

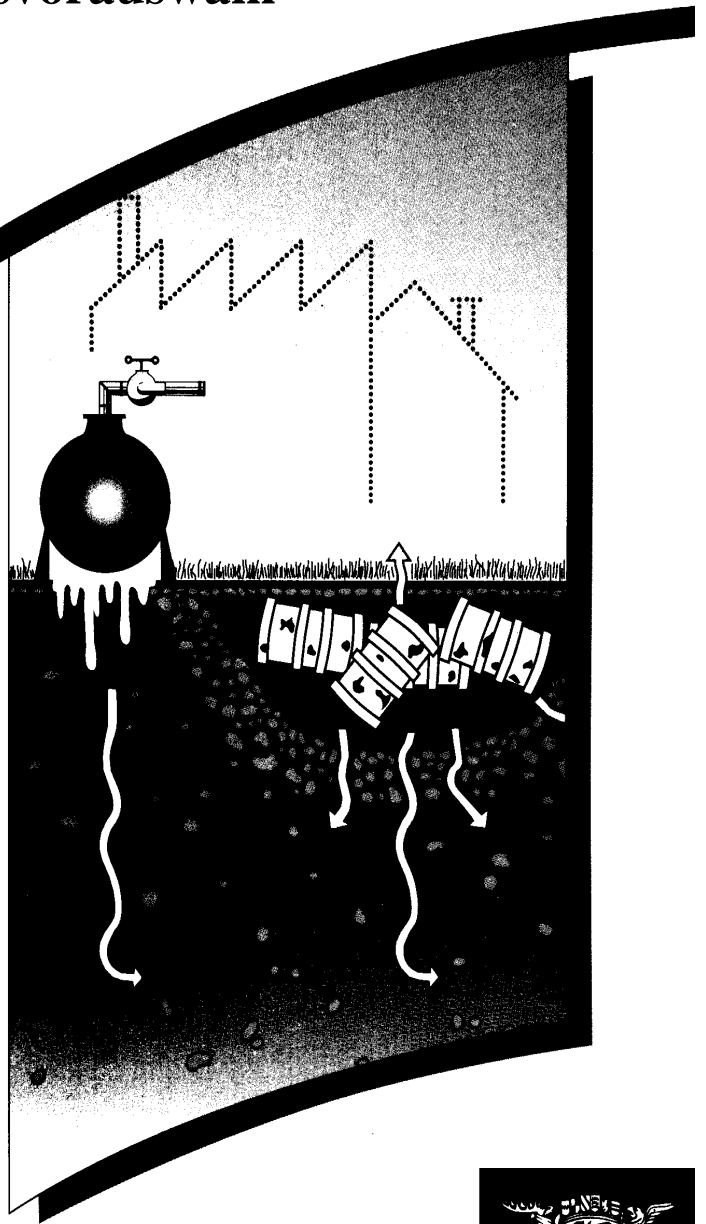
Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Technologien zur Abluftreinigung bei Bodenluftsanierungen

- Verfahrensvorauswahl

Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung



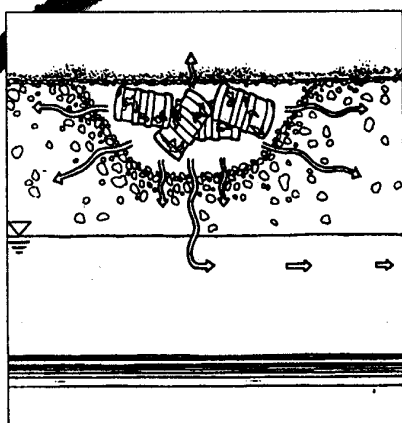
**BODEN
ABFALL
ALLASTEN**



**MINISTERIUM
FÜR UMWELT
UND VERKEHR**

Technologien zur Abluftreinigung bei Bodenluftsanierungen

- Verfahrensvorauswahl



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1996



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Redaktion: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 – Altlastensanierung
Dr.-Ing. Wolfgang Kohler

Verfasser: Weber Ingenieure Pforzheim GmbH
Bauschlotter Str. 62
75177 Pforzheim

Karlsruhe, Januar 1997

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. ÜBERSICHT DER ABGASREINIGUNGSVERFAHREN	2
2.1 ALLGEMEINES.....	2
2.2 THERMISCHE OXIDATION	4
2.3 KATALYTISCHE OXIDATION	5
2.4 UV-OXIDATION	6
2.5 ADSORPTION.....	7
2.6 ABSORPTION.....	8
2.7 BIOLOGISCHE VERFAHREN	9
3. STANDORTSPEZIFISCHE RANDBEDINGUNGEN	10
3.1 SCHADSTOFFSPEKTRUM UND -KONZENTRATION	10
3.2 SCHADSTOFFMENGE UND ZEITLICHER VERLAUF DES AUSTRAGS	11
3.3 VORGEGEBENE GRENZWERTE	12
4. ENTSCHEIDUNGSFINDUNG	13
4.1 VORGEHENSWEISE.....	13
4.2 PUNKTEKATALOG	13
4.3 ENTSCHEIDUNGSDIAGRAMM.....	14
4.4 ÜBERPRÜFUNG DER ENTSCHEIDUNG.....	15
4.4.1 <i>Empfindlichkeitsprüfung</i>	15
4.4.2 <i>Einsatzgrenzen</i>	15
4.4.3 <i>Wirtschaftliche Überlegungen</i>	16
4.4.4 <i>Ökologische Aspekte</i>	16
4.5 BEISPIELE	17
4.5.1 <i>Schadensfall Tankstelle</i>	17
4.5.2 <i>Altstandort Gaswerk</i>	18
4.5.3 <i>Ehemalige Sonderabfalldeponie</i>	19
5. TECHNISCHE REALISIERUNG DER VERFAHREN	21
5.1 VORVERSUCHE	21
5.2 THERMISCHE OXIDATION	22
5.3 KATALYTISCHE OXIDATION	23
5.4 UV-OXIDATION	24
5.5 ADSORPTION.....	25
5.6 ABSORPTION.....	26
5.7 BIOLOGISCHE VERFAHREN	27
6. LITERATURVERZEICHNIS	28
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	29
TABELLENVERZEICHNIS	29
INDEXVERZEICHNIS	30

1. Einleitung

Bei der Sanierung von Altlasten und Schadensfällen wird angestrebt, aufgrund ihrer ökonomischen und ökologischen Überlegenheit bevorzugt in-situ-Verfahren einzusetzen. Gerade bei der Entfernung leichtflüchtiger Schadstoffe hat sich die Bodenluftabsaugung in vielen Fällen als wichtiges Dekontaminationsverfahren erwiesen. Die hierbei anfallende Abluft bedarf meistens einer Behandlung, bevor sie in die Atmosphäre entlassen werden kann. Hierzu stehen derzeit verschiedene technische Lösungen zur Verfügung, die teils aus der industriellen Trenn- und Abscheidetechnik stammen, teils aber auch speziell für die Behandlung von Bodenluft entwickelt wurden.

Die Arbeitshilfe "Technologien zur Abluftreinigung bei Bodenluftsanierungen - Verfahrensvorauswahl" bietet einen Kurzüberblick über die gängigen Abreinigungsverfahren sowie Entscheidungskriterien für die Verfahrensvorauswahl zur Sanierungsvorplanung/E₃₋₄. Das nach diesem Schema erhaltene Ergebnis ist als Verfahrenseingrenzung zu betrachten und kann keine technische Detailplanung ersetzen.

Zunächst werden Verfahren kurz vorgestellt, die zur Abreinigung von Bodenluft eingesetzt werden. Nach der Ermittlung der Ausgangsdaten für den speziellen Anwendungsfall wird die Vorgehensweise zur Entscheidungsfindung dargestellt und anhand von Beispielen erläutert. Je nach Datengrundlage oder Komplexität des Einzelfalles werden zusätzliche Entscheidungskriterien und ihre möglichen Auswirkungen aufgezeigt. Abschließend werden für den Interessierten noch Einzelheiten zur technischen Umsetzung angesprochen, insbesondere werden Tips für die Durchführung von Vorversuchen gegeben.

Dieses Arbeitspapier wurde im Rahmen des Modellvorhabens "Mühlacker" der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg von der Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH erarbeitet. Die hier zusammengetragenen Erfahrungen wurden in mehreren Versuchsreihen, die zu verschiedenen Verfahren durchgeführt wurden, gewonnen.

2. Übersicht der Abgasreinigungsverfahren

2.1 Allgemeines

Zur Abreinigung der bei der Altlastensanierung durch Bodenluftabsaugung geförderte Bodenluft, die häufig mit leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen und/oder aromatischen Kohlenwasserstoffen belastet ist, stehen unterschiedliche Verfahren zu Verfügung. Diese Verfahren sind aus der Abgasreinigung industrieller Produktionsanlagen bekannt. Sie lassen sich in oxidative, adsorptive, absorptive und biologische Verfahren unterteilen und gelten aufgrund der langjährigen Erfahrungen als technisch ausgereift. Durch ihre Weiterentwicklung für kleinere Durchsätze und höhere Reinigungsleistungen sind sie für den neuen Einsatzbereich in der Altlastensanierung geeignet und einsetzbar.

Keine weitere Erläuterungen werden über die Gewinnung, Aufbereitung und Verwertung von Deponiegasen sowie zur Lösemittelrückgewinnung aus Abluftströmen gegeben. Damit entfallen z.B. Gasfackeln, Membran- und Adsorptionsdruckwechselverfahren zur Aufkonzentrierung und anschließenden Rückgewinnung von Reinstoffen, Kondensations- und (Vakuum-)destillationsverfahren zur Auftrennung von Gemischen.

Es wird davon ausgegangen, daß typische Bodenluftabreinigungsanlagen in einem Konzentrationsbereich von unter 10 g/m³ mit Volumendurchsätzen von max. 1000 - 5000 m³/h arbeiten. Bei größeren Durchsätzen, höheren Konzentrationen bei längerer Laufzeit sind die ausgeklammerten Verfahren möglicherweise konkurrenzfähig.

Die Verfahren werden nach folgendem Schema beschrieben:

- Prinzipskizze
- Kurzbeschreibung
- Reststoffe
- Energieeinsatz (ohne Pumpen und Gebläse)

Der Einsatzbereich wird in Tabelle 1 dargestellt.

