

# Inhaltsverzeichnis

I.	Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken .....	02
II.	Verzeichnis der Tafeln .....	03
III.	Verzeichnis der verwendeten Begriffe, Abkürzungen und Definitionen.....	04
1.0	Zusammenfassung.....	05
2.0	Einleitung .....	06
2.1	Ausgangssituation, Stand der Technik.....	09
2.2	Projektziel .....	11
3.0	Hauptteil.....	12
3.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte, der angewandten Methoden und der erzielten Ergebnisse.....	12
3.1.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte .....	12
3.1.2	Darstellung der angewandten Methoden .....	14
3.1.3	Darstellung der tatsächlich erzielten Ergebnisse .....	21
3.2	Diskussion der Ergebnisse.....	21
3.3	Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse .....	22
3.3.1	Ökologische Bewertung .....	22
3.3.2	Technologische Bewertung .....	23
3.3.3	Ökonomische Bewertung .....	24
3.4	Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse .....	26
4.0	Fazit .....	27
5.0	Literaturverzeichnis .....	28

## I. Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken

---

Abb. 1	Seite 09	= Adsorption von LM an Aktivkohlefiltern
<hr/>		
Abb. 2	Seite 10	= Beispiel einer vorgeschriebenen Kontaktwasserreinigung
<hr/>		
Abb. 3	Seite 15	= Edelstahlcontainer zur Rückgewinnung von Lösemitteln aus Altmaschinen
<hr/>		
Abb. 4	Seite 16	= Rückansicht des Containers nach Abbildung 3 mit Aktivkohle-Filtern
<hr/>		
Abb. 5	Seite 17	= Versuchsaufbau mit den beiden Aktivkohlebehältern und den Wasserabscheidern vorne rechts, die in Serie geschaltet sind.
<hr/>		
Abb. 6	Seite 18	= Verfahrensprinzip zur Desorption und Rückgewinnung von LM aus Altmaschinen mithilfe des Containers nach Abbildung 3
<hr/>		
Abb. 7	Seite 19	= Vorläufige Steuerung der Anlage zur indirekten Desorption, für die Dauer der Versuche integriert in die Steuerung der Dekontaminationsbox
<hr/>		
Abb. 8	Seite 20	= Vier-Kanal-Gas-Photometer mit Steuerungsfunktion zur Überwachung der Konzentration von LM-Gasen
<hr/>		
Abb. 9	Seite 23	= Einfluss der Temperatur auf das Adsorptionsvermögen (Beladehöhe) eines Aktivkohlefilters

---

## II. Verzeichnis der Tafeln

---

Tafel 1      Seite 06 = Quellvermögen wichtiger Textilfasern

---

Tafel 2      Seite 07 = Physikalische Eigenschaften von Tetrachlorethen

---

Tafel 3      Seite 25 = Erwartete Energie- und Kosteneinsparung

---

### III. Verzeichnis der verwendeten Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

€	=	Euro
€/a	=	Kosten pro Jahr
€/kWh	=	Kosten je Kilowattstunde
µm	=	10 <sup>-6</sup> m
AP	=	Arbeitspaket
AZ	=	Aktenzeichen
BImSchV	=	Bundesimmissionsschutz-Verordnung
cdm <sup>3</sup>	=	Kubikdezimeter = Liter
cm <sup>2</sup>	=	Flächenmaß
CO <sub>2</sub>	=	Kohlendioxid
d	=	Tag
DBU	=	Deutsche Bundesstiftung Umwelt in 49090 Osnabrück
g/cm <sup>3</sup>	=	Luftbelastung in Gramm je Kubikzentimeter Raumluft
g/l	=	Gramm pro Liter; Konzentration eines Schadstoffs in einer Flüssigkeit
GWh/a	=	Gigawattstunden pro Jahr
h	=	Stunde
J, kJ	=	Joule bzw. Kilojoule, Energieeinheit
K	=	Kelvin; absolute Temperatur
kg	=	Kilogramm
kW	=	Kilowatt
kWh	=	Kilowattstunde
kWh/a	=	Kilowattstunden pro Jahr
KWL	=	Kohlenwasserstoffe
l/h	=	Liter/Stunde als Maß für einen Durchfluss
LM	=	Lösemittel
m <sup>3</sup>	=	Kubikmeter
MAK	=	Maximale Arbeitsplatz - Konzentration eines Schadstoffes
mg/l	=	Milligramm pro Liter; Konzentration eines Schadstoffs in einer Flüssigkeit
mg/m <sup>3</sup>	=	Konzentration eines Schadstoffs im Kubikmeter Luft
Ø	=	Durchmesser
ppm	=	parts per million
TCE	=	Tetrachlorethen (C <sub>2</sub> CL <sub>4</sub> )

# Vermeiden von Umweltbelastungen bei der Desorption von Aktivkohlefiltern in Reinigungsmaschinen (Indirektes Desorptionsverfahren)

## 1.0 Zusammenfassung

Reinigungsmaschinen zur Textilreinigung, arbeiten mit Lösemitteln (LM). Wichtige Reinigungsmedien sind einfache und chlorierte Kohlenwasserstoffe, meistens  $C_2CL_4$ , Handelsname Tetrachlorethen (TCE). Um den Austritt vergaster Anteile der Lösemittel, vor allem bei Verwendung von TCE, entsprechend der 2. BIMSCH zu verhindern, wird die Abluft über Aktivkohlefilter geleitet. Umweltprobleme entstehen bei der Desorption dieser Aktivkohle, da sie in Reinigungsmaschinen allgemein mittels Dampf erfolgt. Die Folge ist, dass das Adsorbat nach der Desorption als Wasser-Lösemittelgemisch vorliegt. Dies bedingt vor allem bei Verwendung von TCE weitere, aufwendige Trennverfahren entsprechend den gesetzlichen Vorschriften, um das mit TCE belastete Kontaktwasser soweit zu reinigen, dass es abgeleitet werden kann. Zur Separation muss erneut Aktivkohle eingesetzt werden, sodass praktisch eine Endlosschleife von Adsorption ↔ Desorption mit hyperbolischem Verlauf der LM-Anteile entsteht. Ein zusätzlicher Energieverbrauch entsteht dadurch, dass die Aktivkohle nach jeder Dampf-Desorption mit Heißluft getrocknet werden muss.

