

Hamburger Berichte 32

Abfallwirtschaft

Technische Universität Hamburg-Harburg

Mirko Schlegelmilch

# GERUCHSMANAGEMENT

Methoden zur

Bewertung und Verminderung

von Geruchsemissionen

**Verlag Abfall *aktuell***

Schlegelmilch

**GERUCHSMANAGEMENT**

**Methoden zur Bewertung und Verminderung von Geruchsemissionen**

**Hamburger Berichte**  
Band 32

Herausgegeben von  
**Professor Dr.-Ing. R. Stegmann**

# **GERUCHSMANAGEMENT**

## **Methoden zur Bewertung und Verminderung von Geruchsemissionen**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Mirko Schlegelmilch

aus

Bremerhaven

2008

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann

2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 22.5.2008

Die Deutsche Bibliothek CIP- Einheitsaufnahme

**Schlegelmilch, Mirko:**

**GERUCHSMANAGEMENT**

Methoden zur Bewertung und Verminderung von Geruchsemissionen

Stuttgart: Verlag Abfall *aktuell*, 2009

(Hamburger Berichte; Bd. 32)

ISBN 978-3-9810064-9-0

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Verlages gestattet.

© 2009 Verlag Abfall *aktuell*, Stuttgart

Druck: Buch- & Offsetdruckerei Stubbemann GmbH, Hamburg

Papier: hergestellt aus 100% chlorfrei gebleichten Faserstoffen

ISBN 978-3-9810064-9-0

Für meine Eltern



---

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RECHTLICHE GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG UND VERMEIDUNG VON GERUCHSEMISSIONEN IN DEUTSCHLAND.....</b>	<b>3</b>
2.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG).....	3
2.2	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft).....	3
2.3	30. Bundes-Immissionsschutzverordnung (30. BImSchV).....	5
2.4	Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL).....	5
2.5	Zusammenfassung .....	7
<b>3</b>	<b>GERÜCHE.....</b>	<b>9</b>
3.1	Physiologische Geruchswahrnehmung.....	9
3.2	Psychologische Geruchswahrnehmung.....	13
3.3	Messung von Gerüchen.....	15
3.4	Eigenschaften von Geruchsstoffen.....	16
3.4.1	<i>Flüchtigkeit</i> .....	16
3.4.2	<i>Löslichkeit</i> .....	17
3.4.3	<i>Struktureller Aufbau</i> .....	18
3.5	Messung von Geruchsstoffen .....	19
3.5.1	<i>Probenanreicherung</i> .....	19
3.5.2	<i>Analysemethoden</i> .....	22
<b>4</b>	<b>TECHNISCHE BEHANDLUNGSVERFAHREN ZUR REDUZIERUNG VON GERUCHSEMISSIONEN .....</b>	<b>27</b>
4.1	Adsorptionsverfahren.....	28
4.2	Absorptionsverfahren.....	30
4.3	Biologische Verfahren.....	31
4.3.1	<i>Biofilter</i> .....	32
4.3.2	<i>Biowäscher und Biotropfkörper</i> .....	36

4.3.3	<i>Kombination von Biowäscher und Biofilter</i> .....	37
<b>5</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>39</b>
5.1	Geruchsminderungsgrad .....	39
5.2	Statistische Versuchsplanung.....	39
<b>6</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>45</b>
6.1	Gasanalytik.....	45
6.1.1	<i>Probenahme</i> .....	45
6.1.2	<i>Olfaktometrie</i> .....	46
6.1.3	<i>SPME-GC/MS-Methode</i> .....	47
6.2	Feststoffanalytik.....	48
6.2.1	<i>Wassergehalt</i> .....	48
6.2.2	<i>Wasserhaltekapazität</i> .....	49
6.2.3	<i>Schüttdichte</i> .....	50
6.2.4	<i>Luftporenvolumen</i> .....	50
6.2.5	<i>Chemisch-physikalische Analysen im Eluat</i> .....	51
6.2.6	<i>Chemisch-physikalische Analysen von Feststoffproben</i> .....	53
6.2.7	<i>Keimzahlbestimmung</i> .....	54
6.3	Emissionsquellen.....	56
6.3.1	<i>Öl – und Fettveredelung (Desodorierung)</i> .....	56
6.3.2	<i>Schokoladenmasseherstellung (Conchieren)</i> .....	57
6.3.3	<i>Kaffeeveredelung</i> .....	58
6.4	Versuchsanlagen .....	59
6.4.1	<i>Statisches Testsystem</i> .....	59
6.4.2	<i>Dynamisches Testsystem</i> .....	61
6.4.3	<i>Versuchsanlage im Technikumsmaßstab</i> .....	64
6.4.4	<i>Versuchsanlage im Containermaßstab</i> .....	65
6.5	Medien/Materialien zur Reinigung geruchsbeladener Abluft.....	71
6.5.1	<i>Biofiltermaterialien</i> .....	71
6.5.2	<i>Adsorbentien</i> .....	77
6.5.3	<i>Absorbentien</i> .....	77

---

<b>7</b>	<b>ENTWICKLUNG EINES GERUCHSMANAGEMENTKONZEPTES .....</b>	<b>79</b>
7.1	Erfassung grundlegender Informationen.....	80
7.2	Erstellung eines Geruchskatasters .....	81
7.2.1	<i>Erfassung von Emissionsquellen.....</i>	<i>82</i>
7.2.2	<i>Charakterisierung und Bewertung der Geruchsquellen .....</i>	<i>84</i>
7.3	Vermeidung und Erfassung von Geruchsemissionen .....	86
7.4	Untersuchungen mit Testsystemen .....	89
7.5	Erhebung von Auslegungsdaten und technische Umsetzung.....	89
<b>8</b>	<b>GERUCHSSPEZIFISCHE DATENBANK.....</b>	<b>91</b>
8.1	Struktur der Datenbank.....	92
8.2	Verwaltung der Informationen innerhalb der Datenbank.....	94
8.3	Dateneingabe .....	99
<b>9</b>	<b>CHEMISCH-ANALYTISCHE BEURTEILUNG VON GERUCHSEMISSIONEN ÜBER HAUPTGERUCHSSTOFFE .....</b>	<b>101</b>
9.1	Bestimmung von Hauptgeruchsstoffen .....	101
9.2	Abschätzung der Aussagekraft von Hauptgeruchsstoffen zur Beurteilung von Gerüchen (Odour-Index-Methode) .....	107
9.2.1	<i>Versuchsbedingungen.....</i>	<i>107</i>
9.2.2	<i>Beschreibung von Konzentrationsänderungen über den Odour-Index.....</i>	<i>108</i>
9.2.3	<i>Beschreibung der Änderung des Geruchseindrucks über den Odour-Index</i>	<i>119</i>
9.3	Zusammenfassung .....	121
<b>10</b>	<b>OPTIMIERUNG DER TESTSYSTEME.....</b>	<b>123</b>
10.1	Optimierung des statischen Testsystems .....	123
10.1.1	<i>Vorversuche (Abluft aus Schokoladenherstellung).....</i>	<i>125</i>
10.1.2	<i>Simultane Optimierung der Zielgröße.....</i>	<i>130</i>
10.2	Optimierung dynamisches Testsystem .....	153
10.2.1	<i>Abluft aus der Öl- und Fettveredelung.....</i>	<i>153</i>

10.2.2	<i>Abluft aus Schokoladenmasseherstellung</i> .....	154
10.2.3	<i>Optimale Versuchsbedingungen für das dynamische Testsystem</i> .....	156
10.3	Optimierte Versuchsbedingungen für die Testsysteme .....	157
<b>11</b>	<b>BEURTEILUNG DER AUSSAGEKRAFT DER TESTSYSTEME</b> .....	<b>159</b>
11.1	Geruchsabbau durch Biofiltermaterialien.....	160
11.1.1	<i>Halbtechnische Versuchsanlage</i> .....	160
11.1.2	<i>Statisches Testsystem</i> .....	161
11.1.3	<i>Dynamisches Testsystem</i> .....	162
11.2	Einzelstoffabbau durch Biofiltermaterialien.....	163
11.2.1	<i>Statisches Testsystem</i> .....	165
11.2.2	<i>Dynamische Testsystem</i> .....	166
11.3	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse .....	166
<b>12</b>	<b>BEURTEILUNG DER REINIGUNGSLEISTUNG UNTERSCHIEDLICHER ABLUFTBEHANDLUNGSVERFAHREN</b> .....	<b>169</b>
12.1	Biologische Verfahren.....	169
12.2	Adsorption .....	175
<b>13</b>	<b>ANWENDUNG DES GERUCHSMANAGEMENTKONZEPTS AM BEISPIEL EINES ÖL- UND FETTVERARBEITENDEN BETRIEBES</b> .....	<b>179</b>
13.1	Grundlegende Informationen über Geruchsemissionen bei der Öl- und Fettveredelung .....	179
13.2	Erstellung eines Geruchskatasters .....	180
13.2.1	<i>Bestimmung und Bewertung der Geruchsquellen</i> .....	180
13.2.2	<i>Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe</i> .....	183
13.3	Auswahl geeigneter Behandlungsverfahren .....	187
13.3.1	<i>Voruntersuchungen mit Testsystemen</i> .....	188
13.3.2	<i>Überprüfung bisheriger Ergebnisse im Technikumsmaßstab</i> .....	190
13.3.3	<i>Vergleich von Biofiltermaterialien im Pilotmaßstab</i> .....	203
13.4	Auslegungsberechnungen anhand von Messwerten aus Pilotversuchen .	206

---

13.4.1	<i>Auslegung eines Biofilters</i> .....	206
13.4.2	<i>Auslegung einer Adsorptionsstufe</i> .....	209
13.5	Kostenabschätzung für die technische Umsetzung .....	210
13.5.1	<i>Biofilter</i> .....	211
13.5.2	<i>Adsorption</i> .....	212
13.5.3	<i>Biofilter/Adsorption-Kombination</i> .....	213
13.6	Zusammenfassung .....	214
<b>14</b>	<b>AUSBLICK</b> .....	<b>217</b>
<b>15</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>219</b>
<b>16</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>221</b>
<b>17</b>	<b>EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN</b> .....	<b>235</b>
<b>18</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>241</b>



---

## 1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Bei nahezu allen Verarbeitungs- und Produktionsprozessen unterschiedlichster Industrien können signifikante Geruchsemissionen auftreten, die nicht zuletzt aufgrund der sinkenden Toleranz in der Bevölkerung gegenüber Geruchsbelästigungen unterbunden werden müssen. Selbst Gerüche, die allgemein als angenehm empfunden werden, stellen für Anwohner bei dauerhafter Exposition eine Belastung dar. Infolge dessen treten immer häufiger lokale Widerstände gegen produzierende oder in der Planung und Genehmigung befindliche Anlagen auf. Nicht zuletzt aus diesem Grund nimmt die Geruchsproblematik auch zunehmend Einzug in die deutsche Gesetzgebung (TA Luft, 2002), so dass die Produktionsstätten verstärkt durch Vorgaben der Umweltbehörden unter Druck geraten. Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass Geruchsemissionen für Betriebe mit Nähe zu Wohnbebauungen zu einem echten Standortproblem geworden sind. Folglich entsteht ein wachsender Bedarf an kompetenten Lösungsansätzen für eine nachhaltige Verminderung der Geruchsemissionen entsprechender Betriebe.

Zur Reduzierung von Geruchsemissionen gibt es zahlreiche Verfahren, die in Abhängigkeit von Geruchsart, -konzentration, Abluftmenge und weiteren Zustandsgrößen mit unterschiedlichem Erfolg eingesetzt werden. Oftmals ist jedoch ein mangelndes Geruchsmanagement grundlegende Ursache für eine unzureichende Verminderung von Gerüchen. Obwohl es sich bei Geruchsemissionen unterschiedlicher Industrien um sehr spezifische Problematiken handelt, ist doch eine allgemeingültige Vorgehensweise bei Abluftproblemen möglich und auch sinnvoll. Einen viel versprechenden Lösungsansatz stellt die Etablierung eines nachhaltigen Geruchsmanagements dar. Ziel dieses innovativen Konzeptes ist es, eine effektive, zuverlässige Lösung für ein spezielles Geruchsproblem mit möglichst geringem finanziellen Aufwand zu finden. Das Geruchsmanagementkonzept beinhaltet die systematische Aufnahme aller relevanten Daten und Informationen, welche die gesamten Themenbereiche von der Erfassung der Emissionssituation bis hin zur apparativen Geruchsbeseitigung umfassen.

In der vorliegenden Arbeit werden das Gesamtkonzept sowie die einzelnen Schritte des Geruchsmanagements detailliert erläutert. Angepasst an die Anforderungen an

ein zielgerichtetes Geruchsmanagementkonzept sind hierfür nötige Instrumente im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und optimiert worden. So machen beispielsweise die oftmals sehr unübersichtlichen Emissionssituationen bei natürlich gewachsenen Industrieanlagen eine systematische Erfassung der Emissionsquellen erforderlich. Unter dem Oberbegriff des Geruchskatasters wurden zu diesem Zweck entsprechende Erfassungsbögen erstellt, auf welchen charakteristische Parameter aufgenommen und ausgewertet werden. Da aber die industriellen Geruchsemissionen prozessspezifisch von sehr unterschiedlichen Substanzen hervorgerufen werden können, stehen Anlagenbauer und –planer von Abluftbehandlungsanlagen vor dem Problem, dass nicht in jedem Fall offensichtlich ist, welches Verfahren zur Behandlung der Emissionen geeignet ist. Aus diesem Grund wird auch die Analyse und Bewertung der Abluftinhaltsstoffe als Teil des Geruchskatasters mit in das Geruchsmanagementkonzept integriert, damit anhand dieser Daten eine gezielte Auswahl erfolgen kann. Oftmals reicht aber auch die Kenntnis der Abluftinhaltsstoffe alleine nicht aus, um ein geeignetes Behandlungsverfahren auszuwählen, da nicht auf entsprechende Erfahrungen mit derartigen Substanzen zurückgegriffen werden kann. Unter diesen Umständen sind Untersuchungen erforderlich, in denen das Reinigungsverhalten unterschiedlicher Verfahren an der betrachteten Abluft evaluiert wird. Da derartige Versuche in der Regel experimentell und finanziell aufwändig sind, wurden zwei modulare Testsysteme entwickelt und optimiert, die es ermöglichen, mit einfachen Mitteln in kurzer Zeit eine Vorauswahl an potenziell geeigneten Behandlungsverfahren zu treffen, dessen Eignung dann in größerem Maßstab verifiziert werden muss. Wie die einzelnen Bestandteile des Geruchsmanagementkonzeptes zusammen aufeinander abgestimmt eingesetzt werden können, um konkrete Lösungsvorschläge zur Behandlung von Geruchsemissionsproblemen zu erarbeiten, wird abschließend am Beispiel eines Öl- und Fett verarbeitenden Betriebes veranschaulicht.

Eines der zentralen Elemente des Geruchsmanagementkonzeptes ist die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte geruchsspezifische Datenbank, in der Informationen und Erfahrungen rund um das Thema Geruch in einem ständig wachsenden Wissenspool zusammengefasst und in übersichtlicher, strukturierter Form potenziellen Nutzern dargeboten werden. Das in ihr verwaltete Know-How leistet einen wichtigen Beitrag hinsichtlich einer nachhaltigen Lösung für spezielle Geruchsemissionsprobleme.

---

## **2 RECHTLICHE GRUNDLAGEN FÜR DIE BEURTEILUNG UND VERMEIDUNG VON GERUCHSEMISSIONEN IN DEUTSCHLAND**

### **2.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)**

Gerüche fallen gemäß §3 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG, 2002) in die Kategorie erheblicher Belästigungen, sofern sie durch Art, Ausmaß oder Dauer der Exposition geeignet sind, eine Belästigung oder Nachteile für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen. Diese sind sowohl im Rahmen der Genehmigung neuer emittierender Anlagen (Genehmigungsverfahren), d. h. vorbeugend, als auch gegebenenfalls durch Anordnung nachträglicher Maßnahmen bei bereits bestehenden Anlagen (Überwachungsverfahren) nach dem Wortlaut des Gesetzes zu vermeiden. Auch im Rahmen der Bauleitplanung ist das Auftreten von Geruchsmissionen bei der Ausweisung sowohl von Wohngebieten als auch von Gewerbegebieten zu berücksichtigen. (Both, 2004)

### **2.2 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)**

Die technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft, 2002) dient dem Schutz der Allgemeinheit vor und der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, welche die Geruchsemissionen mit einschließt. Sie findet vor allem Anwendung bei Genehmigungsverfahren zur Errichtung neuer oder Erweiterung alter Anlagen hinsichtlich ihres Emissions- und Immissionspotentials.

Unter Nummer 5.2 werden allgemeine Anforderungen zur Emissionsbegrenzung festgelegt, die sich z.T. direkt oder indirekt auch auf Geruchsemissionen beziehen.

In Nummer 5.2.4 der TA-Luft werden anorganische Substanzen behandelt. Als Geruchsstoffe sind hiervon im wesentlichen Schwefelwasserstoff und Ammoniak relevant. Die Grenzwerte für Emissionen von Schwefelwasserstoff betragen 15 g/h bzw. 3 mg/m<sup>3</sup>, die für Ammoniak 150 g/h bzw. 30 mg/m<sup>3</sup>.

Gemäß Nummer 5.2.5 dürfen die Emissionen flüchtiger organischer Stoffe den Massenstrom 0,50 kg/h oder die Massenkonzentration 50 mg/m<sup>3</sup>, jeweils angegeben als Gesamtkohlenstoff, nicht überschreiten. Bei Altanlagen mit einem jährlichen Massenstrom an organischen Stoffen von bis zu 1,5 Mg/a dürfen abweichend von diesem Grundsatz die Emissionen an organischen Stoffen im Abgas den Massenstrom bis zu 1,5 kg/h betragen.

Unter Nr. 5.2.8 heißt es hier sehr allgemein für geruchsintensive Stoffe:

„Bei Anlagen, die bei bestimmungsgemäßem Betrieb oder wegen betrieblich bedingter Störanfälligkeit geruchsintensive Stoffe emittieren können, sind Anforderungen zur Emissionsminderung zu treffen, z.B. Einhausen der Anlagen, Kapseln von Anlagenteilen, Erzeugen eines Unterdrucks im gekapselten Raum, geeignete Lagerung von Einsatzstoffen, Erzeugnissen und Abfällen, Steuerung des Prozesses.

Geruchsintensive Abgase sind in der Regel Abgasreinigungseinrichtungen zuzuführen oder es sind gleichwertige Maßnahmen zu treffen. Abgase sind in der Regel über Schornsteine abzuleiten.

Bei der Festlegung des Umfangs der Anforderungen im Einzelfall sind insbesondere der Abgasvolumenstrom, der Massenstrom geruchsintensiver Stoffe, die örtlichen Ausbreitungsbedingungen, die Dauer der Emissionen und der Abstand der Anlage zur nächsten vorhandenen oder in einem Bebauungsplan festgesetzten schützenswerten Nutzung (z.B. Wohnbebauung) zu berücksichtigen. Soweit in der Umgebung einer Anlage Geruchseinwirkungen zu erwarten sind, sind die Möglichkeiten, die Emissionen durch dem Stand der Technik entsprechende Maßnahmen weiter zu vermindern, auszuschöpfen.

Sofern eine Emissionsbegrenzung für einzelne Stoffe oder Stoffgruppen, z.B. für Amine, oder als Gesamtkohlenstoff nicht möglich ist oder nicht ausreicht, soll bei Anlagen mit einer Abgasreinigungseinrichtung die emissionsbegrenzende Anforderung in Form eines olfaktometrisch zu bestimmenden Geruchsminderungsgrades oder einer Geruchsstoffkonzentration festgelegt werden.“

Für verschiedenste Anlagenarten der Energieerzeugung, Baustoff, Metall und Mineralölverarbeitung, sowie der Abfallbeseitigung und Lebensmittelindustrie sind unter Nummer 5.4 der TA Luft (2002) besondere Regelungen getroffen worden. Diese beinhalten in erster Linie Mindestabstandsregelungen zur nächsten Wohnbebauung sowie Hinweise zu baulichen und betrieblichen Anforderungen und einige wenige Grenzwerte für Schadstoffemissionen. Als Mindestabstand von emittierenden Anlagen sind hier häufig 500 m genannt. Jedoch können diese Abstände häufig unterschritten werden, wenn an den Anlagen emissionsmindernde Maßnahmen implementiert wurden. Für derartige Anlagen und auch für landwirtschaftliche Betriebe gelten oft Mindestabstände, die etwa bei 300 m liegen. Ein oberer Grenzwert für Geruchsemissionen wird hier lediglich für Betriebe der Verwertung und Beseitigung von Abfällen festgelegt. Ab einer von der Art des Betriebes abhängigen Mindestgröße beträgt dieser 500 GE/m<sup>3</sup>.

### **2.3 30. Bundes-Immissionsschutzverordnung (30. BImSchV)**

Die 30. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV, 2001) enthält Regeln zur Verringerung von Geruchsemissionen aus Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen. Auch hier ist ein Grenzwert von 500 GE/m<sup>3</sup> angegeben, der nicht überschritten werden darf. Als Mindestabstand sind hier 300 m festgelegt.

### **2.4 Geruchsmissions-Richtlinie (GIRL)**

Während in der TA Luft (2002) lediglich die Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Gerüche geregelt wird und keine Vorschriften zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geruchsmissionen festgelegt werden, gibt die Geruchsmissions-Richtlinie (GIRL, 2004) Verfahren zur Beurteilung von Geruchsemissionen an.

Die Geruchsmissions-Richtlinie hat allerdings nicht den Charakter eines Gesetzes. Sie ist als antizipiertes Sachverständigengutachten zur Konkretisierung der

allgemeinen gesetzlichen Anforderungen zu verstehen. Hansmann (1999) kommt jedoch in Bezug auf die vorherige Ausgabe der Geruchsmissions-Richtlinie (GIRL, 1998) unter Berücksichtigung des Tenors einer Vielzahl von Gerichtsurteilen zu dem Schluss, dass die Geruchsmissions-Richtlinie „zu rechtlich nicht zu beanstandenden Ergebnissen“ führt. Mittlerweile ist die Geruchsmissions-Richtlinie in der überwiegenden Zahl der Bundesländer als veröffentlichter oder unveröffentlichter Erlass eingeführt und ist in diesen Ländern für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden verbindlich geworden (Both, 2004). Sie wird generell als Erkenntnisquelle genutzt und findet in der allgemeinen Rechtsprechung Anwendung.

Entsprechend der GIRL (2004) stellt die Geruchshäufigkeit in diesem Zusammenhang die zentrale Kenngröße zur Ermittlung und Bewertung von Geruchsmissionen dar. Hierfür dürfen jedoch nur deutlich wahrnehmbare Geruchsmissionen herangezogen werden, die mit hinreichender Sicherheit und zweifelsfrei ihrer Herkunft nach aus Anlagen oder Anlagengruppen erkennbar und damit gegenüber Gerüchen aus dem Kraftfahrzeugverkehr, dem Hausbrandbereich, der Vegetation, landwirtschaftlichen Düngemaßnahmen oder ähnlichem abgrenzbar sind. Als weiteres wichtiges Kriterium für die Bewertung von Geruchsemissionen ist die Geruchsqualität (hedonische Geruchswirkung) genannt, da sie wesentlich für das Ausmaß der Geruchsbelästigung verantwortlich ist.

Zur Beurteilung der Erheblichkeit der Geruchseinwirkung werden in dieser Richtlinie in Abhängigkeit von verschiedenen Baugebieten Immissionswerte für die höchstzulässige Geruchsmission (relative Häufigkeit der Geruchsstunden, 10-15%) festgelegt. Für den Genehmigungsfall von Neuanlagen wird geprüft, ob die zu erwartende Zusatzbelastung durch die geplante Anlage addiert zur vorhandenen Belastung diesen Immissionswert überschreitet. Im Falle hedonisch eindeutig angenehmer Gerüche besteht die Möglichkeit, deren Beitrag zur Gesamtbelastung mit dem Faktor 0,5 zu wichten. Die Genehmigung für eine Anlage soll jedoch auch bei Überschreitung der Geruchsmissionswerte nicht versagt werden, wenn der von der zu beurteilenden Anlage zu erwartende Immissionsbeitrag auf keiner Beurteilungsfläche den Wert 0,02 überschreitet, er also maximal einen Anteil von 2% an den zu erwartenden Geruchsmissionen aufweist. Bei Einhaltung dieses Wertes

ist davon auszugehen, dass die Anlage die belästigende Wirkung der vorhandenen Belastung nicht relevant erhöht.

Für die Ermittlung der vorhandenen Belastung sind im Allgemeinen olfaktorische Feststellungen im Rahmen von Begehungen vorzunehmen. Die Ermittlung der durch Neuanlagen zu erwartenden Zusatzbelastung erfolgt über Geruchsausbreitungsrechnungen.

## **2.5 Zusammenfassung**

Während in der europäischen Gesetzgebung noch keine Vorgaben zur Regelungen von Geruchsemissionen verankert sind, gelten für Deutschland die oben erläuterten rechtlichen Regelungen. Allerdings umfassen diese in erster Linie recht allgemeine Anforderungen an emissionsmindernde Maßnahmen. So wird beispielsweise lediglich verlangt, bei potenziellen Emissionsquellen geeignete Maßnahme zu treffen, um störende Geruchsemissionen zu vermeiden. Nur für die Anlagen zur Verarbeitung und Beseitigung von Abfällen sind mit 500 GE/m<sup>3</sup> in der TA-Luft explizit Emissionsgrenzwerte festgelegt. Als weitere Maßnahmen mit klaren Vorgaben sind weiterhin Abstandsregelungen zu Wohnbebauungen für neue und in Planung befindliche Anlagen vorgeschrieben. Entsprechend dieser Regelungen gibt es, bis auf die in der TA-Luft begrenzten Emissionswerte für anorganische Substanzen, für die meisten bestehenden, Geruch emittierenden Betriebe keine klaren emissionsseitigen Vorgaben. Indirekt wird jedoch über die ebenfalls in der TA-Luft festgeschriebene Obergrenze für flüchtigen, organischen Kohlenstoff die Emission von Geruchsstoffen geregelt, da ein Großteil der geruchsaktiven Substanzen organischen Ursprungs ist. Eine Garantie für die deutliche Reduzierung der Geruchsstärke bei Einhaltung des Grenzwertes von 50 mg C/m<sup>3</sup> gibt es jedoch nicht. Diese Regelungen der TA-Luft betreffen nach Ablauf der Übergangsfrist, die in Deutschland am 31. Okt. 2007 endete, endgültig auch alle bestehenden Anlagen, die als Folge dessen verstärkt emissionsmindernde Maßnahmen ergreifen müssen.

Da emissionsbezogen nur wenig klare Vorgaben im Hinblick auf Gerüche festgelegt sind, ist die GIRL der wesentliche Maßstab zur Beurteilung von Geruchsemissionen.

In dieser Richtlinie werden Gerüche immissionsseitig bewertet. Sie gilt für alle Arten von Geruchsimmissionen, unabhängig ihres Ursprungs, sofern diese eindeutig einem Verursacher zugeordnet werden können. Beurteilt werden diese Immissionen in Form von Geruchshäufigkeiten in anliegenden Baugebieten. Je nach Art des Gebietes gelten unterschiedliche Grenzen für die erlaubte Häufigkeit von Geruchsereignissen, dabei dürfen nachweislich als angenehm eingestufte Gerüche einen höheren prozentualen Anteil aufweisen als unangenehme Gerüche. Entsprechend dieser vorgegebenen maximalen Immissionswerte müssen die Emittenten geeignete Vorkehrungen ergreifen, um die prozesstypischen Geruchsemissionen auf ein ausreichendes Maß zu reduzieren.

---

### **3 GERÜCHE**

Geruchsstoffe sind flüchtige chemische Verbindungen, die mit den Geruchsrezeptoren in der Nase wahrgenommen werden (Belitz et al., 2004). Sie erreichen die Rezeptoren beim Einziehen von Luft in die Nase (nasale Wahrnehmung) und zusätzlich beim Verzehr von Lebensmitteln über den Rachenraum, nachdem sie beim Kauen freigesetzt worden sind (retronasale Wahrnehmung) (Schön und Hübner, 1996).

Bei der Wahrnehmung von natürlichen oder industriellen Gerüchen handelt es sich in der Regel nicht um die Wirkung nur eines Geruchsstoffes. Vielmehr ist ein Geruch auf die gleichzeitige Wirkung einer Vielzahl einzelner Substanzen zurückzuführen. Das Geruchssignal wird daher von der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung des Gasgemisches bestimmt (Schön und Hübner, 1996)

Ob ein Geruch von einem Menschen als angenehm oder unangenehm empfunden wird, hängt neben der Zusammensetzung und den stofflichen Eigenschaften der Geruchsstoffe auch von den persönlichen Erfahrungen ab. Die Empfindung eines Geruchseindrucks ist ein Zusammenspiel aus physiologischer Reizwahrnehmung und psychologischer Verarbeitung des Reizes (Schön und Hübner, 1996).

#### **3.1 Physiologische Geruchswahrnehmung**

Geruchsstoffe gelangen über die Atemluft in den hinteren Teil der Nasenhöhle (Abb. 1), und hier durch den Nasenschleim zu den primären bipolaren Sinnesnervenzellen des olfaktorischen Epithels (Krautwurst und Shirokova, 2004). Die Riechzellen senden abhängig von der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung des entsprechenden Gasgemisches ein spezifisches Signalmuster an das Gehirn (periphere Prozesse). Die olfaktorische Region (das Riechepithel) der menschlichen Nasenschleimhaut erstreckt sich über eine Gesamtfläche von etwa 4 cm<sup>2</sup> und enthält ca. 10 bis 30 Mio. Rezeptorzellen. Die Nervensignale werden mit Signalen aus anderen sensorischen Eingangsinformationen verknüpft. Anhand von Erfahrungen aus der Vergangenheit und abhängig von dem aktuellen körperlichen und geistigen

Zustand, wird dann ein spezieller Geruchseindruck beim Menschen ausgelöst, der eine entsprechende Reaktion hervorruft. Menschen können etwa 10.000 unterschiedliche Geruchsqualitäten unterscheiden (DIN EN 13725, 2003). Eine Belästigung entsteht dadurch, dass dem verursachenden Reiz in Zusammenhang mit der Umgebung ein negatives Attribut zugeordnet wird.

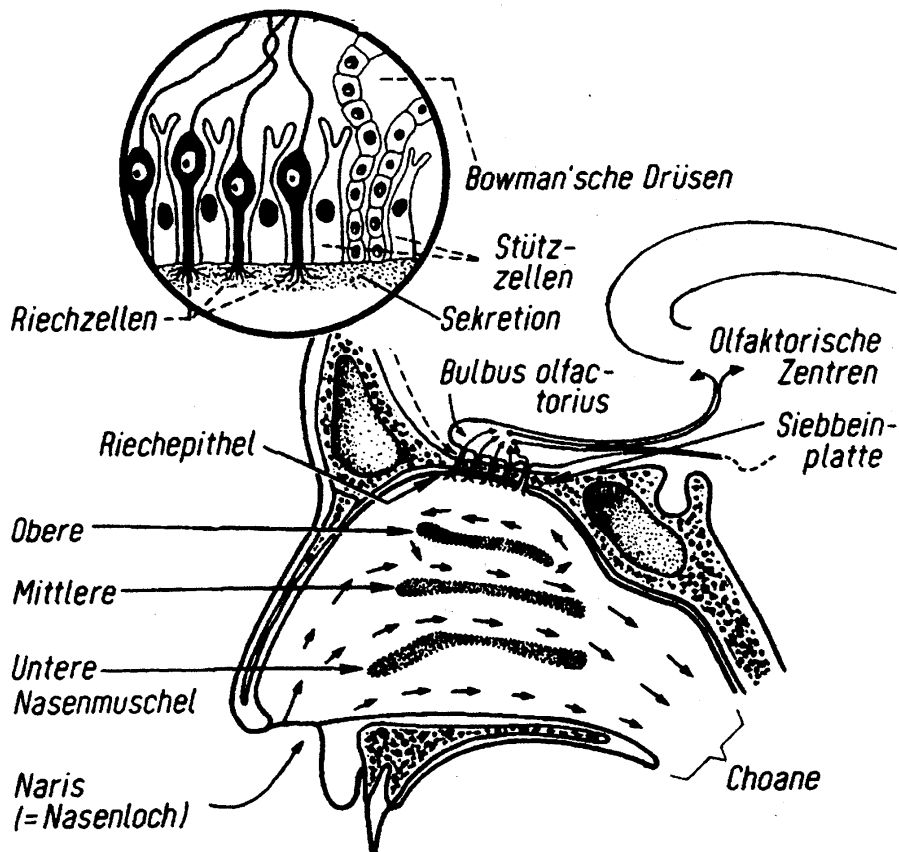


Abb. 1: Anatomischer Aufbau der menschlichen Nase (DIN EN 13725, 2003)

Im Jahr 2004 erhielten Richard Axel und Linda B. Buck den Nobelpreis für Medizin und Physiologie für die Erforschung der Riechrezeptoren und der Organisation des olfaktorischen Systems. Ihre Forschungsarbeit behandelt die Entstehung und Entwicklung der Geruchsrezeptoren sowie die Verarbeitung von Geruchsreizen im Gehirn und deren Umwandlung in Reaktionen, Gedanken und Verhaltensweisen. Die Arbeitsgruppe um Axel und Buck konnte eine Genfamilie von etwa 1000 Genen identifizieren, die mit der Geruchswahrnehmung assoziiert sind (Buck und Axel, 1991). Die unterschiedlichen Geruchsrezeptortypen sind nach einem zufälligen

Muster in der Riechschleimhaut verteilt. In unabhängigen Studien konnten forschungsgruppen um Axel und Buck nachweisen, dass die Signale gleicher Riechrezeptoren jeweils in einem eng begrenzten Bereich des Bulbus olfactorius wahrgenommen werden (Ressler et al., 1994; Vassar et al., 1994; Mombaerts et al., 1996). Die Signale der einzelnen Rezeptoren werden dann in verschiedene Bereiche des olfaktorischen Cortex (der Riechrinde des Endhirns) weitergeleitet, wodurch eine parallele Verarbeitung der Signale eines bestimmten Rezeptortyps sowie eine Kombination mit Signalen anderer Rezeptortypen vor der Weiterleitung der Wahrnehmung an die Großhirnrinde und das limbische System ermöglicht wird (Zou et al., 2001).

Neben der Verursachung olfaktorischer Wahrnehmungen werden auch trigeminale Reize von Gerüchen ausgelöst. Die trigeminale Wahrnehmung beschreibt die Sinnesreize, die über den Trigemini-Nerv vermittelt werden. Es werden über diesen Nerv hauptsächlich irritative Eigenschaften wie brennend, scharf, adstringierend, prickelnd, beißend, brenzlich, stechend und kühlend wahrgenommen. Diese können Reizungen der Augen und Nasenschleimhäute hervorrufen. Dass Geruchswahrnehmungen einen direkten negativen physiologischen Einfluss verursachen, ist nicht bekannt (Dalton, 2003; Rosenkranz und Cunningham, 2003).