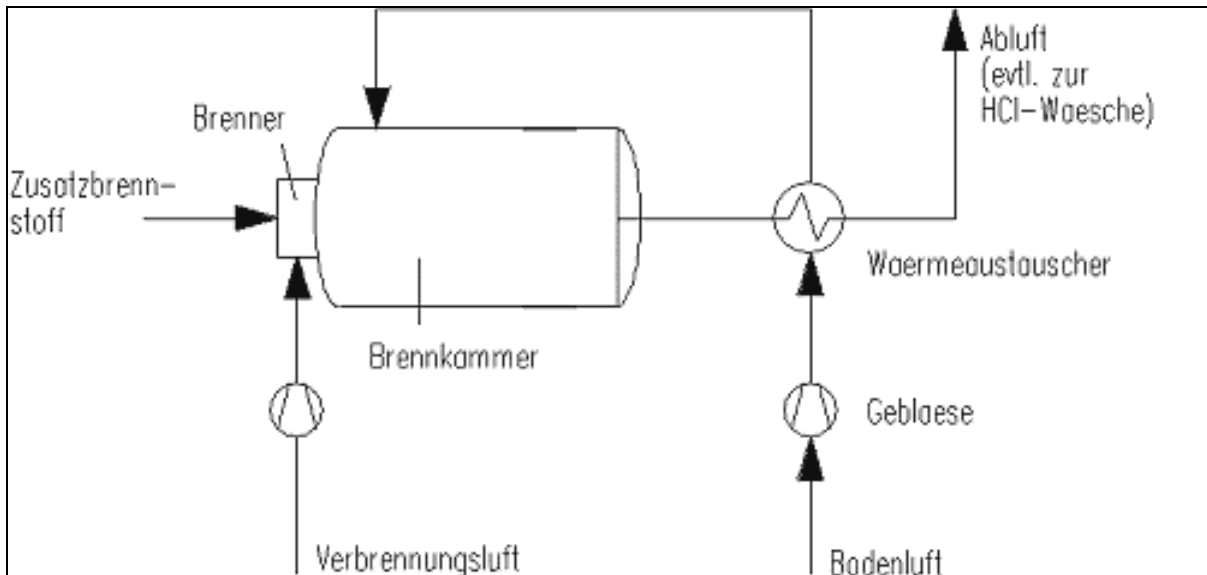
Tabelle 1: Einsatzbereiche der zur Abreinigung von Bodenluft eingesetzten Verfahren, kein Anspruch auf Vollständigkeit

<i>Verfahren</i>	<i>Variante</i>	<i>Abreini- gungs- rate</i>	<i>Volumen- strom*</i>	<i>Schadstoffe</i>	<i>Konzentra- tion</i>
		<i>[%]</i>	<i>[m³/h]</i>		<i>[mg/m³]</i>
Thermische Oxi- dation	> 1200 °C mit Stützfeuerung	> 99	500 - 3000	flüss. Kompon., (C)KW-haltige Gemi- sche mit Dioxinen, Kampfstoffen, Pestizi- den	3.000 - 10.000
	autotherm (mit Wärmerück- gewinnung)	> 99		KW, AKW	> 1.000
Katalytische Oxidation		> 95	200 - 500	KW, AKW, CKW	> 1.000
UV-Oxidation		60 - 80	20 - 200	Vinylchlorid, Tri, Per	< 200
Adsorption	Aktivkohle	> 99	50 - 500	CKW (außer VC), AKW, KW	0 - 10.000
	Molekularsieb	> 99		Wasser, NO _x , CO ₂ , Hg, Dioxine	0 - 10.000
	Kieselgel	> 99		Wasser	0 - 10.000
Absorption	Alkalische Wäsche	> 90	> 200	HCl, HF, NH ₃	30 - 10.000
Biologische Ver- fahren	Biofilter	40 - 90	500 - 5000	CKW, KW, AKW	500 - 10.000
	Tropfkörper	40 - 90	> 200	Alkohole, Aldehyde, Ketone, Ester	3.000 - 10.000

*: Die Volumenstromangabe ist als Anhaltspunkt für die Modulgröße bzw. üblichen Mindestabmessungen zu verstehen.

2.2 Thermische Oxidation

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

Bei der thermischen Abluftreinigung werden die Schadstoffe bei Zündtemperatur in möglichst vollständiger Reaktion mit Sauerstoff zu anorganischen Produkten wie Kohlendioxid und Wasser umgesetzt (oxidiert).

Die thermische Abgasbehandlungsanlage besteht aus Brennersystem, Reaktionsraum und Wärmeaustauscher. Bevor die Rohluft in die Brennkammer gelangt, wird sie in einem Wärmeübertrager von dem die Brennkammer verlassenden Reingas erhitzt. Über einen Verdichter wird die notwendige Verbrennungsluft zusammen mit dem Zusatzbrennstoff dem Brenner zugeführt. Ein Beimischregler gewährleistet eine konstante Verbrennungstemperatur.

Emissionen / Reststoffe

Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide, sonst. organ. Produkte unvollständigen Au - brands (Ruß).
chlorierten Kohlenwasserstoffen in der Rohluft entsteht HCl.

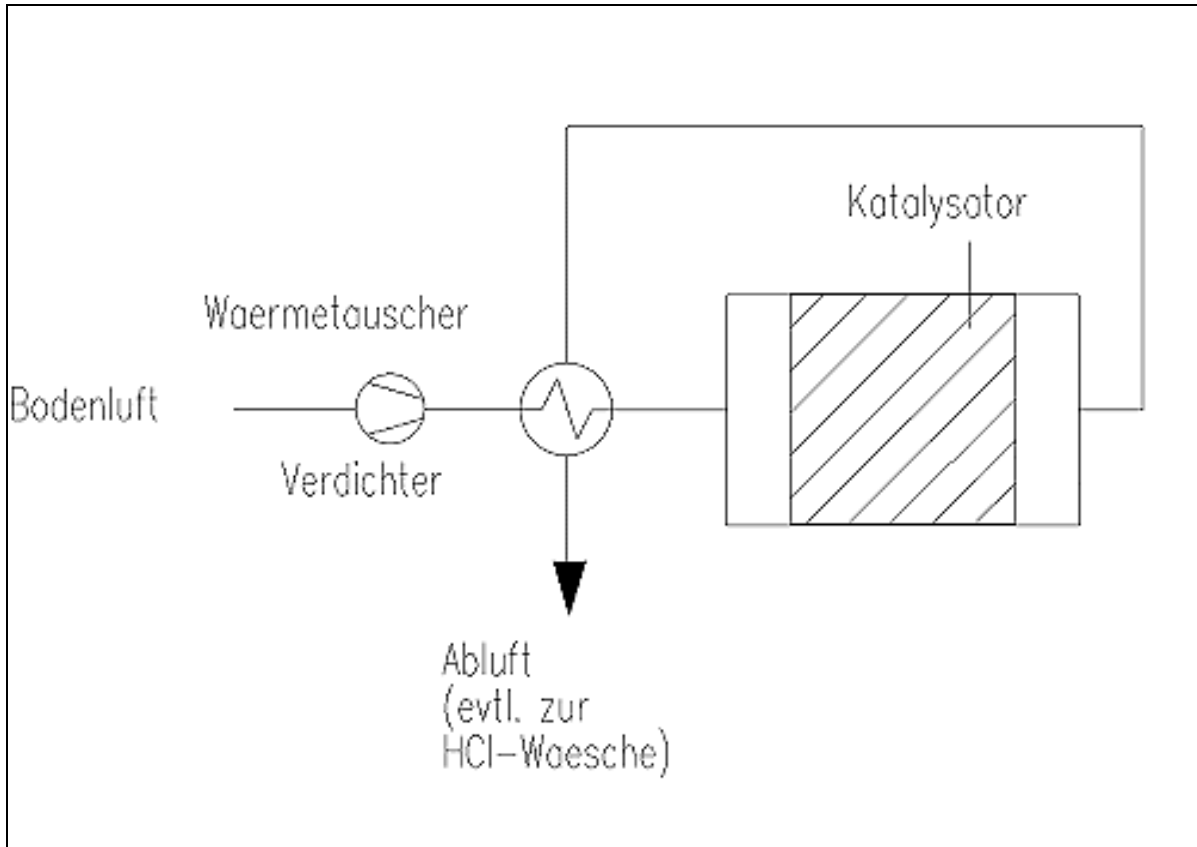
Energieeinsatz

zugeführt werden. Ca. 500

f-
r-
zugemischter Brennstoffe,

2.3 Katalytische Oxidation

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

Die katalytischen Abgasbehandlungsanlage besteht aus Brennersystem, Reaktionsraum mit Katalysator und Wärmeübertrager. Die Rohluft wird im Wärmeübertrager von dem die Brennkammer verlassenden Reingas erhitzt. Die Verbrennungsluft wird über einen Verdichter zusammen mit dem Zusatzbrennstoff dem Brenner zugeführt. Nach Erreichen der Anspringtemperatur des Katalysators, der Temperatur, bei der schon ein meßbarer Umsatz vorhanden ist (200 bis 300 °C), oxidieren die Schadstoffe an der Oberfläche des Katalysators.

Emissionen / Reststoffe

Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickoxide, sonst. organ. Produkte unvollständigen Ausbrands (Ruß). Dioxinbildung wird durch geeignete Reaktionsbedingungen vermieden. Bei chlorierten Kohlenwasserstoffen in der Rohluft entsteht HCl.

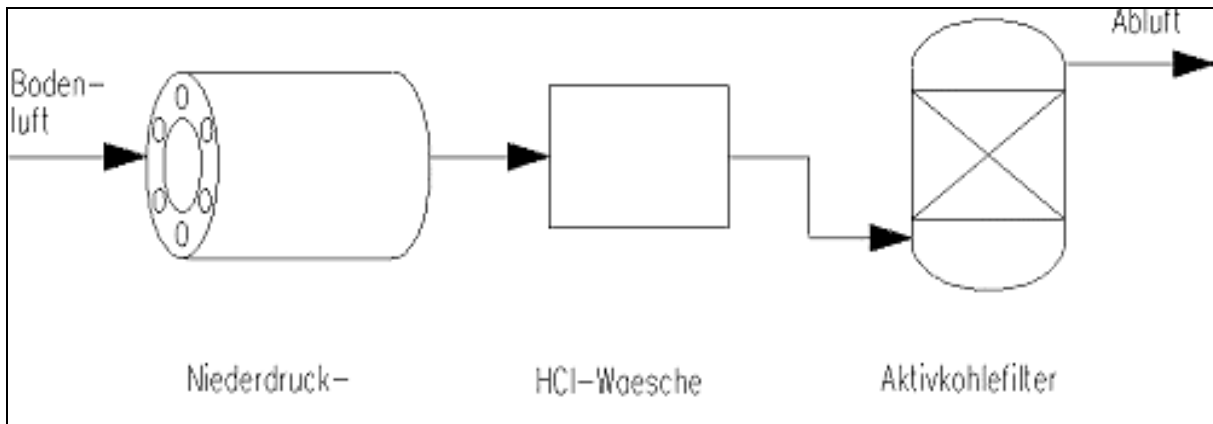
Mit zunehmender Betriebszeit kann der Katalysator seine ursprüngliche Wirkung verlieren, was sich in der Verringerung der Reinigungsleistung bzw der Standzeit zeigt. Die Ursachen liegen überwiegend in der Alterung, Verkokung, Staubablagerung und/oder Vergiftung. Der Katalysator besteht aus Edelmetall und/oder Mischoxiden in Wabenform oder pelletiert als Schüttgut. Die Mischoxide werden nach der Edelmetall-Rückgewinnung deponiert.