Dem Vorhaben liegt die Idee zugrunde, die Vermischung von Lösemitteln, insbesondere von TCE, mit Wasser als Folge der Desorption von Aktivkohle-Filtern dadurch zu vermeiden, dass die Desorption nicht mehr mit Wasserdampf sondern durch eine indirekte Beheizung oder mit Heißluft erfolgt. Nur dann kann die Vermischung des Adsorbens mit Wasserdampf bzw. Wasser und die Entsorgung des entstehenden Kontaktwassers vermieden werden. Dazu wurde ein geeigneter Filterbehälter entwickelt, bei dem die erforderliche Heizenergie durch Heißluft aufgebracht wird. Das bei der Desorption austretende LM-Gas wird abgesaugt, in dem ohnehin in jeder Reinigungsmaschine vorhandenen Kondensator verflüssigt und dem LM-Tank der Reinigungsmaschine zugeführt. Da die Trocknung der Aktivkohle dadurch entfällt, wird zusätzlich eine Energieeinsparung von etwa 40% erreicht. Eine weitere Energieeinsparung wurde dadurch erzielt, dass die Desorption nicht automatisch nach jedem Reinigungsprozess, sondern nur nach Bedarf je TCE-Gehalt des Reingases eingeleitet wird.

Das FuE-Projekt wurde durch die **Deutsche Bundesstiftung Umwelt** (DBU) unter dem **AZ 32 310/01-21** gefördert.

## 2.0 Einleitung

Zum Waschen von Textilien verfügt in der Zwischenzeit beinahe jeder Haushalt über eine Waschmaschine. Allerdings können nicht alle Textilien gewaschen werden. Gründe dafür sind außer der Art der Verschmutzung vor allem die verwendeten Fasern, die in Wasser durch Hydratation unterschiedlich quellen und dadurch zum Verzug der Textilien, insbesondere bei Mischverarbeitung, führen können. Außerdem wird die Gebrauchsdauer der Textilien durch Waschen reduziert.

Textilfaser	Quellvermögen in %
Viskose	115
Baumwolle	43
Wolle	39
Seide	31
Polyamid (PA)	11

Tafel 1: Quellvermögen wichtiger Textilfasern in Wasser

Gerade hochwertige Textilien wie Damenkostüme, Anzüge, Mäntel bestehen aus verschiedenen Stoffarten, die unterschiedlich quellen, wodurch die Gefahr besteht, dass die Kleidungsstücke beim Waschen ihre Form und auch ihre Farbe verlieren. Weitere Anwendung findet die chemische Reinigung in der Industrie, bei Hoteltextilien und auf Kreuzfahrtschiffen.. Ferner ist Berufskleidung zu nennen, die oft mit öligen oder fettartigen Substanzen der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie, der Luftfahrt, der Metallindustrie und ähnlicher Berufszweige verunreinigt ist. In diesen Fällen muss mit Lösemitteln gereinigt werden, was deshalb als „chemische Reinigung“ bezeichnet wird. Gebräuchlichstes Lösemittel ist Tetrachlorethen (TCE), früher als Perchlorethylen oder kurz als „Per“ bezeichnet. Wichtige Kennwerte zur Anwendung von TCE sind:

Bezeichnung	Wert	Einheit
Dichte	1,624	g/cm <sup>3</sup>
MAK-Wert	345	mg/l
Wasserlöslichkeit bei 20°C	160	mg/l
max. Abwasserbelastung	0,5	mg/l
Grenzwert in der Abluft von Adsorptionsanlagen Angabe gemäß der 2. BImSchV	20 3	mg/m <sup>3</sup> ppm
Siedepunkt	121	°C
Verdampfungswärme	209,8	kJ/kg
Spezifische Wärme	0,92	kJ/kg K

Tafel 2: Physikalische Eigenschaften von Tetrachlorethen

Teilweise werden in Reinigungsmaschinen auch Kohlenwasserstoffe (KWL), wie n-Undekan, Isopar H, Shellsol T und Actrel Dry Clean 56 eingesetzt. Weitere neuartige Lösemittel, z.B. Rynex (ein Gemisch aus Propylenglykolether, Wasser und Reinigungsverstärkern), Green Earth (Cyclosiloxane) oder Pentylacetat befinden sich in der Erprobung.

In Wasch- und Reinigungsmaschinen besteht ferner das Problem, dass viele Textilien nicht ausreichend farbecht sind. Sie bluten aus, d. h. die Farbe wird ausgewaschen und geht in das Reinigungsmedium über, das dadurch verfärbt wird. Diese Farbpigmente sowie der abgelöste Schmutz können bei weiteren Chargen auf andere Textilien übertragen werden. Dabei ist mit folgenden Partikelgrößen zu rechnen: Der in jeder Reinigungsmaschine eingebaute Filter erfasst Partikelgrößen bis 30 [ µm ]. Die Partikelgrößen der Färbemittel liegen je nach Färbeverfahren im Bereich von Molekülen bis einige [µm]. Verfärbungen sowie Schmutzpartikel < 30 [ µm ] werden jedoch von den eingebauten Filtern nicht erfasst. Bei Waschmaschinen wird deshalb für jeden Waschgang neues Wasser + Tenside verwendet. Die Dekontamination des Waschwassers wird praktisch in die kommunalen Abwasserreinigungsanlagen verlagert. Bei Reinigungsmaschinen dagegen wird das gebrauchte Lösemittel (TCE oder KWL) grundsätzlich nach jeder Charge ausdestilliert, das LM-Gas wird zwecks Verflüssigung gekühlt und kann anschließend wieder verwendet werden. Es findet also ein Kreislauf des LM statt.

Die LM, insbesondere TCE, stehen im Verdacht, reproduktionstoxisch und karzinogen zu sein. Der MAK-Wert beträgt 345 mg/m<sup>3</sup>. Um diesen Wert einzuhalten, darf TCE einheitlich nur in geschlossenen Systemen verwendet werden. Innerhalb der Reinigungsmaschinen entsteht die Luftbelastung durch Verdunstung von TCE, insbesondere bei höheren Temperaturen

durch die Trocknung des Reinigungsgutes, beim Ausblasen der Maschinen und in geringen Mengen bei der Rückkühlung nach der Destillation.

