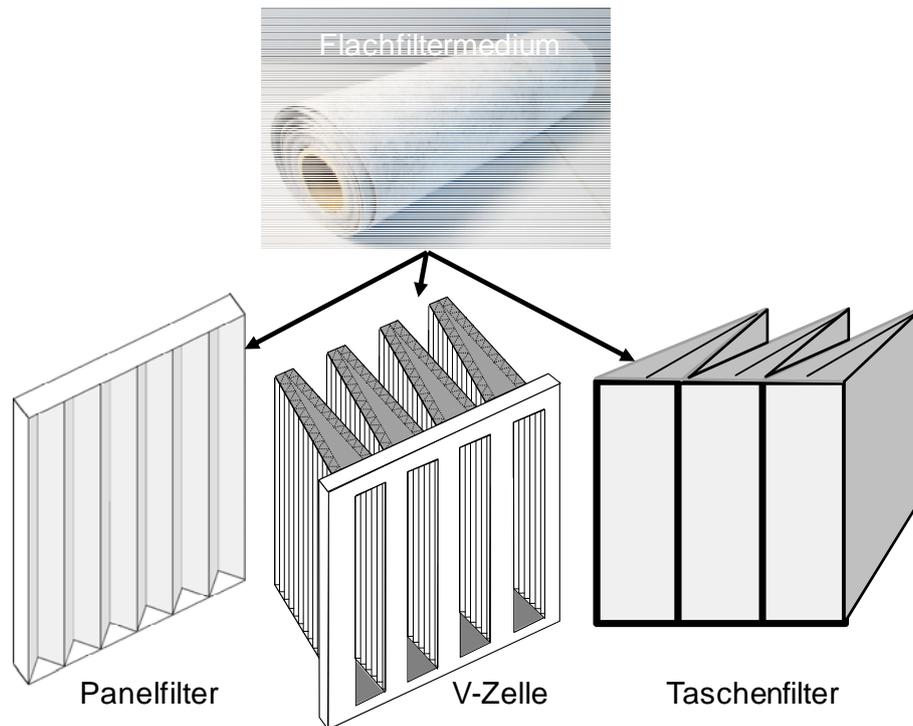
Abbildung 5: n-Hexan-Durchbruchskurve (20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>, n-Hexan-Beladung 1000 mg/kg)

## 2.2 AP 1: Adsorptive RLT-Filter: Auswahl, Versuchsdurchführung, Testergebnisse

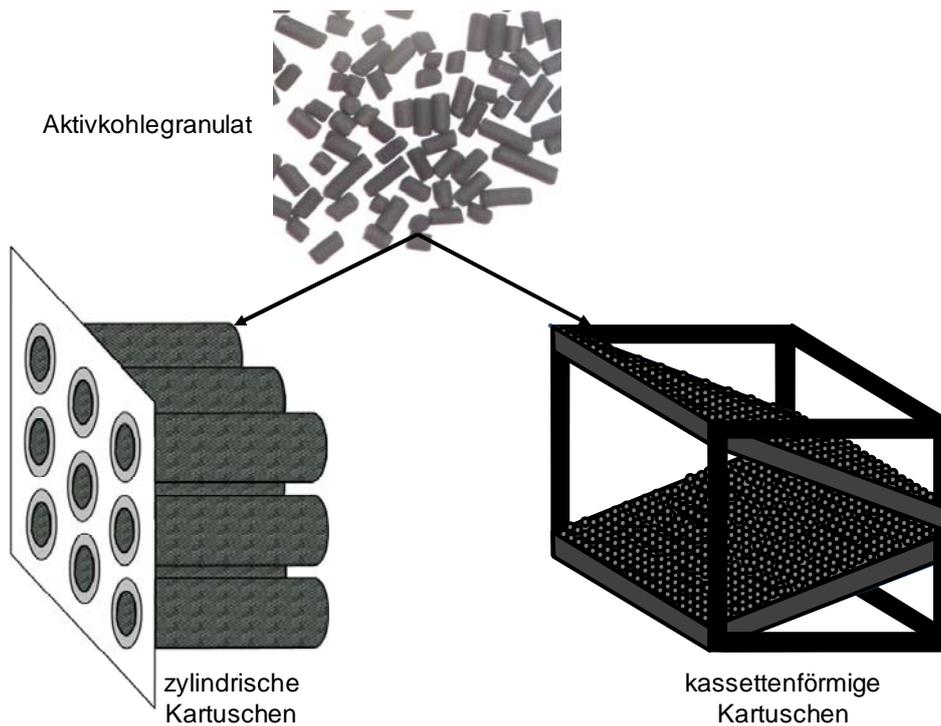
Zunächst wurde ein repräsentativer Querschnitt von kommerziell verfügbaren RLT-Filtern verschiedener Bauform und für unterschiedliche Anwendungen ausgewählt und beschafft. Die Filter wurden nach DIN EN ISO 10121-2 getestet und die Ergebnisse, wie unter 2.1.1 dargestellt, ausgewertet.

### 2.2.1 Auswahl und Beschaffung von RLT-Filtern

In adsorptiven RLT-Filtern können die Adsorbentien in verschiedener Form verarbeitet sein. Das Sorbens kann direkt als Granulat in verschieden ausgeführten Kartuschenformen verwendet werden oder eingebunden zwischen Stützsichten, z. B. aus Gewebe oder Vlies, in Flachfiltermedien. Es sind verschiedene Bauformen adsorptiver RLT-Filter aus beiden Medientypen kommerziell verfügbar, siehe Abbildung 6 und Abbildung 7.



**Abbildung 6: Bauformen von RLT-Filtern aus Flachfiltermedium**



**Abbildung 7: Bauformen von RLT-Filtern mit Sorbensgranulat**

In Panelfiltern ist plissiertes Flachfiltermedium in einem Filterrahmen mit geringer Einbautiefe befestigt. Daraus ergeben sich geringe verarbeitete Flachfiltermedienflächen. V-Zellen bestehen aus mehreren V-förmig angeordneten und mehr oder weniger eng plissierten Filterpanels. Die verarbeitete Flachfiltermedienfläche in V-Zellen ist dementsprechend größer als in Panelfiltern. Taschenfilter bestehen aus ca. 6-10 parallel nebeneinander angeordneten, aus dem Flachfiltermedium gefertigten, Taschen. Die in Taschenfiltern verarbeiteten Filter-

Medienflächen sind ungefähr so groß wie in V-Zellen. In Panelfiltern und V-Zellen ist das Flachfiltermedium relativ starr verarbeitet, in Taschenfiltern ist es flexibler. Taschenfilter sind selten als reine Adsorptionsfilter ausgeführt, meistens handelt es sich um Kombifilter. Die anströmseitige Gewebeschicht dient der Partikelfiltration.

Kartuschenfilter, in denen das Sorbens als Granulat verwendet wird, haben je nach Anwendung sehr unterschiedlich gestaltete Schichten, siehe Abbildung 7. Häufig ist das Granulat in zylindrischen Kartuschen in einem Ringspalt angeordnet. Über die Anzahl der verwendeten Kartuschen kann der Gesamtfilter an die Reinigungsaufgabe angepasst werden. Die verarbeitete Sorbensmenge in Kartuschen ist in der Regel um ein Vielfaches höher als in Filtern mit Flachfiltermedien. Dadurch ist in der Regel die Druckdifferenz der Filter höher als bei Filtern aus Flachfiltermedien. Kartuschenfilter werden häufig für Spezialanwendungen eingesetzt, z. B. wenn der Abscheidung der gasförmigen Komponente eine sicherheitstechnische Bedeutung zukommt.

Adsorptive RLT-Filter sind zum Teil mit speziell ausgerüsteten Aktivkohlen oder anderen Sorbentien für besondere Testsubstanzen, z. B. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), oder Substanzklassen (saure oder basische Gase) ausgestattet.

Unter Berücksichtigung der obenstehenden Aspekte wurden für die vorgesehenen Tests mit Toluol,  $\text{SO}_2$  und  $\text{NH}_3$  die in Tabelle 1 aufgeführten unterschiedlichen adsorptiven RLT-Filtertypen beschafft. Teilweise enthielten die getesteten Filter spezifische Sorbentien oder Aktivkohlen mit speziellen Imprägnierungen zur Abscheidung saurer oder basischer Gase. Im Folgenden werden die verschiedenen Filter mit einer Abkürzung für ihre Bauform (Taschenfilter T, Panelfilter P, V-Zelle V, Kartuschenfilter K) und einer laufenden Nummer bezeichnet. Das führt zu den Bezeichnungen V1 - V7, P1 und P2, T1 und T2 sowie K1 - K3.

Die untersuchten V-Zellen, Taschen- und Panelfilter hatten alle einen Einbauquerschnitt von ca. 600 mm x 600 mm. Der Nennvolumenstrom der V-Zellen und der Taschenfilter betrug jeweils 3.400  $\text{m}^3/\text{h}$ , der der Panelfilter 2.000  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Es wurden ein Kartuschenfiltertyp mit kassettenförmigen sowie einer mit zylindrischen Kartuschen untersucht. Die zylindrischen Kartuschenfilter K1 bestanden jeweils aus 4 Patronen, die auf einem Lochblech montiert wurden. Das Lochblech mit einem Querschnitt von 600 mm x 600 mm war für die Aufnahme von 16 Kartuschen vorgefertigt. Die vier mittig gelegenen Aussparungen wurden für die vier verwendeten Kartuschen genutzt, die weiteren Ausschnitte wurden verschlossen. Bei einem Nennvolumenstrom der einzelnen Patronen von 200  $\text{m}^3/\text{h}$  ergab sich ein Prüfvolumenstrom von 800  $\text{m}^3/\text{h}$ . Der Kassettenfilter besaß einen Einbauquerschnitt von ca. 300 mm x 300 mm und einen Nennvolumenstrom von 425  $\text{m}^3/\text{h}$ . Abhängig vom Testgas wurden Kassettenfilter mit den gleichen Abmessungen jedoch ausgestattet mit unterschiedlichen Sorbentien (K2 und K3) verwendet.

Die untersuchten Taschenfiltern T1 und T2 waren Kombinationsfilter zur Abscheidung von Partikeln und Schadgasen mit unterschiedlicher Eingruppierung bezüglich der Partikelfiltrationsleistung. Bei T1 handelte es sich um einen Feinstaubfilter der Filterklasse F7 nach EN 779, bei T2 um einen Medium-Filter der Filterklasse M6.

Teilweise wurden Filter desselben Filtertyps mit allen drei Testsubstanzen getestet, das ist der Fall für K1, V2-V4 sowie T1 und T2.

**Tabelle 1: Untersuchte Filtertypen**

für Tests mit	Getestete Filtertypen der Bauform			
	Taschenfilter	Panelfilter	V-Zelle	Kartuschenfilter
Toluol	T1, T2	P1, P2	V1, V2, V3, V4	K1, K2
SO <sub>2</sub>	T1, T2	P2	V2, V3, V4, V5	K1, K2
NH <sub>3</sub>	T1, T2		V2, V3, V4, V6, V7	K1, K3

### 2.2.2 Druckabfall von RLT-Filtern

Von den untersuchten RLT-Testfiltern wurden, sofern es der Leistungsbereich des Ventilators zuließ, Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven aufgenommen, die bis auf die der Kassetten-Kartuschenfilter K2 und K3 in Abbildung 8 dargestellt sind. Die Kurven sind Mittelwerte aus den Messwerten von mindestens zwei Filtern. Da die Druckdifferenzen der Kartuschenfilter K2 und K3 250 Pa um ein Vielfaches überschreiten, werden die entsprechenden Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven in der folgenden Abbildung 11 mit der von K1 verglichen. Die rechteckigen Rahmen in Abbildung 8 markieren die Messwerte, die jeweils bei dem Nennvolumenstrom aufgenommen wurden.

In Abbildung 8 ist ersichtlich, dass die Druckdifferenzen der untersuchten V-Zellen geringer sind als die der Filter anderer Bauformen. Bei dem Nennvolumenstrom von 3.400 m<sup>3</sup>/h liegen sie zwischen 57 und 67 Pa. Die Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven der V-Zellen liegen dicht beieinander, obwohl die individuelle Gestaltung der V-Zellen zum Teil deutliche Unterschiede aufweist. So variiert die Sorbensmasse der V-Zellen V1 bis V7 zwischen 2,2 und 4,2 kg, die verbaute Filtermedienfläche liegt zwischen 5,3 und 6,3 m<sup>2</sup> und eine V-Zelle weist nur drei V-Elemente auf statt vier wie die übrigen V-Zellen. In Abbildung 9 ist zur besseren Differenzierung ein Ausschnitt der Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven der V-Zellen bei Nennvolumenstrom dargestellt.

Die  $\Delta p$ - $\dot{V}$ -Kurven der beiden Taschenfilter T1 und T2, beides Kombifilter jedoch mit unterschiedlicher Filterklasse, unterscheiden sich deutlich. Die höhere Druckdifferenz von T1 ist jedoch plausibel und kann auf die höhere Filterklasse (F7) von T1 zurückgeführt werden.

Von den beiden Panelfiltern P1 und P2, die im Rahmen des hier beschriebenen Projektes untersucht wurden, weist P1 die geringeren Druckdifferenzen auf. Das ist nachvollziehbar bei Berücksichtigung der Tatsachen, dass beide Filter zwar aus dem gleichen Filtermedium gefertigt sind, jedoch die Faltentiefe des plissierten Mediums von P1 größer als die von P2 und das Verhältnis der verbauten Filtermedienflächen  $A_1/A_2$  1,5 beträgt. Um die Spannweite der Druckdifferenzen von Panelfiltern zu verdeutlichen, sind in Abbildung 10 die  $\Delta p$ - $\dot{V}$ -Kurven von drei zusätzlich getesteten Einzelfiltern P-X, P-Y und P-Z dieser Bauform dargestellt. Die Filter unterscheiden sich durch die Falten- bzw. Einbautiefe. Die Einbautiefe von P-Y ist doppelt so groß wie die von P-X, die von P-Z ist viermal so groß wie die von P-X. Es wird davon ausgegangen, dass in P-X und P-Y das gleiche Filtermedium verarbeitet ist.

Wie in Abbildung 8 ersichtlich sind die Druckdifferenzen der Kartuschenfilter K1 höher als die der anderen Filter. In Abbildung 11 werden zusätzlich zur  $\Delta p$ - $\dot{V}$ -Kurve von K1 die Druckdifferenzen der Kartuschenfilter K2 und K3 dargestellt. Schon beim Nennvolumenstrom von 425 m<sup>3</sup>/h beträgt der Druckverlust um 500 Pa. Das Filtergehäuse der Filter K2 und K3 ist gleich gestaltet, jedoch unterscheidet sich die Sorbensfüllung. Filter K2 enthält ein Mischadsorbens zur Abscheidung saurer Gase und K3 Aktivkohle mit einer Imprägnierung zur Abscheidung basischer Gase. Die  $\Delta p$ - $\dot{V}$ -Kurven von K2 und K3 sind jedoch quasi iden-

tisch. Handelsübliche rein adsorptiv wirkende RLT-Filter für Anwendungen im Raumluftbereich weisen in der Regel bei Nennvolumenstrom Druckverluste kleiner 100 Pa auf.

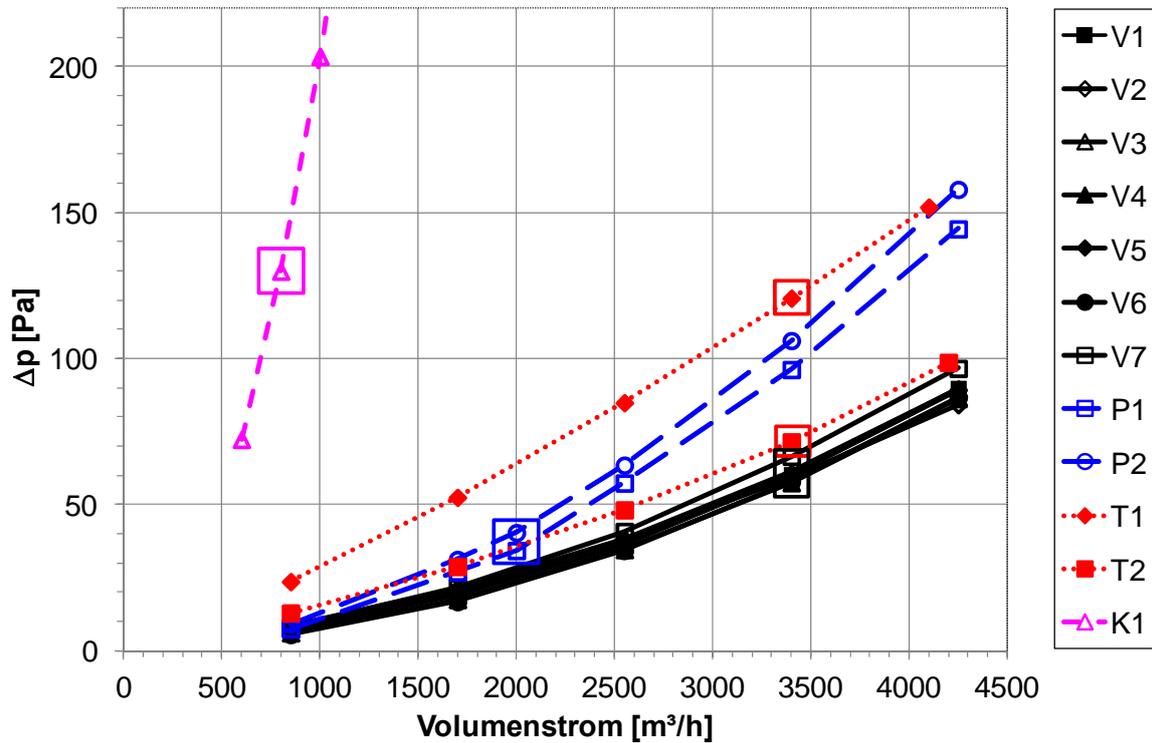


Abbildung 8: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven der getesteten Filtertypen verschiedener Bauformen

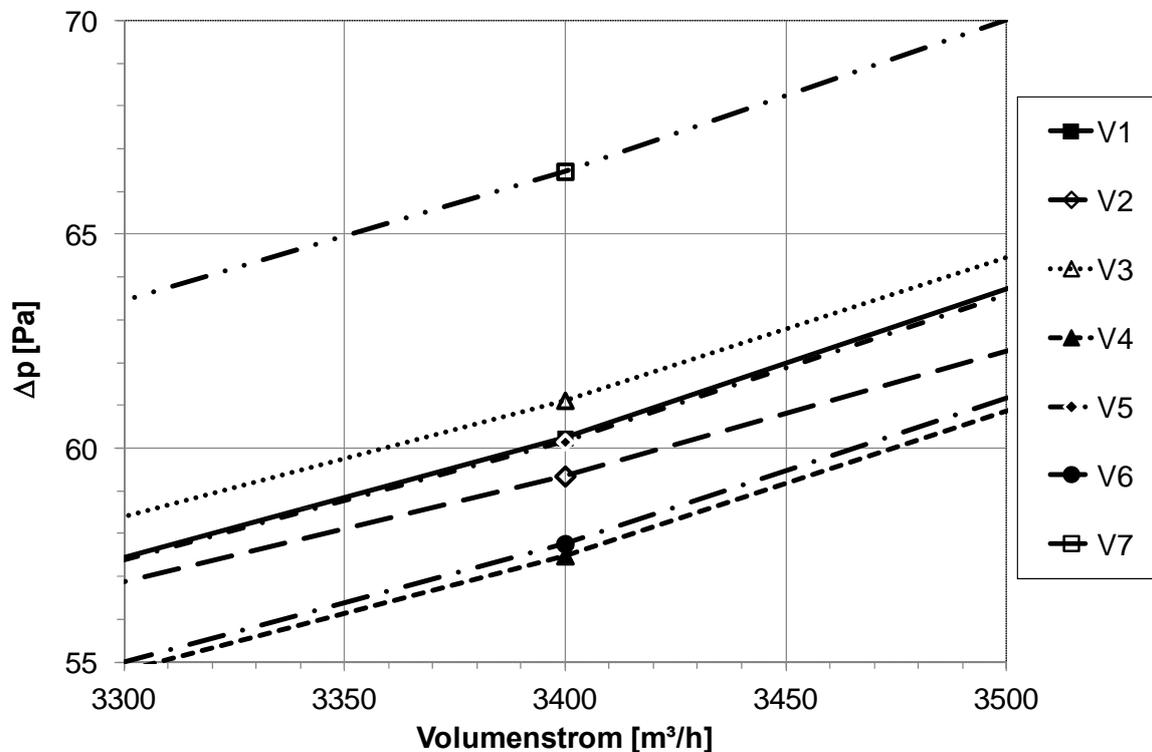


Abbildung 9: Druckdifferenzen der V-Zellen bei Nennvolumenstrom

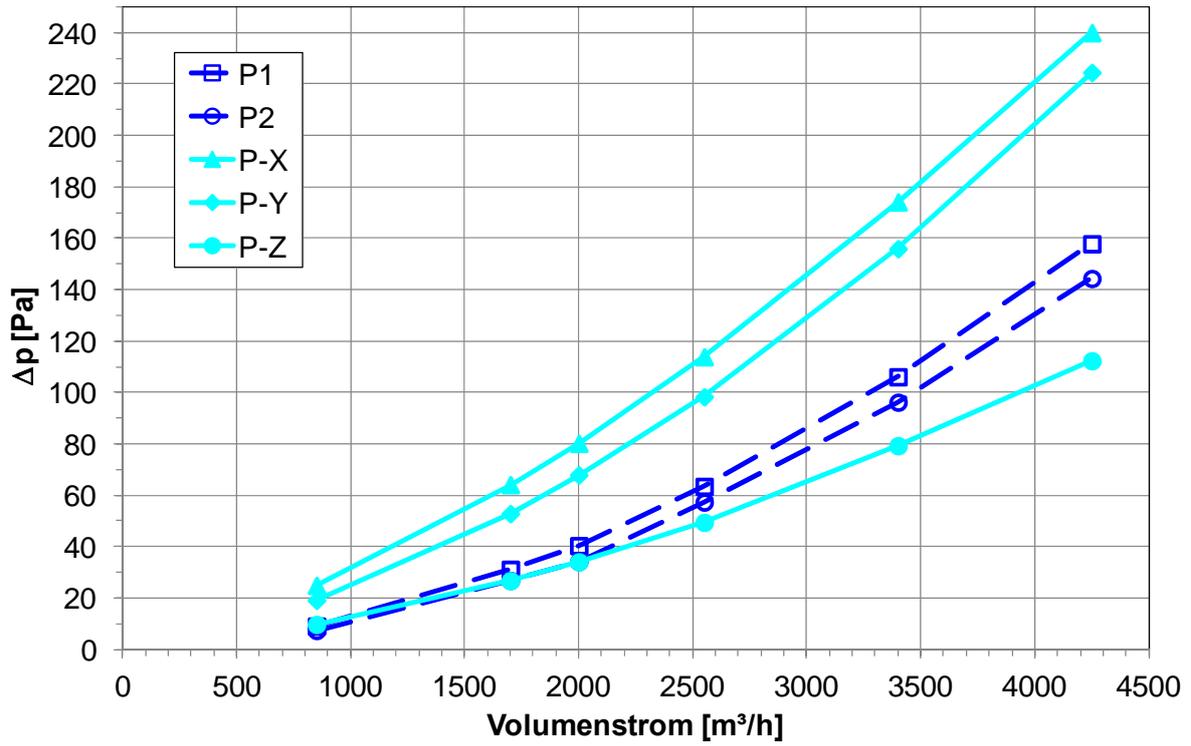


Abbildung 10: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven verschiedener Panelfilter

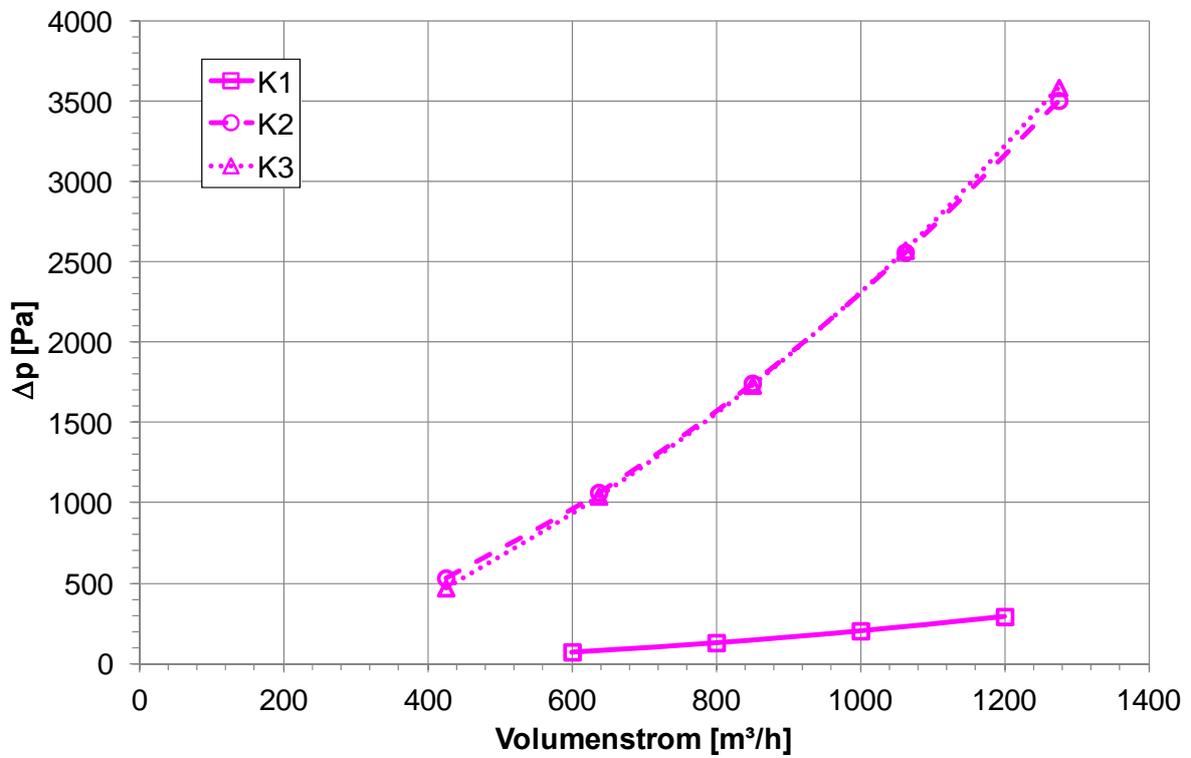


Abbildung 11: Druckdifferenz-Volumenstrom-Kurven verschiedener Kartuschenfilter

### 2.2.3 Ergebnisse der RLT-Filtertests mit Toluol

Zehn verschiedene RLT-Filtertypen der Bauformen V-Zelle, Taschen-, Panel- und Kartuschenfilter wurden mit Toluol und den in 2.1.1 beschriebenen Durchbruchversuchen getestet. Die Tests wurden bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte, einem Toluolvolumenanteil von 9 ppm und dem Nennvolumenstrom durchgeführt. Abbildung 12 gibt einen Überblick über die ermittelten Durchbruchkurven bis zu einer Versuchszeit von 300 min. Die Durchbruchkurven der beiden Kartuschenfilter werden in Abbildung 13 bei verlängerter Zeitachse dargestellt. Die Bezeichnungen der Filter in den Abbildungen schließen den Nennvolumenstrom in der Einheit m<sup>3</sup>/h an zweiter Stelle und anschließend die Druckdifferenz des Filters bei diesem Volumenstrom in der Einheit Pa mit ein. Die Schwankungen bei der Durchbruchkurve des Kartuschenfilters K2 sind auf Schwankungen des Testvolumenstroms und zusätzlich daraus resultierenden Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte zurückzuführen.

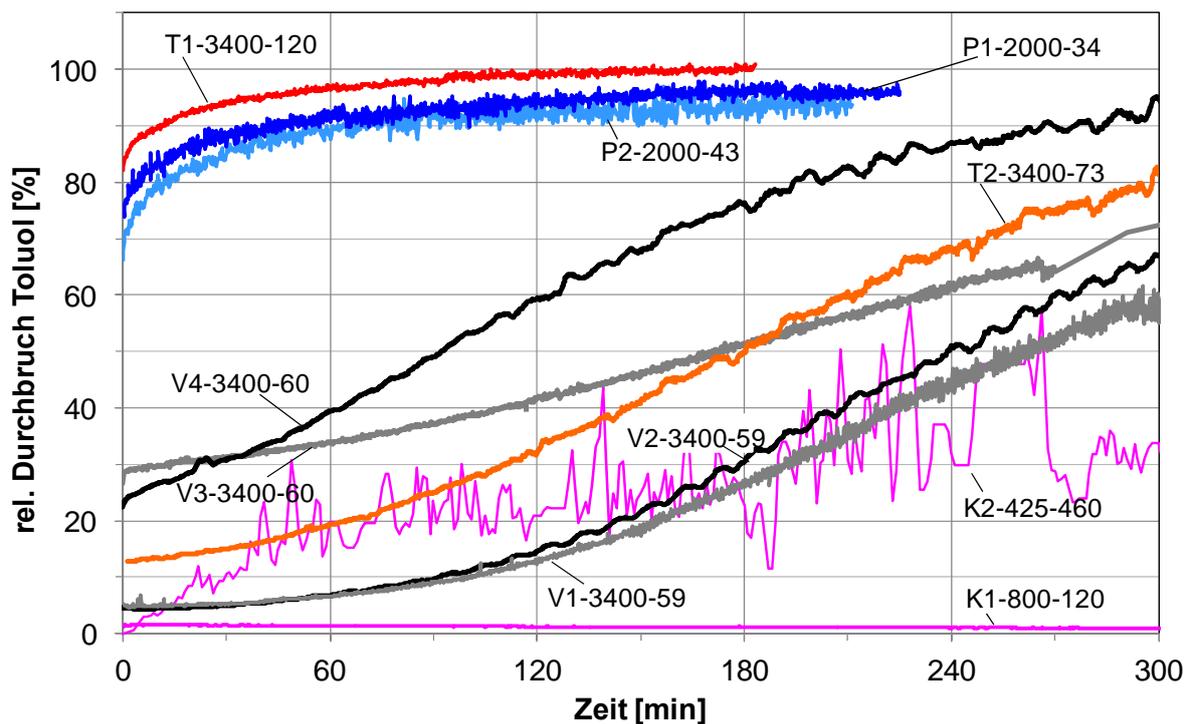
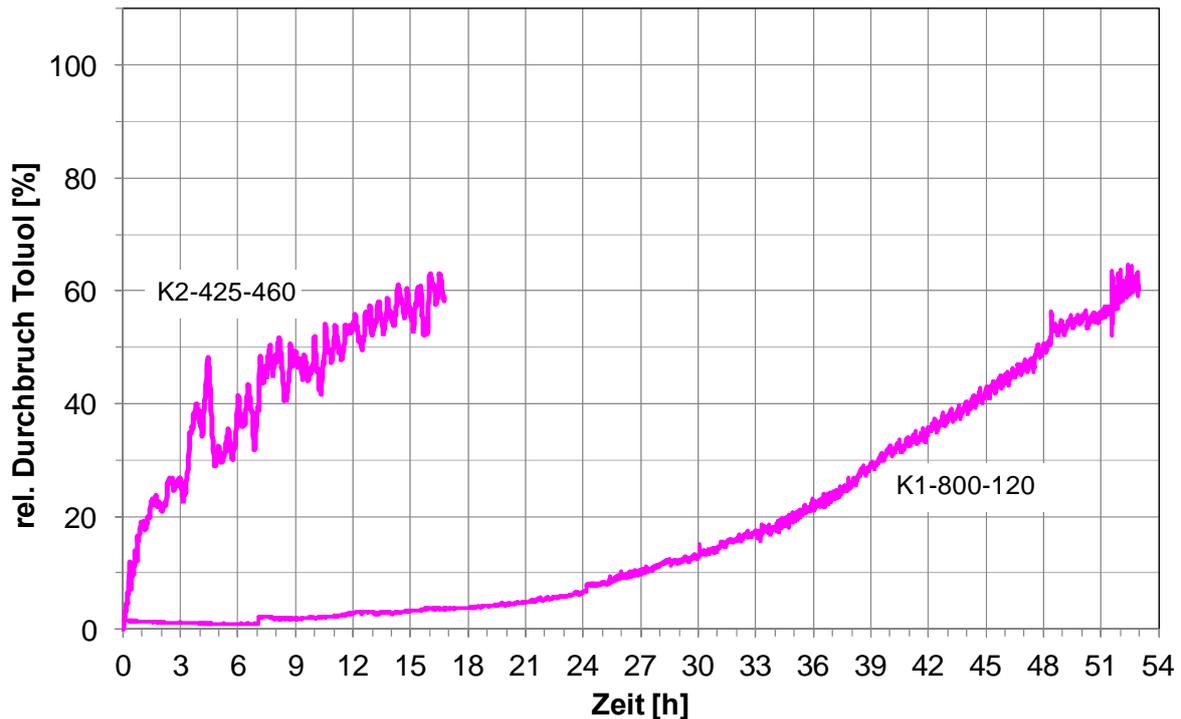
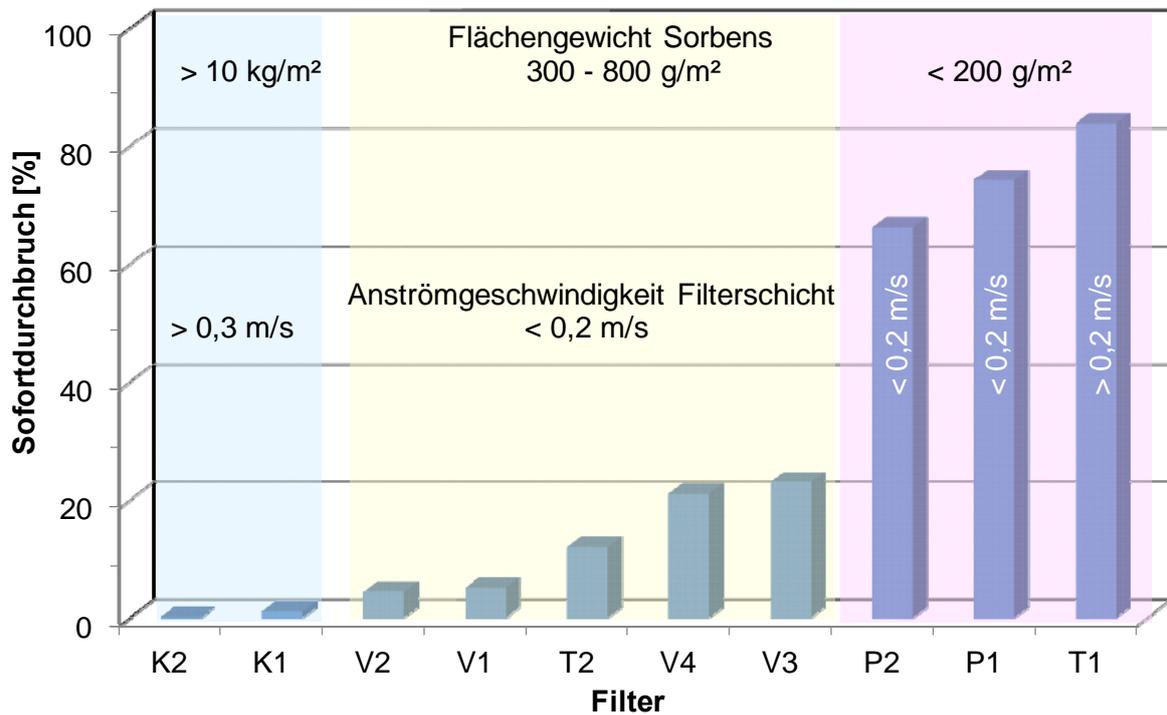


