

# Merkblätter

## Nr. 37

### Auslegung von Gasabscheidern in Chemischreinigungsanlagen

Handlungsanleitung mit Praxisbeispiel



---

# Merkblätter

---

Nr. 37

Auslegung von Gasabscheidern in  
Chemischreinigungsanlagen

Handlungsanleitung mit Praxisbeispiel

## IMPRESSUM:

**Herausgeber:** Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW)  
Wallneyer Straße 6 • D-45133 Essen  
Telefon (0201) 7995-0 • Telefax (0201) 7995-1448  
e-mail: [poststelle@lua.nrw.de](mailto:poststelle@lua.nrw.de)  
Essen 2003

**Verfasser:** Dr. Dieter Menge

**ISSN 0947-5788 (Merkblätter)**

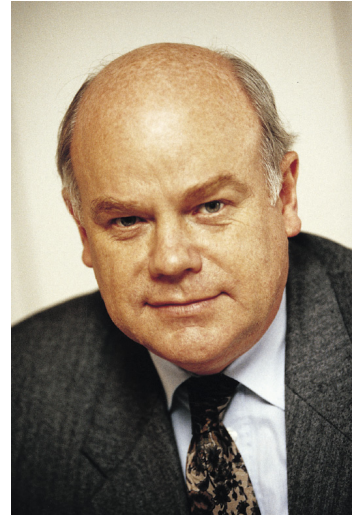
**Informationsdienste:** Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:  
• Internet unter [www.landesumweltamt.nrw.de](http://www.landesumweltamt.nrw.de)  
Aktuelle Luftqualitätsdaten NRW:  
• WDR-Videotext (3. Fernsehprogramm), Tafeln 177 bis 179  
Telefonansagedienst unter (0201) 19 700

**Bereitschaftsdienst:** Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA NRW  
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 71 44 88

## Vorwort

Die Belastung von Tetrachlorethen (PER)-Emissionen im Umfeld von Chemischreinigungen ist gering zu halten. Dies geschieht durch die Ableitung der Abluft aus den Betriebsräumen „über Dach“ in den freien Luftstrom. So sieht es die Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen - 2. BImSchV vor.

Der vorliegende Bericht zeigt, dass das Vorsorgeziel auch durch den Einsatz von Gasabscheidern erreicht werden kann. Auf die Ableitung der Abluft in den freien Luftstrom kann verzichtet werden. Handlungsbedarf besteht da, wo die geforderte Ableitung in der Praxis nicht, oder nur mit unverhältnismäßig hohem bautechnischem Aufwand zu realisieren ist.



Unter den Bedingungen, die an den Betrieb der Gasabscheider in Chemischreinigungsanlagen zu stellen sind, wurde an einem Modellreaktor die Abscheidung von PER untersucht. Das Ergebnis ist die nun vorliegende Handlungsanleitung. Mit ihr ist künftig die standzeitsichere Auslegung solcher Gasabscheider möglich.

In einer Kölner Chemischreinigung, die sich im Erdgeschoss eines Hochhauses befindet, wurde der Betrieb einer Adsorptionsanlage erprobt. Der Zyklus einer Filterbeladung wurde im Rahmen einer begleitenden messtechnischen Erfolgskontrolle überwacht.

Den engagierten Mitarbeitern des Messeinsatzes vor Ort, die wesentlich zum Erfolg des Vorhabens beigetragen haben, gebührt mein besonderer Dank.

Essen 2003

A handwritten signature in black ink that reads "Harald Imer". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Dr.-Ing. Harald Imer  
Präsident des  
Landesumweltamtes NRW



# Inhalt

	VORWORT .....	3
0	ZUSAMMENFASSUNG .....	6
1	PROBLEMSTELLUNG .....	7
2	ZIEL DER UNTERSUCHUNG .....	7
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	7
	3.1 Versuchsaufbau .....	7
	3.2 Probenvorbereitung .....	9
	3.3 Versuchsbedingungen .....	9
	3.4 Analytik .....	10
4	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN .....	10
	4.1 Durchbruchversuch 1 .....	10
	4.2 Durchbruchversuch 2 .....	16
	4.3 Adsorptionsisothermen .....	19
5	AUSLEGUNG VON ADSORBERN .....	24
	5.1 Modellrechnungen .....	24
	5.2 Diskussion der Ergebnisse .....	26
6	ÜBERTRAGUNG IN DIE PRAXIS .....	26
	6.1 Beispiel aus der Praxis .....	27
	6.1.1 Auswahl des Chemischreinigungsbetriebes .....	27
	6.1.2 Roh- und Reingasmessungen an einem zweistufigen Gasabscheider .....	28
	6.2 Thermogravimetrische Analyse .....	30
7	ANHANG .....	32
	Abbildungen .....	32
	Tabellen .....	32
	Auslegungs- und Betriebsdaten zum Praxisbeispiel .....	33
	Index .....	34
	Bilder aus der Chemischreinigung .....	35
	Literatur .....	38

## 0 Zusammenfassung

Nach § 14 der 2. BImSchV ist die Abluft aus Lüftungstechnischen Einrichtungen von Chemischreinigungen in den freien Luftstrom abzuleiten. Als Ersatzmaßnahme wurde in Nordrhein-Westfalen erstmals die Adsorption von Tetrachlorethen (PER) an Aktivkohle zugelassen.<sup>1</sup> In einer Erprobungsphase wurden die unterschiedlichen technischen Ausführungen von Gasabscheidern in raumluftechnischen Anlagen von Chemischreinigungen verglichen und bewertet. Bei der Überwachung wurden während der Erprobungsphase erhebliche Mängel der technischen Auslegung der Gasabscheider festgestellt. Die Konsequenz war, dass aus Gründen der Vorsorge an die künftige Umsetzung der Ersatzmaßnahme bestimmte Mindestanforderungen geknüpft werden mussten, die den Handlungsrahmen absteckten.

Der Handlungsrahmen eröffnete die Möglichkeit der Zulassung von Ausnahmen. Er verbindet die Vorgaben der technischen Auslegung, der Umsetzung und der Überwachung der Maßnahme.<sup>2</sup> Die Möglichkeiten der technischen Realisierung wurden im Kontakt mit den Betreibern, Behördenvertretern und den Anbietern der Maßnahme untersucht und ausgewertet.

Der vorliegende Bericht soll nun eine Handlungsanleitung zur standzeitsicheren Auslegung derartiger Gasabscheider sein. Dazu wurde anhand grundlegender, dynamischer Versuche an einem Modellreaktor (Festbettadsorber) das Durchbruchverhalten von PER an Aktivkohlen unter den im Reinigungsbetrieb üblichen Bedingungen bestimmt. Diese Ergebnisse dienen als Berechnungsgrundlage für die Auslegung und die Kostenkalkulation zum Betrieb von Gasabscheidern.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen an einer kleintechnischen Adsorberanlage sind auf den Betrieb von Gasabscheidern in raumluftechnischen Anlagen von Chemischreinigungen übertragbar. Beispielhaft werden die Resultate aus der Überwachung eines Kölner Reinigungsbetriebes dargestellt. Die dort durchgeführten Langzeitmessungen<sup>3</sup> dienen zur Bestimmung des Durchbruchverhaltens und letztlich zur Festlegung der Standzeit des Gasabscheiders im bestimmungsgemäßen Betrieb der Chemischreinigungsanlage.

# 1 Problemstellung

Das Durchbruchverhalten und damit die Standzeit von Aktivkohle-Adsorbern bei der Abscheidung geringer PER-Konzentration ( $c_{\text{PER}} = 10\text{-}20 \text{ mg/m}^3$ ) aus der Raumluft von Chemischreinigungsanlagen<sup>4</sup> ist bisher nicht untersucht worden. Deren Auslegung erfolgte meist im Rückgriff auf Erkenntnisse die aus der Abscheidung von Lösemittel höherer PER-Konzentrationen ( $c_{\text{PER}} \geq 1000 \text{ mg/m}^3$ ) aus der Gasphase zum Zweck der Rückgewinnung, ohne Grenzwertfestlegung für das Reingas. Die maximale Aufnahmefähigkeit der Aktivkohle für PER bei konstanter Temperatur (Gleichgewichtsbeladung) wurde anhand bekannter oder gemessener Adsorptionsisothermen bestimmt. Für geringere PER-Konzentrationen ( $c_{\text{PER}} < 100 \text{ mg/m}^3$ ) lagen nur wenige Ergebnisse vor. Für PER-Konzentrationen  $c_{\text{PER}} < 20 \text{ mg/m}^3$  gibt es keine sicheren Angaben. Das liegt u.a. auch daran, dass die Einstellung des Gleichgewichts bei den geringen PER-Konzentrationen sehr lange dauert und hohe Ansprüche an die experimentelle Durchführung stellt.

Nach diesen Erkenntnissen ist ungewiss, ob zur Auslegung der Gasabscheider auf Gleichgewichtsdaten aus Adsorptionsisothermen zurückgegriffen werden kann. Dabei ist fraglich, wie groß der Arbeitsbereich des Adsorbers bzw. die Massenübergangszone<sup>1</sup> zu kalkulieren ist, wenn die Konzentration von PER im Reingas den Vorsorgerichtwert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  nicht überschreiten soll.

## 2 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchungen ist es, die Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Aktivkohlefiltern in Chemischreinigungen zu schaffen. Zur Ermittlung von Massenübergangszonen, Durchbruchkurven, Aktivkohlebeladungen und Standzeiten sind Adsorptionsversuche von PER an Aktivkohle durchzuführen. Parallel zu diesen Versuchen sind Adsorptionsisothermen von PER an verschiedenen Aktivkohlen zu messen, damit die für diesen Anwendungsfall optimale Aktivkohle bestimmt werden kann. Die Untersuchungsergebnisse dienen als Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Kosten für den Betrieb der Adsorptionsanlagen.

Die Umsetzung der Maßnahme soll anhand eines Praxisbeispiels verdeutlicht werden. Dazu wurde im Rahmen der behördlichen Überwachung an einer ausgesuchten Chemischreinigung eine begleitende messtechnische Erfolgskontrolle durchgeführt.

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Versuchsaufbau

Die Adsorptionsversuche wurden unter dynamischen Bedingungen in einem kleintechnischen Adsorber mit einem Fassungsvermögen von 2 l Aktivkohle durchgeführt. Der doppelwandige und somit temperierbare Adsorber verfügt über 10 Messstellen, die in einem Abstand von jeweils 10 cm angebracht sind. Temperatur und Feuchte des durchströmenden Gases wurden über Messsonden am Adsorbereingang und -ausgang erfasst und mit einem Schreiber aufgezeichnet.

Die Gasdosierung erfolgte mit thermischen Massendurchflussreglern. Die Steuerung der Regler wurde mit einer separaten Elektronik durchgeführt, die den vorgegebenen Sollwert überwacht und auch gegebenenfalls nachregelt. Die gewünschten Parameter des Adsorptionsgases, nämlich die relative Feuchte und die PER-Konzentration, wurden durch Mischen von drei Teilgasströmen eingestellt. Die definierten Temperaturen bei der Gassättigung (flüssiges PER und Wasser) konnten mit Hilfe von Thermostaten eingehalten werden.

Der Adsorber hat folgende Abmessungen:

Adsorber	
Höhe:	1000 mm
Durchmesser:	50 mm
Volumen:	1970 cm <sup>3</sup>

Tabelle 1: Abmessungen des kleintechnischen Adsorbers



Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

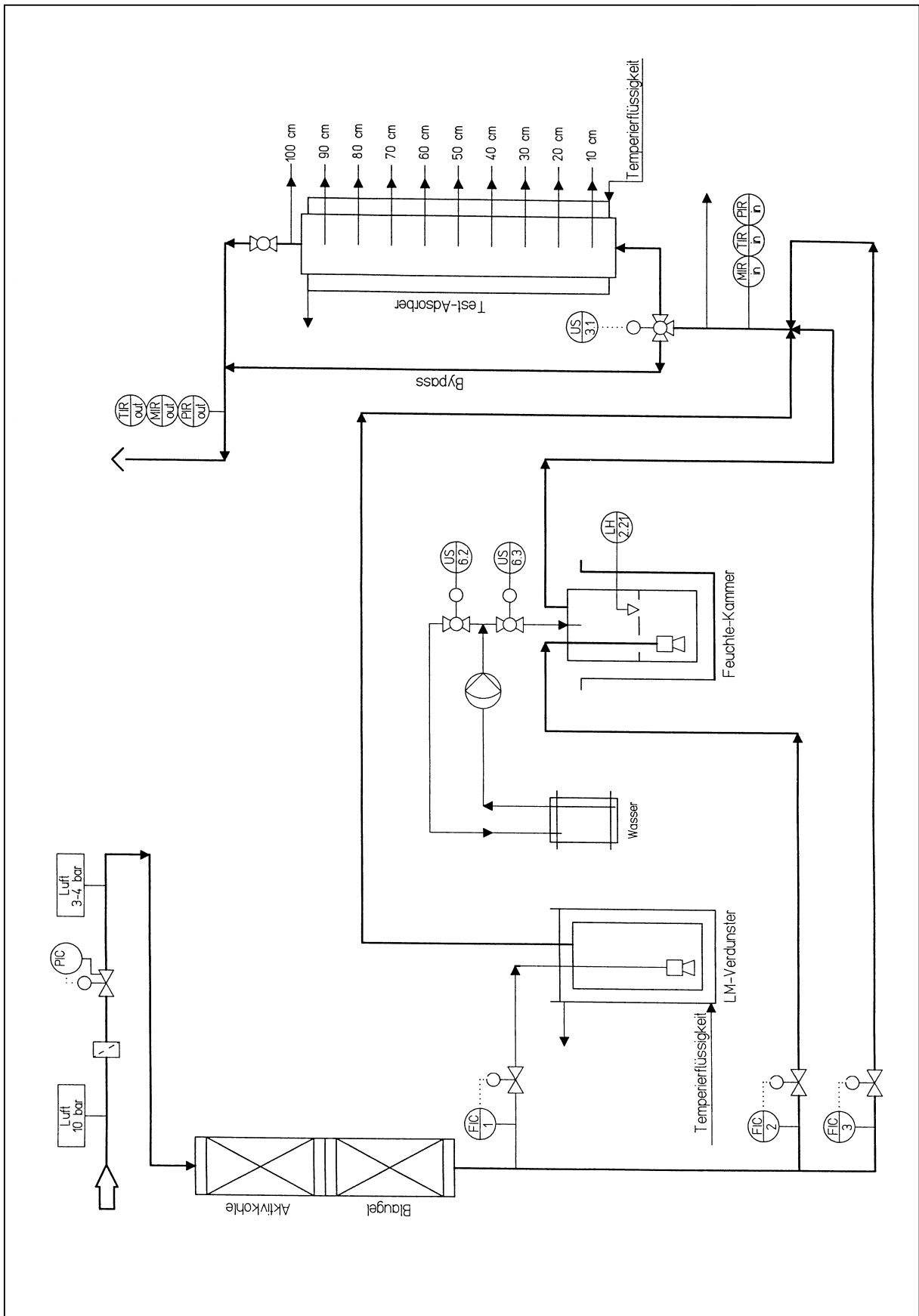


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Durchführung der Adsorptionsversuche