Bei sehr geringen Konzentrationen kann ein Geruch unter Umständen wahrgenommen, jedoch nicht identifiziert werden. Die Erkennungsschwelle eines Geruchsstoffes liegt in etwa um den Faktor 3 oberhalb der Wahrnehmungsschwelle. Mit weiter steigender Konzentration kann von dem Geruch eine Belästigung ausgehen. Wirkliche physische Auswirkungen sind jedoch in der Regel nur bei deutlich höheren Konzentrationen zu erwarten, wenngleich bei den von Amoore und Hautala (1983) ausgewerteten Substanzen das Verhältnis zwischen Irritations- und Geruchsschwelle ein relativ breites Spektrum von 0,5 - 33.000 abdeckt und demnach Reizungen durch Substanzen in Konzentrationen, die unterhalb der Geruchsschwelle liegen, verursacht werden können. Gleiche Zusammenhänge wurden auch von Shusterman (2001) beschrieben. Trotzdem wird aus der Bevölkerung von Symptomen berichtet, die von Konzentrationen weit unterhalb dieser Reizungen auslösenden Schwelle verursacht werden sollen. Man unterscheidet in diesem Zusammenhang zwischen subjektiv empfundenen Reizungen und tatsächlichen

Reizungen. Auch wenn man einen giftigen Stoff mit der Nase wahrnehmen kann, ist dies nicht unbedingt ein Zeichen dafür, dass er in einer gefährlichen Konzentration vorliegt. Die physiologische Wahrnehmung eines Stoffes korreliert nicht mit dessen Gefährdungspotenzial (Dalton, 2003).

Zwar wurden in von Dalton (2003) und Witherspoon et al. (2004) beschriebenen Fällen von Anwohnern expositionsbezogene Symptome wie Schlafstörungen, Atembeschwerden und Brechreize angezeigt, jedoch gelten diese eher als mit den Immissionen in Verbindung gebrachte als weniger von ihnen verursachte Symptome (Winneke et al., 2004). Unabhängig davon wirken fortwährende Geruchsexpositionen belästigend auf die den Immissionen ausgesetzte Bevölkerung. Diese Beeinträchtigung des Wohlbefindens ist Voraussetzung für das Auftreten von Krankheitssymptomen. Nur bei Personen, die sich durch Gerüche belästigt fühlen, sind unter Umständen Symptome zu verzeichnen. Mit abnehmendem Grad der Belästigung schwinden auch die Krankheitsbilder (Witherspoon et al., 2004).

Wie die meisten Sinneswahrnehmungen des Menschen folgt auch die Geruchswahrnehmung dem Weber Fechner Gesetz (DIN EN 13725, 2003). Dieses besagt, dass zwischen der Reizwahrnehmung und der Reizstärke ein logarithmischer Zusammenhang besteht. So muss, um eine arithmetische Steigerung der Empfindungsstärke wahrnehmen zu können, die Reizstärke exponentiell zunehmen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Geruchsstoffkonzentration einer Probe mit der Nase gerade noch als abweichend wahrgenommen werden kann. Für eine Verdopplung der Wahrnehmungsstärke ist eine 10-mal höhere Stoffkonzentration erforderlich. Dieser Zusammenhang ist von besonderer Bedeutung bei der Beurteilung von Geruchsminderungsmaßnahmen. Folglich müssen Abluftbehandlungsanlagen einen Geruchsminderungsgrad von weit über 90% aufweisen, um eine deutliche Verbesserung der Geruchssituation zu erreichen.

### 3.2 Psychologische Geruchswahrnehmung

Die Entwicklungen in der Luftreinhaltung und nicht zuletzt auch in der Abfallbehandlung innerhalb der letzten Jahrzehnte und die damit verbundene Verbesserung der Luftqualität haben dazu geführt, dass die Bevölkerung deutlich sensibler und intoleranter gegenüber Gerüchen reagiert. Aber warum reagieren Menschen so empfindlich auf unangenehme Gerüche?

Die Antwort hierfür liegt in der Beziehung zwischen Gerüchen und der Gesundheit. Lange bevor bekannt war, dass Keime die Ursache für Krankheiten sein können, galten Gerüche, die mit Krankheiten und Übelkeit in Verbindung gebracht wurden als Auslöser. Da diese unangenehmen Gerüche in der Regel auftraten, wenn die hygienische Situation schlecht war und sich Krankheiten leicht verbreiteten, hat sich eine Angst vor negativen Gesundheitseinflüssen in Verbindung mit üblen Gerüchen entwickelt. Obwohl Menschen in unterschiedlichen Kulturen nicht zwangsläufig die gleichen Assoziationen mit bestimmten Geruchsstoffen verbinden, haben Untersuchungen gezeigt, dass Gerüche, die mit menschlichen Fäkalien und Abfall in Verbindung gebracht werden, gleichermaßen von allen Kulturen als unangenehm empfunden werden (Dalton, 2003). Das in Verbindung mit der Wahrnehmung des üblen Geruches angeborene Vermeidungs- oder Fluchtverhalten erfüllt eine Schutzfunktion für den Menschen.

Aus evolutionsgeschichtlicher Sicht erzeugt die Reizung der olfaktorischen Sinnesorgane Signale, die zu einem Vermeidungs- oder Annäherungsverhalten führen, sowohl in Bezug auf Ernährung als auch auf das Sozialverhalten (Abb. 2).

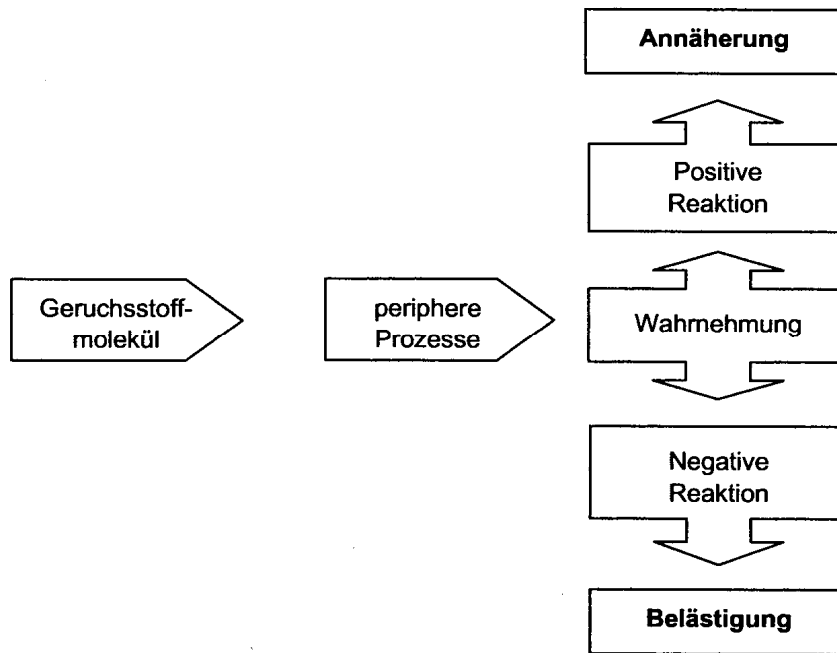


Abb. 2: Ursache und Wirkungskette bei der Geruchswahrnehmung (DIN EN 13725, 2003)

Faktoren, die einen Einfluss auf das Geruchsempfinden eines Menschen haben können, sind beispielsweise Gesundheitszustand, Alter, Erfahrungen, Erziehung, kultureller Hintergrund, soziales Umfeld, Zeitpunkt der Exposition etc. Von besonderer Bedeutung ist die Gewöhnung an Gerüche. Bei längerer Expositionsdauer kann sich der Geruchssinn an einen Geruch adaptieren und ist in der Lage, ihn förmlich auszublenden, was dazu führt, dass er auf Dauer schwächer wahrgenommen wird (Schön und Hübner, 1996; Frechen, 1993; Matheis, 1993). Dies gilt unter Umständen für dauerhafte Hintergrundgerüche, nicht jedoch für wiederkehrende Gerüche. Gegenüber bekannten Gerüchen sind Menschen sogar oftmals besonders sensibilisiert und reagieren deutlich früher und eventuell empfindlicher als Vergleichsgruppen.

Untersuchungen von Dalton (2003) haben gezeigt, dass eine Konditionierung durch das direkte, aktuelle Umfeld einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktion hinsichtlich eines Geruches haben kann. Testpersonen, die mit unterschiedlichen Erwartungen gegenüber demselben Geruchsstoff konditioniert wurden, reagierten entsprechend ihrer Erwartungen unterschiedlich. Weiterhin hat sich gezeigt, dass das Verhalten

anderer Personen einen Einfluss auf die eigene Reaktion hat. Dieser Aspekt sollte besonders bei der Beurteilung von Beschwerdesituationen berücksichtigt werden.

### **3.3 Messung von Gerüchen**

Als maßgebendes Instrument für die Messung von Gerüchen, gilt noch immer die menschliche Nase bzw. der Geruchssinn des Menschen. Bei der dynamischen Olfaktometrie werden Geruchsträger kontrolliert einem Probandenkollektiv zur Beurteilung dargeboten. Für die Konzentrationsbestimmung einer Geruchsprobe erfolgt die Darbietung der Probenluft stark verdünnt mit Neutralluft in einer Verdünnungsreihe mit steigender Konzentration jeweils im Wechsel mit reiner Neutralluft. Die Probanden bestätigen die Wahrnehmung eines Geruches per Signalgabe. Der Messpunkt, an dem der Proband das erste Mal den Geruch wahrnimmt, wird als Geruchsschwelle bezeichnet (DIN EN 13725, 2003).

Die Geruchskonzentration wird in GE/m<sup>3</sup> angegeben. An der Geruchsschwelle beträgt diese genau 1 GE/m<sup>3</sup>. Sie ist definiert als die Menge an Geruchsstoff(en), die nach Verdampfen in 1 m<sup>3</sup> Neutralluft bei 50% eines qualifizierten Panels eine Geruchswahrnehmung hervorruft (Wahrnehmungsschwelle, Geruchsschwelle). Bei der Bestimmung der Geruchskonzentration mittels dynamischer Olfaktometrie wird über die Geruchsschwellenwerte der einzelnen Panelmitglieder gemittelt und das Ergebnis entsprechend des bestimmten Verdünnungsverhältnisses zur Originalprobe angegeben (DIN EN 13725, 2003).

Weitere sensorische Größen, die mit einem Olfaktometer gemessen werden können, sind die Geruchsintensität und die hedonische Geruchswirkung. Während bei der Geruchsstoffkonzentrationsbestimmung nur abgefragt wird, ob ein dargebotener Luftstrom riecht oder nicht, wird bei der Bestimmung der Geruchsintensität nach der Stärke des Geruchseindrucks bei Verdünnungsstufen oberhalb der Wahrnehmungsschwelle (>1 GE/m<sup>3</sup>) gefragt. Die Hedonik beschreibt, ob Gerüche in Abhängigkeit von der Konzentration in mehreren Abstufungen als angenehm oder unangenehm empfunden werden (DIN EN 13725, 2003).

Da bei der Olfaktometrie die menschliche Nase als Sensor eingesetzt wird, ist die Frage nach der Objektivität dieser Art der Messung sicherlich nicht ganz unbegründet, zumal der Geruchssinn von Mensch zu Mensch stark unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Um eine gewisse Objektivität zu gewährleisten, wird wie oben beschrieben auf ein geprüfetes Probandenkollektiv zurückgegriffen, was die Überprüfung der Plausibilität einzelner Messwerte erleichtert. In vergleichenden Untersuchungen und Ringversuchen (Maxeiner und Mannebeck, 2004; Stockinger, 2004; Bahmüller; 1984) wurde jedoch festgestellt, dass trotz der Konformität unterschiedlicher Messinstitutionen mit denen in der DIN EN 13725 (2003) festgelegten Vorgaben, sich die Messergebnisse für die gleiche Probe durchaus um den Faktor 10 zwischen den Instituten unterscheiden können. Diese Erkenntnis gewinnt besonders vor dem Hintergrund einer Diskussion über einzuhaltende Grenzwerte an Bedeutung. So sind in der TA-Luft und der 30. BImSchV Grenzwerte für zulässige Geruchemissionen definiert, die bei keinem Messwert überschritten werden dürfen. Bei der beobachteten Variabilität der Messergebnisse bleibt die Festlegung eines Grenzwertes ohne Angabe eines realistischen Toleranzbereiches zumindest fragwürdig.

### **3.4 Eigenschaften von Geruchsstoffen**

#### *3.4.1 Flüchtigkeit*

Die vom Menschen wahrgenommenen Geruchsstoffe sind Luftbestandteile, also flüchtig, d.h., sie sind imstande unter natürlichen Milieubedingungen zu verdampfen oder existieren bereits im gasförmigen Aggregatzustand.

Ein Maß für die Flüchtigkeit eines chemischen Stoffes ist dessen Dampfdruck. So findet an der Oberfläche einer Lösung (oder eines Feststoffes) ein ständiger Stoffaustausch mit der umgebenden Gasphase statt. Unter konstanten Milieubedingungen stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sich in der Gasphase entsprechend des vorhandenen Umgebungszustandes eine bestimmte Konzentration von Stoffmolekülen befindet,

die einen Druck erzeugen. Dieser Gleichgewichtsdruck wird als Dampfdruck bezeichnet. Verändert man die Milieubedingungen des Stoffsystems etwa durch eine Steigerung der Temperatur, dann erhöht sich die Anzahl der in der Gasphase befindlichen Moleküle (Verdampfen) und damit der Dampfdruck. Eine Abkühlung des Stoffsystems würde den Vorgang umkehren (Kondensation) (Schön und Hübner, 1996).

Neben den Milieubedingungen wird die Flüchtigkeit chemischer Verbindungen auch durch deren Struktur und Größe beeinflusst. Eine ausreichende Flüchtigkeit besteht laut Schön und Hübner (1996), wenn das Molekulargewicht nicht größer als 350 g/mol ist.

#### *3.4.2 Löslichkeit*

Geruchsstoffe müssen sowohl wasserlösliche (hydrophile) als auch fettlösliche (lipophile) Eigenschaften aufweisen. Die Wasserlöslichkeit ist Voraussetzung dafür, dass die Geruchsstoffe nicht von der Wasserschicht der Nasenschleimhaut zurückgehalten werden, die Fettschicht der Nervenzellen wiederum kann nur durchdrungen werden, wenn die Geruchsstoffe lipophil sind. Im Hinblick auf ihre Fähigkeit, vorhandene Grenzschichten passieren zu können, bezeichnet man Geruchsstoffe oft auch als Osmogene (Schön und Hübner, 1996).

Die Löslichkeit von gasförmigen Stoffen in Flüssigkeiten, wird durch das Henry-Gesetz beschrieben. Dies besagt, dass im Gleichgewichtszustand die Konzentration einer Komponente in der Gasphase linear von der Konzentration in der Flüssigphase abhängig ist. Das Verhältnis der beiden Komponenten wird als Henry-Koeffizient bezeichnet. Die Stoffübertragung von einer Gasphase in eine Flüssigkeit setzt voraus, dass die Konzentration der zu absorbierenden Substanzen in der Gasphase höher als die Gleichgewichtskonzentration ist. Das Phasengleichgewicht wird entscheidend durch die Temperatur beeinflusst. Bei steigender Temperatur lässt sich zunehmend weniger eines gasförmigen Stoffes in der Flüssigkeit lösen. Diese Zusammenhänge sind besonders auch bei der absorptiven Abluftbehandlung von Bedeutung.

### 3.4.3 Struktureller Aufbau

Geruchsstoffe können sowohl anorganischer als auch organischer Zusammensetzung sein, wobei den organischen Verbindungen im Hinblick auf die Geruchsproblematik eine deutlich größere Bedeutung zukommt. Besonders organische Schwefel- (z.B. Mercaptane) und Stickstoffverbindungen (z.B. Amine) weisen geringe Geruchsschwellen auf und bilden eine große Gruppe der geruchsaktiven Substanzen. Als anorganische Geruchsstoffe seien beispielsweise Schwefelwasserstoff und Ammoniak genannt.

Neben der Flüchtigkeit und der Löslichkeit wird besonders auch die qualitative Wirkung von Geruchsstoffen entscheidend vom strukturellen Aufbau und den funktionellen Gruppen dieser Verbindungen beeinflusst. Im Gegensatz zu anderen Stoffgruppen ist für Geruchsstoffe keine chemische Eigenschaft typisch. Einerseits können Substanzen trotz unterschiedlicher Struktur einen recht ähnlichen Geruch aufweisen, andererseits führt ein nahezu identischer chemischer Aufbau nicht selten zu einem völlig unterschiedlichen Geruchseindruck. Das Fehlen eines einheitlichen physikalischen oder chemischen Merkmals, das mit der Geruchswirkung eines Stoffes oder Stoffgemisches korreliert, behindert die chemisch-analytische Erfassung und Bewertung von Gerüchen (Kuchta und Jager, 1993).

Eine Klassifizierung im Hinblick auf chemisch-physikalische Eigenschaften von Geruchsstoffen mit speziellem Schwerpunkt auf eine mögliche Entfernung der Substanzen aus Abluft durch Adsorption nehmen Thiesen et al. (2005) vor. Mit Hilfe einer Clusteranalyse basierend auf der Anzahl der Atome und der Bindung und Entfernung zu anderen Atomen werden strukturelle Merkmale der Substanzen beschrieben und diese entsprechend klassifiziert.

Neben den funktionellen Gruppen beeinflusst auch die Molekülgröße die Geruchsqualität eines Stoffes. Abb. 3 zeigt am Beispiel zyklischer aliphatischer Ketone, wie sich die Geruchsqualität mit zunehmender Molekülgröße (Ringgröße) von „minzig“ bei Cyclohexanon über „kampferartig“, „holzig“ bis „moschus“ bei Cyklohexadekanon ändert.

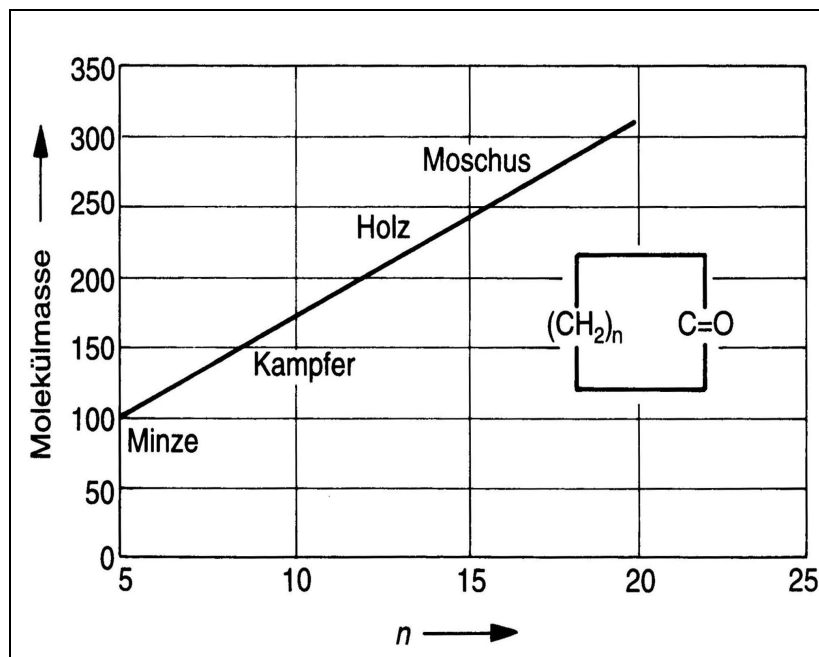


Abb. 3: Abhängigkeit der Geruchsqualität von der Ringgröße (n) zyklischer aliphatischer Ketone und entsprechend der Molekülmasse [g/mol] (Kuchta und Jager, 1993)

Eine weitere wesentliche Eigenschaft, die von der Molekülstruktur beeinflusst wird, ist die Intensität eines Geruchsstoffes. Über eine entsprechende Geruchsintensität kann unter Umständen sogar eine mangelnde Flüchtigkeit ausgeglichen werden. So sind beispielsweise die im Verlauf des Pflanzenwachstums in Blüten und Früchten gebildeten Terpenverbindungen aufgrund ihres Molekulargewichtes schwer flüchtig. Jedoch verursachen derartige ätherische Öle bereits in geringsten Konzentrationen eine intensive Geruchswirkung bei Lebewesen (Schön und Hübner, 1996).

### 3.5 Messung von Geruchsstoffen

#### 3.5.1 Probenanreicherung

Bevor die geruchsaktiven Substanzen mittels chemisch-physikalischer Methoden bestimmt werden können, muss eine geeignete Probenahme erfolgen. Aufgrund der häufig sehr geringen Konzentrationen der geruchsaktiven Substanzen findet in vielen

Fällen vor der Analyse eine Anreicherung dieser Stoffe statt. Beispiele für die verwendeten Probenahmetechniken sind die Anreicherung auf verschiedenen Adsorptionsmaterialien (z.B. Tenax<sup>®</sup>TA, Bentonite, Kieselgel, Aktivkohle) oder Absorption in verschiedenen flüssigen Medien (z.B. Säuren, Basen), sowie Prüfröhrchen mit direkter Farbanzeige (z.B. Drägerröhrchen<sup>®</sup>). Für die genaue Messung der Proben werden Pumpen verwendet, die den Durchfluss regeln, so dass reproduzierbare und definierte Probevolumina analysiert werden können (Namiésnik et al., 2000; Ramel und Nomine, 2000; VDI-Richtlinie 2457 Blatt 1, 1997). Die Probenanreicherung kann direkt am Ort der Probenahme oder später im Labor nach einer vorherigen Erfassung der Abluft in z.B. Plastikbeuteln erfolgen.

Die auf den festen Sammelphasen adsorbierten Komponenten müssen vor der Analyse (z.B. mittels GC oder HPLC) wieder desorbiert werden. Dies kann im Wesentlichen mit Hilfe eines Lösungsmittels oder durch Zufuhr von thermischer Energie (Thermodesorption) geschehen (VDI 2100 Blatt 1, 2001).

Die im Rahmen dieser Arbeit zur Anreicherung verwendete Festphasen-Mikroextraktion (Solid-Phase Microextraction, SPME) hat sich in den letzten Jahren als eine leistungsfähige Alternative zu konventionellen Probenahmetechniken erwiesen und bietet die Vorteile einer leichten Handhabung, einer einfachen Analytik ohne weitere Probenaufbereitung oder Verwendung von Lösungsmitteln, einer hohen Empfindlichkeit sowie eines guten Preis-Leistungsverhältnisses für die Analyse flüchtiger Verbindungen (Emmel und Zoubek, 2002; Marsili, 2002; Koziel und Pawliszyn, 2001; Tuduri et al., 2001). Die SPME kombiniert die Probenahme und Anreicherung der Analyten in einem Schritt und ermöglicht eine direkte Übertragung der Analyten in einen Gaschromatographen (GC). Für die SPME-Messmethode wird eine beschichtete Faser in einer modifizierten Spritze, einem so genannten Fieldsampler, verwendet. Die beschichtete Faser wird der Probe ausgesetzt, wobei die Analyten adsorptiv oder absorptiv gebunden werden. Nach der Extraktion werden die Analyten im GC-Injektor thermisch von der Faserbeschichtung desorbiert (Chai und Pawliszyn, 1995). Abb. 4 zeigt schematisch den Mechanismus der SPME-Technik und die Injektion in den GC.

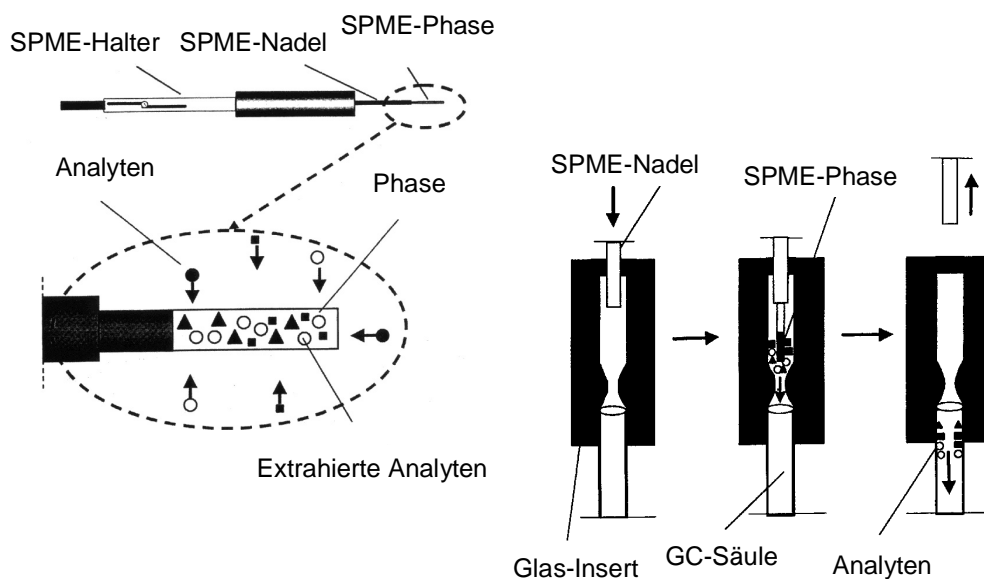


Abb. 4: Mechanismus der SPME-Technik und Injektion in den GC

SPME-Screening-Verfahren werden vielfach zur Identifizierung von VOCs in Luft verwendet (Emmel und Zoubek, 2002; Alpendurada, 2000;). Kleeberg et al. (2005a, 2003) entwickelten eine Screening-Methode zur Identifizierung von Hauptkomponenten in der Abluft aus der Fettverarbeitung mittels SPME-Anreicherung und anschließender GC-MS- bzw. GC-FID/Sniffing-Bestimmung. Ein Test von fünf verschiedenen kommerziell erhältlichen SPME-Phasen zeigte, dass mit der Carboxen/Polydimethylsiloxan (CAR/PDMS)-Phase um den Faktor 30 - 200 höhere Extraktionskapazitäten im Vergleich zu anderen SPME-Phasen (Polyacrylate (PA), Polydimethylsiloxan (PDMS), Carbowax/Divinylbenzol (CW/DVB), Polydimethylsiloxan/Divinylbenzol (PDMS/DVB)) erreicht werden konnten. Die CAR/PDMS-Phase ist daher für einen empfindlichen Nachweis von geruchsaktiven Substanzen am besten geeignet. Es wurden jedoch bei längeren Extraktionszeiten und höherer Probenkonzentration Verdrängungseffekte bei den sehr flüchtigen Substanzen beobachtet. Die auf der SPME-Phase angereicherte Menge eines bestimmten Analyten hängt demnach sowohl von der Zusammensetzung des Stoffgemischs als auch der gesamten Menge an Stoffen in der Probe ab. Eine Quantifizierung von Geruchsstoffen unter Einsatz der SPME-Technik ist daher

schwierig. Die SPME-Methode eignet sich jedoch sehr gut als Screening-Methode zur qualitativen Bestimmung der Abluftinhaltsstoffe (Kleeberg et al., 2005a).

Auch weitere Autoren (Cho et al., 2003; Tuduri et al., 2002; Koziel et al., 2000) haben beschrieben, dass Stoffe, die eine bessere Affinität zur Anreicherungsfasern haben als andere, diese verdrängen. Dies gilt besonders bei hohen Stoffkonzentrationen in der Abluft. So werden an den aktiven Zentren beispielsweise Substanzen mit geringem Molekulargewicht durch welche mit höherem Molekulargewicht ersetzt (Murray, 2001). Ändert sich also die Abluftzusammensetzung, so kann sich auch die Gleichgewichtszusammensetzung auf der Faser ändern. In speziellen Fällen kann dann die Menge eines extrahierten Stoffes größer werden, obwohl sich die Konzentration dieser Substanz in der Abluft nicht geändert hat. Eigene Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die verwendete SPME-Methode für eine halbquantitative Bestimmung von Abluftinhaltsstoffen geeignet ist.

#### *3.5.2 Analysemethoden*

Für die Bestimmung von Geruchsstoffen stehen in erster Linie Adsorptionsröhrchen mit Farbumschlag, Gaschromatographie (GC), Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC) sowie die unter dem Sammelbegriff „Elektronische Nasen“ zusammengefassten Gassensorenarrays zur Verfügung.

Die Geruchsstoffmessung mit Gasprüfröhrchen beschränkt sich auf wenige Substanzen. Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Mercaptane sind typische Geruchsstoffe, die mit diesem System gut nachweisbar sind (Dräger, 1997). Für die Analyse von polaren Verbindungen wie Säuren und Basen bietet sich die HPLC als Methode der Wahl an. Die Bestimmung von primären und sekundären aliphatischen Aminen erfolgt z.B. gemäß VDI 2467 Blatt 2 (1991) nach Anreicherung, Derivatisierung und HPLC-Trennung UV-photometrisch. Die meisten Geruchsstoffe werden jedoch aufgrund ihrer Flüchtigkeit und ihrer relativ hohen chemischen Beständigkeit mittels GC bestimmt. In der letzten Zeit kamen zunehmend elektronische Nasen zur Bestimmung von Geruchsstoffen zum Einsatz (Münchmeyer und Walte, 2004).

### Gasprüfröhrchen

Prüfröhrchen gehören zu den klassischen Messverfahren der Gasanalyse. Hierbei handelt es sich um Glasröhrchen, die Reagenzien enthalten, welche mit dem zu messenden Stoff unter Farbänderung reagieren. Die meisten Prüfröhrchen sind Skalenröhrchen, bei denen die Länge der Farbzone ein Maß für die Konzentration des zu messenden Stoffes ist. Anhand der aufgedruckten Skala kann die Konzentration direkt abgelesen werden. Ein definiertes Volumen der Abluftprobe wird mittels einer speziell dafür ausgelegten Balgpumpe durch das Röhrchen gesaugt.

### Gaschromatographie (GC)

Bei der Gaschromatographie wird ein Teil der Geruchsprobe zusammen mit einem Trägergas über eine stationäre Phase geleitet. Die in der mobilen Phase gelösten Stoffe treten in stoffspezifische Wechselwirkung mit der stationären Phase und bewegen sich aus diesem Grund unterschiedlich schnell über die Phase hinweg. Dies führt zu einer Auftrennung des Stoffgemisches. Mit geeigneten Detektoren können nach der Auftrennung die einzelnen Inhaltsstoffe der Probe bestimmt werden.

Als Methode der Wahl bietet sich die Kapillargaschromatographie für die Bestimmung der Mehrzahl der geruchsaktiven Substanzen an. Zur analytischen Trennung der Geruchsstoffgemische mit Kapillartrennsäulen sind alle handelsüblichen GCs geeignet. Als Detektoren kommen Flammenionisationsdetektoren (FID) oder spezielle N- oder S-selektive Detektoren wie der flammenphotometrische (FPD) oder thermionische Detektor (TID) in Frage. Am weitesten verbreitet ist die Verwendung von massenselektiven Detektoren in Verbindung mit entsprechenden Massenspektren-Datenbanken, wodurch zusätzlich eine Identifizierung der in einem Geruchsstoffgemisch enthaltenen Einzelsubstanzen ermöglicht wird. Durch Kombination mit einem Sniffing-Port (GC/O) kann schließlich der Zusammenhang zwischen dem einzelnen Geruchsstoff und seinem Geruchseindruck hergestellt werden. (VDI 2100 Blatt 1, 2001)

Die eigentliche Identifizierung der Substanzen erfolgt über deren Retentionszeiten im GC-System, die Massenspektren, sowie über die Geruchsbeschreibungen am

Sniffing-Port. Eine direkte Identifizierung über die Retentionszeiten ist nur dann möglich, wenn bei der Erhebung der Vergleichsdaten exakt das gleiche System verwendet wurde. Um auch Daten unterschiedlicher Systeme aus der Literatur für eine Identifizierung heranziehen zu können, werden Retentions-Indices verwendet (Ettre, 2003; Van den Dool und Kratz, 1963). Hier werden die Retentionszeiten der Substanzen mit denen von Alkanen ins Verhältnis gesetzt und ermöglichen so eine Vergleichbarkeit des Retentionsverhaltens auch zwischen unterschiedlichen GC-Systemen. Eine umfangreiche Auswahl an Retentions-Indices sind beispielsweise bei Lee und Noble (2003), Qian und Reineccius (2002), Bücking (1999), Rychlik et al. (1998) und in den On-line-Datenbanken des National Institute of Standards and Technology (NIST) und Flavornet von Acree und Arn zu finden. Auch die Massenspektren werden mit einschlägigen Datenbanken (z.B. Wiley, NIST) verglichen, um eine möglichst eindeutige Identifizierung der Substanzen sicherzustellen. Für einen Abgleich der Geruchscharakteristika stehen zahlreiche Beschreibungen von unter anderen Jordan et al. (2003), Lee und Noble (2003), Sigma-Aldrich (2003), Qian und Reineccius (2002), Bücking (1999), Rychlik et al. (1998), Arora et al. (1995), Flament (1989) und in den On-line-Datenbanken „Flavornet“ von Acree und Arn (2004) und „Flavor-Base“ von Leffingwell & Associates (2007) zur Verfügung. Eine Absicherung der Ergebnisse kann schließlich über Vergleiche mit den entsprechenden Standardsubstanzen erfolgen (Ranau et al., 2005; Ranau und Steinhart, 2004).

#### Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC)

Polare, niedermolekulare Stoffe bereiten aufgrund ihrer Polarität auch bei guter Flüchtigkeit Probleme bei gaschromatographischen Trennungen. Einerseits haften sie im Einspritzblock und verursachen schlecht reproduzierbare Injektionsverläufe bzw. Signalverschleppung (Memory). Andererseits sind sie durch ihre Oberflächenaktivität und das nicht ideale Verdampfungsverhalten gaschromatographisch schlecht trennbar. Deshalb stellt für diese Stoffe die HPLC die Methode der Wahl dar (Matz et al., 2005, 2004; VDI 2457 Blatt 1, 1997).

Die HPLC ist ein Verfahren der Säulen-Flüssigkeits-Chromatographie. Sie stellt ein Trennverfahren dar, bei dem die flüssige Probe mittels einer flüssigen Phase (Eluent)

unter hohem Druck über die stationäre Phase (Trennsäule) transportiert wird. Je nach Art der Wechselwirkung zwischen stationärer Phase, mobiler Phase und Probe unterscheidet man in der Flüssigkeitschromatographie folgende Trennmechanismen: Adsorptions-, Verteilungs-, Ionenaustausch-, Ausschluss- und Affinitätschromatographie. Bei der HPLC finden hauptsächlich die Verfahren der Adsorptions- und Verteilungschromatographie Anwendung. Bei der Adsorptionschromatographie werden die Probenmoleküle durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen reversibel an die stationäre Phase gebunden. Bei der Verteilungschromatographie nutzt man die unterschiedliche Löslichkeit der zu trennenden Substanzen in den beiden Phasen aus.

Als Detektoren in der HPLC werden überwiegend UV- Fluoreszenz-, elektrochemische und in letzter Zeit auch massenselektive Detektoren eingesetzt (VDI 2457 Blatt 1, 1997). Die Identifizierung von geruchsaktiven Substanzen mittels LC/MS ist zurzeit noch schwierig, da keine umfangreichen Massenspektren-Datenbanken wie in der GC zur Verfügung stehen (Matz et al., 2004).

### Sensoren Arrays (elektronische Nasen)

„Elektronische Nasen“ sind Instrumente, die eine Anordnung von chemisch sensitiven Gassensoren mit einer begrenzten Selektivität, gekoppelt mit einer geeigneten Mustererkennung umfassen und dazu im Stande sind, einfache und komplexe Gerüche zu identifizieren (Münchmeyer und Walte, 2004; Gardner und Bartlett, 1994). Diese Gassensorenarrays sind bereits seit einigen Jahren im Einsatz. Der besondere Reiz dieser Geräte liegt in der schnellen und qualitativen Beurteilung des Probengases ohne eine aufwendige und zeitintensive Laboranalytik. Die Analyse und klassifizierende Entscheidung erfolgt sofort. Als Ergänzung zu den traditionellen Geruchsmessverfahren soll die elektronische Nase vor allem zur kontinuierlichen Erfassung der Geruchssituation dienen.