Abbildung 12: Toluol-Durchbruchkurven durch RLT-Filter



**Abbildung 13: Toluol-Durchbruchskurven durch Kartuschenfilter**

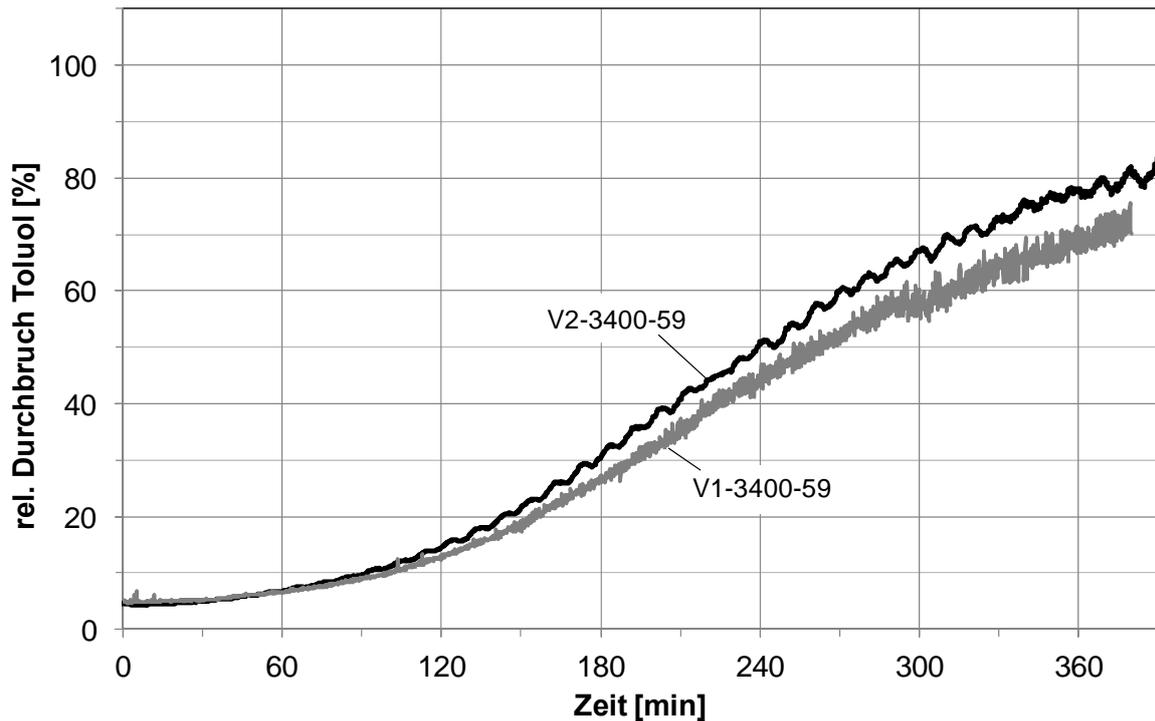
In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind deutliche Unterschiede beim Abscheideverhalten der verschiedenen Filter erkennbar. Die Werte des Sofortdurchbruchs der Filter, d. h. dem Toluoldurchbruch zu Beginn des Versuches, liegen zwischen quasi 0 % und ca. 84 %. Zu einem Sofortdurchbruch kann es kommen, wenn die Verweilzeit der Adsorptivmoleküle in dünnen Adsorbenschichten mit geringer Packungsdichte des Granulats sehr klein ist. Wenn innerhalb des Filtermediums Bereiche vorliegen, in denen kein Adsorbens vorhanden ist, mit dem die Adsorptivmoleküle während der Verweilzeit in Kontakt treten können, kommt es zu Bypassseffekten, die sich im Sofortdurchbruch niederschlagen. Dieser Effekt ist offensichtlich bei den Panelfiltern und dem Taschenfilter T1 stark ausgeprägt. Die Kartuschenfilter mit Adsorbenschichten von mehreren Zentimetern und Testvolumenströmen kleiner 1000 m<sup>3</sup>/h haben dagegen verschwindend geringe Sofortdurchbrüche. In Abbildung 14 ist die Rangfolge der Filter bezüglich des Sofortdurchbruchs aufgetragen. Zusätzlich werden Angaben zu den Flächengewichten des Sorbens (Aktivkohlemasse bezogen auf Anströmfläche) der Filter sowie den Anströmgeschwindigkeiten gemacht. Erkennbar ist der Einfluss des Flächengewichtes. Bei zu geringen Flächengewichten kommt es selbst bei moderaten Anströmgeschwindigkeiten zu hohen Sofortdurchbrüchen.



**Abbildung 14: Rangfolge nach Sofortdurchbruch**

Weiterhin ist in Abbildung 12 der unterschiedliche Verlauf der Durchbruchskurven festzustellen. Angestrebt werden bei der Abscheidung durch Adsorption an durchströmten Filterschichten ausgeprägt s-förmige Verläufe, die der stufenförmigen idealen Abtrennkurve möglichst nahe kommen. Der Grund hierfür ist, dass bei s-förmiger Durchbruchskurve die Kapazität der Filterschicht besser genutzt werden kann. Von den untersuchten Filtern weisen die V-Zellen, der Taschenfilter T2 und der Kartuschenfilter K1 einen annähernd s-förmigen Verlauf auf. K1 und K2 weisen erst nach mehr als ca. 51 h und 15 h einen Toluoldurchbruch von 60 % auf. Bei Betrachtung der Durchbruchswerte bei ca. 180 min Versuchszeit und bei Nichtberücksichtigung der unterschiedlichen Testvolumenströme ergibt sich folgende Rangfolge der Filter bezüglich des Toluol-Durchbruchs: 1-K1, 2-K2, 3-V1, 4-V2, 5-T2, 6-V3, 7-V4, 8-P2, 9-P1, 10-T1.

Die Abscheideleistung der Filter wird von mehreren Parametern bestimmt. Wichtig sind die absolute Menge des Adsorbens und seine Adsorptionskapazität. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 15 erneut die Toluol-Durchbruchskurven der V-Zellen V1 und V2, die beide mit normaler, nicht imprägnierter Aktivkohle ausgestattet sind, dargestellt. Beide Filter haben denselben Nennvolumenstrom, dieselbe Druckdifferenz und vergleichbare Durchbruchskurven, obwohl V2 fast eineinhalb mal so viel Aktivkohle enthält wie V1.



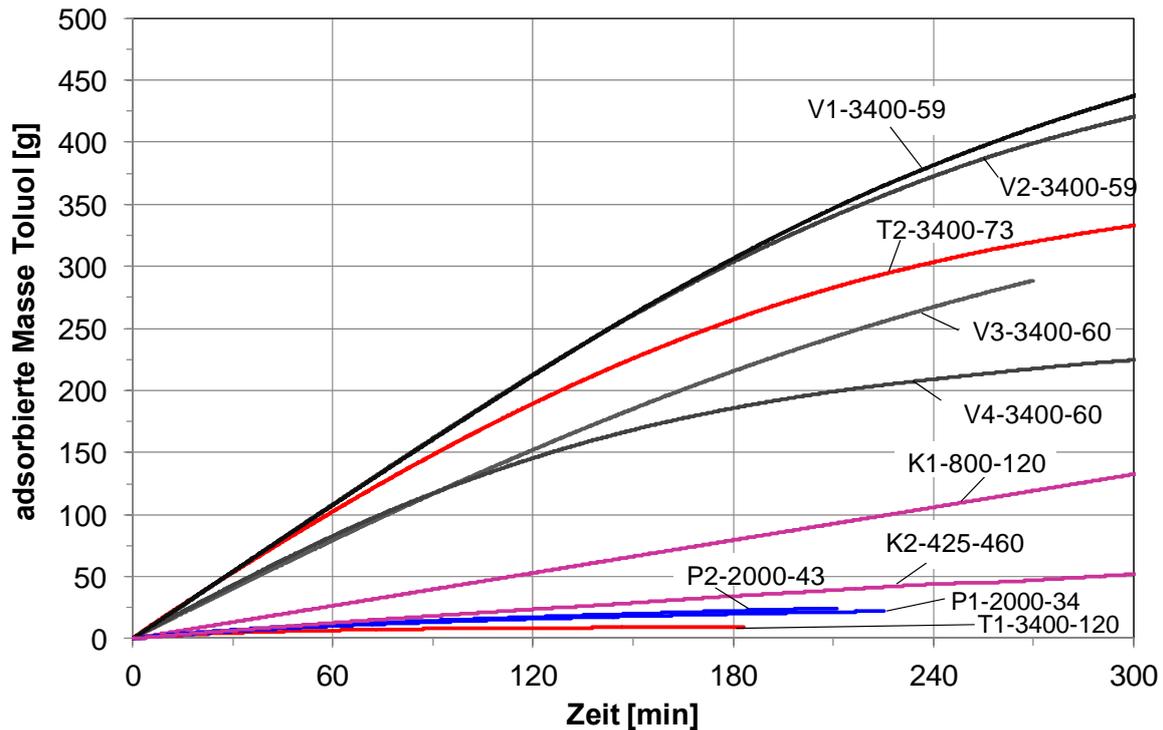
**Abbildung 15: Vergleich der Toluol-Durchbruchkurven durch V1 und V2**

In Abbildung 16 sind die während der Tests adsorbierten Toluolmassen dargestellt. Sie wurden mit Hilfe von Massenbilanzen auf der Basis der ermittelten Durchbruchkurven mit der folgenden Gleichung berechnet

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

Darin sind  $m$  die adsorbierte Masse,  $M$  die molare Masse des Adsorptivs,  $T$  die absolute Temperatur,  $R$  die universelle Gaskonstante,  $\dot{V}$  der Volumenstrom im Adsorber,  $c_{ein}$  die Rohgaskonzentration,  $c_{aus}$  die Reingaskonzentration des Testgases und  $\Delta t$  das Zeitintervall zwischen den Konzentrationsmesspunkten. Mit  $i$  und  $i+1$  werden die Zeitintervalle indiziert.

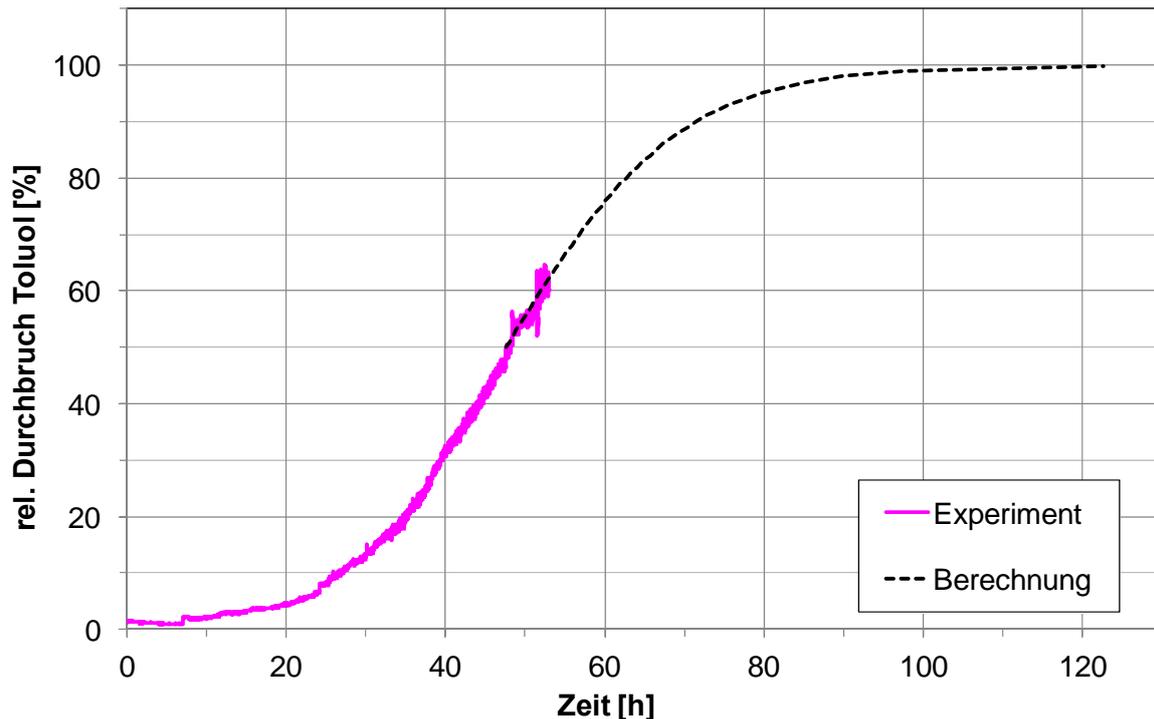
Wenn der Filter vollständig erschöpft ist, der relative Durchbruch des Testgases 100 % beträgt und damit das Adsorptiongleichgewicht erreicht ist, bleibt der Wert der adsorbierten Masse konstant. Durch Bezug der adsorbierten Masse auf die Sorbensmasse im Filter wird die Kapazität oder Beladung des Sorbens bei den gegebenen Bedingungen berechnet. Im Gleichgewichtszustand kann so ein Punkt einer Adsorptionisotherme ermittelt werden.



**Abbildung 16: Adsorbierte Toluolmassen an RLT-Filtern**

Der vollständige Durchbruch während der Versuchszeit wurde nur bei den Filtern T1 und V4 erreicht. Für weitere Filter, von denen die Sorbensmasse bekannt war und die einen annähernd s-förmigen Durchbruchkurvenverlauf aufwiesen, wurde mit Hilfe des Ansatzes nach Yoon-Nelson der weitere Kurvenverlauf bis 100 % Durchbruch berechnet. Dieser Ansatz wurde in einem der Vorläufervorhaben zu diesem Projekt „Evaluation und Optimierung praxisorientierter Prüfprozeduren für adsorptive Filter für die allgemeine Raumlüftung zur Fortschreibung der DIN EN ISO 10121“ (FV-Nr. 18516 N) für die Testsubstanz Toluol für die Anwendung auf RLT-Filter evaluiert. Für die Anwendung wurde ein Berechnungstool auf Excel-Basis erstellt, das interessierten Kreisen unter <https://www.iuta.de/vernetzung/igf-forschungsprojekte/aif-nummer/18516/> zur Verfügung steht. Mit Hilfe des Yoon-Nelson-Ansatzes kann für Durchbruchkurven von Toluol mit möglichst geringem Sofortdurchbruch und symmetrisch s-förmigem Verlauf, die experimentell bis mindestens zu einem Durchbruch von 50 % ermittelt wurden, der weitere Kurvenverlauf berechnet werden, siehe Ligotski et al. 2019. Die experimentell ermittelte Toluol-Durchbruchskurve des Kartuschenfilters K1 ließ sich mit dem Yoon-Nelson-Ansatz sehr gut weiterberechnen, siehe Abbildung 17. Bei den V-Zellen mit höherem Sofortdurchbruch gaben die berechneten Verläufe die Messwerte, die über 50 % Durchbruch hinausgingen, nur unzureichend wieder.

Auf Basis der experimentell bestimmten und berechneten Durchbruchkurven wurden die adsorbierten Massen bei Erreichen des Adsorptionsgleichgewichtes und die entsprechenden Gleichgewichtskapazitäten ermittelt. Insgesamt wurden bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte und 9 ppm Toluol Gleichgewichtskapazitäten von ca. 3 % bis 22 % ermittelt.



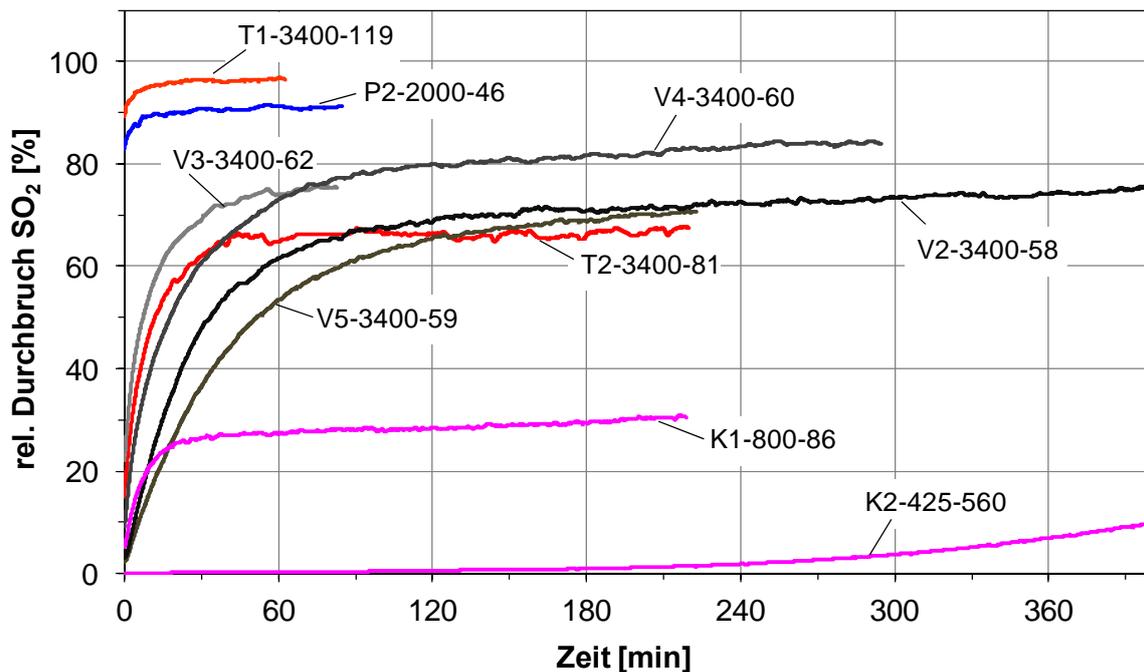
**Abbildung 17: Toluol-Durchbruchskurve durch Filter K1 - Experiment und Berechnung mit Yoon-Nelson-Ansatz**

#### 2.2.4 Ergebnisse der RLT-Filtertests mit SO<sub>2</sub>

Mit der Testsubstanz SO<sub>2</sub> wurden neun verschiedene RLT-Filtertypen der Bauformen V-Zelle, Taschen-, Panel- und Kartuschenfilter getestet. Die Tests erfolgten bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte, einem SO<sub>2</sub>-Volumenanteil von ca. 9 ppm und dem Nennvolumenstrom. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die ermittelten Durchbruchskurven bis zu einer Versuchszeit von 400 min. Erneut schließen die Bezeichnungen der Filter in der Abbildung an zweiter Stelle den Nennvolumenstrom in der Einheit m<sup>3</sup>/h und anschließend die Druckdifferenz bei diesem Volumenstrom in der Einheit Pa mit ein.

Die Durchbruchskurven von Schwefeldioxid durch die verschiedenen Filter außer K2 weisen keinen s-förmigen Verlauf auf. Es kommt dagegen zunächst zu einem relativ steilen Anstieg der Durchbruchswerte, die dann ab einem individuell verschiedenen Zeitpunkt und Durchbruchswert bis Versuchsende nahezu konstant auf einer Art Plateau unterhalb von 100 % verharren. Bei der Mehrzahl der Filter liegt das Durchbruchsplateau unterhalb von 80 % und wird innerhalb von 90 min. erreicht. Die Werte des Sofortdurchbruchs von SO<sub>2</sub> von den verschiedenen Filtern liegen in den Bereichen unterhalb von ca. 20 % und über 80 %.

Der deutlich andere Durchbruchskurvenverlauf von Schwefeldioxid im Vergleich zu dem von Toluol kommt daher, dass SO<sub>2</sub> nur zu einem geringen Anteil durch Physisorption abgeschieden wird. Dann wird das physikalisch gebundene SO<sub>2</sub> durch chemische Reaktionen insbesondere bei Anwesenheit von Wasserdampf bzw. abgeschiedenem Wasser umgewandelt und angelagert (siehe z. B. Abdulrasheed et al. 2018, Rosas et al. 2017, Zhang et al. 2006). Weil das Sorptionspotenzial auf diese Weise immer wieder erneuert wird, erfolgt die Annäherung der Durchbruchskurve an die Sättigungskonzentration sehr langsam. Bei RLT-Filtern und einem Testvolumenanteil von 9 ppm SO<sub>2</sub> wird in praktikablen Versuchszeiten daher häufig kein vollständiger Durchbruch erreicht.



**Abbildung 18: SO<sub>2</sub>-Durchbruchskurven durch RLT-Filter**

Die Durchbruchskurve des Kartuschenfilters K2 ist in Abbildung 19 bei verlängerter Zeitachse dargestellt. Der Versatz in der Durchbruchskurve bei etwas mehr als 10 Stunden Versuchszeit kommt daher, dass der Versuch über Nacht unterbrochen und am nächsten Tag fortgeführt wurde. Während der Unterbrechung verblieb der Filter ohne Durchströmung im Prüfstand. Nach ca. 17 h Versuchszeit scheint das Durchbruchplateau bei ca. 48 % erreicht zu sein.

In Abbildung 20 sind die an den verschiedenen Filtern abgeschiedenen SO<sub>2</sub>-Massen in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen. Den Bezeichnungen der Filter in der Abbildung schließen sich wie zuvor an zweiter Stelle die Nennvolumenströme in der Einheit m<sup>3</sup>/h und anschließend die Werte der Durchbruchplateaus in der Einheit % an. Der Zeitpunkt, an dem das Durchbruchplateau erreicht ist, ist in dem Diagramm prinzipiell daran zu erkennen, dass danach die abgeschiedene SO<sub>2</sub>-Masse linear mit der Zeit ansteigt. Die Steigung ist von der Höhe des Durchbruchplateaus und dem Volumenstrom abhängig. Zur Beurteilung der Abscheideeffizienz ist Abbildung 20 jedoch nur eingeschränkt geeignet.

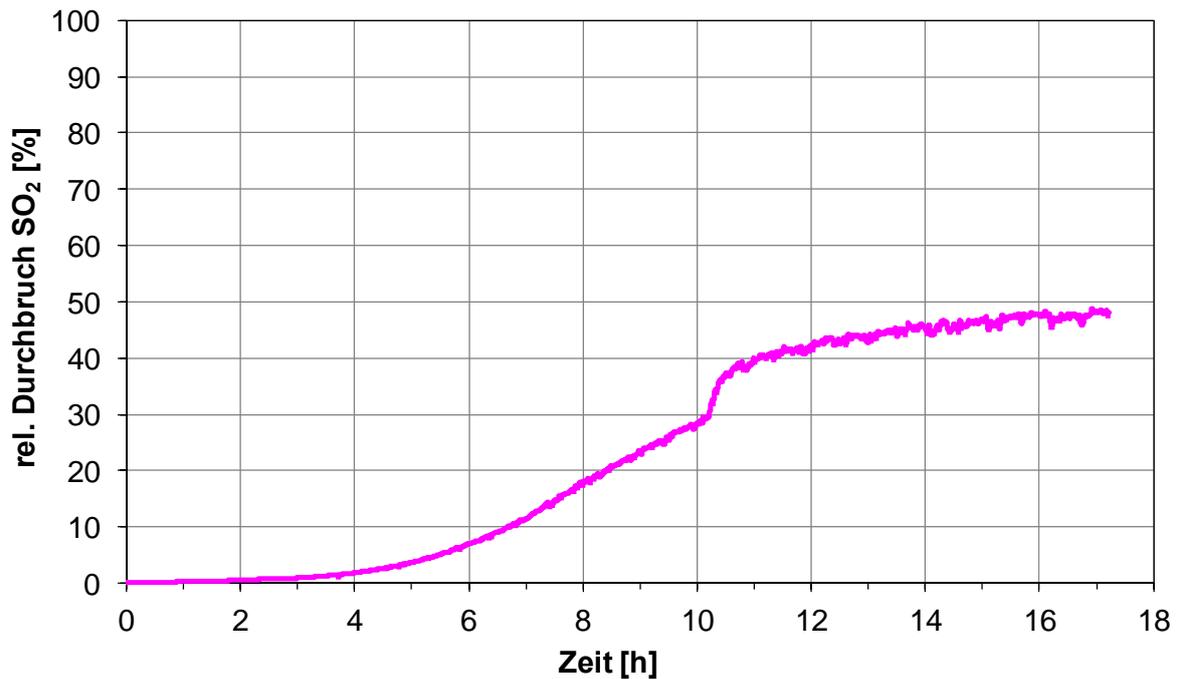


Abbildung 19: SO<sub>2</sub>-Durchbruchkurve durch Filter K2  
(Nennvolumenstrom 425 m<sup>3</sup>/h, Druckdifferenz > 500 Pa)

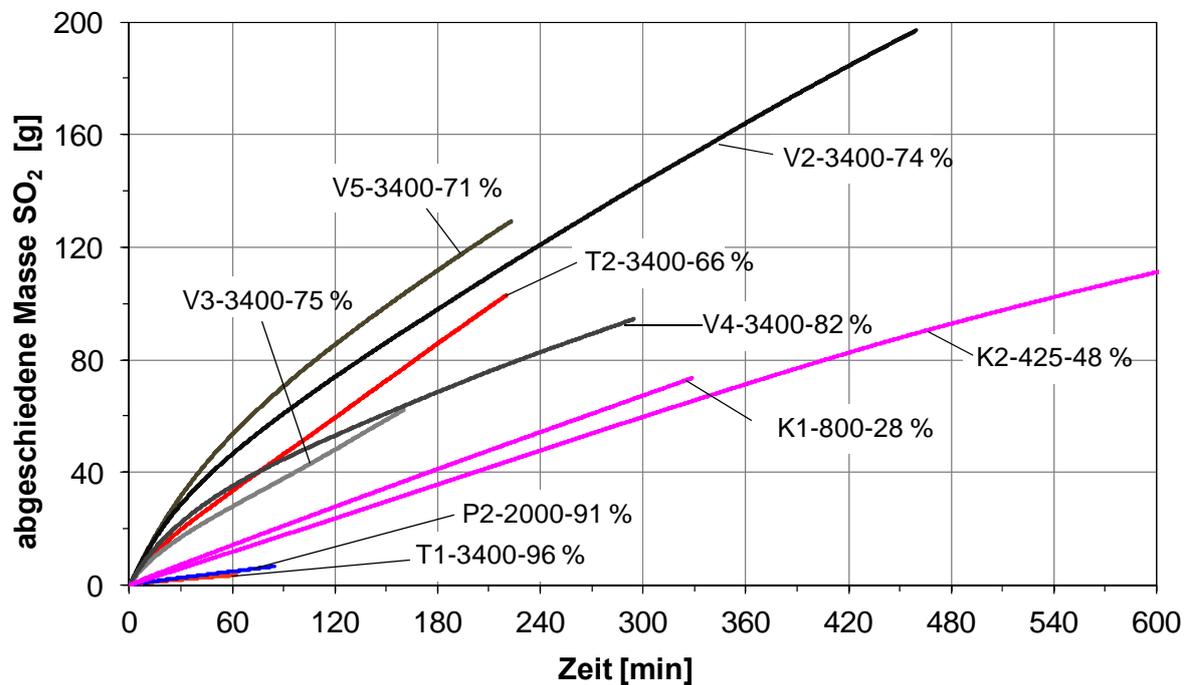


Abbildung 20: Abschiedene SO<sub>2</sub>-Massen an RLT-Filtern

In Tabelle 2 ist dargestellt, wie groß der Anteil der abgeschiedenen SO<sub>2</sub>-Masse im Verhältnis zu der zugeführten SO<sub>2</sub>-Masse nach 10 h bzw. 20 h ist. Der 10-Stunden-Wert für K2 stammt

aus den Versuchsergebnissen. Alle anderen Werte wurden überschlägig berechnet unter Annahme eines konstanten Durchbruchplateaus. Die Abscheideraten geben einen wesentlich besseren Eindruck von der tatsächlichen Abscheidekapazität der Filter wieder.

**Tabelle 2: SO<sub>2</sub>-Abscheideraten nach 10 h und 20 h Beaufschlagung**

<b>Filter</b>	<b>Abscheiderate nach 10 h</b>	<b>Abscheiderate nach 20 h</b>
	%	%
V2	29,6	26,2
V3	27,1	26,8
V4	19,9	18,0
V5	34,6	32,1
T1	3,4	3,4
T2	32,6	31,9
P2	8,9	8,8
K1	69,7	69,0
K2	94,9	83,2

### 2.2.5 Ergebnisse der RLT-Filtertests mit Ammoniak

Es wurden neun verschiedene RLT-Filtertypen der Bauformen V-Zelle, Taschen- und Kartuschenfilter mit der Testsubstanz Ammoniak getestet. Die Tests erfolgten bei 23 °C, 50 % relativer Luftfeuchte, einem NH<sub>3</sub>-Volumenanteil von ca. 9 ppm und dem jeweiligen Nennvolumenstrom. Abbildung 21 gibt einen Überblick über die ermittelten Durchbruchkurven bis zu einer Versuchszeit von zwei Stunden. Die Bezeichnungen der Filter in der Abbildung schließen an zweiter Stelle den Nennvolumenstrom in der Einheit m<sup>3</sup>/h und anschließend die Druckdifferenz bei diesem Volumenstrom in der Einheit Pa mit ein. Das unterschiedliche Abscheidevermögen der verschiedenen RLT-Filter für NH<sub>3</sub> ist in Abbildung 21 deutlich zu erkennen. Alle Filter, bei denen schon in der ersten Viertelstunde der 80%-Durchbruch überschritten wird, sind mit nicht modifizierter Aktivkohle ausgestattet. Die Filter V4, V6, V7 und K3 enthalten imprägnierte Aktivkohle oder Ionentauscher als Sorbens. Die größere NH<sub>3</sub>-Abscheidung an diesen Sorbentien erfolgt u. a. aufgrund der Bildung von Ammoniumsalzen und der Lösung in dem in den Poren adsorbierten Wasser (Sager et al. 2016, Petit & Bandosz 2009, Guo et al. 2005). Die Durchbruchkurven der Filter V4, V6, V7 und K3 mit den leistungsfähigeren Sorbentien sind in Abbildung 22 über die Versuchszeit von bis zu 22 Stunden dargestellt. Den geringsten Durchbruch weist der Kartuschenfilter K3 auf, nach 22 h beträgt der Durchbruch erst ca. 10 %.