Um den Vorschriften (2. BImSchV) nachzukommen, wird die belastete Luft innerhalb der Reinigungsmaschinen über Adsorberanlagen, in der Regel Aktivkohlefilter, mit entsprechendem Volumen geführt. Aktivkohlefilter sind im vorliegenden Temperaturbereich für den Dauergebrauch geeignet, da sie desorbiert werden können. In größeren Reinigungsanlagen werden meist zwei dieser Filter verwendet, die dann im Gegentakt zur Adsorption und Desorption arbeiten, wodurch ein Dauerbetrieb gewährleistet ist. Die gereinigte Luft entspricht den Vorschriften und kann in den Arbeitsräumen verbleiben, sodass Heizenergie eingespart werden kann. [1]



## 2.1 Ausgangssituation, Stand der Technik

Bei der Adsorption von LM an Aktiv-Kohle handelt es sich thermodynamisch betrachtet um einen exothermen Vorgang. Es entsteht eine Wärmeentwicklung im Filter aufgrund der molekularen Ablagerung des LM-Gases in einem energetisch stabilen Zustand auf den äußeren und inneren Oberflächen der porenreichen Aktivkohle.

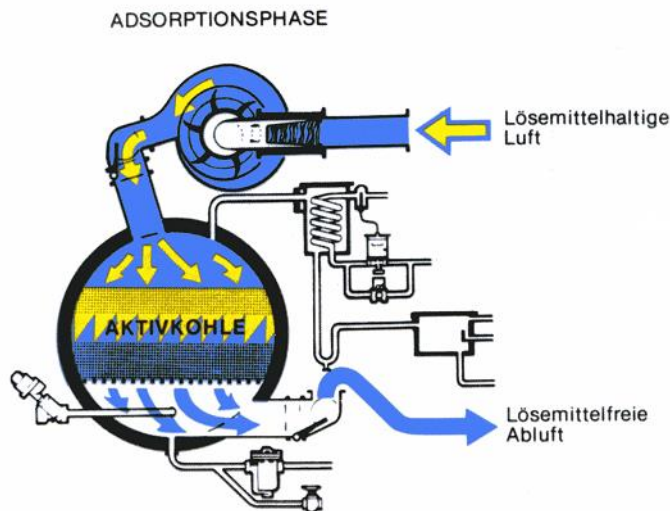


Abbildung 1: Adsorption von LM am Aktivkohlefilter  
(Quelle: BÖWE-Prospekt)

Zur Desorption muss deshalb erneut Energie aufgewendet werden, um die abgelagerten LM-Moleküle vom Adsorbens zu lösen, d. h. die Aktivkohle muss erhitzt werden. In Reinigungsmaschinen geschieht dies durch Heißdampf. Dabei geht das Extrakt, also die abgelagerten LM-Moleküle, von der Aktivkohle in das Extraktionsmittel Wasser über. Die zuvor an die Aktivkohle angelagerten Lösemittel, die in das Desorptionsmittel, also den kondensierten Dampf übergehen, müssen daraus wieder entfernt werden. Praktisch wird bei diesem Verfahren das Lösemittel und damit die gesamte Entsorgungproblematik lediglich vom Medium Luft zunächst in die Aktivkohle und von dort anschließend in den Dampf bzw. das Kondensat verschoben, denn gemäß Abbildung 2 entsteht Kontaktwasser, das mit TCE belastet ist und in diesem Zustand nicht abgegeben oder eingeleitet werden darf. [2]

Außer diesem Desorptionsverfahren wird in der Fachliteratur über zahlreiche weitere Möglichkeiten berichtet, wie z. B. induktive und dielektrische Erwärmung der beladenen Aktivkohle oder die Verwendung inerte Gase, die aber in Reinigungsmaschinen aufgrund des hohen Aufwands bisher nicht eingesetzt wurden. [3] [4] [5]

Stand der Technik sind ferner Angebote verschiedener Filterhersteller, möglichst große Kompletfilter zu verkaufen mit der Dienstleistung, die beladene Aktivkohle insgesamt nach Beladung auszutauschen und für eine geordnete Entsorgung der beladenen Aktivkohle nach den Vorgaben des Abfall- und Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu sorgen.[7]

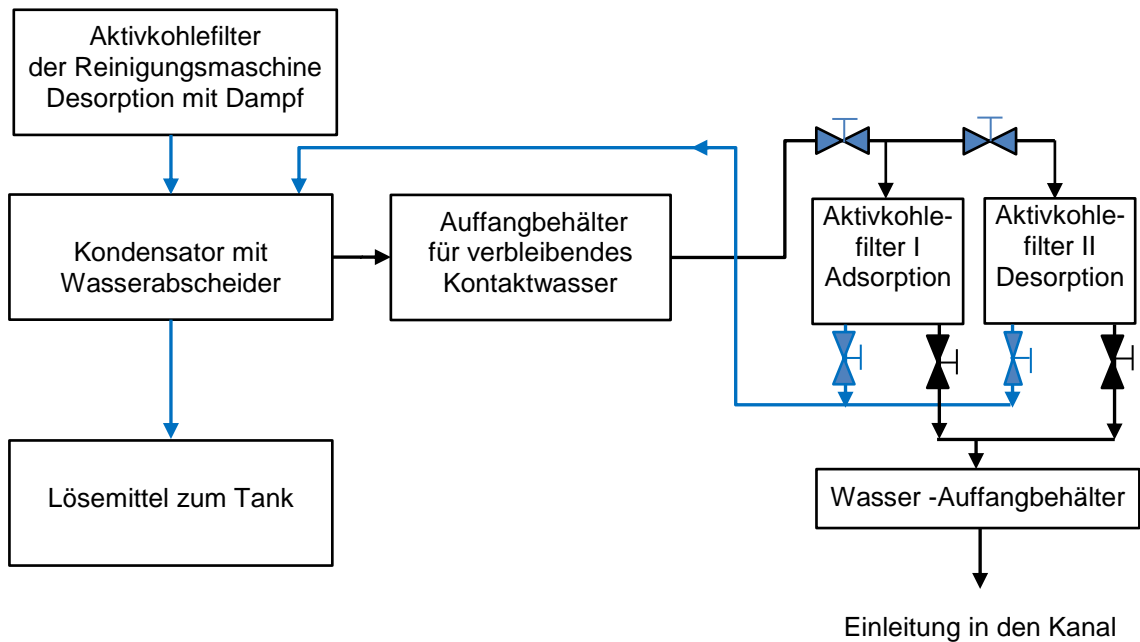


Abbildung 2: Beispiel einer vorgeschriebenen Kontaktwasserreinigung

Die Desorption bzw. Wäsche der Aktivkohlefilter in Reinigungsmaschinen, die etwa 20 l TCE je 100 kg Aktivkohle aufnehmen können, erfolgt physikalisch, bisher ausnahmslos mit Wasserdampf. Damit wird das Lösemittel im Adsorber ausgewaschen. Ein Kondensator verflüssigt dann das Dampf - Lösemittel - Gemisch. Der gesamte Energieverbrauch für die Desorption in genannter Menge beträgt etwa 90 kWh. Die abfließende Lösung aus Wasser und Lösemittel wird im Wasserabscheider aufgrund der unterschiedlichen Dichte / spezifischen Gewichte getrennt (Wasser  $\rho = 1,0$  kg je l, TCE  $\rho = 1,62$  kg je l). Allerdings wird in der Praxis keine vollständige Trennung erreicht. Das Kontaktwasser enthält immer noch etwa 20 mg TCE je l, so dass vor der Einleitung des Wassers eine Kontaktwasserbehandlung nach Abbildung 2 erforderlich ist, die meist von einem externen Unternehmen vorgenommen wird. [2]