Zum Einsatz in elektronischen Nasen kommen zahlreiche schnell reagierende Sensoren, basierend auf unterschiedlichen chemischen und physikalischen Prinzipien. Dies sind u.a. Metalloxidsensoren (MOS), Feldeffekttransistoren (MOSFET), leitfähige Polymere (CPS) wie Polypyrrol, Polyanilin oder Polythiophen, akustische Oberflächenwellensensoren (SAW), bei denen die Messung der

Sorptionsmenge eines Gases in einem Sorbens über eine Dichte- oder Masseänderung erfolgt, oder Quartz-Mikrowaagen (QMB) (Heining und Wiese, 2000). Die häufig eingesetzten Metalloxidsensoren bestehen beispielsweise aus einem Halbleiterfilm (z.B.  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), der auf einem keramischen Material aufgebracht ist (Münchmeyer und Walte, 2004; Ampuero und Bosset, 2003; Schaller et al., 1998).

Die Kombination unterschiedlich querempfindlicher Sensoren, die eine ganze Stoffgruppe detektieren, mit einer Mustererkennung ermöglicht das „Lernen“ und „Wiedererkennen“ von Gerüchen. In den meisten Fällen werden die Signale der einzelnen Sensoren eines Arrays im Verhältnis zueinander und zum Signal eines Reingases (Nullgas) ausgewertet (Taurino et al., 2003; Heining und Wiese, 2000).

---

## 4 TECHNISCHE BEHANDLUNGSVERFAHREN ZUR REDUZIERUNG VON GERUCHSEMISSIONEN

Für die Behandlung geruchsbeladener Abluft stehen eine Reihe von verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Verfügung. Alle Verfahren haben zum Ziel, die Geruchsemissionen eines Emittenten auf ein Minimum zu reduzieren. Die Voraussetzung für den Einsatz aktiv durchströmter Abluftreinigungsverfahren ist eine vorherige kanalisierte Erfassung der belasteten Abluftströme; denn nur kontrolliert handhabbare Abgase lassen sich gezielt einer geeigneten Behandlung zuführen.

Zahlreiche physikalisch-chemische sowie mehrere biologische Verfahren sind prinzipiell zur Geruchsbehandlung geeignet. Aus wirtschaftlichen Gründen kommen aufgrund der niedrigen Stoffkonzentrationen jedoch nur wenige Verfahren tatsächlich zur Anwendung (Fischer, 2004). Wichtige Parameter, die bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten, sind neben der Abluftmenge insbesondere die chemische Zusammensetzung, die Höhe der Belastung, die Temperatur und die Luftfeuchte.

Neben den genannten Prozessgrößen ist jedoch zusätzlich immer auch die allgemeine Situation vor Ort zu berücksichtigen. Die wesentlichen Parameter für die Umsetzbarkeit einer Verfahrensoption sind in der Regel der erforderliche Platzbedarf der Behandlungsanlage, die zu erfüllenden behördlichen Auflagen sowie das finanzielle Budget. Man kann nahezu jede Anlage so groß bauen, dass sie eine geforderte Reinigungsleistung erfüllt, jedoch stehen dann unter Umständen der finanzielle Aufwand und der vermeintliche Nutzen in keinem vernünftigen Verhältnis mehr zueinander.

Ziel bei der Auswahl und Auslegung eines geeigneten Behandlungsverfahrens muss es daher sein, ein Optimum zu finden, bei dem die geforderte Reinigungsleistung erfüllt wird und mit möglichst geringen finanziellen Mitteln eine an die lokalen Bedingungen angepasste Lösung geboten werden kann. Oftmals stellt eine Anlagenkombination, eine Verschaltung unterschiedlicher Behandlungsverfahren, eine optimierte Maßnahme zur Minderung der Geruchsemissionen dar. Eine

Übersicht der unterschiedlichen, zur Verfügung stehenden Verfahren ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht über Verfahren zur Geruchsbehandlung

---

<b>Verfahrensklassen</b>	<b>Varianten</b>
Adsorptionsverfahren	unterschiedliche Adsorbentien
Absorptionsverfahren	physikalische A., chemische A.,
Biologische Verfahren	Biowäscher, Biofilter
Thermische Verfahren	thermische Nachverbrennung katalytische Nachverbrennung regenerative Nachverbrennung
Nicht-thermische Oxidationsverfahren	Ozon, UV, Plasma
Sonderverfahren	Zudosierung von Zuschlagstoffen

---

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Abluftreinigungsverfahren kurz vorgestellt. Ausführlichere Beschreibungen der Verfahren können im Anwenderhandbuch zum Geruchsmanagement (Schlegelmilch et al., 2004) nachgeschlagen werden.

#### **4.1 Adsorptionsverfahren**

Bei der Adsorption wird der im Abgas oder in der Abluft enthaltene Schadstoff an der Oberfläche eines Feststoffes (Adsorbens) angelagert und so aus dem Gas- bzw. Luftstrom entfernt. Der adsorbierte Stoff reichert sich auf der aktiven Oberfläche des Adsorbens bis zu einem Gleichgewichtszustand an. Daraufhin kann der gesättigte Feststoff keine flüchtigen Stoffe mehr aufnehmen und muss entsorgt oder regeneriert werden. Da die Bindung zwischen Schadstoff und Adsorbens meist reversibel ist, können die aufkonzentrierten Schadstoffe desorbiert und anschließend entsorgt oder

zurück gewonnen werden. Bei der Adsorption wird entsprechend die Abluft zwar gereinigt, aber das Geruchsproblem noch nicht endgültig gelöst.

Zu den häufig verwendeten Adsorbentien gehören beispielsweise Aktivkohle, Aktivtonerden, Kieselgele und Zeolithe. Die ersten drei zählen zu den amorphen Adsorbentien mit einer uneinheitlichen inneren Struktur. Zeolithe sind kristallin und weisen regelmäßige Hohlräume mit verbindenden Poren definierter Größen auf (Buonicore, 1992a). In letzter Zeit wird mehr und mehr an speziell entwickelten Adsorbentien geforscht (Cartellieri et al., 2005; König und Werner, 2004).

In technischen Anwendungen sind Adsorber in der Regel als Festbett ausgeführt. Die in einen Behälter eingebaute ruhende Schüttung wird in diesem Fall von dem zu reinigenden Gasstrom durchströmt. Ist das Adsorbens gesättigt, kommt es zum Durchbruch der abzureinigenden Stoffe durch die Adsorbenschüttung. Die Konzentration am Ausgang des Adsorbers nähert sich der Eingangskonzentration der unbehandelten Abluft an. Um Adsorptionsanlagen kontinuierlich betreiben zu können, müssen Adsorption und Desorption bzw. Beladung und Regeneration gleichzeitig möglich sein. Dies erreicht man durch Parallelschaltung mehrerer Adsorber oder durch den Einsatz von Adsorberrädern (Fischer, 2004).

Üblicherweise wird die Desorption regenerativ betriebener Adsorptionsanlagen im industriellen Betrieb mittels Heißgas- oder Wasserdampfdesorption durchgeführt. Nachteilig ist hierbei die geringe Wärmekapazität der Gase und die damit verbundenen großen Volumenströme, die das Desorbat wieder verdünnen (Cartellieri et al., 2005). Eine weitere Möglichkeit ist die elektrothermische Regeneration. Hierbei ist der Energieeintrag vom Spülgasstrom entkoppelt, was unter anderem eine bessere Regelbarkeit und die Gewinnung eines höher konzentrierten Desorbates zum Vorteil hat (Bathen und Schmidt-Traub, 1999). Eine in den letzten Jahren häufig untersuchte Variante der elektrothermischen Desorption ist die Mikrowellendesorption. Diese zeigt bei einigen Anwendungen zwar viel versprechende Ergebnisse (Stegmann und Hensel, 2004; Robers et al., 2004), unter Sauerstoffatmosphäre kann es aber beispielsweise in Aktivkohlebetten zu elektrischen Entladungen zwischen den Aktivkohlepartikeln kommen (Price und Schmidt, 1998), was zur Selbstentzündung führen kann.

Ein wesentlicher Parameter bei der Auslegung von Adsorbern ist der Apparatequerschnitt, da dieser für die Strömungsgeschwindigkeit maßgebend ist. Adsorber sollten so ausgelegt werden, dass die Tanzgeschwindigkeit (Adsorbenskörner im oberen Schüttbereich bewegen sich) der verwendeten Adsorbentien nicht erreicht wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wird auf den freien Apparatequerschnitt bezogen und liegt bei den meisten Festbettadsorbern in der Praxis zwischen 0,1 und 0,5 m/s (VDI 3674, 1998).

### 4.2 Absorptionsverfahren

Bei der Absorption werden die Geruchsstoffe in einer Waschflüssigkeit gelöst. Der Stoffübergang wird in erster Linie durch die Löslichkeit der Substanz, die Differenz zur Gleichgewichtskonzentration und die Stoffübergangsfläche zwischen Gas- und Flüssigphase bestimmt (Buonicore, 1992b). Die Löslichkeit kann durch die Verwendung von Löslichkeitsvermittlern, wie von Freudenthal et al. (2005) diskutiert, beeinflusst werden. Zur Vergrößerung der Stoffübergangsfläche werden in der Regel Füllkörperkolonnen verwendet. Weitere mögliche Ausführungen von Absorptionswäschern sind Venturi- und Sprühwäscher sowie Bodenkolonnen (Fischer, 2001; Heining, 1998; Bounicore, 1992b).

Da sich die Abluftinhaltsstoffe in der Waschflüssigkeit anreichern, würde der Absorptionsvorgang bald zur Einstellung eines Gleichgewichtes nach dem Henry-Gesetz führen und damit zum Erliegen kommen. Aus diesem Grunde muss ein Austausch oder eine Regeneration der Waschflüssigkeit erfolgen (Fischer, 2004).

Gemäß dem Henry-Gesetz ist im Gleichgewichtszustand die Konzentration einer Komponente in der Gasphase linear von der Konzentration in der Flüssigphase abhängig. Das Verhältnis der beiden Komponenten wird als Henry-Koeffizient bezeichnet. Die Stoffübertragung von einer Gasphase in eine Flüssigkeit setzt voraus, dass die Konzentration der zu absorbierenden Substanzen in der Gasphase höher als die Gleichgewichtskonzentration ist. Das Phasengleichgewicht wird entscheidend durch die Temperatur beeinflusst. Bei steigender Temperatur lässt sich zunehmend weniger eines gasförmigen Stoffes in der Flüssigkeit lösen.

Als Absorbens ist grundsätzlich jede Flüssigkeit geeignet, die das Absorptiv zu lösen vermag. In den meisten Fällen ist das Absorbens Wasser. In Wasser kann das Absorptiv dissoziieren, chemisch umgesetzt werden oder Hydrate bilden. Bleibt das Absorptiv im Absorbens im Molekülverband erhalten, so spricht man von einer physikalischen Absorption. Dissoziiert das Absorptiv im Absorbens oder wird es chemisch umgesetzt, spricht man von einer Chemisorption. Bei physikalischer Absorption kann durch die Wahl der Absorptionstemperatur und gegebenenfalls des Druckes, sowie durch Zugabe von Lösungsvermittlern zur Waschflüssigkeit (Freudenthal et al., 2004; Hekmat und Vortmeyer, 1999; Schippert, 1994) die Absorptionsfähigkeit erhöht werden.

Chemischen Wäschern werden in vielen Fällen Chemikalien beigemischt, die mit den gelösten Stoffen reagieren und so zu einer besseren Abscheidung und gleichzeitig einer Regeneration der Waschflüssigkeit beitragen. Hierbei muss beachtet werden, dass auch die Reaktionsprodukte aus der Waschflüssigkeit entfernt werden müssen, damit die Reaktion nicht zum Erliegen kommt.

Eine Regeneration der Waschflüssigkeit kann durch Strippung mit Luft oder Wasserdampf erfolgen. Es findet, ähnlich wie bei der Adsorption, eine Verlagerung der Schadstofffracht statt. Ziel ist es auch hier, einen Regenerationsstrom zu erzeugen, der deutlich höher konzentriert ist als die ursprüngliche Abluft und daher besser behandelt werden kann. Die Regeneration wässriger Waschflüssigkeiten kann auch biologisch erfolgen, in diesem Falle wird von Biowäschern gesprochen (s. Kap. 4.3.2). Eine weitere Möglichkeit der Aufarbeitung besteht in der Überführung der im Absorbens gelösten Stoffe in eine unlösliche Form durch Zufügung entsprechender Reaktionsmittel. Die Fällungsprodukte können dann aufgrund ihres Dichteunterschiedes oder mittels Filtern von der Waschflüssigkeit abgetrennt werden.

### **4.3 Biologische Verfahren**

Biologische Abluftreinigungsverfahren beruhen auf der Aktivität von Mikroorganismen, die in der Lage sind, organische und auch einige anorganische,

gasförmige Verbindungen biologisch abzubauen und so in nicht schädliche bzw. geruchsneutrale Verbindungen zu überführen (Bardtke, 1990). Im Unterschied zu vielen anderen Abluftreinigungsverfahren findet bei der biologischen Abluftreinigung ein tatsächlicher Abbau der Abluftinhaltsstoffe und keine Verlagerung in andere Medien wie Abwasser oder Adsorbens statt, so dass keine problematischen Reststoffe entstehen. Im Vergleich zu thermischen Verfahren entstehen keine oder nur geringe Mengen an Schwefel- und Stickoxiden. Da diese Verfahren normalerweise bei Umgebungsdruck und -temperatur betrieben werden, fallen vergleichsweise geringe Energiekosten an. Der Bedarf an Zusatzstoffen und Chemikalien ist allenfalls gering. Aus diesen Gründen sind die Investitions- und Betriebskosten bei biologischen Abluftreinigungsverfahren, speziell Biofiltern, vergleichsweise niedrig (Ergas und Cárdenas-González, 2004; Devigny et al., 1999).

Es wird im Wesentlichen zwischen den folgenden Verfahren unterschieden:

- Biofilter
- Biowäscher / Biotropfkörper.

Wie bei allen biologischen Systemen ist auch bei den biologischen Abluftbehandlungsverfahren eine Adaption der Mikroorganismenpopulation an veränderte Umgebungsbedingungen erforderlich. Dies führt dazu, dass beim Anfahren von biologischen Verfahren nicht immer sofort mit der vollen Reinigungsleistung gerechnet werden kann. Erst bei der Inbetriebnahme derartiger Anlagen beginnt sich im biologisch aktiven Medium eine speziell an die Abluft angepasste Mischpopulation an Mikroorganismen zu entwickeln. Der vollständige Aufbau dieser Population kann von System zu System unterschiedlich lange dauern. Biofilter benötigen in der Regel zwischen 4 bis 6 Wochen Adaptionszeit bis zur vollen Funktionsfähigkeit (VDI 3477, 2004), Biowäscher eher weniger lang. Durch Animpfen der Systeme kann diese Phase unter Umständen verkürzt werden.

### *4.3.1 Biofilter*

Biofilter sind biochemische Festbettreaktoren, in denen die zu reinigende Abluft durch eine Schüttung aus Biofiltermaterial geleitet wird, in dem die Reinigung durch

Sorption und anschließendem aeroben biologischen Abbau durch auf dem Filtermaterial angesiedelte Mikroorganismen stattfindet. Man unterscheidet zwischen offenen und geschlossenen Biofiltern. Über die Konstruktion des Biofilters kann maßgeblicher Einfluss auf die Strömungsverteilung, die Temperaturverteilung, die Verdichtungsneigung und den Feuchtehaushalt des Biofiltermaterials genommen werden (Heining, 1998). Diese Kriterien gilt es hinsichtlich eines funktionsbezogenen Betriebes zu optimieren.

Wichtige Kriterien für Biofiltermaterialien sind ein geringer Druckverlust über das Material, sowie eine gewisse Homogenität, um eine gleichmäßige Durchströmung zu ermöglichen. Gleichzeitig muss es eine ausreichend große spezifische Oberfläche für den Stoffaustausch und die Besiedelung mit Mikroorganismen haben. In den meisten Fällen befinden sich im Filtermaterial bereits vor dem Einbau stabile Mischpopulationen von Mikroorganismen, die sich dann an die Abluftinhaltsstoffe adaptieren. Auch das Animpfen des Filters z.B. mit Klärschlamm oder speziellen Kulturen zur Verkürzung der Adaptionsphase ist möglich (Kennens und Thalasso, 1998). Häufig verwendete Biofiltermaterialien beinhalten Kompost, Torf, Wurzelholz, Rinde, Holzschnitzel und verschiedene Kombinationen dieser und anderer Materialien.

Ein Problem beim Betrieb von Biofiltern ist deren begrenzte Standzeit. Naturgemäß werden die organischen Materialien des Biofilters auf Dauer auch von Mikroorganismen zersetzt. Dies führt zu einer Abnahme des stützenden Strukturmaterials und zu einer Erhöhung des Feinkornanteils. Als Folge dessen kann es zu Verdichtungserscheinungen innerhalb des Materials kommen, was zu einem erhöhten Druckverlust und einer ungleichmäßigeren Durchströmung des Biofilters führen kann. Auch tragende Teile der Konstruktion können durch Verrottung oder Korrosion in Mitleidenschaft gezogen werden. Für die Standzeit von Biofiltermaterialien geben verschiedene Autoren Werte zwischen 1 und 5 Jahren an (VDI 3477, 2004; Fischer, 1990; Eitner, 1990; Hübner und Saake, 1989). Danach wird das Material in der Regel komplett ausgetauscht. Aber auch eine Regenerierung des alten Materials durch Absieben der Feinfraktion und Beimengung von Frischmaterial kann eine Alternative sein (VDI 3477, 2004).

Die Betriebsbedingungen im Biofilter sollten entsprechend einer optimalen Aktivität der enthaltenen Mikroorganismen eingestellt werden. Dafür ist eine ausreichende Feuchte sowohl der Abluft als auch des Filtermaterials unerlässlich. Generell gilt bei biogen-organischen Filtermaterialien ein Wassergehalt von 40-60% als optimal (Heining, 1998; Kennes und Thalasso, 1998; VDI 3477, 2004). Um ein Austrocknen des Filters zu vermeiden, muss die Abluft mit Wasserdampf gesättigt sein. Ist die zu behandelnde Luft nicht ausreichend feucht, so wird hierzu im Allgemeinen ein Befeuchter, z.B. ein Gegenstrom-Füllkörperwäscher, eingesetzt.

Es ist grundsätzlich nicht möglich, eine allgemein gültige Volumenbelastung des Biofiltermaterials mit Abluft anzugeben. Die maximale Filterbettbelastung ist im Wesentlichen abhängig von dem Filtermaterial, der Abluftzusammensetzung und weiteren Betriebsbedingungen. Für eine optimale Auslegung des Biofilters ist es notwendig, Daten aus Pilotversuchen zu sammeln (Heining et al., 1997b). In der Praxis bewährte Filterbettbelastungen liegen in der Regel zwischen 40 und 150 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h Abluftvolumenstrom pro Filterbettvolumen (Dammann und Stegmann, 1999; Hahne und Vorlop, 1999; Paul und Nisi, 1996). Aber auch Filterbettbelastungen von bis zu 500 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h sind beschrieben (VDI 3477, 2004).

Der mikrobielle **Geruchsabbau** in Biofiltern wird laut VDI-Richtlinie 3477 (VDI 3477, 2004) nach Gust et al. (1979) formal mit einer chemischen Reaktion gleichgesetzt, deren Geschwindigkeit von der Konzentration der Verunreinigung, der Feuchte, der Mikroorganismenkonzentration und der Temperatur abhängig ist. Die Autoren räumen jedoch ein, dass die Parameter aufgrund der Datenfülle experimentell nicht bestimmbar sind und beschreiben den Biofilter zusammenfassend als einen Reaktor mit einer Abbaukinetik 1. Ordnung, welche sich experimentell bestimmen lässt (Heining, 1998). Komplexere Modelle gehen von einem Übergang der Reaktionsordnung von 1 auf 0 bei höheren Konzentrationen aus (Ottengraf, 1986; Heining et al., 1997b). Dieser Ansatz ähnelt mathematisch der aus der biologischen Reaktionskinetik bekannten Monod-Kinetik (Streese, 1997).

Entsprechend der beschriebenen Abbaukinetik ergibt sich der in Abb. 5 dargestellte Konzentrationsverlauf des Geruchs über die Biofiltermaterialschüttung.

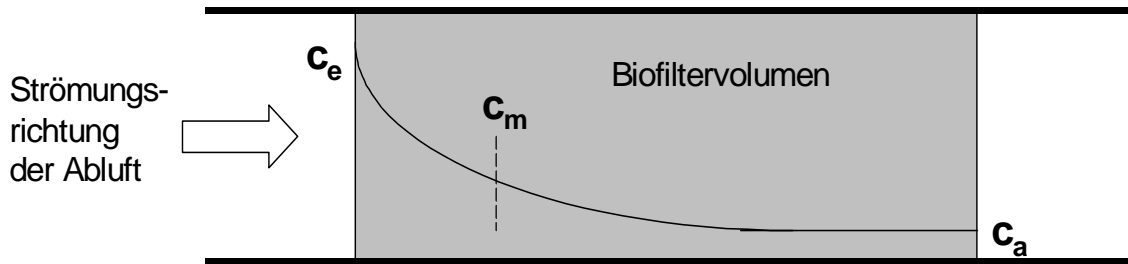


Abb. 5: Geruchstoffkonzentrationsverlauf über eine Biofiltermaterialschüttung (nach Heining, 1998)

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass der wesentliche Geruchsabbau in den ersten Schichten der Biofiltermaterialschüttung im hohen Konzentrationsbereich stattfindet. Für die Auslegung von Biofiltern bedeutet dies, dass für den Geruchsabbau im niedrigen Konzentrationsbereich verhältnismäßig mehr Filtermaterialvolumen benötigt wird. Die mittlere Konzentration ( $c_m$ ) im Biofilter entspricht wegen des nichtlinearen Konzentrationsverlaufs nicht dem arithmetischen Mittel der Ein- und Ausgangskonzentrationen. Durch eine differenzielle Betrachtung des Biofiltervolumens lässt sich herleiten, dass die mittlere Konzentration im Inneren des Biofilters vielmehr dem logarithmischen Mittelwert der Ein- und Ausgangskonzentrationen entspricht. Diese wird nach der folgenden Formel berechnet (Streese et al., 2005):

$$c_m = \frac{c_e - c_a}{\ln \frac{c_e}{c_a}} \text{ [GE/m}^3\text{]} \quad (1)$$

mit  $c_e$ : Geruchstoffkonzentration am Biofilter-Eingang [GE/m<sup>3</sup>]

$c_a$ : Geruchstoffkonzentration am Biofilter-Ausgang [GE/m<sup>3</sup>].

Die Geruchsabbaurate ( $r$ ) ist eine systemspezifische Größe, die die Reinigungsleistung des betrachteten Systems bezüglich des jeweils abzubauenen Geruchstoffs bzw. Geruchstoffgemischs in Verbindung mit dem verwendeten Filtermaterial beschreibt. Sie berücksichtigt neben der Verringerung der Geruchstoffkonzentrationen auch die Filterbettbelastung:

$$r = \frac{(c_e - c_a) * \dot{V}_{Luft}}{V_{Filter}} \text{ [GE/m}^3\text{h]} \quad (2)$$

- mit
- $r$ : Geruchsabbaurate [GE/m<sup>3</sup>h]
  - $c_e$ : eingehende Geruchsstoffkonzentration [GE/m<sup>3</sup>]
  - $c_a$ : ausgehende Geruchsstoffkonzentration [GE/m<sup>3</sup>]
  - $\dot{V}_{Luft}$ : zu behandelnder Abluftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h]
  - $V_{Filter}$ : Volumen der Filtermaterialschüttung [m<sup>3</sup>].

Die Geruchsabbaurate ist von der Temperatur und der mittleren Konzentration abhängig. Die Konzentrationsabhängigkeit folgt in niedrigen Konzentrationsbereichen meist einem linearen Zusammenhang:

$$r = k_1 * c_m \quad (3)$$

- mit  $k_1$ : Kinetikkonstante [1/h]

Man spricht in diesen Fällen von einer Kinetik erster Ordnung. Diese Beziehungen werden später bei der Auslegungsberechnung der Biofilter in Kap. 13.4.1 verwendet.

#### 4.3.2 Biowäscher und Biotropfkörper

In Biowäschern und Biotropfkörpern sind die Mikroorganismen in der Regel in der Waschflüssigkeit suspendiert oder besiedeln als Biofilm - sofern vorhanden - eingebaute Füllkörper. Der wesentliche Apparateteil ist die Absorptionskolonne, da in ihr der eigentliche Stoffaustausch zwischen Gas- und Flüssigphase stattfindet und somit die Abluftbestandteile den Mikroorganismen zugänglich gemacht werden. In der Regel werden bei diesen Verfahren Füllkörper eingesetzt, um die Stoffaustauschfläche zwischen beiden Phasen zu erhöhen. Gas- und Flüssigphase werden dann im Gegenstrom zueinander geführt. Bei Ausführungen ohne Füllkörper werden häufig Kreuzstromwäscher verwendet.

Die Waschflüssigkeit im Biowäscher wird kontinuierlich im Kreislauf geführt. Über die Einbindung eines Reaktionsbehälters in den Kreislauf kann die Regenerationszeit des Wäscherwassers verlängert werden (VDI 3478, 1996). Unter Umständen kann

eine zusätzliche Belüftung des Regenerationsbehälters erforderlich sein, um den erhöhten Sauerstoffbedarf zu decken (Schippert, 1994; Gust et al., 1979). Weiterhin können dem Wäscherwasser fehlende Nährstoffe für die Mikroorganismen zugesetzt werden. Auch eine pH-Wert-Regelung ist denkbar.

Die Dimensionierung eines Füllkörperwäschers kann analog zum Biofilter auf Grundlage von Vorversuchen vorgenommen werden. Zu beachten ist allerdings, dass mit dem Volumenverhältnis von Regenerationsbecken und Füllkörperschüttung ein weiterer Parameter zu optimieren ist. In der Praxis liegt die Leerrohrgeschwindigkeit in einem Biowäscher etwa zwischen 0,5 – 2,5 m/s. Bei Füllkörperwäschern arbeitet man mit Berieselungsdichten zwischen 20 – 60 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h bezogen auf die Gesamtoberfläche der Füllkörperschüttung (VDI 3478, 1996).

#### *4.3.3 Kombination von Biowäscher und Biofilter*

In der VDI-Richtlinie 3477 (VDI 3477, 2004) wird empfohlen, dem Biofilter einen Abscheider vorzuschalten, der beispielsweise Staubpartikel aus dem Abluftstrom entfernt und nachfolgende Anlagenteile wie evtl. einen Ventilator schont.

Bei einer Kombination von Biowäscher und Biofilter ist der Wäscher neben einer eventuellen Staubabscheidung vor allem in der Lage, einen Großteil der Abluftbelastung abzubauen und gleichzeitig den Luftstrom mit Wasser zu sättigen. Aufgrund der Vorbehandlung der Abluft geschieht der Abbau im Filter in niedrigeren Konzentrationsbereichen. Dies hat zur Folge, dass sich durch die geringere Abbauaktivität der Mikroorganismen das Biofiltermaterial sowie die Luft weniger stark erwärmen und somit dem System weniger Wasser entzogen wird.

Die Verringerung der Stoffkonzentrationen in der Abluft wird ebenfalls durch die Pufferwirkung des Biowäschers unterstützt. Konzentrationsspitzen, besonders von gut wasserlöslichen Substanzen (z.B. Ammoniak), werden im Wäscherwasser zurückgehalten und teilweise abgebaut bzw. zeitverzögert ausgetragen und mit einem niedrigeren Konzentrationsniveau dem Biofilter zugeführt (Schlegelmilch et al., 2005). Die Pufferkapazität des Wäschers hängt neben der Art des zu puffernden Stoffes auch von dem Wäscherwasservolumen und den Betriebsbedingungen ab.



---

## 5 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 5.1 Geruchsminderungsgrad

Zur Darstellung der Effektivität von Behandlungsanlagen wird häufig der Begriff des Geruchsminderungsgrades bzw. des Wirkungsgrades verwendet (DIN EN 13725, 2003). Berechnen lässt sich dieser über das Verhältnis der in das Reinigungssystem ein- und austretenden Geruchsstoffkonzentrationen:

$$\eta[\%] = \frac{c_{roh} - c_{rein}}{c_{roh}} * 100 \quad (4)$$

mit  $\eta$ : Wirkungsgrad [%]  
 $c_{roh}$ : Geruchsstoffkonzentration Rohgas [GE/m<sup>3</sup>]  
 $c_{rein}$ : Geruchsstoffkonzentration Reingas [GE/m<sup>3</sup>].

### 5.2 Statistische Versuchsplanung

Bei der systematischen Optimierung einer Methode oder eines Verfahrens ist es oft notwendig, mehrere Parameter zu betrachten, die einen Einfluss auf das gewünschte Endergebnis besitzen können. Die statistische Versuchsplanung bedient sich mathematischer Modelle, um den Einfluss einer großen Anzahl verschiedener Parameter bei möglichst geringem experimentellem Aufwand zu prüfen. Für die Versuchsplanung müssen zunächst Ziel- und mögliche Einflussgrößen festgelegt werden. Die Zielgröße definiert das Resultat der Versuchsoptimierung, während als Einflussgrößen oder Faktoren die Parameter bezeichnet werden, von denen die Zielgröße abhängig ist (Kleeberg, 2002). Mögliche Einflussgrößen sind beispielsweise Temperatur, Druck, Konzentration etc., Zielgrößen können z.B. Erträge, Wirkungsgrade oder Ähnliches sein.

Ein geeignetes Modell stellt die simultane Optimierung dar, bei der die Zusammenhänge zwischen der Zielgröße und den einzelnen Faktoren zeitgleich

untersucht werden. Dazu werden Experimente durchgeführt, die einen bestimmten experimentellen Raum abdecken. Mit Hilfe eines mathematischen Modells können dann aus diesen Experimenten die Zielgrößenwerte an allen Stellen des Raumes vorhergesagt werden und so das tatsächliche Optimum ermittelt werden (Esbensen et al., 1996; Otto, 1997). Der experimentelle Raum wird durch die unterschiedlichen Faktoren aufgespannt. Entsprechend ergibt sich dessen Umfang aus dem betrachteten Wertebereich der einzelnen Einflussgrößen.

Damit bei der Durchführung entsprechender Versuche nicht jede mögliche Kombination der Einflussfaktoren untersucht werden muss, empfiehlt es sich, systematische Versuchspläne aufzustellen. Eine geeignete Möglichkeit bieten die faktoriellen Experimente. Sie basieren auf der gleichzeitigen Veränderung aller Faktoren auf einer begrenzten Anzahl von Faktoreinstellungen bzw. -stufen. Faktorielle Experimente erlauben, den gesamten Raum der Faktoreinstellungen zu untersuchen. Sie garantieren eine hohe Präzision bei minimalem experimentellem Aufwand. Mit ihrer Hilfe lassen sich Faktorenwechselwirkungen erkennen (Otto, 1997).

Der Aufwand einer Versuchsoptimierung ist von der Anzahl der Faktoren und der gewählten Versuchsstufen abhängig. Der Vorteil von mehreren Versuchsstufen liegt in einem höheren Informationsgewinn. So lassen sich bei der Verwendung von 2 Stufen nur lineare Zusammenhänge erkennen, während bei 3 Stufen auch quadratische Zusammenhänge betrachtet werden können. Mit der Stufenzahl erhöht sich allerdings auch die Anzahl der durchzuführenden Experimente beträchtlich. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche beträgt bei  $n$  Stufen und  $k$  Faktoren  $n^k$  (Kleeberg, 2002).

Ein Beispiel für faktorielle Versuchspläne sind die in dieser Arbeit verwendeten Box-Behnken-Pläne. Sie gehören zu den dreistufigen Plänen (Response Surface Design). In den Box-Behnken-Versuchsplänen liegen die Faktorkombinationen in gleichem Abstand vom Zentrum des Planes auf einer Kugel bzw. Hyperkugel. Untersucht man beispielsweise drei Einflussfaktoren, kann der Versuchsplan in Form eines Würfels dargestellt werden, der von den 3 Faktoren aufgespannt wird (Abb. 6). Jeder Punkt stellt hierbei ein Experiment dar. Es ergeben sich 15 erforderliche Versuche, während bei einem vollständigen faktoriellen Versuchsplan 27 Experimente für eine

aussagekräftige Optimierung nötig sind. Nachteilig kann beim Box-Behnken Plan sein, dass an den Ecken des Würfels kein Versuch liegt und die Zielgröße nur über das Modell durch Interpolation berechnet werden kann. Zur Abschätzung des experimentellen Fehlers müssen die Faktorkombinationen an mindestens einer Stelle wiederholt werden. Üblicherweise erfolgt dies im Zentrum des Planes durch eine Dreifachmessung. Aus der berechneten Varianz wird die Signifikanz der Einflussgrößen ermittelt. Mit dieser Methode sollen sowohl lineare als auch nicht lineare Zusammenhänge zwischen den Faktoren und der Zielgröße möglichst allgemein dargestellt werden. Es wird daher mit wenigstens drei Faktorstufen experimentiert (Otto, 1997).

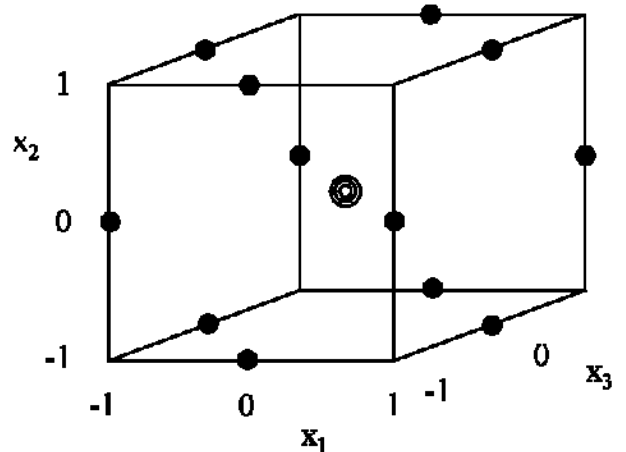


Abb. 6: Graphische Darstellung des Box-Behnken-Plans für drei Faktoren ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) mit den drei kodierten Faktorstufen (-1, 0, 1) (Otto, 1997)

Die Kanten des Würfels ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) stellen die drei Einflussgrößen (Faktoren) auf die betrachtete Zielgröße dar. Die Eck- und Mittelpunkte des Würfels stellen die mit -1, 0, 1 kodierten Stufen der jeweiligen Einflussgröße dar. Hierbei entspricht die -1 dem kleinsten, die 0 einem mittleren und die 1 dem größten einzustellenden Wert der Einflussgrößen. Für den Parameter „Temperatur“ wären beispielsweise folgende Faktorstufen denkbar, bei denen die Experimente durchgeführt werden: 0 °C (-1), 10 °C (0) und 20 °C (1). Entsprechend der durch die Punkte in der graphischen Darstellung (Abb. 6) nach Box-Behnken vorgegebenen Experimente ergibt sich der in Tab. 2 dargestellte detaillierte Versuchsplan.

Tab. 2: Box-Behnken-Versuchsplan für 3 Faktoren

Versuchsnummer	Faktoren			Zielgröße
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	+1	+1	0	$y_1$
2	+1	-1	0	$y_2$
3	-1	+1	0	$y_3$
4	-1	-1	0	$y_4$
5	+1	0	+1	$y_5$
6	+1	0	-1	$y_6$
7	-1	0	+1	$y_7$
8	-1	0	-1	$y_8$
9	0	+1	+1	$y_9$
10	0	+1	-1	$y_{10}$
11	0	-1	+1	$y_{11}$
12	0	-1	-1	$y_{12}$
13, 14, 15	0	0	0	$y_{13}, y_{14}, y_{15}$

Entsprechend dieses Versuchsplans werden für alle 15 Experimente die hier vorgegebenen Versuchsbedingungen eingestellt. Für den Versuch Nummer 1 beispielsweise wird für die Einflussgrößen  $x_1$  und  $x_2$  der höchste Wert des betrachteten Größenbereiches eingestellt und für den Faktor  $x_3$  die mittlere Stufe. Die Versuche 13, 14 und 15 werden unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt, um wie oben beschrieben den experimentellen Fehler abschätzen zu können.