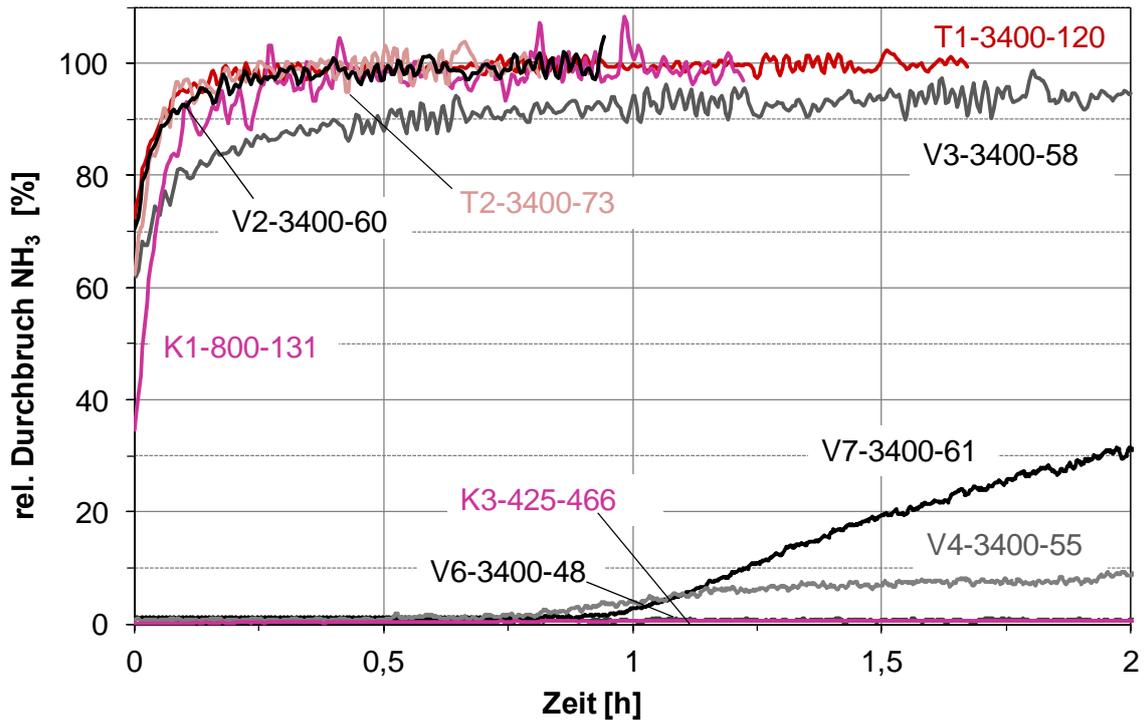


Abbildung 21: NH<sub>3</sub>-Durchbruchskurven durch RLT-Filter bis zu einer Versuchszeit von 2 h

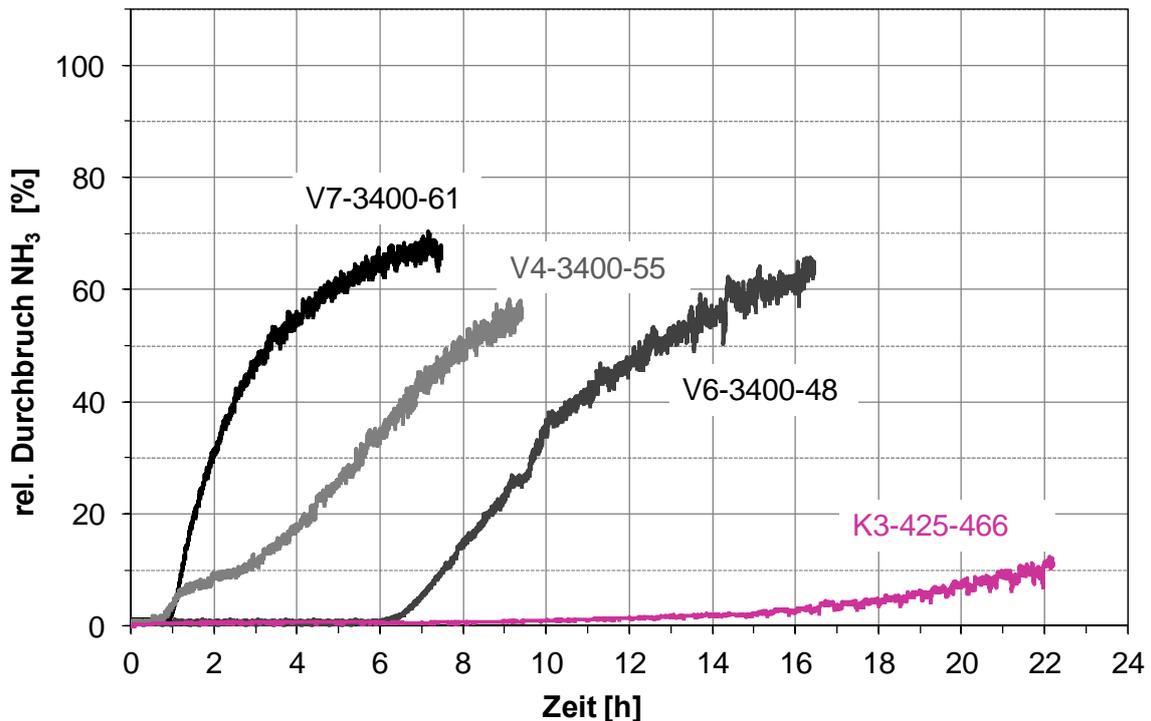


Abbildung 22: NH<sub>3</sub>-Durchbruchskurven durch RLT-Filter bis zu einer Versuchszeit von 24 h

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die während der Versuche adsorbierten NH<sub>3</sub>-Massen dargestellt. An den mit nicht modifizierter Aktivkohle ausgestatteten Filtern (Abbildung 23) wurden größtenteils weniger als ein Gramm Ammoniak abgeschieden. Dagegen werden an

den Filtern mit imprägnierter Aktivkohle und Ionentauscher wesentlich höhere  $\text{NH}_3$ -Massen adsorbiert (Abbildung 24). Zur weitergehenden Bewertung der Filter wurden die adsorbierten Massen auf die Sorbensmenge im Filter bezogen. Die daraus resultierenden Sorbensbeladungen am Versuchsende sind in Abbildung 25 für die verschiedenen Filter dargestellt. Bei den Filtern, die bis zum vollständigen  $\text{NH}_3$ -Durchbruch getestet wurden, entspricht die Beladung der Gleichgewichtsbeladung. Bei den anderen Filtern werden die Versuchszeit und der Durchbruch bei Abbruch des Versuches angegeben.

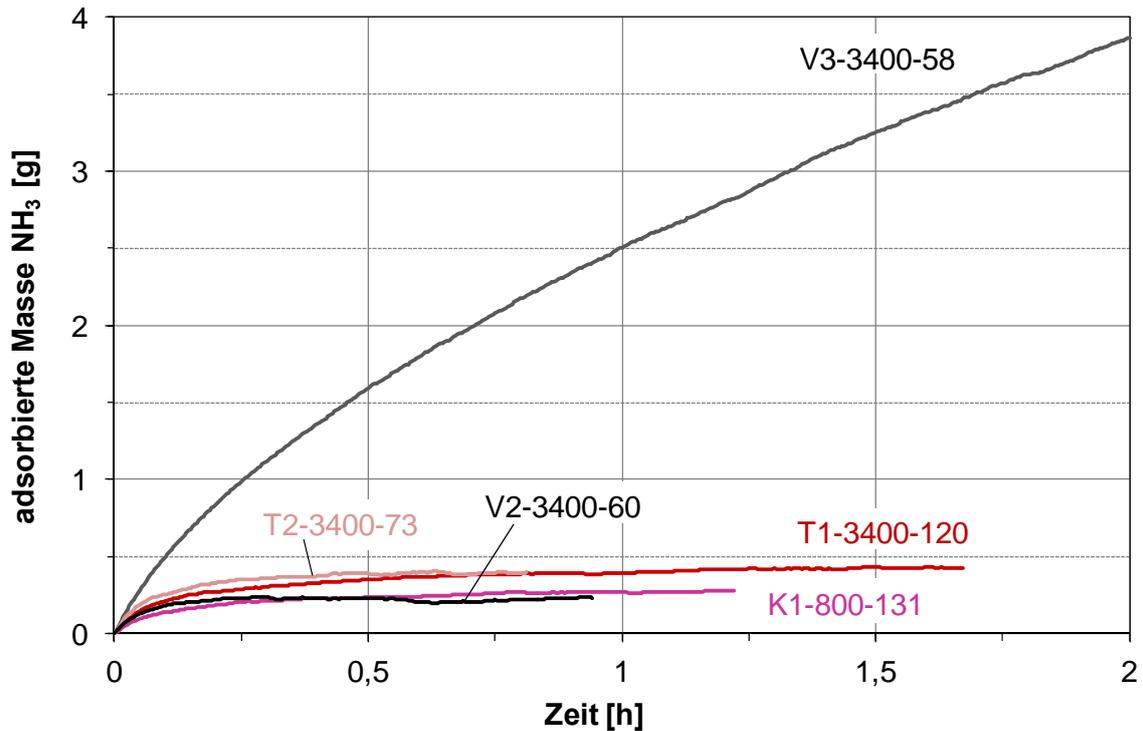


Abbildung 23: Adsorbierte Massen  $\text{NH}_3$  an RLT-Filtern geringer Kapazität bis zu einer Versuchszeit von 2 h

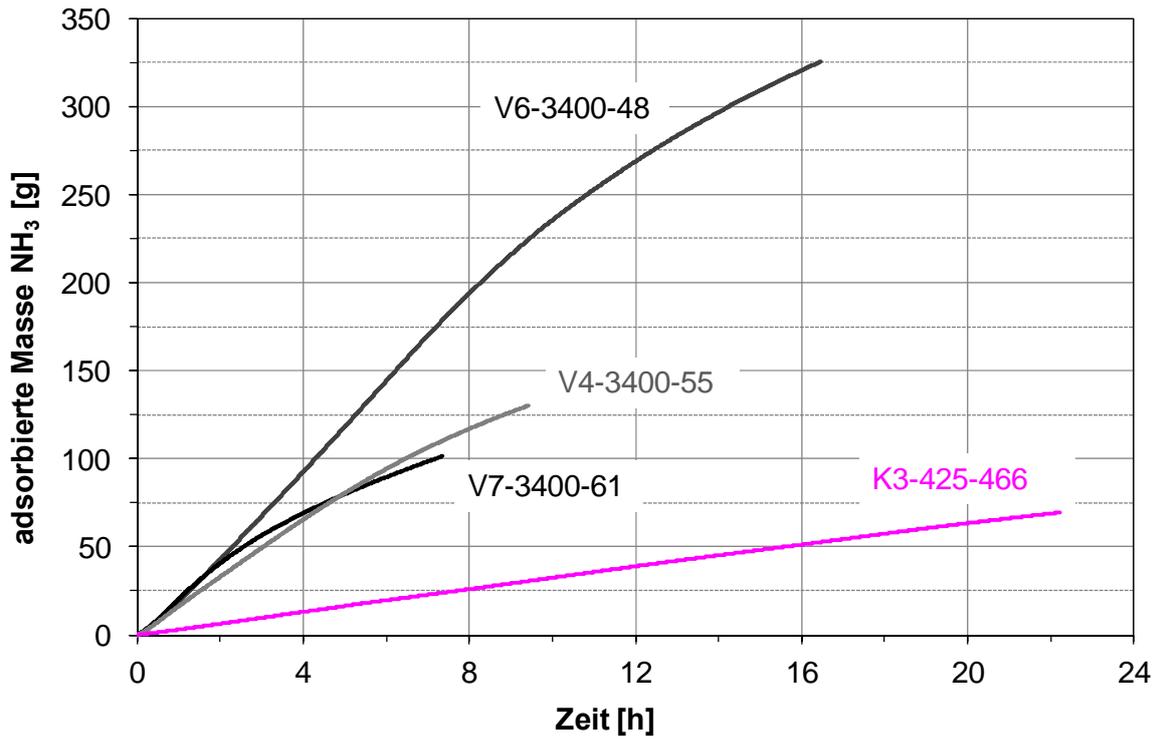


Abbildung 24: Adsorbierte Massen NH<sub>3</sub> an RLT-Filtern größerer Kapazität bis zu einer Versuchszeit von 24 h

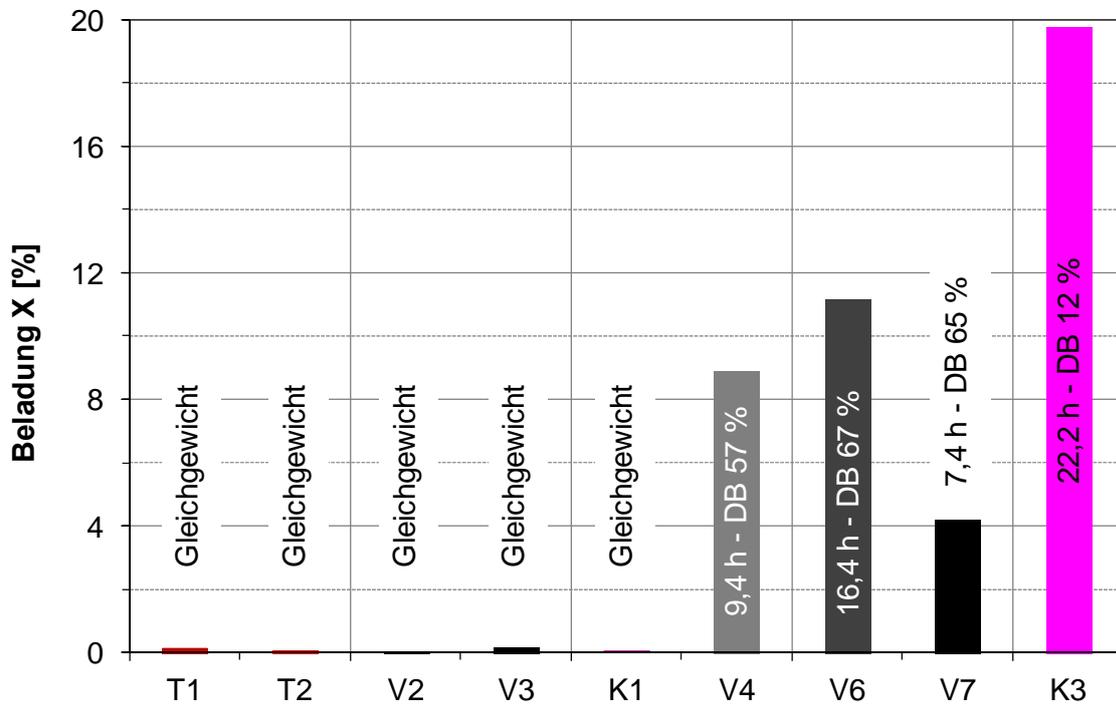


Abbildung 25: Sorbensbeladung mit NH<sub>3</sub> der verschiedenen Filter

## 2.3 AP 2 - Adsorptive Druckluftfilter: Auswahl, Evaluierung der Testmethode, Tests und Ergebnisse

### 2.3.1 Auswahl und Beschaffung von Druckluftfiltern

Der prinzipielle Aufbau von adsorptiven Druckluftfiltern ist in Abbildung 26 dargestellt. Das Sorbens befindet sich in einem zylindrischen Filterelement, das seinerseits in einem druckfesten Gehäuse positioniert ist. Normalerweise wird das Filterelement von innen nach außen durchströmt. Das Sorbens kann in den Filterelementen in verschiedener Form vorliegen, als Aktivkohlegranulat oder eingebunden in Flachfiltermedium. Das Flachfiltermedium kann plissiert oder gerollt in das Filterelement eingebracht sein, siehe Abbildung 27.

Druckluftfilter, bei denen das Sorbens, in der Regel Aktivkohle, als Granulat in einer Schüttung in dem zylindrischen Ringspalt angeordnet ist, werden im Folgenden als Kartuschenfilter bezeichnet. Die einzelnen untersuchten Kartuschenfiltertypen sind mit K und einer fortlaufenden Zahl gekennzeichnet. Die Filter, in denen das Sorbens eingebunden in ein Flachfiltermedium vorliegt, werden Medienfilter genannt und mit M bezeichnet. Zur Kennzeichnung der Medienfiltern wird zusätzlich angegeben, ob das Medium gewickelt (Mg) oder plissiert (Mp) vorliegt.

In Kartuschenfiltern ist in der Regel deutlich mehr Aktivkohle verarbeitet als in Medienfiltern. Alle während des Projektes untersuchten Kartuschenfilter enthielten mehr als 100 g Aktivkohle, das Gros der untersuchten Medienfilter etwas mehr als 10 g.

Für das Projekt wurden jeweils 4-5 verschiedene Filtertypen der Bauformen Medienfilter gewickelt (Mg1-Mg4) und Medienfilter plissiert (Mp1-Mp4) und 5 verschiedene Kartuschenfiltertypen (K1-K5) sowie die dazugehörigen Filtergehäuse beschafft und getestet.

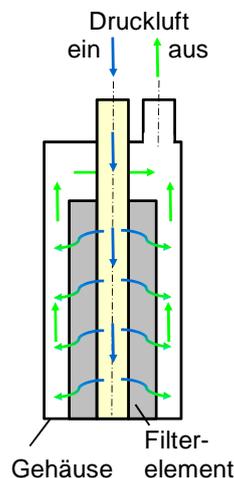
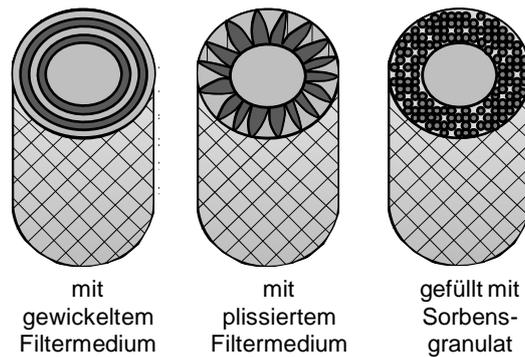


Abbildung 26: Prinzipieller Aufbau von Druckluftfiltern

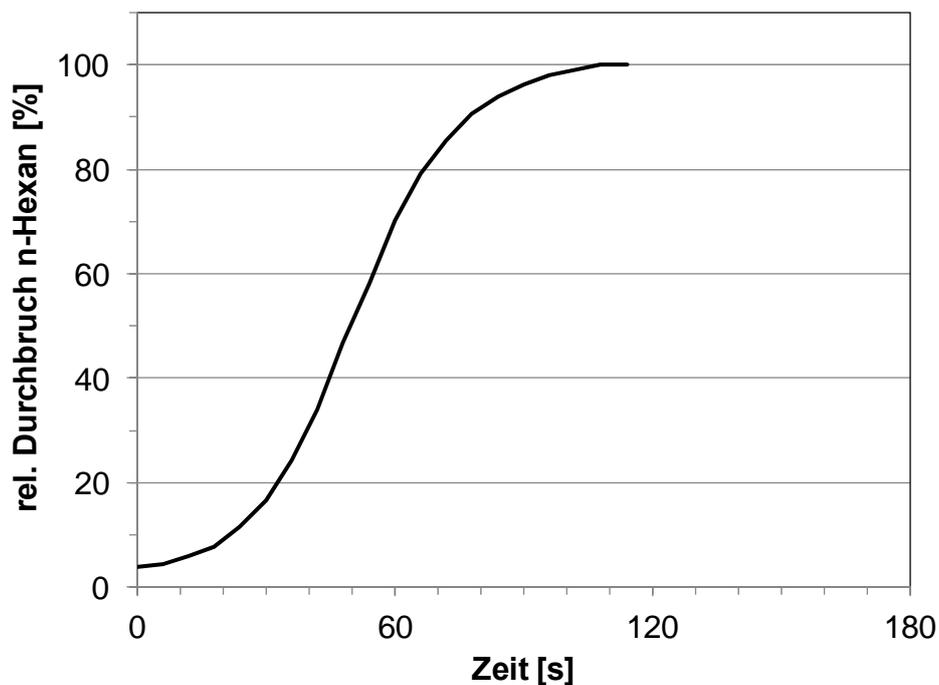


**Abbildung 27: Filterelementtypen**

### 2.3.2 Weiterentwicklung der Testvorschrift ISO 12500-2 (Öldampf)

Die bestehende Prüfnorm ISO 12500-2 für adsorptive Druckluftfilter gibt, wie unter 2.1.2 dargestellt, einen Durchbruchstest mit  $1000 \text{ mg/kg}_{\text{tr, DL}}$  n-Hexan als Testgas in trockener Druckluft als Trägergas vor. Die Test sind bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $7 \text{ bar}_\text{Ü}$  und dem Nennvolumenstrom der Filter bis zu einem vereinbarten Durchbruchswert durchzuführen. Häufig wird der 80%-Durchbruch als Abbruchkriterium vereinbart. Es wird angegeben, dass mindestens drei Filter gleichen Typs getestet und die Ergebnisse gemittelt werden sollen.

Der Hauptkritikpunkt an der bestehenden Norm ist, dass bei dem Test von Druckluftfiltern, die nur eine geringe Menge an Aktivkohle enthalten, der vollständige n-Hexan-Durchbruch schon in den ersten Minuten erfolgen kann, wie in Abb. Abbildung 28 exemplarisch dargestellt. Das hat zur Folge, dass die Durchbruchskurven verschiedener Filter kaum zu unterscheiden sind, eine seriöse Kapazitätsbestimmung nicht möglich ist und dadurch die Filter nur schwierig zu bewerten sind.



**Abbildung 28: Durchbruchskurve von n-Hexan (Testkonzentration  $1000 \text{ mg/kg}_{\text{tr, DL}}$ )**

In dem Vorläuferprojekt „Carbon Management in der Druckluftfilterbranche (17992 N)“ wurde bereits der Vorschlag für ein modifiziertes Prüfverfahren gemacht, in dem die die n-Hexan-Konzentration so angepasst wird, dass der 80%-Durchbruch innerhalb einer Zeitspanne von einer halben Stunde bis zu zwei Stunden erfolgt. Konkret wurde vorgeschlagen, mit einer geringeren Konzentration als  $1000 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$  n-Hexan zu starten. Wenn der 80%-Durchbruch schon vor Ablauf einer halben Stunde erreicht werden, wäre ein neuer Test mit verringerter Testkonzentration zu beginnen. Wenn innerhalb der ersten halben Stunde des Versuches absehbar wäre, dass der 80%-Durchbruch nicht innerhalb von zwei Stunden erreicht wird, sollte ein neuer Test mit  $1000 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$  n-Hexan begonnen werden.

Im aktuellen Projekt wurde ein vergleichbarer Weg beschritten. Als Einstiegstestkonzentration wurden  $100 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$  n-Hexan, ca.  $33 \text{ ppm}_V$ , ausgewählt. Bei der Auswahl der Testkonzentration wurde berücksichtigt, dass die obere Grenze des kleinsten Messbereiches der FIDs bei  $10 \text{ ppm}_V$  liegt und die prozentuale Abweichung vom Zielwert der n-Hexan-Dosierung bei sinkender n-Hexan-Konzentration abnimmt, siehe Abbildung 29. Darin werden die Verläufe der Rohgaskonzentration bei Testgaskonzentrationen von 10, 100, 300 und  $1000 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$  während einzelner Versuche dargestellt.

Der neue Ansatz für eine Testmethode wurde an einer Auswahl verschiedener Druckluftfilter getestet. Abbildung 30 zeigt die mit  $100 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$  n-Hexan ermittelten n-Hexan-Durchbruchskurven. Der Bezeichnung der einzelnen Filtertypen folgt in der Legende der Nennvolumenstrom der Filter in der Einheit  $\text{m}^3/\text{h}$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und 1 bar. Der 80%-Durchbruch erfolgte bei den getesteten Medienfiltern überwiegend nach ca. 20 min. Die Durchbruchskurve durch den Filter Mg4 ist in Abbildung 30 nicht dargestellt, da bereits zu Beginn ein vollständiger Durchbruch vorlag. Die mit Aktivkohlegranulat gefüllten Kartuschenfilter K1 bis K3 haben erst nach 200 - 240 min Versuchszeit den 80%-Durchbruch erreicht, siehe Abbildung 31.

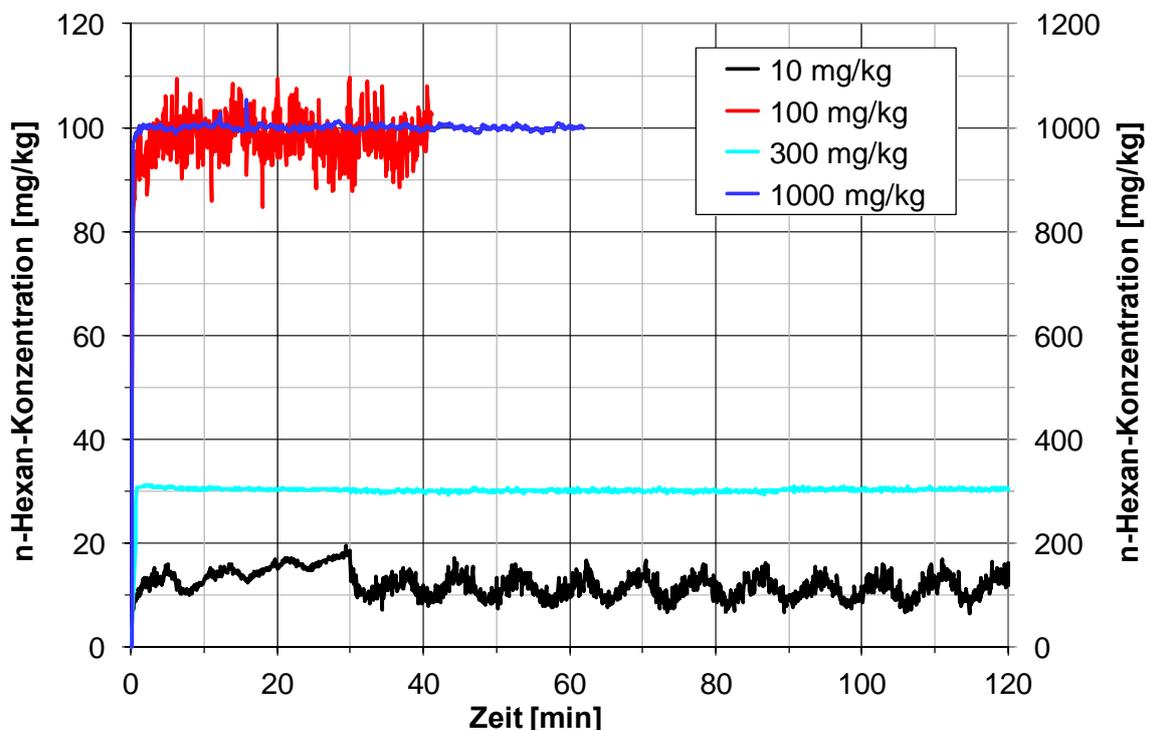


Abbildung 29: Dosierkonstanz von n-Hexan bei verschiedenen Konzentrationen

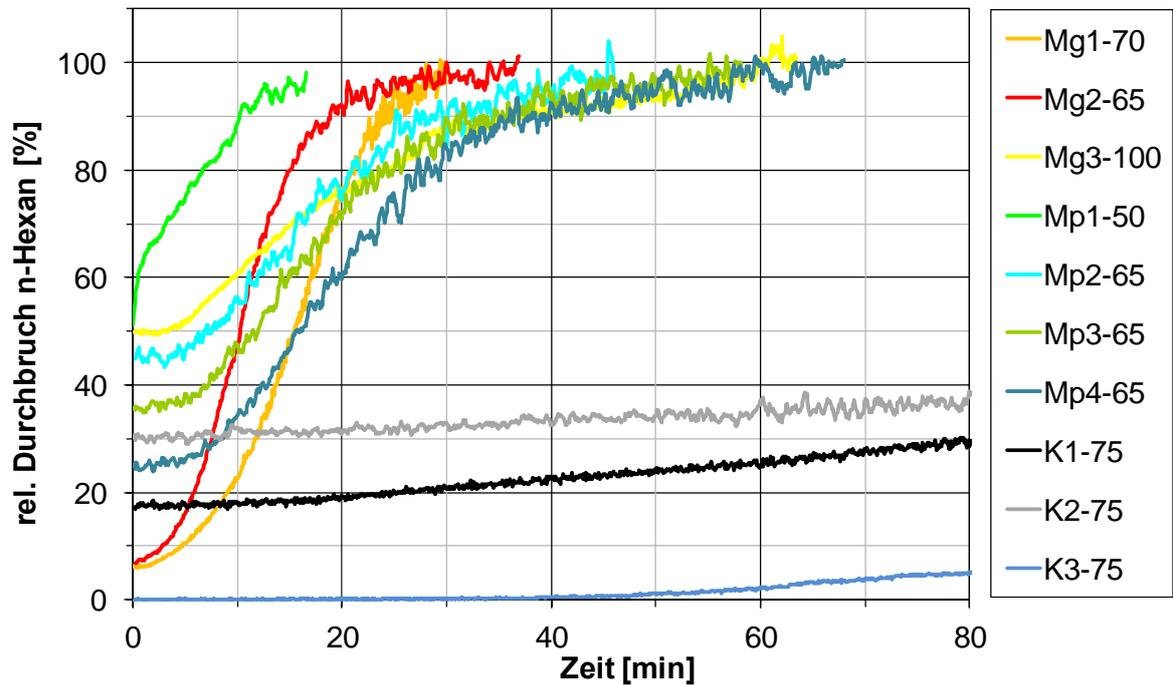


Abbildung 30: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Druckluftfilter verschiedener Bauart (bei  $100 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $7 \text{ bar}_\text{ü}$ , Nennvolumenstrom)

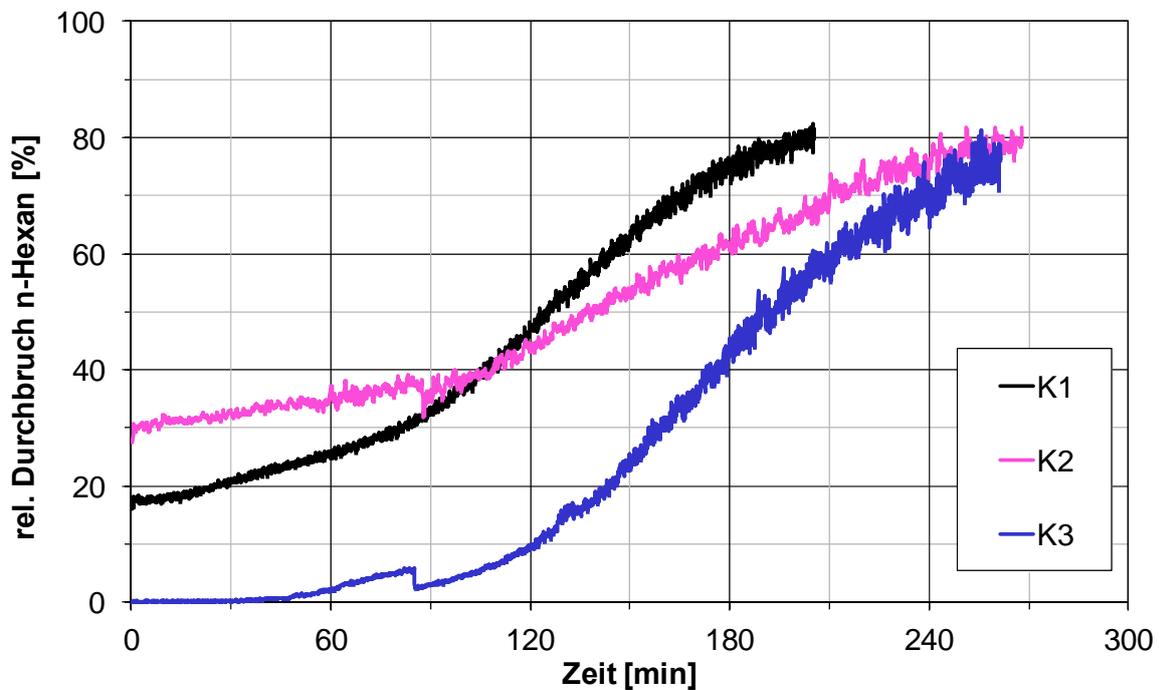


Abbildung 31: Durchbruchkurven von n-Hexan durch die Druckluftfilter K1 bis K3 (bei  $100 \text{ mg/kg}_{\text{tr DL}}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $7 \text{ bar}_\text{ü}$ ,  $75 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Der Kartuschenfilter K1 wurde mit zwei höheren Testgaskonzentrationen, mit 300 und 1000 mg/kg<sub>tr DL</sub> n-Hexan getestet. In Abbildung 32 sind die Durchbruchkurven dargestellt. Bei einer n-Hexan-Testgaskonzentration von 300 mg/kg<sub>tr</sub> n-Hexan beträgt die Versuchszeit bis zum 80%-Durchbruch ungefähr 75 min und bei 1000 mg/kg<sub>tr DL</sub> liegt sie unterhalb einer halben Stunde. Der Kartuschenfilter K2 wurde ebenfalls zusätzlich mit 1000 mg/kg<sub>tr DL</sub> n-Hexan getestet, siehe Abbildung 33. Der 80%-Durchbruch erfolgte dabei nach ca. einer halben Stunde.