### 3.2 Probenvorbereitung

Die eingesetzte Aktivkohle wurde aus dem Lagerbestand der Fa. CarboTech genommen. Eine besondere Vorbehandlung erfolgte nicht, da dies im praktischen Einsatz auch nicht geschieht. Damit liegen reale Voraussetzung vor. Das Produkt ist allerdings vor dem Einsatz analysiert worden.

Die für die Versuche verwendete Luft stammte aus der werkseigenen Druckluftleitung. Zur Entfeuchtung und Entfernung von Verunreinigungen wurde diese Luft vor der Zuführung in die Versuchsanlage druckreduziert, getrocknet und durch eine Aktivkohle-Filtereinheit geleitet.

### 3.3 Versuchsbedingungen

Parallel zu den dynamischen Adsorptionsversuchen verlief die Bestimmung der Adsorptionsisothermen.

Ausgewählt wurden handelsübliche Aktivkohlen mit unterschiedlichen Aktivierungsgraden, also Produkte mit verschiedenen Porenvolumen und inneren Oberflächen, und verschiedenen Korndurchmessern.

Die Messung der Isothermen erfolgte an den zuvor getrockneten Aktivkohleproben (3 h, 150 °C). Diese befinden sich in Porzellanschälchen in einer Adsorptionskammer. Dort werden die Proben mit einem definierten Luft/Lösemittelgemisch überströmt, bis sich eine Gleichgewichtsbeladung eingestellt hat. Die Einstellung der gewünschten Partialdrücke, also der Konzentrationen, wird durch Mischen zweier Teilgasströme erreicht. Ein definierter Teilstrom wird dabei durch mit Lösemittel gefüllte Waschflaschen geleitet und gesättigt. Durch Zumischen eines reinen Luftstroms wird die Konzentration eingestellt. Bei der Messung selbst wird die Aktivkohle zunächst mit dem am höchsten konzentrierten Gasstrom beladen und anschließend durch Einstellung niedrigerer Partialdrücke desorbiert.

Für die dynamischen Adsorptionsversuche sind die in der Tabelle 2 aufgeführten Parameter ausgewählt worden. Die Auswahl der Aktivkohle D 47/3 erfolgte aufgrund von Messungen, Erfahrungswerten und theoretischen Berechnungen.

Einige chemisch-physikalische Eigenschaften von PER sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Parameter	Wert
Rohgasstrom	2,8 m <sup>3</sup> /h
Kontaktzeit	2,5 s
Strömungsgeschwindigkeit	0,4 m/s
PER-Konzentration	10-20 mg/m <sup>3</sup>
Relative Feuchte	ca. 50 %
Adsorptionstemperatur	20-25 °C
Aktivkohle	D 47/3
Aktivkohlemenge	2 l
Geforderter Reingaswert	< 0,1 mg/m <sup>3</sup>

**Tabelle 2:** Versuchsparameter

<b>Tetrachlorethen (PER)</b>	
Chemische Formel	$C Cl_2 = C Cl_2$
CAS-Nummer	127-18-4
Molmasse	165,8 g/mol
Dichte (20 °C)	1,623 g/cm <sup>3</sup>
Siedepunkt	121 °C
Schmelzpunkt	- 24 °C
Dampfdruck (20 °C)	19 mbar
Sättigungskonzentration (20 °C)	118 g/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärme	146 J/mol K
Dynamische Viskosität (20 °C)	0,88 Pas
Löslichkeit in Wasser (25 °C)	0,15 g/l

**Tabelle 3:** Chemisch-physikalische Eigenschaften von PER

### 3.4 Analytik

Die Probenahme zur Bestimmung der PER-Konzentration im Gasstrom erfolgte vor dem Adsorber zur Bestimmung der Eingangskonzentration im Rohgas sowie an den einzelnen Probenahmestellen des Adsorbers. Bei dem angewendeten Messverfahren analog der VDI 3482 wird ein Probegasstrom über mit Aktivkohle gefüllte Adsorptionsröhrchen geleitet. Das von der Aktivkohle adsorbierte PER wird anschließend mit Schwefelkohlenstoff desorbiert und mit Gaschromatograph und Massenspektrometer quantitativ bestimmt. Über das exakt gemessene Gasprobenvolumen ist dann die Bestimmung der Konzentration im Gas möglich. Je nach der zu erwartenden Konzentration betrug die Probegasmenge zwischen 1 l (Gaseintritt) und 2-10 l (Adsorbermessstellen). Die Nachweisgrenze liegt bei diesem Verfahren bei 0,01 mg/m<sup>3</sup>.

Die Analysen wurden von dem Analytischen Labor Gelsenkirchen (ALGE) durchgeführt.

## 4 Ergebnisse der Untersuchungen

### 4.1 Durchbruchversuch 1

Beim ersten Versuch wurde die Aktivkohle D 47/3 eingesetzt. Wegen der zu erwartenden langen Standzeiten wurde eine PER-Konzentration von 15-20 mg/m<sup>3</sup> im Rohgas angestrebt. Von der Aktivkohle wurde eine Kurzanalyse durchgeführt. Die Aktivkohleeigenschaften und Versuchsparameter zeigt Tabelle 4.

<b>Aktivkohle</b>	<b>Typ D 47/3</b>
Rütteldichte	460 g/l
Aschegehalt	3,8 %
Wassergehalt	1,0 %
Benzolbeladung	
p/ps=0,1:	35,0 %
p/ps=0,9:	38,8 %
Einwaage	973 g
PER-Eingangskonzentration (Rohgas)	19,2 mg/m <sup>3</sup>
Partialdruckverhältnis (20 °C) p/ps	1,29 x 10 <sup>-4</sup>
Relative Feuchte	40 %
Adsorptionstemperatur:	22-24 °C
Rohgasstrom	2,8 m <sup>3</sup> /h
Strömungsgeschwindigkeit	0,4 m/s

**Tabelle 4:** Versuchsdaten

Die gemessenen Konzentrationen von PER betragen an der ersten Messstelle, also bei einer Schichthöhe von 10 cm, anfangs  $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bzw.  $0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Dies ist die Nachweisgrenze bei dem angewendeten Analysenverfahren. Damit kann der geforderte Grenzwert von  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  unter diesen Bedingungen problemlos eingehalten werden.

Der erste Durchbruch wurde an der Messstelle 1 nach 267 h mit  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen, lag damit aber noch unter den geforderten  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Zu diesem Zeitpunkt betrug die Konzentration an der Messstelle 2 (20 cm) weiterhin  $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Der Versuch wurde nach einer Laufzeit von 1550 h oder 65 Tagen aus Zeitgründen abgebrochen, als der Durchbruch an der vierten Messstelle (40 cm) erreicht war.

Die Durchbruchskurven sind in der Abbildung 2 dargestellt.

Einen großen Einfluss auf die Form der Durchbruchskurven hat die Adsorptionskinetik. Eine steile Durchbruchskurve bedeutet eine hohe Adsorptionsgeschwindigkeit und somit eine gute Adsorptionskinetik. Diese Parameter werden oft zur Auslegung von Adsorptionsreaktoren herangezogen. Man bedient sich dabei dem einfachen, sogenannten „Zonenmodell“. Nach der Darstellung in Abbildung 3 kann man einen im Beladungszustand befindlichen Adsorptionsreaktor in drei Zonen einteilen. Eine Zone dem Gaseintritt nahe, in der das Adsorbens voll beladen ist, eine weitere, in der die Beladung gerade stattfindet - auch mit Massenübergangszone (MÜZ) bezeichnet. Die dritte Zone ist unbeladen. Die MÜZ wandert durch den Adsorber hindurch und hat sich beim Durchbruch bis zum Adsorberausgang verschoben. Es hat sich gezeigt, dass sich die MÜZ in vielen Fällen mit konstanter Geschwindigkeit und konstanter Länge durch den Reaktor schiebt, solange die Bedingungen gleich bleiben. Man kann so dieses in kleinen Reaktoren gemessene Verhalten auf große Apparate übertragen, wenn die lineare Strömungsgeschwindigkeit gleich ist.

Die in der Abbildung 3 vorgeschlagene Bestimmungsmethode von Geschwindigkeit und Zeit geht davon aus, dass die Durchbruchskurve nach zwei verschiedenen Adsorberlängen  $L_1$  und  $L_2$  gemessen wird. Zur Ermittlung der Frontgeschwindigkeit  $V_{\text{MÜZ}}$  werden die Zeitabstände  $T_1$  und  $T_2$  ihrer halben Durchbruchkonzentration gemessen. Für die Geschwindigkeit der MÜZ gilt dann

(1)

$$V_{\text{MÜZ}} = \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1}$$

Die Länge der MÜZ wurde nach dem „Schwellwertverfahren“ errechnet. Dieses Verfahren orientiert sich an den Zeiten, zu denen vorgegebene Konzentrationsschwellen überschritten werden. Die Durchbruchzeit  $t_1$  wurde bei der Auswertung bei den relativen Konzentrationen  $c/c_0 = 0,05$  und  $t_2$  bei  $c/c_0 = 0,95$  bestimmt.

Für die Länge der MÜZ ergibt sich

(2)

$$H_{\text{MÜZ}} = V_{\text{MÜZ}} (T_2 - T_1)$$

Aus den in der Abbildung 2 dargestellten Durchbruchskurven nach 20 und 30 cm Schichtlänge wurden folgende Werte (Mittel) ermittelt:

$$V_{\text{MÜZ}} = 0,025 \text{ cm/h}$$

$$H_{\text{MÜZ}} = 6,6 \text{ cm}$$

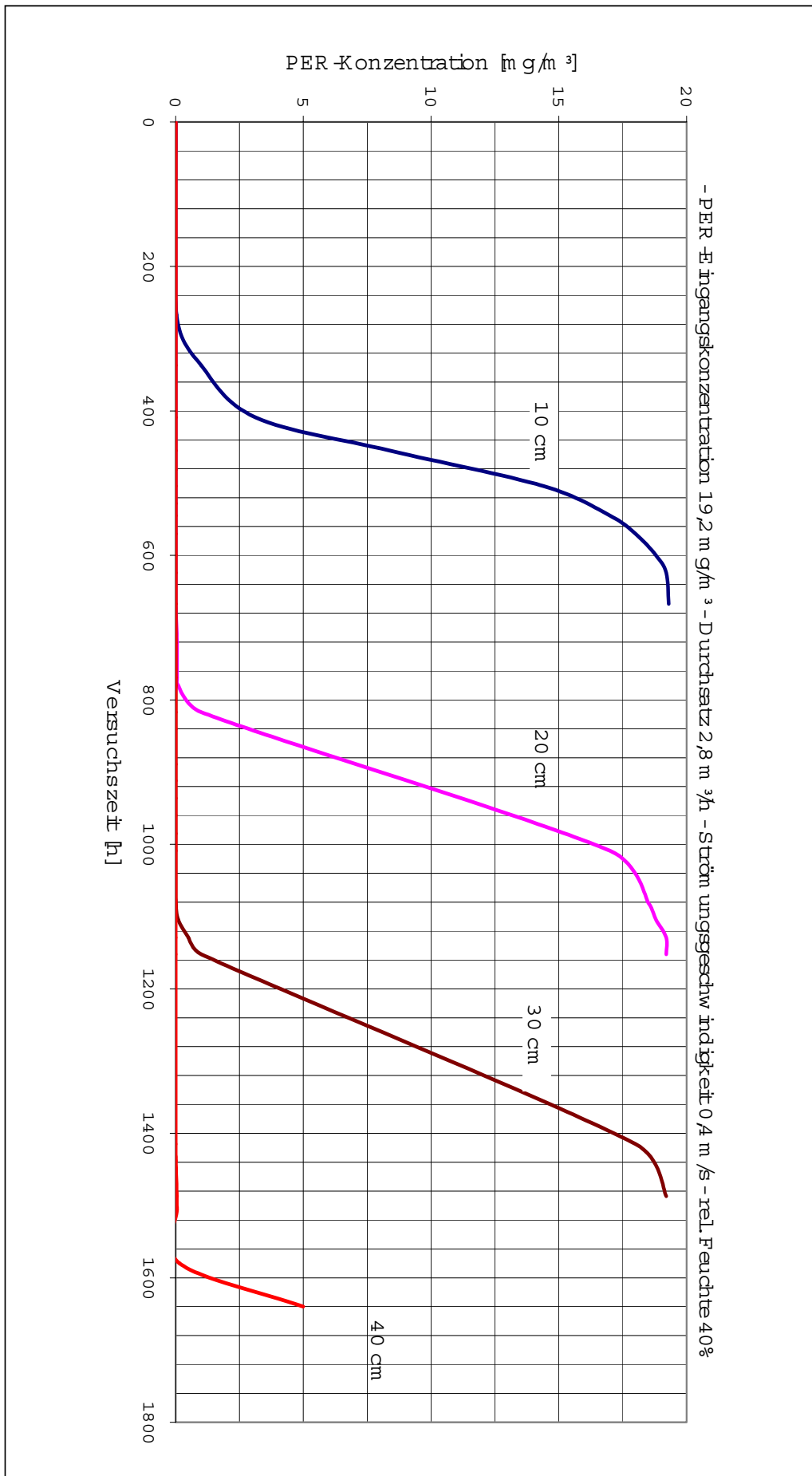


Abbildung 2: Durchbruchkurven aus Versuch 1

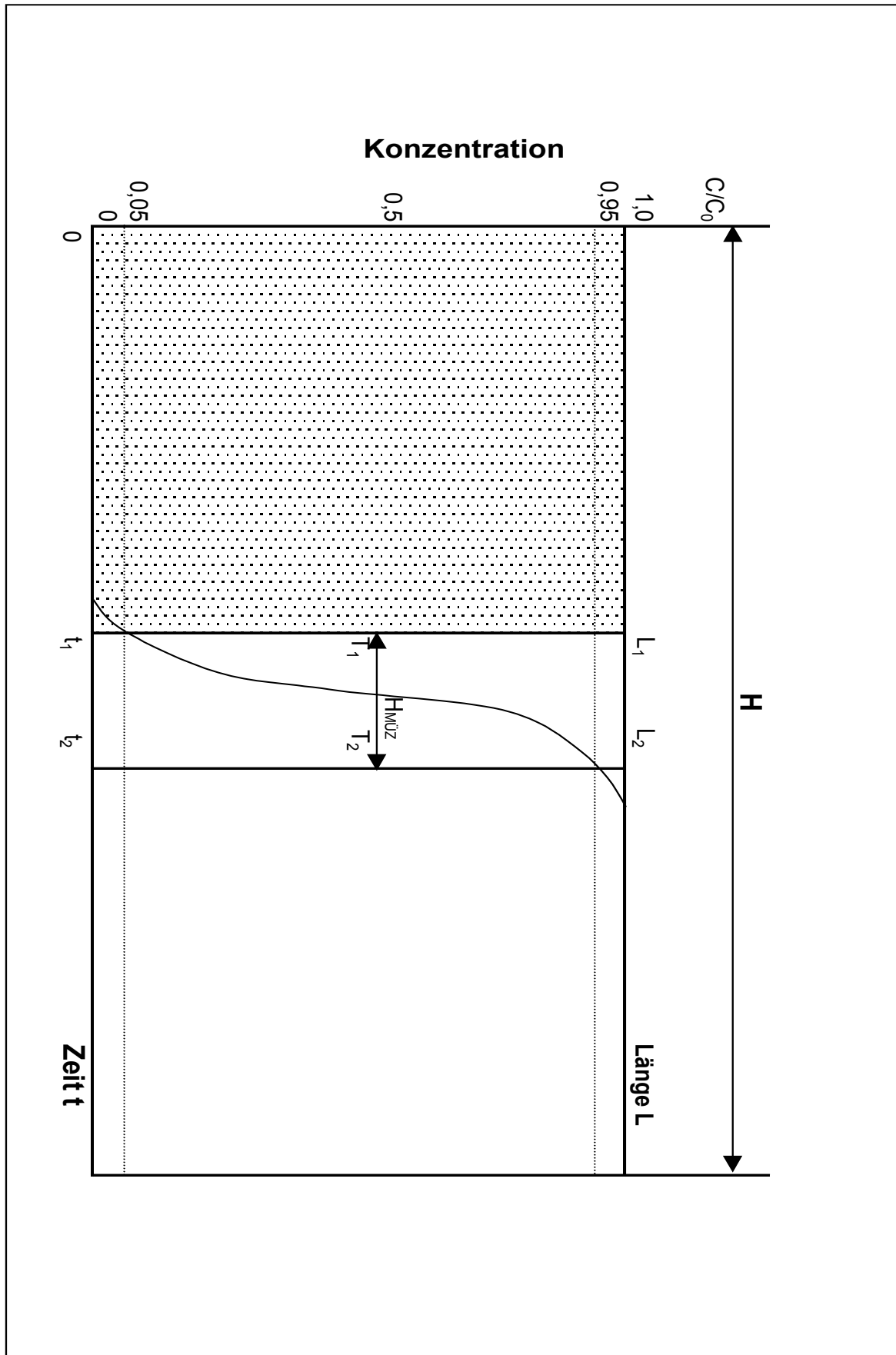


Abbildung 3:

Ausbildung einer Massenübergangszone (MÜZ) in einem durchströmten Festbettadsorber

Die MÜZ ist unter den vorliegenden Bedingungen extrem kurz. Dies ist begründet durch die sehr gute Adsorbierbarkeit des PER, außerdem ist die Adsorptionskinetik ausgezeichnet. Daneben spielen natürlich auch die günstigen adsorptiven Eigenschaften der eingesetzten Aktivkohle eine Rolle.

In den einzelnen Aktivkohleschichten von jeweils 10 cm wurden die in der Tabelle 5 aufgeführten Standzeiten bis zum Erreichen des Durchbruchs bei einer Konzentration von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  ermittelt:

Aktivkohleschicht (cm)	Standzeit (h)	Summe Standzeit (h)
0 - 10	290	290
10 - 20	480	770
20 - 30	420	1190
30 - 40	450	1640

**Tabelle 5:** Ermittelte Standzeiten bei Versuch 1

Man sieht, dass in den einzelnen Schichten unterschiedliche Standzeiten gemessen wurden. Das deutet darauf hin, dass sich das Adsorptionsgleichgewicht nicht einstellt hat. Zumindest die erste AK-Schicht (0-10 cm) ist nicht bis zum Gleichgewicht beladen.

Aus den gemessenen Standzeiten und dem aus der Rohgaskonzentration und Rohgasstrom berechneten PER-Fracht ergibt sich rechnerisch, dass eine Aktivkohlebeladung in der Aktivkohleschicht 0 - 40 cm von 22,7 % bis zum Erreichen der Durchbruchkonzentration zu erwarten ist.

Nach Beendigung des Versuchs wurde die Aktivkohle in Schichten von 10 cm aus dem Adsorber genommen und thermogravimetrisch analysiert.

Bei dieser Analysenmethode (TGA) wird die Aktivkohleprobe in einer Thermowaage im Stickstoffstrom linear mit einer Rate von  $10 \text{ °C/min}$  aufgeheizt. Während des Aufheizens desorbieren die adsorbierten Stoffe, der Gewichtsverlust und die Temperatur werden dabei registriert. So erhält man Informationen über die Höhe der Aktivkohlebeladung und über den Temperaturbereich, in dem diese Stoffe desorbieren. Anhand eventuell vorhandener Desorptionspeaks kann man außerdem erkennen, ob sich verschiedene Stoffe oder auch Wasser auf der Aktivkohle befinden. Die Messungen ergaben die in der Tabelle 6 gezeigten Resultate.

Aktivkohleschicht (cm)	Wasserbeladung (%)	PER- Beladung (%)	Gesamtbeladung (%)
0 - 10	0,5	20,9	21,4
10 - 20	0,6	19,5	20,1
20 - 30	0,7	20,1	20,8
30 - 40	0,5	18,5	19,0
40 - 50	3,4		3,4
50 - 100	3,1		3,1

**Tabelle 6:** Aktivkohlebeladungen aus den TG-Analysen zu Versuch 1

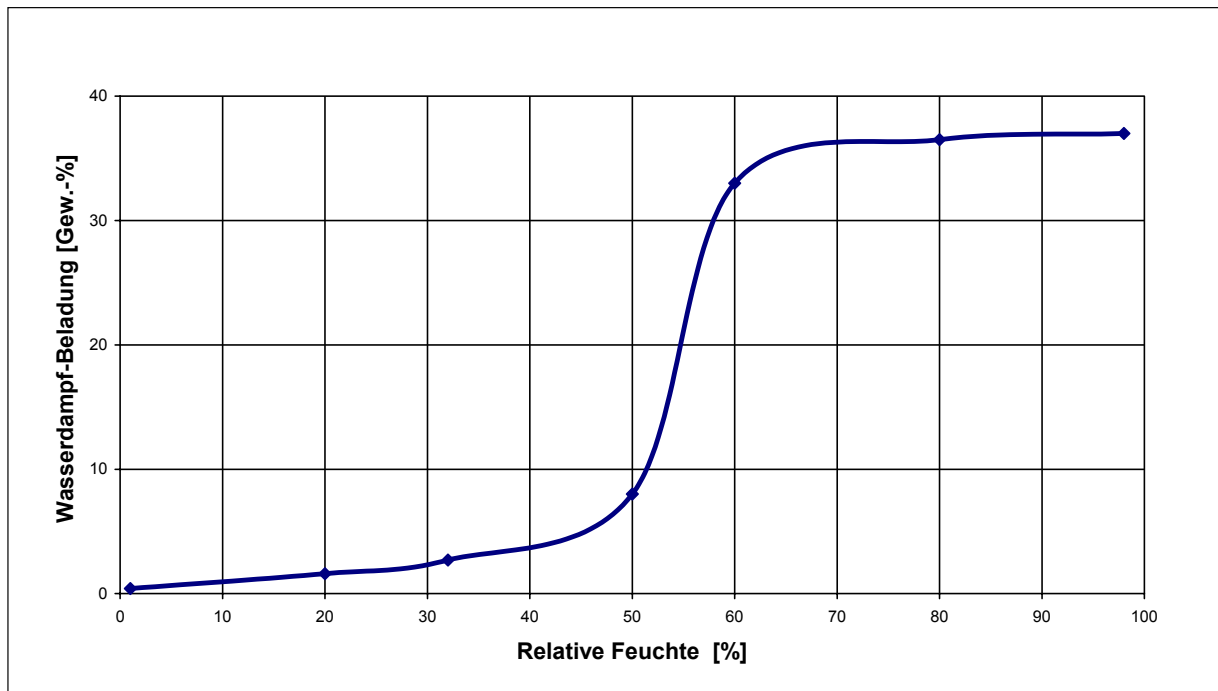
Aus diesen Ergebnissen ergibt sich eine durchschnittliche PER-Beladung in der Schicht von 0 - 30 cm von 20,2 %. Die Aktivkohle in der Schicht von 30 - 40 cm ist noch nicht ganz gesättigt.

Bis über eine Schichtlänge von 100 cm die gesamte Aktivkohle des Adsorbers zu 20,2 % mit PER beladen ist, würden nach vorliegenden Analysendaten unter den eingestellten Versuchsbedingungen 3656 Betriebsstunden verstreichen.

In der Aktivkohleschicht, in der noch kein PER adsorbiert wurde, stellt sich eine Wasserbeladung von ca. 3,3 % ein. Dies entspricht somit der Gleichgewichtsbeladung für einen relativen Feuchtegehalt von 40% entsprechend ca.  $8 \text{ g Wasser/m}^3$  in der Beladeluft. (100 % relative Feuchte bei  $22 \text{ °C}$  ( $21 \text{ g Wasser/m}^3$ ).

Diese geringe Beladung ist begründet durch den hydrophoben Charakter der Aktivkohle. Aus der Messung von Wasserdampfisothermen ist bekannt, dass die Aktivkohle erst ab relativen Feuchten von ca. 60 % merklich Wasser adsorbiert. Ab dieser Konzentration steigt die Wasserbeladung aber stark an. In der Abbildung 4 ist die Wasserdampfisotherme der Aktivkohle D 47/3 aufgezeichnet, die dies noch einmal verdeutlicht“.

Die geringen Mengen an Wasser werden allerdings, wie die Beladungswerte zeigen, trotz der niedrigen Konzentration von PER von diesem noch verdrängt.



**Abbildung 4:** Adsorptionsisotherme von Wasserdampf an Aktivkohle D47/3



## 4.2 Durchbruchversuch 2

Da sich bereits während der Messung der Adsorptionsisothermen an verschiedenen Aktivkohlen abzeichnete, dass der ausgewählte Typ D 47/3 das beste Produkt für diesen Anwendungsfall ist, wurde bei dem zweiten Versuch kein weiterer Typ getestet. Vielmehr wurde die Konzentration des PER erhöht um festzustellen, welche Auswirkungen dies auf die Standzeit und Reingaskonzentration hat. Dies erlaubt bei der Vorausberechnung der Standzeiten eine fundiertere Kalkulation der Betriebskosten.