Die Auswertung der 15 Versuche erfolgt anhand von Flächenplots (Abb. 7), die die Zielgröße in Abhängigkeit der Faktorenkombinationen über den gesamten Versuchsraum darstellen. Als empirisches Modell zur Berechnung der Antwortflächen wird ein Polynom zweiten Grades verwendet (Otto, 1997):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \quad (5)$$

mit  $k$ : Anzahl der Faktoren

$b_0$ : Ordinatenabschnitt

$b_i, b_{ij}, b_{ii}$ : Regressionsparameter für die linearen, Wechselwirkungs- und quadratischen Effekte

Um alle Parameter des Polynoms in Gleichung 5 schätzen zu können, müssen alle Faktoren auf mindestens drei Stufen (3-stufiger Versuchsplan) untersucht werden.

In dem Flächenplot (Abb. 7) sind auf der x- und z-Achse 2 der untersuchten Einflussgrößen und auf der y-Achse die Zielgröße aufgetragen. Die dritte Einflussgröße wird hier konstant gehalten. Die Werte der Zielgröße sind zur übersichtlicheren Darstellung auf der Antwortfläche farblich abgestuft. Die den Farben zugewiesenen Werte sind der Legende zu entnehmen. Auf der durch die x- und z-Achsen aufgespannten Ebene ist eine Projektion der Antwortfläche als Konturenplot dargestellt.

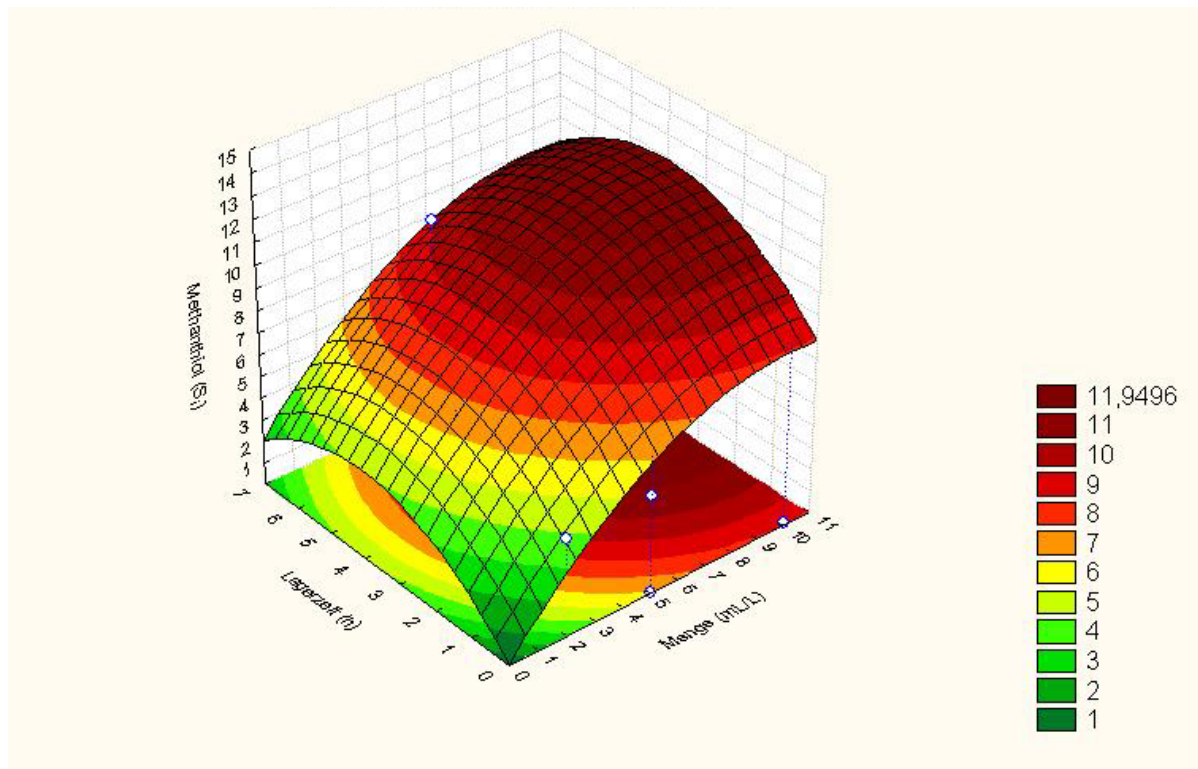


Abb. 7: Beispiel für einen Flächenplot zur Darstellung der Einflüsse zweier Faktoren auf eine Zielgröße

Für das abgebildete Beispiel gilt, dass bei einer Erhöhung der Einflussgröße „Menge“ auch die Zielgröße ansteigt, während sich bei dem Faktor „Lagerzeit“ ein echtes Maximum hinsichtlich der Zielgröße ausbildet. Die Auswirkungen einer Veränderung des dritten Parameters kann durch einen Vergleich der drei für die jeweiligen Stufen dieser Einflussgröße aufgenommenen Flächenplots ermittelt werden.

Die Signifikanz einzelner Einflussfaktoren auf die Zielgröße kann in einem Paretodiagramm (Abb. 8) veranschaulicht werden. Signifikante Einflüsse werden

durch Überschreitung der Signifikanzschranke ( $p=0,05$ ) angezeigt (Kleeberg, 2002). Die Signifikanz der Effekte wird über die Standardabweichung der Ergebnisse der Dreifachmessung im zentralen Punkt des Box-Behnken-Plans (Abb. 6) bestimmt. Im Paretdiagramm sind die Ergebnisse der statistischen Betrachtung der einzelnen Faktoren jeweils für deren lineare und quadratische Effekte (Haupteffekte) dargestellt. Die Werte der abgeschätzten, standardisierten Effekte geben die Stärke des Einflusses der Faktoren auf die Zielgröße an. Negative Werte zeigen eine Verringerung der Zielgröße bei steigender Einflussgröße an und positive Werte einen Anstieg. Die Zahlenwerte entsprechen den durch Division mit der ermittelten Standardabweichung standardisierten Regressionsparametern der jeweiligen Einflussparameter aus Gleichung 5 auf Basis der kodierten Faktoren (-1, 0, +1).

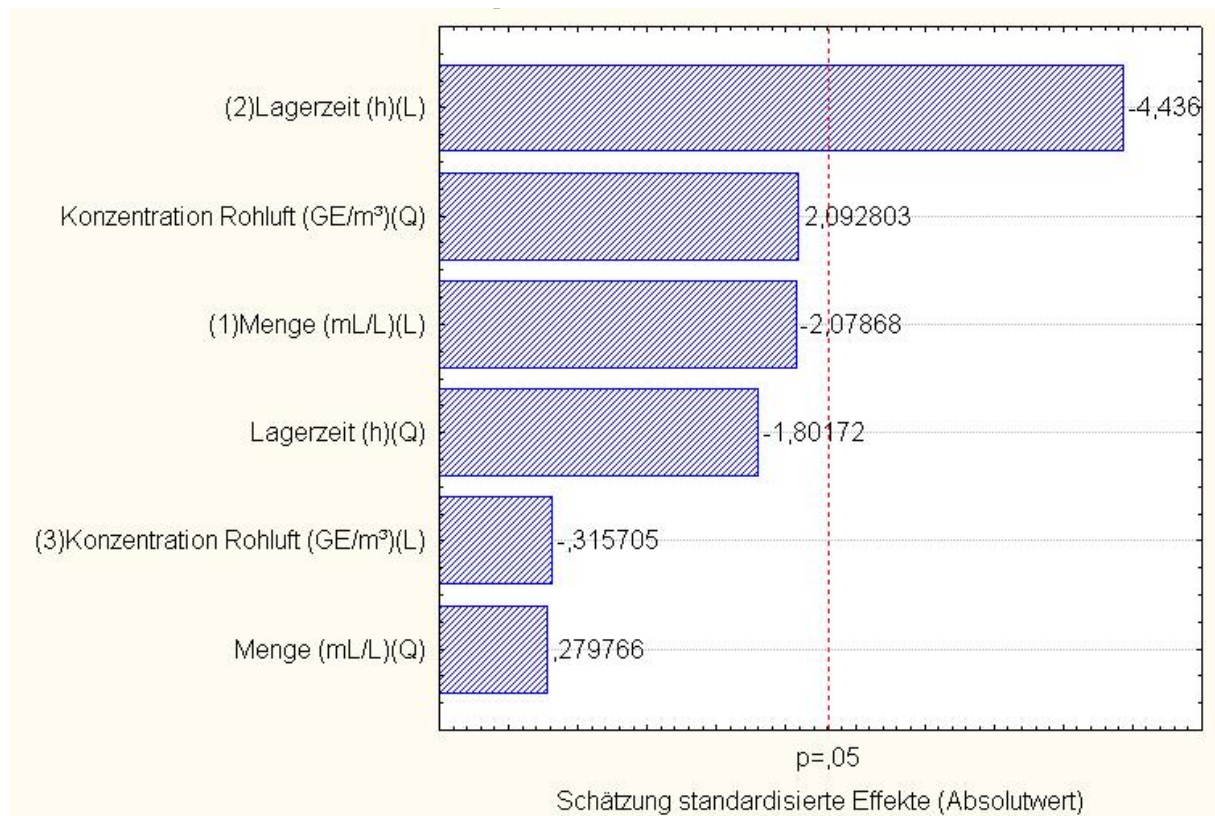


Abb. 8: Paretdiagramm der linearen (L) und quadratischen (Q) Effekte der Faktoren auf eine Zielgröße

## 6 MATERIAL UND METHODEN

### 6.1 Gasanalytik

#### 6.1.1 Probenahme

Die Probenahme für die anschließende Gasanalytik erfolgte entsprechend der DIN EN 13725 (2003) für Geruchsproben nach dem Lungenprinzip (Abb. 9) in geruchsneutrale und luftdichte Beutel aus Polyterephthalsäureester (Nalophan<sup>®</sup>, Kalle GmbH, Wiesbaden). Die so genommenen Proben wurden max. 6 Std. nach ihrer Entnahme im Labor analysiert.

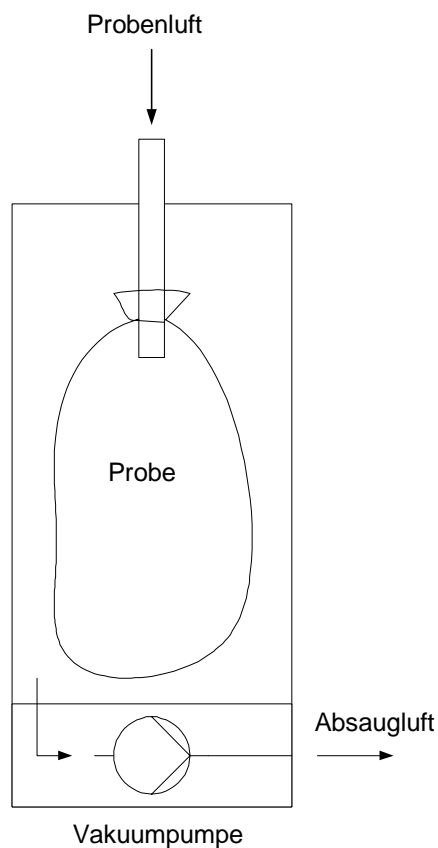


Abb. 9: Skizze und Foto eines Probennehmers für die Entnahme von Geruchsproben nach dem Lungenprinzip

### 6.1.2 Olfaktometrie

Die Geruchskonzentrationen der untersuchten Abluftproben wurden entsprechend der Europäischen Norm zur „Bestimmung der Geruchstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie“ (DIN EN 13725, 2003) ermittelt. Für die Messungen wurde das dynamische 4-Platz-Olfaktometer TO6 (Abb. 10) der Fa. Mannebeck/Ecoma (Kiel) verwendet. Der Messbereich dieses Gerätes liegt zwischen etwa 6 und 30.000 GE/m<sup>3</sup>. Höher konzentrierte Proben wurden vor der Messung verdünnt.

Die Verdünnung der Proben erfolgte durch Spülen einer Laborgasmaus mit der zu verdünnenden Probe. Nach diesem Vorgang wurde der Inhalt der Gasmaus mit Neutralluft in einen im Verhältnis zum Volumen der Gasmaus deutlich größeren Geruchsbeutel überführt. Die Beutelgrößen sollten hierbei mindestens um den Faktor 50 größer sein, damit ein ausreichender Gasaustausch erfolgen kann. Das Verdünnungsverhältnis errechnet sich aus dem Verhältnis der beiden Volumina.



Abb. 10: Olfaktometer TO6, Fa. Mannebeck, Kiel

Die Überprüfung der Eignung der Prüfpersonen für die Geruchsmessung erfolgte mittels n-Butanol als Referenzgas. Die Konzentration betrug 50,9 ppm n-Butanol in Stickstoff 5.0. Der prognostizierte Geruchsschwellenwert dieses Prüfgases darf im Mittel bei einem für die Olfaktometrie geeigneten Probanden zwischen 20 und 80 ppb liegen, bei einer Standardabweichung von unter 2,3 (DIN EN 13725, 2003).

### 6.1.3 SPME-GC/MS-Methode

#### Anreicherung

Die Anreicherung der Geruchsstoffe im Labor erfolgte direkt aus dem Probenahmebeutel mit Hilfe der Festphasenmikroextraktion (Solid-Phase Microextraction, SPME). Die Messbedingungen der SPME-Methode sind von Kleeberg et al. (2005b) optimierten worden und in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Parameter der SPME-Methode

SPME-Fasermaterial:	Carboxen/Polydimethylsiloxan (CAR/PDMS)
SPME-Anreicherungszeit	30 min
Anreicherungstemperatur	Raumtemperatur
Desorptionstemperatur	290 °C
Desorptionszeit	5 min

#### Gaschromatographie

Die gaschromatographische Analyse der Abluftinhaltsstoffe nach der Anreicherung auf SPME-Fasern erfolgte mittels eines mit einem Flammenionisationsdetektor und einem Sniffingport gekoppelten Gaschromatographen (Chrompack CP9000 Gas Chromatograph, Varian, Darmstadt, Germany) und eines mit einem Massenspektrometer gekoppelten Gaschromatographen (HP 6890 Gas Chromatograph, Agilent Technologies, Waldbronn). Die Geräteparameter und chromatographischen Bedingungen sind in Tab. 4 und Tab. 5 aufgelistet.

Für die Identifizierung der Substanzen anhand der Massenspektren wurden die Wiley (2000) und NIST (National Institute of Standards and Technology, 2005) Datenbanken für die Zuordnung von Geruchseindrücken die Flavor-Base (Leffingwell & Associates, 2007) und Flavornet (Acree, T. und Arn, H., 2004) herangezogen.

Tab. 4: Geräteparameter und chromatographische Bedingungen des GC-FID/O-Systems

Gerät	Chrompack CP9000 Gas Chromatograph
Trennsäule	DB-5, 30 m, I.D. 0,32 mm, Filmdicke 0,25 µm
Temperaturprogramm	40 °C (6 min isotherm), mit 5 °C/min auf 100 °C aufheizen, mit 30 °C/min auf 300 °C aufheizen, 300 °C (2 min isotherm)
Trärgas	Stickstoff, 4 mL/min
Injektor	290 °C, Split: 1:20, am Ende der Säule erfolgt eine Teilung im Verhältnis 1:1 für FID und Sniffingport
Detektor	FID: 300 °C, Sniffingport: Raumtemperatur
Datenaufnahme	HP-ChemStation, Version A.06.03

Tab. 5: Geräteparameter und chromatographische Bedingungen des GC-MS-Systems

Gerät	HP 6890 Gas Chromatograph
Trennsäule	HP-5-MS, 30 m, I.D. 0,25 mm, Filmdicke 0,25 µm
Temperaturprogramm	40 °C (6 min isotherm), mit 5 °C/min auf 100 °C aufheizen, mit 30 °C/min auf 300 °C aufheizen, 300 °C (2 min isotherm)
Trärgas	Helium, 0,6 mL/min
Injektor	290 °C, Split: 1:20
Detektor	HP 5973 Mass Selective Detector, Scanbereich (m/z) 35-550, EI, Threshold 14,0, 70 eV
Datenaufnahme	HP-ChemStation, Version A.03.00

## 6.2 Feststoffanalytik

### 6.2.1 Wassergehalt

Die Bestimmung des Wassergehalts der Biofiltermaterialien erfolgte nach DIN EN 12880 (2001). Hierfür wurde eine repräsentative Probe des Materials bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz, mindestens 24 Stunden, getrocknet. Die Auswertung erfolgte

anhand einer Dreifachbestimmung. Der Wassergehalt wird auf die Frischmasse bezogen.

Der Wassergehalt bzw. die Trockensubstanz ergibt sich gemäß folgender Berechnung:

$$WG = \frac{m_{\text{feucht}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{feucht}} - m_{\text{tara}}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$TS = 100 - WG \quad (7)$$

mit:  $WG$ : Wassergehalt [%]  
 $TS$ : Trockensubstanzgehalt [%]  
 $m_{\text{feucht}}$ : Masse der Einwägschale inkl. feuchter Probe [g]  
 $m_{\text{trocken}}$ : Masse der Einwägschale inkl. getrockneter Probe [g]  
 $m_{\text{tara}}$ : Masse der Einwägschale [g].

### 6.2.2 Wasserhaltekapazität

Die Wasserhaltekapazität wurde in Anlehnung an das im Methodenbuch zur Analyse von Kompost (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1998) beschriebene Verfahren per Dreifachbestimmung ermittelt. Hierfür wurden die Materialien auf Filterpapier in Trichtern gegeben und über mehrere Stunden hinweg mehrmalig zur Befeuchtung mit Wasser übergossen. Anschließend wurden die Proben eine halbe Stunde lang mit Folie abgedeckt zum Abtropfen stehen gelassen. Von der nun mit Wasser gesättigten Probe wurde entsprechend Kap 6.2.1 der Wassergehalt bestimmt.

### 6.2.3 Schüttdichte

Die Schüttdichte ist abhängig von der Feuchtigkeit und der Struktur des Materials. Sie wird durch die Volumenbestimmung einer ausreichend großen, repräsentativen Materialmenge in einem geeigneten volumetrischen Messgefäß (z.B. 2 L Bescherglas) bei gleichzeitiger Feststellung der Masse ermittelt. Die Messung erfolgt dreimalig bei anschließender Mittelwertbildung.

### 6.2.4 Luftporenvolumen

Das Luftporenvolumen der Biofiltermaterialien wird nach der Druckwechsellmethode gemäß dem Methodenbuch zur Analyse von Kompost (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1994) ermittelt. Hierfür wird ein Druckbehälter mit Probenmaterial gefüllt und anschließend mit 2 bar Druckluft befüllt ( $p_1$ ). Durch Öffnen eines Absperrventils zu einem Ausgleichsbehälter stellt sich ein neuer Druck in der Apparatur ein ( $p_2$ ). Das Luftporenvolumen errechnet sich bei Temperaturkonstanz aus den beiden Drücken und dem Volumen des Ausgleichsbehälters. Die Porosität wird unter Berücksichtigung des Druckbehältervolumens wie folgt ermittelt:

$$V_P = \frac{(p_2 \cdot V_A)}{p_1 - p_2} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_B} \cdot 100 \quad (9)$$

mit:  $V_P$ : Luftporenvolumen [L]  
 $V_A$ : Volumen des Druckausgleichsbehälters [2 L]  
 $V_B$ : Volumen des Druckbehälters [0,4 L]  
 $p_1$ : Druck vor Öffnen des Absperrventils [Pa]  
 $p_2$ : Druck nach Öffnen des Absperrventils [Pa]  
 $\varepsilon$ : Porosität des Materials [%].

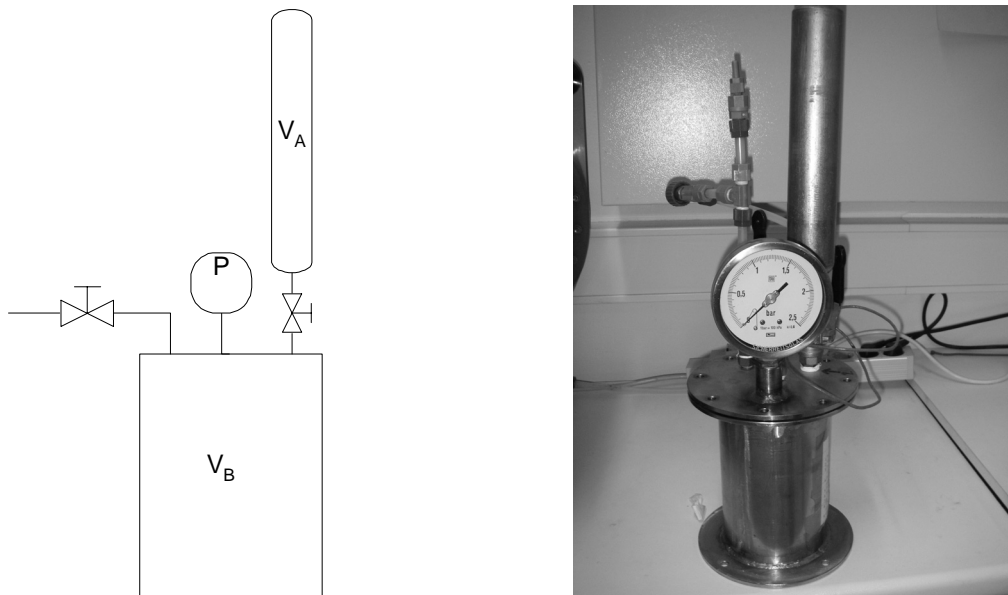


Abb. 11: Foto und schematische Skizze der Apparatur zur Luftporenvolumenbestimmung

### 6.2.5 Chemisch-physikalische Analysen im Eluat

#### Eluatherstellung

Der pH-Wert, die Leitfähigkeit, der Ammoniumstickstoffgehalt sowie die Nitrat-, Nitrit-, Sulfat- und Phosphatkonzentrationen werden im Eluat der Feststoffproben bestimmt. Die Herstellung des Eluats erfolgte gemäß DIN 38414-4 (1984). Eine frische Feststoffprobe wird im Verhältnis 1:10 mit demineralisiertem Wasser versetzt und für 2 h im Überkopfschüttler eluiert. Anschließend wird die Probe durch ein Sieb gegossen, dekantiert und zentrifugiert (20 min, 6000 U/min).

#### pH-Wert

Die Messung des pH-Werts erfolgte gemäß DIN 38404-5 (2005) im Eluat mit einer Glaselektrodeneinstabmesskette (SenTix 50, WTW GmbH, Weilheim) und einem pH-Messgerät (pH 91, WTW GmbH, Weilheim).

### Leitfähigkeit

Die Bestimmung der Leitfähigkeit erfolgte gemäß DIN EN 27888-8 (1993) in Verbindung mit Vorschriften aus dem Methodenhandbuch zur Analyse von Kompost (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1994) im Eluat mit einer Elektrode (TetraCon 96, WTW GmbH, Weilheim) und einem Leitfähigkeitsmessgerät (LF 539, WTW GmbH, Weilheim).

### Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N)

Bei der Bestimmung des Ammoniumstickstoffgehaltes wird das Ammonium im Eluat durch Zugabe einer 10 molaren Natronlauge in Ammoniak umgewandelt. Der Gehalt an Ammoniak wird mit einer gassensitiven Elektrode (inoLab pH/ION 735, WTW, Weilheim) bestimmt (DIN EN ISO 11732, 2005).

### Nitrat, Nitrit, Sulfat und Phosphat

Die Bestimmung von Nitrat-N, Nitrit-N, Sulfat und Phosphat-P erfolgte mittels Ionenchromatograph (Ionenchromatograph DX-100, Dionex GmbH, Idstein gemäß DIN EN ISO 10304-2 (1996) im Eluat. Die Ionen werden flüssigkeitschromatographisch mit einer Trennsäule (Vorsäule: AG4A-SC, Säule: AS4A-SC, DIONEX, Idstein) getrennt und über die Leitfähigkeit detektiert. Als Eluent wurde 2,4 mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / 3,0mM NaHCO<sub>3</sub> verwendet. Der säulenfluss lag bei 2 mL/min.

### Gebundener Stickstoff

Der gebundene Stickstoff wird gemäß DIN 38409 - H 28 (1992) im Eluat bestimmt. Bei dieser Methode wird oxidiertes Stickstoff in saurer Lösung durch Devardasche Legierung zu Ammoniak bzw. Aminen reduziert. Organisch gebundener Stickstoff wird katalytisch aufgeschlossen und in Ammoniumsalze überführt. Durch Zugabe von Natriumhydroxid-Lösung wird Ammoniak aus der Reaktionsmischung ausgetrieben und maßanalytisch bestimmt.

### Organischer Kohlenstoffgehalt (TOC)

Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes im Eluat erfolgt gemäß DIN EN 1484 (1997). Der Kohlenstoff der organischen Verbindungen wird hier thermisch zu Kohlendioxid oxidiert. Die Bestimmung des Kohlendioxids erfolgt über einen Infrarot-Detektor (Analyzer multi N/C 2000, Analytic Jena, Jane). Es wird die Differenzmethode angewandt, das heißt der TOC ergibt sich aus der Differenz des Gesamtkohlenstoffgehaltes (TC) und des anorganischen Kohlenstoffgehaltes (TIC). Der anorganische Kohlenstoff wird als CO<sub>2</sub> aus der Probe mit Phosphorsäure ausgetrieben und ebenfalls infrarotspektroskopisch gemessen.

#### *6.2.6 Chemisch-physikalische Analysen von Feststoffproben*

### Trocknen und Mahlen

Für die Bestimmung der auf die Trockensubstanz bezogenen Parameter (Glühverlust, organischer Kohlenstoffgehalt, organischer Stickstoffgehalt) wird eine homogene, trockene Probe des Materials benötigt. Gemäß dem Methodenbuch zur Analyse von Kompost (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1994) wurde das feuchte Material bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz (ca. 24 h) getrocknet und anschließend mit einer Schneidmühle (SM1, Retsch, Haan, Germany) vorzerkleinert und anschließend mit einer Zentrifugalmühle (ZM1, Retsch, Haan, Germany) auf eine Korngröße <0,25 mm gemahlen.

### Glühverlust

Als Glühverlust wird die Differenz zwischen dem Gesamttrockenrückstand und dem Gesamtglührückstand der getrockneten und gemahlene Probe bezogen auf die Trockensubstanz bezeichnet. Die Bestimmung des Glühverlusts erfolgte gemäß DIN 38409-1 (1987) bei einer Ofentemperatur (Muffelofen, Heraeus Instruments GmbH, Hanau) von 550 °C über 5 h.

### Organischer Kohlenstoffgehalt (TOC)

Der organische Kohlenstoffgehalt wurde in Anlehnung an das im Methodenbuch zur Analyse von Kompost (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 1994) beschriebene Verfahren von der getrockneten und gemahlene Probe bestimmt. Der Gesamtkohlenstoff (TC) wird bei dieser Methode thermisch (Ströhlein Coulomat, BEHR Labortechnik GmbH, Düsseldorf) zu Kohlendioxid oxidiert und das gebildete CO<sub>2</sub> mit einem IR-Spektrometer (Modell Finor, Maihak AG, Hamburg) detektiert. Der TOC ergibt sich aus der Differenz von Gesamtkohlenstoff und anorganischem Kohlenstoff (TIC). Zur Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffgehaltes wird die Probe mit konzentrierter Salzsäure versetzt und ebenfalls die freigesetzte CO<sub>2</sub>-Menge gemessen.

### Organisch gebundener Stickstoff (TKN – Kjeldahl-Stickstoff)

Der gebundene Stickstoff wurde in Anlehnung an die Methoden zur Untersuchung von Böden des VDLUFA (1991) in der getrockneten und gemahlene Probe bestimmt. Der organisch gebundene Stickstoff wird katalytisch aufgeschlossen und in Ammoniumsalze überführt. Durch Zugabe von NaOH-Lösung wird Ammoniak aus der Reaktionsmischung ausgetrieben und titrimetrisch bestimmt. Es wurden ein Aufschlussgefäß (KTL-20S), ein Aufschlussblock (Kjeldalift KTL20) und eine Wasserdampfdestillationsapparatur (Vapodest 20) der Fa. Gerhardt GmbH und Co. KG (Bonn) verwendet.

#### *6.2.7 Keimzahlbestimmung*

Für die Keimzahlbestimmung im Biofiltermaterial wurde die Zahl Kolonie bildender Einheiten (KBE) mesophiler Pilze und Bakterien herangezogen. Zwar ist es nicht möglich, mit dieser Methode die Gesamtpopulation einer Probe zu bestimmen, aber die gefundenen Keimzahlen gestatten einen Vergleich der unter denselben Bedingungen und auf gleichen Nährböden wachsenden Keime unterschiedlicher Materialien (Alef, 1991).

### Probenaufbereitung

In Anlehnung an das im Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie (Alef, 1991) beschriebene Verfahren wurde jeweils eine repräsentative, naturfeuchte Mischprobe des Biofiltermaterials in einen sterilen Kolben eingewogen und im Verhältnis 1:10 mit einer sterilen physiologischen NaCl-Lösung (0,9%) versetzt. Der Ansatz wurde gründlich vermischt und dann 20 min intensiv geschüttelt. Nach abschließender Sedimentation der Feststoffe wurde eine logarithmische Verdünnungsreihe ( $10^0$ - $10^{-7}$ ) unter Verwendung des Überstandes angefertigt.

### Kultivierungsbedingungen

Jeweils drei 10 µL-Tropfen jeder Verdünnungsstufe wurden auf geeignete Nährmedien aufgetragen und bei 37 °C inkubiert (Tab. 6).

Tab. 6: Darstellung der verwendeten Selektivnährmedien und der jeweiligen Kultivierungsbedingungen

<b>Organismengruppe</b>	<b>Nährmedium</b>	<b>Inkubationstemperatur [°C]</b>	<b>Inkubationszeit [d]</b>
Gesamtbakterien (mesophil)	CASO-Agar (Roth, Karlsruhe)	37	3-4
Schimmelpilze (mesophil)	DG-18 Agar (Roth, Karlsruhe)	37	7-10

### Auszählung

Die Auszählung der Keime erfolgte anhand der auf den Agarplatten sichtbaren Kolonien. Für die Ermittlung der Keimzahlen wurde ein Mittelwert über die Ergebnisse der drei Parallelansätze auswertbarer Verdünnungsstufen berechnet. Die Anzahl der KBE wurde auf die Trockenmasse des untersuchten Materials bezogen und errechnet sich wie folgt:

$$n = \bar{n}_{Tr} \cdot \frac{V_{Lsg}}{V_{Tr} \cdot S \cdot m} \quad (10)$$

- mit:  $n$ : Anzahl der mit dieser Methode nachweisbaren KBEs im untersuchten Material bezogen auf dessen Trockensubstanz [KBE/mg]
- $\bar{n}_{Tr}$ : Mittelwert der Anzahl KBE über die drei Ansätze einer Verdünnungsstufe [-]
- $V_{Tr}$ : Volumen des Tropfens auf der Agarplatte [mL]
- $V_{Lsg}$ : Volumen der Suspensionslösung, die zum Ausschütteln der Materialprobe verwendet wurde [mL]
- $S$ : Verdünnungsstufe [-]
- $m$ : Trockenmasse der Materialprobe [mg].

Anschließend wurde erneut über die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Verdünnungsstufen gemittelt.

### 6.3 Emissionsquellen

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten gasanalytischen Untersuchungen zur Optimierung der Testsysteme sowie zur Beurteilung der Reinigungsleistung von unterschiedlichen Abluftbehandlungsverfahren wurde beispielhaft Abluft aus drei unterschiedlichen Bereichen der industriellen Lebensmittelverarbeitung verwendet.

#### 6.3.1 Öl – und Fettveredelung (Desodorierung)

Bei der Raffination von Speiseölen und –fetten werden im Verfahrensschritt der Desodorierung unerwünschte Substanzen (sog. Ranzstoffe) im Hochvakuum aus dem Produkt abdestilliert. Bei den hier frei werdenden Substanzen handelt es sich größtenteils um typische Fettoxydationsprodukte wie organische Säuren, Aldehyde und Ketone (s.a. Guillen et al., 2005; Belitz et al., 2004; Jelen et al., 2000; Dijkstra, 1999; Morales et al., 1994; Guth, 1991).

Die Abluft aus der Vakuumdestillation wird im so genannten Fallwasserkreislauf mit Kalilauge vorgereinigt, wodurch die freien Fettsäuren verseift und andere Abluftinhaltsstoffe im alkalischen Fallwasser gelöst werden. Das in den Fallwassertanks rezirkulierende Fallwasser gibt bei Kontakt mit Umgebungsluft die in ihr gelösten Geruchsstoffe an diese ab und bildet eine Geruchsquelle.

In dem betrachteten Fall stehen die offenen Rezirkulationsbecken in einem kleinen Kellerraum. Die Abluftproben wurden dem Gasraum oberhalb der Flüssigkeit entnommen.

### 6.3.2 Schokoladenmasseherstellung (Conchieren)

Bei der Schokoladenmasseherstellung wird die Kakaomasse entgast, unter Zusatz von beispielsweise Zucker, Kakaobutter und Milchpulver gewalzt sowie beim anschließenden Conchierprozess durch mechanischen Energieeintrag weiter verfeinert.

Bei der Entgasung werden vorwiegend Essigsäure (ca. 0,05%) und saure Aromabegleitstoffe, aber wenig typisches Kakaoaroma ausgetragen. Zu den emittierenden Geruchsstoffen gehören weiterhin Aldehyde, Ketone und Ester. Der Wasserdampfgehalt der Abluft beträgt bis zu 2%. (VDI 3893, 1989). Neben Wasserdampf emittieren auch beim Conchieren in erster Linie Essigsäure, aber auch weitere flüchtige Stoffe wie beispielsweise Ethanal, Aceton, Diacetyl, Methanol, Ethanol, Isopropanol, Isobutanol, Isopentanol und Essigsäureethylester (Belitz et al., 2004).

Untersuchungen zu den Hauptgeruchsstoffen, die beim Conchieren emittieren, wurden von Counet et al. (2002) und Schnermann und Schieberle (1997) durchgeführt. Counet et al. (2002) untersuchten dunkle Schokolade vor und nach dem Conchieren und ermittelten einen Verlust von 2-Methylpropanal und 2- und 3-Methylbutanal. Schnermann und Schieberle (1997) postulierten die Emission von 2-Methylbutansäureethylester, 2-Methoxy-3-isopropylpyrazin, Hexanal und 2-Ethyl-3,6-dimethylpyrazin während des Conchierungsprozesses anhand von Untersuchungen der Hauptaromastoffe von Kakaomasse und Milkschokolade.

Bei dem betrachteten Betrieb wird die Raumlufte aus den verschiedenen Bereichen der Schokoladenmasseherstellung gesammelt erfasst. Es wurden sowohl dieser Abluftstrom als auch Proben aus dem Gasraum direkt über ausgewählten Conchen für Versuche verwendet.