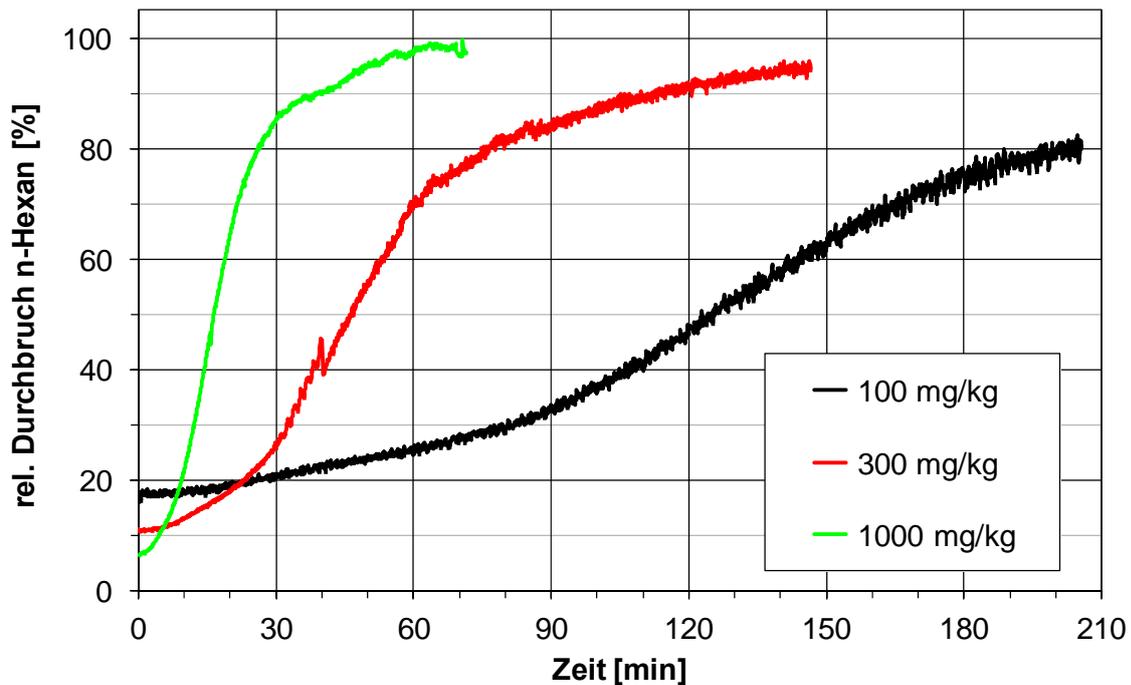
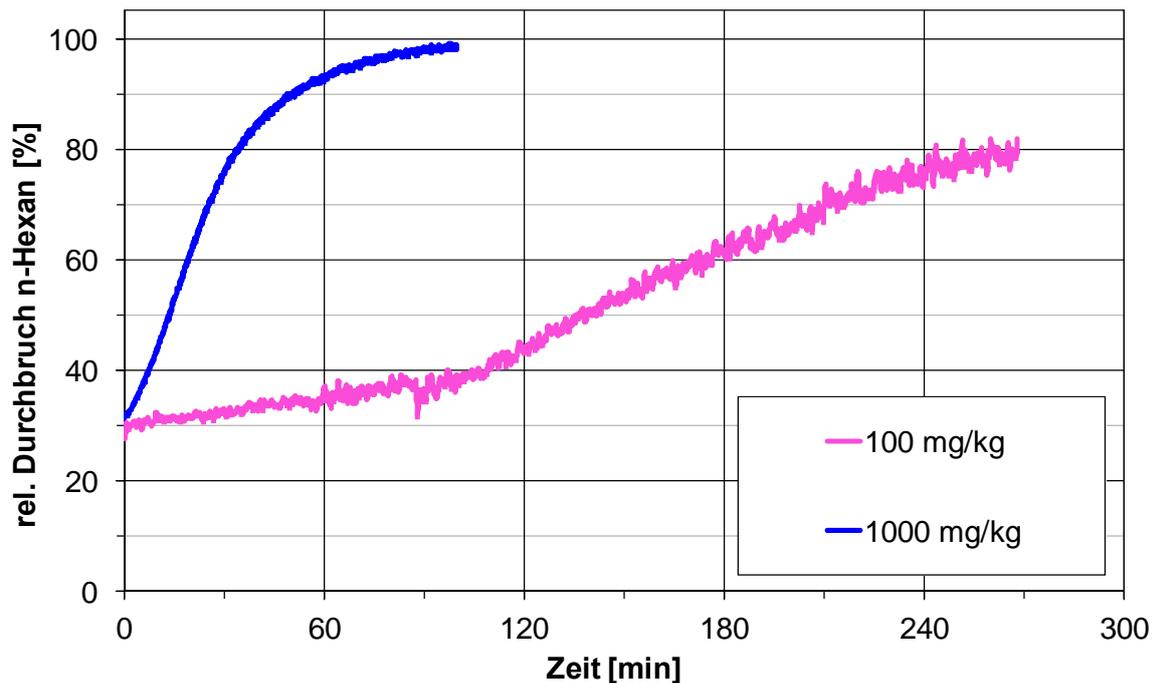


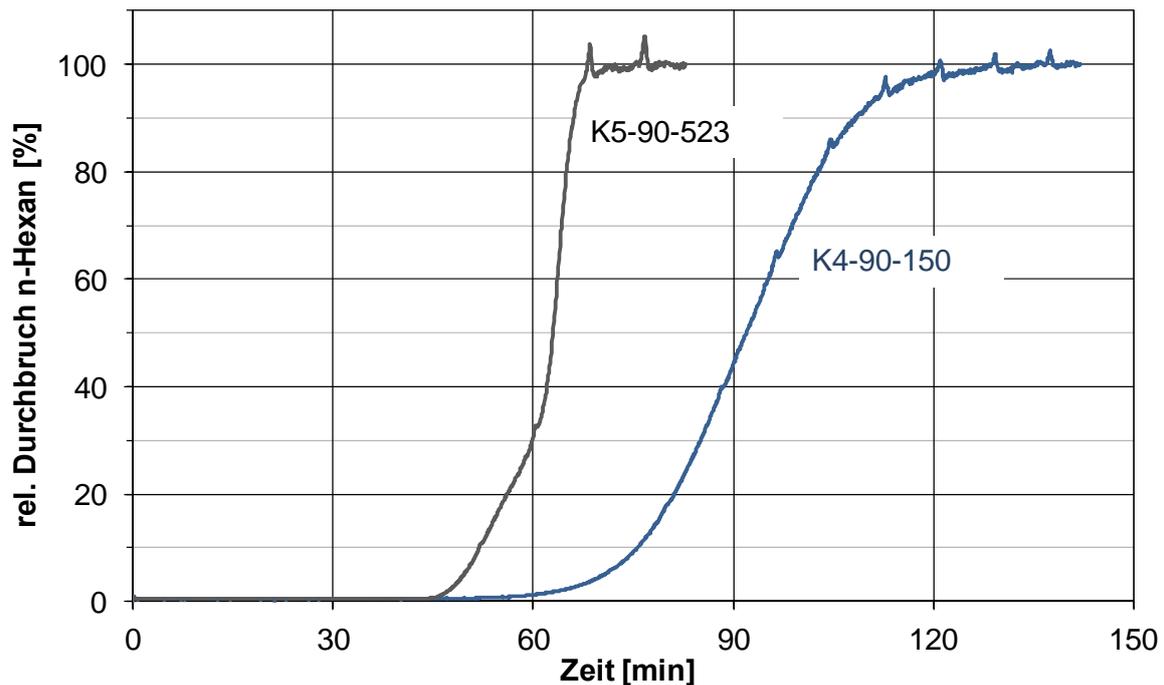
Abbildung 32: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Druckluftfilter K1 bei verschiedenen Testgaskonzentrationen (20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>, 75 m<sup>3</sup>/h)



**Abbildung 33: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Druckluftfilter K2 bei zwei verschiedenen Testgaskonzentrationen (20 °C, 7 barü, 75 m<sup>3</sup>/h)**

Als leicht modifiziertes Testverfahren auf der Basis der ISO 12500-2 wird aufgrund der Erfahrungen der beschriebenen Tests folgendes Vorgehen vorgeschlagen. Wenn die Sorbensmenge des Filters bekannt ist oder abzuschätzen ist, dass die verarbeitete Sorbensmasse größer als 100 g ist, wird der Durchbruchstest mit 1000 mg/kg<sub>tr</sub> n-Hexan anderenfalls mit 100 mg/kg<sub>tr DL</sub> n-Hexan durchgeführt. Sollte der Durchbruch von n-Hexan bei Tests mit 100 mg/kg<sub>tr DL</sub> nach einer Stunde unterhalb von 50 % liegen, wird empfohlen, den Versuch zu beenden und einen neuen Filter desgleichen Typs mit 1000 mg/kg n-Hexan zu testen. Die Leistungsdaten des Filters, d. h. der Sofortdurchbruch, die Zeit und adsorbierte Masse bis zum 80%-Durchbruch sind immer zusammen mit der Testgaskonzentration anzugeben.

Die Kartuschenfilter K4 und K5 wurden gemäß dem modifizierten Testverfahren direkt mit 1000 mg/kg<sub>tr DL</sub> n-Hexan getestet. Die Durchbruchkurven sind in Abbildung 34 dargestellt.

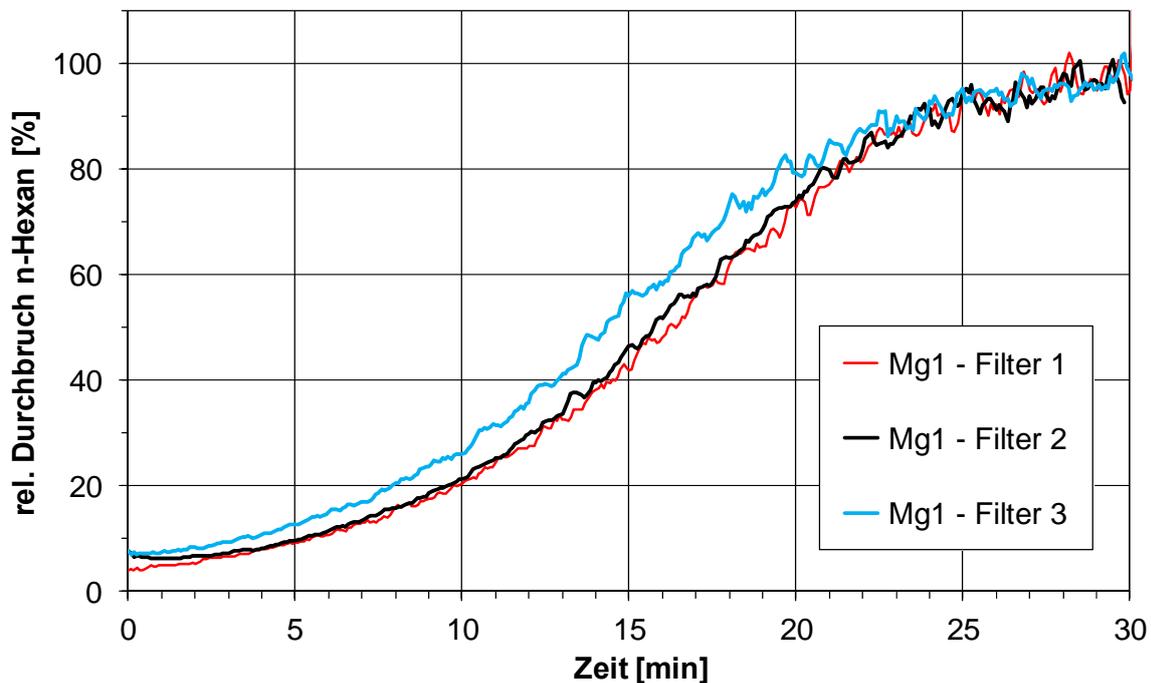


**Abbildung 34: Durchbruchskurven von n-Hexan durch die Druckluftfilter K4 und K5 (1000 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 barÜ, 90 m³/h)**

### 2.3.3 Evaluierung der ISO 12500-2

#### Wiederholungstests

In der ISO 12500-2 ist vorgeschrieben, den Durchbruchversuch an mindestens drei Filtern desselben Typs durchzuführen und als Ergebnis den Mittelwert zu verwenden. In Abbildung 35 sind die n-Hexan-Durchbruchskurven durch drei Medienfilter des Typs Mg1 dargestellt. Die Durchbruchskurven weisen Abweichungen sowohl hinsichtlich des Sofortdurchbruchs als auch der absoluten Durchbruchswerte zu einem bestimmten Zeitpunkt auf. Gründe hierfür sind beispielsweise Unterschiede beim zeitlichen Verlauf von Temperatur oder Rohgaskonzentration oder Inhomogenitäten der verarbeiteten Medien. Die Vorgabe der Norm, mindestens drei Filter zu testen, wird als sinnvoll erachtet.



**Abbildung 35: Durchbruchkurven von n-Hexan durch den Druckluftfilter Mg1 (100 mg/kg, 20 °C, 7 barÜ, 70 m³/h)**

#### Testtemperaturintervall

In der ISO 12500-2 ist weiterhin vorgeschrieben, die dem Filter zugeführte Druckluft auf  $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  zu temperieren. Da die Adsorption von organischen Komponenten, wie n-Hexan, ein exothermer Prozess ist, führen höhere Temperaturen generell zu geringeren Adsorptionskapazitäten (Sager & Schmidt 2010). Um zu überprüfen, ob durch das vorgegebene Temperaturintervall eventuell Einfluss auf die Filterbewertung haben kann, wurden 4 verschiedene Filter jeweils bei 15, 20 und 25 °C in Einzelversuchen getestet. Die Abbildung 36 bis Abbildung 39 zeigen die Durchbruchkurven der Filter jeweils bei 15, 20 und 25 °C.

Obwohl die Versuchszeit bis zum 80%-Durchbruch bei den Medienfiltern bei 15 °C etwas später erfolgt als bei den höheren Temperaturen ist der Temperatureinfluss insbesondere bei Berücksichtigung der allgemeinen Wiederholbarkeit von Filtertests (siehe auch Abbildung 35) gering. Die Versuchsergebnisse sprechen für die Eignung des in der bestehenden ISO 12500-2 vorgegebenen Temperaturintervalls.

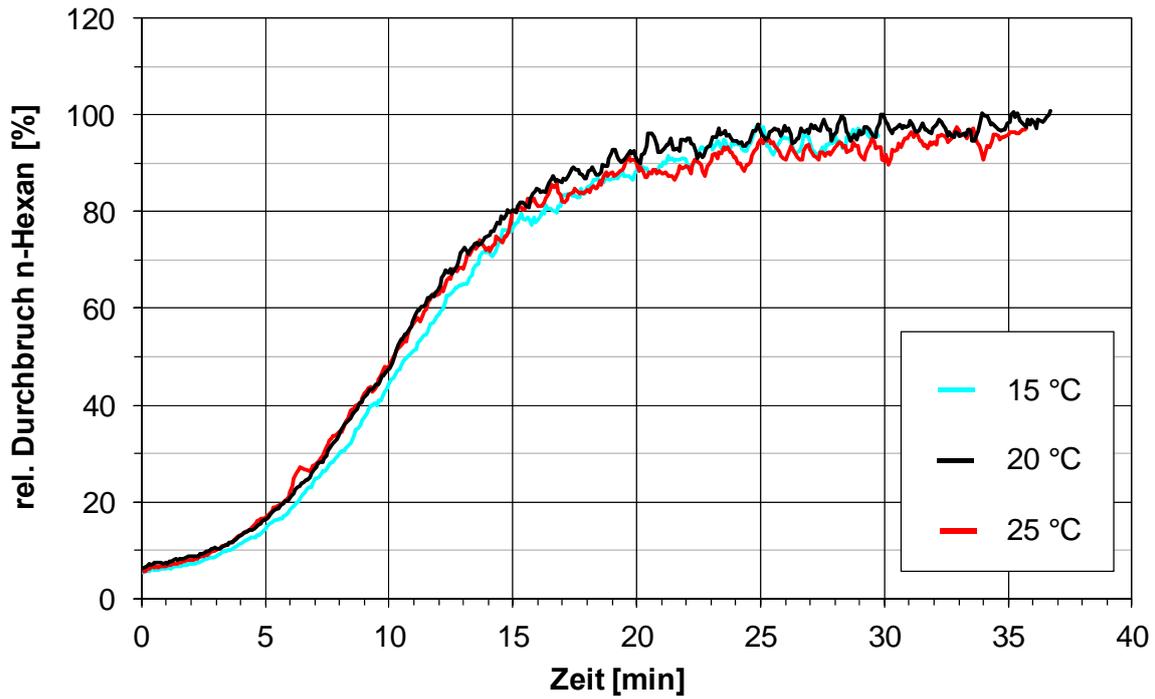


Abbildung 36: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Filter Mg2 bei 15, 20 und 25 °C (100 mg/kg n-Hexan, 7 bar<sub>ü</sub>, 65 m<sup>3</sup>/h)

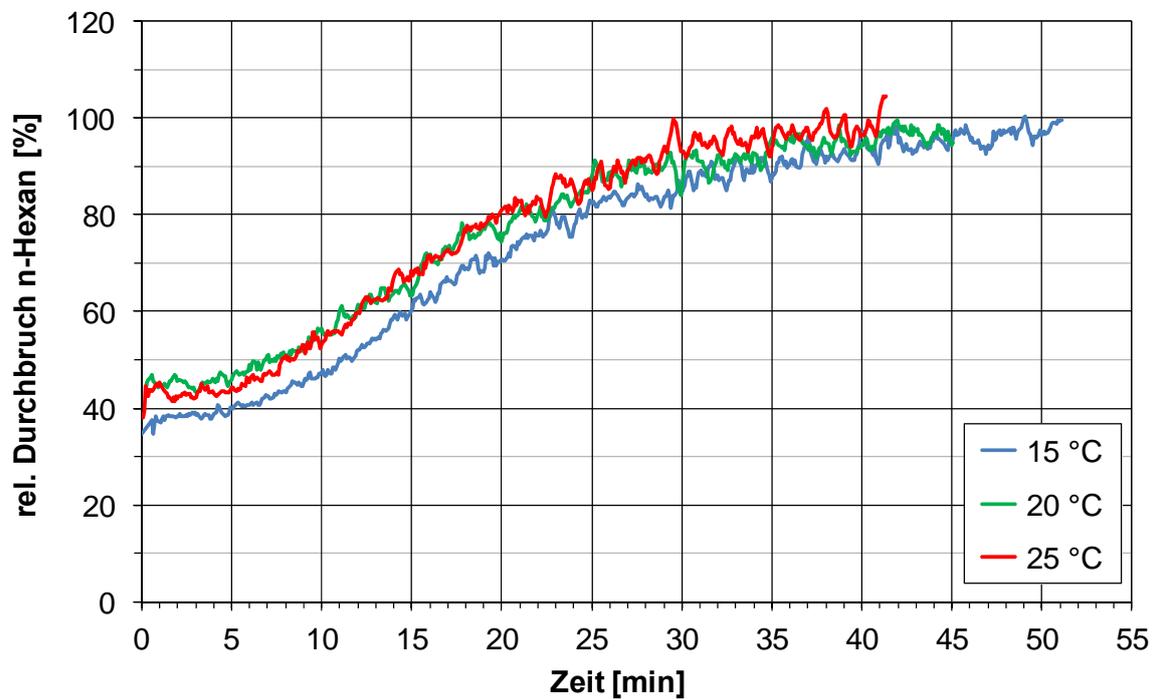


Abbildung 37: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Filter Mp2 bei 15, 20 und 25 °C (100 mg/kg n-Hexan, 7 bar<sub>ü</sub>, 65 m<sup>3</sup>/h)

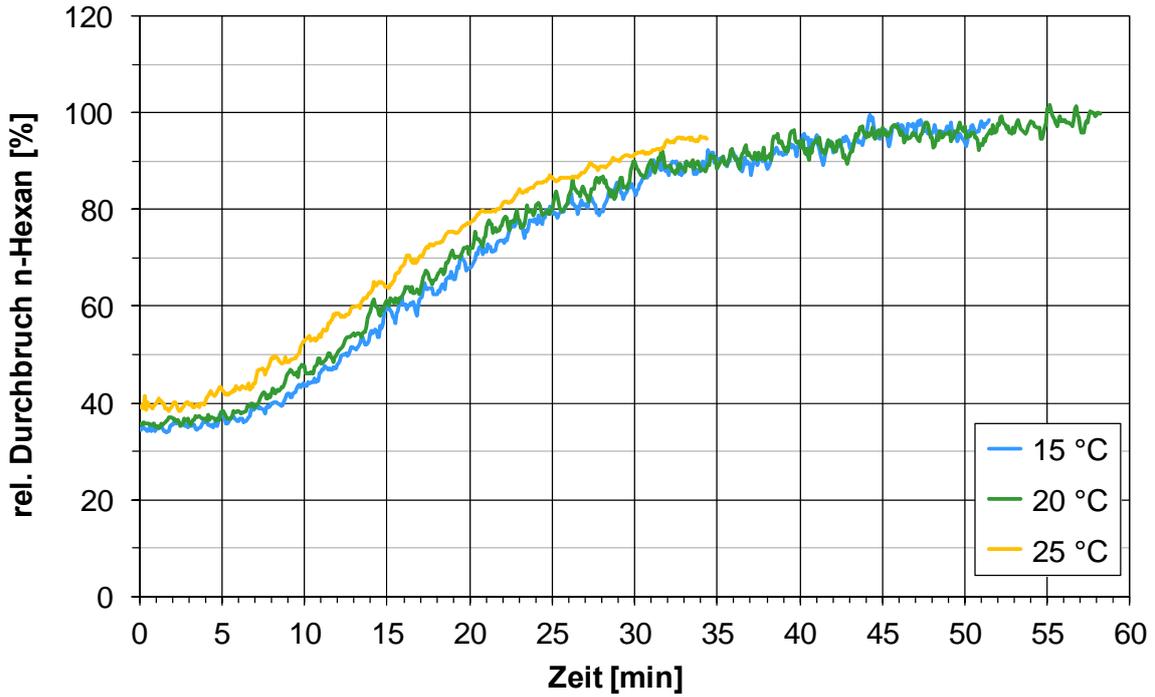


Abbildung 38: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Filter Mp3 bei 15, 20 und 25 °C (100 mg/kg n-Hexan, 7 bar<sub>ü</sub>, 65 m<sup>3</sup>/h)

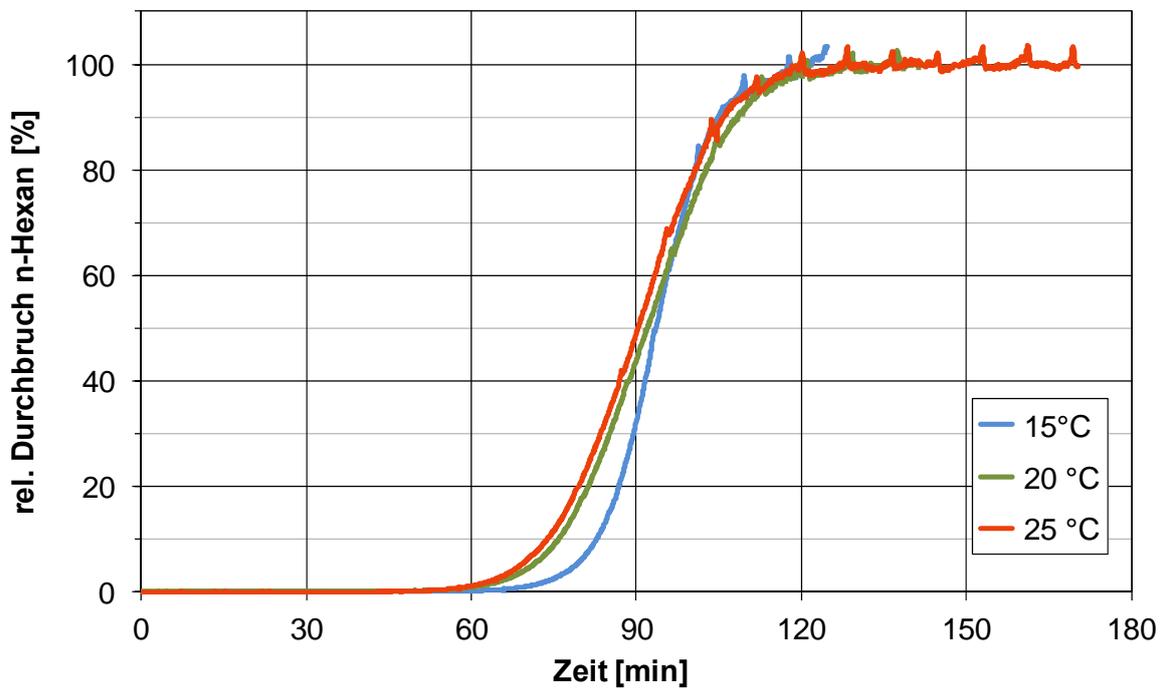
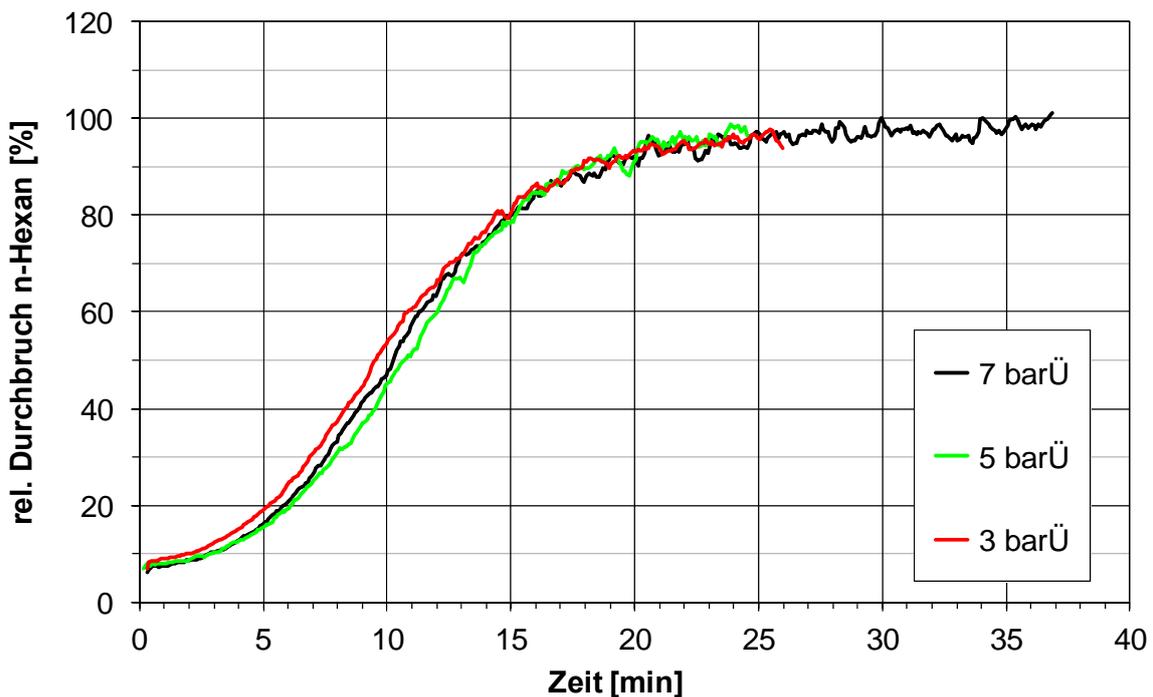


Abbildung 39: Durchbruchkurven von n-Hexan durch Filter K4 bei 15, 20 und 25 °C (1000 mg/kg n-Hexan, 7 bar<sub>ü</sub>, 90 m<sup>3</sup>/h)

### Testdruck

In allen Teilen der ISO 12500 zur Prüfung von Druckluftfiltern wird ein Prüfdruck von 7 bar<sub>Ü</sub> vorgeschrieben. Um den Einfluss des Druckes auf die Adsorption von n-Hexan zu untersuchen, wurden an einem Medienfilter (Mg2) zusätzliche Versuche bei Prüfdrücken von 3, 5 und 7 bar<sub>Ü</sub> durchgeführt. Der Volumenstrom wurde in Abhängigkeit von dem Prüfdruck angepasst. Abbildung 40 zeigt die ermittelten n-Hexan-Durchbruchskurven. Bei den untersuchten Druckverhältnissen ist kein Einfluss des Druckes zu erkennen. Auch die adsorbierten Massen, die jeweils bei Versuchsende zwischen 1,3 und 1,4 g lagen, unterstützen dieses Ergebnis.



**Abbildung 40: Durchbruchskurven von n-Hexan durch Filter Mg2 bei 3, 5 und 7 bar<sub>Ü</sub>  
(100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 65 m<sup>3</sup>/h)**

### 2.3.4 Druckabfall von Druckluftfiltern

In Abbildung 41 sind die Druckverluste der 13 verschiedenen getesteten Druckluftfilter der Bauformen Medienfilter gewickelt (Mg), Medienfilter plissiert (Mp) und Kartuschenfilter (K) dargestellt. Es wurden Differenzdrücke zwischen ca. 20 mbar und mehr als 600 mbar ermittelt.

Aus den Differenzdruck-Unterschieden verschiedener Filter der gleichen Bauform kann der Einfluss von Filtergestaltung und -medienauswahl abgeleitet werden:

Die Kartuschenfilter K1 und K2 haben dieselbe Kartuschengeometrie, sind aber mit verschiedenen Aktivkohlen ausgestattet. Aufgrund von unterschiedlicher Dichte enthält K2 ca. 25 % mehr Aktivkohlemasse als K1. Trotzdem haben bei Filter quasi denselben Druckverlust.

Anders verhält es sich mit den Filtern K2 und K3. Sie enthalten die gleiche AK, allerdings unterschiedliche Mengen, weil die Kartuschengeometrie unterschiedlich ist. K3 enthält ca. 30 % mehr Aktivkohle als K2. Die Druckdifferenz von Filter K3 ist ungefähr fünfmal so groß wie die von Filter K2.

Die sehr hohe Druckdifferenz von Filter Mg4 im Vergleich zu den anderen Filtern mit gewickelten Medien wird auf die Permeabilität des verwendeten Flachfiltermediums zurückgeführt, das bei der Betrachtung mit bloßem Auge deutlich undurchlässiger erscheint als andere Medien.

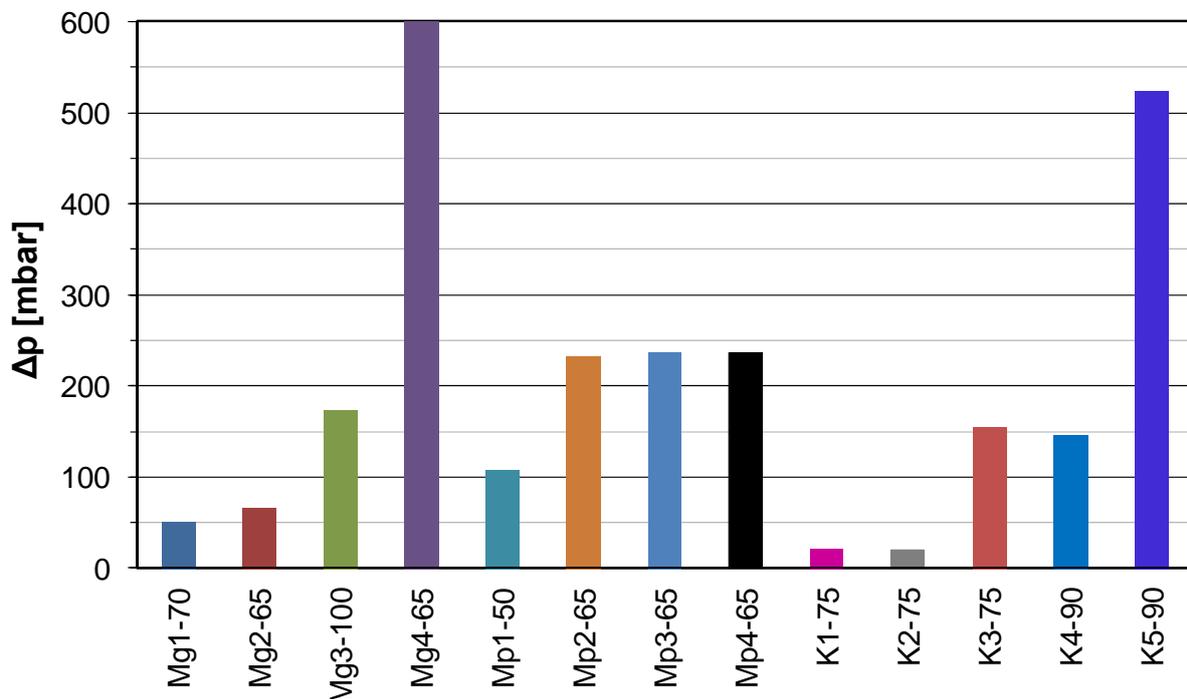
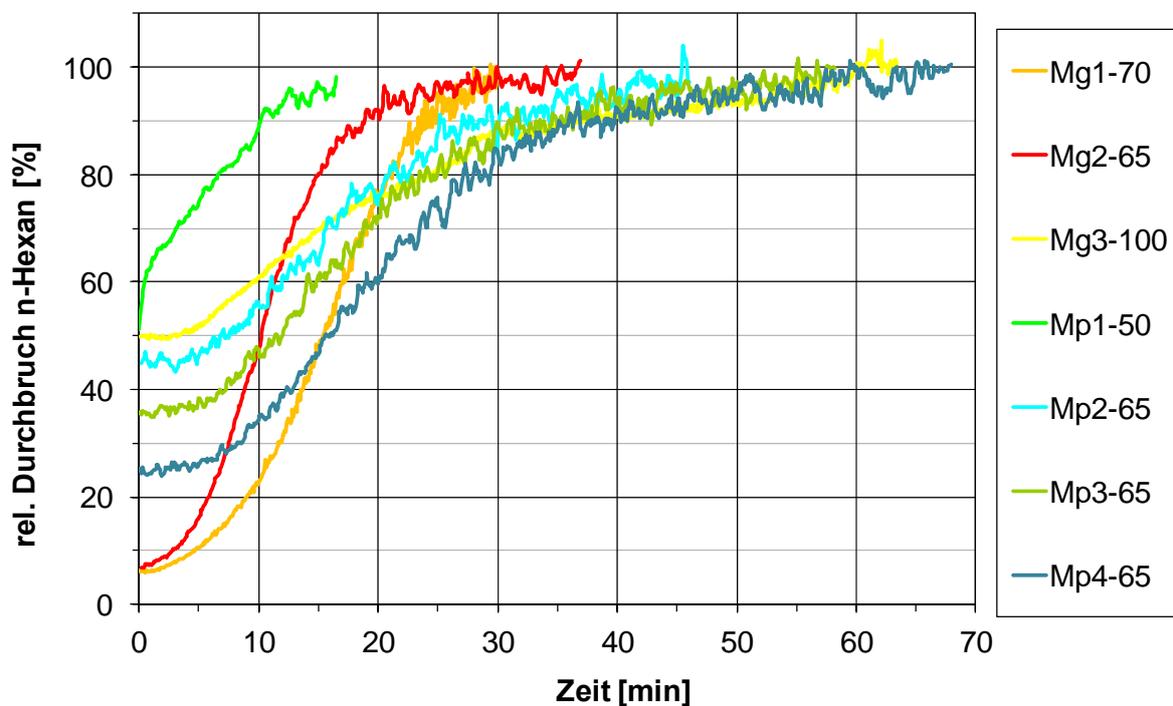


Abbildung 41: Druckdifferenzen verschiedener Druckluftfilter unterschiedlicher Bauart

### 2.3.5 Testergebnisse Druckluftfilter

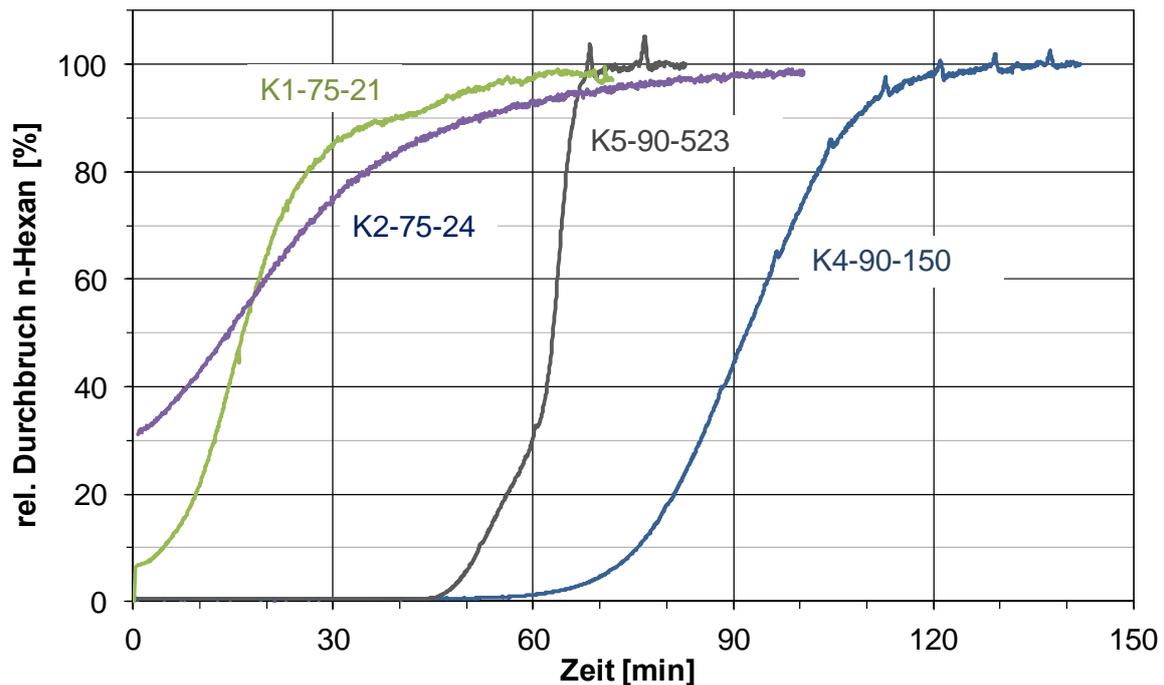
Zur Ermittlung der Abscheideleistung wurden alle Druckluftfilter Durchbruchversuchen mit n-Hexan unterzogen. Die Testgaskonzentration, 100 oder 1000 mg/kg<sub>tr</sub> n-Hexan, wurde gemäß dem unter 2.3.2 beschriebenen Verfahren ausgewählt.