Energieeinsatz

Bei der Katalytischen Oxidation wird die erforderliche Reaktionstemperatur durch den Katalysator herabgesetzt, so daß bei kleinerer Temperatur als der Zündtemperatur die Schadstoffe oxidiert werden. Ca. 200 Wh/m³ für CKW.

2.4 UV-Oxidation

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

chemisch-physikalisches Verfahren, mit dem die in der Bodenluft ultravioletten Bereich weitestgehend oxidiert werden.

Die Bodenluft gelangt zunächst in den UV-Reaktor. Der Gasstrom wird im Ringraum zwischen der Stahlwand des Reaktors und dem Quarzglasrohr der Lampe der Bestrahlung werden aus dem natürlichen Wassergehalt der Luft OH-Radikale gebildet,

möglich. In dem nachgeschalteten Gaswäscher werden die gebildeten Natron NaCl neutralisiert.

Emissionen / Reststoffe

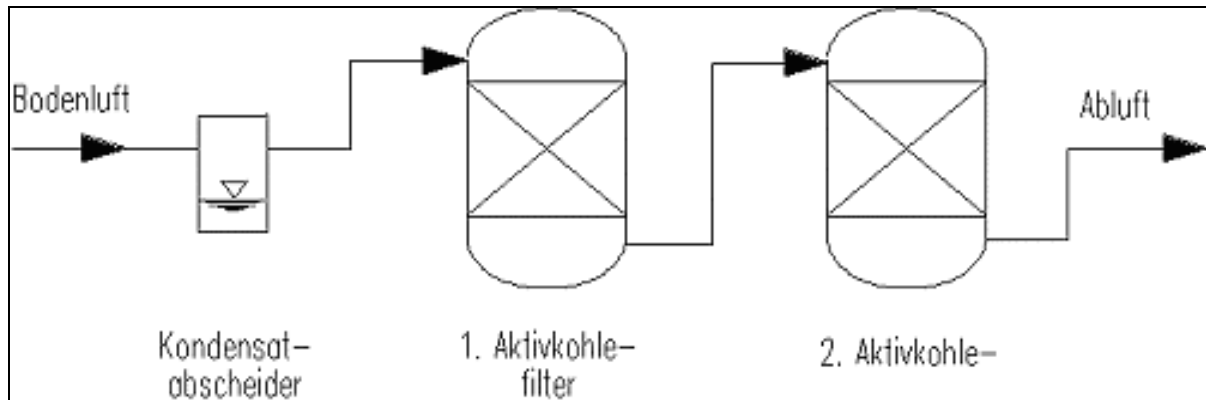
Ethin, anorg. Chlorverbindungen, insbesondere Phosgen-/Dioxinbildung ist durch geeignete Reaktionsbedingungen zu vermeiden. Ausgebrannte UV-Röhren werden recycelt (

Energieeinsatz

Der Schadstoffabbau einer der Leistung des Strahlers abhängig. Für den CKW-Abbau haben sich sog. Lampen bewährt. Ca. 30 Wh/m³.

2.5 Adsorption

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

Unter Adsorption versteht man die Anreicherung von z.B. Gasen an der Oberfläche fester Stoffe, i.a. Aktivkohle, aber auch Molekularsieve und Kieselgel.

Der zu behandelnde Gasstrom durchströmt den Festbettadsorber meistens von unten nach oben. Die Apparate werden je nach Konzentration und Durchsatz des zu behandelnden Rohgasstromes parallel oder in Reihe geschaltet. Nach der erfolgreichen Beladung wird der Filter bzw. das Füllmaterial zurückgenommen und regeneriert.

Niedrige Temperaturen und erhöhte Drücke begünstigen die Adsorption. Mit zunehmender Lösemittelkonzentration und abnehmender Bodenluftfeuchte steigt die Adsorptionskapazität.

Reststoffe

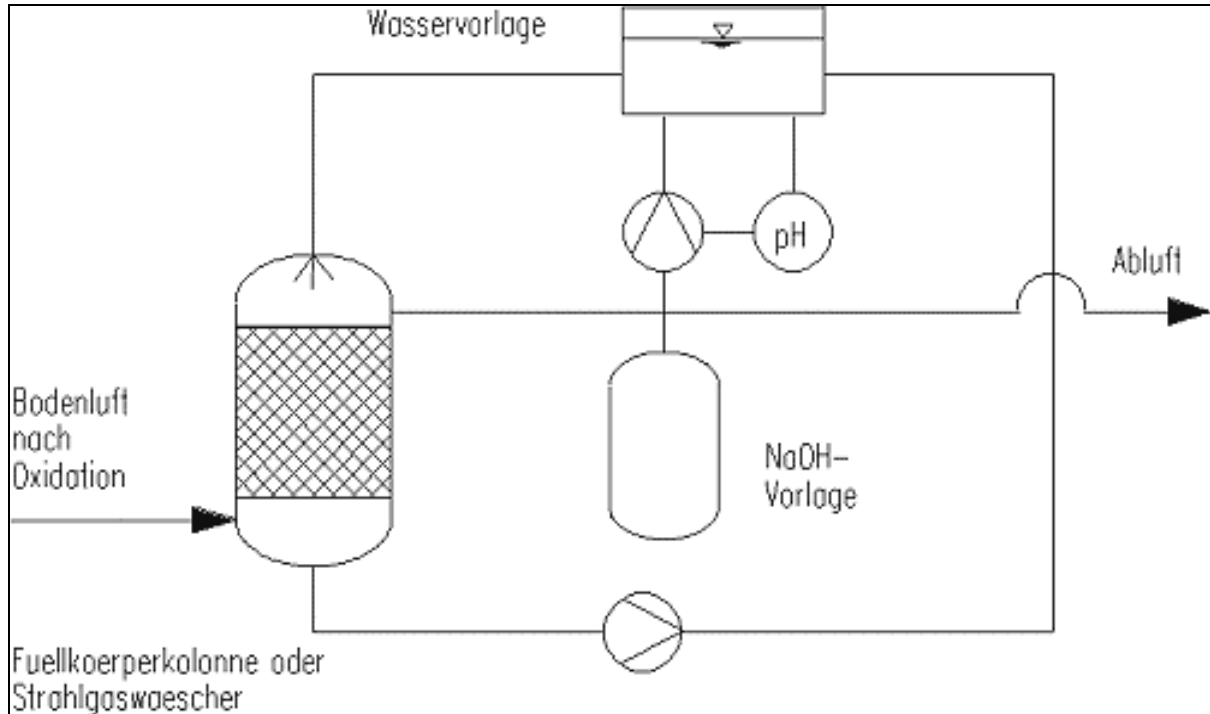
Fast alle Filtermaterialien können vor ihrer Entsorgung mehrfach genutzt werden (Regeneration).

Energieeinsatz

Ca. 2 kWh/kg von Aktivkohle dampfdesorbierter CKW.

2.6 Absorption

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

Bei der Absorption nimmt ein Wasch-, Lösungs- oder Absorptionsmittel verschiedene Substanzen aus der Gasphase auf. Die Auflösung des Gases im Waschmittel wird durch tiefe Temperatur und erhöhten Druck begünstigt.

Das Verfahren findet bisher hauptsächlich als nachgeschaltete Reinigungsstufe bei der Oxidation von leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen Verwendung. Dort entsteht u.a. gasförmiger Chlorwasserstoff (HCl), welcher im Gaswäscher von der Waschflüssigkeit, hier verdünnte Natronlauge, absorbiert und zu Natriumchlorid und Wasser umgesetzt wird.

Reststoffe

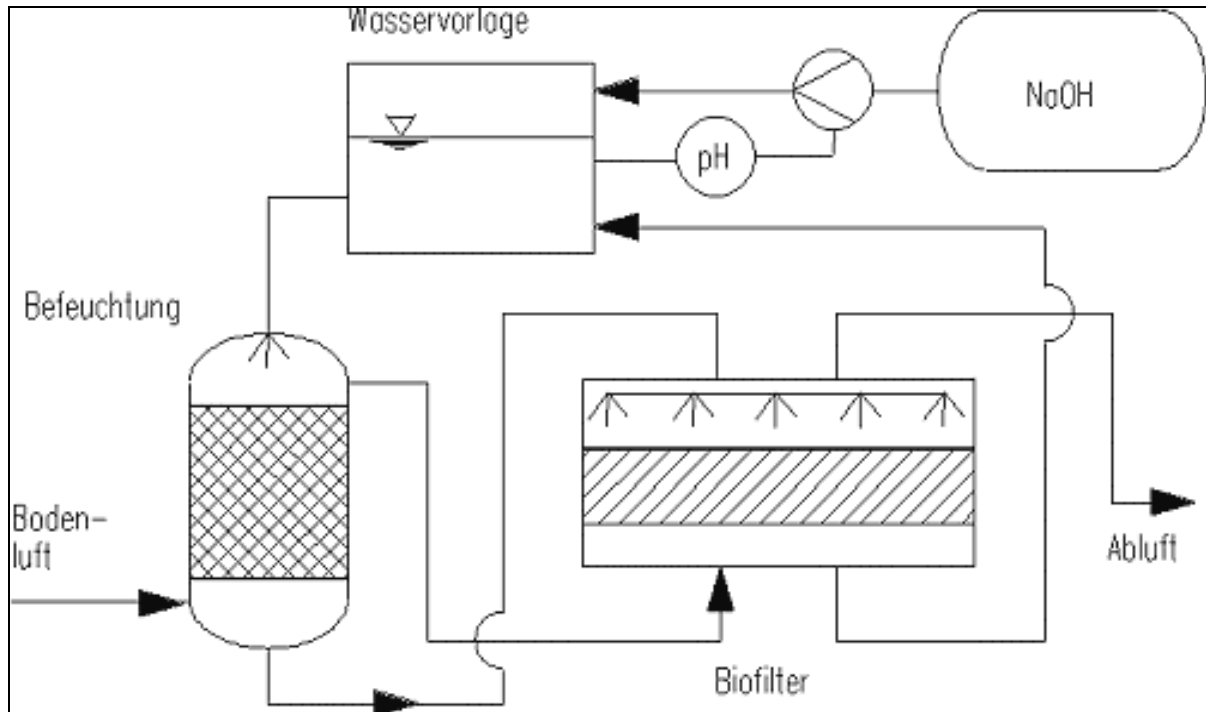
Salzbefrachtetes Abwasser.