Grund für diese aufwendige Entsorgung ist die bisher übliche Desorption mit Wasserdampf. Bei dieser Desorptionmethode fallen am Kondensator große Mengen an Kontaktwasser an, die weiter behandelt werden müssen, da lösemittelhaltiges Abwasser erst ab einer Konzentration von 0,5 mg/l der

Abwasserbehandlung zugeführt werden darf. Man war daher immer bestrebt, die Kapazität des Aktivkohlefilters maximal auszunützen. Die Desorption wurde deshalb erst nach einer bestimmten Anzahl an Reinigungszyklen der Maschine eingeleitet. Man konnte daher nicht sicher sein, ob die Kapazität der Filter überfahren wurde.

## **2.2 Projektziel**

**Ziel des FuE-Vorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Desorption von Aktivkohlefiltern für Textil- und Industriereinigungsmaschinen (Metallentfettung, Fellentfettung und Industrietextilien), bei dem die Bildung von Lösemitteln, insbesondere mit TCE-belastetem Kontaktwasser vermieden wird. Die Größe des Filters sollte so bemessen werden, dass das Adsorptionsvolumen für jeweils bis zu mindestens 25 Reinigungsvorgänge ausreichen würde. Die Desorption sollte durch Gassensoren bei Erreichen der zulässigen Belastung des Reingases ausgelöst werden.**

## **3.0 Hauptteil**

### **3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitspakete, der angewandten Methoden und der erzielten Ergebnisse**

Zu Beginn des Vorhabens wurde der im Folgenden angeführte Arbeitsplan aufgestellt. Diese Planung konnte im Wesentlichen eingehalten werden.

#### **3.1.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte**

##### **AP 1 Entwicklungsplanung**

Die Unterlagen über den Aufbau von Aktivkohlefiltern, die verschiedenen Kohlequalitäten sowie die technischen Daten zu Adsorption und Desorption wurden zusammengestellt. Die Anforderungen an die Neuentwicklung wurden in einem Lastenheft präzisiert.

##### **AP 2 Festlegung der Wärmeerzeugung zur Desorption**

Es wurden Berechnungen und Versuche zur optimalen Wärmeerzeugung und Wärmeübertragung von der Destillationswendel auf die Aktivkohle durchgeführt.

##### **AP 3 Konstruktion**

Festlegung der Behältergröße und Entwurf verschiedener Rohrwendel unter Berücksichtigung optimaler Wärmeübertragung für ein Aktivkohlevolumen entsprechend 2 x 150 kg.

##### **AP 4 Herstellung der Einzelteile und Montage eines Aktivkohlefilters als Prototyps**

Die erforderlichen Einzelteile für einen Prototyps wurden konstruiert und hergestellt oder von entsprechenden Fachfirmen beschafft. Es folgte die Montage eines Prototyps.

##### **AP 5 Beschaffung und Aufbau der peripheren Komponenten**

Zu diesen Komponenten zählen die Register zur Heißluftherzeugung, Seitenkanalverdichter, Kühlwasserleitungen, Leitungsführungen, Ventile und Umschaltventile, die mit Hilfe der entsprechenden Verbindungs- und Schaltungstechnik an den Prototypen angeschlossen wurden.

#### **AP 6 Steuerungsaufbau**

Der gesamte Ablauf Adsorption - Desorption - Kühlung sollte mit einem Mikrocontroller und entsprechender Programmierung unter Einbezug laufender Messung der Luftbelastung gesteuert werden. Die entsprechenden Steuerungsprogramme waren zu entwickeln.

#### **AS 7 Auswahl, Einbau und Erprobung der Sensorik**

Zur Überwachung der neuen Aktivkohlefilter wurden Sensoren für den Gasgehalt der Luft vor und nach dem Aktivkohlefilter, Differenzdruck am Filter und die verschiedenen Temperaturen benötigt. Die Sensoren wurden ausgewählt und eingebaut. Messbereiche, Funktionen und Schnittstellen zur Steuerung waren zu überprüfen.

#### **AP 8 Versuche**

Für die ersten Versuche wurde der zuvor entwickelte Filter-Prototyp in den bereits erwähnten Edelstahlcontainer eingebaut und erprobt. Da es sich hier um einen geschlossenen Versuchsraum mit der entsprechenden Umwelttechnik handelt, waren alle Voraussetzungen gegeben, um Umweltbelastungen beim Auftreten von Undichtheiten, Steuerungsfehlern u. ä. zu vermeiden.

#### **AP 9 Erprobung regenerativer Techniken**

Nach der Durchführung von Änderungen und Verbesserungen sollten Methoden zur Rückgewinnung der aufgewendeten Energie, insbesondere der Heißluft zur Desorption, erprobt werden. Dies waren: Einbau eines Wärmetauschers oder die Verwendung der aus dem Filter austretenden Heißluft für Trocknungszwecke in der Reinigungsmaschine.

#### **AP 10 Erprobung des Prototypen an einer Reinigungsmaschine**

In diesem Arbeitspaket sollte das Filter in eine Reinigungsmaschine eingebaut und im praktischen Betrieb getestet werden. Dabei sollte auch getestet werden, ob ein Mehrchargenbetrieb, d.h. die Desorption erst nach einigen Reinigungszyklen, möglich ist.

#### **AS 11 Tests, Fehlerbeseitigung, Verbesserungen;**

Es wurde damit gerechnet, dass bei der Erprobung noch Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten entdeckt werden konnten, die zu beseitigen bzw.

einzubauen waren.

### **AP 12 Vergrößerung (scale up) des Filters für höhere Gasdurchsätze**

Die entwickelte Filtertechnik sollte in diesem Arbeitsgang für industrielle Anwendungen vergrößert werden. Die technischen Unterlagen dafür wurden, beginnend mit 300 kg Aktivkohle bis zu größeren Anlagen mit 3 t, entwickelt.