In Abbildung 42 sind die Durchbruchkurven von n-Hexan, die bei einer Testkonzentration von 100 mg/kg an Medienfiltern mit gewickelten und plissierten Medien ermittelt wurden, dargestellt. Bei Filter Mg4 lag bereits zu Versuchsbeginn ein vollständiger Durchbruch vor. Der 80%-Durchbruch der übrigen Filter Mg1 - 3 und Mp1 - 4 erfolgte nach Versuchszeiten von 5 bis 30 Minuten, jedoch überwiegend nach 20 bis 30 Minuten. Die Sofortdurchbrüche der Filter sind, unabhängig davon, ob das Medium gewickelt oder plissiert ist, sehr unterschiedlich, sie liegen zwischen 6 und 53 %. Erneut folgt in der Legende auf die Bezeichnung der einzelnen Filter der Nennvolumenstrom der Filter bei 20 °C und 1 bar in der Einheit m<sup>3</sup>/h.



**Abbildung 42: Durchbruchkurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluft-Medienfilter (100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>,  $\dot{V}_N$ )**

In Abbildung 43 sind die Durchbruchkurven von n-Hexan durch Kartuschenfilter, die mit einer Testkonzentration von 1000 mg/kg an ermittelt wurden, dargestellt. Der 80%-Durchbruch der Kartuschenfilter erfolgte nach Versuchszeiten von 5 bis 30 Minuten. Die Sofortdurchbrüche der Filter sind, unabhängig davon, ob das Medium gewickelt oder plissiert ist, sehr unterschiedlich, sie liegen zwischen 6 und 53 %. Erneut folgt in der Legende auf die Bezeichnung der einzelnen Filter der Nennvolumenstrom der Filter bei 20 °C und 1 bar in der Einheit m<sup>3</sup>/h. Zusätzlich ist nachfolgend der Druckverlust über den Filter in der Einheit mbar angegeben.



**Abbildung 43: Durchbruchkurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluft-Kartuschenfilter (1000 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>,  $\dot{V}_N$ )**

In Abbildung 44 sind die bei den Tests mit 100 mg/kg n-Hexan an Medienfiltern adsorbierten n-Hexan-Massen dargestellt. Sie wurden, wie unter 2.2.3 dargestellt, mit Hilfe von Massenbilanzen berechnet. Der Bezeichnung der einzelnen Filter in der Abbildung folgt der Nennvolumenstrom der Filter bei 20 °C und 1 bar in der Einheit m<sup>3</sup>/h. An den Medienfiltern wurden nur sehr geringe n-Hexan-Massen, unter 3 g, adsorbiert.

Abbildung 45 zeigt in analoger Darstellung wie in Abbildung 44 den Verlauf der adsorbierten Massen während der Tests, die mit einer n-Hexan-Konzentration von 1000 mg/kg an Kartuschenfiltern durchgeführt wurden. In der Legende wird bei der Bezeichnung der einzelnen Filter zusätzlich zum Nennvolumenstrom der Filter bei 20 °C und 1 bar in der Einheit m<sup>3</sup>/h der Druckverlust über den Filter in der Einheit mbar angegeben. Die adsorbierten Massen bei diesen Tests waren deutlich größer als an den Medienfiltern. Das liegt daran, dass die Sorbensmengen der Kartuschenfilter deutlich größer sind und darüber hinaus die Adsorptionskapazitäten von Aktivkohle bei höheren Konzentrationen der abzuscheidenden Komponente in der Gasphase entsprechend des Gleichgewichtsverhaltens größer sind. Die konstanten Werte der adsorbierten Massen jeweils am Ende der Versuche in Abbildung 45 machen deutlich, dass bei diesen Tests ein vollständiger Durchbruch der Filter erreicht wurde und die Sorbensbeladung sich im Gleichgewicht zur Gasphasenkonzentration befinden.

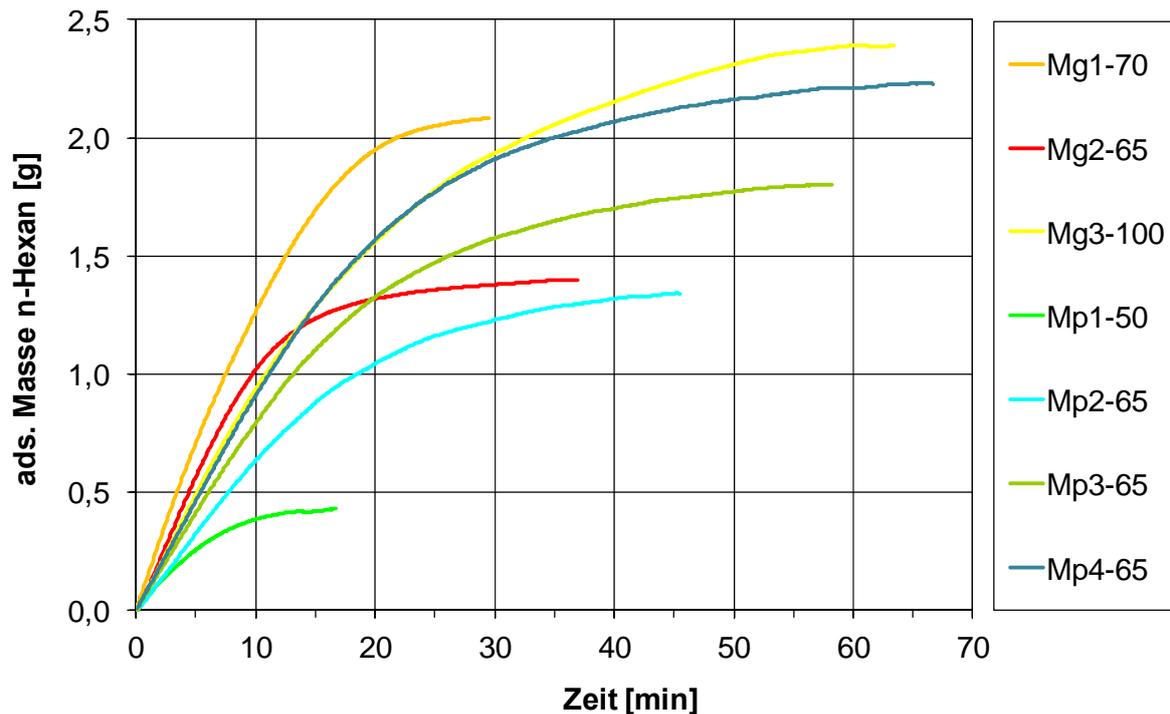


Abbildung 44: Adsorbierte n-Hexan-Massen während der Durchbruchversuche mit verschiedenen Druckluft-Medienfiltern (100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>,  $\dot{V}_N$ )

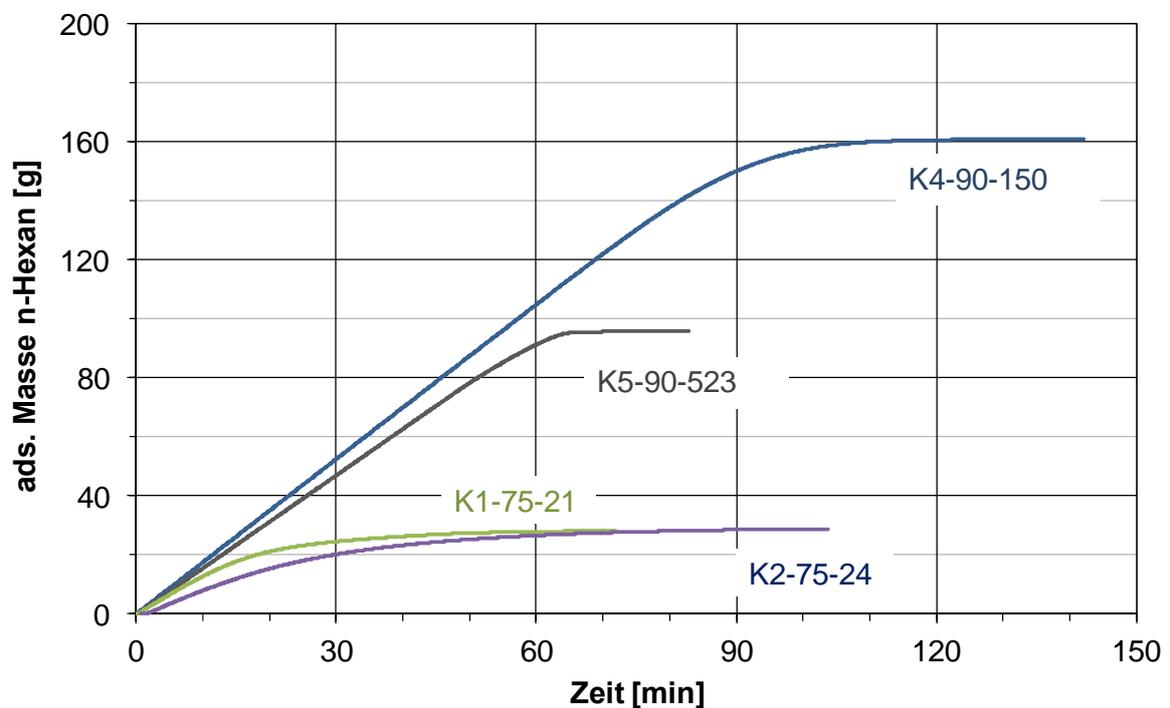
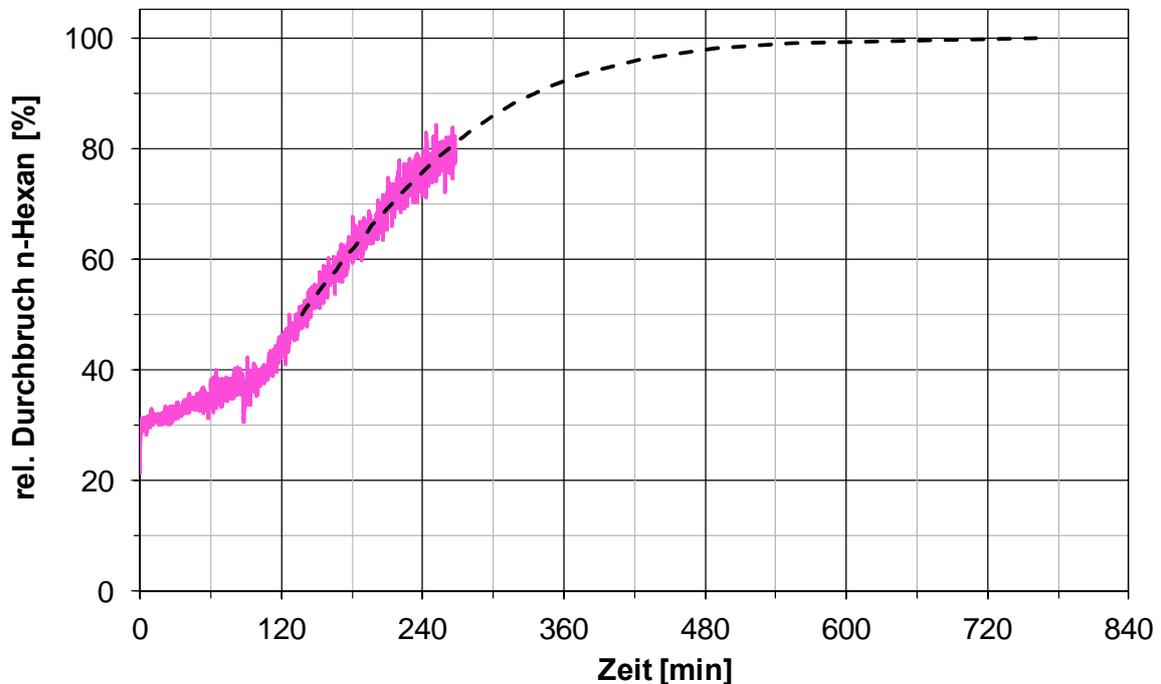


Abbildung 45: Adsorbierte n-Hexan-Massen während der Durchbruchversuche mit verschiedenen Druckluft-Kartuschenfiltern (1000 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>,  $\dot{V}_N$ )

Häufig ist bei Druckluftfiltern die Ermittlung der Gleichgewichtskapazität des Filters bei geringeren Testgaskonzentrationen zeitaufwändig. Deshalb wurde mit den zur Verfügung stehenden Druckluftfiltern eine Untersuchung begonnen, inwieweit die Nutzung der Yoon-Nelson-

Gleichung (siehe Abschnitt 2.2.3) auch zur Berechnung von n-Hexan-Durchbruchskurven über einen Durchbruch von 50 % hinaus möglich ist. Das Ergebnis dieser Studie ist, dass sich s-förmige Durchbruchskurven von n-Hexan mit der Yoon-Nelson-Gleichung zufriedenstellend über den 50-%-Durchbruch hinaus berechnen lassen, siehe beispielsweise Abbildung 46.



**Abbildung 46: Durchbruchskurve von 100 mg/kg n-Hexan durch Filter K2 - Experiment und Berechnung mit Yoon-Nelson-Ansatz (100 mg/kg n-Hexan, 20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>, 75 m<sup>3</sup>/h)**

Auf Basis der experimentell bestimmten oder mit der Yoon-Nelson-Gleichung berechneten Durchbruchskurven wurden die adsorbierten Massen bei Erreichen des Adsorptionsgleichgewichtes und die entsprechenden Gleichgewichtskapazitäten, wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, ermittelt.

Abbildung 47 zeigt die n-Hexan-Gleichgewichtsbeladungen der Sorbentien in den untersuchten Filtern bei einer n-Hexan-Konzentration von 100 mg/kg. Die Filterbezeichnung enthält wie bei Abbildung 45 zusätzlich die Angabe des Nennvolumenstroms und des Druckverlustes. Die Gleichgewichtskapazitäten liegen bei 100 mg/kg n-Hexan in der Gasphase zwischen 8 und 18 %. Für die Kartuschenfilter K2 und K3, die unterschiedliche Mengen derselben Aktivkohle enthalten, wurden auch vergleichbare Gleichgewichtsbeladungen berechnet.

In Abbildung 48 sind die n-Hexan-Gleichgewichtsbeladungen bei n-Hexan-Konzentrationen von 1000 mg/kg dargestellt. Die Filterbezeichnung in der Abbildung ist wie in Abbildung 47. Bei einer Gasphasenkonzentration von 1000 mg/kg n-Hexan sind die erreichten Beladungen höher. Es wurden Werte zwischen 16 und 25 % erreicht. Es ist plausibel, dass die Gleichgewichtsbeladungen von n-Hexan bei zunehmender Gasphasenkonzentration steigen, weil n-Hexan aufgrund von Physisorption abgeschieden wird und an Aktivkohlen normalerweise Adsorptionsisothermen des Typs 1 der Einstufung nach Brunauer et al. 1940 aufweist. Das

bedeutet, dass sich die Isothermenkurve einem Grenzwert annähert, ihn aber auch bei sehr hohen Gasphasenkonzentrationen nicht überschreitet.

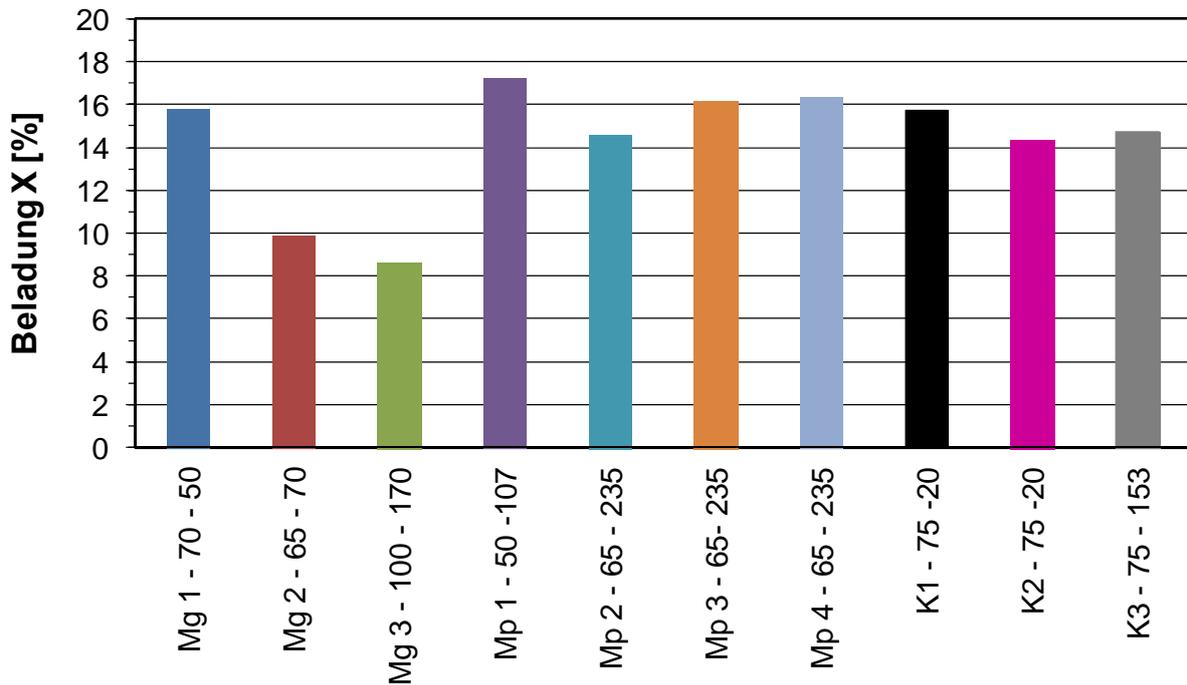


Abbildung 47: Gleichgewichtsbeladung der verschiedenen Druckluftfilter n-Hexan bei einer Belastung mit 100 mg/kg n-Hexan

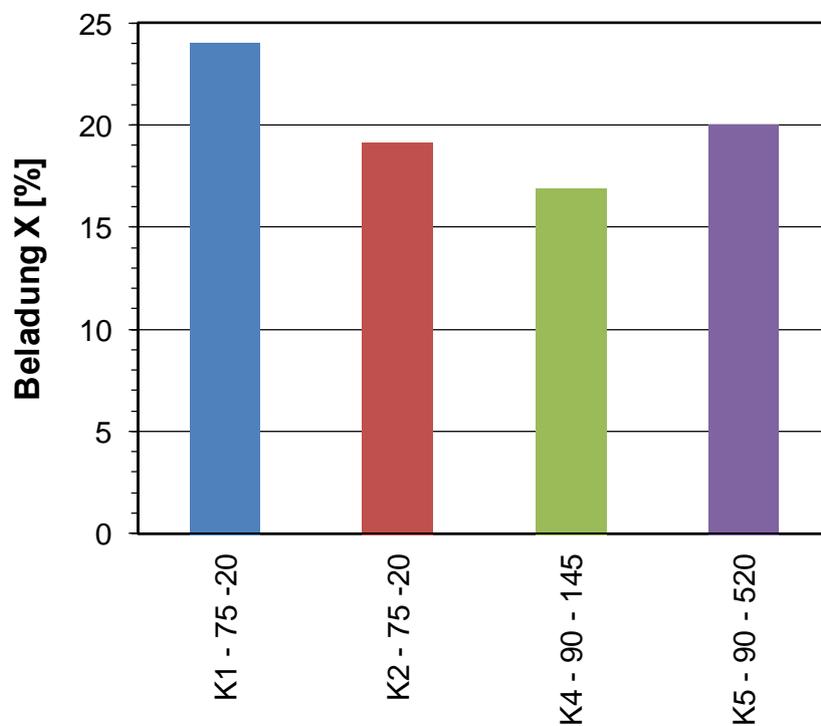


Abbildung 48: Gleichgewichtsbeladung der verschiedenen Druckluftfilter n-Hexan bei einer Belastung mit 1000 mg/kg n-Hexan

## 2.4 AP 3 - Klassifizierung – Kennziffern

Die Grundlage bei der Ermittlung von Kennzahlen  $K$  zur Klassifizierung von Filtern hinsichtlich Abscheideleistung und Energieeffizienz ist es, den Nutzen eines Filters ins Verhältnis zu setzen zu dem hierfür notwendigen Energieaufwand:

$$K = \text{Nutzen/Aufwand.}$$

Bei einem Vergleich von Filtern gilt, dass derjenige mit dem höheren Zahlenwert der Kennziffer  $K$  energieeffizienter ist.

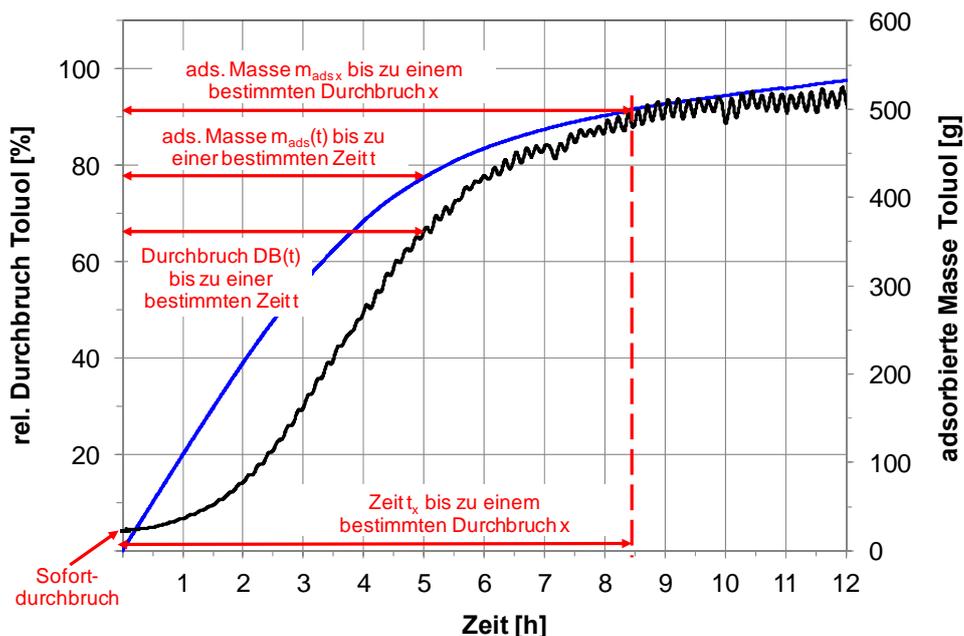
Der Nutzen eines Adsorptionsfilters ist festgelegt durch die Adsorptionsleistung, die u. a. von der Sorbenskapazität abhängt. Die einzelnen Faktoren, die auf die Adsorptionsleistung Einfluss nehmen, werden in dem folgenden Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Es werden Kennziffern  $K_{ads}$  zur Bewertung des Adsorptionsvermögens der beiden Filteranwendungen und der verschiedenen Testsubstanzen abgeleitet.

Der Energieaufwand für einen Filter entsteht durch den Energieverbrauch des Ventilators, der durch den Druckabfall des Filters  $\Delta p$  und den Volumenstrom  $\dot{V}$  bestimmt wird. In Abschnitt 2.4.2 wird dargestellt, wie die absoluten Werte zu Vergleichszwecken in Kennziffern  $K_{en}$  genutzt werden können.

In Abschnitt 2.4.3 wird beschrieben, was zu beachten ist bei der Kombination von  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  zu einer Gesamtkennziffer, die die Energieeffizienz berücksichtigt bei der Beurteilung von Adsorptionsfiltern.

### 2.4.1 Kennziffern zur Beschreibung der Adsorptionsleistung

Faktoren, die die Adsorptionsleistung beschreiben, sind die Standzeit  $t_x$  bis zu einem bestimmten Durchbruch  $DB_x$ , die bis zu diesem Zeitpunkt adsorbierte Masse  $m_{ads,x}$  der abzuscheidenden Substanz und der Sofortdurchbruch  $SFD$ . Zur Beurteilung können aber auch der Durchbruch  $DB(t)$  und die adsorbierte Masse  $m_{ads}(t)$  an einem bestimmten Zeitpunkt herangezogen werden. Abbildung 49 verdeutlicht diese Faktoren anhand einer Durchbruchkurve von Toluol durch einen RLT-Filter der Bauform V-Zelle und der zugehörigen Kurve der adsorbierten Masse in Abhängigkeit von der Versuchszeit.



**Abbildung 49: Leistungsparameter eines Adsorptionsfilters (Durchbruchskurve: schwarz, adsorbierte Masse: blau)**

Während des Projektes wurden verschiedene Ansätze für Kennziffern entwickelt und hinsichtlich Anwendbarkeit und Plausibilität überprüft.

In der ersten Kennziffer  $K_{ads\ 1}$  zur Beschreibung der Adsorptionsleistung wurden maßgeblich die Standzeit  $t_x$  bis zu einem bestimmten Durchbruch  $DB_x$  und die damit einhergehende adsorbierte Masse  $m_{ads\ x}$  der abzuscheidenden Substanz sowie der Sofortdurchbruch  $SFD$  verwendet.

Folgende Überlegungen wurden bei der Ableitung der Formel berücksichtigt. Bei gleicher Testgaskonzentration ist die Stand- oder Durchbruchzeit nicht nur abhängig von der Kapazität und der Sorbensmenge des Filters sondern auch von dem Nennvolumenstrom des Filters. Ein Filter mit einer längeren Durchbruchzeit als ein anderer Filter muss nicht zwangsläufig eine höhere Adsorptionsleistung besitzen, die längere Durchbruchzeit kann auch durch einen geringeren Nennvolumenstrom begründet sein. Die Rückhaltefähigkeit eines Filters wird beschrieben durch den Bezug der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt adsorbierten Masse auf die Masse, die dem Testsystem in dem entsprechenden Zeitraum zugeführt wurde. Diese wird mit Hilfe der Testgaskonzentration, bzw. des Testgasvolumenanteils  $c_{1\ i}$ , des Volumenstroms  $\dot{V}$  und der Zeit  $t_x$  berechnet. Die Filterleistung und der Nutzen werden geschmälert durch einen hohen Sofortdurchbruch  $SFD$ , so dass der  $SFD$  in einem Reduktionsterm zu berücksichtigen ist.

Um eine dimensionslose Kennziffer zur Beschreibung der Adsorptionsleistung zu erhalten, wurde die Referenzdurchbruchzeit  $t_R$  eingeführt. Die Ermittlung von substanz- und anwendungsspezifischen  $t_R$  auf Basis der Versuchsergebnisse wird, genauso wie die Auswahl geeigneter Durchbruchswerte  $x$ , in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Die folgende Formel wurde als erste ermittelt für eine Kennziffer, die die Adsorptionsleistung beschreibt:

$$K_{ads\ 1} = \frac{t_x}{t_R} \cdot \frac{m_{ads\ x}}{(\dot{V} \cdot c_{1\ i} \cdot t_x)} \cdot (1-SFD). \quad (2)$$

In Abschnitt 2.4.1.1 werden die Schwierigkeiten bei der Verwendung der Kennzahl  $K_{ads\ 1}$  anhand des Adsorptionssystems RLT-Filter/Toluol beschrieben.

Die Beschränkungen bei der Anwendung der Kennziffer  $K_{ads\ 1}$  führten zur Ableitung einer weiteren Kennziffer  $K_{ads\ 2}$ , siehe Gleichung 3. Darin wurde der Term mit der auf die Referenzzeit bezogenen Durchbruchzeit ersetzt, durch den Durchbruchwert  $DB(t_V)$  zu einem bestimmten Vergleichszeitpunkt  $t_V$ . Die Bedeutung der Auswahl eines geeigneten Zeitpunktes abhängig von Anwendung und Testsubstanz wird im Folgenden dargestellt. Der Durchbruchwert  $DB(t_V)$  wurde als Reduktionsterm berücksichtigt, d. h. je höher der Durchbruch desto kleiner der Nutzen. Die adsorbierte Masse und die dem System zugeführte Masse werden in Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  auf den Zeitraum  $t_V$  bezogen, als  $m_{ads\ V}$  bezeichnet und mit  $\dot{V} \cdot c_{1\ i} \cdot t_V$  berechnet.

$$K_{ads\ 2} = (1 - DB(t_V)) \cdot \frac{m_{ads\ V}}{(\dot{V} \cdot c_{1\ i} \cdot t_V)} \cdot (1-SFD) \quad (3)$$

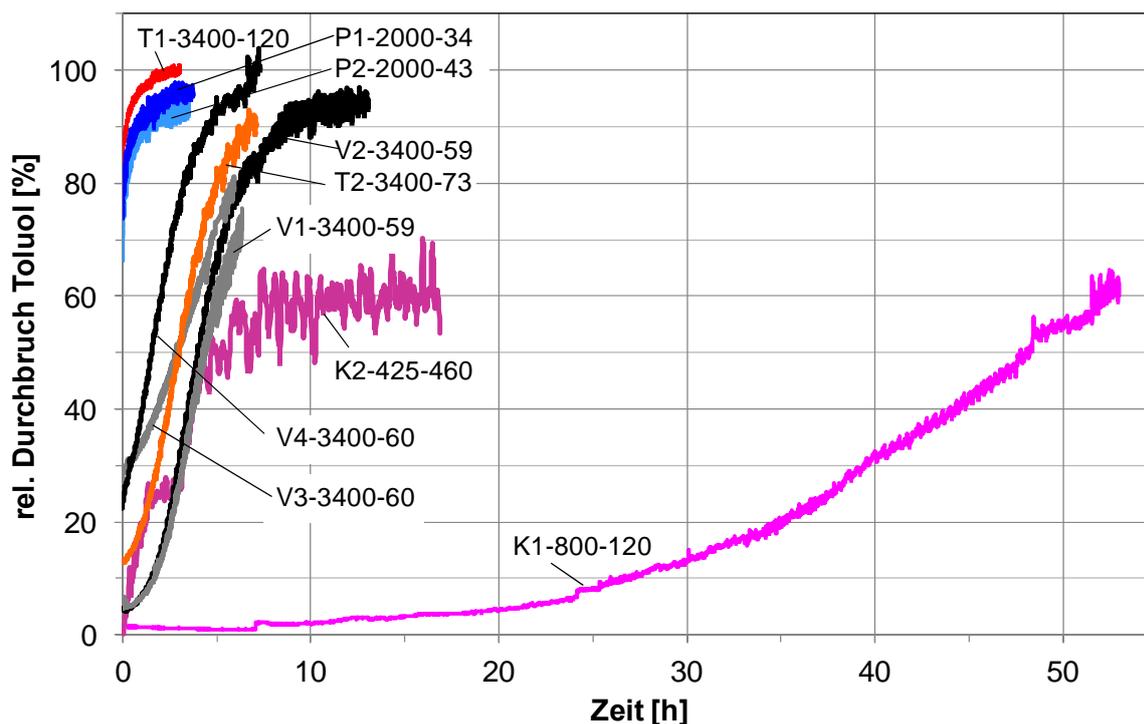
In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Anwendung der Kennziffern  $K_{ads\ 1}$  und  $K_{ads\ 2}$  auf die verschiedenen Adsorptionssysteme beschrieben.