Die Rohgaskonzentration wurde auf  $25 \text{ mg/m}^3$  erhöht, alle anderen Parameter blieben unverändert. Es war somit zu erwarten, dass sich die Standzeiten entsprechend verringern würden. Es ist dabei aber zu berücksichtigen, dass die Aktivkohlebeladung bei höheren Adsorptivkonzentrationen ansteigt. Insofern dürfte die Standzeit nicht linear abnehmen. Für den Versuch wurde die Aktivkohle D 47/3 aus der gleichen Charge wie beim ersten Versuch genommen, die Einwaage betrug diesmal 1006 g.

Auch unter diesen veränderten Bedingungen wurden Reingaswerte von  $< 10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  an den einzelnen Probenahmestellen gemessen. Der erste Durchbruch an Messstelle 1, also nach 10 cm Schichthöhe, wurde nach einer Versuchszeit von 310 h festgestellt. Die Durchbruchkurven zeigt die Abbildung 5.

Auch anhand dieser Durchbruchkurven (20 und 30 cm) wurden die Geschwindigkeit und die MÜZ unter diesen Versuchsbedingungen ermittelt.

$$V_{\text{MÜZ}} = 0,029 \text{ cm/h}$$

$$H_{\text{MÜZ}} = 7,0 \text{ cm}$$

Dieser Versuch wurde ebenfalls nach Erreichen des Durchbruchs an Messstelle 4 (40 cm) beendet. Die Standzeiten der Aktivkohle in den Schichtsegmenten sind in der Tabelle 7 aufgeführt.

Aktivkohleschicht (cm)	Standzeit (h)	Summe (h)
0 - 10	330	330
10 - 20	350	670
20 - 30	360	1030
30 - 40	340	1380

**Tabelle 7:** Ermittelte Standzeiten bei Versuch 2

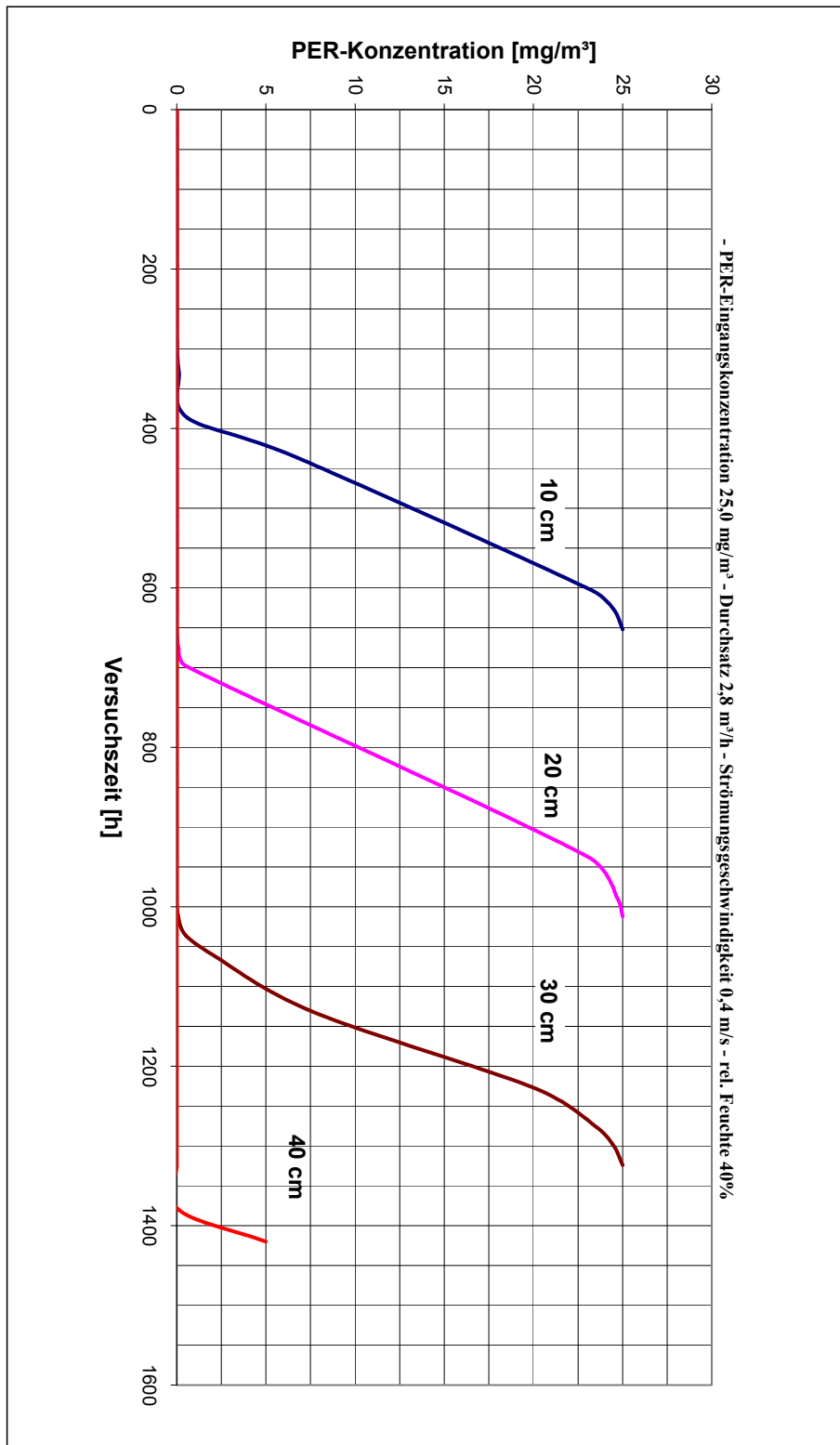


Abbildung 5: Durchbruchskurven aus Versuch 2

Auch bei diesem Versuch zeigte sich, dass die Standzeit der ersten Schicht etwas kürzer ist als bei den folgenden. Insgesamt gesehen sind die Standzeiten der einzelnen Schichten jedoch deutlich gleichmäßiger als beim ersten Versuch. Der Grund dafür ist die sehr konstante Rohgaskonzentration.

Bis zum Durchbruch des PER nach 40 cm Schichthöhe erzielt man theoretisch eine Aktivkohlebeladung von 24,0 %.

Auch bei diesem Versuch ist die Aktivkohle analog Versuch 1 aus dem Adsorber ausgefüllt und thermogravimetrisch untersucht worden.

Diese Messungen ergaben die in der Tabelle 8 aufgeführten Beladungen.

Aktivkohleschicht (cm)	Wasserbeladung (%)	PER-Beladung (%)	Gesamtbeladung (%)
0 - 10	0,6	26,6	27,3
10 - 20	0,8	24,4	25,2
20 - 30	0,9	25,4	26,3
30 - 40	0,6	23,6	24,2
40 - 50	3,5		3,5
50 - 100	3,0		3,0

**Tabelle 8:** Aktivkohlebeladungen aus Versuch 2

Die durchschnittliche PER-Beladung der Aktivkohlen beträgt in den gesättigten Schichten (0-30 cm) 25,5 %. Dieser Wert zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem aus den ermittelten Standzeitdaten bestimmten Wert von 24,0 %. Hiernach läge die Rohgaskonzentration nicht bei 25 mg/m<sup>3</sup>, sondern bei 26,6 mg/m<sup>3</sup>.

Die Wasserbeladung entspricht erwartungsgemäß den Werten aus Versuch 1, was bei der gleichen relativen Feuchte auch nicht anders zu erwarten war.

Berechnet man auch hier aus dem Analyseergebnis die Zeit, die zur Beladung des gesamten Adsorber (100 cm) von 25,5 % benötigt wird, so kommt man unter den eingestellten Versuchsbedingungen (siehe Tabelle 9) auf eine Betriebszeit von 3665 Stunden.

Eingestellte Versuchsbedingungen			TG-Analyse	
	Rohgas		Aktivkohlemenge kg	Beladung
	Volumenstrom m <sup>3</sup> /h	Konzentration mg/m <sup>3</sup>		
Versuch 1	2,8	19,2	973	20,2 %
Versuch 2	2,8	25	1006	25,5 %

**Tabelle 9:** Daten zur Ermittlung der Betriebszeit

### 4.3 Adsorptionsisothermen

In der Tabelle 10 sind die Messergebnisse zusammengefasst. Zu den einzelnen Aktivkohletypen sind die zugehörigen Rütteldichten, die Oberflächen und die gemessenen Aktivkohlebeladungen aufgeführt. Neben der Beladung in Gew.-% ist auch jeweils die Beladung in g/l Aktivkohle vermerkt. Dies ist insofern wichtig, als die Adsorber ein bestimmtes Volumen aufweisen und die Aktivkohlemenge von daher festgelegt ist. Falls verschiedene Aktivkohlen gleiche Beladungen aufweisen, aber eine unterschiedliche Dichte besitzen, hat das schwerere Produkt eine höhere volumenbezogene Kapazität.

Zur besseren Übersicht sind die ermittelten Isothermen in den Abbildung 6 und Abbildung 7 graphisch dargestellt. Anhand der Messwerte ist deutlich zu erkennen, dass die höher aktivierten Aktivkohlen bei hohen Partialdrücken des Lösemittels, also bei höheren Konzentrationen, die größte Adsorptionskapazität aufweisen. Dies ist allgemein bekannt und hängt mit der unterschiedlichen Porenstruktur und der Porenradienverteilung zusammen. Diese Verhältnisse kehren sich aber bei bestimmten Partialdruckverhältnissen, in diesem Fall ungefähr bei  $p/ps = 0,001$ , um. Unterhalb dieser Konzentrationen zeigen die feinporigen Produkte die bessere Abscheideleistung. Dieser Konzentrationsbereich ist für die vorliegende Aufgabenstellung relevant.

Aktivkohle	Typ	D 45/2	D 43/3	D 45/3	D 47/3	A 35/4	C 40/4	D 47/4	D 50/4
Rütteldichte	[g/l]	425	442	451	460	343	387	458	492
BET - Oberfläche	[m <sup>2</sup> /g]	1130	1190	1090	1020	1360	1200	960	900
Beladung	[%]								
p/ps 0,9 = 106,2 g/m <sup>3</sup>		80,1	82,4	72,6	73,7	106,6	88,6	61,5	57,3
p/ps 0,1 = 11,8 g/m <sup>3</sup>		71,5	76,4	67,0	67,3	94,4	78,4	57,3	53,8
p/ps 0,01 = 1,18 g/m <sup>3</sup>		60,3	64,4	59,9	59,5	65,7	63,9	51,9	49,5
p/ps 0,001 = 0,118 g/m <sup>3</sup>		40,9	42,5	44,6	38,7	37,6	41,7	39,8	39,9
p/ps 0,0001 = 0,0118 g/m <sup>3*</sup>		24,0	24,0	29,2	28,2	20,4	25,0	26,6	27,1
Beladung	[g/l]								
p/ps 0,9 = 106,2 g/m <sup>3</sup>		340,4	364,2	327,4	347,1	365,6	342,9	281,7	281,9
p/ps 0,1 = 11,8 g/m <sup>3</sup>		303,9	337,7	302,2	317,0	323,8	303,4	262,4	264,7
p/ps 0,01 = 1,18 g/m <sup>3</sup>		256,3	284,6	270,1	280,2	225,4	247,3	237,7	243,5
p/ps 0,001 = 0,118 g/m <sup>3</sup>		173,8	187,9	201,1	182,3	129,0	161,4	182,3	196,3
p/ps 0,0001 = 0,0118 g/m <sup>3*</sup>		102,0	106,1	131,7	132,8	70,0	96,8	121,8	133,3