### **3.1.2 Darstellung der angewandten Methoden**

Entsprechend dem vorgestellten Projektziel war eine indirekte Erhitzung der Aktivkohle zur Desorption zu entwickeln. Die dazu erforderliche Wärmeenergie in Form von Heißluft sollte vom Wärmeträger direkt an die Aktivkohle abgegeben werden. Bei Verwendung von Dampf sollte die Wärmeenergie über durchströmte Rohrwendel an die Aktivkohle abgeleitet werden. Um eine ausreichende Erhitzung zu erreichen, wurden verschiedene Möglichkeiten der Wärmeerzeugung durchgerechnet und praktisch erprobt. Dabei schied die Verwendung elektrischer Energie aus, da sich der Energieverbrauch als zu hoch und deshalb als zu teuer erwies. Die Rohrwendel könnten anstelle von elektrischer Energie mit Dampf erhitzt werden, der im Haus für Versuche zur Verfügung steht. Der Dampf wurde mit einem Druck bis zu 5 bar eingeleitet. Dessen Temperatur wurde auf max. 150°C entsprechend einem Dampfdruck von ~ 4 bar festgelegt, um einen sicheren Abstand zur Zersetzungstemperatur von TCE (152 °C) einzuhalten. Ferner wurde die Desorption mittels Heißluft erprobt.



Abbildung 3: Edelstahlcontainer zur Rückgewinnung von Lösemitteln aus Altmaschinen



Abbildung 4. Rückansicht des Containers nach Abbildung 3 mit Aktivkohle-Filtern (vor Umstellung auf indirekte Adsorption)

Für die ersten Versuche wurde, wie im Antrag erwähnt, zunächst der von uns entwickelte, geschlossene Edelstahlcontainer (Abbildungen 3 und 4) zur Rückgewinnung von Lösemitteln an den Versuchsaufbau angeschlossen. Ferner wurden die Behältergrößen von zunächst 2 x 300 kg auf den Einsatz von 2 x 150 kg Aktivkohle (Abbildung 5) festgelegt, Rohrwendel unterschiedlicher Abmessungen im Hinblick auf die optimale Wärmeübertragung auf die Aktivkohle ausgewählt und für entsprechende Versuche vorbereitet. Um die indirekte Desorption zu erreichen, wurde zunächst eine Beheizung mit Dampf verwendet, der über Heizregister in Wendel im Aktivkohlefilter geleitet wurde. Zur Erhöhung der Adsorptionskapazität wurde die Aktivkohle in der Adsorptionsphase mit Kaltluft gekühlt, die mit einem Kältekompressor erzeugt wurde.

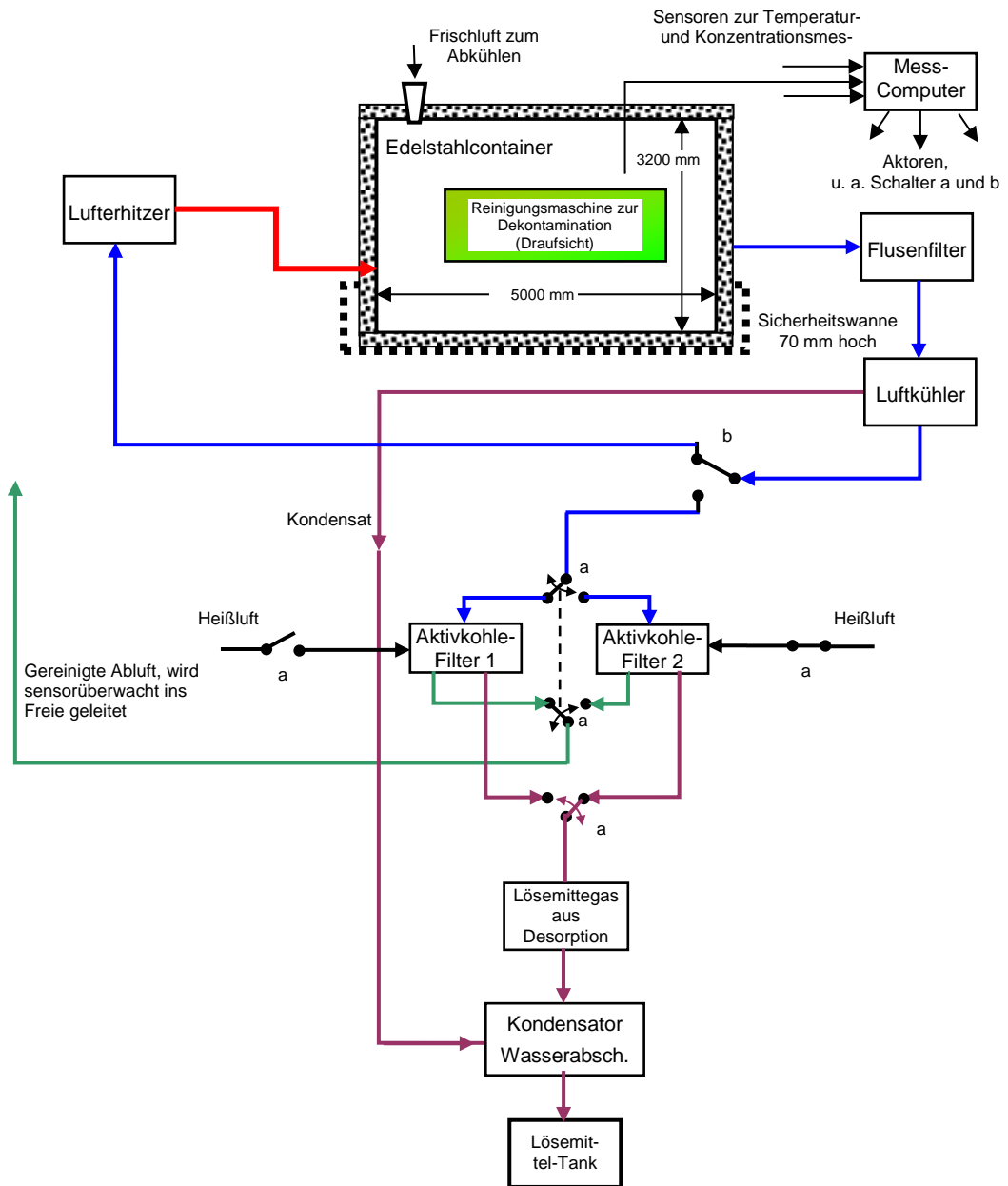




Abbildung 5: Versuchsaufbau mit den beiden Aktivkohlebehältern und den Wasserabscheidern vorne rechts, die in Serie geschaltet sind.