#### 2.4.1.1 RLT-Filter - Adsorption von Toluol

In Abbildung 50 werden die Durchbruchkurven von Toluol durch alle getesteten RLT-Filter bei folgenden Versuchsbedingungen: 23 °C, 50 % relative Feuchte, 9 ppm Toluol, Nennvolumenstrom gezeigt, um erneut einen Eindruck von dem Leistungsspektrum zu vermitteln. In der Abbildung folgt der Bezeichnung des Filters an zweiter Stelle der Nennvolumenstrom in der Einheit m<sup>3</sup>/h und an dritter Stelle die Druckdifferenz des Filters in der Einheit Pa. Bei bloßer Betrachtung der Durchbruchkurven ergibt sich für den Beobachter die folgende Rangfolge des Rückhaltevermögens der Filter:

$$K1 > K2 > V1 > V2 > V3 > T2 > V4 > P2 > P4 > T1.$$

Zusätzlich wird auf Abbildung 12 verwiesen, in der die Durchbruchkurven von Toluol durch RLT-Filter in höherer zeitlicher Auflösung dargestellt sind.



**Abbildung 50: Toluol-Durchbruchkurven von RLT-Filtern ( $c_1 = 9 \text{ ppm}$ ,  $23 \text{ °C}$ ,  $50 \text{ \% r. F.}$ ,  $\dot{V}_N$ )**

Die Kennziffer  $K_{ads\ 1}$  aus Gleichung 2 wurde zunächst an RLT-Filtern der Bauform V-Zelle mit Toluol als Testsubstanz getestet und überprüft. Die V-Zellen boten als Testgruppe den Vorteil, dass sie alle einen Nennvolumenstrom von  $3.400 \text{ m}^3/\text{h}$  und Druckdifferenzen um  $60 \text{ Pa}$  besitzen. Zuerst wurden, auf der Basis der V-Zellen-Durchbruchkurven, ein Vergleichsdurchbruch  $DB_x$  von  $60 \text{ \%}$  und eine Referenzdurchbruchzeit  $t_R$  von  $10 \text{ Stunden}$  festgelegt. Die Referenzdurchbruchzeit wurde ausgewählt, weil der  $60 \text{ \%}$ -Durchbruch in dieser Zeit bei allen V-Zellen erreicht wurde. In Tabelle 3 sind die damit berechneten  $K_{ads\ 1}$ -Werte für die V-Zellen V1 bis V4 dargestellt. Die Rangfolge, die die Kennziffern aufweisen, spiegelt die gleiche Einordnung wieder, die anhand von Abbildung 50 abgeleitet wurde.

**Tabelle 3: Kennziffer  $K_{ads\ 1}$  für RLT-Filter der Bauform V-Zelle und die Testsubstanz Toluol**

RLT-Filter	$K_{ads\ 1}$
V1	0,348
V2	0,328
V3	0,152
V4	0,080

Die Anwendung der Kennziffer  $K_{ads\ 1}$  auf die anderen Bauformen war mit dem zuvor gewählten Parameter  $DB_{60}$  nicht durchgängig möglich, weil z. B. die Panel-Filter schon Sofortdurchbrüche aufwiesen, die oberhalb von  $60 \text{ \%}$  lagen. Es war auch nicht möglich, einen für alle Bauformen praktikablen Vergleichsdurchbruchswert festzulegen. Im Zuge des Projektes wurde der Kartuschenfilter K1 zwar bis zu  $60 \text{ \%}$ -Durchbruch getestet, die hierfür notwendige Versuchszeit lag aber deutlich über  $52 \text{ h}$  und ist für Standardtests nicht praktikabel.

Vor der Nutzung der Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  für Adsorptionssystem RLT-Filter/Toluol musste zunächst eine geeignete Vergleichszeit ermittelt werden. Die Kennziffern wurden zunächst mit

$t_V = 60$  min und anschließend mit  $t_V = 120$  min berechnet. Die Tabelle 4 zeigt die berechneten Kennziffern.

An den Werten in Tabelle 4 ist erkennbar, wie die Vergleichszeit die Kennziffer beeinflusst. Bei doppelt so langem Vergleichszeitraum, nimmt der Kurvenverlauf, d. h. der Durchbruchwert zum Zeitpunkt  $t_V$ , einen größeren Einfluss auf die Kennziffer. Der Einfluss des Reduktionsfaktors, in dem der Sofortdurchbruch berücksichtigt wird, sinkt dagegen. Der Quotient aus adsorbierter Masse und zugeführter Masse bleibt weitgehend erhalten.

**Tabelle 4: Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  für RLT-Filter und die Testsubstanz Toluol und zwei unterschiedliche Vergleichszeiten**

RLT-Filter	$K_{ads\ 2}(60\ \text{min})$	$K_{ads\ 2}(120\ \text{min})$
K1	0,92	0,92
K2	0,74	0,55
V1	0,81	0,75
V2	0,83	0,74
V3	0,31	0,26
V4	0,29	0,17
P1	0,003	0,0013
P2	0,006	0,0224
T1	0,0003	0,0001
T2	0,62	0,56

In Abbildung 51 sind die Werte bei  $t_V = 60$  min und  $t_V = 120$  min in zwei Balkendiagrammen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei längerer Vergleichszeit die Rangfolge zwar fast vollständig erhalten bleibt, aber die Kennziffern etwas stärker differenzierbar sind.

Die Rangfolgen nach  $K_{ads\ 2}(60\ \text{min})$  und  $K_{ads\ 2}(120\ \text{min})$  geben die Leistungsfähigkeit nach den entsprechenden Zeiträumen weitgehend in der Staffelung wieder, die aus Abbildung 50 abgeleitet werden kann. Die zu Beginn des Abschnitts angegebene Rangfolge über die gesamte Versuchszeit wird besser von  $K_{ads\ 2}(120\ \text{min})$  beschrieben.

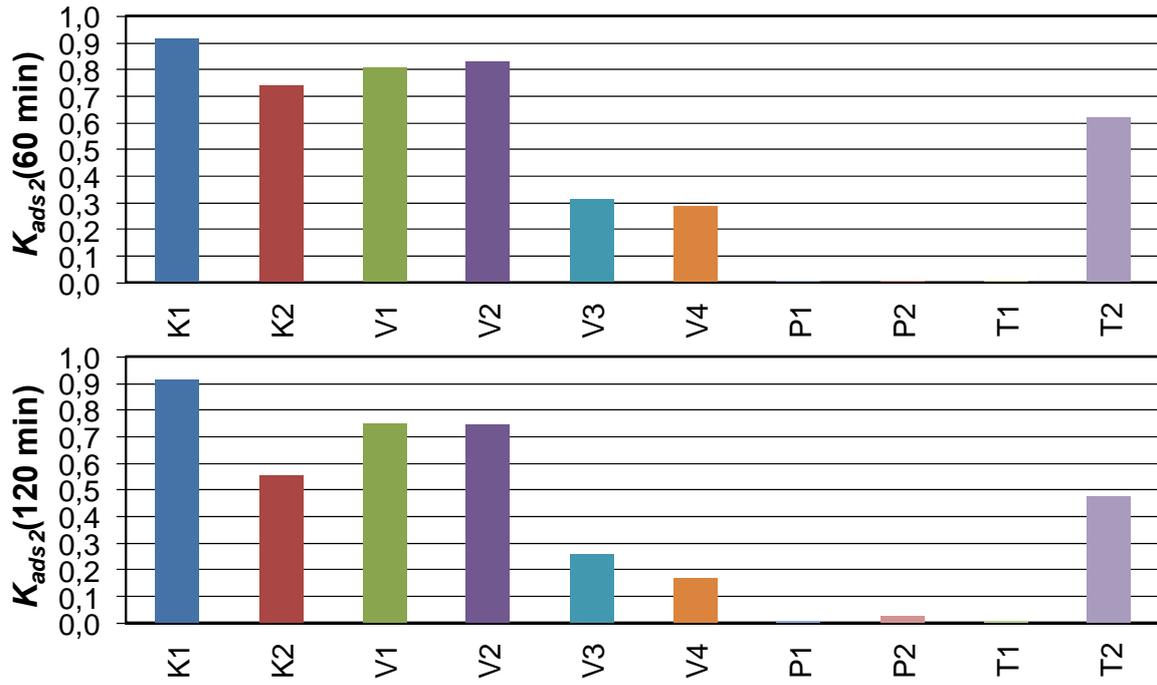


Abbildung 51: Kennziffer  $K_{ads2}$  der verschiedenen RLT-Filter und Toluol als Testsubstanz mit Vergleichzeiten  $t_v$  von 60 und 120 min

### 2.4.1.2 RLT-Filter - Adsorption von Ammoniak

Vor Anwendung der Kennziffern auf das Adsorptionssystem RLT-Filter/Ammoniak sind in Abbildung 52 die Durchbruchkurven von  $\text{NH}_3$  durch alle 9 getesteten RLT-Filter bei 23 °C, 50 % relativer Feuchte, 9 ppm  $\text{NH}_3$  und Nennvolumenstrom dargestellt. In der Abbildung folgt der Bezeichnung des Filters an zweiter Stelle der Nennvolumenstrom in der Einheit  $\text{m}^3/\text{h}$  und an dritter Stelle die Druckdifferenz des Filters in der Einheit Pa. Wie bereits in Abschnitt 2.2.5 dargestellt, haben Filter, die lediglich unbehandelte Aktivkohle enthalten, nur vernachlässigbare Adsorptionskapazitäten für Ammoniak. Bei den untersuchten Filtern waren die Filter V2, V3, K1, T1 und T2 mit nicht modifizierter Aktivkohle ausgerüstet.

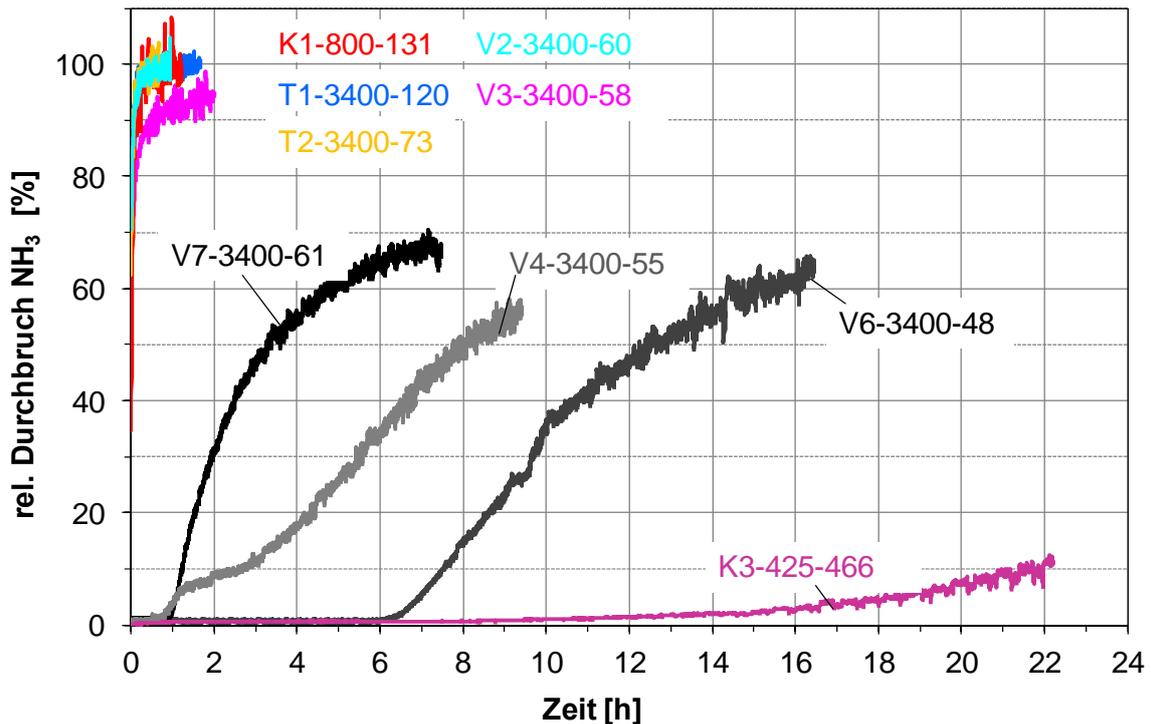


Abbildung 52:  $\text{NH}_3$ -Durchbruchskurven von RLT-Filtern (9 ppm  $\text{NH}_3$ , 23 °C, 50 % r. F.,  $\dot{V}_N$ )

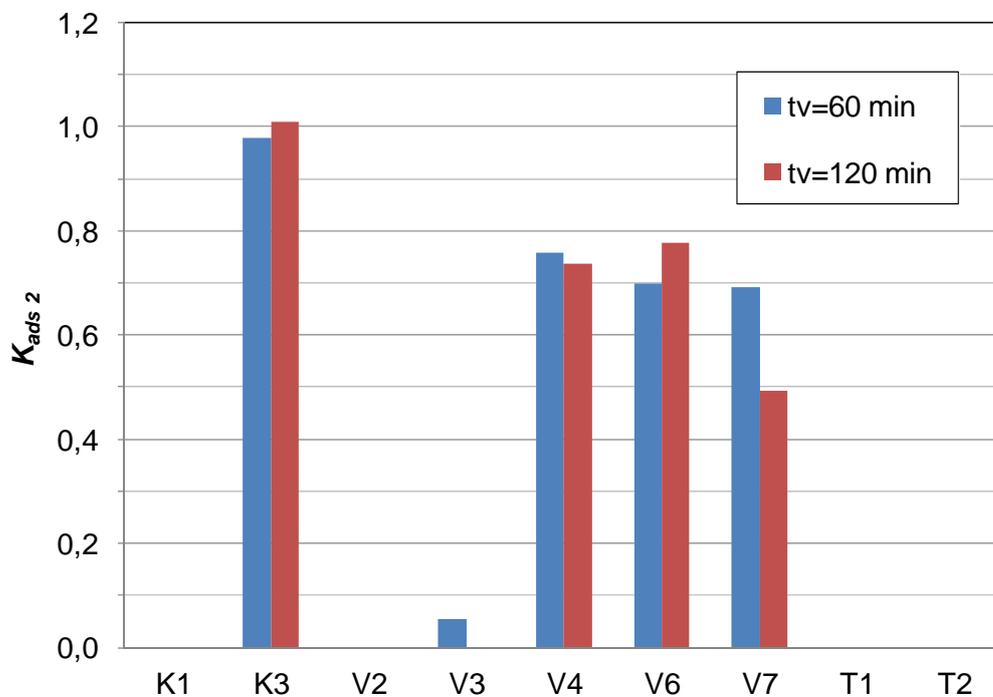
Die Anwendung von  $K_{ads\ 1}$  auf das Adsorptionssystem RLT-Filter/ $\text{NH}_3$  wurde unterlassen, weil kein geeigneter Wert für  $DB_x$  festlegbar war. Bei den Taschenfiltern und der V-Zelle V2 war der Sofortdurchbruch höher als 60 % und bei dem Kartuschenfilter K3 betrug der Durchbruch auch nach 22 Stunden Versuchszeit erst ca. 10 %.

Für das Adsorptionssystem RLT-Filter/Ammoniak wurde die Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  auch mit den Vergleichszeiten  $t_V = 60$  min und  $t_V = 120$  min verwendet. In Tabelle 5 sind die berechneten Werte dargestellt. Bei allen Filtern, die in dem betreffenden Zeitraum bei einer Beaufschlagung mit Nennvolumenstrom einen vollständigen Ammoniak-Durchbruch aufweisen, ist der Kennzifferwert Null. Eine weitere Differenzierung der Adsorptionsleistung wird als nicht erforderlich angesehen, da diese Filter als nicht geeignet zur Abscheidung von Ammoniak angesehen werden. Bei den Filtern, die für die Ammoniakabscheidung geeignet sind, entspricht die Rangfolge der Kennziffern  $K_{ads\ 2}(60\ \text{min})$  für V4 und V6 nicht der scheinbar plausiblen Rangfolge, die Abbildung 52 zu entnehmen ist. Ursache hierfür sind Unterschiede im Sofortdurchbruch und den mittleren Rohgaskonzentrationen, die zwischen 7,7 und 11,5 ppm lagen.

In Abbildung 53 sind die  $K_{ads\ 2}$ -Werte der untersuchten RLT-Filter bei  $t_V = 60$  min und  $t_V = 120$  min in einem Balkendiagramm dargestellt. Die Kennziffern, die mit einer Vergleichszeit von 120 min berechnet wurden, geben die Rangordnung bei der Leistungsfähigkeit besser wieder als die, die mit einer Vergleichszeit von 60 min berechnet wurden. Die aus Abbildung 52 ersichtliche Staffelung des Leistungsvermögens wird aber auch durch die Zahlenwerte, die mit 120 min berechnet wurden, nicht abgebildet. Längere Vergleichszeiten wurden dennoch nicht in Betracht gezogen, um die Versuchszeiten im praktikablen Rahmen zu halten.

**Tabelle 5: Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  für RLT-Filter und die Testsubstanz  $NH_3$  und zwei unterschiedliche Vergleichszeiten**

RLT-Filter	$K_{ads\ 2}(60\ min)$	$K_{ads\ 2}(120\ min)$
K1	0,00	0,00
K3	0,98	1,01
V2	0,00	0,00
V3	0,05	0,00
V4	0,76	0,74
V6	0,70	0,78
V7	0,69	0,49
T1	0,00	0,00
T2	0,00	0,00



**Abbildung 53: Kennziffer  $K_{ads\ 2}$  der verschiedenen RLT-Filter und  $NH_3$  als Testsubstanz mit Vergleichszeiten  $t_V$  von 60 und 120 min**

### 2.4.1.3 RLT-Filter - Adsorption von Schwefeldioxid

Neun verschiedene RLT-Filter wurden mit Schwefeldioxid getestet. Die Durchbruchkurven sind in Abbildung 54 dargestellt. In Abbildung 18 und Abbildung 19 wurden sie bereits in höherer zeitlicher Auflösung gezeigt. Die Durchbruchkurven von  $\text{SO}_2$  weisen, wie bereits in Abschnitt 2.2.4 eingehender erläutert, einen besonderen Kurvenverlauf auf. Sie erreichen bei dem verwendeten Testgasvolumenanteil von 9 ppm innerhalb praktikabler Versuchszeiten keinen vollständigen Durchbruch, sondern es werden nahezu konstante Durchbruchsniveaus unterhalb von 100 % erreicht.

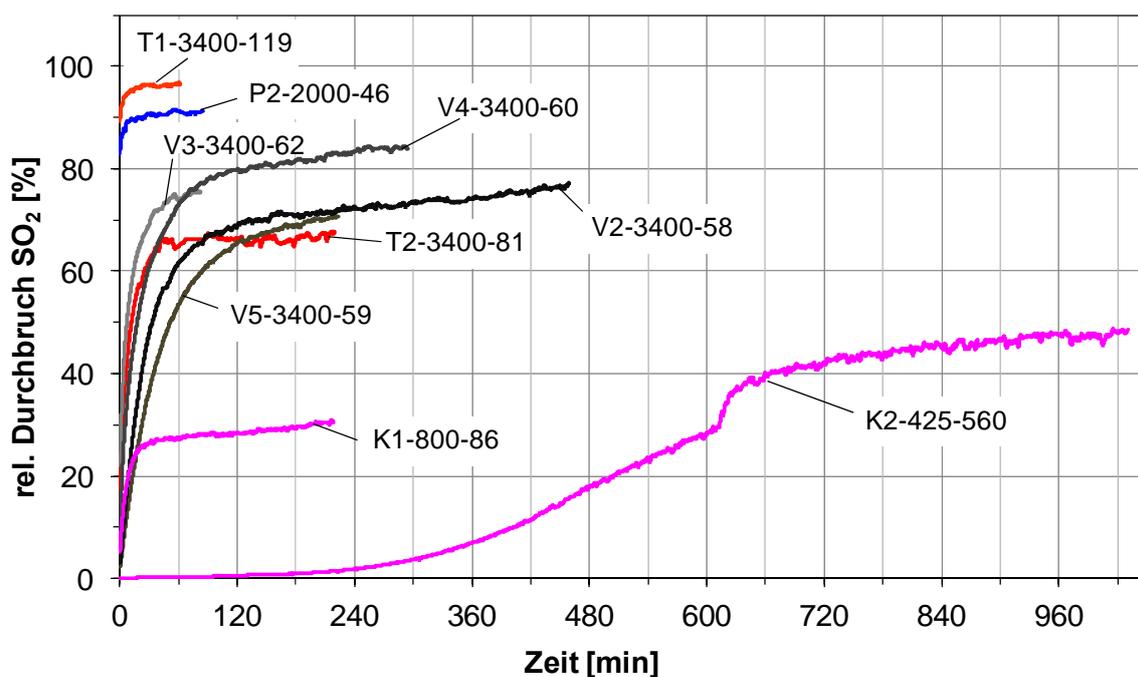


Abbildung 54:  $\text{SO}_2$ -Durchbruchkurven von RLT-Filtern (9 ppm  $\text{SO}_2$ , 23 °C, 50 % r. F.,  $\dot{V}_N$ )

Die Anwendung von  $K_{ads,1}$  wurde auch bei dem Adsorptionssystem RLT-Filter/ $\text{SO}_2$  dadurch eingeschränkt, dass es unmöglich war, bauformübergreifend einen geeigneten Wert für  $DB_x$  festzulegen. Bei dem Taschenfilter T1 oder dem Panelfilter P2 war der Sofortdurchbruch höher als 60 %, und bei dem Kartuschenfilter K2 betrug der Durchbruch auch nach 17 Stunden Versuchszeit weniger als 50 %. Bei einer Beschränkung auf die Bauform V-Zelle, einem Vergleichsdurchbruch  $DB_x$  von 60 % und einer Referenzdurchbruchzeit  $t_R$  von 1000 Minuten folgten die Zahlenwerte der augenscheinliche Rangfolge der Adsorptionsleistung nach Abbildung 54.

In Tabelle 6 sind die mit Vergleichszeiten von  $t_V = 60$  min und  $t_V = 120$  min ermittelten Werte der Kennziffer  $K_{ads,2}$  von den untersuchten RLT-Filtern angegeben. Bei Filtern mit kürzerer Versuchszeit als 120 Minuten wurden die Durchbruchkurven entsprechend extrapoliert. Die Werte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit mit dem Faktor 100 multipliziert.

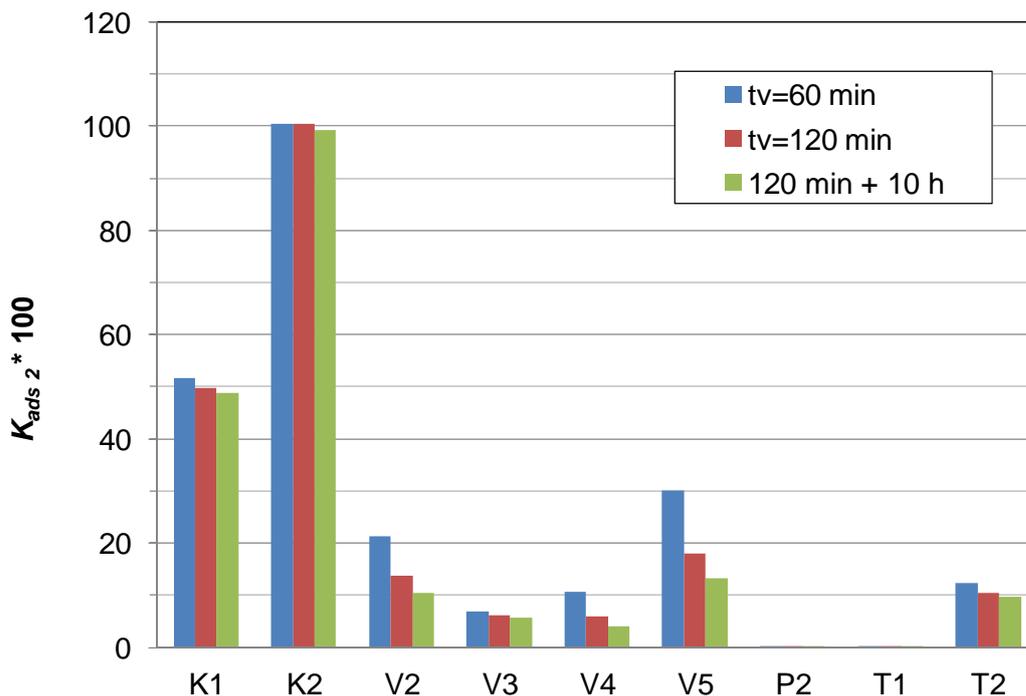
Zusätzlich wurde überprüft, inwieweit und mit welchem Resultat sich die Berücksichtigung einer längeren betrachteten Zeitspanne, nämlich 10 Stunden, bei der Berechnung des Verhältnisses von adsorbierter zu zudosierter Masse auswirkt. Die zudosierte Masse wurde dazu wie zuvor mit Hilfe der Konzentration und des Volumenstroms für einen Zeitraum von 10 Stunden berechnet. Der adsorbierten Masse nach zwei Stunden Versuchszeit wurde für ei-

nen Zeitraum von weiteren 8 Stunden ein konstanter Zuwachs von dem bei 2 Stunden vorliegenden Wert hinzugerechnet. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 6 als  $K_{ads\ 2}(120\ \text{min}, m_{ads}(10\ \text{h}))$  angegeben.

In Abbildung 55 sind die verschiedenen  $K_{ads\ 2}$ -Werte der untersuchten RLT-Filter wie in den vorherigen Abschnitten in einem Säulendiagramm dargestellt. Es ist ersichtlich, dass alle Kennziffern nachvollziehbare Werte und sehr ähnliche Rangordnungen liefern.

**Tabelle 6: Kennziffern  $K_{ads\ 2}$  für RLT-Filter und die Testsubstanz  $\text{SO}_2$  und unterschiedliche Vergleichszeiten**

RLT-Filter	$K_{ads\ 2}(60\ \text{min}) \cdot 100$	$K_{ads\ 2}(120\ \text{min}) \cdot 100$	$K_{ads\ 2}(120\ \text{min}, m_{ads}(10\ \text{h})) \cdot 100$
K1	51,54	49,81	48,83
K2	100,47	100,41	99,16
V2	21,34	13,86	10,45
V3	6,97	6,13	5,60
V4	10,65	5,96	4,08
V5	30,16	18,11	13,20
P2	0,15	0,14	0,13
T1	0,01	0,01	0,01
T2	12,38	10,50	9,74



**Abbildung 55: Kennziffern  $K_{ads\ 2}$  für RLT-Filter und die Testsubstanz  $\text{SO}_2$  und unterschiedliche Vergleichszeiten**

#### 2.4.1.4 Druckluftfilter - Adsorption von n-Hexan

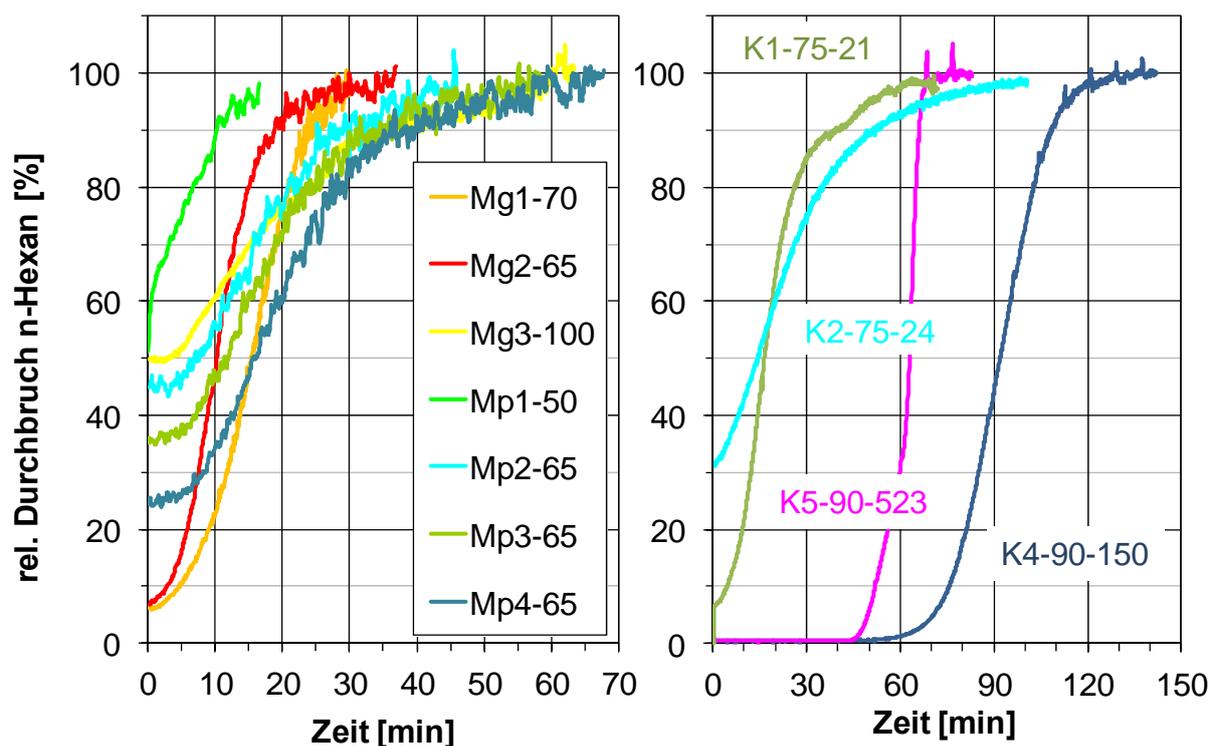
Abbildung 56 gibt einen Überblick über die Durchbruchkurven von n-Hexan der untersuchten Druckluftfilter. Die Filter im linken Diagramm wurden mit einer Testkonzentration von 100 mg/kg, die im rechten Diagramm mit 1000 mg/kg n-Hexan getestet. Erneut folgt in der Legende auf die Bezeichnung der einzelnen Filter der Nennvolumenstrom der Filter bei 20 °C und 1 bar in der Einheit m<sup>3</sup>/h. Das Ablesen der Rangfolgen bezüglich der Adsorptionsleistung aus den Durchbruchkurven gestaltet sich schwierig. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Werte des Sofortdurchbruchs mit der Folge, dass sich die Durchbruchkurven schneiden. Je nachdem wie stark der Sofortdurchbruch gewichtet wird, können sich unterschiedliche Rangordnungen ergeben. Unabhängig davon lassen sich die folgenden zwei Rangordnungen ablesen:

Mg1 > Mg2 > Mp1 und

Mp4 > Mp3 > Mp2 ≈ Mg3 > Mp1.

Bei Kartuschenfiltern ist die Rangfolge eindeutiger erkennbar:

K4 > K5 > K1 > K2.



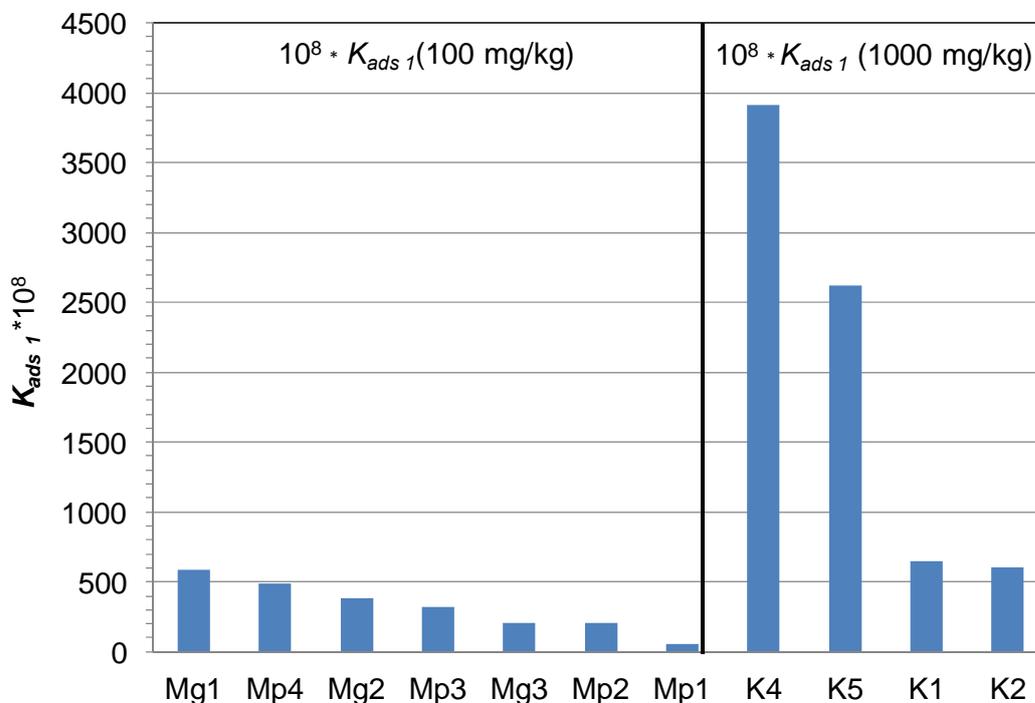
**Abbildung 56: Durchbruchkurven von n-Hexan durch verschiedene Druckluftfilter (20 °C, 7 bar<sub>ü</sub>,  $\dot{V}_N$ , links: 100 mg/kg n-Hexan, rechts: 1000 mg/kg n-Hexan)**

Da die Evaluierung der bestehenden ISO 12500-2 als Optimierungsvorschlag ergeben hat, die Prüfung mit einer n-Hexan-Konzentration durchzuführen, bei der der 80-%-Durchbruch innerhalb von praktikablen Versuchszeiten erreicht wird, erschien es für das Adsorptionssystem Druckluftfilter/n-Hexan als sinnvoll, die Kennziffer  $K_{ads1}$  zu verwenden. Wegen der Bedeutung des 80-%-Durchbruchs bei Prüfungen von Druckluftfiltern wurde als Vergleichsdurchbruch ein Wert von 80 % ausgewählt. Als Referenzzeit wurden 5 Stunden festgelegt.