Energieeinsatz

Umwälzpumpen und Dosierstation.

2.7 Biologische Verfahren

Prinzipskizze:



Kurzbeschreibung

Eine Biofilteranlage besteht aus Gasvorwärmer, Gasbefeuchter und Bioreaktor. Bevor die verunreinigte Bodenluft den Biofilter durchströmt, wird sie in den Verfahrenseinheiten Gasvorwärmer und Gasbefeuchter so konditioniert, daß die auf dem Biofilter befindlichen Mikroorganismen optimale Lebensbedingungen erhalten (relative Feuchte $\approx 100\%$, Temperatur $+ 10$ bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Um Austrocknung vorzubeugen, wird der Biofilter mit Kreislaufwasser flächig besprüht.

Reststoffe

Verbrauchtes Filtermaterial, aufgesalzenes Kreislaufwasser.

Energieeinsatz

Umwälzpumpen, Dosierstationen, Gaskonditionierung.

3. Standortsspezifische Randbedingungen

3.1 Schadstoffspektrum und -konzentration

Je nachdem, ob es sich bei der Sanierung um einen (ehemaligen) Industriestandort, eine (Alt-)ablagerung oder um einen Schadensfall handelt, sind verschiedene Schadstoffe bzw. Schadstoffspektren zu erwarten.

Kommunale Altablagerungen sind zumeist über die Phase der aktiven Methanproduktion hinaus, so daß die Restgehalte für eine Deponiegasverwertung nicht ausreichen.

Industrielle Ablagerungen, Industriestandorte und Güterumschlagstationen, aktuelle und ältere Schadensfälle können nahezu jede chemische Verbindung enthalten. Hier nach Branchen und technischem Stand der Produktion einzugrenzen, erfordert eine sorgfältige historische Erkundung (s. Altlastenhandbuch). Die meisten Stoffe durchlaufen im Boden Umwandlungsprozesse, wenn sie mit Sauerstoff oder Wasser in Berührung kommen. Auch biologische Abbaumechanismen sind bei vielen Verbindungen bekannt.

Auf alle Verbindungen einzugehen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Vor allem bei akuten Schadensfällen sind die betreffenden Stoffdatenblätter/Unfallmerkblätter zu Rate zu ziehen. Treten relativ ungebräuchliche Chemikalien auf, sollte direkt Kontakt mit dem Hersteller aufgenommen werden.

Das Handbuch stützt sich auf die in dem Erlaß des Umweltministeriums Baden-Württemberg "Orientierungswerte bei der Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" genannten Parameter, sofern sie aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften der Bodenluftabsaugung zugänglich sind. Bei Stoffen mit einem Siedepunkt über 200 °C wird davon ausgegangen, daß sie, besonders in kleinen Konzentrationen, einen so geringen Dampfdruck aufweisen, daß eine Sanierung durch Bodenluftabsaugung nicht in Frage kommt.

3.2 Schadstoffmenge und zeitlicher Verlauf des Austrags

Für die Auswahl des richtigen Verfahrens muß bekannt sein, in welcher Konzentration die Schadstoffe anfallen bzw. über welchen Zeitraum mit einem Austrag zu rechnen ist.

Um diese Größen möglichst genau zu erhalten, muß zunächst die gesamte im Boden enthaltene bzw. durch die Absaugung erreichbare Schadstoffmenge abgeschätzt werden. Weiterhin muß der voraussichtliche Sanierungsverlauf und die Sanierungsdauer bekannt sein, um die Kosten kapitalisieren zu können /18/.

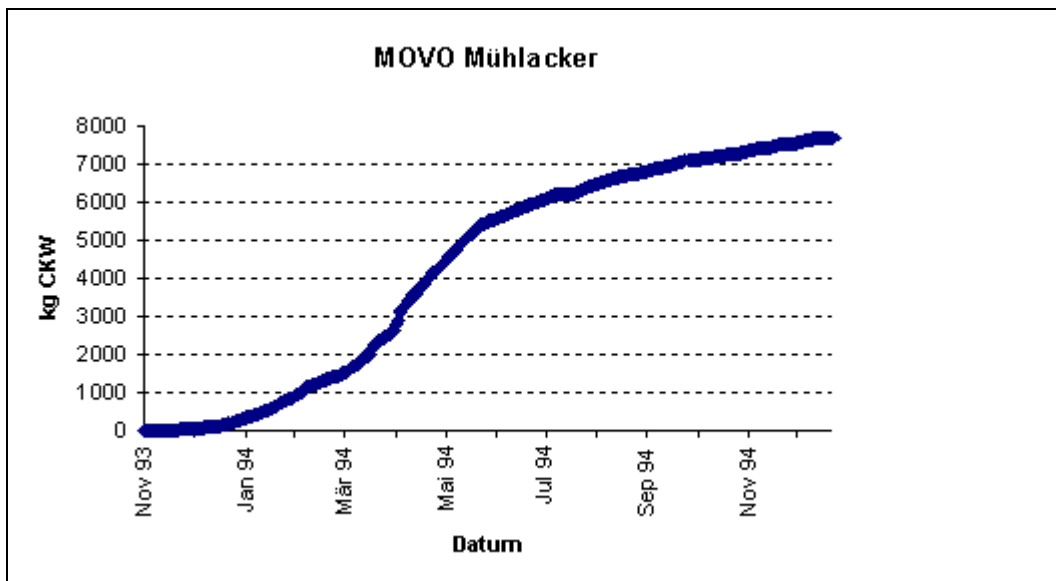


Abb. 1: Typischer Sanierungsverlauf einer Bodenluftabsaugung (Modellvorhaben Mühlacker), Austrag akkumuliert

Der Austrag

$$[\text{Fracht}] \text{ kg/d} = [\text{Volumenstrom}] \text{ m}^3/\text{d} * [\text{Konzentration}] \text{ mg/m}^3$$

ist erfahrungsgemäß zu Beginn der Sanierungsmaßnahme am größten. Er kann durch geschickte Anordnung der Brunnen sowie durch Einzelansteuerung der an den Absaugpegeln angelegten Unterdrücke optimiert werden. Unter der Annahme eines lokalen Gleichgewichts zwischen flüssiger und gasförmiger Phase gemäß dem Henryschen Gesetz nimmt der tägliche Austrag exponentiell ab. Er nimmt umso schneller ab, je undurchlässiger der Boden ist, weil dann nicht die Gleichgewichtseinstellung, sondern der Stofftransport durch Diffusion die limitierende Größe ist.

Oftmals ist die intermittierende Absaugung bei solch problematischen Standorten eine wirtschaftliche Alternative zum Dauerbetrieb der Anlage bei niedrigsten Konzentrationen.

Es ist zu prüfen, ob nach dem Abklingen des Austrages ein anderes Verfahren als zu Sanierungsbeginn eingesetzt werden sollte. So könnte beispielsweise zunächst für zwei Jahre eine Katalytische Oxidation das Verfahren der Wahl sein, um danach durch eine Festbettadsorption abgelöst zu werden.

3.3 Vorgegebene Grenzwerte

Bei der Auswahl eines oder mehrerer Verfahren zur Lösung eines speziellen Bodenluftproblems sind verschiedene Aspekte unterschiedlicher Priorität zu berücksichtigen. Die Aufgabenstellung lautet, die geförderte Bodenluft auf die vorgegebenen Grenzwerte abzureinigen.

Bodenluftabsauganlagen sind (noch?) keine genehmigungspflichtigen Anlagen im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes. Mit Hilfe der vorgestellten Verfahren ist es jedoch möglich, die Grenzwerte der TA Luft einzuhalten oder zu unterschreiten.

Im Einzelfall können in der Sanierungsanordnung strengere Abluftwerte festgelegt sein. Oft wird der in der TA Luft angegebene Konzentrationswert auch ohne Überschreitung des zulässigen Massenstroms gefordert.

Tabelle 2: Grenzwerte für typische Bodenluft-Kontaminanten nach TA Luft

<i>Schadstoff</i>	<i>zuläss. nach TA Luft [mg/m³]</i>	<i>^s Fracht [g/h]</i>
Vinylchlorid, Benzol	5	25
Tetrachlorkohlenstoff, 1,2-Dichlorethan, 1,1-Dichlorethen, Chloroform	20	100
Trichlorethylen, 1,1,1-Trichlorethan, Perchlorethylen, Chlorbenzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzol	100	2000
Dichlormethan, cis/trans-1,2-Dichlorethen, Paraffinkohlenwasserstoffe (außer Methan), Olefinkohlenwasserstoffe (außer 1,3-Butadien)	150	3000
H ₂ S	5	50
Phosgen (nur UV-Oxidation)	1	10
Chlor	5	50
anorg. Chlorverbindungen (als HCl)	30	300

4. Entscheidungsfindung

4.1 Vorgehensweise

Zu dem Zeitpunkt, zu dem die Entscheidung über das einzusetzende Abreinigungsverfahren fällig wird, liegen bereits einige mehr oder weniger gründlich abgesicherte Daten vor. Nachdem man sich die vorhandenen Ergebnisse entsprechend Kapitel 3 aufbereitet hat, wird vorgeschlagen, folgendermaßen weiterzugehen:

Zunächst werden die Hauptparameter

- zu erwartender Volumenstrom
- zu erwartende Gesamtschadstoffkonzentration
- zu erwartende Sanierungsdauer

gemäß einem vorgegebenen Punktekatalog bewertet und zusammengefaßt.

Da oftmals mehrere Verfahren, auch Verfahrenskombinationen möglich sind, wurde ein Flußdiagramm erarbeitet, mit dessen Hilfe man für viele Fälle eine erste Vorauswahl treffen kann. Anschließend wird diese Lösung, auch für komplexere Grenzfälle, überprüft, bevor die Auswahl endgültig bestätigt wird. Die Anwendung dieser Methode wird anhand von Beispielen erläutert.