\*Pseudogleichgewicht nach 10 Wochen Messzeit

**Tabelle 10:** Messergebnisse der Adsorptionsisothermen

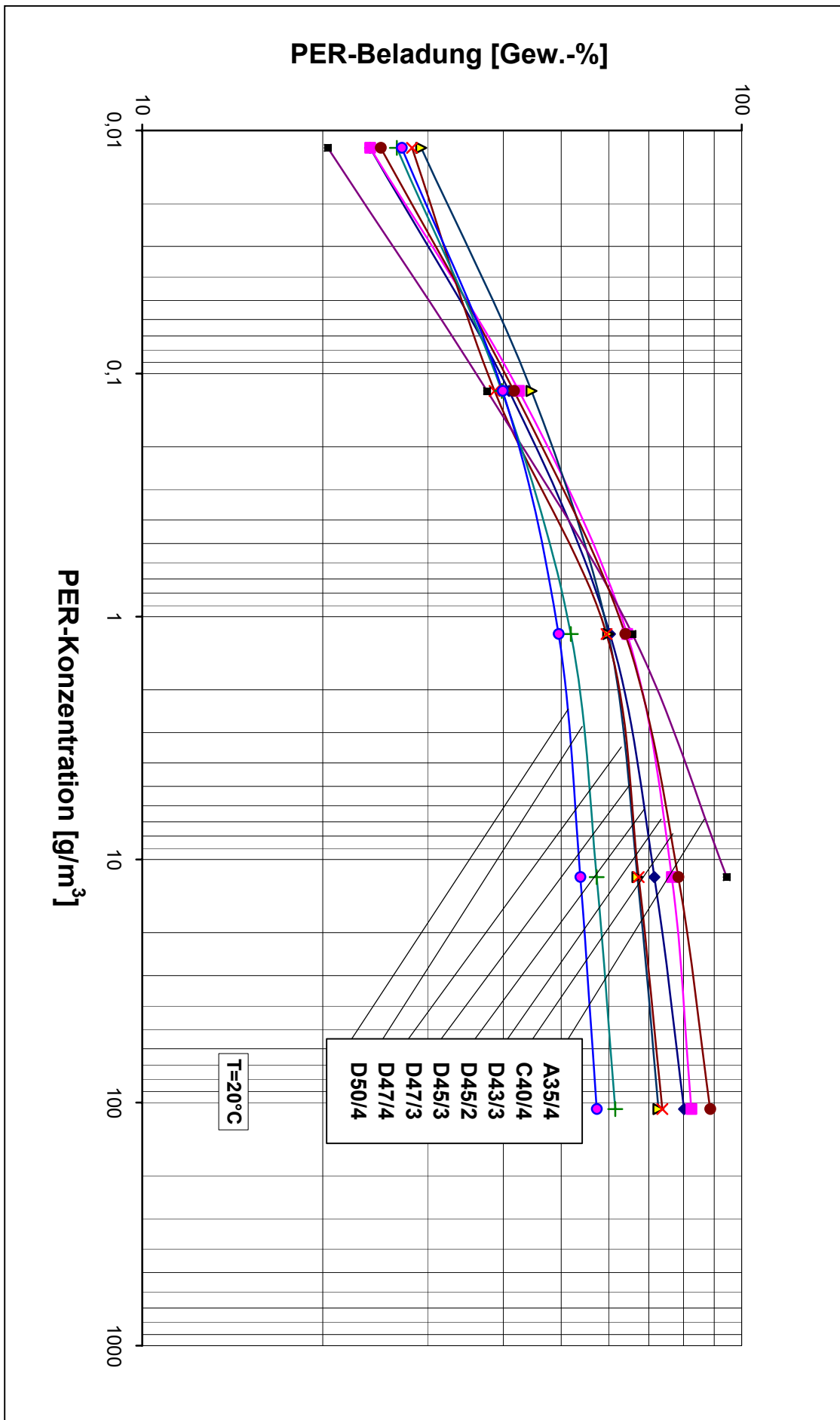


Abbildung 6: Adsorptionsisothermen von Tetrachlorethen (PER) an Aktivkohlen

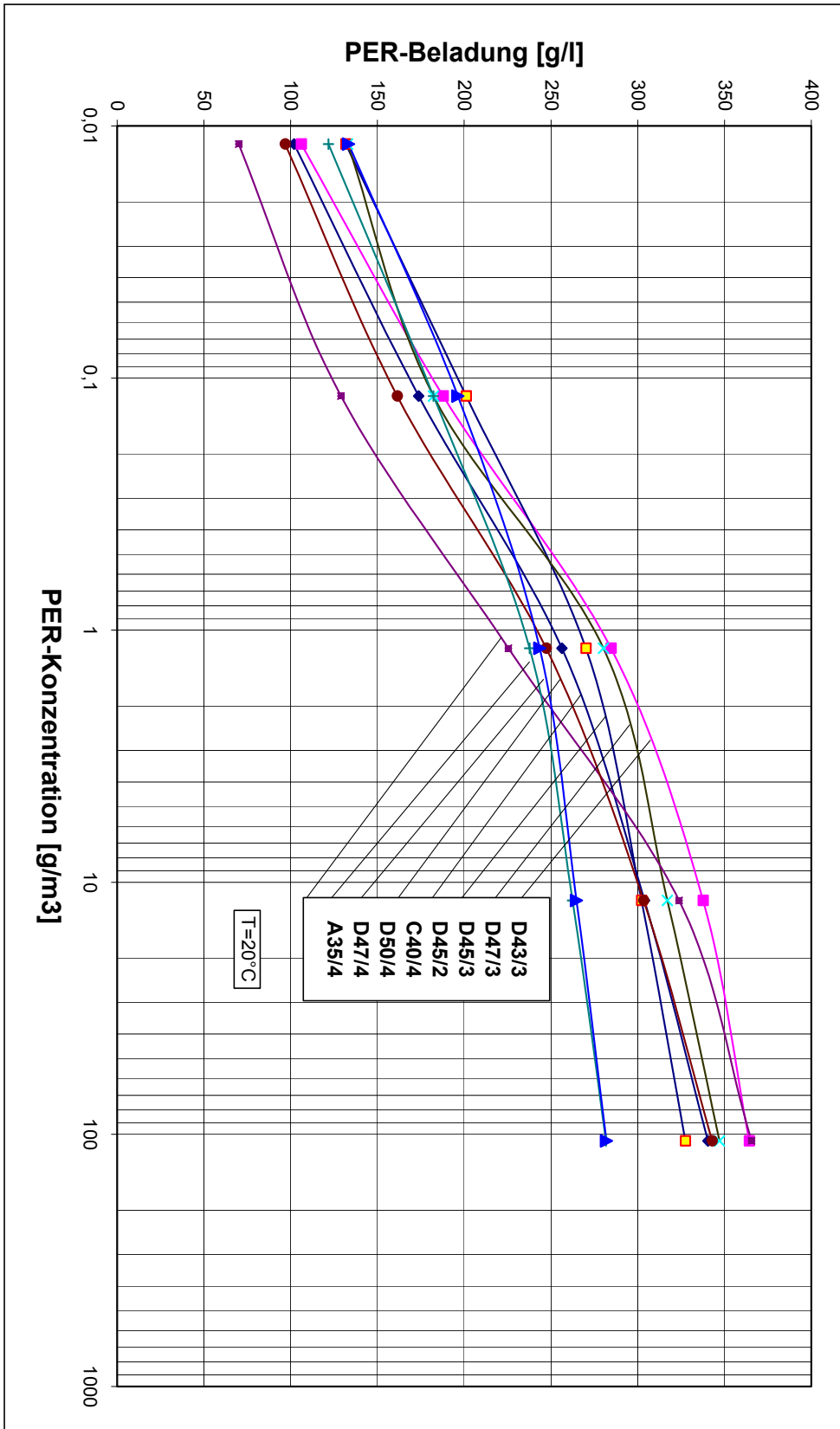


Abbildung 7: Adsorptionsisothermen von Tetrachlorethen (PER) an Aktivkohlen

Die gemessenen PER-Beladungen zeigen, dass die Aktivkohlen D 45/3 und D 47/3 die höchsten Adsorptionskapazitäten aufweisen. Volumenbezogen hat noch die Aktivkohle D 50/4 die gleiche Kapazität. Gegenüber der D 45/3 hat die D 47/3 jedoch den Vorteil, dass diese Aktivkohle aufgrund der geringeren Oberfläche und damit des geringeren Aktivierungsgrades preiswerter ist. Die Aktivkohle D 50/4 hat wegen des größeren Korndurchmessers eine schlechtere Adsorptionskinetik.

Zu dem letzten Messpunkt ( $p/p_s = 0,0001$  bzw.  $c = 11,8 \text{ mg/m}^3$ ) ist anzumerken, dass sich hier selbst nach einer Messzeit von 10 Wochen noch kein Gleichgewicht eingestellt hat. Die Beladung nimmt immer noch leicht ab. Dies hängt zum einen mit der Messmethode zusammen, zum anderen aber auch mit der starken Affinität des PER zur Aktivkohle selbst. Da sich einerseits die Substanz sehr gut adsorbieren lässt, ist umgekehrt die Desorption natürlich auch viel schwieriger.

Dies erklärt auch die Abweichung des letzten Messpunktes bei der graphischen Darstellung der Adsorptionsisotherme an der Aktivkohle D 47/3 (Abbildung 8). Nach der Einstellung des Adsorptionsgleichgewichtes wird sich dieser Punkt des Graphen annähern, aber nicht erreichen. Eingezeichnet wurden zusätzlich noch einige berechnete Isothermenpunkte. Man kann erkennen, dass die Isotherme in ihrem Verlauf leicht nach oben abknickt. Dies entspricht den Erfahrungen, dass sich nämlich bei kleinen Konzentrationen und somit niedrigen Partialdruckverhältnissen die Isothermen in der Auftragung nach Freundlich dem 0-Punkt der y-Achse asymptotisch nähern. Dies ist auch logisch, da nach Beladung der Aktivkohle auch bei sehr kleinen Konzentrationen im Gas die Aktivkohle immer noch ein gewisses Adsorptionsvermögen aufweist.

Trägt man die beiden bei den dynamischen Adsorptionsversuchen gemessenen Aktivkohlebeladungen mit den entsprechenden Konzentrationen in die Graphik ein, so weichen diese etwas von der berechneten Linie ab. Die kleinen Abweichungen nach unten sind mit den unterschiedlichen Adsorptionstemperaturen bei der Isotherme ( $20^\circ\text{C}$ ) und den Versuchen selbst ( $22\text{-}24^\circ\text{C}$ ) zu erklären. Eine höhere Adsorptionstemperatur bedeutet immer eine niedrigere Beladung. Das heißt mit anderen Worten, dass die anhand der Adsorptionsisotherme ermittelten Werte auf die Praxis übertragbar sind. Dies trifft jedoch nur auf die vorgegebenen Bedingungen zu. D.h. Einsatz einer frischen Aktivkohle, eine relative Feuchte von  $< 50 \%$  und eine Adsorptionstemperatur von ca.  $25^\circ\text{C}$ .

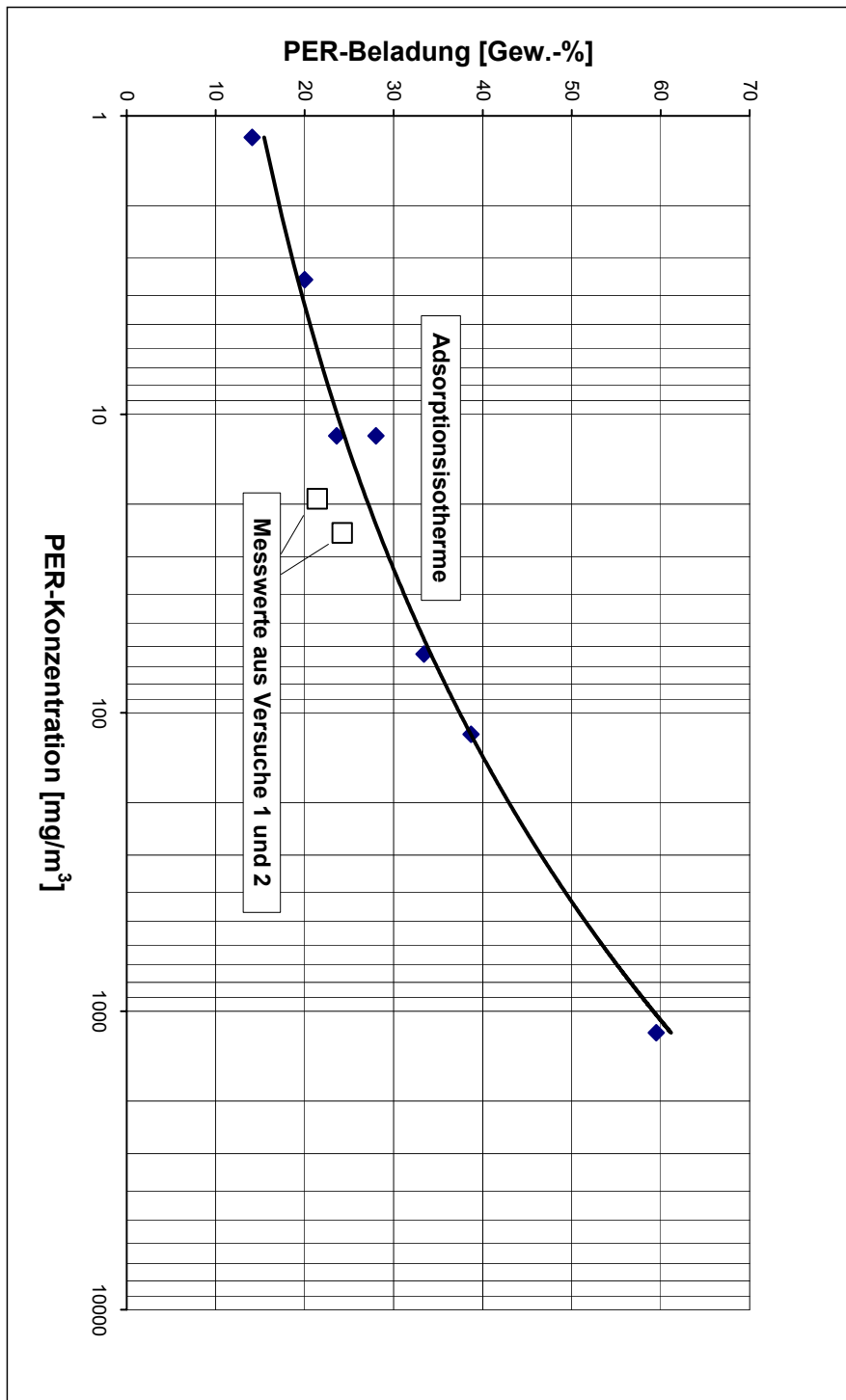


Abbildung 8: Adsorptionsisotherme von Tetrachlorethen (PER) an Aktivkohle D47/3



## 5 Auslegung von Adsorbern

Da die in der Praxis anfallenden Abluftmengen in der Größenordnung von 500 - 2000 m<sup>3</sup>/h liegen und die PER-Konzentration bei 10 - 20 mg/m<sup>3</sup>, sind die beispielhaft ausgeführten Modellrechnungen auf diesen Bereich angewendet worden.