Die Kennziffern  $K_{ads\ 1}$  der mit 100 oder 1000 mg/kg n-Hexan getesteten Filter werden durch den Zusatz 100 oder 1000 gekennzeichnet. In Tabelle 7 sind die ermittelten Kennziffern aufgeführt. Der besseren Übersichtlichkeit halber wurden sie mit dem Faktor  $10^8$  multipliziert. In Abbildung 57 werden die ebenfalls mit dem Faktor  $10^8$  multipliziert Kennziffern in einem Säulendiagramm dargestellt. Die Filter sind auf der x-Achse gemäß der zu Beginn des Abschnitts aus Abbildung 56 abgeleiteten Rangfolge sortiert. Dadurch wird verdeutlicht, dass die Werte der Kennzahlen diese Ordnung wiedergeben.

**Tabelle 7: Kennziffern  $K_{ads\ 1}$  für Druckluftfilter und die Testsubstanz n-Hexan**

Druckluft-Filter	$K_{ads\ 1}(100) \cdot 10^8$	$K_{ads\ 1}(1000) \cdot 10^8$
Mg1	582	
Mg2	381	
Mg3	204	
Mp1	55	
Mp2	204	
Mp3	317	
Mp4	486	
K1		651
K2		606
K4		3914
K5		2621



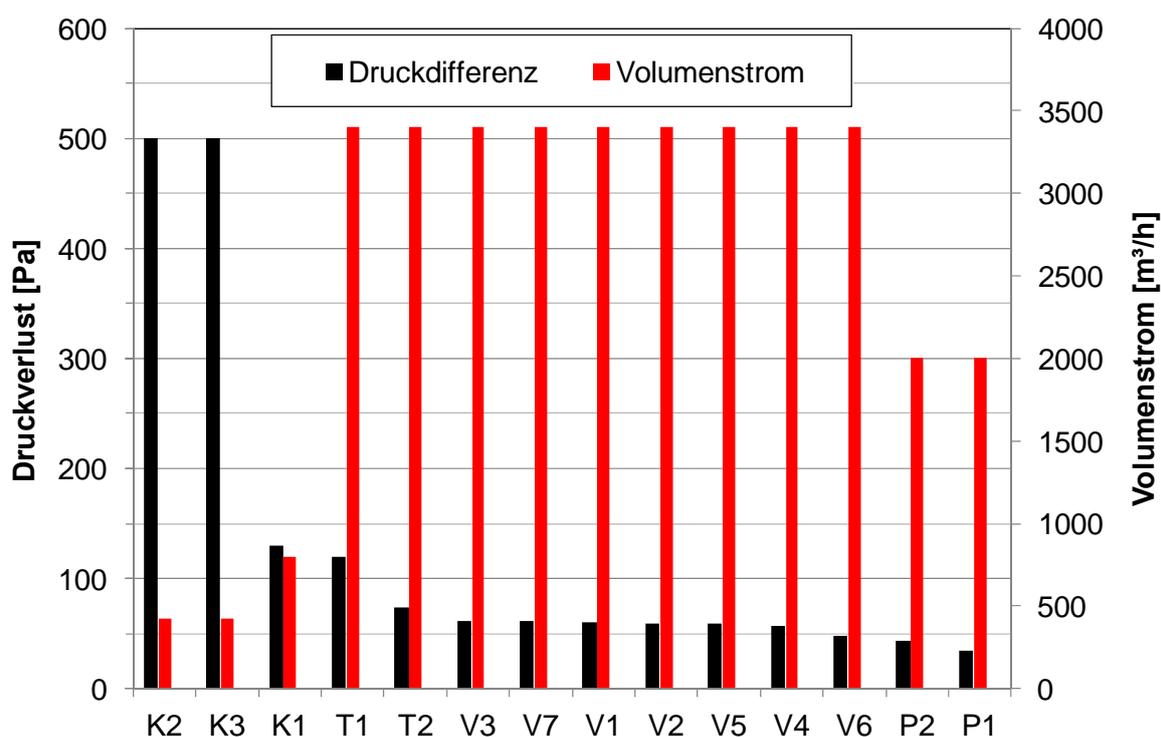
**Abbildung 57: Kennziffern  $K_{ads\ 1}$  für Druckluftfilter und die Testsubstanz n-Hexan**

## 2.4.2 Kennziffern zur Beschreibung des Energieaufwandes

Durch die Nutzung eines Filters in einem Luftkanal entsteht ein erhöhter Energieverbrauch des Ventilators. Dieser Mehraufwand wird durch die Druckdifferenz des Filters  $\Delta p$  und den Volumenstrom  $\dot{V}$  im Luftkanal bestimmt. Während des Projektes wurden verschiedene Ansätze für Kennziffern  $K_{en}$  zur Beschreibung des Energieaufwandes, den die Filter verursachen, entwickelt. Wie zuvor die Kennziffern  $K_{ads}$  wurden auch die Kennziffern  $K_{en}$  hinsichtlich Anwendbarkeit und Plausibilität überprüft. Für die Kennziffern zur Beschreibung des Energieaufwandes gilt, dass hier besonders geringe Werte angestrebt werden. Die Ergebnisse werden für die Anwendung auf RLT- und Druckluftfilter nacheinander dargestellt. Begonnen wird mit den Kennziffern für RLT-Filter.

### RLT-Filter

Vorab werden die für den Energieverbrauch relevanten Eigenschaften Druckdifferenz und Volumenstrom der untersuchten RLT-Filter in Abbildung 58 dargestellt. Die Filter sind von links nach rechts nach absteigender Druckdifferenz sortiert. Festzustellen ist, dass die Kartuschenfilter die höchsten Druckdifferenzen aufwiesen, gefolgt von den Taschenfiltern und V-Zellen. Die Panelfilter verursachten bei Nennvolumenstrom den geringsten Druckverlust.



**Abbildung 58: Druckdifferenz und Volumenstrom der untersuchten RLT-Filter**

Kartuschenfilter weisen zwar in der Regel höhere Druckdifferenzen als andere Filter auf, sie werden jedoch häufig auch mit geringeren Volumenströmen als Filter anderer Bauform betrieben. Daher kann das Produkt aus Druckdifferenz und Volumenstrom von Kartuschenfiltern durchaus vergleichbar sein mit dem von Filtern eines anderen Typs. Zur Verdeutlichung werden in Abbildung 59 die Leistungsbedarfe der verschiedenen untersuch-

ten RLT-Filter dargestellt. Der Wert des Produktes aus Druckdifferenz  $\Delta p$  und Volumenstrom  $\dot{V}$  entspricht, sofern der Ventilatorwirkungsgrad vernachlässigt wird, dem zusätzlichen Leistungsbedarf des Ventilators durch die Verwendung des Filters. Da dieser Wert den Filter hinsichtlich des Leistungsbedarfs geeignet charakterisiert, wurde das Produkt aus Druckdifferenz und Volumenstrom im Ansatz für die Kennziffer  $K_{en1}$  verwendet. Zur Entdimensionierung wurde der Wert des Produktes auf einen willkürlich gewählten Referenzleistungsbedarf  $P_R$  von 1 W bezogen. Die Kennziffer  $K_{en1}$  wird berechnet mit

$$K_{en1} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{P_R} \quad (4)$$

Die Kennziffer  $K_{en1}$  entspricht dem Zahlenwert des Produktes aus Druckdifferenz und Volumenstrom und wird somit auch in Abbildung 59 abgebildet.

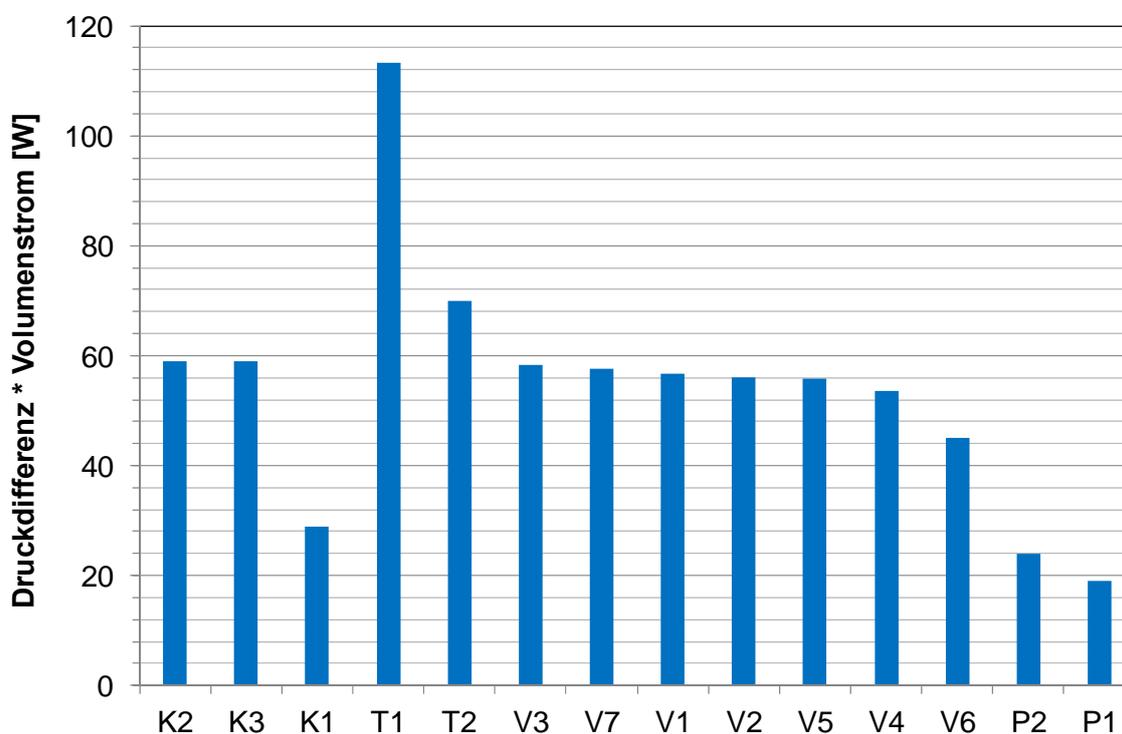


Abbildung 59: Leistungsbedarf aufgrund von RLT-Filtern - Kennziffer  $K_{en1}$  der untersuchten RLT-Filter

Als weiterer Ansatz für eine Kennziffer  $K_{en2}$  wurde getestet, das Produkt aus Druckdifferenz  $\Delta p$  und Volumenstrom  $\dot{V}$  zur Entdimensionierung auf die kinetische Energie des Luftstroms in einem freien Strömungsquerschnitt vor dem Filter zu beziehen. Die kinetische Energie wurde hierzu mit Hilfe des Luftmassenstroms  $\dot{m}_L$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  berechnet, so dass sich folgende Gleichung ergab:

$$K_{en2} = \frac{\Delta p \cdot \dot{V}}{\frac{\dot{m}_L \cdot v}{2}} \quad (5)$$

Die Berechnung des Luftmassenstroms  $\dot{m}_L$  erfolgte mit der Dichte von Luft und dem Volumenstrom  $\dot{V}$ . Die Strömungsgeschwindigkeit wurde durch Bezug des Volumenstroms  $\dot{V}$  auf

einen ausgewählten Querschnitt berechnet. Es wurde eine Querschnittsfläche von 0,6 m x 0,6 m verwendet. Die Werte von  $K_{en,2}$  sind in Abbildung 60 mit logarithmischer Achseneinteilung dargestellt. Die Kennziffer  $K_{en,2}$  nimmt bei kleineren Volumenströmen hohe Zahlenwerte an, weil sich in der Kennzifferformel der Volumenstrom nach Kürzungen im Nenner wiederfindet. Dadurch spiegelt die Kennziffer nicht den tatsächlichen Leistungsbedarf durch die Filter wieder. Aus diesem Grund wurde von der weiteren Verwendung von  $K_{en,2}$  abgesehen.

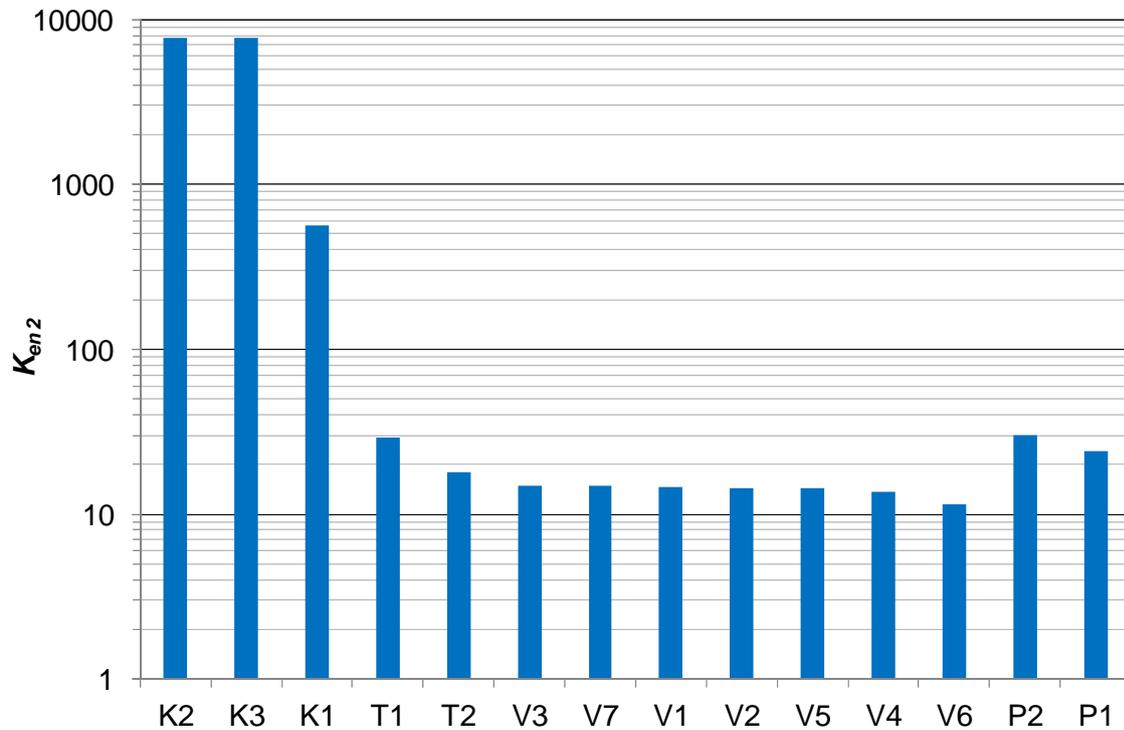


Abbildung 60: Kennziffer  $K_{en,2}$  der untersuchten RLT-Filter

## Druckluftfilter

In Abbildung 61 sind die Druckdifferenzen und die Nennvolumenströme der getesteten Druckluftfilter abgebildet. Die Darstellungsweise entspricht der in Abbildung 58 für RLT-Filter. Abgesehen davon, dass die Druckdifferenzen bei Druckluftfiltern höher sind als bei RLT-Filtern, im Bereich von bis zu mehreren hundert Millibar, treten bei Filtern aller Bauformen und Nennvolumenströme zum Teil hohe Druckdifferenzen auf. Abbildung 62 zeigt, wie sich das auf die Kennziffer  $K_{en1}$  für die untersuchten Druckluftfilter auswirkt. Es ergibt sich eine nachvollziehbare Reihenfolge der Kennziffern  $K_{en1}$  der Druckluftfilter.

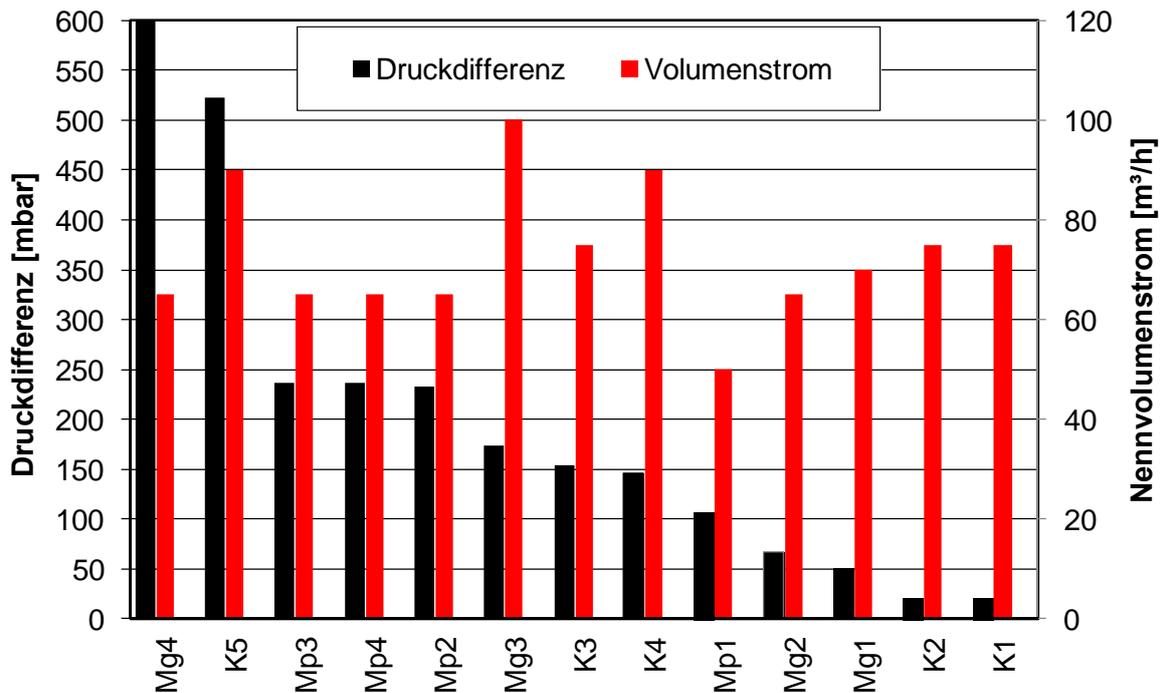


Abbildung 61: Druckdifferenz und Volumenstrom der untersuchten Druckluftfilter

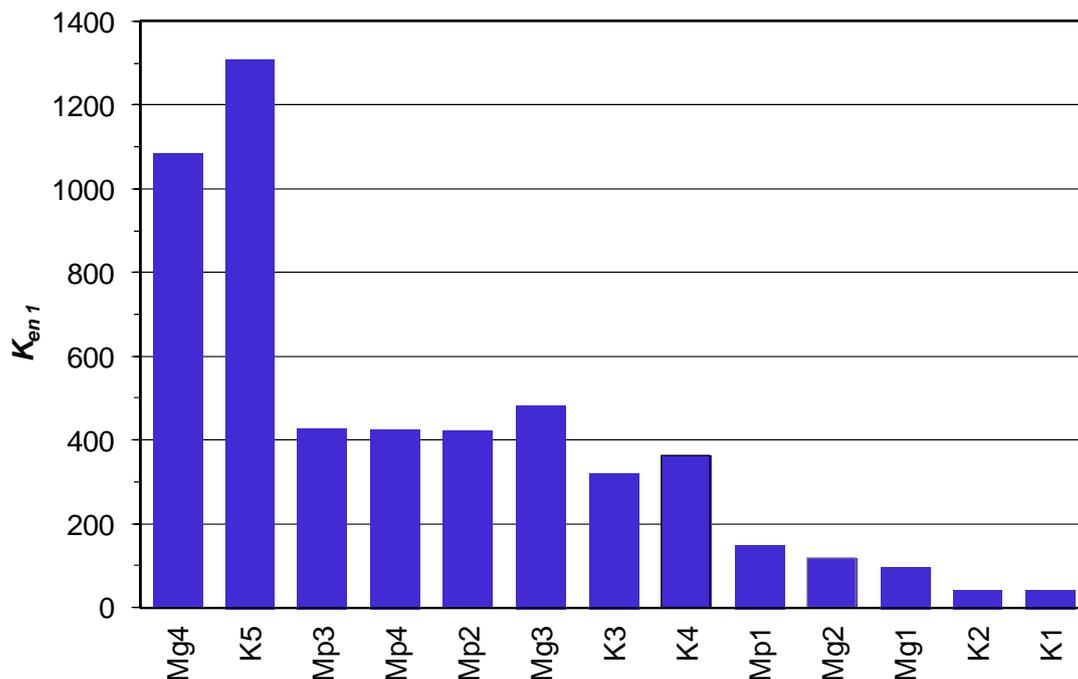


Abbildung 62: Kennziffer  $K_{en1}$  der untersuchten Druckluftfilter

### 2.4.3 Gesamtkennziffern „Energieeffizienz bei der Adsorption“

Das Ziel war es Gesamtkennziffern abzuleiten, die die Adsorptionsleistung von RLT- und Druckluftfiltern im Hinblick auf den Energiebedarf beim Einsatz dieser Filter charakterisieren. Dazu wurden die für das spezifische Adsorptionssystem jeweils am besten geeigneten Kennziffern  $K_{ads}$  auf die spezifischen Kennziffern für den Energiebedarf  $K_{en}$  bezogen. Damit die Gesamtkennziffern einen für den Vergleich einfach handhabbaren Zahlenwert annehmen, war es notwendig,  $K_{ads}$  mit einem Faktor  $10^n$  zu multiplizieren. Nachfolgend wird für RLT- und Druckluftfilter angegeben, welche Kennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  und welche Multiplikatoren verwendet wurden.

#### RLT-Filter

Für RLT-Filter hatten sich für alle drei Testsubstanzen, Toluol, Ammoniak und Schwefeldioxid die Kennziffern  $K_{ads,2}$  (120 min) und  $K_{en,1}$  zur Charakterisierung des Adsorptionsverhaltens und des Leistungsbedarfes qualifiziert. Um leicht zu erfassende Gesamtkennziffern zu erhalten, war es notwendig, die Werte von  $K_{ads,2}$  (120 min) mit dem Faktor  $10^3$  zu multiplizieren, so dass sich für die Gesamtkennziffer von RLT-Filtern folgende Formel ergab:

$$K_{ges} = \frac{10^3 \cdot K_{ads,2}(120 \text{ min})}{K_{en,1}} \quad (6)$$

Abbildung 63 zeigt für das Adsorptionssystem RLT-Filter/Toluol im oberen Säulendiagramm die Gesamtkennziffern der verschiedenen mit Toluol getesteten RLT-Filter. Die Filter wurden in dem Diagramm von links nach rechts nach abnehmender Gesamtkennziffer angeordnet. In dem unteren Säulendiagramm werden die zugehörigen Teilkennziffern der RLT-Filter dargestellt. Die Gesamtkennziffern spiegeln das Verhältnis von Adsorptionsleistung und Leistungsbedarf nachvollziehbar und plausibel wieder.

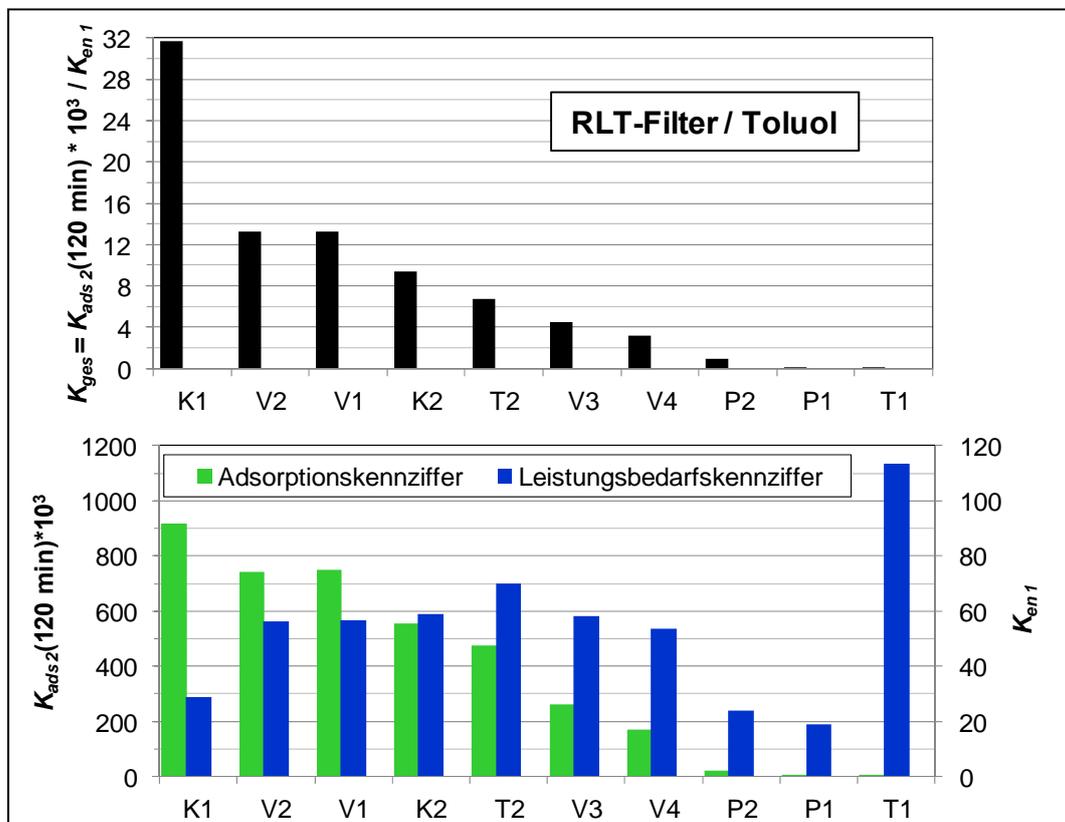
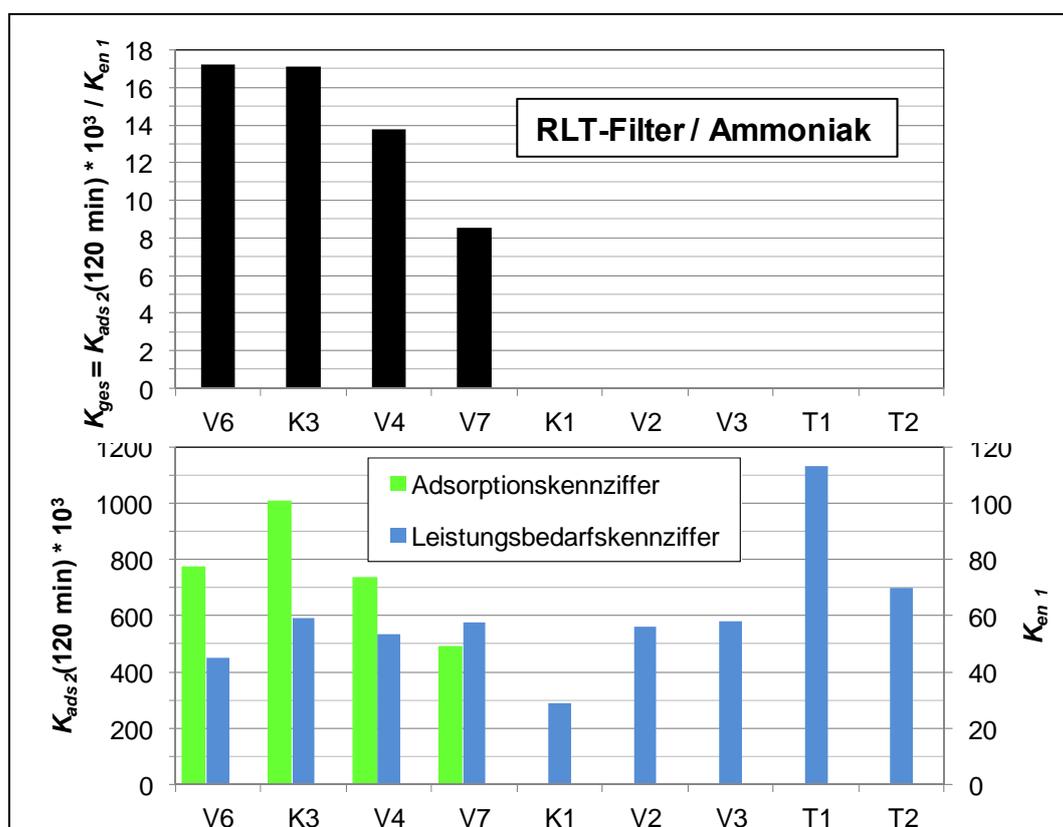


Abbildung 63: Gesamtkennziffer  $K_{ges}$  und Teilkennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  der mit Toluol getesteten RLT-Filter

Wie bereits beschrieben, fanden auch für das Adsorptionssystem RLT-Filter/Ammoniak die Teilkennziffern  $K_{ads,2}(120 \text{ min})$  und  $K_{en,1}$  Berücksichtigung zur Berechnung der Gesamtkennziffer, und die Werte von  $K_{ads,2}(120 \text{ min})$  wurden mit dem Faktor  $10^3$  multipliziert. Abbildung 64 zeigt in Analogie zu Abbildung 63 im oberen Säulendiagramm die Gesamtkennziffern der verschiedenen in diesem Fall mit Ammoniak getesteten RLT-Filter. Die Filter wurden in beiden Diagrammen von links nach rechts nach abnehmender Gesamtkennziffer angeordnet. Im unteren Säulendiagramm sind die zugehörigen Teilkennziffern  $K_{ads,2}(120 \text{ min}) \cdot 10^3$  und  $K_{en,1}$  dargestellt. Die Berücksichtigung des Leistungsbedarfes in der Gesamtkennziffer führt dazu, dass die V-Zelle V6 eine etwas höhere Gesamtkennziffer als der Kartuschenfilter K3 hat, obwohl K3 die höchste Adsorptionskennziffer aufweist.



**Abbildung 64: Gesamtkennziffer  $K_{ges}$  und Teilkennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  der mit Ammoniak getesteten RLT-Filter**

Auch die Berechnung der Gesamtkennziffern für das Adsorptionssystem RLT-Filter/Schwefeldioxid erfolgte mit den Teilkennziffern  $K_{ads,2}(120 \text{ min})$ , multipliziert mit dem Faktor  $10^3$ , und  $K_{en,1}$ . Für das Adsorptionssystem RLT-Filter/Schwefeldioxid zeigt Abbildung 65 im oberen Diagramm die Gesamtkennziffern in der Reihenfolge mit abnehmendem Zahlenwert und im unteren Diagramm die zugehörigen Teilkennziffern  $K_{ads,2}(120 \text{ min}) \cdot 10^3$  und  $K_{en,1}$ . Es ist erkennbar, dass die deutlich höhere Adsorptionsleistung des Kartuschenfilters K2 im Vergleich zu K1 durch den ebenfalls deutlich höheren Leistungsbedarf kompensiert wird, und die Gesamtkennziffer von K1 sogar geringfügig höher ist als die von K2.

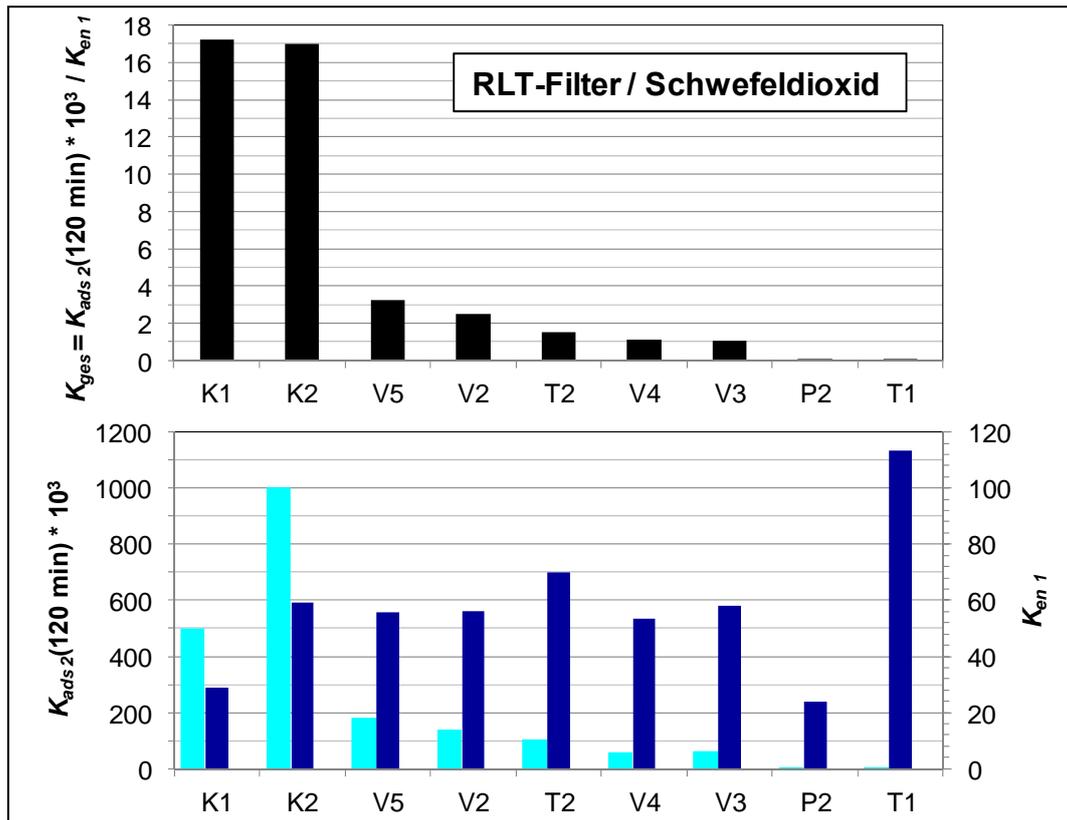


Abbildung 65: Gesamtkennziffer  $K_{ges}$  und Teilkennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  der mit Schwefeldioxid getesteten RLT-Filter

### Druckluftfilter

Bei der Ableitung der Gesamtkennziffer für das Adsorptionssystem **Druckluftfilter/n-Hexan** wurde die Kennziffer  $K_{ads1}$  zur Charakterisierung des Adsorptionsverhaltens verwendet. Je nach Prüfgaskonzentrationen, 100 oder 1000 mg/kg n-Hexan, mit der die Filter getestet wurden (siehe Abschnitte 2.3.2 und 2.4.1.4), war  $K_{ads1}(100)$  oder  $K_{ads1}(1000)$  zu berücksichtigen. Zur besseren Handhabbarkeit wurden die Werte von  $K_{ads1}$  mit dem Faktor  $10^8$  multipliziert. Der Leistungsbedarf der Filter wurde, wie bei allen anderen Adsorptionssystemen, gut mit der Kennziffer  $K_{en1}$  beschrieben, so dass sich für die Gesamtkennziffer folgende Formel ergab

$$K_{ges} = \frac{10^8 \cdot K_{ads1}}{K_{en1}} \quad (7)$$

Abbildung 66 zeigt ein Säulendiagramm, in dem die Gesamtkennziffern der verschiedenen mit 100 mg/kg getesteten Druckluftfilter auf der vertikalen Primärachse aufgetragen sind. Die Filter wurden in dem Diagramm von links nach rechts nach abnehmender Gesamtkennziffer angeordnet. Die Teilkennziffern der jeweiligen Filter sind auf der vertikalen Sekundärachse abzulesen. Abbildung 67 zeigt in gleichartiger Darstellung wie in Abbildung 66 die Gesamt- und Teilkennziffern der mit 1000 mg/kg getesteten Druckluftfilter. Die Gesamtkennziffern spiegeln sowohl für die mit 100 mg/kg als auch für die mit 1000 mg/kg getesteten Druckluftfilter das Verhältnis von Adsorptionsleistung und Leistungsbedarf gut wieder.