4.2 Punktekatalog

1. Welcher Volumenstrom ist zu behandeln?

< 100 m ³ /h	1 Pkt.
100 - 300 m ³ /h	2 Pkt.
300 - 1000 m ³ /h	3 Pkt.
> 1000 m ³ /h	4 Pkt.

2. Welcher Konzentrationsbereich für das gesamte Schadstoffspektrum wird erwartet?

< 500 mg/m ³	1 Pkt.
500 - 1000 mg/m ³	2 Pkt.
1000 - 3000 mg/m ³	3 Pkt.
> 3000 mg/m ³	4 Pkt.

3. Wie lange wird im angegebenen Konzentrationsbereich saniert?

< 1 Jahr	1 Pkt.
1 - 2 Jahre	2 Pkt.
2 - 5 Jahre	3 Pkt.
> 5 Jahre	4 Pkt.

4.3 Entscheidungsdiagramm

Das **Entscheidungsdiagramm** ist so aufgebaut, daß jedes Verfahren in seinen sowohl verfahrenstechnisch als auch wirtschaftlich optimalen Bereich gestellt wird.

Wenn mehr als eine Antwort nicht eindeutig beantwortet werden kann, müssen weitere Bodenluftanalysen oder Vorversuche durchgeführt werden.

Bei einer unsicheren Antwort sollten beide Wege weiterverfolgt werden, möglicherweise ergibt sich der richtige Weg durch Ausschluß der anderen Möglichkeit.

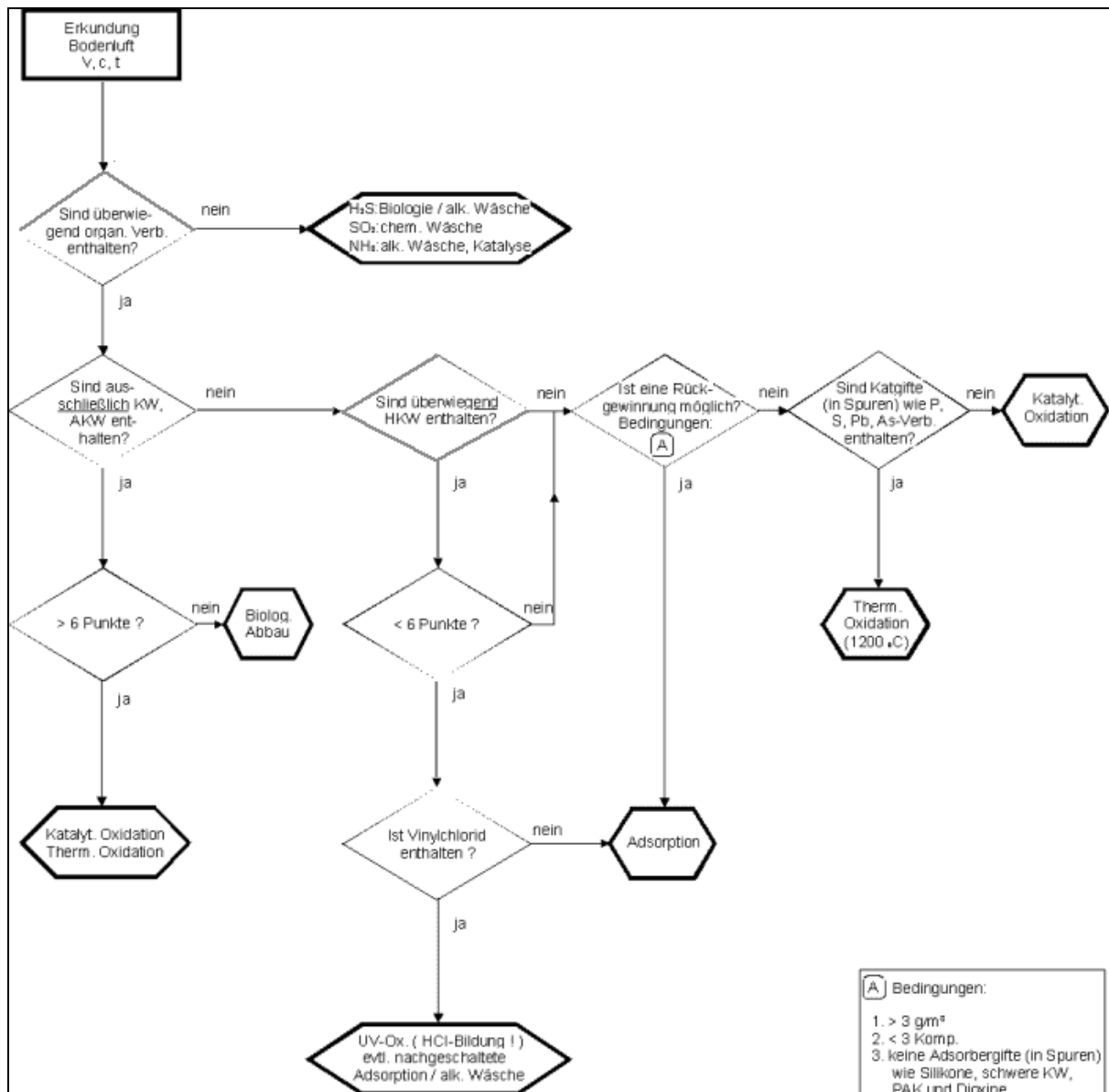


Abb. 2: Entscheidungsdiagramm

4.4 Überprüfung der Entscheidung

4.4.1 Empfindlichkeitsprüfung

Der Punktekatalog sollte mit leicht geänderten Ausgangsdaten, welche die Unsicherheit der Datengrundlage berücksichtigen, nochmals durchgegangen und ggf. das Entscheidungsdiagramm neu durchlaufen werden. Wenn sich bei geringfügig veränderten Rohluftdaten ein anderes Verfahren ergibt (Empfindlichkeitsprüfung), sollten beide Verfahren den folgenden Prüfungen unterzogen werden.

4.4.2 Einsatzgrenzen

Es gibt für nahezu jedes Verfahren Fälle, die besondere Beachtung bei der technischen Umsetzung erfordern. Die folgende Tabelle ist als Checkliste zu verstehen, welche grobe Fehleinschätzungen beim Durchlaufen des Entscheidungsdiagramms auffinden und beheben soll.

Für jedes Verfahren werden erschwerende Eigenschaften des zu behandelnden Rohluftstromes aufgegriffen und die Konsequenzen aufgezeigt, insbesondere wenn nach dem Entscheidungsdiagramm kein anderes Verfahren in Betracht kommt.

Tabelle 3: Flexibilisierung der Einsatzgrenzen

<i>Verfahren</i>	<i>Rohlufteigenschaften</i>	<i>Risiko</i>	<i>Technische Lösung</i>
Thermische Oxidation	Chlor- und gleichzeitig aromatische Verbindungen enthalten	Dioxinbildung	Erhöhung der Verbrennungstemp. und Verweilzeit sowie schlagartige Abkühlung der Abluft (Quench)
Katalytische Oxidation	Katalysatorgifte wie Pb, P, S, Cl enthalten	kein vollständiger Abbau der Schadstoffe	Reinigungsstufe voranschalten oder Standzeit verringern oder resistente Katalysatoren suchen
UV-Oxidation (ausschließlich für CKW)	Konzentrationen > 0,5 mg/m ³	kein vollständiger Abbau der Schadstoffe	2. Verfahren kombinieren, i.A. A-Kohle-Adsorption
Adsorption	harzende oder polymerisierende Verbindungen	Regenerierung nicht möglich	Opferkohle voranschalten oder Einwegkohle
Absorption	nicht einfach auftrennbare Schadstoffgemische	Desorption des Waschmittels nicht möglich	Schadstoffverlagerung in flüssige Phase
Biologie	Toxische Inhaltsstoffe	Inhibierung des Abbaus	Prüfen, ob wirklich toxisch in betreff. Konzentration

4.4.3 Wirtschaftliche Überlegungen

Bei der Angebotseinholung sollte daran gedacht werden, daß die Anfangskonzentration möglicherweise schnell abnimmt und das Verfahren flexibel reagieren muß. Die Kosten des Anlagenbetriebes sind daher bei verschiedenen Auslastungen zu ermitteln.

Der Umfang des analytischen Begleitprogrammes hängt nicht nur von den Erfordernissen der Austragsoptimierung, sondern auch vom gewählten Abreinigungsverfahren ab. Bei diskontinuierlichen Verfahren wie die der Festbettadsorption muß durch zusätzliche Analysen der Filterdurchbruch vermieden werden.

Je nach Automatisierbarkeit eines Verfahrens kann seine zeitliche Verfügbarkeit erhöht werden, sie wird durch zusätzliche Investitionen für Meß- und Steuerungstechnik erkaufte. Möglicherweise können jedoch dafür Wartungskosten eingespart werden. Dies muß am Einzelfall durchgerechnet werden. Durch eine automatische Registrierung aller Anlagenparameter ist eine lückenlose Betriebsdokumentation gewährleistet.

4.4.4 Ökologische Aspekte

Es ist darauf zu achten, daß keine Schadstoffverlagerung stattfindet. So sollte eine weitgehende Kreislaufführung von Adsorbentien und Waschmitteln durch Regeneration angestrebt werden, damit möglichst geringe Mengen an Rest- und Abfallstoffen entstehen. Das Verfahren mit dem geringsten Reststoff-, Abwasser- oder Abluftanfall ist zu bevorzugen.

Bei der katalytischen und der thermischen Oxidation ist eine Minimierung des Energieeintrages durch Wärmerückgewinnung anzustreben.

4.5 Beispiele

Anstelle eines 2. Durchlaufs mit geänderten Daten (4.4.1 Empfindlichkeitsprüfung) zeigt sich die Variationsbreite der Entscheidung als Intervallangabe beim Punktekatalog bzw. im Weiterverfolgen zweier Wege im Entscheidungsdiagramm.