Für die Auslegung der Adsorber sind die gleichen Parameter wie bei den Versuchen (vgl. Tabelle 2) angenommen worden.

Die in den folgenden Beispielen berechneten Anströmflächen sind durch die Strömungsgeschwindigkeit 0,4 m/s und den 2,8 m<sup>3</sup>/h festgelegt.

(3)

$$\text{Anströmfläche (m}^2\text{)} = \frac{\text{Rohgasstrom (m}^3\text{/s)}}{\text{Strömungsgeschwindigkeit (m/s)}}$$

Als Berechnungsgrundlage für die Betriebsmittelverbrauche wird eine wöchentliche Betriebszeit von 55 Stunden angenommen. Bei einer jährlichen Betriebszeit von 50 Wochen ergibt dies eine Laufzeit der Abluftreinigungsanlage von 2.750 Stunden pro Jahr. Diese Zahl wurde für die Ermittlung der Verbräuche bei allen nachfolgenden Beispielen eingesetzt. Für die Kosten der Aktivkohle werden 7,50 DM/kg veranschlagt. Eine Reaktivierung ist aufgrund der hohen Beladungen und damit des hohen Chlorgehaltes nicht möglich. Daher sind in dieser Kalkulation auch die Entsorgungskosten für die beladenen Produkte eingeschlossen.

Beispiel	Rohgasstrom m <sup>3</sup> /h	Anströmfläche m <sup>2</sup>	Aktivkohlemenge	
			m <sup>3</sup>	kg
A	500	0,35	0,35	160
B	800	0,56	0,56	256
C	1000	0,69	0,69	320
D	1500	1,04	1,04	480
E	2000	1,39	1,39	639

**Tabelle 11:** Auslegung von Adsorbern Beispiel A bis E

### 5.1 Modellrechnungen

Die Ergebnisse der einzelnen modellhaft vorgenommenen Berechnungen sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

#### Erläuterungen zu Tabelle 12

##### PER-Fracht (Spalte 4)

Die Frachten des Lösemittels ergeben sich aus dem Rohgasstrom und der PER-Konzentration, multipliziert mit der jährlichen Betriebszeit von 2.750 h.

##### Aktivkohlebeladung (Spalte 5)

Die Aktivkohlebeladungen die maximal erreicht werden können, sind die mit der Adsorptionsisotherme wiedergegebenen Gleichgewichtsbeladungen. Wie die Messungen der Adsorptionsisothermen zeigen, ist bei den geringen Rohgaskonzentrationen mit einer Gleichgewichtseinstellung erst nach mehr als 10 Wochen zu rechnen. Als Berechnungsgrundlage sind die tatsächlich erreichbaren, geringeren, aus

Versuch 1 und 2 ermittelten Aktivkohlebeladungen (vgl. Messwerte aus Versuch 1 und 2 in Abbildung 8) maßgebend. Das bedeutet, dass bei einer Rohgaskonzentration von  $10 \text{ mg/m}^3$  nicht, wie nach der Adsorptionsisotherme erwartet wird mit einer Beladung von 24 % gerechnet werden kann. Zur Berechnung des Aktivkohleverbrauchs wurde deshalb eine Beladung von 15 % zugrunde gelegt.

### Aktivkohleverbrauch (Spalte 6)

Der Aktivkohleverbrauch pro Jahr ergibt sich aus der PER-Fracht, die in jedem Jahr unter den einzelnen Bedingungen anfällt und den zugehörigen erzielbaren Aktivkohlebeladungen.

### Standzeit (Spalte 7)

Die Standzeiten einer Aktivkohlefüllung sind abhängig von der Fracht und werden ermittelt aus dem Aktivkohleverbrauch und der in den Adsorbentien enthaltenen Aktivkohlemenge.

### Kosten (Spalte 8)

Wie bereits erläutert, sind in den veranschlagten Kosten der Aktivkohle die Entsorgungskosten einkalkuliert. Sie werden ermittelt, indem der Jahresverbrauch (Spalte 6) mit den spezifischen Kosten von 7,50 DM multipliziert wird. Daneben sind die Kosten aus dem Gebläse und dem Adsorber zu berücksichtigen. Prinzipiell ist eine Bauausführung in Normalstahl und Edelstahl möglich. Da die Preisunterschiede für eine Ausführung in Normalstahl oder Edelstahl für Anlagen dieser Größenordnung nicht so gravierend sind, sollte aus Korrosionsschutzgründen Edelstahl verwendet werden. Die Kosten für Anlagen in der genannten Größenordnung von  $500 - 2.000 \text{ m}^3/\text{h}$  werden schätzungsweise 10-20.000 DM betragen.

1	2	3	4	5	6	7	8
	Rohgasstrom $\text{m}^3/\text{h}$	Tetrachlorethen (PER)		Aktivkohle			
		Konzentration $\text{mg/m}^3$	Fracht $\text{kg/a}$	Beladung %	Verbrauch $\text{kg/a}$	Standzeit Monate	Kosten $\text{DM/a}$
<b>A</b>	500	10	13,75	12	115	17	863
		20	27,5	20	138	14	1035
<b>B</b>	800	10	22	12	183	17	1373
		20	44	20	220	14	1650
<b>C</b>	1000	10	27,5	12	229	17	1718
		20	55,0	20	275	14	2063
<b>D</b>	1500	10	41,25	12	344	17	2580
		20	82,5	20	413	14	3098
<b>E</b>	2000	10	55,0	12	458	17	3435
		20	110,0	20	550	14	4125

Tabelle 12: Modellrechnungen Beispiel A bis E

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Wie die in der Tabelle 12 angegebenen Standzeiten zeigen, sind diese recht lang, teilweise über 2 Jahre. Man muss jedoch berücksichtigen, dass die Versuche unter idealen Bedingungen durchgeführt wurden, die so in der Praxis nicht erreicht werden können. Als erstes ist hier die Feuchte in der Abluft zu nennen. Diese kann im praktischen Betrieb stark schwanken. Wie bereits erläutert, adsorbiert die Aktivkohle bei höheren relativen Feuchten (> 60 %) auch merklich Wasser. Dies gilt generell für alle Aktivkohletypen und -sorten. Durch diese höhere Wasseraufnahme ändert sich auch das Aufnahmevermögen der Aktivkohle für das PER. Hinzu kommt, dass in den Chemischreinigungen auch noch mit anderen Stoffen, wie beispielsweise Detachiermitteln, gearbeitet wird. Diese gelangen ebenfalls über die abgesaugte Raumluft auf die Aktivkohle und werden adsorbiert, was auch wiederum die Adsorption des PER beeinflusst. Insofern wird sich natürlich auch die Massenübergangszone verlängern. Aufgrund der genannten Einschränkungen sollte daher bei der Auslegung der Adsorber eine Kontaktzeit von mindestens 1 sec zugrundegelegt werden, damit der geforderte Reingaswert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  eingehalten werden kann. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte im Bereich von 0,2 - 0,4 m/s liegen. Dies bedeutet bei einer Kontaktzeit von 1 sec, dass die Schichthöhen 20 - 40 cm im Minimum betragen müssen. Zur Erhöhung der Standzeiten können selbstverständlich längere Aktivkohleschichten eingeplant werden. Dies hat den Vorteil, dass sich die in der Praxis erreichbaren Aktivkohlebeladungen den bei den Versuchen ermittelten Werten annähern. Bei einer zu engen Auslegung ist es unter ungünstigen Umständen möglich, dass nur 50 % der theoretisch möglichen Beladung erreicht werden.

Bei der Konstruktion der Adsorber ist zu bedenken, dass bei liegenden und quer angeströmten Filtern immer die Gefahr von sogenannten Schleichluftströmen besteht. Nach dem Einfüllen der Aktivkohle verdichtet sich die Schicht im Laufe der Zeit. Dadurch entstehen Hohlräume am oberen Ende der Aktivkohleschicht, durch die die Abluft ohne gereinigt zu werden an der Aktivkohle vorbeiströmen kann. Neben einer unregelmäßigen Durchströmung des Filterbetts führt dies zu einer Erhöhung der Reingaskonzentration. Es sind daher immer Filter zu bevorzugen, die von unten nach oben durchströmt werden.

Anhand der ermittelten Grundlagen und verwendeten Basisdaten ist es hiermit möglich, für beliebige in Chemischreinigungen anfallende Abluftströme und PER-Konzentrationen Adsorberauslegungen, Standzeitberechnungen und Kostenabschätzungen vorzunehmen.

Zur Überwachung der Reingaswerte kann die bei den Versuchen verwendete Messmethode eingesetzt werden. Eine kontinuierliche analytische Überwachung wird relativ teuer sein. Da nun aber Informationen über die zu erwartenden Standzeiten vorliegen, können die Zeiträume für eine sporadische Messung sehr gut abgeschätzt werden.

## 6 Übertragung in die Praxis

Ziel der Adsorptionsversuche war es, Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Aktivkohlefiltern zur Abscheidung von PER aus der Abluft von Chemischreinigungen zu ermitteln und die damit verbundenen Kosten abzuschätzen

Die Anforderungen die aufgrund rechtlicher Vorschriften an eine derartige Maßnahme zu stellen sind, wurden bereits früher beschrieben.<sup>1</sup> Sie basieren auf dem Grundsatz der Vorsorge.

Durch die Bestimmung von Adsorptionsisothermen an verschiedenen Aktivkohletypen und durch Berechnungen konnte das für die Aufgabenstellung am besten geeignete Produkt ermittelt werden. Außerdem geben diese Messungen Aufschluss über die zu erwartenden Aktivkohlebeladungen im praktischen Anwendungsfall.

Die dynamischen Adsorptionsversuche in einem Festbettfilter zeigen, dass unter den Randbedingungen wie sie in Chemischreinigungen vorliegen, Reingaswerte von  $< 0,1 \text{ mg PER/m}^3$  problemlos eingehalten werden können. Die Untersuchungsergebnisse dienen damit als Grundlage für die Auslegung derartiger Aktivkohlefilter.

Basierend auf den Ergebnissen der Versuche an der Modellapparatur können Gasabscheider künftig installiert und in Betrieb genommen werden. Bestehende Anlagen können auf eine standzeitsichere Auslegung überprüft und falls erforderlich nachgerüstet werden.

## 6.1 Beispiel aus der Praxis

### 6.1.1 Auswahl des Chemischreinigungsbetriebes

Ein Vergleich der verschiedenen Ausführungen der in den raumlufttechnischen Anlagen von Chemischreinigungsanlagen integrierten Gasabscheider zeigte, dass lediglich eine Ausführung den mit der Ausnahmegenehmigung festgelegten Vorsorgerichtwert, für PER im Reingas von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  über die Standzeit einhalten konnte.<sup>1</sup> Hierbei handelt es sich um einen zweistufigen Aktivkohleadsorber, bestehend aus einem Aktivkohleschüttfilter als Vorfilter und einer parallelen Anordnung von Ringfiltern als Hauptfilter.

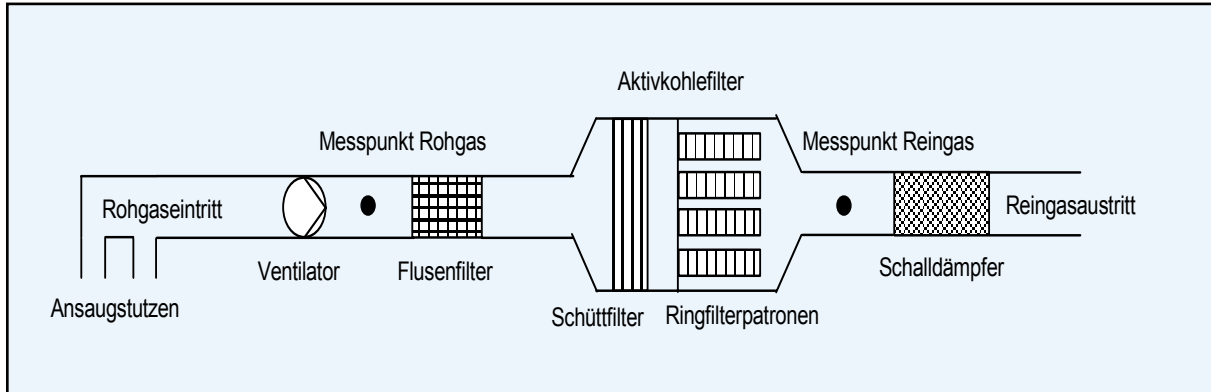


Abbildung 9: RLT-Anlage mit zweistufigem Gasabscheider

Bei der hier dargestellten Version beinhaltet der Schüttfilter 30 kg Aktivkohle, die 32 parallel angeordnete Ringfilterpatronen<sup>5</sup> mit je 2 kg Füllgewicht nachgeordnet sind. Eine Patrone besteht aus einem einseitig geöffneten, doppelwandigen Hohlzylinder. Die durchströmte Aktivkohleschicht wird durch die gasdurchlässige innere und äußere gelochte Mantelfläche der Patrone umschlossen. Das einströmende Rohgas strömt vom Inneren der Patrone durch die, zwischen den beiden Zylindern angeordnete Aktivkohle radial nach außen (siehe Abbildung 10). Mit der Betriebsdauer verbreitert sich die Adsorptionsfront. Ausgehend von der gegebenen Anströmfläche, der inneren Mantelfläche mit dem Radius  $r_i$ , verbreitert sie sich maximal um den Faktor  $(r_a - r_i)/r_i$ .