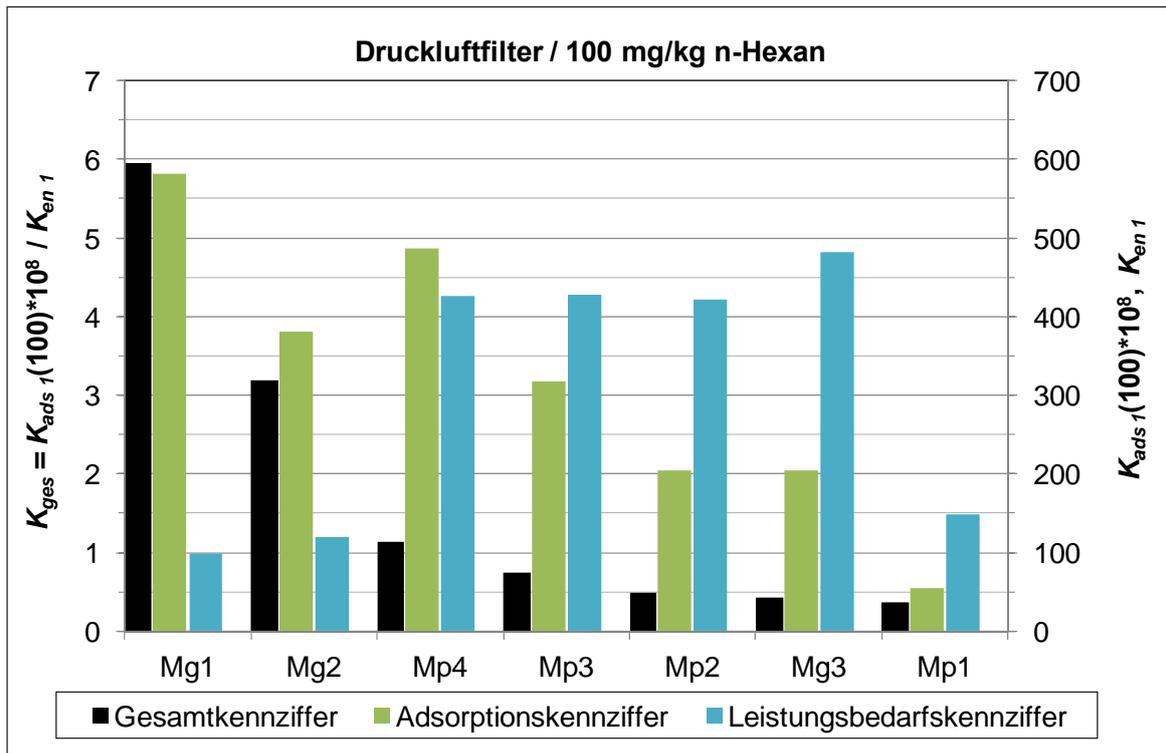


Abbildung 66: Gesamtkennziffer  $K_{ges}$  und Teilkennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  der mit 100 mg/kg n-Hexan getesteten Druckluftfilter

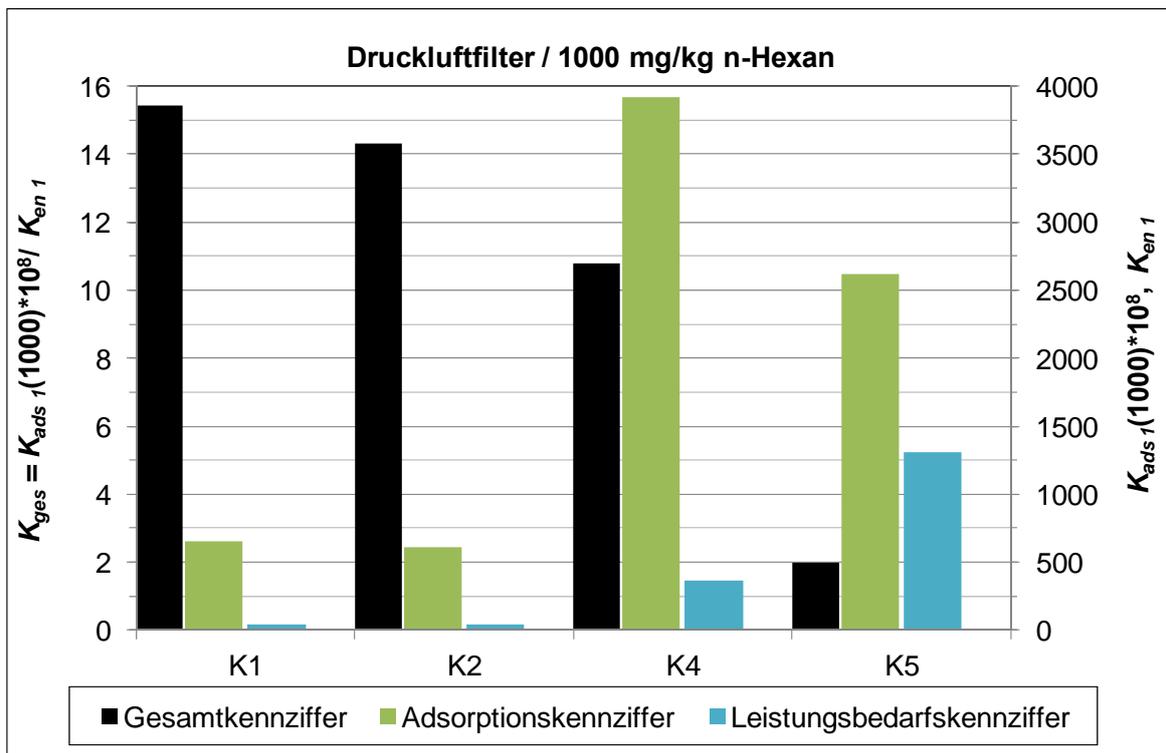


Abbildung 67: Gesamtkennziffer  $K_{ges}$  und Teilkennziffern  $K_{ads}$  und  $K_{en}$  der mit 1000 mg/kg n-Hexan getesteten Druckluftfilter

### 2.4.4 Vorschläge für ein Klassifizierungssystem als Basis für Produkt - Energielabel

Es wurden sowohl für RLT-Filter als auch für Druckluftfilter Gesamtkennziffern zur Beschreibung der Energieeffizienz bei der Adsorption ermittelt. Die Gesamtkennziffern für die verschiedenen Adsorptionssysteme werden im Folgenden mit  $K_{RLT-ToI}$ ,  $K_{RLT-NH3}$ ,  $K_{RLT-SO2}$  und  $K_{DL-100}$  sowie  $K_{DL-1000}$  bezeichnet. Tabelle 8 gibt die Zahlenwerte der Gesamtkennziffern an, die die untersuchten Filtern maximal erreichten.

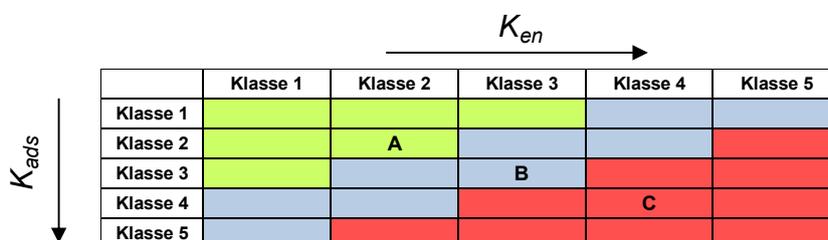
**Tabelle 8: Maximale Gesamtkennziffern der Testfilter**

Gesamtkennziffer	Maximalwert
$K_{RLT-ToI}$	31,7
$K_{RLT-NH3}$	17,3
$K_{RLT-SO2}$	17,2
$K_{DL-100}$	6,0
$K_{DL-1000}$	15,4

Auf Basis der Projektergebnisse wurden zwei Möglichkeiten der Filterklassifizierung abgeleitet.

Eine erste Möglichkeit der Klassifizierung bietet die Eingruppierung anhand der absoluten Zahlenwerte der Gesamtkennziffern. So könnten beispielsweise alle RLT-Filter mit Kennziffern  $K_{RLT} > 10$  als besonders, die mit  $2 < K_{RLT} < 10$  als durchschnittlich und die mit  $K_{RLT} < 2$  als wenig leistungsfähig und energieeffizient klassifiziert werden. Bei Druckluftfiltern könnten z. B. für  $K_{DL-100}$  Klassengrenzen von 0,5 und 2 und für  $K_{DL-1000}$  von 10 festgelegt werden. Insbesondere für die Festlegung von Klassengrenzen bei  $K_{DL-1000}$  werden jedoch weitere Untersuchungen einer wesentlich größeren Anzahl an entsprechenden Druckluftfiltern als unerlässlich angesehen.

Mehr Informationen für den Nutzer lieferte eine Klassifizierung, die zwar auch den Zahlenwert der Gesamtkennziffer angibt, aber darüber hinaus eine Eingruppierung bezüglich der Teilkennziffern vornimmt. So könnten wie in Abbildung 68 dargestellt, ein Kennzifferfeld erstellt werden, bei dem Bereiche oder Klassen der Teilkennziffer  $K_{ads}$  absteigend auf der Ordinate und Bereiche der Teilkennziffer  $K_{en}$  ansteigend auf der Abzisse aufgetragen werden. Dem Feld der Gesamtkennziffern könnten entsprechende Effizienzklassen zugeordnet werden. Hierfür sollten aber zusätzliche Untersuchungen an einer größeren Anzahl von Filtern durchgeführt werden. Denn, obwohl im Rahmen des Projektes sicherlich ein erster wichtiger Überblick über die Leistungsfähigkeit marktverfügbarer Filter gewonnen wurde, war die Anzahl der untersuchten Filter begrenzt.

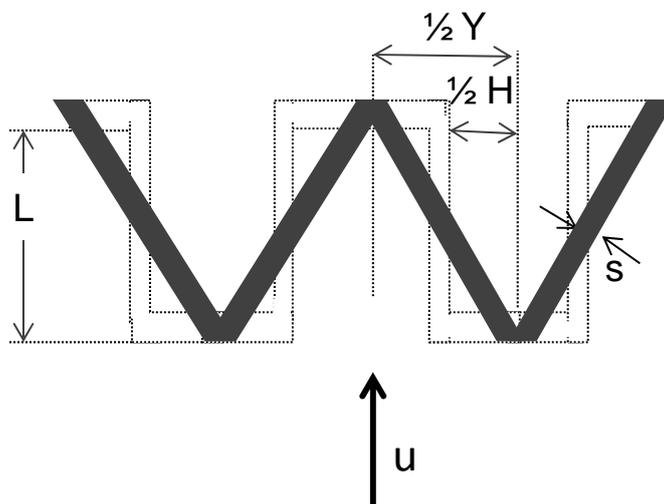


**Abbildung 68: Klassifizierungsfeld**

## 2.5 AP I - Überprüfung eines einfachen Modells zur Berechnung des Druckverlustes

Die Projektarbeiten haben den Einfluss der Druckdifferenz eines Filters auf seine Gesamtbeurteilung verdeutlicht. Die Druckdifferenz eines plissierten Filterelementes hängt nicht nur von der Permeabilität des darin verarbeiteten Flachfiltermediums und der gesamten Anströmfläche ab, sondern kann auch in erheblichem Maße von der Gestaltung der Faltengeometrie beeinflusst werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Eignung der einfachen, analytischen Methode nach Lücke & Fissan 1995 überprüft zum Abschätzen des Druckverlustes plissierter Filterelemente auf der Basis von Daten des in den Filtern zu verarbeitenden Flachfiltermediums und der Faltengeometrie. Das Ziel der Arbeiten war es, eine einfach zu verwendende Excel-Anwendung zu erstellen, die bei der Auslegung und Konstruktion neuer Filterelemente genutzt werden kann.

In dem Modell nach Lücke & Fissan 1995 wird ein Teilbereich des Faltenpaketes betrachtet und die reale Gassenkontur der Falte vereinfacht durch eine Rechteckgeometrie abgebildet (siehe Abbildung 69). Die maßgeblichen Abmessungen sind die Faltentiefe  $L$ , der Faltenabstand  $Y$  und die Mediendicke  $s$ . Mit Hilfe dieser Größen wird die Gassenbreite  $H$  berechnet.



**Abbildung 69: Faltenabbildung nach Lücke & Fissan 1995**

Nach dem Modell setzt sich die Druckdifferenz, die durch die Falte hervorgerufen wird, aus vier Anteilen zusammen, verursacht durch

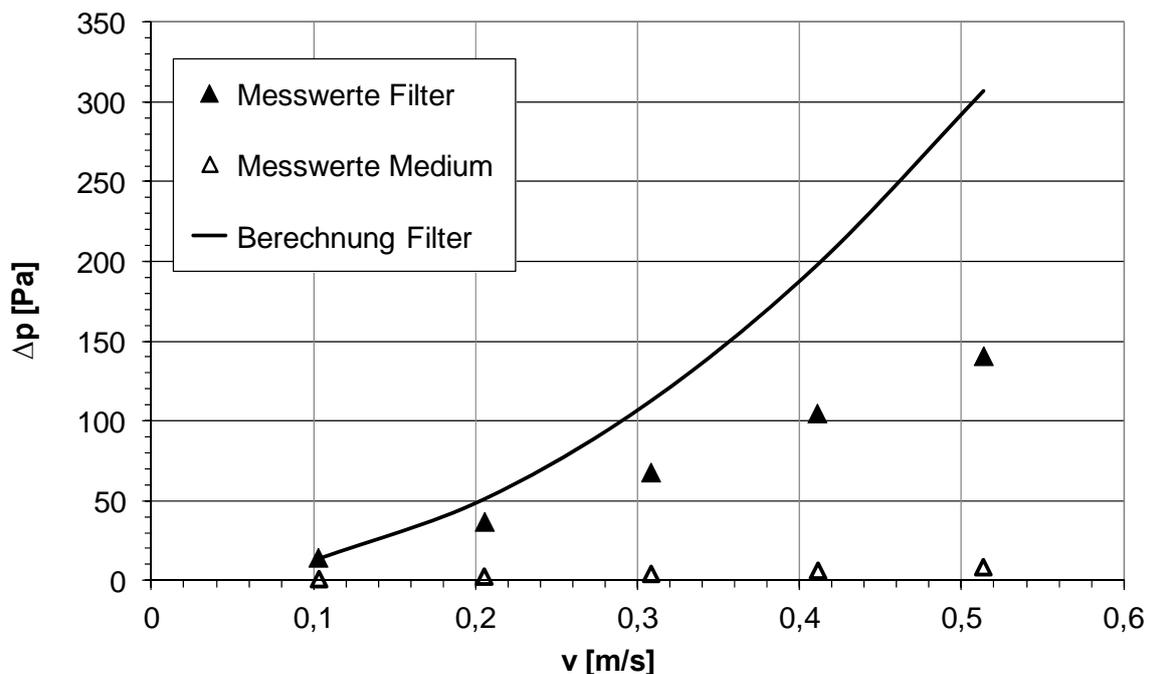
1. die Einschnürung der Strömung beim Eintritt in die Faltengasse ( $\Delta p_E$ ),
2. die Durchströmung des Mediums ( $\Delta p_{Medium}$ ),
3. die Durchströmung der abströmseitigen Faltengasse ( $\Delta p_{Gasse}$ ) und
4. die Ausdehnung der Strömung beim Austritt aus der Falte ( $\Delta p_A$ ).

Unter Nutzung der Navier-Stokes-Gleichung, dem Gesetz von Darcy, nach Zusammenfassung von  $\Delta p_E$  und  $\Delta p_A$  zu  $\Delta p_{E/A}$  sowie zahlreichen vereinfachenden Annahmen ergibt sich nach dem Modell von Lücke & Fissan 1995 folgende Gleichung zur Berechnung des Gesamtdruckverlustes  $\Delta p_{ges}$ :

$$\Delta p_{ges} = \rho \cdot u^2 \cdot \left( \left(1 - \frac{Y}{H}\right)^2 + \left(\frac{s \cdot \mu \cdot Y}{2 \cdot L \cdot k \cdot \rho \cdot u}\right) + \left(\frac{6 \cdot \mu \cdot Y \cdot L}{\rho \cdot u \cdot H^3} + \frac{93 \cdot Y^2}{80 \cdot H^2}\right) \right). \quad (8)$$

Darin sind  $\rho$  die Dichte und  $\mu$  die dynamische Viskosität der Luft,  $u$  ist die Anströmgeschwindigkeit der Strömung vor der Falte und  $k$  ist die Permeabilität des Mediums. Diese Faktoren müssen, um das Modell nutzen zu können, neben den geometrischen Faktoren  $Y$ ,  $H$ ,  $L$  und  $s$  bekannt sein. Sollte die Permeabilität des Mediums nicht bekannt sein, kann sie mit Hilfe von Druckverlustmessungen am Flachfiltermedium einfach ermittelt werden.

Das Modell von Lücke & Fissan 1995 wurde anhand von sechs plissierten Raumlufffiltern getestet. Der Vergleich von berechneten und gemessenen Druckdifferenzen war jedoch nicht zufriedenstellend. In Abbildung 70 sind exemplarisch die gemessenen und berechneten Druckdifferenzen des Panelfilters P1 dargestellt. Die berechneten Werte übersteigen die real gemessenen Druckdifferenzen erheblich. Die mangelnde Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Druckdifferenzen wird zum Teil darauf zurückgeführt, dass das Modell für Filter mit enger Plissierung ( $L/Y= 10 - 40$ ) evaluiert wurde und ein Teil der vereinfachenden Annahmen bei der Ableitung auf diesen geometrischen Gegebenheiten beruht, das Verhältnis  $L/Y$  der im Projekt untersuchten Filter aber unterhalb von 4 lag. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Wert der Mediendicke  $s$  einen erheblichen Einfluss auf die berechnete Druckdifferenz hat, und die Mediendicke nicht immer exakt bestimmt werden kann.



**Abbildung 70: Experimentell bestimmte und nach Lücke & Fissan 1995 berechnete Werte der Druckdifferenz eines Panelfilters**

## 2.6 Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen

In Tabelle 9 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 9: Ziele und Ergebnisse des Forschungsvorhabens 19146 N**

AP	Ziele	Ergebnisse
1	Adsorptive RLT-Filter: Auswahl, Durchführung von Tests und Auswertung	2.2
1.1	Auswahl und Beschaffung von RLT-Filtern inkl. Charakterisierung hinsichtlich Druckdifferenz	2.2.1/2.2.2
1.2	Tests an RLT-Filtern verschiedener Bauform gemäß DIN EN ISO 10121 mit Toluol inkl. Auswertung	2.2.3
1.2	Tests an RLT-Filtern verschiedener Bauform gemäß DIN EN ISO 10121 mit SO <sub>2</sub> inkl. Auswertung	2.2.4
1.2	Tests an RLT-Filtern verschiedener Bauform gemäß DIN EN ISO 10121 mit NH <sub>3</sub> inkl. Auswertung	2.2.5
2	Adsorptive Druckluftfilter: Auswahl, Evaluierung der Testmethode, Durchführung von Tests und Auswertung	2.3
2.1	Auswahl und Beschaffung von Druckluftfiltern inkl. Charakterisierung hinsichtlich Druckdifferenz	2.3.1/2.3.4
2.2	Evaluierung und Weiterentwicklung der Testvorschrift ISO 12500-2 (Öldampf)	2.3.2/2.3.3
2.3/ 2.4	Tests an Druckluftfiltern verschiedener Bauform mit n-Hexan gemäß optimierter Testmethode inkl. Auswertung	2.3.5
3	Klassifizierung	2.4
3.1	Ermittlung von Kennziffern für die Adsorptionsleistung	2.4.1
3.1	System RLT-Filter / Testsubstanz Toluol	2.4.1.1
3.1	System RLT-Filter / Testsubstanz Ammoniak	2.4.1.2
3.1	System RLT-Filter / Testsubstanz Schwefeldioxid	2.4.1.3
3.1	System Druckluftfilter / Testsubstanz n-Hexan	2.4.1.4
3.1	Ermittlung von Kennziffern für den Energieverbrauch	2.4.2
3.1	Ermittlung von Gesamtkennziffern „Energieeffizienz bei der Adsorption“	2.4.3
3.2/ 3.3	Ermittlung eines Klassifizierungssystems als Basis für Produkt-Energielabel	2.4.4
I	Überprüfung eines einfachen Modells zur Berechnung des Druckverlustes	2.5

### **3 Verwendung der Zuwendung**

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans - Begründung der Überschreitung in separatem Schreiben)  
HPA-A 19,67 Personenmonate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) entfällt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) entfällt

### **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem Antrag. Es wurden im beabsichtigten Maße Raumluft- und Druckluftfilter beschafft und getestet. Die Tests umfassten, wie vorgesehen, Druckdifferenzmessungen und die Durchführung von Adsorptionsuntersuchungen mit Hilfe von Durchbruchversuchen. Die Raumluftfilter wurden mit den drei Testsubstanzen Toluol, Ammoniak und Schwefeldioxid, die Druckluftfilter mit n-Hexan getestet. Die Testmethode für adsorptive Druckluftfilter, ISO 12500-2, wurde im Rahmen des Projektes erfolgreich evaluiert, und es wurden Optimierungsvorschläge für die Fortschreibung der Norm erarbeitet. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurden Kennziffern zur Beschreibung der Adsorptionsleistung und des Energieverbrauches der Filter abgeleitet. Es wurden Möglichkeiten der Klassifizierung von Raumluft- und Druckluftfiltern als Basis für Energielabel vorgestellt. Alle geleisteten Arbeiten waren zwingend notwendig und im Umfang angemessen.

### **5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU**

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Energieeffizienz von adsorptiven Raumluft- und Druckluftfiltern sind für Filterhersteller auf vielfältige Weise von Nutzen. Durch die Tests an zahlreichen auf dem Markt verfügbaren Filtern und die Veröffentlichung der Ergebnisse in neutraler Form werden Filterhersteller in die Lage versetzt, die eigenen Produkte besser hinsichtlich Abscheideleistung und Energieeffizienz einschätzen zu können. Das kommt insbesondere KMU zugute, die keine eigenen Forschungsabteilungen besitzen, die ein gezieltes Benchmarking durchführen können. Die größere Produktkompetenz kann nicht nur zur besseren Vermarktung genutzt werden, sie kann auch zu einer Optimierung und Weiterentwicklung der Filter führen. Die hierfür relevanten Projektergebnisse sind erneut besonders für KMU von Nutzen, da die Erarbeitung aufwändige Testeinrichtungen und entsprechend ausgebildetes Personal voraussetzt. Das Projekt hat weiterhin dazu beigetragen, den sowohl im Bereich Wissenschaft und Forschung als auch in der Praxis geringen Wissensstand in Bezug auf adsorptive Filter zu verbessern. Auch dieser Punkt nützt aus den zuvor aufgeführten Gründen speziell KMU. Als Beleg für das Interesse der Industrie an den Forschungsarbeiten wird die rege Beteiligung an den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses mit jeweils 17 Teilnehmern angesehen. Die Arbeiten zur Eva-

luierung der ISO 12500-2 stießen in technischer Hinsicht auf besonders großes Interesse, da die Fortschreibung der Norm in naher Zukunft ansteht. Als besonderer wissenschaftlicher Nutzen des Projektes werden die Arbeiten zur Vorausberechnung von Durchbruchkurven mit Hilfe von semi-empirischen Ansätzen angesehen. Hierzu zählt insbesondere die erfolgreiche Überprüfung der Eignung der Yoon-Nelson-Gleichung für das Adsorptiv n-Hexan.

## 6 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Rahmen	Datum
Information von Unternehmen bei den Sitzungen des PA	1. PA-Sitzung 2. PA-Sitzung	06.04.2017 13.12.2018
Vorstellung der Ergebnisse durch Vorträge bei relevanten Tagungen	9. Filtrationstag, IUTA e. V., Duisburg  Sitzung des AK Luftfilter im VDMA	09.11.2017  14.11.2017
Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Vorlesungen an der Universität Duisburg-Essen: „Adsorptionstechnik“ Prof. Dr. D. Bathen „Air pollution control“ Dr. S. Haep „Umweltmesstechnik“ Dr. C. Asbach	WS 2017/2018 WS 2017/2018 SS 2017
Ergebnistransfer in technische Regelwerke und Normen durch Mitarbeit in den Arbeitsgruppen	IEC TC59 PT 63086 (Raumluftreiniger), NA 060-09-21 Spiegelausschuss zu CEN/TC195 und ISO/TC142 (RLT-Filter) im FB Allg. Lufttechnik des NAM im DIN durch Dr. S. Schumacher, ISO/TC 118/SC 4 (Compressed air treatment technology) und PN14-N111 (Air Treatment Working Group) durch Dr. W. Mölter-Siemens	gesamte Projektlaufzeit
Beratung von Unternehmen	z. B. Kalthoff Luftfilter und Filtermedien GmbH; Hengst SE & Co. KG, Münster; Donaldson Filtration Deutschland GmbH	gesamte Projektlaufzeit
Veröffentlichung Projektergebnisse auf den Internetseiten der FS	<a href="https://www.iuta.de/vernetzung/igf-forschungsprojekte/aif-nummer/19146">https://www.iuta.de/vernetzung/igf-forschungsprojekte/aif-nummer/19146</a>	gesamte Projektlaufzeit

Nach Ende des Projektes und vor Abgabe des Abschlussberichtes durchgeführte Transfermaßnahme:

Maßnahme	Rahmen	Datum
Wissenschaftl. Publikation	Fachveröffentlichung in: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft	Mai 2019
Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Vorlesungen an der Universität Duisburg-Essen: „Umweltmesstechnik“ Dr. C. Asbach	SS 2019

## Geplante Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Rahmen	Datum
Wissenschaftl. Publikation	Fachveröffentlichung in: Adsorption Science & Technology	Herbst 2019
Einbeziehung der Ergebnisse in Schulungsmaßnahmen	Adsorptionskurs im Vorfeld des 11. Filtrationstag, IUTA e. V., Duisburg	04.11.2019
Übernahme der Ergebnisse in die akademische/universitäre Lehre	Vorlesungen an der Universität Duisburg-Essen: „Adsorptionstechnik“ Prof. Dr. D. Bathen “Air pollution control“ Dr. S. Haep „Umweltmesstechnik“ Dr. C. Asbach	WS 2019/2020 WS 2019/2020 SS 2020
Ergebnistransfer in technische Regelwerke und Normen durch Mitarbeit in den Arbeitsgruppen	IEC TC59 PT 63086 (Raumluftreiniger), NA 060-09-21 Spiegelausschuss zu CEN/TC195 und ISO/TC142 (RLT-Filter) im FB Allg. Lufttechnik des NAM im DIN durch Dr. S. Schumacher, ISO/TC 118/SC 4 (Compressed air treatment technology) und PN14-N111 (Air Treatment Working Group) durch Dr. M. Wittmar	weiterhin
Beratung von Unternehmen	z. B. Kalthoff Luftfilter und Filtermedien GmbH; Hengst SE & Co. KG, Münster; Donaldson Filtration Deutschland GmbH	weiterhin
Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf den Internetseiten der FS	<a href="https://www.iuta.de/vernetzung/igf-forschungsprojekte/aif-nummer/19146">https://www.iuta.de/vernetzung/igf-forschungsprojekte/aif-nummer/19146</a>	Herbst 2019

### Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Ein weiterer Transfer der Projektergebnisse wird im Rahmen einer Schulung zum Thema Adsorption stattfinden. Die Schulung findet als separate Maßnahme im Rahmen des 11. Filtrationstages am IUTA im November 2019 statt. Die Maßnahme findet auf Anregung von Industrievertretern statt. Der Abschlussbericht wird auf den Internetseiten der FS veröffentlicht. Die Nutzung und der Abruf dieser Informationen wird als sehr realistisch eingeschätzt, da sowohl bei den PA-Sitzungen als auch auf Tagungen zahlreiche Firmenvertreter hierfür Interesse zeigten und auf die Internetseiten der FS verwiesen wurden. Dem Transfer über die Internetseiten kommt wegen der leichten Zugänglichkeit besondere Bedeutung zu. Für den weiteren Transfer ist im Herbst 2019 eine weitere Veröffentlichung zum Thema „Abschätzung der Leistungsfähigkeit von Druckluftfiltern bei Belastung mit geringsten Konzentrationen“ in der Fachzeitschrift Adsorption Science & Technology geplant. Gespräche mit Industrievertretern zeigten, dass diese Fragestellung Druckluftfilterhersteller aktuell beschäftigt. Die Realisierbarkeit des Transfers über die Veröffentlichung wird deshalb als hoch eingeschätzt.

## 7 Literaturverzeichnis

- Abdulrasheed A, Jalil A, Triwahyono S, Zaini M, Gambo Y, Ibrahim M (2018). Surface modification of activated carbon for adsorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>: A review of existing and emerging technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 1067-1085.
- Brunauer S, Deming L S, Deming W E, Teller E J (1940). A Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *J. Am. Chem.Soc.* 62, 1723-1732.
- DIN EN ISO 10121-2:2013-08. Methode zur Leistungsermittlung von Medien und Vorrichtungen zur Reinigung der Gasphase für die allgemeine Lüftung – Teil 2: Einrichtungen zur Reinigung der Gasphase (GPACD). 2013, Beuth-Verlag, Berlin.
- Guo J, Xu WS, Chen YL, Lua AC(2005). Adsorption of NH<sub>3</sub> onto activated carbon prepared from palm shells impregnated with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *J. Colloid Interface Sci.* 281(2), 285–290.
- ISO 8573-1:2010-04. Druckluft - Teil 1: Verunreinigungen und Reinheitsklassen. 2010, Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 12500-1:2007-06. Filter für Druckluft - Testmethoden - Teil 1: Öl-Aerosole. 2007, Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 12500-2:2007-06. Filter für Druckluft - Testmethoden - Teil 2: Öldämpfe. 2007, Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 12500-3:2009-07. Druckluftfilter - Prüfverfahren - Teil 3: Partikel. 2009, Beuth-Verlag, Berlin.
- ISO 12500-4:2009-12. Druckluftfilter - Prüfverfahren - Teil 4: Wasser. 2009, Beuth-Verlag, Berlin.
- Ligotski R, Sager U, Schneiderwind U, Asbach C, Schmidt F (2019). Prediction of VOC adsorption performance for estimation of service life of activated carbon based filter media for indoor air purification. *Building and Environment* 149, 146-156.
- Lücke T, Fissan H (1995). Eine einfache Methode zur Berechnung des Druckverlustes von Filterelementen für die Schwebstoffiltration. *Chemie Ingenieur Technik* 67, 1480-1485.
- Petit C, Bandosz TJ (2009). Role of surface heterogeneity in the removal of ammonia from air on micro/mesoporous activated carbons modified with molybdenum and tungsten oxides. *Microporous and Mesoporous Materials* 118, 61–67.
- Rosas J, Ruiz-Rosas R, Rodríguez-Mirasol J, Cordero T (2017). Kinetic study of SO<sub>2</sub> removal over lignin-based activated carbon. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 76(9), 338-343. *Chemical Engineering J.* 307, 707-721.
- Sager U, Däuber E, Bathen D, Asbach C, Schmidt W, Weidenthaler C, Tseng JC, Pommerin A (2016). Sorptive Abscheidung von Ammoniak-Immissionen an Aktivkohle und deren Modifikationen bei Umgebungsbedingungen. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 76(9), 338-343.
- Sager U, Schmidt F (2010). Binary Adsorption of n-Butane or Toluene and Water Vapor. *Chem. Eng. Technol.* 33(7), 1203-1207.
- Zhang P, Sager U, Schmidt F, Wanko H, Ulrich J (2006). Untersuchung des Adsorptionsverhaltens von Dünnschichtfiltern am Beispiel der Kfz-Innenraumfilter. *Chem. Ing. Tech.* 78(12), 1837-1844.