### 6.3.3 Kaffeeveredelung

Bei dem hier betrachteten Verfahren wird vorgequollener Rohkaffee in einem Autoklaven bei ca. 5 bar und 155 °C etwa eine Stunde mit Wasserdampf beaufschlagt. Im Anschluss werden die veredelten Kaffeebohnen durch eine Bodenklappe des Autoklaven in einen Pufferbehälter entleert. Bei der Regelung des Autoklaven auf die konstanten Betriebsbedingungen sowie bei der Öffnung des Behälters wird geruchsbelastete Abluft frei. Diese wird über mehrere Auslassrohre in einem Kondensator zusammengefasst und an die Umgebungsluft abgeführt. Je nach Produktionsschritt ändern sich die Abluftparameter wie Temperatur, relative Feuchte und Schadstoffzusammensetzung.

Die für die Optimierungsversuche des statischen Testsystems verwendete Abluft entweicht dem Veredelungsprozess während des erforderlichen Druckausgleichs gegen Ende des Dämpfungsprozesses. Bei diesem Vorgang wird sichergestellt, dass im Behälter immer ein konstanter Druck herrscht. Überschüssiger Druckdampf wird abgelassen und stellt aufgrund im Dampf gelöster Geruchsstoffe eine Geruchsquelle dar.

Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Analyse des Kaffeearomas. Insgesamt wurden bisher über 800 Inhaltsstoffe identifiziert (Nijssen et al., 1996), von denen jedoch nur 25 (Kaffeetränk) bzw. 28 (Kaffeepulver) Substanzen einen signifikanten Beitrag zum Gesamtaroma beitragen (Mayer et al., 2000; Czerny et al., 1999; Semmelroch und Grosch, 1996; Semmelroch et al., 1995; Blank et al., 1992). Neben verschiedenen Aldehyden, Ketonen, Phenolen, Schwefelverbindungen, Pyrazinen und Furanen wurde 2-Furfurylthiol als wichtigster Aromastoff identifiziert. Die meisten Publikationen zu Aromaveränderungen während der Kaffeeverarbeitung beschäftigen sich mit dem Röstvorgang (Yeretzian et al., 2002; Czerny und Grosch, 2000; Mayer et al., 1999), während über die bei der

Kaffeeveredelung emittierenden Aromastoffe wenig bekannt ist. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass zu den Substanzen, die zu größeren Anteilen in dieser Abluft zu finden sind, vor allem Aldehyde (u.a. 2- und 3-Methylbutanal, Hexanal) und Furane (u.a. 2-Methylfuran) gehören.

## 6.4 Versuchsanlagen

Im Rahmen dieser Arbeit sind eine Reihe von Versuchsanlagen in unterschiedlichen Maßstäben (Tab. 7) zur Behandlung von geruchsbelasteter Abluft zum Einsatz gekommen. Die Dimensionen der Anlagen reichen vom Labormaßstab bis hin zu einer Abluftbehandlungsanlage im Containermaßstab. Als Reinigungsverfahren wurden im Wesentlichen biologische Verfahren, aber auch Adsorptions- und Absorptionsverfahren verwendet.

Tab. 7: Übersicht über die verwendeten Versuchsanlagen zur Abluftbehandlung

Versuchsanlage	behandelbare Abluftmenge	Behandlungsverfahren	Reaktionsvolumen
<u>Labormaßstab</u>			
Statisches Testsystem	5-100 L	variabel	-
Dynamisches Testsystem	4 x 50-500 L/h	variabel	4 x 450 mL
<u>Technikumsmaßstab</u>			
	5 m <sup>3</sup> /h	<u>Kombination</u>	
		Biowäscher	2,5 L
		Biofilter	50 L
		Adsorption	1,3 L
<u>Containermaßstab</u>			
	1000 m <sup>3</sup> /h	<u>Kombination</u>	
		Biowäscher	2 x 0,55 m <sup>3</sup>
		Biofilter	4 x 2,2 m <sup>3</sup>

### 6.4.1 Statisches Testsystem

Bei dem Rahmen dieser Arbeit entwickelten statischen Testverfahren, wird geruchsbeladene Abluft zusammen mit einem dem Reinigungsverfahren entsprechenden Material (z.B. Biofiltermaterial, Adsorbens oder Waschflüssigkeit) in

ein geeignetes Gefäß gegeben. Der Geruchsabbau des Materials wird nach einer definierten Lagerzeit im Labor unter möglichst konstanten Bedingungen (z.B.  $T = 20\text{ °C}$ ) mittels Olfaktometrie und chemisch-analytischen Methoden bestimmt.

Für die Untersuchungen haben sich die aus der Olfaktometrie bekannten Probenahmebeutel aus Polyterephthalsäureester (Nalophan<sup>®</sup>, Kalle GmbH, Wiesbaden) bewährt (DIN EN 13725, 2003). In den beschriebenen Beutel wird eine definierte Menge des Materials, welches auf seine Abbauleistung hin untersucht werden soll, eingebaut. Nach der Befüllung wird der Beutel evakuiert. Nun kann die geruchsbeladene Probenluft in den Beutel überführt werden. Dieser Vorgang definiert den Beginn der Testphase. Nach einer definierten mehrstündigen statischen Reinigungsphase (Lagerung der Probe) wird die behandelte Probenluft zum sofortigen Abbruch der Reinigungsphase in einen neuen Beutel überführt. Die Geruchsstoffkonzentration der Probe kann nun olfaktometrisch und gasanalytisch im Labor bestimmt werden. Über einen Vergleich mit der Originalprobe und unter Berücksichtigung einer Nullprobe (Testmaterial und geruchsneutrale Reिनluft) kann die Reinigungsleistung des Testmaterials bezüglich des Geruchsabbaus der untersuchten Abluft bestimmt werden. Abb. 12 zeigt das statische Testsystem und den Vorgang des Überführens der untersuchten Luft.



Abb. 12: Statisches Testsystem (links), Überführung der behandelten Abluft in einen neuen Beutel (Abbruch der Reinigungsphase, rechts)

Die wesentlichen Randbedingungen zur Durchführung der Versuche mit dem statischen Testsystem sind das Material/Abluftverhältnis und die Lagerdauer. Um zuverlässige und reproduzierbare Daten zu erhalten, wurden diese Parameter für Biofiltermaterialien optimiert (Kap. 10.1, Kleeberg et al., 2005b).

Eine Analyse mittels Olfaktometrie und SPME-GC/MS erfolgt so schnell wie möglich, zumindest jedoch innerhalb der nächsten 8 Stunden, um sicherzustellen, dass nach der ursprünglichen Probenahme bis zur Messung der Geruchsabbauleistung nicht mehr als 12 Stunden vergangen sind. Van Harreveld (2003) hat umfangreiche Untersuchungen zur Abnahme der Geruchskonzentration in Probenahmebeuteln aus Nalophan<sup>®</sup> in Abhängigkeit von der Lagerzeit durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass in den ersten 12 Stunden keine nennenswerte Abnahme der Geruchskonzentration stattfindet. Nach 30 Stunden war jedoch eine Abnahme der Geruchskonzentration von bis zu 50% messbar. Es ist daher wichtig, die Lagerzeit beim statischen Testsystem so gering wie möglich zu halten, so dass eine ausreichende Reaktionszeit des Testmaterials mit der Abluft gewährleistet ist, jedoch noch keine Abnahme der Geruchskonzentration durch die Lagerung der Beutel erfolgt. Das Lagerungsverhalten der betrachteten Abluft kann anhand von Blindwerten, bei denen die Abluft ohne Materialzugabe gelagert wird, abgeschätzt werden.

#### 6.4.2 *Dynamisches Testsystem*

Um die Möglichkeit zu haben, mit einem einfachen Screeningverfahren auch das Verhalten der Materialien zur Geruchsreduzierung im kontinuierlichen Betrieb beurteilen zu können, wurde neben dem statischen Testsystem auch ein dynamisches Testsystem entwickelt. Bei dem dynamischen Testsystem können unterschiedliche Reinigungsverfahren für die Behandlung eines geruchsbeladenen Abluftstroms gleichzeitig getestet werden. In Anlehnung an einen späteren kontinuierlichen Betrieb werden die Reinigungssubstanzen in diesem System aktiv durchströmt.

Das dynamische Testsystem stellt eine Versuchsanlage im Labormaßstab dar (Abb. 13). Es besteht aus vier parallel geschalteten Testeinheiten. Jede der Testeinheiten

kann sowohl als Adsorptions- als auch als Absorptionskolonne betrieben werden. Die Kolonnen haben einen Innendurchmesser von 54 mm und verfügen über einen Reaktionsraum von ca. 450 mL. Der untere Teil der Kolonne dient als Pumpensumpf, über den z.B. das Wäscherwasser bei einem Betrieb der Testeinheit als Absorptionskolonne rezirkuliert werden kann. In diesem Fall wird die Waschlösung aus dem Kolonnensumpf in den Kolonnenkopf gepumpt und dort über dem Reaktionsraum versprüht. Der Reaktionsraum kann für derartige Anwendungen mit Füllkörpern zur Vergrößerung der Kontaktfläche und somit zur Verbesserung des Stoffaustausches zwischen Gas- und Flüssigphase gefüllt werden. Wird die Testeinheit als Biofilter betrieben, kann in den Kolonnensumpf Wasser zur Befeuchtung des Filtermaterials gefüllt werden.

Eine Drehschieber-Vakuumpumpe (VT 4.4, Becker, Wuppertal) saugt die zu behandelnde Abluft durch das Testsystem. Die Prozessabluft wird je nach Bedarf auf die einzelnen Testeinheiten verteilt. Durch Regulierventile kann für jede Kolonne der gewünschte Volumenstrom anhand von Schwebekörperdurchflussmessern eingestellt werden. Das Testsystem wird im Saugbetrieb gefahren, damit die zu testende Abluft vor dem Eintritt in das System nicht durch den Pumpvorgang verändert wird. Durch die Pumpe hervorgerufene Störeinflüsse könnten beispielsweise Verschmutzungen aus vorherigen Einsätzen oder Temperatureinflüsse sein.

Durch die parallele Anordnung der Testeinheiten ist es möglich, bis zu vier unterschiedliche Reinigungsverfahren bei einem speziellen Anwendungsfall unter gleichen Bedingungen zu testen und auf ihre Reinigungsleistung hin zu vergleichen. Das komplette Testsystem ist in einem Aluminiumkoffer untergebracht, was die Mobilität der Versuchsanlage gewährleistet. Ein modularer Aufbau der Testeinheiten ermöglicht die flexible Anpassung an besondere Versuchsbedingungen bzw. an spezielle Anforderungen neuartiger Reinigungskonzepte.

Die Beprobung der Anlage erfolgt am Einsatzort, und die Proben werden im Labor analysiert. Da ein kontinuierlicher Abluftstrom durch das System geleitet wird, ist eine Probenahme mit allen zu Verfügung stehenden Anreicherungsverfahren zur chemisch-physikalischen Analyse sowie für die Olfaktometrie zur Beurteilung der Reinigungsleistung der unterschiedlichen Behandlungsverfahren möglich.

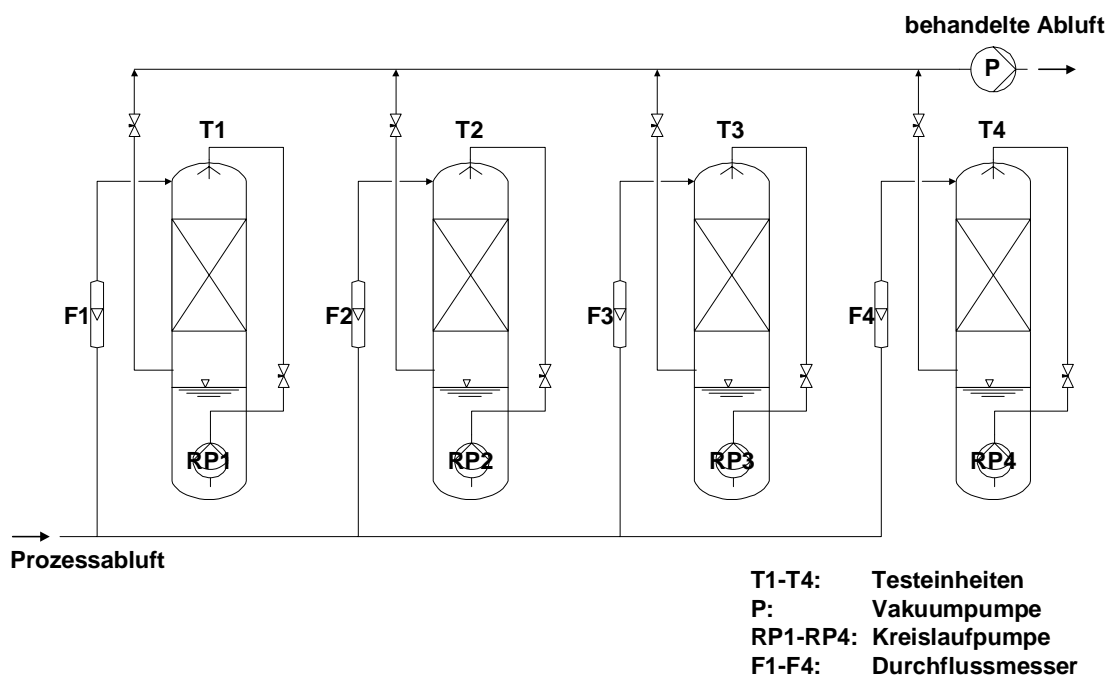
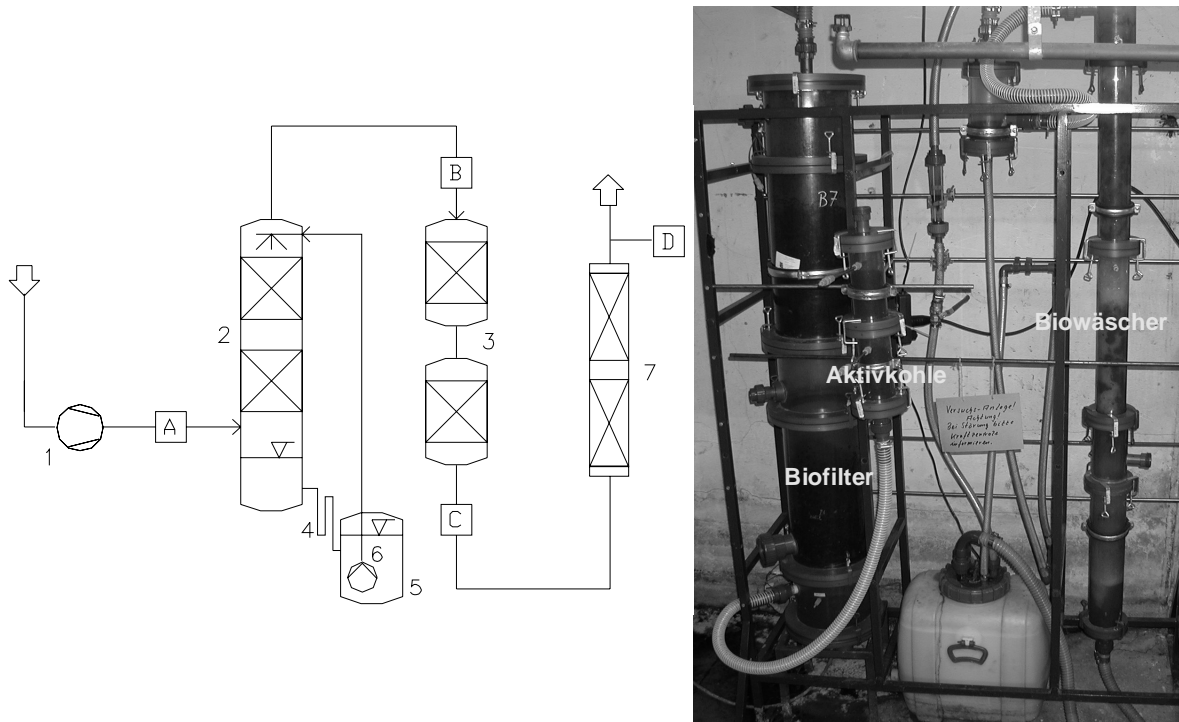


Abb. 13: Foto und Verfahrensfliessbild des dynamischen Testsystems zur vergleichenden Beurteilung unterschiedlicher Abluftbehandlungsverfahren

## 6.4.3 Versuchsanlage im Technikumsmaßstab

An der Technikumsanlage (Abb. 14) wurden unterschiedliche Abluftbehandlungsverfahren zu einem mehrstufigen System in Reihe geschaltet. Zur Reinigung von geruchsbeladener Abluft aus der Fettveredelung wurden eine Biowäscher-, Biofilter- und Adsorptionsstufe miteinander kombiniert.



- |                     |                          |                        |
|---------------------|--------------------------|------------------------|
| 1. Radialverdichter | 4. Siphon                | 7. Aktivkohlestufe     |
| 2. Biowäscher       | 5. Regenerationsbehälter | A-D. Probenahmestellen |
| 3. Biofilter        | 6. Rezirkulationspumpe   |                        |

Abb. 14: Verfahrensfliessbild und Foto der aus Biowäscher, Biofilter und Aktivkohlefilter bestehenden Versuchsanlage zur Behandlung geruchsbeladener Abluft

Ein Radialverdichter fördert die Abluft durch die Versuchsanlage. Der Biowäscher wird im Gegenstrom betrieben. Eine Umlaufpumpe fördert die Waschlösung aus einem 60 L Kunststoffkanister, der als Vorrats- und Regenerationsbehälter dient, in den Kolonnenkopf des Wäschers und verrieselt sie über den Füllkörpern (HiFlow Pallringe, 15 mm; Abb. 15). Der Wäscher besteht aus einem 2,25 m hohen, transparenten PVC Kunststoffrohr mit einem Durchmesser von 8 cm. Dieses ist mit

zwei 0,5 m hohen, ungeordneten Schüttungen (Abstand voneinander: 0,25 m) gefüllt. Der nachgeschaltete Biofilter wird im down-flow betrieben. Die 1,75 m hohe Säule aus transparentem PVC mit einem Durchmesser von 0,25 m enthält zwei übereinander angeordnete Stufen mit einem Füllvolumen von zusammen etwa 50 L. Die aus dem Biofilter austretende biologisch vorbehandelte Abluft durchströmt zwei Aktivkohleschüttungen (Füllvolumen zusammen ca. 1,3 L). Die Probenahmestellen dienen zur Charakterisierung der Rohluft (A), der Reinigungsleistung des Biowäschers (B), des Biofilters (C), sowie der Adsorptionsstufe (D).



Abb. 15: Füllkörper des Technikumsbiowäschers (HiFlow Pallringe, 15 mm)

#### 6.4.4 Versuchsanlage im Containermaßstab

Die Versuchsanlage zur biologischen Abluftbehandlung im Containermaßstab besteht ebenfalls aus einer Biowäscher/Biofilter-Kombination und ist für die Behandlung einer Abluftmenge von 1000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. Die zugehörigen Aggregate sind auf drei 20'-Container aufgeteilt. Einer der Container steht für die Biofiltereinheit zur Verfügung, der zweite für die Biowäschereinheit mit den dazugehörigen Reaktionsbehältern und dem Verdichter und der dritte als Messwarte.

Die zu behandelnde Abluft wird von einem Hochdruck-Radialventilator (HRD 60 FU, Elektror, Esslingen am Neckar) durch die im Unterdruck betriebene Versuchsanlage (Abb. 16) geleitet. Hierbei passiert sie zuerst die Biowäschereinheit und dann die Biofilter. Die Biowäscher- und Biofilteraggregate sind aufgrund der Korrosionsbeständigkeit aus Kunststoff (PEHD) gefertigt.



Abb. 16: Foto der Abluftbehandlungsanlage im halbtechnischen Maßstab (oben) mit Blick in den Biofilter- (links) und Biowäschercontainer (rechts)

Abb. 17 zeigt ein RI-Fließbild der Versuchsanlage. Probenahmestellen für Geruchsbestimmungen befanden sich vor (Q 120) und hinter den Wäschern (Q 210, Q 310) sowie hinter den Biofiltern (Q 550, Q 650, Q 750, Q 850).

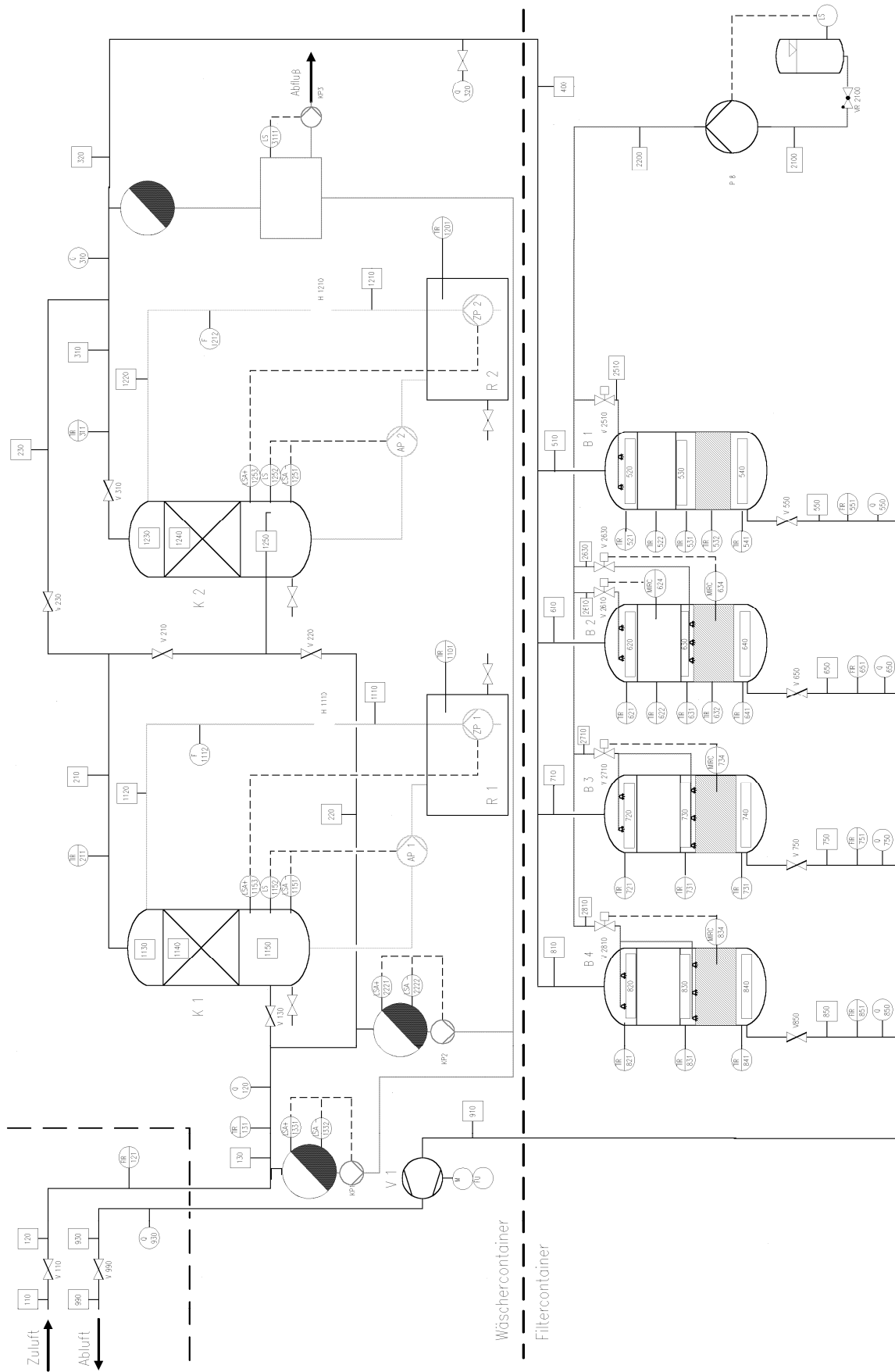
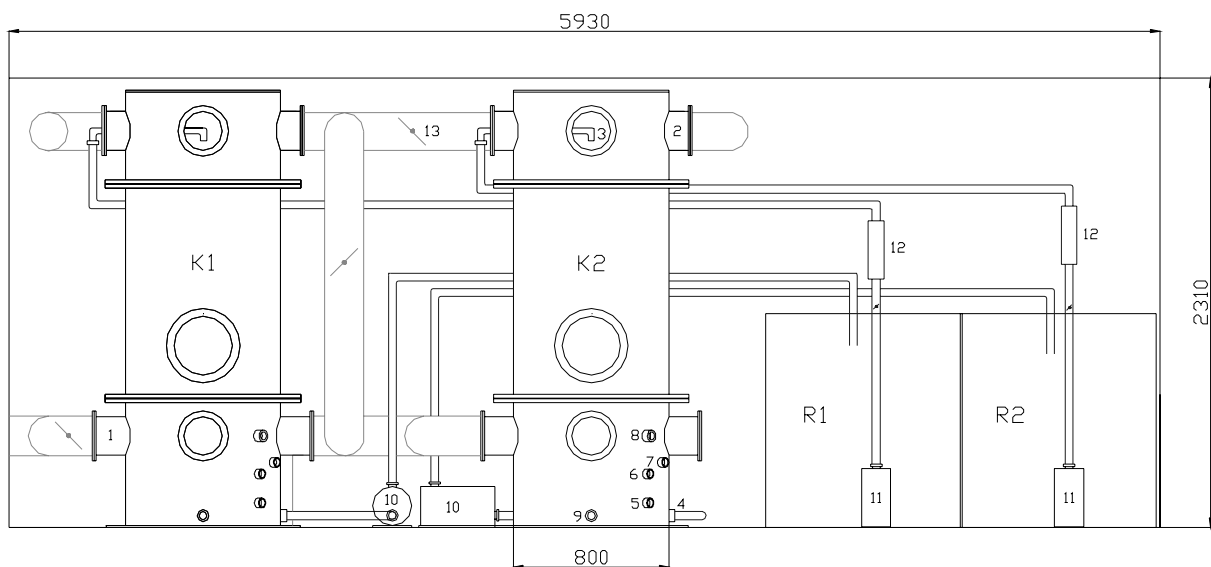


Abb. 17: RI-Fließbild der halbtechnischen Versuchsanlage zur Abflutbehandlung

**Biowäscher.** Die Biowäschereinheit (Abb. 18) besteht aus zwei baugleichen Wäschern mit einem Füllkörpervolumen von je etwa 0,55 m<sup>3</sup>. Als Füllkörper wurden NOR-PAC Hochleistungsfüllkörper (2", Polypropylen, Abb. 19) verwendet. An der Frontseite des Biowäschers sind Stutzen mit transparenten Blindflanschen angebracht, sie dienen sowohl als Sichtfenster, als auch als Eingreifluken für Wartungsarbeiten. Jeder der Wäscher wird aus einem 1 m<sup>3</sup> fassenden Regenerationstank gespeist. Das Wasser wird über der ungeordneten Füllkörperschüttung verrieselt und aus dem Wäschersumpf wieder in den Regenerationstank zurückgepumpt. Mittels Füllstandssensoren (Schwinggabelsensoren Liquiphant, Endress + Hauser, Weil am Rhein) werden die Pumpen im Wäschersumpf geregelt und stellen einen kontinuierlichen Betrieb sicher. Die zu behandelnde Abluft durchströmt die Wäscher von unten nach oben. Die beiden Biowäscher können wahlweise in Reihe, parallel oder einzeln betrieben werden.



K	Biowäscher	3	Sprühdüse	10	Entleerungspumpe Wäschersumpf
R	Regenerationsbehälter	4	Abluft Wäschersumpf	11	Zulaufpumpe Wasserkreislauf
1	Lufttrittsstutzen	5 - 7	Füllstandssensoren	12	Durchflussregler Wasserkreislauf
2	Luftaustrittsstutzen	8, 9	Anschlüsse zur Befüllung/Entleerung	13	Absperrklappe

Abb. 18: Schnitt durch den Biowäschercontainer der halbtechnischen Versuchsanlage

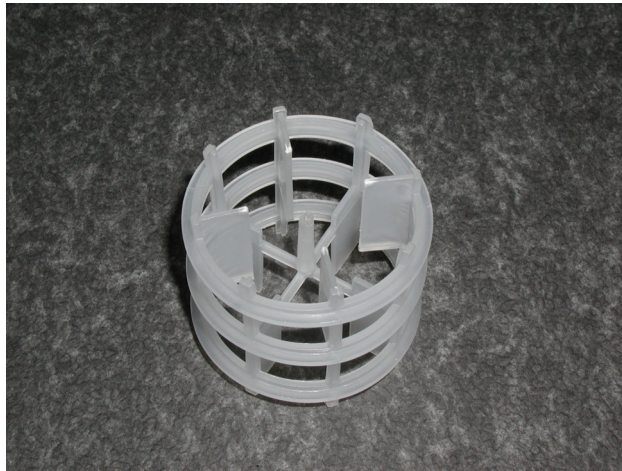


Abb. 19: NOR-PAC Hochleistungsfüllkörper (2", Polypropylen)

**Biofilter.** Der durch die Biowäscher vorgereinigte Abluftstrom kann auf maximal vier baugleiche Biofilterelemente aufgeteilt werden (Abb. 20). Jeder Biofilter enthält zwei Filterstufen, die durch einen luftdurchlässigen Boden getragen werden, welcher mit Kokosfasern abgedeckt ist. Das Nutzvolumen je Boden beträgt in etwa  $1,1 \text{ m}^3$  bei einem Filterquerschnitt von  $1,3 \times 1,3 \text{ m}$ . An der Frontseite sind in jeder Filterkammer Luken zur Befüllung und Entleerung eingebaut. Eine weitere Luke auf der Oberseite des Biofilters dient ebenfalls zur Befüllung. Je zwei Handlöcher in den Frontluken ermöglichen eine Probenahme von Filtermaterial. Am Boden der Filterelemente zusammenfließendes Sickerwasser läuft kontinuierlich in einen separaten Tank ab.

**Messwerterfassung und -verarbeitung.** An ausgewiesenen Messstellen (Abb. 17) werden on-line die Temperatur (PT 100) und der Volumenstrom (SCHMIDT<sup>®</sup> Strömungs-Sensor, SS 20.502) gemessen und aufgezeichnet. Für die Messwerterfassung und die Verarbeitung der Messsignale wird das Programm "LabView" (Version 5.1, National Instruments, Austin, Texas, USA) verwendet.

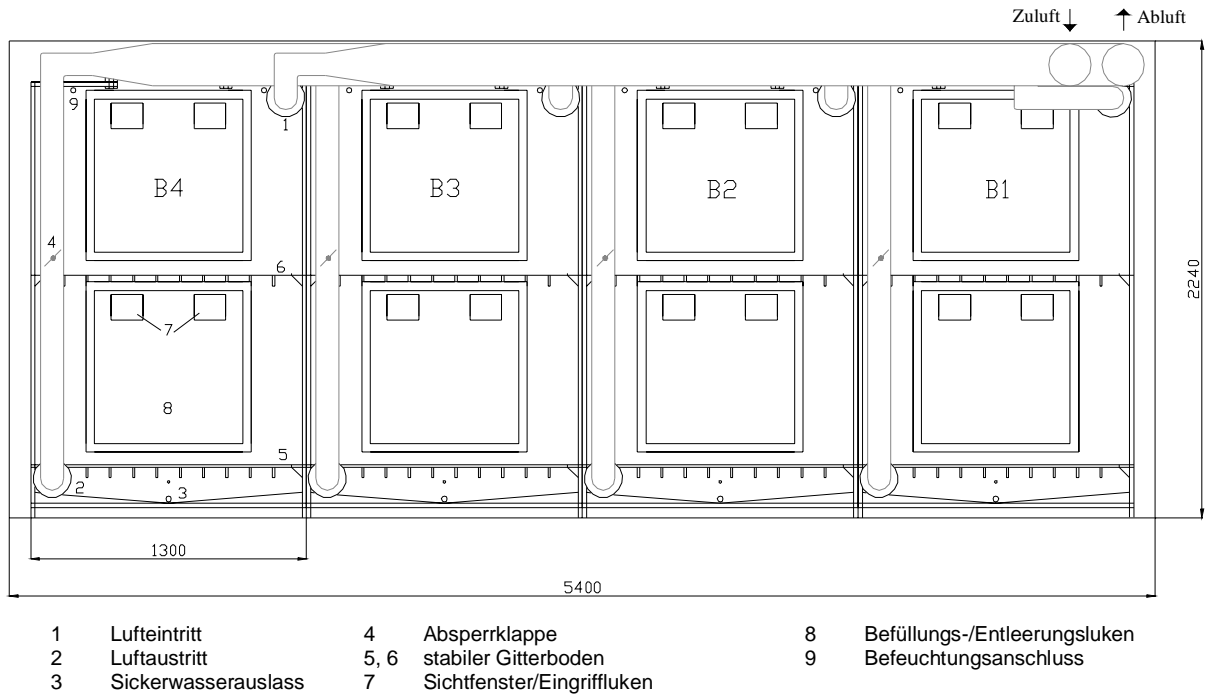


Abb. 20: Schnitt durch den Biofiltercontainer der halbtechnischen Versuchsanlage

## 6.5 Medien/Materialien zur Reinigung geruchsbeladener Abluft

### 6.5.1 Biofiltermaterialien

#### Sojakompost

Die bei Ölmühlen zur Verarbeitung angelieferten Sojabohnen beinhalten noch einen Anteil an Sojastängeln, die als Störstoffe aussortiert werden. Diese schwer verrottbaren Stängel können bei der Kompostierung von beispielsweise Schlämmen als Strukturmaterial zugegeben werden. Das nach der Rotte wieder abgeseibte (20-40 mm) und bereits vorkompostierte Material wird hier als Sojakompost bezeichnet (Abb. 21).



Wasserhaltekapazität	[% TS]	70
Porosität	[%]	76,3
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		7,01
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		7,19
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[μS/cm]	3830
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	333
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	326
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	26
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	420
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	90,9
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	199
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	71,32
TOC <sup>b</sup>	[%]	32
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	24,79

Abb. 21: Foto und charakteristische Parameter des Sojakompostes (<sup>a</sup> im Eluat, <sup>b</sup> im Feststoff, n.n.: nicht nachweisbar)

Kokosfasern/Torf-Gemisch

Das Kokosfasern/Torf-Gemisch (Abb. 22) besteht zu ca. 67% aus Kokosfasern und zu 33% aus Fasertorf. Es handelt sich um aus gebrochenen Kokosnuss-Schalen gewonnene Fasern mit sehr geringen Salzgehalten (gewaschen in Süßwasser), gemischt mit weißem Fasertorf (KOK 050, Belflor, Störk-Küfers, Emmingen-Liptingen).



Wasserhaltekapazität	[% TS]	81
Porosität	[%]	93
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		6,44
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		6,40
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[ $\mu$ S/cm]	227
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	39
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	< 10
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	< 5
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	281
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	965
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	96,99
TOC <sup>b</sup>	[%]	42,3
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	3,15

Abb. 22: Foto und charakteristische Parameter des Kokosmixes (<sup>a</sup> im Eluat, <sup>b</sup> im Feststoff, n.n.: nicht nachweisbar)

## Rindenmulch

Bei Rindenmulch (Abb. 23) handelt es sich um leicht ankompostierte Kiefernrinde mit Holzanteil (ca. 62/38%), welche mittels zweier Sieblinien (Aussiebung des Überkorns und des Feinanteils) klassiert wird (20-50 mm). Als Rohmaterial wird frische, unbehandelte Rinde aus Sägereien verwendet (RIM 240, Belflor, Störk-Küfers, Emmingen-Liptingen).