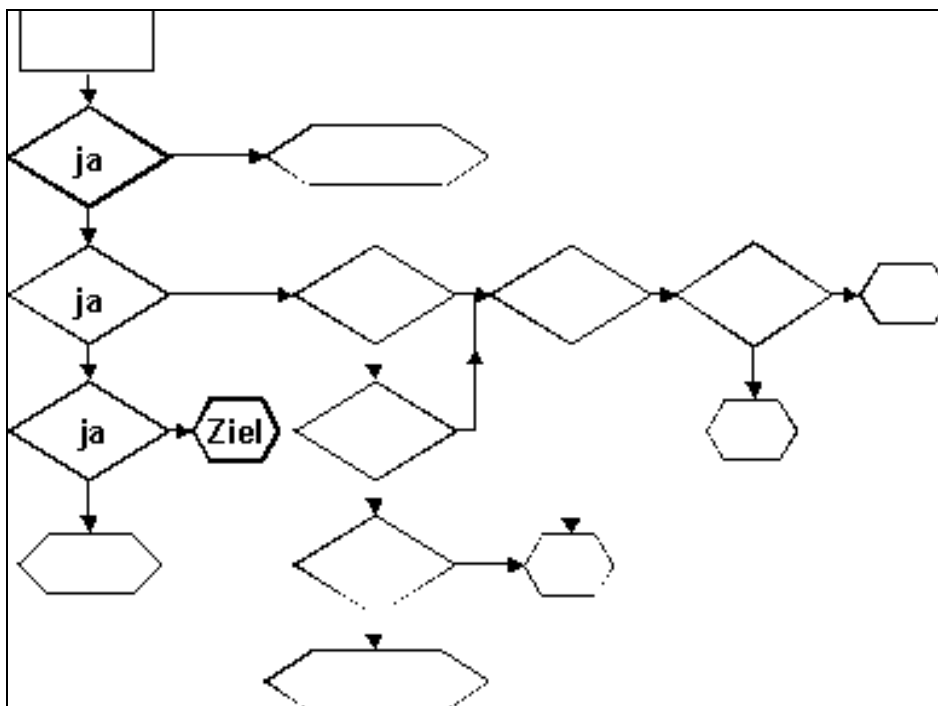
4.5.1 Schadensfall Tankstelle

Für ca. 1 Jahr fallen 200 m³/h an Benzindämpfen (800 mg/m³) an.

Punktekatalog

1. 2 Pkt.
2. 2 Pkt.
3. 1 Pkt.
5 Pkt.

Entscheidungsdiagramm



Sind überwiegend organ. Verbindungen enthalten?	Ja
Sind ausschließlich KW, AKW enthalten?	Ja
Wurden mehr als 6 Punkte erreicht?	Nein

⇒ Biologischer Abbau

Einsatzgrenzen

Bei der Wahl dieses Verfahrens ist anzumerken, daß die in sog. verbleitem Benzin als Antiklopfmittel verwendeten organischen Bleiverbindungen höheren Konzentrationen, ebenso wie Benzol, toxisch wirken können.

4.5.2 Altstandort Gaswerk

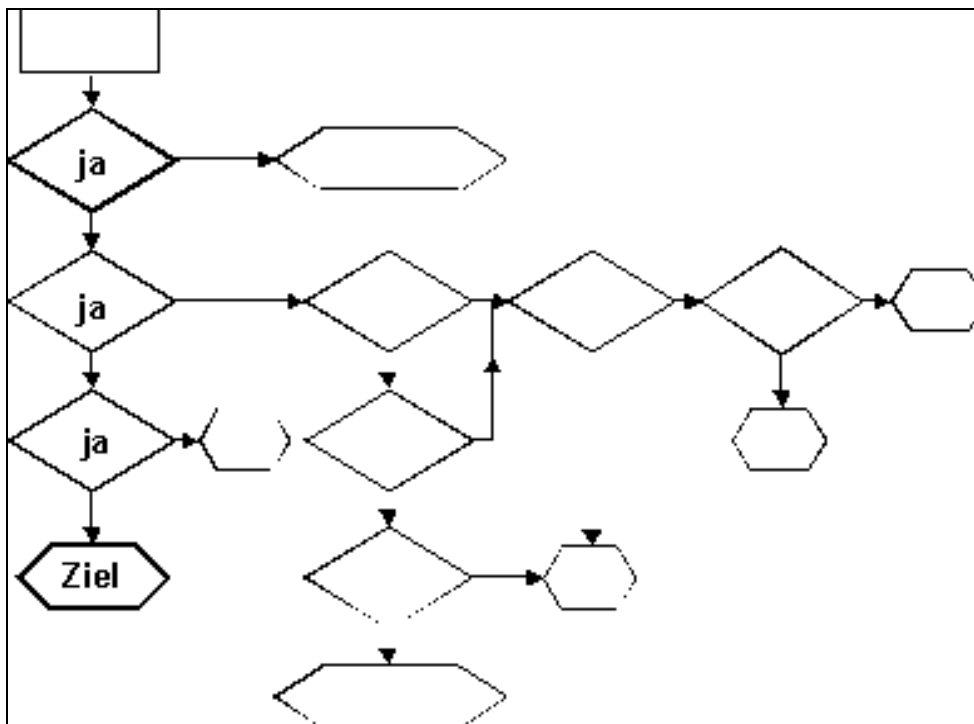
Für ca. 3 Jahre fallen 750 m³ Bodenluft an.

Benzol 100 mg/m³
Summe BTXE 1500 mg/m³

Punktecatalog

1. 3 Pkt.
2. 3 Pkt.
3. 3 Pkt.
9 Pkt.

Entscheidungsdiagramm



Sind überwiegend organ. Verbindungen enthalten? Ja

Sind ausschließlich KW, AKW enthalten? Ja

Wurden mehr als 6 Punkte erreicht? Ja

⇒ Katalytische oder thermische Oxidation

Einsatzgrenzen

Durch Analyse Vorhandensein von Katalysatorgiften überprüfen, Kosten zur Katalyse hinzurechnen!

Wirtschaftl. Aspekte

Angebote von beiden Verfahren einholen.

Ökologische Aspekte

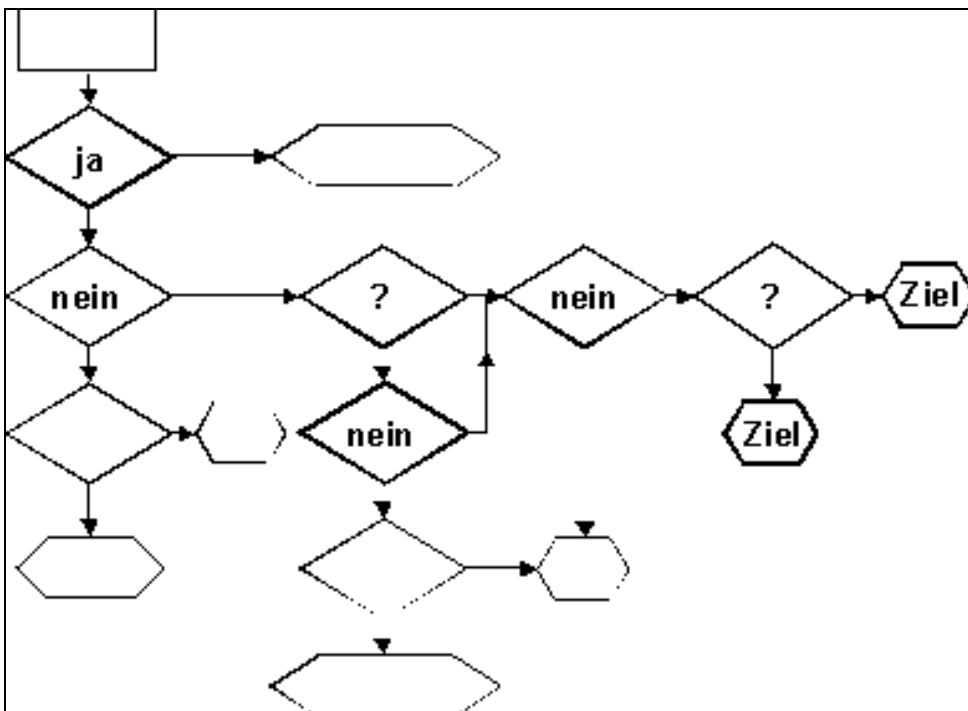
Reststoffe bei Katalyse: Verbrauchtes Katalysatormaterial (bei dieser Bodenluftzusammensetzung jedoch lange Standzeit)

4.5.3 Ehemalige Sonderabfalldéponie

Für ca. 1 Jahr werden 300 m³/h Bodenluft mit einem Schadstoffgemisch aus CKW, AKW und KW abgesaugt, Gesamtkonzentration ca. 900 mg/m³.

Punktecatalog

1. 2 - 3 Pkt.
2. 2 Pkt.
3. 1 - 2 Pkt.
5 - 7 Pkt.

Entscheidungsdiagramm

Sind überwiegend organ. Verbindungen enthalten? Ja
Sind ausschließlich KW, AKW enthalten? Nein
Sind überwiegend HKW enthalten? ?

Bei unklarer Antwort beide Wege weiterverfolgen:

Ist eine Rückgewinnung möglich? Nein
< 6 Punkte ? Nein

Damit kommt man automatisch wieder auf :

Ist eine Rückgewinnung möglich? Nein
Sind Katalysatorgifte enthalten? ?

⇒ Katalytische oder thermische Oxidation (1200 °C)

Überprüfung s. 4.5.2

5. Technische Realisierung der Verfahren

5.1 Vorversuche

Je nach gewähltem Verfahren sind entsprechend Kap. 4.4 weitere Untersuchungsschritte zu veranlassen, weil die Bodenluft nicht ausschließlich die Beimischungen enthält, nach denen bei der Standorterkundung untersucht wurde.

Bereits bei den Absaugversuchen zur Brunnenkonfiguration muß die Bodenluft abgereinigt werden. Man sollte sich deshalb schon zu diesem Zeitpunkt über die grundsätzliche Einsetzbarkeit von Abreinigungsverfahren informiert haben, um möglichst frühzeitig die Einsatzgrenzen überprüfen zu können.

So ist es z.B. für die Dimensionierung einer *Adsorptionsanlage* ein relativ geringer Aufwand, bereits bei den ersten Absaugversuchen Untersuchungen für den Einsatz von Aktivkohle mit einzuplanen.

Die Ergebnisse eines Vorversuchs sind besonders bei Vielstoffgemischen durch theoretische Überlegungen nicht zu ersetzen.

Sie geben Aufschluß über den erreichbaren Umsatz bzw. Abreinigungsgrad. Somit kann beurteilt werden, ob die Grenzwerte eingehalten werden können. Bei sorgfältiger Durchführung ist weiterhin eine überschlägige Abschätzung der Betriebsmittel möglich, so daß die Anlagenbetriebskosten vorausberechnet werden können.

5.2 Thermische Oxidation

Besondere Eignung

- wenn gleichzeitig flüssige Abfälle vernichtet werden sollen
- wenn alle anderen Verfahren wegen unverträglichen Beimengungen (Harze, Phenole oder Weichmacher) versagen.