Zum Anschluss der Aktivkohlefilter musste ein Durchbruch zu dem Edelstahlcontainer geschaffen werden, da er aufgrund seiner Abmessungen außerhalb des Betriebsgebäudes aufgestellt werden musste.

Der Prozessablauf ist in der nächsten Abbildung schematisch dargestellt.



**Abbildung 6:** Verfahrensprinzip zur Desorption und Rückgewinnung von LM aus Altmaschinen mithilfe des Containers nach Abbildung 3

- = Warmluft
- = belastete Luft
- = Reinluft
- = Heißluft (Heizung)
- = LM-Gas, Kondensat

Bei einem zweiten Versuch zur Desorption wurde Heißluft durch die Kohle geblasen, wie in Abbildung 6 dargestellt (gezeichnete Stellung: Filter 1 absorbiert, Filter 2 wird desorbiert). Der Kondensator wurde bei dieser Desorptionsmethode umgeschaltet, um die mittels eines Seitenkanalverdichters durch die Aktivkohle geblasene heiße Luft anschließend auf nur 2°C abzukühlen, sodass das aufgenommene Lösemittel restlos kondensierte und in den Tank zurückgeleitet werden konnte. Da in diesem Lösemittel immer noch geringe Wasseranteile aus dem Feuchtegehalt der Heißluft enthalten sein können, wurde das kondensierte LM sicherheitshalber zuvor über einen Wasserabscheider geleitet.

Um die geplanten Versuche durchführen zu können, wurde die Steuerung der Dekontamination zunächst probeweise in die Gesamtsteuerung des Containers eingebaut, wie der Abbildung 7 zu entnehmen ist. Diese Dekontaminationssteuerung wurde nach erfolgreichem Abschluss des Testbetriebs in die Steuerung der Reinigungsmaschinen integriert.



Abbildung 7: Vorläufige Steuerung der Anlage zur indirekten Desorption, (für die Dauer der Versuche integriert in die Steuerung der Dekontaminationsbox).

Entsprechend Arbeitspaket 8 wurde eine Sensorik mit Steuerungsfunktionen zur Messung der Luftbelastung mit gasförmigem Lösemittel beschafft und eingebaut (Abbildung 8). Mit dem Gerät „airTox Gasphotometer“ werden die Temperaturen (max. 125°C) und die LM-Konzentration vor und nach dem Aktivkohlefilter gemessen. [6]



Abbildung 8: Vier-Kanal-Gas-Photometer mit Steuerungsfunktion zur Überwachung der Konzentration von LM-Gasen

Das Messgerät ist ein Produkt der Firma Fresenius Umwelttechnik GmbH in 46599 Herten. Das Gas-Messprinzip beruht auf der Absorption von Infrarotlicht proportional zur Gaskonzentration. Steigt die LM-Konzentration in der Reinluft aus dem Kohlefilter auf das max. zulässige Maß ( $20 \text{ mg/m}^3 = 3 \text{ ppm}$ ), so löst das Messgerät folgende Schaltvorgänge aus:

- Blockieren des derzeit aktiven Kohlefilters Nr. 1,
- Umleiten der Abluft auf das Aktivkohlefilter Nr. 2,
- Einschalten der Heißluft zur Regeneration zu Aktivkohlefilter Nr. 1
- weitere Schaltungen der beiden Filter abwechselnd im Gegenteil.

### 3.1.3 Darstellung der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Die Desorption eines Aktivkohlefilters mit einem Inhalt von 150 kg durch Einblasen von Heißluft mit einer Temperatur von 125°C dauerte etwa 80 Minuten.

Zusätzlich wurde eine verkleinerte Ausführung des Aktivkohlefilters für Reinigungsmaschinen mit 12 bis 30 kg Füllmenge entwickelt. Für diese Maschinengröße genügen nun wesentlich kleinere Kohlefilter. Es wurden zwei Behälter mit den Maßen 250 mm Ø und 900 mm Höhe ( $V \approx 45 \text{ cdm}^3$ ) mit je 16 kg Aktivkohle eingesetzt. In diesen kleinen Behältern erfolgt die Desorption ebenfalls indirekt mittels Heizwendel, die mit Dampf beheizt werden.

## 3.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche ergab, dass das Projektziel erreicht werden konnte. Die Desorption der Aktivkohle mittels Heißluft erbrachte eine Rückgewinnung des LM im erwarteten Umfang. Gleichzeitig konnten die maximal zulässige Belastung der Reingluft nach dem Filter von  $20 \text{ mg/m}^3$  eingehalten werden. Kontaktwasser, das zur Entsorgung dem in Abbildung 2 dargestellten Trennungsprozess unterzogen werden musste, fiel nicht mehr an. Diese umwelttechnisch relevanten Ergebnisse sind, wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, in Zukunft mit rel. bescheidenem Aufwand zu erreichen.

Ähnliches gilt für die ökonomische Bewertung der Entwicklungsergebnisse. Hier fällt die Energieeinsparung auf. Diese wird durch den Wegfall der bei der direkten Desorption mit Dampf erforderlichen Trocknung der Aktivkohle erreicht. Da durch die entwickelte Desorptionsmethode einerseits kein Kontaktwasser mehr anfällt und andererseits das vom Kohlefilter absorbierte TCE zurückgewonnen wird, ergibt sich hierdurch ein erheblicher Rückgang im Verbrauch von TCE mit entsprechender Kostenreduzierung.

Die Entwicklungsarbeiten konnten daher erfolgreich abgeschlossen werden.