Wasserhaltekapazität	[% TS]	62,4
Porosität	[%]	76
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		5,52
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		5,70
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[μS/cm]	73,4
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	37
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	< 10
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	< 5
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	933
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	1368
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	94,48
TOC <sup>b</sup>	[%]	45,7
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	4,07

Abb. 23: Foto und charakteristische Parameter des Rindenmulches (<sup>a</sup> im Eluat, <sup>b</sup> im Feststoff, n.n.: nicht nachweisbar)

## Wurzelholz

Das Wurzelholz (Abb. 24) ist doppelt gerissen und aufgefasert. Es stammt hauptsächlich aus vorgereinigten Wurzelstöcken und wird mittels zweier Sieblinien (Aushebung des Überkorns und des Feinanteils) dimensioniert (20-40 mm). Um die Oberfläche des Materials und somit auch den Lebensraum für die Mikroorganismen zu vergrößern, wird es durch zweifache Zerkleinerung aufgefasert (WHF - 20-40, Belflor, Störk-Küfers, Emmingen-Liptingen).



Wasserhaltekapazität	[% TS]	54,1
Porosität	[%]	80,6
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		5,34
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		5,44
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[ $\mu$ S/cm]	146,6
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	111
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	<10
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	<5
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	n.n.
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	2,06
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	6,28
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	72,18
TOC <sup>b</sup>	[%]	34
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	4,86

Abb. 24: Foto und charakteristische Parameter des gerissenen Wurzelholzes (<sup>a</sup> im Eluat, <sup>b</sup> im Feststoff, n.n.: nicht nachweisbar)

### Grünschnittkompost

Als Grünschnittkompost (Abb. 25) wird hier der Siebüberlauf >20 mm von kompostiertem Bioabfall bezeichnet, der vorwiegend aus Grünabfällen besteht. Die Rottephase betrug 10 Wochen.



Wasserhaltekapazität	[% TS]	58,7
Porosität	[%]	-
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		8,02
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		-
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[ $\mu$ S/cm]	-
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	-
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	-
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	-
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	-
TOC <sup>b</sup>	[%]	-
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	-

Abb. 25: Foto und charakteristische Parameter des Grünschnittkompostes (<sup>a</sup> im Eluat, <sup>b</sup> im Feststoff)

Kakao/Kompost-Gemisch

Als Kakao/Kompost-Gemisch Abb. 26 wird hier ein Gemisch aus Kakaoschalen und feinem reifen Kompost im Mischungsverhältnis 1:1 bezeichnet.



Wasserhaltekapazität	[% TS]	-
Porosität	[%]	-
pH (o.Filtr.) <sup>a</sup>		-
pH (m.Filtr.) <sup>a</sup>		-
Leitfähigkeit <sup>a</sup>	[ $\mu$ S/cm]	-
TOC <sup>a</sup>	[mg/l]	-
TN <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NH <sub>4</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NO <sub>3</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
NO <sub>2</sub> -N <sup>a</sup>	[mg/l]	-
PO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	-
SO <sub>4</sub> <sup>a</sup>	[mg/l]	-
Glühverlust <sup>b</sup>	[%]	-
TOC <sup>b</sup>	[%]	-
TKN <sup>b</sup>	[mg/g]	-

Abb. 26: Foto des Kakao/Kompost-Gemisches (Analyseergebnisse liegen nicht vor)

### 6.5.2 Adsorbentien

#### Aktivkohle

Für die Adsorptionsversuche wurde die Aktivkohle Chemviron KI 3-P kaliumjodiert (Noske Kaeser, Hamburg) verwendet (Abb. 27).

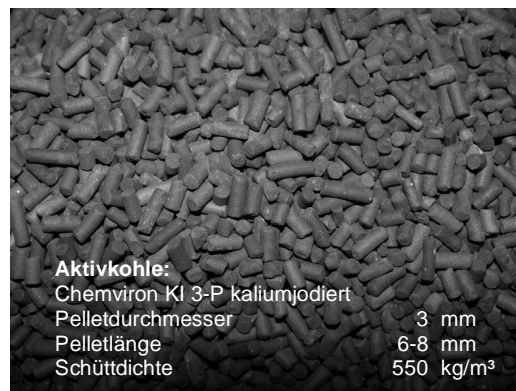


Abb. 27: Aktivkohlepellets zur adsorptiven Reinigung von Geruchsemissionen (Noske Kaeser, Hamburg)

### 6.5.3 Absorbentien

#### Wasser

Für die reinen Absorptionsversuche im Testsystem wurde entionisiertes Wasser verwendet. In den Versuchsanlagen im halbtechnischen und im Technikumsmaßstab wurden die Biowäscher in der Regel mit Abwasser aus der örtlichen Klärstufe angeimpft und mit Leitungswasser aufgefüllt.



---

## 7 ENTWICKLUNG EINES GERUCHSMANAGEMENTKONZEPTES

Geruchsemissionen können durch eine Vielzahl unterschiedlicher Arten von Emissionsquellen hervorgerufen sowie durch Umwelteinflüsse, insbesondere örtliche Wetterlagen, in ihren Ausbreitungen und entsprechend ihren Auswirkungen beeinflusst werden. Da Gerüche oftmals in sehr geringen Konzentrationen von der menschlichen Nase noch wahrnehmbar sind und störend wirken können, sind hohe Wirkungsgrade für die möglichen Minderungsmaßnahmen gefordert. Aufgrund der speziellen Anforderungen muss entsprechend gezielt aus den zur Verfügung stehenden Maßnahmen zur Verminderung von Geruchsemissionen das am besten geeignete Verfahren ausgewählt werden. Die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Verfahren sind entscheidend von den örtlichen Gegebenheiten wie beispielsweise der Abluftzusammensetzung, dem Konzentrationsniveau, der Abluftmenge, sowie weiterer Zustandsgrößen abhängig. Obwohl es sich bei Geruchsemissionen unterschiedlicher Industrien um sehr spezifische Problematiken handelt, ist doch eine allgemeingültige Vorgehensweise bei Abluftproblemen möglich und auch sinnvoll. Um ein industrielles Geruchsproblem erfolgreich beheben zu können, ist vorerst die detaillierte Erfassung der Emissionssituation erforderlich. Die systematische Aufnahme relevanter Daten und Informationen sind Teil des Geruchsmanagements, welches die gesamten Themenbereiche von der Erfassung der Emissionssituation bis hin zur apparativen Geruchsbeseitigung umfasst.

Abb. 28 zeigt ein Konzept für die Herangehensweise an ein Geruchsemissionsproblem mit dem Ziel, eine effektive, zuverlässige Lösung mit möglichst geringem finanziellen Aufwand zu finden. Das Geruchsmanagement lässt sich in zwei Phasen unterteilen. In der Evaluationsphase wird durch eine Charakterisierung und Bewertung der Emissionsquellen die Situation beim Emittenten genau beschrieben. In der zweiten Phase wird nach Möglichkeiten für die Lösung des Emissionsproblems gesucht. Hierfür können die umfangreichen geruchsspezifischen Informationen aus der im Rahmen dieser Arbeit erstellten geruchsspezifischen Datenbank (Kap. 8) genutzt und/oder ergänzende Untersuchungen mit Versuchsanlagen unterschiedlicher Dimensionen zur Überprüfung der Eignung ausgewählter Behandlungsverfahren durchgeführt werden. Die Pfeile beschreiben mögliche Entscheidungswege von einem Geruchsproblem bis hin zu einer nachhaltigen

Lösung. Als Teil des Gesamtkonzeptes sollen sukzessive neue Erkenntnisse, die bei der Erforschung möglicher Lösungsansätze für bisher unbekannte Emissionsquellen gewonnen werden, in den Informationspool der Datenbank einfließen, um eine ständig anwachsende Wissensquelle zu schaffen. Diese Informationsverarbeitungen sind in der Abb. 28 als gestrichelte Linien dargestellt. Das Gesamtkonzept wird im Folgenden näher erläutert.

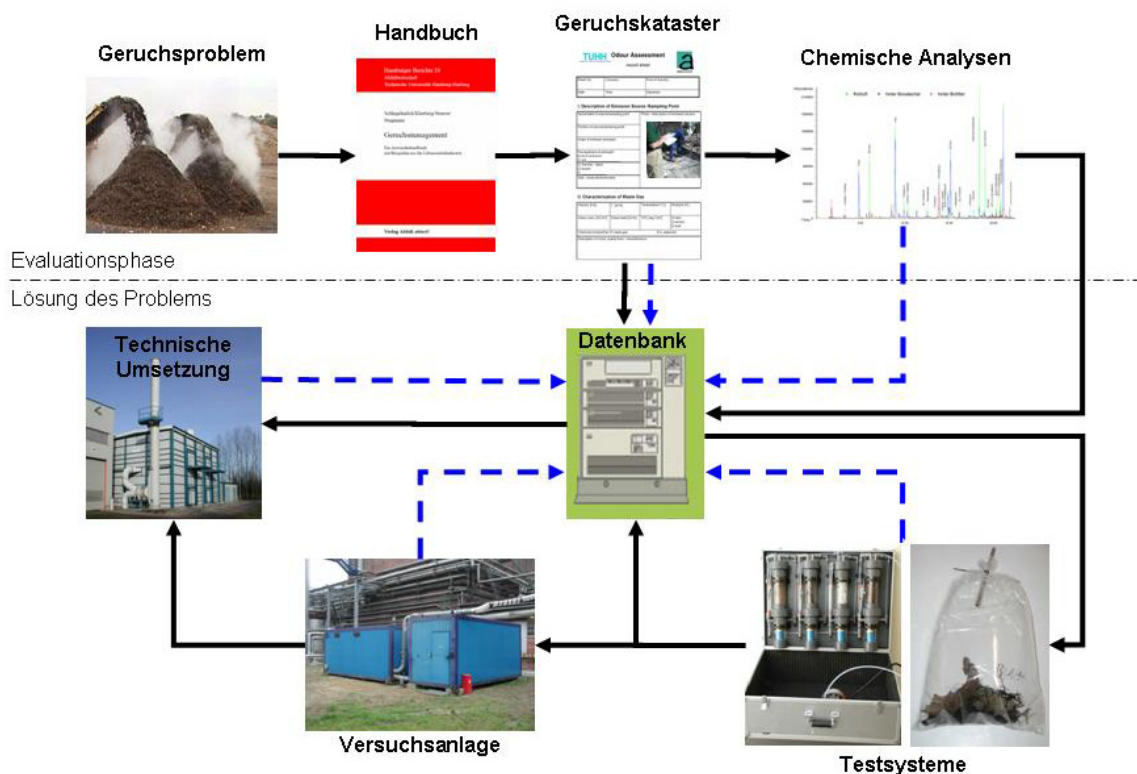


Abb. 28: Geruchsmanagementkonzept zur nachhaltigen Verminderung von Geruchsemissionen

## 7.1 Erfassung grundlegender Informationen

Bei der Betrachtung eines bestimmten Geruchsproblems empfiehlt es sich, als ersten Schritt grundlegende Informationen über zur Verfügung stehende Abluftbehandlungsverfahren zu sammeln, sowie sich im Hinblick auf den speziellen

Anwendungsfall über bereits vorhandene Erfahrungen und Untersuchungen aus der Literatur zu informieren. Diese Recherche kann Aufschluss über typische Emissionsquellen und verfügbare Behandlungsmöglichkeiten geben. Teilweise gibt es für die Behandlung von Geruchsemissionen unterschiedlicher Verursacher auch Verfahren nach dem Stand der Technik, auf die zurückgegriffen werden kann. So hat sich beispielsweise der Biofilter für die Behandlung von Kompostabluft bewährt (Schlegelmilch et al., 2005; VDI 3477, 2004; Heining, 1998). Entsprechend kann auf einen umfangreichen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden, der auch Dimensionierungsangaben beinhaltet. Als besonders praktikables Instrument zu Vermittlung derartiger Informationen soll die entwickelte geruchsspezifische **Datenbank** dienen, in der Wissen rund um die Problematik der Geruchsemissionen verarbeitet und in einer anwenderfreundlichen Form dargestellt werden. Weitere hilfreiche Informationen stellen themenbezogene Handbücher dar (z.B. Schlegelmilch et al., 2004).

## 7.2 Erstellung eines Geruchskatasters

Oftmals sind die Emissionssituationen beim Verursacher sehr individuell und Geruchsminderungskonzepte liegen noch nicht vor. Für diesen Fall gilt es, sich ein möglichst vollständiges Bild der lokalen Gegebenheiten zu machen.

Für die Erstellung eines Geruchskatasters ist die vollständige Erfassung aller möglichen Emissionsquellen erforderlich. Hierbei sind nicht nur offensichtliche Quellen, wie beispielsweise offene Abluftstutzen, -schächte oder Schornsteine zu berücksichtigen, sondern insbesondere auch diffuse Quellen. Gerade jene Quellen scheinen oftmals klein und unbedeutend, können aber einen wesentlichen Teil der örtlichen Geruchsemissionen ausmachen. Zu diffusen Quellen zählen beispielsweise offene Anlieferungs- und Lagerungsbereiche, offene Tore und Fenster, Leckagen in Abluftkanälen, sowie offene Klärbecken und Abwasserkanäle.

Das Geruchskataster beinhaltet eine möglichst genaue Beschreibung der einzelnen Geruchsquellen und ihres jeweiligen Beitrages zur Gesamtemissionssituation. Es umfasst die Ermittlung der Quellen und ihre Aufteilung nach Geruchskonzentration,

Geruchsart und Volumenstrom. Anhand dieser Beurteilung sollen für den speziellen Anwendungsfall entsprechend den örtlichen Bedingungen optimierte Maßnahmen zur Reduzierung des Geruchsproblems getroffen werden. Das Geruchskataster stellt demnach ein Instrument zur Bewertung eines speziellen Geruchsproblems dar.

### *7.2.1 Erfassung von Emissionsquellen*

Bei der Ermittlung der Geruchsquellen sollte unbedingt auf eine vollständige und systematische Erfassung geachtet werden. Hierfür kann ein detaillierter Gebäude- und Lageplan des zu untersuchenden Geländes bzw. Betriebes von Nutzen sein, auf dem die jeweiligen Quellen registriert werden können.

Bei Emissionsquellen kann es sich grundsätzlich um definierte oder diffuse Quellen handeln. Bei definierten Quellen wird die Abluft zwangsgeführt in die Atmosphäre abgegeben, während diffuse Quellen meist unkontrolliert durch Umgebungsbedingungen beeinflusst emittieren (VDI 3790 Blatt 1, 2003). Definierte Quellen sind in der Regel relativ einfach aufzuspüren, diffuse Quellen sind oftmals weniger offensichtlich.

Entsprechend der Richtlinie VDI 3790 Blatt 2 (2000) unterscheidet man zwischen:

- Punktquellen
- Linienquellen
- Flächenquellen
- Mobilen Quellen.

Punktquellen sind in der Regel Schornsteine, Abluftstutzen und -schächte. Sie zeichnen sich durch einen recht geringen Austrittsquerschnitt aus, wodurch der austretende Abluftvolumenstrom relativ einfach zu bestimmen ist. Bei Punktquellen handelt es sich vorwiegend um aktive, also definierte Quellen. Passive Punktquellen sind bei der Erfassung eines Geruchsproblems weniger von Bedeutung (Frechen, 2004).

Linienquellen sind in der Praxis recht selten und zählen nahezu ausschließlich zu den diffusen Quellen. Linienquellen können beispielsweise Risse in der Abdeckschicht einer Deponie oder offene Fließrinnen und Förderbänder sein.

Auch bei Flächenquellen handelt es sich in den meisten Fällen um diffuse, passive Quellen. Hierzu zählen unter anderem offene Lagerbereiche und nicht belüftete Klärbecken. Beispiele für definierte Flächenquellen sind offene Flächenbiofilter und offene, belüftete Kompostmieten.

Mobile Emissionsquellen sind beispielsweise anliefernde LKWs. Diese stellen ein nicht zu vernachlässigendes Beschwerdepotenzial dar, sofern sie auf ihrer Route durch anliegende Wohnsiedlungen fahren. Diese Möglichkeit der Emission sollte bei der Bewertung der Geruchssituation unbedingt mit diskutiert werden.

Für die Aufnahme der Geruchsquellen sollte das Gelände systematisch abgegangen werden. Hierfür ist betriebskundiges Personal (z.B. Umweltbeauftragter) erforderlich, das über Detailwissen über die Produktionsprozesse und die örtlichen Gegebenheiten verfügt. Weiterhin anwesend sein sollte eine Fachkraft mit Erfahrungen im Bereich der Bewertung und Erfassung von Geruchsquellen. Zusammen werden nun akute und potenzielle Geruchsquellen registriert. Es sollte darauf geachtet werden, dass wirklich alle Emissionsquellen bei dem Erfassungskonzept berücksichtigt werden. Rauchttests stellen eine Möglichkeit dar, besonders auch diffuse Quellen sichtbar zu machen (Wolsteinholme, 1998). Darüber hinaus können auch nicht optimal funktionierende Abluftbehandlungsanlagen eine Emissionsquelle darstellen.

In einem zweiten Schritt sollte der Ursprung der erfassten Geruchsquellen festgestellt werden. Hierfür ist in der Regel im Hinblick auf eine spätere Minimierung des Geruchsproblems die Begutachtung der verursachenden verfahrenstechnischen Produktionsprozesse innerhalb der Gebäude erforderlich. Eine wesentliche Geruchsquelle in industriellen Betrieben sind die Produktionshallen, in denen bei Verarbeitungsprozessen geruchsbelastete, gasförmige Emissionen entstehen können.

### 7.2.2 Charakterisierung und Bewertung der Geruchsquellen

Für die Beschreibung der unterschiedlichen Geruchsquellen sollte eine möglichst einheitliche Systematik angewendet werden, damit die Emissionsquellen untereinander vergleichbar sind und der jeweilige Beitrag zur Gesamtgeruchsemission abgeschätzt werden kann. Es empfiehlt sich, einen Erfassungsbogen zu erstellen, auf dem jede Quelle beschrieben und jeweils systematisch charakteristische Parameter der Abluft notiert werden. Ein Beispiel für einen derartigen Erfassungsbogen ist in Abb. 29 dargestellt.

Im Folgenden sollen einige der relevanten Angaben zur Charakterisierung von Geruchsquellen näher erläutert werden.

Ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung einer Emissionsquelle im Hinblick auf ihren Beitrag zum Geruchsproblem ist offensichtlich die Geruchsstärke bzw. **Geruchsstoffkonzentration** und die sich daraus bei Kenntnis des emittierenden Volumenstroms ergebende **Geruchsfracht**. Je höher die Geruchsfracht ist, desto größer ist auch der Einfluss der Geruchsemissionen auf die Umgebung und desto weitreichender sind deren Auswirkungen. Weiterhin kann die Beschreibung des **Geruchseindrucks** entscheidende Hinweise für eine richtige Bewertung hinsichtlich der Hauptgeruchsquellen geben. Oftmals kann anhand dieser Angaben schon bestimmt werden, welche Emissionsquelle die wesentliche Ursache für ein bestehendes Geruchsproblem darstellt.

Der Anteil an **organischem Kohlenstoff (TOC)** in der Abluft ist ein wichtiger Parameter bei der Auswahl eines geeigneten Behandlungsverfahrens. Während bei hohen TOC-Gehalten ab  $2 \text{ g/m}^3$  unter Umständen eine autotherme Abluftverbrennung in katalytischen Verfahren zur Geruchsreduzierung eingesetzt werden könnte (Fischer, 2001), wird bei geringeren Konzentrationen eher auf biologische oder thermisch-katalytische Verfahren zurückgegriffen. Zwar ist der TOC-Wert ein Parameter für den Grad der organischen Belastung des Emissionsstromes, jedoch kann vom TOC-Gehalt nicht direkt auf die Geruchsbelastung geschlossen werden. Zahlreiche Autoren haben festgestellt, dass der TOC nicht mit der Geruchsstärke korreliert (Heining et al., 1997a; Dammann et al., 1996; Bidlingmaier und Müskens, 1993; Mayer, 1990). Als Gründe sind hier unter anderen die Detektierung des nicht

riechenden Methans bzw. die nur teilweise Erfassung der stark riechenden Schwefel- oder Stickstoffverbindungen sowie die Nichterfassung von Ammoniak genannt.

 <b>Geruchskataster</b> <small>Technische Universität Hamburg-Harburg</small>			
<b>Erfassungsbogen</b>			
Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes	
Datum:	Uhrzeit:	Durchführung:	

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**

Bezeichnung der Messstelle	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle	
Herkunft der Abluft (Prozess)	
Vorbehandlung der Abluft? <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja, _____	
<input type="checkbox"/> Kamin / Schornstein <input type="checkbox"/> Stutzen <input type="checkbox"/> _____	
Maße / Querschnittsfläche	

**II. Charakterisierung der Abluft**

$v$ [m/s]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /h]	$\vartheta$ [°C]	rF [%]
Geruch [GE/m <sup>3</sup> ]	Geruchsfracht [GE/h]	TOC [mg C/m <sup>3</sup> ]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
Chemische Zusammensetzung der Abluft			<input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

Abb. 29: Beispiel eines Erfassungsbogens zur Charakterisierung von Geruchsquellen

Die **Temperatur** kann einen Einfluss auf die Auswahl des geeigneten Behandlungsverfahrens haben. Für herkömmliche Biofilter beispielsweise sollte die Abgastemperatur 40 °C nicht wesentlich überschreiten. Bei Ablufttemperaturen oberhalb von 50 °C hingegen ist theoretisch auch der Einsatz von thermophilen Biofiltern denkbar (Van Liere und van Groenestijn, 2003). Während für den Betrieb von Biofilteranlagen ein mit Wasser gesättigter Luftstrom unbedingt erforderlich ist, kann sich ein hoher **Wassergehalt** beispielsweise auf Adsorptionsverfahren negativ auswirken. Auch muss bei der Auslegung von Anlagen berücksichtigt werden, dass bei feuchten Abluftströmen nicht unerhebliche Mengen an Kondensat anfallen können.

Anhand der **chemischen Zusammensetzung** der Abluftprobe können für den Geruch verantwortliche Geruchsstoffe identifiziert werden. Hat man den oder die Hauptgeruchsstoff(e) analysiert, kann man gezielt nach geeigneten Verfahren suchen, mit denen eine Reduzierung dieser Substanzen in der Abluft möglich ist. Wichtige Hinweise auf die Zusammensetzung können bereits aus der Kenntnis über den die Emissionen verursachenden Produktionsprozess gewonnen werden. Da besonders in der Lebensmittelindustrie die produzierten Produkte strengen Qualitätskontrollen unterliegen, sind in der Regel deren Inhaltsstoffe bekannt, was bereits wichtige Anhaltspunkte für die Zusammensetzung der Gasphase liefern kann.

### 7.3 Vermeidung und Erfassung von Geruchsemissionen

Im Anschluss an die systematische Aufnahme aller Emissionsquellen, sollte vorrangig geprüft werden, ob ein Teil der Emissionen vermieden werden kann. Dies könnte der Fall sein, wenn Gerüche beispielsweise nur während ungünstiger Betriebsbedingungen auftreten, die es dann zu vermeiden gilt. Als Beispiel sei hier die Kompostierung genannt, bei der unter optimalen Betriebsbedingungen (ausreichende Belüftung, nicht zu hohe Materialfeuchte) deutlich weniger Geruchsemissionen auftreten (Boisch, 2001). Unter Umständen können auch übel riechende Substrate oder Reinigungsreagenzien durch weniger geruchsintensive Stoffe ersetzt werden. Weiterhin sind in industriellen Betrieben Änderungen bei den Produktionsprozessen denkbar, welche jedoch in der Praxis bei hinsichtlich Ertrag

und Qualität optimierten Verfahren nur selten umgesetzt werden können. Einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung von Geruchsemissionen leistet in jedem Fall eine optimale Sauberkeit des Betriebes besonders der Außenbereiche. Die Lagerung stinkender Produktionsreste oder Ähnlichem auf dem offenen Gelände sollte dringend vermieden werden, da diese Quellen diffuse Emissionen darstellen.

Sind alle möglichen Vermeidungsmaßnahmen geprüft, wird nach einem technischen Behandlungsverfahren für die verbleibenden Geruchsemissionen gesucht werden. Bevor jedoch die Emissionen in einer Abluftreinigungsanlage behandelt werden können, müssen sie kontrolliert zugeführt werden. Eine ablufttechnische Erfassung über Rohrleitungen wird bei definierten Quellen in der Regel kein Problem darstellen, da es sich vorwiegend um Abluftschächte und Abluftstutzen handelt. In diesem Fall sind sie bereits in Abluftsystemen kanalisiert und können direkt einer Behandlungsanlage zugeführt werden.

Probleme stellen hingegen die diffusen Emissionsquellen dar. Es kann einen erheblichen Aufwand bedeuten, all diese Emissionen kontrolliert zu erfassen. Besonders bei alten Industrieanlagen, die über viele Jahre gewachsen sind, kann die Eindämmung diffuser Emissionen eine echte Herausforderung bedeuten. Oftmals müssen zerbrochene Fenster ersetzt, Emissionsquellen abgedeckt und abgesaugt werden. Zu diesem Zweck ist in den meisten Fällen die Installation von Lüftungssystemen erforderlich.

Schon bei der Planung von ablufttechnischen Erfassungssystemen sollte berücksichtigt werden, dass Abluftbehandlungsanlagen in der Regel effektiver und wirtschaftlicher betrieben werden können, wenn ihnen konzentrierte Abluftströme zugeführt werden. Weiterhin wächst die Größe der geplanten Anlage mit zunehmendem Volumenstrom der Abluft, womit auch die Investitionskosten ansteigen. Folglich ist es in den meisten Fällen vorteilhaft, die Abluft direkt an Quellen erhöhter Emissionen, also am Ort ihres Entstehens, zu erfassen und abzuleiten oder diese Bereiche zumindest räumlich von beispielsweise großen Produktionshallen zu trennen. Auf diese Weise werden die zu behandelnden Luftmengen minimiert, da eine Mischung und Verdünnung mit nicht oder nur schwach belasteter Luft vermieden wird.

Bei der Verwendung von Abzugshauben ist darauf zu achten, dass diese möglichst dicht an der Emissionsquelle installiert sind. Im Idealfall sind sie direkt mit dem Bauteil verbunden und saugen die entstehende Abluft direkt ohne Fremdluffterfassung ab. Für eine effektive Ablufferfassung sollte die Absauggeschwindigkeit am Ort des Auftretens zwischen 0,25 und 0,5 m/s betragen (Wolsteinholme, 1998). Entsprechend muss bei zunehmendem Abstand der Haube zur Quelle der Luftdurchsatz erhöht werden.

Generell sollten die Ablufferfassungsanlagen so ausgelegt werden, dass sich der betrachtete Raum immer im leichten Unterdruck befindet, um so diffuse Geruchsemissionen zu vermeiden. Auf diese Weise entsteht an kritischen Stellen wie beispielsweise offenen Fenstern und Türen eine Luftströmung in den Raum hinein und austretende Strömungen werden verhindert. Als grober Richtwert sollte die abgesaugte Luftmenge etwa 10% über der dem Raum zugeführten Luftmenge liegen (Wolsteinholme, 1998).

Bei großen Öffnungen in Gebäuden, z.B. Zufahrtstoren, ist es oftmals nicht praktikabel den erforderlichen Unterdruck einzustellen. So müssen bei einem ca. 3 x 3 m großen Durchbruch Flussraten von etwa 136.000 m<sup>3</sup>/h aufgebracht werden, um eine messbare Druckdifferenz zu erreichen (Wolsteinholme, 1998). Besonders einfallende Winde machen die Einhaltung vorgegebener Druckverhältnisse nahezu unmöglich. Bei hoch frequentierten Durchfahrten können beispielsweise Kunststoffvorhänge oder Luftschleier eine tolerierbare Lösung darstellen.

Die erfassten Abluftströme sollten entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrer physikalischen Eigenschaften, ihres organischen Anteils und ihres Volumenstromes gezielt mit geeigneten Verfahren gereinigt werden. Es kann unter Umständen vorteilhaft sein, mehrere kleinere, speziell für spezifische Teilströme ausgelegte Anlagen zur Behandlung der geruchsbeladenen Abluft zu installieren, anstatt die gesammelte Abluft zentral einem Behandlungssystem zuzuführen. Für eine geeignete Auswahl sind Kenntnisse über Vorteile und Grenzen unterschiedlicher Abluftbehandlungsverfahren sowie die Informationen über die einzelnen Abluftströme aus dem Geruchskataster erforderlich.

#### **7.4 Untersuchungen mit Testsystemen**

Da nicht für jede spezielle Emissionssituation bereits Informationen vorliegen und auch die entwickelte Datenbank keinen Anspruch auf Vollständigkeit bieten kann, müssen unter Umständen auf der Suche nach dem geeigneten Abluftbehandlungsverfahren zusätzliche eigene Untersuchungen an den Geruchsemissionen durchgeführt werden. Für eine erste Einschätzung der möglichen Behandlungsverfahren bietet sich die Verwendung von einfachen Labortestsystemen an. Zu diesem Zweck wurden ein statisches und ein dynamisches Testsystem entwickelt und optimiert (Kap. 10). Sie ermöglichen eine vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Verfahren unter standardisierten Bedingungen und erlauben so eine Vorabauswahl aussichtsreicher Möglichkeiten zur Abluftbehandlung.

#### **7.5 Erhebung von Auslegungsdaten und technische Umsetzung**

In weiteren Untersuchungen, in denen Versuchsanlagen im Technikums- und Pilotmaßstab eingesetzt werden, gilt es die Ergebnisse aus den Testsystemen zu verifizieren, bis schließlich belastbare Daten für die Dimensionierung einer großtechnischen Abluftbehandlungsanlage mit geeignetem Reinigungsverfahren zur Verfügung stehen.

Die Erkenntnisse aus allen Untersuchungen sollen im Idealfall wieder der Datenbank zugeführt werden. Auf diese Weise wächst die verwaltete Datenmenge sukzessive an, und die Datenbank wird so mehr und mehr zu einem wertvollen Instrument bei der Behandlung von Geruchsproblemen, so dass in zunehmendem Maße auf eigene Vorversuche bei der Suche nach geeigneten Abluftbehandlungsverfahren verzichtet werden kann.



---

## 8 GERUCHSSPEZIFISCHE DATENBANK

Das Ziel bei der Entwicklung dieser geruchsspezifischen Datenbank war es, eine Plattform für eine problem- und lösungsorientierte Verarbeitung von Informationen bezüglich der Vermeidung und Identifizierung von Geruchsemissionen zur Verfügung zu stellen. Entsprechend sind in der Datenbank Geruchsstoffe mit geruchsspezifischen Informationen zu diesen Stoffen verknüpft. Die verwalteten Informationen beinhalten beispielsweise die stoffliche Zusammensetzung der Emissionen bestimmter Industrien, sowie die für den Geruch im Wesentlichen verantwortlichen Hauptgeruchsstoffe. Weiterhin sind stoffspezifische Parameter wie die Geruchsschwellen und Geruchseindrücke, aber auch viel versprechende Abluftbehandlungsverfahren für die entsprechenden Verbindungen aufgeführt. Da die einzelnen geruchsaktiven Substanzen den zentralen Datensatz der Datenbank bilden, können auch die an spezifischen Anlagen gewonnenen Erkenntnisse zum größten Teil auf andere Industriebereiche übertragen werden. Dies stellt eine optimale Informationsverarbeitung der Erfahrungen aus dem gesamten Bereich der Geruchsforschung sicher. Durch die Erweiterung der Datensätze mit neuen Erkenntnissen aus eigenen Untersuchungen oder aus einschlägigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen wird dieser Wissenspool stetig wachsen.

Zwecks einer besseren internationalen Verbreitungsmöglichkeit sind die Datensätze sowie die Datenbank selber in englischer Sprache erstellt worden. Die Entwicklung der Datenbank erfolgte als Webanwendung basierend auf dem Framework „Ruby on Rails“, einem Tool zur Entwicklung datenbankbasierender Software unter der Verwendung der Programmiersprache „Ruby“.

In dem folgenden Kapitel ist sowohl die Struktur der Datenbank als auch der Umfang der in ihr verwalteten Informationen beschrieben.

## 8.1 Struktur der Datenbank

Abb. 30 zeigt die grundlegende, innere Struktur der Datenbank. Die einzelnen Blöcke stellen die unterschiedlichen Datenkategorien dar, unter welchen jeweils die gelisteten Informationen abgelegt sind. Neben den fachlichen Informationen enthalten diese Datenblöcke auch für die datenbankinterne Datenverwaltung erforderliche Identifikationsnummern (id). Die Verknüpfung der unterschiedlichen Datensätze untereinander wird durch die Linien dargestellt, die die einzelnen Informationsblöcke miteinander verbinden. Die Bezeichnung "0..\*" am Ende oder Anfang einer Verbindungslinie besagt, dass eine beliebige Anzahl des entsprechenden Datensatzes mit entweder genau einem ("1") Datensatz oder einer unbestimmten Anzahl ("0..\*") von Datensätzen verknüpft sein kann. Eine Substanz (*substances*) kann beispielsweise zahlreiche ("0..\*") Namen und Synonyme (*names*) besitzen, wobei jedoch jeder Name nur genau einer ("1") Substanz zugeordnet werden kann. Andererseits kann eine Substanz durch mehr als nur einen ("0..\*") Geruchseindruck (*odour chracteristics*) beschrieben werden, wobei auch ein Geruchseindruck durchaus charakteristisch für eine Reihe ("0..\*") von Substanzen sein kann.

Es wird deutlich, dass das Herzstück der Datenbank die Datensätze der Geruchsstoffe sind. Die Substanzen sind mit weiteren relevanten Datensätzen intern aber auch mit externen Weblinks verknüpft. Die aufgeführten Daten innerhalb der Datenbank sind nach Möglichkeit durch die Angabe entsprechender Quellen belegt. Diese verweisen in der Regel auf wissenschaftliche Publikationen, können aber auch auf unveröffentlichte eigene Untersuchungen zurückzuführen sein.

Bei der Verwendung der Datenbank wird zwischen allgemeinen Nutzern und registrierten Nutzern unterschieden. Der gewöhnliche Nutzer hat lediglich die Erlaubnis, die verwalteten Daten einzusehen, während registrierte Nutzer neue Datensätze eingeben und bestehende verändern dürfen (Abb. 31). Bei nicht registrierten Nutzern entfällt entsprechend die Möglichkeit des Editierens (*Edit*) und des Löschens (*Delete*) der Datensätze. Da es sich um eine internetbasierende Datenbank handelt, ist es theoretisch möglich, dass Fachleute auf der ganzen Welt ihr Wissen und ihre Erfahrungen als registrierte User in den Ausbau der Datenbank direkt mit einbringen könnten. In der Praxis müsste natürlich sichergestellt sein, dass

nur vertrauenswürdige Quellen mit aufgenommen werden, da mit steigender Zahl der registrierten Nutzer die Überprüfung der Datensätze auf Plausibilität immer schwieriger wird. Aus diesem Grund sollte die Anzahl der Personen mit Schreibrechten auf der Datenbank auf eine übersichtliche Zahl begrenzt sein. Trotzdem besitzt die Datenbank ein gutes Potential für einen schnell wachsenden, weltweit zugänglichen Wissenspool zum Thema Geruch.