Dann wird jedoch meistens eine Verbrennungstemperatur von über 1200 °C bei ausreichender Verweilzeit gefordert, damit ein vollständiger Ausbrand sicher erreicht wird. Dies bedeutet hohe Betriebskosten aufgrund der Stützfeuerung.

Sind in der Bodenluft gleichzeitig chlorhaltige Verbindungen und (polycyclische) aromatische Kohlenwasserstoffe oder polychlorierte Biphenyle enthalten, ist die thermische Zersetzung dieser Verbindungen zwar möglich, doch es besteht die Gefahr, daß sich während der Abkühlphase der Abluft im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 400 °C Dioxine und Furane bilden.

Der Temperaturbereich, in dem Dioxine zerstört werden, liegt bei ca. 1200 °C. Doch selbst in Anlagen, die in diesem Temperaturbereichen arbeiten, können am Reaktorausgang (300 - 400 °C) oder auf nachgeschalteten Staubfiltern (häufige Betriebstemperatur 250 °C) Dioxine gebildet werden. Die Anwesenheit von Staubpartikeln fördert hierbei die Bildung von Dioxen (De-Novo-Synthese). Da in Vorversuchen meist die zur Dioxinprobenahme erforderlichen Abluftströme nicht verfügbar sind, ist es sicherer, beim Vorhandensein eines evtl. dioxinbildenden Gemisches in der Anlagenplanung von vorneherein eine Quenche vorzusehen. Der gereinigte Abluftstrom wird schlagartig auf Temperaturen unter 100 °C abgekühlt, um den für die Dioxinbildung relevanten Temperaturbereich zu überspringen. Hierbei geht die im Reingas gespeicherte Energie verloren und kann nicht mehr zur Aufheizung des zu reinigenden Gasstromes dienen.

Vorversuche für die thermische Oxidation beschränken sich normalerweise auf eine Brennwertermittlung des Bodenluftstromes. Ausgewertet wird die sich einstellende Temperaturerhöhung des Gasstroms durch die freiwerdende Reaktionsenthalpie. Sie ist relativ preiswert und unkompliziert durchzuführen. Aus dem Brennwert kann die zusätzlich erforderliche Energiemenge für die Stützfeuerung berechnet werden.

Zur besseren Ausnutzung der Reaktionswärme ist bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen die Brennkammer als Wärmetauscher in Form von Keramikwabenkörpern ausgebildet. Durch pendelnde Abluftführung wird die Reaktionsenergie zur Vorwärmung des Rohgases ausgenutzt (ab 1 g/m³ autotherm, 450 - 700 °C Verbrennungstemperatur).

5.3 Katalytische Oxidation

Für die vergleichende Betrachtung von *Katalytischer Oxidation* und *Thermischer Abluftreinigung* ist ebenfalls eine Brennwert-Ermittlung sinnvoll.

Die Reinigungsleistung respektive der erreichbare Umsatz hängt ab von

- der Art und Konzentration der Schadstoffe
- Sauerstoffgehalt und Eintrittstemperatur des Abgases
- Temperatur und Raumgeschwindigkeit im Katalysator
- dem Katalysatormaterial

Diese Größen sollten in einem Vorversuch möglichst genau ermittelt werden.

Bei Unsicherheiten, ob Katalysatorgifte im Bodenluftstrom enthalten sind, wird eine Emmisionsmessung direkt nach der Absaugvorrichtung (i.A. Seitenkanalverdichter) empfohlen, bei der die Dämpfe und mitgerissenen Stäube auf die entsprechenden Elemente (Pb, S, P, As usw.) untersucht werden. Diese relativ teure Untersuchung (ca. 5.000 - 8.000.- DM) ist zu rechtfertigen, wenn man die gegenüber der Thermischen Abluftreinigung eingesparten Betriebskosten betrachtet.

Typische Katalysatorgifte sind

- Halogenverbindungen (nicht bei resistenten Katalysatormaterialien)
- Phosphor- oder Schwefelverbindungen,
- Siliciumverbindungen (Silikone),
- metallorganische Verbindungen (Bleialkyle/-carbonyle),
- Selen- und Arsenverbindungen.

5.4 UV-Oxidation

Der Vorversuch soll die

- richtige Auswahl des Strahlers
- die Verweilzeit zur Maximierung des Umsatzes

feststellen. Dies wird erreicht, indem einerseits verschiedene Röhren eingesetzt werden, andererseits der durchgeschickte Volumenstrom variiert wird. Die mittlere Verweilzeit bei der **UV-Oxidation** beträgt nur wenige Sekunden. Eine Erhöhung der Verweilzeit führt zu höheren Umsätzen, allerdings sollte die Kettenreaktion möglichst bei Austritt des Gasstroms aus dem Reaktor abgeschlossen sein. Andernfalls ist bei hohen Schadstoffkonzentrationen eine Rekombination noch vorhandener Radikale zu organischen Produkten nicht völlig ausgeschlossen. Durch die Rekombination von Radikalen an den Reaktorwänden und den dadurch bedingten Reaktionsabbruch, sowie durch relativ kurze Verweilzeiten der Schadstoffe im Reaktor kommt es nicht zu einem vollständigen Abbau der Schadstoffe. Die unvollständige Umsetzung kann außerdem zur Neubildung von umweltschädlichen Substanzen führen. Zur Probenahme für Screening-Versuche zur Ermittlung unerwünschter Nebenprodukte haben sich Plastikbeutel bewährt.

Weiterhin sollten die Temperaturerhöhung im Strahler erfaßt werden, damit gegebenenfalls eine Kühlung miteingeplant werden kann. Wenn der Gasstrom in Strahlernähe hohen Temperaturgradienten ausgesetzt ist, steigt die Wahrscheinlichkeit der Dioxinbildung. Zur Umsatzermittlung bei allen Oxidationsversuchen gilt generell, daß in der Probenahmeleitung eine ausreichende Abkühlung des Probenahmevolumens erfolgt, andernfalls muß ab Temperaturdifferenzen von > 50 K zur Umsatzermittlung eine Volumenkorrektur vorgenommen werden, die die Ausdehnung des Gases berücksichtigt. Andernfalls wird eine vermeintliche Abreinigung vorgetäuscht. Als zuverlässig hat sich die Probenahme mittels Handpumpen herausgestellt, weil Samplerpumpen auf Druckschwankungen in der Leitung, welche durch die Seitenkanalverdichter ständig vorhanden sind, zu empfindlich reagieren.

Bei höheren Schadstoffkonzentrationen und großer zu durchstrahlender Schichtdicke ist das Auftreten eines Filtereffektes durch Molekülschatten denkbar, wodurch es zu einer Verminderung des Schadstoffabbaues kommen kann. Untersuchungen haben gezeigt, daß Schadstoffe wie beispielsweise Tri- und Tetrachlorethen sowie Vinylchlorid relativ leicht umgesetzt werden können. Hingegen können als Beispiele für leichtflüchtige, schwerabbaubare Verbindungen Toluol, Xylol und 1,2-Dichlorethen genannt werden. Für Vielstoffgemische ist die UV-Oxidationsanlage als alleinige Abreinigungsstufe nicht ausreichend.

5.5 Adsorption

Die Dimensionierung eines Aktivkohlefilters für einen Einzelstoff kann sehr genau vorgenommen werden, hierüber liegen ausreichend Stoffdaten vor. Ein Vorversuch ist eigentlich nur da vonnöten, wenn ein Schadstoffgemisch in sehr geringen Konzentrationen vorliegt, so daß oxidative Verfahren relativ teuer sind.

Im Schadstoffgemisch tritt konkurrierende **Adsorption** auf, d.h. der leichter adsorbierbare Stoff wird zuerst adsorbiert, der schwerer adsorbierbare Stoff wird im Festbett räumlich dahinter festgehalten. Weiterhin können bei teilbeladener Aktivkohle Verdrängungseffekte auftreten, so daß Stoffe mit leichterer Bindung von fester gebundenen Substanzen ersetzt werden. Die flüchtigere Substanz lagert sich ebenfalls weiter hinten im Filter ab. So können Chromatographie-Effekte entstehen, daß die verschiedenen Substanzen im Filter aufgetrennt werden und in Schadstofffronten den Filter durchschlagen.

Bei Aktivkohle wirkt sich aufgrund ihrer Hydrophobie die Anwesenheit von Wasserdampf nicht so negativ aus wie bei anderen Adsorbentien, organische Stoffe werden bevorzugt adsorbiert. Bei höheren Wasserdampfgehalten verringert sich die Adsorptionskapazität für organische Stoffe. Je geringer deren Wasserlöslichkeit ist, desto geringer ist die Adsorptionskapazität /12/

Nicht alle Stoffe lassen sich gleich gut an dem Adsorptionsmittel anlagern. Vinylchlorid ist beispielsweise eine Verbindung, die von Aktivkohle nur schlecht zurückgehalten werden kann, aber bei der Bodenluftsanierung von Standorten mit halogenierten Kohlenwasserstoffen häufig anzutreffen ist. In diesem Falle muß das Adsorptionsverfahren durch eine Verfahrenseinheit (z.B. UV-Oxidation) erweitert oder nach Durchbruch der ersten Schadstoffkomponente ausgetauscht werden. Ebenfalls ungeeignet ist die Aktivkohleadsorption für Aceton, Methanol, Ethanol, Propan, i-Propanol.

Der Vorversuch soll

- das optimale Adsorbens für die vorliegende Schadstoffkombination
- das Durchbruchverhalten des Filters
- sowie bei vorgegebenem Grenzwert die maximale Beladepazität

ermitteln.

Hierzu wird beispielsweise eine kleinere Aktivkohlemenge in einer Bypass-Schaltung bis zum Durchbruch zu beladen. Anschließend werden horizontalisiert einzelne Filterschichten beprobt, um

- wandernde Schadstofffronten
- angereicherte, nicht desorbierbare Komponenten (KW; Silikone u. Harze, Schwermetalle usw.)

aufzufinden.

Durch die freiwerdende Adsorptionswärme heizt sich besonders im Bereich hoher Beladungen der Filter auf, so daß Zersetzungsreaktionen der Lösungsmittel auftreten können. Insbesondere

bei Aldehyden und Ketonen können durch ihre leichte Oxidierbarkeit Adsorberbrände entstehen.

5.6 Absorption

Sofern die **Absorption** die Entfernung saurer Luftinhaltsstoffe bezweckt, wie sie bei der Oxidation von CKW auftreten, werden keine Vorversuche benötigt. Die Dimensionierung bzw. Auswahl des Absorbers erfolgt nach den einschlägigen Regelwerken.