### **3.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

#### **3.3.1 Ökologische Bewertung**

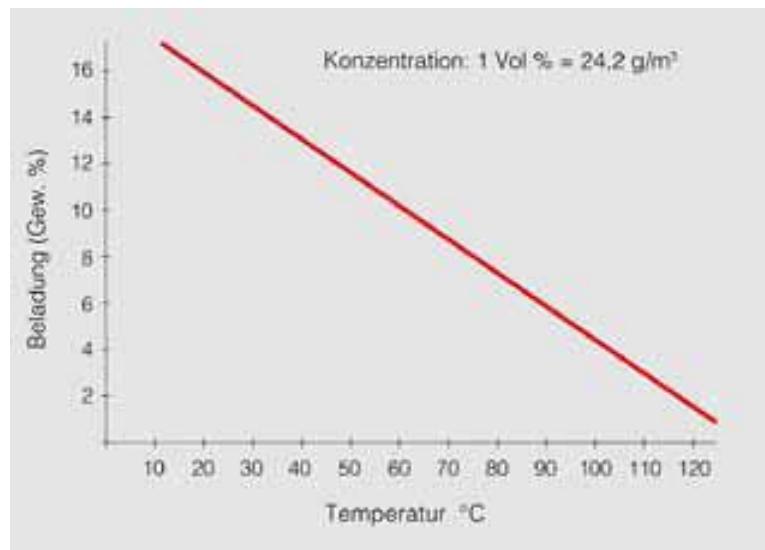
Als wichtigstes Entwicklungsergebnis wird angeführt, dass bei der neuen Desorptionsmethode für Aktivkohlefilter kein Kontaktwasser, das sind je nach Maschinengröße täglich 30 bis 60 l, mehr anfällt. Dies wird dadurch erreicht, dass die mit LM-Gas beladene Heißluft aus dem Aktivkohlefilter anschließend in einem Wärmetauscher abgekühlt wird, wobei das Lösemittel in flüssiger Form anfällt und wieder in den Reintank der Maschine geleitet werden kann. Die Rückgewinnung des LM aufgrund der neuen Desorptionsmethode hat ferner zur Folge, dass der Verbrauch an TCE merklich zurückgeht, da kein belastetes Kontaktwasser zur Entsorgung gegeben werden muss. Dies kann bei einem Kohlefilter mit einer Füllung von 150 kg eine Verbrauchsreduzierung von bis zu 30 l TCE pro Tag bedeuten (Tafel 3, Pos. 1 und 2)

Eine weitere Umweltentlastung wird dadurch erreicht, dass die Desorption streng nach Bedarf veranlasst wird. Dies wird durch das Gas-Photometer gesteuert, wodurch eine Desorption erst dann eingeleitet wird, wenn die aus dem Filter austretende Reinluft eine Tendenz zu unzulässig hohen Anteilen an LM-Gas aufweist. Das bedeutet, dass die Aktivkohle nicht mehr auf Verdacht nach einer mehr oder weniger willkürlich ausgewählten Anzahl an Chargen, sondern je nach den Abluftwerten etwa täglich desorbiert werden muss.

Da kein Dampf zur direkten Desorption der Aktivkohle mehr benutzt wird, muss sie auch nicht mehr getrocknet werden. Daraus resultiert eine beachtliche Energieeinsparung von täglich 33 bis 99 kWh, die Tafel 3, Pos. 6, 7 und 8 zu entnehmen ist.

### 3.3.2 Technologische Bewertung

Die Adsorptionsfähigkeit der Aktivkohle richtet sich nach deren Oberfläche. Diese bezieht sich nicht allein auf die Mantelfläche sondern die zerklüfteten inneren Poren sind in die Betrachtung der gesamten Oberfläche mit einzu-beziehen. Ferner spielt die Temperatur bei der Adsorption und Desorption eine große Rolle. Betrachtet man zunächst die Adsorption, so ist aus Abbil-dung 9 zu entnehmen, dass das Aufnahmevermögen der Aktivkohle mit steigender Temperatur linear abnimmt.



**Abbildung 9:** Einfluss der Temperatur auf das Adsorptionsvermögen (Beladehöhe) eines Aktivkohlefilters

(die angegebene Konzentration bezieht sich auf Toluol; veröffentlicht von der Donau Carbon GmbH; [www.donau-carbon.com](http://www.donau-carbon.com))

Der Temperaturverlauf zur optimalen Desorption ist umgekehrt proportional zu Abbildung 9, d.h. die Desorptionsrate erhöht sich ebenfalls linear jedoch mit steigender Temperatur. Außerdem ist der Verlust an Aktivkohle im relevanten Temperaturbereich bis 120°C sehr niedrig, da keine Kohlenstoffverbrennung auftritt. Lediglich die bei der Regeneration mit der Heißluft ausge-tragenen Kohlenstoffpartikel erfordern nach längerer Zeit Ersatz.

Die kompletten Aktivkohlefilter für Reinigungsmaschinen können nun auf-grund der Entwicklungsarbeiten räumlich um etwa 25 bis 30% kleiner ge-staltet werden, da der bisher erforderliche Aufwand zur Kontaktwasserent-sorgung (siehe Abbildung 2) entfallen kann. Ein weiterer Vorteil ergibt sich dadurch, dass auch die Füllmenge an Aktivkohle reduziert werden kann. Bisher wurde die Desorption der Aktivkohle möglichst lange verzögert, um die Entsorgung der rel. großen Mengen an Kontaktwasser auf möglichst

wenige Termine zu konzentrieren. Die Aktivkohlefilter wurden deshalb zum Teil auch noch über ihrer Aufnahmekapazität betrieben, d.h. überfahren.

Aufgrund unserer Entwicklung wird die Desorption nun automatisch durch Erreichen kritischer Messwerte, der aus dem Filter austretenden, gereinigten Luft, ausgelöst.

### **3.3.3 Ökonomische Bewertung**

Durch die Verwendung von Heißluft zur Desorption beladener Aktivkohle werden folgende Kosten für die angeführten Aufgaben entweder stark reduziert oder entfallen ganz:

- Das Trocknen der bisher mit Dampf regenerierten Aktivkohle,
- Kostenvorteil durch Verwendung des durch die neue Desorption zurückgewonnenen TCE
- Platzbedarf und Kosten für Kontaktwasseraufbereitung (Investitionskosten und laufende Kosten für Energie und Instandhaltung),

Die eingesparten Energien und Kosten ergeben sich aus folgender Tafel:



Pos.	Filterinhalt →	100 kg	150 kg	300 kg
1	max. absorbiertes und zurückgewonnenes TCE/d	20 l entspr. 21 kg	30 l entspr. 49 kg	60 l entspr. 98 kg
2	dadurch jährl. Einsparung an TCE	5.250 l	7.500 l	15.000 l
3	Eingesp. Kosten für Kontaktwasseraufbereitung 1,45 €/l	7.612,50 €	10.875,00 €	21.750,00 €
4	Eingesparte Kosten für TCE; Preis 1,60 €/l	8.400,00 €	12.000,00 €	24.000,00 €
5	Energie zur Heißluftherzeugung für eine Desorption	65 kWh	98 kWh	195 kWh
6	Energieeinsparung je Desorption, da Filter-Trocknung entfällt *)	33 kWh	50 kWh	99 kWh
7	gesparte Energiekosten je Desorption bei 0,35 €/kWh	11,55 €	17,50 €	34,65 €
8	Jährl. Energieeinsparung *)	8250 kWh	12500 kWh	24750 kWh
9	Jährl. Kosteneinsparung an elektr. Energie *)	2.887,50 €	4.625,00 €	9.157,50 €
10	Σ Jährl. Kosteneinsparung	18.900,00 €	27.500,00 €	54.907,50 €

**Tafel 3: Erwartete Energie- und Kosteneinsparung**

\*) bei einer Desorption pro Arbeitstag

Eine weitere Energieeinsparung ergibt sich dadurch, dass die Desorption nicht automatisch nach bestimmten Zeitintervallen, sondern nur nach Bedarf, z. B. täglich, wie Tafel 3 zugrunde liegend, eingeleitet wird. Dazu wird der TCE-Gehalt im Reingas sensorisch überwacht und eine Desorption nur nach Bedarf eingeleitet.