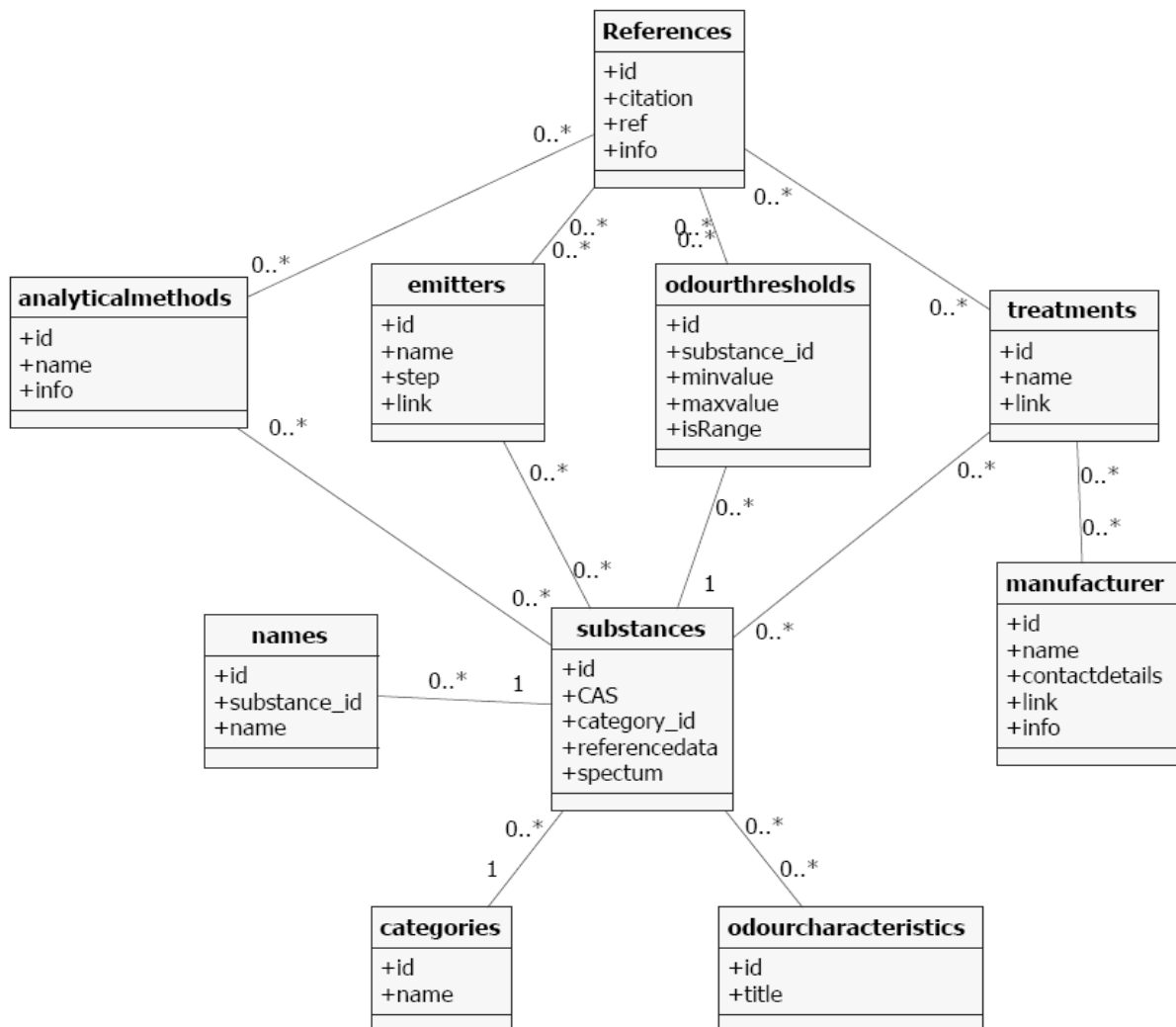


Abb. 30: Modell der inneren Struktur der geruchsspezifischen Datenbank  
(Erläuterungen siehe Text)



Odour database

## OdourDB

[Substances](#)  
[Substance Classes](#)  
[Odour Characteristics](#)  
[Treatment Methods](#)  
[Analytical Methods](#)  
[Emitters](#)  
[Manufacturers](#)  
[References](#)  
  
[Logoff mirko](#)  
[Administration](#)

### Substances

CAS	Name	Substance class	
100-41-4	Ethylbenzene	Aromate	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Butanoic acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Butyric acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Ethylacetic acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Propylformic acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Propanecarboxylic acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
107-92-6	Butanic acid	Carboxylic acids	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Pentanal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	n-Valeraldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valeraldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	n-Pentanal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valeral	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valerianic aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valeric acid aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valeric aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Valeryl aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Amyl aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Butyl formal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	n-Valeric aldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	1-Pentanal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
110-62-3	Pentan-1-al	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	Heptanal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	n-Heptaldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	n-Heptanal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	n-Heptylaldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	Enanthal	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>
111-71-7	Enanthaldehyde	Aldehydes	<a href="#">Show</a> <a href="#">References</a> <a href="#">Edit</a> <a href="#">Delete</a>

Abb. 31: Startseite der Webapplikation für einen registrierten Nutzer der Datenbank bei Aktivierung der Kategorie *Substances*

## 8.2 Verwaltung der Informationen innerhalb der Datenbank

Wie schon in Abb. 31 zu sehen, befindet sich auf der Startseite der Datenbank neben der Möglichkeit zum Einloggen registrierter User eine Liste mit den Hauptkategorien der verwalteten Datensätze:

- Substanzen
- Substanzklassen
- Geruchseindrücke
- Emittenten
- Abluftbehandlungsverfahren
- Anbieter von Abluftbehandlungsverfahren
- Analysemethoden
- Quellennachweise.

Unter jedem dieser internen Links wird eine Liste mit den entsprechenden in der Datenbank verfügbaren Datensätzen geöffnet (Abb. 31).

Die Einträge zu den einzelnen **Substanzen** (*substances*) enthalten neben den in Abb. 32 und Abb. 33 aufgeführten Informationen einen Weblink, der auf die auf der Internetseite des U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology (NIST) aufgeführten physikalisch-chemischen Eigenschaften und das Massenspektrum des betrachteten Stoffes verweist.

Unter **Substanzklasse** (*substance class*) erfolgt eine Eingruppierung der einzelnen Geruchsstoffe in die entsprechenden chemischen Substanzklassen. Die zugehörigen, in der Datenbank erfassten Stoffe lassen sich anzeigen, wenn die gewünschte Unterkategorie ausgewählt wird. Entsprechende Listen erscheinen bei den **Geruchseindrücken** (*odour characteristics*), den **Emittenten** (*emitters*), den **Behandlungsverfahren** (*treatment methods*) und den **Analysemethoden** (*analytical methods*).



Odour database

## OdourDB

[Substances](#)
[Substance Classes](#)
[Odour Characteristics](#)
[Treatment Methods](#)
[Analytical Methods](#)
[Emitters](#)
[Manufacturers](#)
[References](#)
[Login](#)
**CAS: 107-92-6**

### Substance names

Butanoic acid  
 Butyric acid  
 Ethylacetic acid  
 Propylformic acid  
 Propanecarboxylic acid  
 Butanic acid

### Substance class

Carboxylic acids

### Reference data

<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=107-92-6&Units=SI>

### Analytical methods

### Mass spectrum

<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C107926&Units=SI&Mask=200#Mass-Spec>

### Odour thresholds

14.5 ng/L air [[Devos, M., Gemert, L.J. van., Patte, F., Rouault, J. \(1990\)](#)]

### Odour characteristics

sweaty  
 rancid  
 cheese

### Emitters

[Chocolate production](#)

### Treatment methods

[Biofilter](#) [[Accortt, J., R. Krause and R. Rynk \(2001\)](#)], [[Gasser, U. Grosch, W. and Schieberle, P. \(1990\)](#)], [[Belitz, H.-D.; Grosch, W. and Schieberle, P. \(2004\)](#)], [[Dammann, B. and R. Stegmann, 1999\]](#)], [[Eitner, D., 1990.](#)], [[Eitner, D., 1992.](#)], [[Fell, J., 2002\]](#)], [[Fetzner, S. and M. Roth, 1995\]](#)], [[Hahne, J. and K.-D. Vorlop, 1999\]](#)].

[Edit List](#)

Abb. 32: Darstellung der zu den einzelnen Substanzen verfügbaren Informationen im *show-Modus* (normaler Nutzer)



Odour database

## OdourDB

[Substances](#)  
[Substance Classes](#)  
[Odour Characteristics](#)  
[Treatment Methods](#)  
[Analytical Methods](#)  
[Emitters](#)  
[Manufacturers](#)  
[References](#)  
  
[Logoff mirko](#)  
[Administration](#)

### Editing CAS 107-92-6

107-92-6

#### Substance names

Butanoic acid [Edit](#) [Delete](#)  
 Butyric acid [Edit](#) [Delete](#)  
 Ethylacetic acid [Edit](#) [Delete](#)  
 Propylformic acid [Edit](#) [Delete](#)  
 Propanecarboxylic acid [Edit](#) [Delete](#)  
 Butanic acid [Edit](#) [Delete](#)  
[Add name](#)

#### Substance class

Carboxylic acids

#### Reference data

<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook>

#### Analytical methods

#### Mass spectrum

<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook>

#### Odour thresholds

14.5 ng/L air [Devos, M., Gemert, L.J. van., Patte, F., Rouault, J. (1990)] [Edit](#) [Delete](#)  
[Add odour threshold](#)

#### Odour characteristics

sweaty [Remove](#)  
 rancid [Remove](#)  
 cheese [Remove](#)  
 sweet

#### Emitters

Chocolate production [Remove](#)  
 Oil and fat refinery

#### Treatment Methods

Biofilter [Accortt, J., R. Krause and R. Rynk (2001)] [Gasser, U; Grosch, W. (1990)] [Belitz, H.-D.; Grosch, W. and Schieberle, P. (2004)] [Dammann, W. B. and R. Stegmann, 1999] [Eitner, D., 1990. ] [Eitner, D., 1992. ]

Bioscrubber

[Show](#) | [List](#)

Abb. 33: Darstellung der zu den einzelnen Substanzen verfügbaren Informationen im *edit*-Modus (registrierter Nutzer)

In der Kategorie **Emittenten** (*emitters*) sind Industrien verzeichnet, für die die Zusammensetzung und die Hauptgeruchsstoffe der gasförmigen Emissionen zumindest teilweise bekannt sind. Jeder Industriezweig ist wiederum in einzelne Verfahrens- oder Produktionsschritte untergliedert. Entsprechende Links liefern Listen mit potenziell emittierenden Substanzen und möglichen Behandlungsverfahren. Sowohl die Industriezweige als auch die einzelnen Prozessschritte sind mit allgemeinen Informationen zu dem entsprechenden Verfahren hinterlegt.

Ähnlich aufgebaut ist die Kategorie der **Abluftbehandlungsverfahren** (*treatment methods*). In den allgemeinen Informationen wird das generelle Verfahrensprinzip dieser Anlagen erläuternd dargestellt. In weiteren Unterkategorien werden spezielle Verfahrensausführungen beschrieben und entsprechend den Geruchsstoffen zugeordnet, die mit diesen aus der Abluft entfernt werden können. Die Verfahrensausführung beschreibt beispielsweise bestimmte Waschflüssigkeiten bei der Absorption oder spezielle Biofiltermaterialien. Eine weitere Information, die der Nutzer der Datenbank in diesem Zusammenhang abrufen kann, ist der Hinweis auf Firmen, die die besagten Verfahren ver- und betreiben.

Unter den **Anbietern von Abluftbehandlungsanlagen** (*manufacturers*) erscheint eine Liste mit allen in die Datenbank aufgenommenen Firmen und den Anlagen, die diese vertreiben. Diese Informationen sollen dem User der Datenbank die Möglichkeit bieten, direkt mit Partnern in Kontakt zu kommen, die ihm bei der technischen Lösung des Geruchsproblems, welches er unter Umständen mit Hilfe der Datenbank zu weiten Teilen schon charakterisiert hat, behilflich sein können. Weiterhin kann diese Rubrik als Plattform für Firmen genutzt werden, wo sie ihre Produkte und Dienstleistungen zum Thema Abluftbehandlung anbieten können. Mögliche Kunden können so einen Überblick über entsprechende Firmen auf dem Markt erhalten. Die verwalteten Informationen zu den Firmen beinhalten im Wesentlichen das Firmenprofil und die Kontaktdaten.

Die **Analysemethoden** (*analytical methods*) verknüpfen die Substanzen mit Nachweisverfahren, die erfolgreich zu deren Identifizierung in einer Gasprobe eingesetzt worden sind. Die unterschiedlichen Methoden werden wiederum erläutert und ebenfalls in Unterkategorien aufgeteilt, in denen bestimmte Versuchs-

bedingungen, Einstellungsparameter und apparative Besonderheiten beschrieben werden.

Unter den **Quellennachweisen** (*references*) ist eine Liste mit allen in der Datenbank zitierten Quellen abgelegt. Diese beziehen sich, wie schon erwähnt, im Wesentlichen auf wissenschaftliche Veröffentlichungen, aber auch auf eigene unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse. Für eine Literaturrecherche nach bestimmten Themenschwerpunkten kann der Datenbanknutzer entsprechend der zur Verfügung stehenden Kategorien und Unterkategorien eine gezielte Vorauswahl treffen.

### 8.3 Dateneingabe

Die Eingabe von neuen Datensätzen in die Datenbank ist nur registrierten Nutzern möglich. Auch bei der Dateneingabe bilden die einzelnen Geruchsstoffe das Kernstück der Informationsübergabe. Neue Erkenntnisse über Behandlungsverfahren, Emissionszusammensetzungen oder analytische Methoden werden in erster Linie über die betrachteten Substanzen eingegeben.

Bei der Erfassung einer neuen Substanz können Angaben wie die substanzspezifische Identifikationsnummer (CAS-Nr.), die Substanznamen, die Geruchsschwellen und die Internetadresse für die Stoffdaten direkt eingegeben werden, während bei den anderen Eintragungen aus einer Vorgabeliste ausgewählt wird (Abb. 34). Hierdurch kann verhindert werden, dass unterschiedliche Ausdrücke für die Beschreibung des selben Sachverhaltes oder der selben Eigenschaft verwendet werden. Ist der gewünschte Begriff noch nicht in der Auswahlliste enthalten, so muss dieser Eintrag in der entsprechenden Kategorie neu generiert werden. Entsprechend der in Abb. 30 dargestellten Struktur können unter einigen der vorgegebenen Kategorien durchaus mehrere Eintragungen erfolgen.



Odour database

## OdourDB

- [Substances](#)
- [Substance Classes](#)
- [Odour Characteristics](#)
- [Treatment Methods](#)
- [Analytical Methods](#)
- [Emitters](#)
- [Manufacturers](#)
- [References](#)
  
- [Logoff mirko](#)
- [Administration](#)

## New Substance

CAS

Substance class

- Carboxylic acids
- Carboxylic acids
- Anorganic substances
- Esters
- Nitriles
- Aldehydes
- Ketones
- Alcohols
- Amines
- Ethers
- Phenols
- Thiols
- Alkanes
- Alkines
- Alkenes
- Aromates
- Furans

Abb. 34: Beispiel für die unterschiedlichen Eingabemöglichkeiten von Informationen in die Datenbank – direkte Eingabe (CAS-Nr., oben), Auswahl aus Liste (substance class, unten)

---

## **9 CHEMISCH-ANALYTISCHE BEURTEILUNG VON GERUCHSEMISSIONEN ÜBER HAUPTGERUCHSSTOFFE**

Das Problem bei der chemisch-analytischen Charakterisierung von Gerüchen liegt wie bereits erwähnt darin, dass Gerüche in der Regel von einem Stoffgemisch verursacht werden, welches aus einer Vielzahl an Einzelsubstanzen besteht. Um die Inhaltsstoffe einer Geruchsprobe identifizieren zu können, müssen die in Form von Chromatogrammen ausgegebenen Analyseergebnisse im Wesentlichen per Hand mit Unterstützung von Datenbanken ausgewertet werden. Mit zunehmender Anzahl der Substanzen steigt entsprechend auch der analytische Aufwand.

Verantwortlich für den verursachten Geruch sind jedoch nicht alle Inhaltsstoffe einer Probe in gleichem Maße. Das Stoffgemisch besteht in der Regel aus einer Vielzahl unterschiedlich stark oder auch gar nicht riechender Substanzen. Für eine geruchscharakterisierende Beschreibung geht es daher im Wesentlichen darum, die für den Geruch entscheidenden Stoffe zu identifizieren.

In den folgenden Kapiteln wird untersucht, ob sich Geruchsemissionen ausreichend genau über eine Auswahl an so genannten Hauptgeruchsstoffen in Bezug auf Geruchswirkung und -stärke charakterisieren lassen. Diese Erkenntnis würde zum Beispiel bei der Auswahl von geeigneten Abluftbehandlungsverfahren von Nutzen sein. Sollte es möglich sein, aus einem Stoffgemisch einige wenige Hauptgeruchsstoffe zu benennen, so kann gezielter nach einer auf diese Substanzen zugeschnittenen Maßnahme zu deren Entfernung aus der Abluft gesucht werden. Auch der chemisch-analytische Aufwand für die Beurteilung von Abluftbehandlungsverfahren könnte dadurch reduziert werden, wenn nur noch gezielt auf Hauptgeruchsstoffe analysiert werden müsste.

### **9.1 Bestimmung von Hauptgeruchsstoffen**

Bei der Bewertung der Geruchsstoffe kommt es nicht allein darauf an, welche Substanzen den mengenmäßig größten Anteil im Stoffgemisch bilden, sondern vielmehr auch darauf, wie stark die einzelnen Stoffe riechen. Methoden zur

Charakterisierung der geruchlichen Bedeutung der entsprechenden Substanzen sind vor allem aus der Lebensmittel- und Aromaforschung bekannt. Hierzu zählen die Aromaextraktverdünnungsanalyse (AEVA bzw. Aroma Extract Dilution Analysis AEDA) (Ullrich und Grosch, 1987) und die CHARM-Analyse (Combined Hedonic and Response Measurement bzw. „charm“ = Reiz) (Acree et al., 1984).

Bei der AEVA werden Aromakonzentrate schrittweise im Verhältnis 1:1 verdünnt und die Konzentrate sowie die aus ihnen hergestellten Verdünnungen mittels GC/O analysiert. Das Verfahren wird solange fortgesetzt, bis kein Aromastoff mehr am Sniffing-Port wahrgenommen wird. Die Verdünnungsstufe, in der der jeweilige Aromastoff zuletzt olfaktorisch wahrgenommen wird, wird als dessen Flavor-Dilution-Faktor (FD-Faktor) angegeben (Ullrich und Grosch, 1987).

Bei der von Acree et al. (1984) entwickelten CHARM-Analyse riechen mindestens 6 geschulte Prüfer den Aromaextrakt sowie eine Reihe von Verdünnungsstufen am Sniffing-Port ab. Über einen Tastengeber wird die Wahrnehmung eines Geruchsstoffes angezeigt. Die Registrierung der Dauer eines Signals erfolgt mittels elektronischer Auswertesoftware. Die Relevanz der einzelnen Aromastoffe wird über die Anzahl der Prüfer, die den Aromastoff wahrgenommen haben, die Dauer der Wahrnehmung und die Verdünnungsstufen berechnet.

Eine häufig verwendete Methode zur Gewichtung der einzelnen Geruchsstoffe, die ohne aufwändige olfaktorische Messungen auskommt, stellt die Bestimmung der Aromawerte (Odour Activity Values OAV) dar. Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Geruchsstoffe quantifiziert und ihre Konzentration im Lebensmittel mit ihrer Geruchsschwelle ins Verhältnis gesetzt. Es werden die Geruchsschwellen in dem Medium gewählt, welches die vorwiegende Matrixphase des Lebensmittels am besten widerspiegelt, z.B. Wasser, Öl oder Alkohol (Rothe und Thomas, 1963). Nach diesem Konzept liefert jeder Aromastoff, der einen Aromawert  $>1$  besitzt, einen Beitrag zum Gesamtaroma. Je höher der Aromawert einer Substanz ist, desto größer ist auch deren Bedeutung für das Aroma (Grosch, 1993).

Eine ähnliche Methode, die Bestimmung der Odor Indices, wurde von Forschern aus den USA zur Bewertung von Abluft aus Abwasserbehandlungsanlagen entwickelt. Hierbei werden die Konzentrationen der Geruchsstoffe in der Abluft mit ihren

Geruchsschwellen in Luft ins Verhältnis gesetzt (Goldstein, 2001). Nach der gleichen Methode hat Bowly (2003) über den hier als chemische Geruchskonzentration bezeichneten Quotienten aus Stoffkonzentration und Geruchsschwelle die Hauptgeruchsstoffe von Deponiegasemissionen bestimmt. Jedoch ist auch diese Bewertungsmethode sehr aufwändig, da neben der Identifizierung und einer quantitativen Bestimmung der Inhaltsstoffe auch noch deren Geruchsschwellen bekannt sein müssen.

Als Bewertungsinstrument für die identifizierten Inhaltsstoffe wird als vereinfachte Methode ein modifizierter Odour-Index eingeführt, der in ähnlicher Form auch von Freudenthal et al. (2005) verwendet wurde. Der Odour-Index ( $OI_i$ ) setzt die mittels GC/MS gemessene Peakfläche einer Substanz ( $a_i$ ) mit der jeweiligen Geruchsschwelle dieses Stoffes ins Verhältnis, um ein rechnerisches Maß für die Geruchsstärke zu erhalten (Gleichung 11). Über den Anteil des Odour-Index einer Substanz an der Summe aller Odour-Indices des Stoffgemisches kann der prozentuale Anteil dieser Substanz am Gesamtgeruch abgeschätzt werden. Der Quotient aus diesen beiden Größen wird fortan als relativer Odour-Index ( $OI\%_i$ ) bezeichnet. Folgende Berechnungen liegen diesen Überlegungen zugrunde:

$$OI_i = \frac{a_i}{OT_i} \quad (11)$$

$$OI\%_i = \frac{OI_i}{\sum_{j=1}^n OI_j} \quad (12)$$

mit  $OI\%_i$  relativer Odour-Index des Stoffes i [%] (Anteil am Gesamtgeruch)

$OI_i$  Odour-Index des Stoffes i

$a_i$  Peakfläche des Stoffes i im TIC

$OT_i$  Geruchsschwelle des Stoffes i

$n$  Anzahl der in der Probe identifizierten Geruchsstoffe.

Abb. 35 zeigt ein Beispiel für ein Chromatogramm mit 14 identifizierten Substanzen einer Gasprobe. Entsprechend der Gleichung 11 ergibt sich der Odour-Index des Stoffes 12 ( $OI_{12}$ ) aus dem Quotienten der Peakfläche ( $a_{12}$ ) und dessen

Geruchsschwelle ( $OT_{12}$ ). Gemäß Gleichung 12 muss folglich zur Ermittlung des relativen Odour-Index der Substanz 12 ( $OI\%_{12}$ ) noch die Summe aller Odour-Indices ( $OI_1-OI_{14}$ ) bestimmt werden.

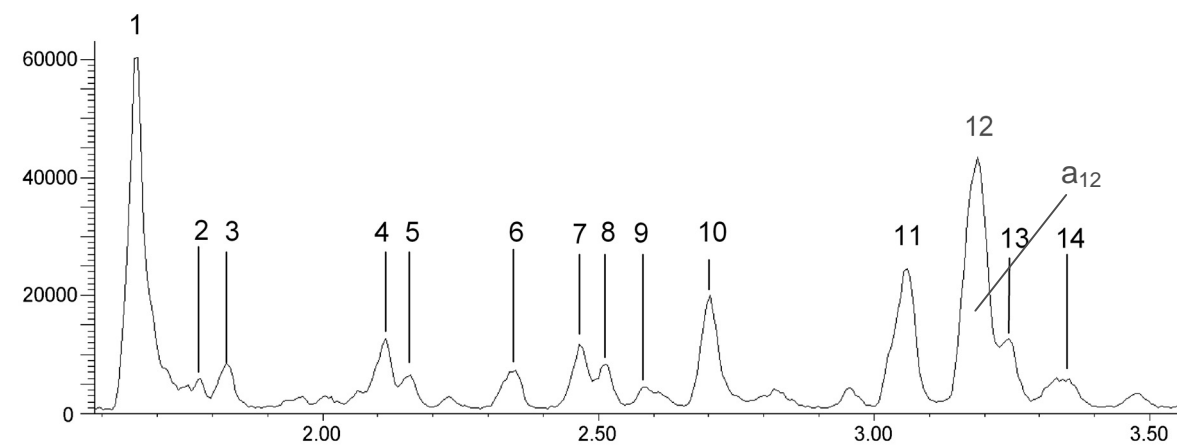


Abb. 35: Beispiel für ein Totalionenstromchromatogramm mit 14 identifizierten Substanzen

Aus der Betrachtung der relativen Odour-Indices aller in der Probe identifizierten Stoffe können die für den Geruch relevanten Substanzen entsprechend ihres Anteils ausgewählt werden. Für die Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe kann ein Auswahlkriterium festgelegt werden. Hierfür bietet sich ein prozentualer Mindestbeitrag zum Gesamtgeruch an. Mit der hier beschriebenen Methode sind alle in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Geruchsemissionen charakterisiert worden.

In Tab. 8 sind beispielhaft die in Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung identifizierten Substanzen aufgeführt. Die Emissionsquelle wurde für diese Betrachtung mehrmals beprobt und die jeweiligen relativen Odour-Indices berechnet. Nach einer Mittelwertbildung wurden nach unterschiedlichen Kriterien Hauptgeruchsstoffe bestimmt. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass nach dem oben beschriebenen Berechnungsverfahren von den 60 nachgewiesenen Substanzen nur 10 im Mittel mit mindestens einem Prozent an dem Gesamtgeruch beteiligt sind. In der Summe ergibt sich rechnerisch für diese Geruchsstoffe ein Beitrag von etwa 99%. Als entsprechend unbedeutend sind die restlichen 50 Substanzen für die Geruchswirkung der Abluftprobe einzuschätzen. Wird die Grenze für das Auswahlkriterium etwas höher angelegt, so kann die Anzahl der Hauptgeruchsstoffe

noch weiter einschränken werden. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wären rechnerisch nur 6 Geruchsstoffe für insgesamt 95% des Gesamtgeruchs verantwortlich, wobei sogar knapp 90% davon auf allein 4 Substanzen fallen.

Natürlich ist eine derartige Bewertung einer Abluft nur möglich, wenn die wesentlichen Inhaltsstoffe und ihre Geruchsschwellenwerte bekannt und entsprechend nachweisbar sind. Für Geruchsschwellenwerte gibt es zahlreiche Literaturstellen (Wagner, 1999; Rychlik et al., 1998; Devos et al., 1990, Amoore und Hautala, 1983; Van Gemert und Nettenbreijer, 1977) die unterschiedlich umfangreiche Zusammenstellungen bieten. Das Problem bei diesen Werten ist jedoch, dass deren Schwankungsbreite nicht nur von Autor zu Autor sondern auch innerhalb einer Veröffentlichung bis zu drei Zehnerpotenzen betragen kann. Oftmals geht auch aus den Arbeiten nicht eindeutig hervor, ob wirklich die Geruchsschwelle oder doch die Erkennungsschwelle eines Stoffes bestimmt wurde und welche Methode hierfür genau verwendet wurde. Daher ist bei der Verwendung der vorhandenen Daten eine gewisse Erfahrung hinsichtlich der Auswahl des Geruchsschwellenwertes erforderlich. Allein Devos et al. (1990) haben nach einem eigenen Gewichtungsverfahren die ihnen zugänglichen Daten anderer Autoren ausgewertet und zu einem Mittelwert zusammengefasst.

Weiterhin gilt es zu beachten, dass mit der in der vorliegenden Arbeit zur Anreicherung der Geruchsstoffe verwendeten SPME-Methode und aufgrund der oftmals sehr geringen Konzentrationen auch mit anderen Anreicherungsverfahren, keine vollständig quantitative Analyse der Substanzen erfolgen kann. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die Mengenverhältnisse der auf der SPME-Faser angereicherten Stoffe zueinander in etwa die Relationen aus der Gasphase abbilden. Wenngleich diese Relation bei sehr hohen Konzentrationen einzelner Stoffe aufgrund von Verdrängungs- und Übersättigungseffekten auf der Faser auch verfälscht werden können (Kap. 3.5.1).

Unabhängig davon ergibt sich laut der oben beschriebenen Berechnungsmethode je nach Auswahlkriterium eine entsprechend geringe Anzahl an relevanten Geruchsstoffen. Inwieweit sich der Geruch von Abluft und dessen Veränderung über das Verhalten von Hauptgeruchsstoffen beschreiben lässt, soll in weiteren Betrachtungen untersucht werden.

Tab. 8: Relative Odour Indices (OI%) der anhand wiederholter Messungen in Abluft aus der Schokoladenherstellung nachgewiesenen Substanzen zur Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe; Zahlen auf ganze % gerundet

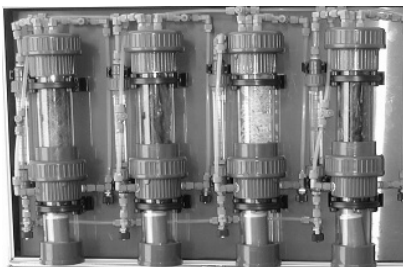


	OI%								Mittelwert (OI%)
1. Ethanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2. Aceton	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3. 2-Propanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4. Pentan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5. 1,3-Pentadien	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6. Dimethylsulfid	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
7. Essigsäuremethylester	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
8. 1-Propanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>9. 2-Methylpropanal</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>
<b>10. Essigsäure</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>8%</b>	<b>5%</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>6%</b>	<b>10%</b>
11. 2-Butanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
12. 2-Methyl-3-buten-2-ol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
13. Essigsäureethylester	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
14. Tetrahydrofuran	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
15. 2-Butenal	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>16. 3-Methylbutanal</b>	<b>58%</b>	<b>55%</b>	<b>64%</b>	<b>67%</b>	<b>53%</b>	<b>61%</b>	<b>62%</b>	<b>69%</b>	<b>61%</b>
17. 3-Methyl-2-butanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
18. Benzol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>19. 2-Methylbutanal</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	<b>12%</b>	<b>15%</b>	<b>9%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>
20. 2-Methylhexan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
21. 3-Methylhexan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
22. 2-Pentanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
23. 2-Pentanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>24. Pentanal</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>
25. Heptan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
26. 3-Hydroxy-2-butanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
27. Methylcyclohexan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
28. 3-Methyl-1-butanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
29. Dimethyldisulfid	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>30. 2-Methylpropansäure</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>
31. Toluol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
32. Butandiol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>33. Buttersäure</b>	<b>7%</b>	<b>5%</b>	<b>3%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>
34. Butandiol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
35. Furfural	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>36. 3-Methylbutansäure</b>	<b>8%</b>	<b>9%</b>	<b>7%</b>	<b>4%</b>	<b>11%</b>	<b>7%</b>	<b>7%</b>	<b>6%</b>	<b>7%</b>
37. Essigsäure-3-methyl-2-butylester	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>38. 2-Methylbutansäure</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	<b>3%</b>	<b>3%</b>	<b>6%</b>	<b>4%</b>	<b>4%</b>	<b>3%</b>	<b>3%</b>
39. Ethylbenzol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40. m/p-Xylol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
41. Essigsäure-3-methyl-1-butylester	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
42. Essigsäure-2-methyl-1-butylester	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
43. Cyclohexanol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
44. Styrol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
45. o-Xylol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
46. Cyclohexanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
47. 2-Heptanon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
48. 2,5-Dimethylpyrazin	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
49. 2,3-Diethylpyrazin	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
50. alpha-Pinen	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
51. Benzaldehyd	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
52. 1-Ethyl-3-methylbenzol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
53. 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
54. 2-Pentylfuran	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
55. 1,2,4-Trimethylbenzol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>56. Trimethylpyrazin</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>
57. delta-3-Caren	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
58. Tetramethylpyrazin	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
59. Guajacol	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Summe OI% (MW ≥ 1%)</b>	<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>99%</b>	<b>98%</b>	<b>98%</b>	<b>98%</b>	<b>98%</b>	<b>99%</b>
<b>Summe OI% (MW &gt; 1%)</b>	<b>97%</b>	<b>96%</b>	<b>97%</b>	<b>97%</b>	<b>94%</b>	<b>93%</b>	<b>94%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>
<b>Summe OI% (MW &gt; 5%)</b>	<b>90%</b>	<b>87%</b>	<b>91%</b>	<b>92%</b>	<b>87%</b>	<b>88%</b>	<b>89%</b>	<b>91%</b>	<b>89%</b>

## 9.2 Abschätzung der Aussagekraft von Hauptgeruchsstoffen zur Beurteilung von Gerüchen (Odour-Index-Methode)

### 9.2.1 Versuchsbedingungen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen wurden an Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung und der Öl- und Fettveredelung mit den in Tab. 9 aufgeführten Versuchsanlagen durchgeführt.

Tab. 9: Zur Reduzierung von Geruchsemissionen verwendete Versuchsanlagen und Behandlungsverfahren

Versuchsanlage	Behandlungsverfahren	Abluftquelle / Belastungen
<u>Labormaßstab</u> Dynamisches Testsystem 	Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wurzelholz</li> <li>• Sojakompost</li> <li>• Rindenmulch</li> <li>• Kokosfasern/Torf</li> </ul> Wäscher <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasser</li> </ul> Adsorption <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivkohle</li> </ul>	Öl- und Fettveredelung, Schokoladenmasseherstellung  4 x 75 L/h
<u>Technikumsmaßstab</u> 	<u>Kombination</u> Biowäscher Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünschnittkompost</li> <li>• Sojakompost</li> </ul> Adsorption <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivkohle</li> </ul>	Öl- und Fettveredelung  1-3,5 m³/h
<u>Containermaßstab</u> 	<u>Kombination</u> Biowäscher Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wurzelholz</li> <li>• Sojakompost</li> <li>• Rindenmulch</li> <li>• Kokosfasern/Torf</li> </ul>	Öl- und Fettveredelung  400-1000 m³/h

### 9.2.2 Beschreibung von Konzentrationsänderungen über den Odour-Index

In diesem Kapitel wird untersucht, ob die über den Odour-Index identifizierten Hauptgeruchsstoffe tatsächlich eine charakteristische Größe zur Beschreibung geruchsaktiver Emissionen darstellen. Zu diesem Zweck werden Konzentrationsänderungen der Hauptgeruchsstoffe mit denen der olfaktometrisch gemessenen Geruchskonzentration verglichen. Die Bestimmung erfolgt über die Geruchsminderungsgrade der Reinigungsverfahren an den oben beschriebenen Versuchsanlagen.

An diese Stelle wird der Odour-Betrag eingeführt. Er ergibt sich aus der Summe der Odour-Indices betrachteter Substanzen einer Probe.

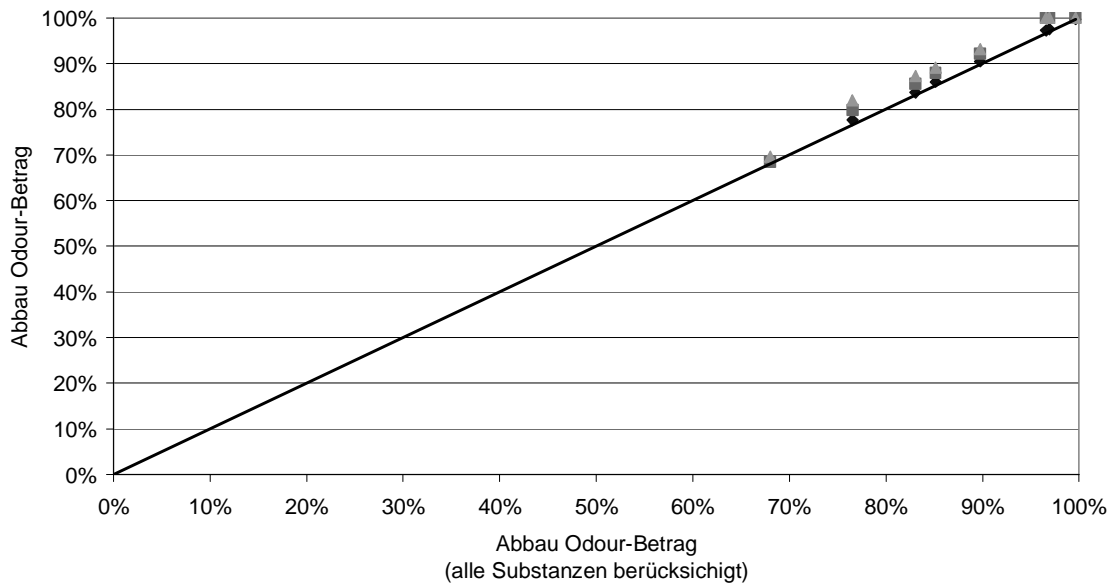
$$OB_n = \sum_{i=1}^n OI_i \quad (13)$$

mit  $OB_n$  Odour-Betrag von n Substanzen  
 $OI_i$  Odour-Index des Stoffes i  
 $n$  Anzahl der berücksichtigten Geruchsstoffe.