Ein besonders zu beachtender Anwendungsfall ist die direkte Entfernung der Luftkontaminanten mittels Absorption, i.a. für die Bodenluftabsaugung auf Altlasten ein zu teures und aufwendiges Verfahren, bei Schadensfällen jedoch u.U. eine zu prüfende Alternative. Absorptionsverfahren für organische Lösungsmittel sind aufgrund der Vor-Ort-Regeneration betriebstechnisch nicht einfach zu handhaben und erst ab Volumenströmen von über 5000 m³/h und Konzentrationen von über 5 g/m³ gegenüber der Adsorption konkurrenzfähig /19/.

Hierzu sind bei Stoffgemischen Vorversuche zur Regenerationsfähigkeit des Waschmittels erforderlich, da andernfalls lediglich eine Schadstoffverlagerung in ein flüssiges Medium stattfindet.

5.7 Biologische Verfahren

Vorversuche zu biologischen Abreinigungsverfahren, insbesondere zu Biofiltern, sind nicht empfehlenswert, weil die Adaption der Biologie an den betreffenden Standort relativ lange (einige Wochen) dauert und die Ergebnisse auf die größere Sanierungsanlage nicht notwendigerweise übertragbar sind. **Biologische Verfahren** sollten nur für als gut abbaubar bekannte Stoffe eingesetzt werden, Besonderheiten in der Verfahrensführung (Nährlösungen, Wahl des Substrates) usw. sollten zunächst in Laborversuchen überprüft werden.

Das Filtermaterial hat einerseits die Aufgabe, die Schadstoffe zurückzuhalten (ad-/absorbieren), um sie dem biologischen Abbau zugänglich zu machen, andererseits dient es manchen Mikroorganismen als Substrat (kometabolischer Abbau) und wird seinerseits mit verstoffwechselt.

Als Filtermaterialien können Kompost aus organischem Müll, Rinde, Laub und Papier sowie Heidekraut und Reisig verwendet werden. Es gibt jedoch auch Biofilter, die mit Rindenschrot und andere Rindenprodukte gefüllt sind. Oft werden diese genannten Filterbestandteile in Kombination von zwei bis drei Stoffen eingesetzt. Zur Auflockerung des Filtrats können außerdem noch inerte Zuschlagsstoffe oder Trägermaterialien wie Styropor, Lava und Blähton zugesetzt werden.

Trocknet das Filtermaterial zu stark aus, entstehen Risse und Verklumpungen. Durch die Wiederbefeuchtung des Biofilters kann die ursprüngliche Filterleistung nicht mehr erreicht werden, weil das Rohgas bevorzugt durch die entstandenen Kanalzonen fließt und nur ein geringer Teil der Gesamtfläche zum Stoffaustausch genutzt wird. Pflanzenaufwuchs auf der Filteroberfläche sollte ebenfalls vermieden werden, da bevorzugte Wegigkeiten entlang der Wurzeln entstehen. Ribildung und Verklumpung kann mit Hilfe einer Druckverlustmessung kontrolliert werden.

Eine ausreichende *Wasserlöslichkeit* der Schadstoffe ist eine Voraussetzung für den mikrobiellen Abbau. Gerade die geringe Wasserlöslichkeit einiger altlastenrelevanter Schadstoffe, z.B. höher kondensierter Aromaten, ist oft der begrenzende Faktor für den Einsatz von biologischen Sanierungsverfahren.

Die *biologische Abbaubarkeit* des zu behandelnden Schadstoffes ist dann gegeben, wenn man einen Mikroorganismus findet, welcher den Schadstoff als Substrat verwenden kann. Mit der Anreicherungsmethode ist es beispielsweise möglich, einen bestimmten Mikroorganismus aus einer Mischkultur zu isolieren und ihn durch Zugabe von Nährlösungen (z.B. Stickstoff, Phosphat), sowie der Einstellung von optimalen Lebensbedingungen zu einer Reinkultur aufzubauen. Durch die Züchtung von Bakterien können heute eine ganze Reihe von Schadstoffen biologisch abgebaut werden.

Hohe *Schadstoffkonzentrationen* können zu toxischen Effekten und zur weitgehenden Abtötung der vorhandenen Mikroorganismenpopulation führen. Trotz prinzipieller Abbaubarkeit und günstigen Lebensbedingungen im Biofilter kann es in diesen Fällen zu einer drastischen Minimierung oder zu einem gänzlichen Ausfall des mikrobiologischen Schadstoffabbaues führen.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ Fritz, W.; und Kern, H.: Reinigung von Abgasen, Vogel Verlag und Druck KG, 3. Auflage, Würzburg 1992
- /2/ Gans, W.: Gleichgewicht und Kinetik bei der Adsorption organischer Dämpfe an Aktivkohle, VDI-Verlag
- /3/ Kast, W.: Adsorption aus der Gasphase, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1988
- /4/ Fa. Eisenmann: Prospekt "Leitfaden Umwelttechnik", 7. Auflage, 1992
- /5/ Baumbach, G.: Luftreinhaltung, Springer-Verlag, 3. Auflage, 1993
- /6/ Mackenbrock, U., Kopp-Holtwiesche, Blank, W.: Zur biologischen Abbaubarkeit von Industriechemikalien, TerraTech, Nr. 4/1994, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz
- /7/ Schindler, Friedl: Staub - Reinhaltung der Luft, 1995
- /8/ Menig: Luftreinhaltung durch Adsorption, Absorption, Oxidation, Deutscher Fachschriften Verlag, Wiesbaden 1977
- /9/ Reschke, G., Mathews W.: Abluftreinigung und Lösungsmittelrückgewinnung durch Adsorption an Adsorberharzen, Chem.-Ing.-Tech. 67 (1995), VCH Verlagsgemeinschaft mbH, 69469 Weinheim, 1995
- /10/ Sattler: Thermische Trennverfahren, VCH-Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1988
- /11/ VDI Reihe 3 / Nr. 70; Adsorption organ. Stoffe an Aktivkohle aus einem Luftstrom mit geringer Gaskonzentration
- /12/ Ripperger, S.: Adsorption organischer Stoffe an Aktivkohle aus einem Luftstrom mit geringer Gaskonzentration, VDI-Verlag, Düsseldorf 1982
- /13/ Grabhorn, H., Herzog, F.: Kondensationsverfahren zur Lösemittelrückgewinnung und Abgasreinigung, Wasser/ Luft/ Boden 6/1995
- /14/ Kobelt, G.: Biologische Abluftreinigung, Grundlagen - Planung - Betrieb, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1995
- /15/ Stucki, G., Goy, A., Schmuckli, R., Cedraschi, P.: Biologische Reinigung von Abluft aus der chemischen Industrie, Staub - Reinhaltung der Luft 55 (1995), Springer-Verlag 1995
- /16/ Schlünder E.-U., Thurner, F.: Destillation, Absorption, Extraktion, Georg-Thieme Verlag, Stuttgart 1986
- /17/ VDI-Richtlinie 2280: Auswurfbegrenzung Organische Verbindungen - insbesondere Lösungsmittel
- /18/ Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Leitfaden zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, 2. Aufl., München 1990
- /19/ Weiß, S., Wanko, H., Kalina, A.: EntsorgungsPraxis 3/94, Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH, Gütersloh
- /20/ Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Hydraulische und pneumatische in-situ-Verfahren, Karlsruhe 1995
- /21/ VDI-Entwurf 3897: Emissionsminderung: Anlagen zur Bodenluftabsaugung und zum Grundwasserstrippen, Düsseldorf 1996

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Typischer Sanierungsverlauf einer Bodenluftabsaugung (Modellvorhaben Mühlacker), Austrag akkumuliert	11
Abb. 2: Entscheidungsdiagramm.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einsatzbereiche der zur Abreinigung von Bodenluft eingesetzten Verfahren, kein Anspruch auf Vollständigkeit	3
Tabelle 2: Grenzwerte für typische Bodenluft-Kontaminanten nach TA Luft	12
Tabelle 3: Flexibilisierung der Einsatzgrenzen	15

Indexverzeichnis

A		
Abgasreinigung		
Absorption	8	
Adsorption	7	
biologische Verfahren.....	9	
Einsatzbereiche	3	
Einsatzgrenzen.....	15	
Entscheidungsdiagramm.....	14	
Fallbeispiele.....	17	
katalytische Oxidation	5	
ökologische Aspekte.....	16	
Schadstoffmenge und zeitlicher Verlauf des Austrags.....	11	
Schadstoffspektrum und -konzentration	10	
thermische Oxidation.....	4	
UV-Oxidation	6	
vorgegebene Grenzwerte	12	
Vorgehensweise.....	13	
Vorversuche.....	21	
wirtschaftliche Überlegungen	16	
Abluftreinigung		
Absorption	8	
Adsorption	7	
Allgemeines	1	
biologische Verfahren.....	9	
Einsatzbereiche	3	
Einsatzgrenzen.....	15	
Entscheidungsdiagramm.....	14	
Fallbeispiele.....	17	
katalytische Oxidation	5	
ökologische Aspekte.....	16	
Schadstoffmenge und zeitlicher Verlauf des Austrags.....	11	
Schadstoffspektrum und -konzentration	10	
thermische Oxidation.....	4	
UV-Oxidation	6	
vorgegebene Grenzwerte.....	12	
Vorgehensweise	13	
Vorversuche	21	
wirtschaftliche Überlegungen	16	
Absorption - Abluftreinigung		
Allgemeines	8	
Vorversuche	26	
Adsorption - Abluftreinigung		
Allgemeines	7	
Vorversuche	25	
B		
biologische Verfahren - Abluftreinigung ..	9	
Vorversuche	27	
Bodenluftsanierung - Abluftreinigung		
Absorption.....	8	
Adsorption.....	7	
Allgemeines	1	
biologische Verfahren	9	
Einsatzgrenzen	15	
Entscheidungsdiagramm	14	
Fallbeispiele	17	
katalytische Oxidation.....	5	
ökologische Aspekte	16	
Schadstoffmenge und zeitlicher Verlauf des Austrags	11	
Schadstoffspektrum und -konzentration	10	
thermische Oxidation.....	4	
UV-Oxidation	6	
vorgegebene Grenzwerte.....	12	
Vorgehensweise	13	
Vorversuche	21	
wirtschaftliche Überlegungen	16	
F		
Fallbeispiele		
Abgasreinigung	17	
Abluftreinigung.....	17	
Bodenluftsanierung - Abluftreinigung	17	
K		
katalytische Oxidation		
Abluftreinigung.....	5, 23	
T		
thermische Oxidation		
Abluftreinigung.....	4, 22	
U		
UV-Oxidation		
Abluftreinigung.....	6, 24	