Insgesamt kann durch die beschriebene Entwicklung eine Energieeinsparung beim gesamten Adsorptions- und Desorptionsprozess von bis zu 40% erwartet werden.

Eine Kostenreduktion ist ferner bei den Investitionskosten für diejenigen Reinigungsbetriebe gegeben, die ihr Kontaktwasser bisher selbst aufbereiteten. Dadurch entfallen bei Investition in eine Dekontaminationseinrichtung etwa 5 000,- € bis 8 000,- €. Ein ähnlicher Betrag kann bei bisheriger Vergabe der Kontaktwasseraufbereitung an Dienstleister jährlich eingespart werden.

### **3.4 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse**

Die erfolgreiche Entwicklung der neuartigen, trockenen Desorptionsmethode bedeutet für die gesamte Reinigungstechnik eine echte Innovation. deshalb werden wir diese Desorption ab sofort bei neuen Maschinen unserer Tochterfirma BÖWE Textile Cleaning GmbH sowie bei der Instandsetzung gebrauchter Maschinen durch die Ziermann GmbH einsetzen. Dadurch werden wir für die BÖWE-Reinigungsmaschinen erhebliche Marktanteile hinzugewinnen und möglicherweise sogar die Marktführerschaft erringen.

Zur internationalen Verbreitung der Vorhabensergebnisse besteht folgende Planung: Für den Vertrieb wird ein neu eingestellter Mitarbeiter eine webbasierte Präsentation ausarbeiten. Die gleichen Inhalte werden auch mehrsprachig als Druckversion hergestellt, um die Böwe-Händler, zurzeit sind das weltweit 52 selbständige Handelsunternehmen, sowie unsere Kundenschaft über die Neuentwicklung zu informieren.

Zusätzlich wird der Geschäftsführer Frank Ziermann die neue Desorptionsmethode ab 2017 bei Vortragsveranstaltungen in Asien und Europa vorstellen. Es ist damit zu rechnen, dass diese Informationen aufgrund der möglichen Einsparungen auf großes Interesse zu stoßen.

Reinigungsmaschinen, die mit der neuen Destillation ausgerüstet sind, werden wir auf der „Texcare Asia Shanghai“ im September 2017 ausstellen.

(Die „Texcare International“ ist die Weltleitmesse der Wäscherei-, Reinigungs- und Miettextilien-Branche, auf der die marktführenden Unternehmen ihre Produkte den wichtigsten Entscheidern, potenziellen Investoren und interessierten Fachbesuchern aus aller Welt präsentieren.)

Ferner werden wir CINET – das internationale Komitee für die professionelle Textilpflege - über die Entwicklung unterrichten. CINET ist die Dachorganisation für alle nationalen Verbände der professionellen Textilpflege mit Sitz in den Niederlanden.

## 4.0 Fazit

Entwicklungsziel war die Verbesserung des Desorptionsvorgangs von Aktivkohlefiltern in Reinigungsmaschinen. Die Desorption erfolgte bisher mit Wasserdampf. Dies hat den Nachteil, dass sich die absorbierten Mengen an LM mit dem Wasserdampf bzw. nach Kondensation mit dem Wasser vermischen. Es entsteht Kontaktwasser, das separat entsorgt werden muss.

Diese ökologischen und ökonomischen Nachteile konnten durch die Entwicklung einer indirekten Beheizung der Aktivkohle zur Desorption erreicht werden. Als Folge führen die ökologisch bedeutenden Belastungsreduzierungen (kein Kontaktwasser, geringere Luftbelastung, Energieeinsparung) gleichzeitig auch zu beachtlichen, ökonomischen Vorteilen in Form erheblicher Kosteneinsparungen.

## 5.0 Literaturverzeichnis

- [1] Flüchtige Verbindungen effizient aus Abluft entfernen  
BINE Informationsdienst; Projektinfo 03/2009
  
- [2] Der Landrat des Rhein-Erft-Kreises:  
Einleitung von lösemittelhaltigem Kontaktwasser aus  
Chemischreinigungen in öffentliche Abwasseranlagen; August 2008  
[http://www.rheinerftkreis.de/stepone/data/downloads/3b/80/00/mb\\_chemischreinigung.pdf](http://www.rheinerftkreis.de/stepone/data/downloads/3b/80/00/mb_chemischreinigung.pdf)
  
- [3] Stand der Wissenschaft und Technik zur dielektrischen Erwärmung  
von Adsorbentien und Katalysatoren  
<http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/05/06H058/t4.pdf>
  
- [4] Dr.-Ing. Günter Engineering GmbH  
DGE-Adsorber für den Umweltschutz“;  
[http://www.dge-wittenberg.de/produktkatalog/daten/deutsch/katalog/adsorber/dge\\_adsorber.pdf](http://www.dge-wittenberg.de/produktkatalog/daten/deutsch/katalog/adsorber/dge_adsorber.pdf)
  
- [5] Holger Wilhelm Kajszika; Adsorptive Abluftreinigung und Lösemittel-  
Rückgewinnung durch Inertgasregenerierung; S. 56  
Herbert Utz Verlag Wissenschaft; 80799 München
  
- [6] W. Altmann, E. Chrisof; Dr. G. Knofe;  
Taschenbuch Textilreinigung  
Herausgeber: BÖWE GmbH 1993
  
- [7] Allgemeine Informationen über Aktivkohlefiltration  
herausgegeben von der Brockhaus Umwelt Lennetal GmbH  
<http://www.brockhaus.com/fileadmin/media/pdf/Aktivkohlefiltration.pdf>
  
- [8] Römpf Lexikon Umwelt  
Georg Thieme Verlag Stuttgart