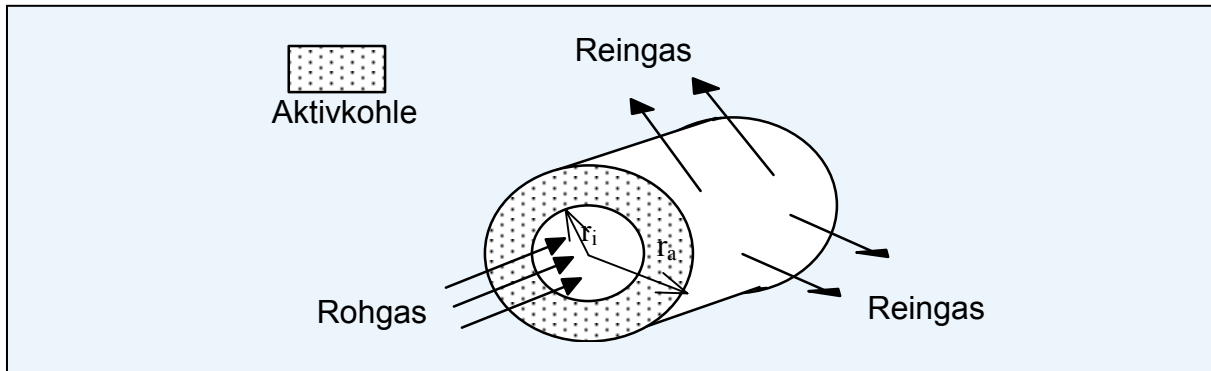


Abbildung 10: Filterpatrone vom Typ CAMCARB 2600 der Fa. CAMFIL

Die Aktivkohlemenge des Gasabscheiders muss so bemessen sein, dass eine Kontaktzeit der mit PER belasteten Abluft von mindestens 0,5 s gewährleistet wird:

$$(4) \quad V_{\text{Aktivkohle}} \geq t_{\text{Kontakt}} \cdot v_{\text{Raumluft}} \cdot 3,6^{-1}$$

$V_{\text{Aktivkohle}}$  Volumen Aktivkohle in Liter (l)

$t_{\text{Kontakt}}$  Kontaktzeit der Abluft an Aktivkohle, beträgt 0,5 s

$v_{\text{Raumluft}}$  Rohgasstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$

Der Aktivkohlefilter muss so dimensioniert sein, dass eine Anströmgeschwindigkeit des Rohgases beim Eintritt in die Aktivkohleschicht von 0,4 m/s nicht überschritten wird. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung,

$$(5) \quad F_{\text{quer}} \geq \frac{V_{\text{Raumluft}}}{v_{\text{quer}} \cdot 3600}$$

$F_{\text{quer}}$  Anströmfläche der Aktivkohleschicht;  $v_{\text{quer}} = 0,4 \text{ m/s}$

Alle Angaben zu Auslegung und Betrieb des Abscheiders finden sich im Anhang.

## 6.1.2 Roh- und Reingasmessungen an einem zweistufigen Gasabscheider

In Abbildung 9 sind die Messpunkte für die Roh- und Reingasmessungen gekennzeichnet. Zwischen Schüttfilter und Ringfiltersystem konnte bauartbedingt kein Messpunkt eingerichtet werden. Um den Beladungszustand des Schüttfilters zu ermitteln, wurde das Ringfiltersystem demontiert und die Reingaskonzentration nach dem Schüttfilter bis zum Durchbruch gemessen. Aus Abbildung 3 ist zu ersehen, dass die nutzbare Adsorberlänge um die Länge der MÜZ reduziert ist. Veranschlagt man  $H_{\text{MÜZ}} = 7$  bei Rohgaskonzentrationen von 20-25 mg/m<sup>3</sup> cm und für erreichbare Beladungen von 20-25 %, so berechnet man für die Beladung beim Durchbruch (Durchbruchbeladung) 13-16 %. Die Reingaskonzentration beträgt dann mit 0,01 mg/m<sup>3</sup> (Nachweisgrenze) aber bereits mehr als 10 % des Vorsorgerichtwertes von 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Vorsorglich wurde daher zur Dimensionierung der Abscheider bei einer zugrunde gelegten Rohgaskonzentration von 10 mg/m<sup>3</sup> von einer theoretischen Durchbruchbeladung ausgegangen, die 40 % der erreichbaren Gleichgewichtsbeladung entspricht. Diese Vorgehensweise wird durch die vorliegenden Messergebnisse bestätigt. Danach sollte die Auslegung und der Betrieb von Aktivkohleabscheidern so erfolgen, dass zum Ende der Standzeit eine PER-Beladung von maximal 10 % erreicht ist.

In Abbildung 11 sind die Messergebnisse der Roh- und Reingasmessungen am Gasabscheider dargestellt. Betrachtet man die Ergebnisse der Messungen aus dem Betrieb mit Schüttfilter und Ringfilter vom 18.07.98-24.03.99, so erkennt man, dass der Durchbruch nach etwa 6 Monaten Betriebszeit eintritt. In Übereinstimmung mit dem berechneten Wert ergibt sich aus der Bilanz der aufgenommenen PER-Menge eine Durchbruchbeladung von 13 %:

$$1050 \text{ h} \times 760 \text{ m}^3/\text{h} \times 15 \text{ mg}/\text{m}^3 = 12 \text{ kg PER}$$

Bezogen auf die eingesetzte Aktivkohle (Schüttfilter 30 kg + Ringfilter 64 kg = 94 kg) beträgt die Durchbruchbeladung nach 6 Monaten 13 %.

Die Lösemittelbilanz für die insgesamt im untersuchten Zeitraum (18.07.98-24.03.99) der Messreihe I von der Aktivkohle aufgenommene PER-Menge ergibt:

$$1403 \text{ h} \times 760 \text{ m}^3/\text{h} \times 15 \text{ mg}/\text{m}^3 = 16 \text{ kg PER}$$

Bezogen auf die eingesetzte Aktivkohle (Schüttfilter 30 kg + Ringfilter 64 kg) beträgt die Durchbruchbeladung nach 8 Monaten 17 %.

Der Vorsorgerichtwert für die PER-Konzentration im Reingas von 0,1 mg/m<sup>3</sup> ist mit den gemessenen Werten von 0,194 und 0,186 mg/m<sup>3</sup> am 24.03.99 überschritten

Nach Beendigung der Messreihe I am 24.03.99 und der Messreihe II am 13.07.99 wurde der Schüttfilter und der Ringfilter im November 1999 neu befüllt. Am 01.09.00 war der Gasabscheider insgesamt 1740h in Betrieb. Die aufgenommene PER-Menge betrug demnach:

$$1740 \text{ h} \times 760 \text{ m}^3/\text{h} \times 15 \text{ mg}/\text{m}^3 = 20 \text{ kg PER}$$

Bezogen auf die eingesetzte Aktivkohle (Schüttfilter 30 kg + Ringfilter 64 kg = 94 kg) ergibt sich eine Durchbruchbeladung nach 10 Monaten von 21 %.

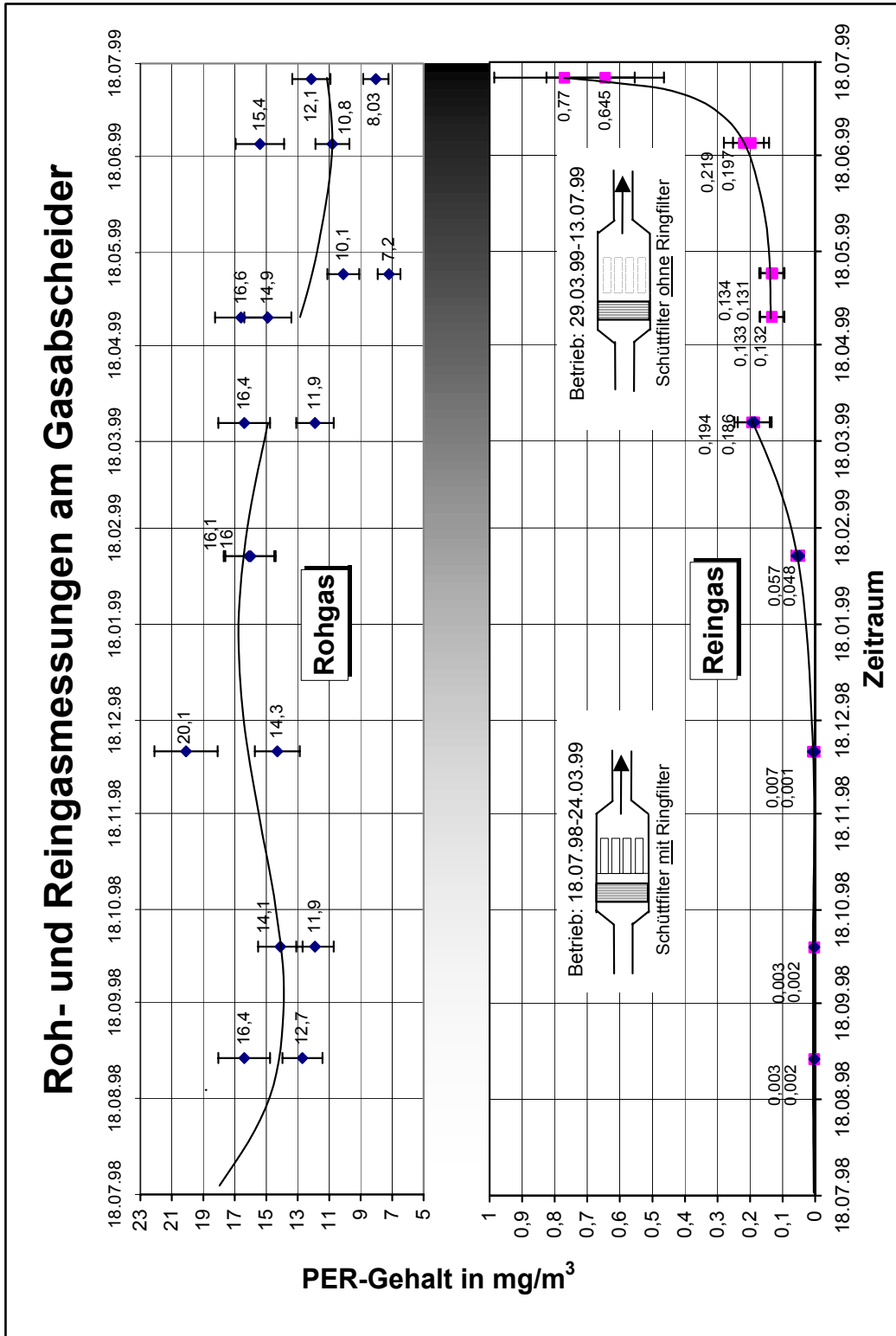
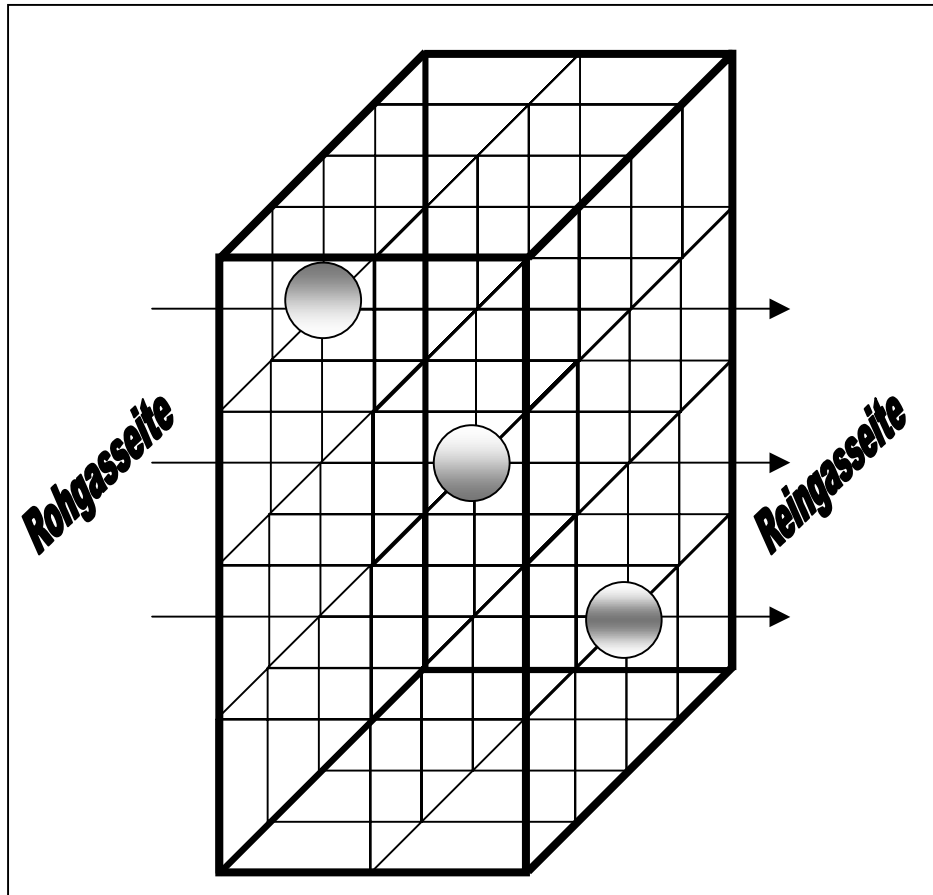


Abbildung 11:

Langzeituntersuchungen zum Durchbruchverhalten eines 2-stufigen Aktivkohleabscheiders

## 6.2 Thermogravimetrische Analyse

Zur Kontrolle wurden am 02.09.00 Proben beladener Aktivkohle einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) unterzogen. Insgesamt wurden 4 Proben der beladenen Aktivkohle, und eine Probe der Frischkohle untersucht. 1 Probe wurde dem Ringfilter entnommen, 3 Proben wurden dem Schüttbetfilter entnommen. Die Lage der dem Schüttbetfilter entnommenen Proben ist nachfolgend abgebildet:



**Abbildung 12:** Lage und Anströmung der Aktivkohleproben im Schüttbetfilter

Die Aktivkohle im Schüttbetfilter war 3 Monate, die in der Filterpatrone war 10 Monate im Einsatz. An den beladenen Aktivkohlen sind folgende Messungen durchgeführt worden:

- \* Ermittlung der Gesamtbeladung durch eine Thermogravimetrische Analyse (TGA)
- \* Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl-Fischer
- \* Ermittlung der PER-Beladung mittels AOX-Messungen

Die Analyse der neu eingefüllten Aktivkohle ergab folgende Werte:

Aktivkohle	Typ Norit RB 3
Rütteldichte	466 g/l
Aschegehalt	5,9 %
Wassergehalt	10,3 %
Benzolbeladung	
p/ps=0,1:	38,5 %
p/ps=0,9:	36,5 %

**Tabelle 13:** Daten der eingesetzten Aktivkohle

Die Messungen an den beladenen Aktivkohlen führte zu folgendem Ergebnis:

	Gesamtbeladung %	Wasserbeladung %	PER-Beladung (aus AOX) %	Sonstige Beladung %
<b>Probe 1</b> <b>Schüttbett vorne</b>	23,4	2,2	17,3	3,9
<b>Probe 2</b> <b>Schüttbett Mitte</b>	24,4	2,4	16,8	5,2
<b>Probe 3</b> <b>Schüttbett hinten</b>	21,5	6,5	15,0	
<b>Probe 4</b> <b>Filterpatrone</b>	9,5	8,9	0,3	0,3

**Tabelle 14:** Ergebnisse der Messungen aus der Thermogravimetrischen Analyse (TGA)

Die PER-Beladung wurde aus dem AOX-Wert berechnet und ist bei allen Proben in etwa gleich hoch. Nach diesen Messwerten ist die Aktivkohle nahezu bis zum Gleichgewicht beladen, da ansonsten die Beladungen an der Eingangs- bzw. Ausgangsseite des Filters größere Differenzen aufweisen müssten. Die Wasserbeladung ist bei den Aktivkohlen in der vorderen und mittleren Aktivkohleschicht sehr gering. Das adsorbierte Wasser wird hier vom PER verdrängt.

Die Aktivkohle in der Filterpatrone hat erwartungsgemäß eine höhere Wasserbeladung, da der PER-Gehalt hier noch sehr gering ist. Dies bedeutet, dass das PER bislang nahezu vollständig von dem Schüttfilter zurückgehalten wurde.

Die in Tabelle 14 mit „Sonstige Beladung“ angegebenen Werte sind rechnerisch durch Differenzbildung aus Gesamtbeladung und Wasser- bzw. PER-Beladung ermittelt worden. Hierbei handelt es sich vermutlich um Stoffe, die sich ebenfalls in der Raumluft der Reinigung befanden und abgeschieden wurden. Sie sind z.T. im Reinigungsmittel enthalten und rühren aus dem Reinigungs- und Trocknungsprozess her. Sie können aber auch aus der Vorreinigung und Nachbehandlung von Textilien z.B. bei der Detachur oder beim Dämpfen freigesetzt werden. Dabei handelt es sich um Detachiermittel, Imprägniermittel, Reinigungsverstärker und andere Hilfsstoffe:

Stoff	CAS-Nr.
2 - (2 -Butoxyethoxy)ethanol	112-34-5
Fettsäurediethanolamid	68425-47-8
Diisooctylsulfosuccinat, Natriumsalz	577-11-7
Fettalkoholethoxylat	69011-36-5
Alkylbenzolsulfonate	68411-30-3
Benzylalkohol	100-51-6
Isoparaffinisches Kohlenwasserstoffgemisch	64742-48-9
Phenylmonoethylenglykolether	122-99-6
Phosphorsäure	7664-38-2
Ammoniumhydrogendifluorid	1341-49-7
Mischung aus Kunstharz und Polysiloxanen (Wirkstoffe)	
Propan (Treibmittel)	74-98-6
Butan (Treibmittel)	106-97-8
4-Methylpentan-2-on	828-0006

**Tabelle 15:** Sonstige Beladung der Aktivkohle neben PER und Wasser



## 7 Anhang

### Abbildungen

ABBILDUNG 1:	VERSUCHSAUFBAU ZUR DURCHFÜHRUNG DER ADSORPTIONSVERSUCHE .....	8
ABBILDUNG 2:	DURCHBRUCHSKURVEN AUS VERSUCH 1 .....	12
ABBILDUNG 3:	AUSBILDUNG EINER MASSENÜBERGANGSZONE (MÜZ) IN EINEM DURCHSTRÖMTEN FESTBETTADSORBER .....	13
ABBILDUNG 4:	ADSORPTIONSISOTHERME VON WASSERDAMPF AN AKTIVKOHLE D47/3 .....	15
ABBILDUNG 5:	DURCHBRUCHSKURVEN AUS VERSUCH 2 .....	17
ABBILDUNG 6:	ADSORPTIONSISOTHERMEN VON TETRACHLORETHEN (PER) AN AKTIVKOHLEN .....	20
ABBILDUNG 7:	ADSORPTIONSISOTHERMEN VON TETRACHLORETHEN (PER) AN AKTIVKOHLEN .....	21
ABBILDUNG 8:	ADSORPTIONSISOTHERME VON TETRACHLORETHEN (PER) AN AKTIVKOHLE D47/3 .....	23
ABBILDUNG 9:	RLT-ANLAGE MIT ZWEISTUFIGEM GASABSCHIEDER .....	27
ABBILDUNG 10:	FILTERPATRONE VOM TYP CAMCARB 2600 DER FA. CAMFIL .....	27
ABBILDUNG 11:	LANGZEITUNTERSUCHUNGEN ZUM DURCHBRUCHSVERHALTEN EINES 2-STUFIGEN AKTIVKOHLEABSCHIEDERS .....	29
ABBILDUNG 12:	LAGE UND ANSTRÖMUNG DER AKTIVKOHLEPROBEN .....	30

### Tabellen

TABELLE 1:	ABMESSUNGEN DES KLEINTECHNISCHEN ADSORBERS .....	7
TABELLE 2:	VERSUCHSPARAMETER .....	9
TABELLE 3:	CHEMISCH-PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN VON PER .....	10
TABELLE 4:	VERSUCHSDATEN .....	10
TABELLE 5:	ERMITTELTE STANDZEITEN BEI VERSUCH 1 .....	14
TABELLE 6:	AKTIVKOHLEBELADUNGEN AUS DEN TG-ANALYSEN ZU VERSUCH 1 .....	14
TABELLE 7:	ERMITTELTE STANDZEITEN BEI VERSUCH 2 .....	16
TABELLE 8:	AKTIVKOHLEBELADUNGEN AUS VERSUCH 2 .....	18
TABELLE 9:	DATEN ZUR ERMITTLUNG DER BETRIEBSZEIT .....	18
TABELLE 10:	MESSERGEBNISSE DER ADSORPTIONSISOTHERMEN .....	19
TABELLE 11:	AUSLEGUNG VON ADSORBERN BEISPIEL A BIS E .....	24
TABELLE 12:	MODELLRECHNUNGEN BEISPIEL A BIS E .....	25
TABELLE 13:	DATEN DER EINGESETZTEN AKTIVKOHLE .....	30
TABELLE 14:	ERGEBNISSE DER MESSUNGEN AUS DER THERMOGRAVIMETRISCHEN ANALYSE (TGA) .....	31
TABELLE 15:	SONSTIGE BELADUNG DER AKTIVKOHLE NEBEN PER UND WASSER .....	31
TABELLE 16:	ABMESSUNGEN UND BETRIEBSDATEN DES GASABSCHIEDERS .....	33
TABELLE 17:	ANALYSENDATEN DER BELADENEN AKTIVKOHLE (NORIT RB3) .....	33
TABELLE 18:	KENNDATEN DER EINGESETZTEN AKTIVKOHLE .....	33

## Auslegungs- und Betriebsdaten zum Praxisbeispiel

	Aussenmaße cm	Anström-fläche m <sup>2</sup>	Volumen- strom m <sup>3</sup> /h	Anström- geschwindigkeit m/s	Aktivkohle-menge kg
Filtergehäuse	70 x 130 x 63		800 (1000)		
Flusenfilter	69 x 69 x 63				
Schüttfilter	25 x 117 x 56	0,65		0,34 (0,43)	30+64=94
Patronen	45 x 14,5	1,20		0,19 (0,23)	

Tabelle 16: Abmessungen und Betriebsdaten des Gasabscheiders

## Entnahme von Aktivkohleproben am 02.09.2000 Beladung in %

	Gesamt	Wasser	PER (aus AOX)	Sonstige
Probe 1 Schüttbett vorn	23,4	2,2	17,3	3,9
Probe 2 Schüttbett mitte	24,4	2,4	16,8	5,2
Probe 3 Schüttbett hinten	21,5	6,5	15,0	
Probe 5 Filterpatrone	9,5	8,9	0,3	0,3

Tabelle 17: Analysendaten der beladenen Aktivkohle (Norit RB3)

Aktivkohle Typ Norit RB 3	
Rütteldichte	466 g/l
Aschegehalt	5,9 %
Wassergehalt	10,3 %
Benzolbeladung	
P/ps=0,1:	38,5 %
p/ps=0,1:	36,5 %

Tabelle 18: Kenndaten der eingesetzten Aktivkohle

# Index

## Adsorptionsversuche

Adsorptionsgeschwindigkeit .....	11
<b>Adsorptionsisotherme</b> .....	19
PER an Aktivkohle .....	20, 23
Wasserdampf an Aktivkohle D47/3 .....	15
<b>Aktivkohle</b> .....	10
Adsorptionskapazität .....	19, 22
Gleichgewichtsbeladung .....	7, 9, 14, 24
PER-Beladung .....	14, 18
Standzeit .....	14, 25
Wasserbeladung .....	14, 15, 18, 31
<b>Analytik</b> .....	10
Nachweisgrenze .....	10
Thermowaage .....	14
<b>Auslegung von Adsorbentien</b> .....	24
Betriebskosten .....	16, 26
Grenzwert .....	7
Kontaktzeit .....	26, 27
Kosten .....	24, 25
Massenübergangszone .....	26
Modellrechnungen .....	24, 25
Standzeit .....	25
Durchbruchskurven .....	11
Massenübergangszone .....	11, 13
Messverfahren .....	10
Modelladsorber .....	7
Parameter .....	9
Probenvorbereitung .....	9
Schwellwertverfahren .....	11
Versuchsaufbau .....	7
Versuchsbedingungen .....	9
Zonenmodell .....	11

## Praxisbeispiel

<b>Aktivkohle</b>	
Messungen an beladener Aktivkohle .....	18, 19
PER-Beladung .....	22
Sonstige Beladung .....	31
Wasserbeladung .....	31
<b>Aktivkohleadsorber</b> .....	27
Durchbruchbeladung .....	28
Kontaktzeit .....	26
Lösemittelbilanz .....	28
Massenübergangszone .....	26
Ringfilter .....	27
Schüttfilter .....	27
<b>Anforderungen</b> .....	26, 36, 38
Auslegungs- und Betriebsdaten .....	33
Bilder aus der Chemischreinigung .....	35, 36, 37

## Bilder aus der Chemischreinigung



**Bild 1:** Rohgasabscheider



**Bild 2:** Schüttfilter, geöffnet



**Bild 3:** Ringfiltersystem ohne Aktivkohlepatronen



**Bild 4:** Ringfiltersystem mit Aktivkohlepatronen



**Bild 5:** Abluffführung in der Chemischreinigung



**Bild 6:** Mündung des Abluffrohres, Reingasseite

## Literatur

- 1 Anforderungen an raumluftechnische Maßnahmen mit Gasabscheidung in Chemischreinigungen, Landesumweltamt NRW, Merkblätter Nr. 19, Essen 1999 (Arbeitsprogramm zum Vollzug der 2. BImSchV)
- 2 Bericht zum Praktikum im Landesumweltamt NRW im Rahmen der Ausbildung zum Umweltmanagementexperten, Thema: Anforderungen an raumluftechnische Maßnahmen mit Gasabscheidebetrieb in Chemischreinigungen zur Reduzierung der PER-Konzentration abgesaugter Raumlufte als Ersatzmaßnahme zur Ableitung in den freien Luftstrom gemäß § 14 der 2. BImSchV. Dr. Claus Günther, Dr. Dieter Menge
- 3 Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen, Staatliches Umweltamt Köln, Dez. 32-33, Mess- und Prüfdienst, Klaus Hoffmann
- 4 Begleitende messtechnische Erfolgskontrolle bei der Sanierung einer Textilreinigungsanlage, Landesumweltamt NRW, Materialien Nr. 16, Essen 1995
- 5 CAMCARB(r) mit FC-CC-Gehäuse der Fa. CAMFIL GmbH Reinfeld