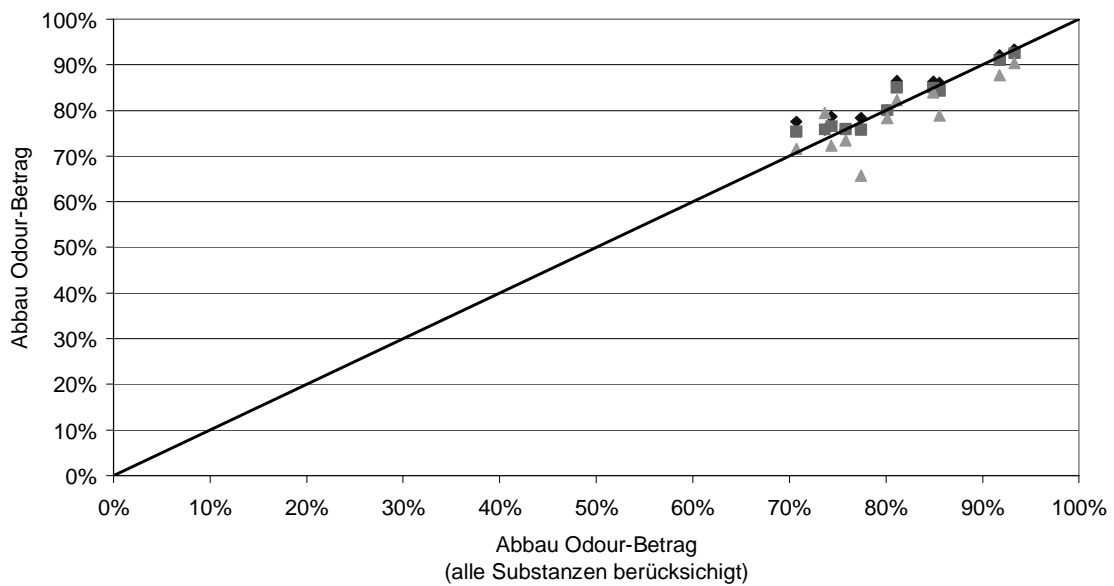
Auf diese Weise kann der Einfluss einer Auswahl von Geruchsstoffen (z.B. der Hauptgeruchsstoffe) auf den Gesamtgeruch abgeschätzt werden. Nach der oben beschriebenen Theorie ist demnach der Odour-Betrag als Summe aller Odour-Indices der Stoffe in einer Probe ein Maß für deren Geruchsstärke. Entsprechend sollte das Verhältnis der Odour-Beträge vor und hinter einer Behandlungsstufe in direkter Relation zur Geruchsabnahme stehen. Unter der weiteren Annahme, dass eine Geruchprobe über die Hauptgeruchsstoffe hinreichend gut charakterisierbar ist, sollte die Relation auch über die Odour-Beträge der Hauptgeruchsstoffe beschreibbar sein. Diese Überlegungen sollen nun anhand von Messergebnissen aus unterschiedlichen Beispielfällen überprüft werden.

In Abb. 36 ist die Abnahme der Odour-Beträge durch den Abbau der Geruchsstoffe in unterschiedlichen Biofiltermaterialien dargestellt. Die Messwerte wurden an dem dynamischen Testsystem und der Pilotanlage während der Behandlung von Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung und aus der Öl- und Fettveredelung aufgenommen.

### Öl- und Fettveredelung



### Schokoladenmasseherstellung



- ◆ berücksichtigte Substanzen: 10 (Öl, Schokolade); relativer Odour-Betrag in Rohluft: 98% (Öl), 99% (Schokolade)
- berücksichtigte Substanzen: 3 (Öl), 4 (Schokolade); relativer Odour-Betrag in Rohluft: 89% (Öl, Schokolade)
- ▲ berücksichtigte Substanzen: 1 (Öl, Schokolade); relativer Odour-Betrag in Rohluft: 79% (Öl), 61% (Schokolade)

Abb. 36: Abbau des Odour-Betrags durch Biofiltermaterialien an der Pilotanlage und dem dynamischen Testsystem für eine variierende Anzahl berücksichtigter Geruchsstoffe

Die Odour-Beträge der Proben wurden jeweils für eine unterschiedliche Anzahl von Geruchsstoffen bestimmt. In einer Auswahl werden die Geruchsstoffe berücksichtigt, die rechnerisch den überwiegenden Teil des Geruches ausmachen. Als Auswahlkriterium wurde ein relativer Odour-Index von mindestens 1% festgelegt. Der Anteil dieser jeweils 10 Stoffe am Gesamtgeruch belief sich in diesen Fällen auf 98 bzw. 99%. Für eine weitere Abschätzung wurden lediglich die 3 – 4 Hauptgeruchsstoffe berücksichtigt, die jeweils einen rechnerischen Anteil von 89% am Gesamtgeruch haben, und schließlich wurden diese noch auf nur einen Hauptgeruchsstoff reduziert. Um festzustellen, welchen Einfluss der Umfang der für die Berechnung des Geruchsabbaus berücksichtigten Geruchsstoffe einer Probe hat, werden die Ergebnisse über den Abbau der Odour-Beträge aller nachweisbaren Substanzen aufgetragen. Die in den Diagrammen eingezeichnete Diagonale deutet Werte der direkten Übereinstimmung an. Bei einem Vergleich der errechneten Abbauwerte fällt auf, dass bei den Untersuchungen an Abluft aus der Öl- und Fettveredelung mit abnehmender Zahl der berücksichtigten Substanzen und somit auch sinkenden relativen Odour-Beträgen der errechnete Abbau leicht ansteigt. Bei der Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung ist der Effekt nicht so eindeutig, tendenziell geht er hier eher zurück. Die Unterschiede zwischen den Werten sind in den meisten Fällen relativ gering. Im Mittel liegen die maximalen Differenzen bei 4%. Berücksichtigt man die Berechnung für nur einen Hauptgeruchsstoff nicht, so liegt die maximale Abweichung der Werte untereinander nur noch bei 2%. Es wird deutlich, dass die prozentuale Abnahme des Odour-Betrages bei den betrachteten Beispielen relativ unabhängig von der Anzahl der berücksichtigten Hauptgeruchsstoffe ist. Generell wird dies vor allem für die Fälle zutreffen, bei denen die Geruchsminderungsmaßnahmen wenig selektiv oder das Spektrum an Geruchsstoffen in der zu behandelnden Abluft relativ klein ist. Verhalten sich die Substanzen bei der Passage eines Reinigungsaggregats sehr unterschiedlich, so werden die errechneten Abnahmen der Odour-Beträge in Abhängigkeit von der Anzahl der für die Berechnung berücksichtigten Geruchsstoffe sicherlich stärker schwanken. Als Beispiel hierfür sind in Abb. 37 die Odour-Indices zweier an der Technikumsanlage genommener Proben vor und nach der Biofilterbehandlung dargestellt.

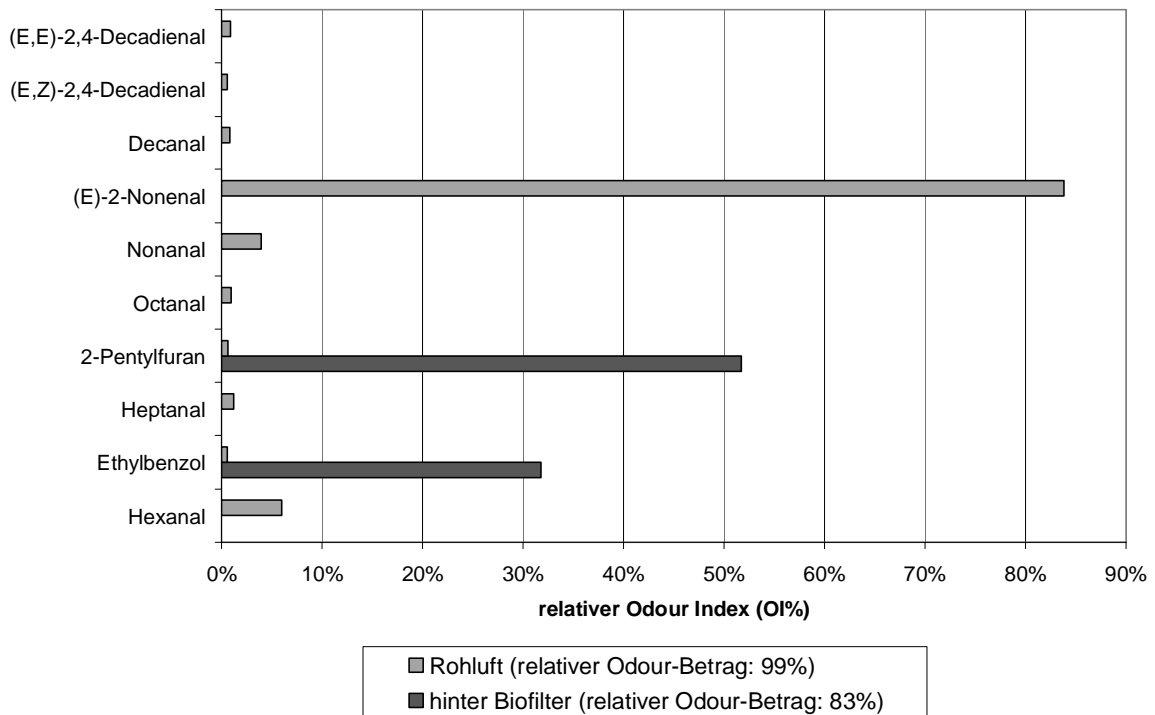


Abb. 37: Relative Odour-Indices von 10 Hauptgeruchsstoffen aus der Abluft eines Öl und Fett verarbeitenden Betriebes in der Rohluft und nach biologischer Abluftbehandlung im Vergleich

Deutlich ist die Verschiebung des Einflusspektrums der Hauptgeruchsstoffe zu erkennen. Während in der Rohluft 2-Nonenal mit Abstand den höchsten relativen Odour-Index aufweist, haben in der behandelten Abluft 2-Pentylfuran und Ethylbenzol den größten rechnerischen Anteil am Geruch der Probe. Auch der relative Odour-Betrag der ausgewählten Hauptgeruchsstoffe beträgt nach der biologischen Behandlung nur noch 83% im Vergleich zu 99% in der Rohluft. Wenngleich derartige Effekte bei einer Abnahme des Odour-Betrags von 99,5% über den Biofilter in diesem Fall keine große Rolle spielen, so können sie doch zu Abweichungen zwischen den unterschiedlich berechneten Odour-Beträgen führen. Das Risiko Fehleinschätzung steigt offensichtlich mit sinkendem relativen Odour-Betrag sowie auch mit geringer werdender Anzahl der berücksichtigten Geruchsstoffe. Aus diesem Grund sollten mehr als ein Hauptgeruchsstoff in die Berechnung einfließen und der auf die Rohluft bezogene relative Odour-Betrag der ausgewählten Substanzen mindestens bei etwa 90% liegen.

In der obigen Darstellung konnte gezeigt werden, dass sich Änderungen des Odour-Betrags einer geruchsbelasteten Abluft relativ gut über den Odour-Betrag ausgewählter Hauptgeruchsstoffe beschreiben lassen. Im folgenden Schritt bleibt zu prüfen, inwieweit diese Werte mit olfaktometrischen Messungen korrelieren und ob entsprechend über den Odour-Index bestimmte Hauptgeruchsstoffe für eine chemisch-analytische Charakterisierung von Geruchsemissionen ausreichen.

Zu diesem Zweck sind olfaktometrisch bestimmte Wirkungsgrade von Reinigungsstufen gegenüber den errechneten Abnahmen des Odour-Betrags in Abb. 38 aufgetragen. Die Berechnung der Odour-Beträge basiert auf den Odour-Indices von jeweils etwa 10 Hauptgeruchsstoffen, die zusammen 98-99% des relativen Odour-Betrags ausmachen. Die Werte wurden bei Untersuchungen an beiden Abluftvarianten mit den in Kap. 6.4, Tab. 7 beschriebenen Behandlungsverfahren im Labor-, Technikums- und Pilotmaßstab erhoben. Die in Abb. 38 eingezeichnete Diagonale gibt die Lage der Werte einer direkten Übereinstimmung der gemessenen und der errechneten Geruchsabnahme an.

Wie in Abb. 38 zu sehen ist, liegen die abgebildeten Werte abgesehen von einigen „Ausreißern“ relativ dicht an dieser Linie. Es ist demnach ein gewisser Zusammenhang zwischen der Änderung des Odour-Betrags und der Abnahme des olfaktometrisch gemessenen Geruchs erkennbar. Inwieweit die Geruchsabnahme durch den Odour-Betrag beschrieben werden kann, soll im Folgenden überprüft werden.

In Abb. 39 ist die absolute prozentuale Abweichung zwischen dem olfaktometrisch bestimmten und dem über den Odour-Betrag berechneten Geruchsminderungsgrad in Abhängigkeit von der Rohluftkonzentration dargestellt. Wie zu sehen ist, liegen die Unterschiede zwischen beiden Werten für den überwiegenden Teil der Messpunkte unterhalb von 20%.

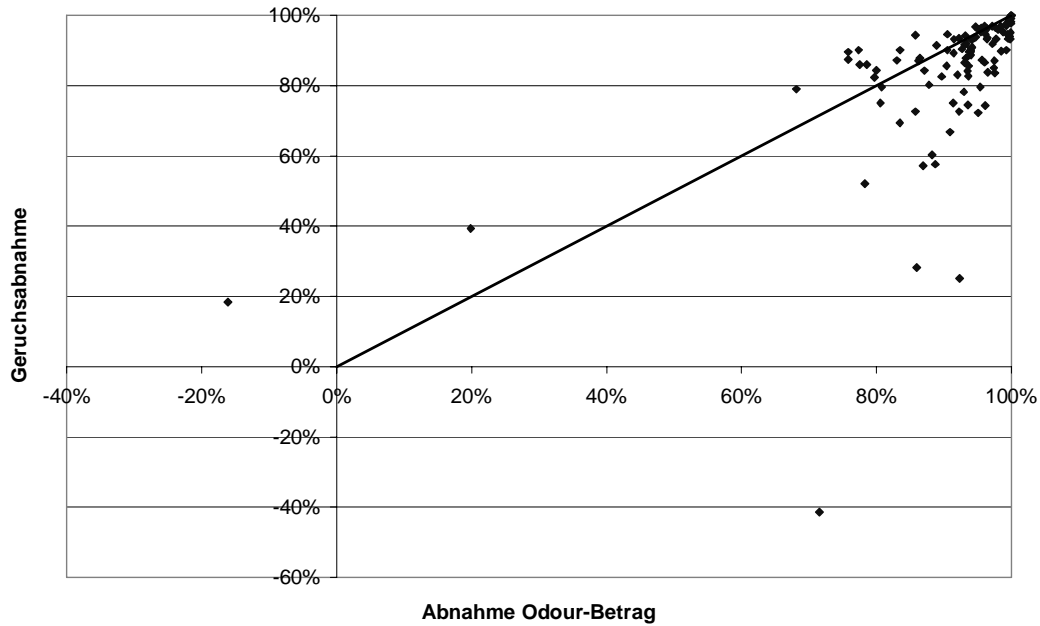


Abb. 38: Olfaktometrisch bestimmte und über den Odour-Betrag berechnete Geruchsminderungsgrade im Vergleich. Die Diagonale gibt die Lage der Werte einer direkten Übereinstimmung an. Messungen an unterschiedlichen Versuchsanlagen an Abluft aus der Lebensmittelindustrie.

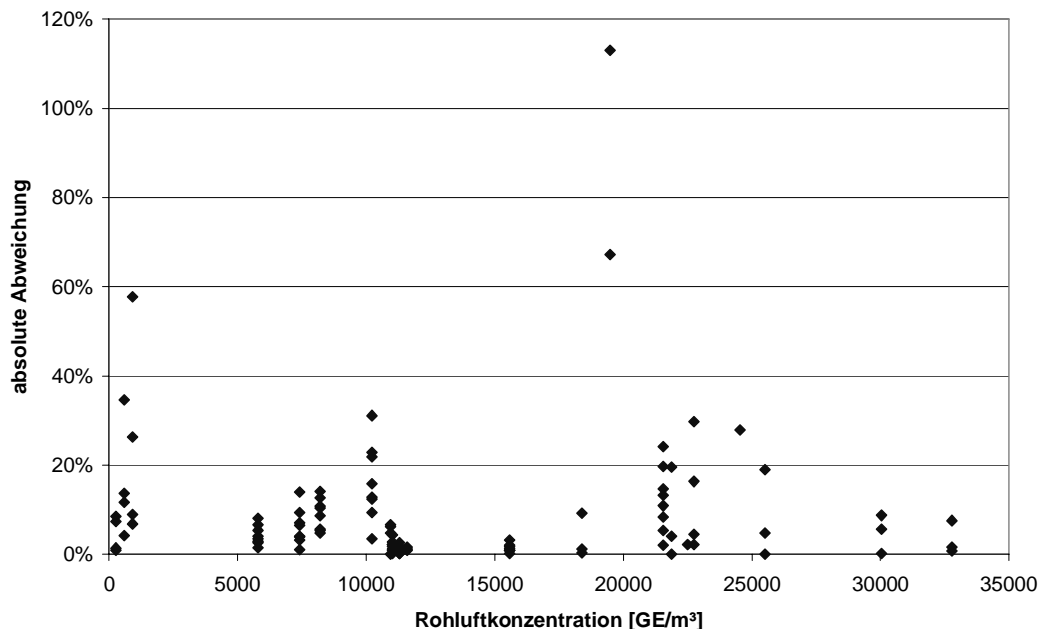


Abb. 39: Absolute Abweichung zwischen den olfaktometrisch gemessenen und den über den Odour-Betrag berechneten Geruchsminderungsgraden in Abhängigkeit von der Rohluftkonzentration. Messungen an unterschiedlichen Versuchsanlagen an Abluft aus der Lebensmittelindustrie.

Die deutlichsten Abweichungen von der 20%-Differenz sind in einem Konzentrationsbereich zwischen 20.000 und 25.000 GE/m<sup>3</sup> zu erkennen. Diese Werte wurden bei Messungen an dem dynamischen Testsystem aufgenommen. Es handelt sich hierbei um Ergebnisse von Adsorptionsversuchen mit Aktivkohle an Abluft aus der Öl- und Fettveredelung. Die starken Abweichungen sind in diesem Fall auf das Adsorptionsverhalten der Geruchsstoffe an Aktivkohle in Verbindung mit der hier verwendeten Nachweismethode zurückzuführen.

Auf der SPME-Faser reichern sich die Analyten in der Regel in etwa dem Massenverhältnis an, welches der Zusammensetzung in der Gasphase entspricht. Sollte jedoch die Konzentration der Substanzen in der Abluftprobe extrem hoch sein, kann es zu einer Sättigung der Faser kommen. Dies führt zu Verdrängungseffekten unter den extrahierten Stoffen. Substanzen, die besonders gut an der Faser sorbieren, werden dann im Vergleich zu den anderen tendenziell überrepräsentiert. Trotzdem erhält man bei der Analyse ein charakteristisches Abbild der Probe. Kommt es aber zu einer selektiven Veränderung der Gaszusammensetzung, so wird auch das Gleichgewicht auf der Faser gestört. Durch den Wegfall eines Konkurrenten um die freien Sorptionsplätze werden dann unter Umständen andere Stoffe wiederum deutlich stärker repräsentiert als vorher. Diese Veränderungen wirken sich natürlich auf die jeweiligen Odour-Indices der Substanzen und folglich auch auf den Odour-Betrag der Probe aus, was zu Fehlinterpretationen bei der Beurteilung von Abluftbehandlungsanlagen führen kann.

Genau dieses selektive Reinigungsverhalten zeigt sich bei der adsorptiven Behandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung mit Aktivkohle. Entsprechende Versuche wurden mit dem dynamischen Testsystem durchgeführt und Durchbruchkurven für unterschiedliche Parameter aufgenommen (Abb. 40). Für den beschriebenen Versuch wurde die Testeinheit mit ca. 100 mL (60 g) Aktivkohle befüllt. Die Filterbelastung betrug 5000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h (8 m<sup>3</sup>/kg h) bei einer Schütthöhe von ca. 5 cm.

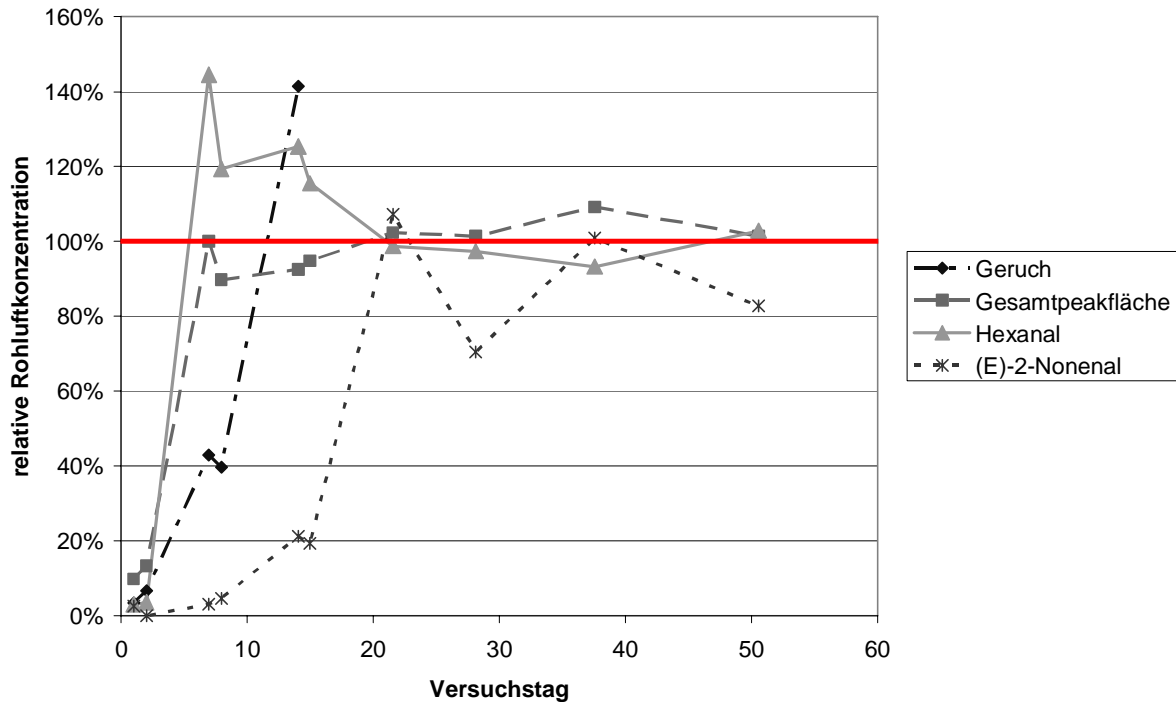


Abb. 40: Durchbruchkurven unterschiedlicher Parameter der Abluft aus der Öl- und Fettveredelung durch eine Aktivkohlestufe im dynamischen Testsystem

Deutlich sind in Abb. 40 die zeitlich verzögerten Durchbrüche der unterschiedlichen Parameter zu erkennen. Als erstes brechen der anteilig in der Rohluft am stärksten vertretende Hauptgeruchsstoff Hexanal und die Summe aller mittels GC/MS bestimmter Peakflächen, hier als Gesamtpeakfläche bezeichnet, durch. Während die Hexanalkonzentration hinter der Aktivkohle scheinbar höher ist als vor der Behandlung, bricht die Gesamtpeakfläche genau bis zur 100%-Markierung durch und schwankt ab diesem Zeitpunkt relativ konstant um diesen Wert. Folglich scheint die SPME-Faser bei der Anreicherung in der Rohluft und der behandelten Abluft vollständig gesättigt zu sein.

Die scheinbare Konzentrationserhöhung des Hexanals durch den Behandlungsschritt ist, wie oben schon erwähnt, überwiegend auf eben diesen Sättigungsvorgang zurückzuführen. Bei der Anreicherung der Rohluft auf der Faser ist diese vollständig gesättigt und es kommt in Abhängigkeit der Flüchtigkeit der Substanzen zu Verdrängungseffekten zwischen den Analyten. Auch der Durchbruch durch die Aktivkohleschüttung erfolgt unterschiedlich schnell. Das vergleichsweise leicht flüchtige Hexanal bricht relativ früh durch und konkurriert entsprechend mit weniger

Analyten um die Sorptionsplätze auf der Anreicherungsfasern in der behandelten Abluft, was dazu führt, dass hinter der Adsorptionsstufe eine größere Menge Hexanal nachgewiesen wird als in der Rohluft. Durch die Verdrängungseffekte auf der Aktivkohle ist jedoch auch eine reale Konzentrationserhöhung denkbar, sofern bereits adsorbierte Stoffe wieder verdrängt werden. Das schwerer flüchtige 2-Nonenal bricht deutlich später durch. Mit dessen Konzentrationsanstieg in der behandelten Abluft wird wiederum die extrahierte Menge an Hexanal weniger. Mit fortgeschrittenem Verlauf des Versuches nähert sich die Abluftzusammensetzung hinter der Aktivkohle wieder der aus der Rohluft an.

Da 2-Nonenal den mit Abstand höchsten Odour-Index in der Rohluft aufweist, wirken sich Konzentrationsänderungen dieses Stoffes besonders auf den Odour-Betrag aus. Als Folge dessen wird allein durch den Rückhalt von Nonenal eine deutliche Verringerung des Odour-Betrages bewirkt. Dies wiederum deckt sich aber nicht mit den Beobachtungen bezüglich des olfaktometrisch gemessenen Geruches, dessen Durchbruch deutlich vor dem des Nonenals zu beobachten war. Gründe hierfür könnten darin liegen, dass die Konzentration von Hexanal in der Abluft deutlich höher ist als sie im Verhältnis zu den anderen Substanzen auf der SPME-Faser abgebildet wird. Es ist denkbar, dass beispielsweise Nonenal repräsentativ extrahiert wurde und Hexanal aufgrund von Sättigungs- und Verdrängungseffekten nur zu einem Bruchteil. Folglich wird die Bedeutung des Nonenals für den Geruch in der Rohluft deutlich überschätzt, was in Verbindung mit der veränderten Abluftzusammensetzung hinter der Adsorptionsstufe auch zu einer Fehleinschätzung der Reinigungsleistung führt. Da derartige Effekte bei der olfaktometrischen Vermessung von Geruchsproben keine Rolle spielen, ist eine Diskrepanz zwischen diesen und denen über den Odour-Betrag berechneten Werte nicht verwunderlich. Um solchen Sättigungseffekten entgegen zu wirken, sind Verdünnungen der Probenluft oder kürzere Anreicherungszeiten denkbar. Jedoch bleibt in solchen Fällen zu beachten, dass gering konzentrierte Substanzen aus der Gasphase unter Umständen dann nicht nachgewiesen werden können. Sollten diese Stoffe sehr niedrige Geruchsschwellenwerte besitzen, könnten sie einen wesentlichen Anteil am Gesamtgeruch ausmachen, der jedoch nicht berücksichtigt wird. Auch in diesem Fall können also Fehler auftreten. Ideal wären jeweils Verdünnungsreihen mit ausreichend langen

Anreicherungszeiten, was jedoch den experimentellen Aufwand enorm vergrößern würde.

Wie der Abb. 39 zu entnehmen ist, treten weitere Abweichungen bei vergleichsweise niedrigen Rohluftkonzentrationen auf. Diese Messpunkte entstammen einer Versuchsreihe, die an der Abluft der Schokoladenmasseherstellung mit dem dynamischen Testsystem durchgeführt wurde. Untersucht wurde das Abbauverhalten von Geruchsstoffen in Biofiltermaterialien. Der Grund für die hohen Abweichungen in diesem Konzentrationsbereich könnte darin liegen, dass ab einem gewissen Konzentrationsniveau der sogenannte Eigengeruch der Biofiltermaterialien oder geruchsaktive Stoffwechselprodukte, die beim Abbau der Geruchsstoffe gebildet werden können, gegenüber dem zu reduzierenden Anlagengeruch überwiegen. In diesem Fall würden derartige Substanzen bei der Berechnung des Odour-Betrags über die Hauptgeruchsstoffe nicht berücksichtigt werden, jedoch wäre ihr Beitrag zum Geruch bei der olfaktometrischen Konzentrationsbestimmung messbar. Entsprechend gering war bei diesen Ansätzen auch der Geruchsabbau, der lediglich zwischen 18 und 52% lag. Weiterhin könnte bei diesen geringen Konzentrationen die Anreicherungszeit nicht lang genug sein, um eine ausreichende Menge einzelner Substanzen für einen entsprechenden Nachweis am GC/MS auf der SPME-Faser zu sorbieren. Wären dies Substanzen mit niedrigen Geruchsschwellenwerten, so würden sie unter Umständen bei der olfaktometrischen Geruchsmessung berücksichtigt, jedoch aufgrund der fehlenden Detektion am GC/MS nicht in die Berechnung des Odour-Betrages mit einbezogen werden. Offensichtlich korrelieren die Geruchsabbaugrade bei niedrigen Geruchskonzentrationen in Verbindung mit geringen Reinigungsleistungen von Biofiltern weniger gut mit den über den Odour-Betrag berechneten Werten.

Diese Feststellung wird auch durch die Darstellung in Abb. 41 bestätigt, in der die soeben diskutierten Messwerte aus Darstellungsgründen nicht berücksichtigt wurden. Es ist die prozentuale Abweichung zwischen den gemessenen und errechneten Geruchsabnahmen gegenüber den olfaktometrisch bestimmten Werten aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, dass sich mit steigendem olfaktometrisch bestimmten Wirkungsgrad auch das Maß der Übereinstimmung verbessert.

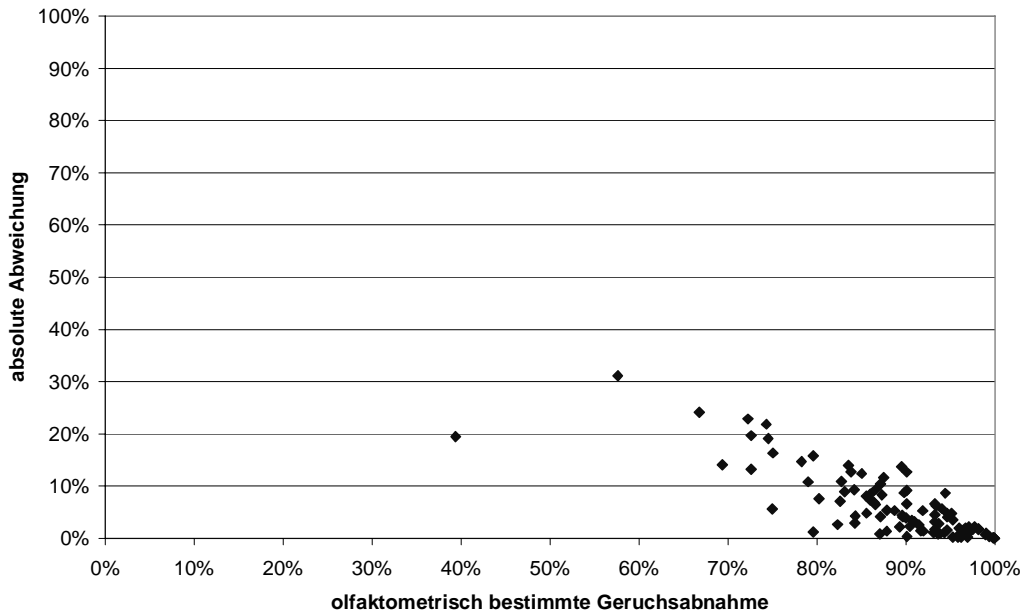


Abb. 41: Absolute Abweichung zwischen den olfaktometrisch gemessenen und den über den Odour-Betrag berechneten Geruchsminderungsgraden in Abhängigkeit von der olfaktometrisch bestimmten Geruchsabnahme. Messungen an unterschiedlichen Versuchsanlagen an Abluft aus der Lebensmittelindustrie.

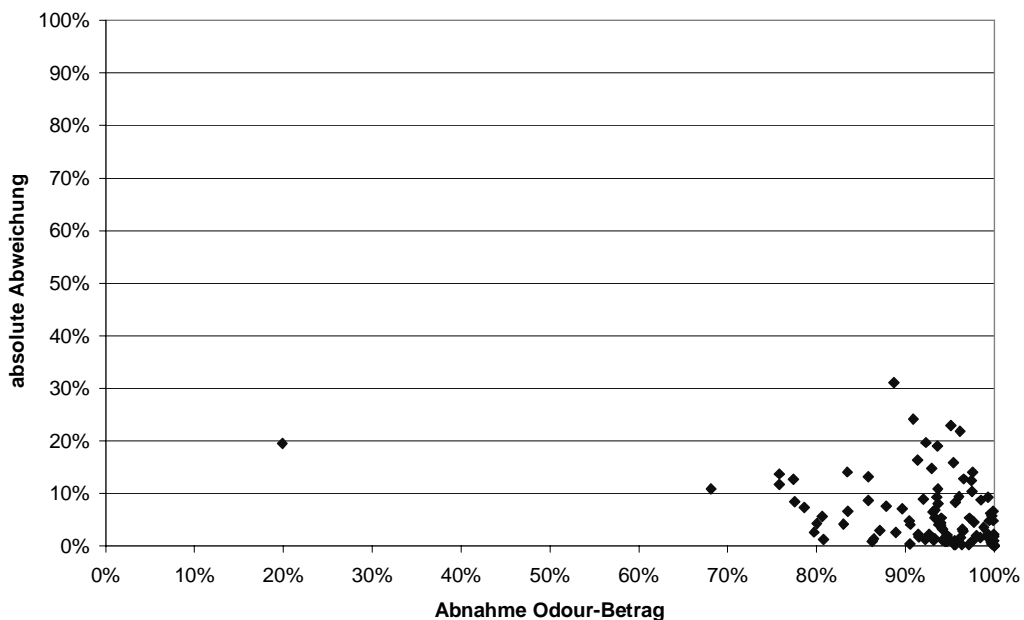


Abb. 42: Absolute Abweichung zwischen den olfaktometrisch gemessenen und den über den Odour-Betrag berechneten Geruchsminderungsgraden in Abhängigkeit von der Abnahme des Odour-Betrags. Messungen an unterschiedlichen Versuchsanlagen an Abluft aus der Lebensmittelindustrie.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Darstellung der Abweichung gegenüber den über den Odour-Betrag errechneten Wirkungsgraden (Abb. 42). Liegen diese Werte oberhalb von etwa 98%, so sind Abweichungen von unter 10% von den olfaktometrisch bestimmten Werten zu erwarten.

Die Ergebnisse zeigen, dass in einem gewissen Rahmen auch Geruchskonzentrationsänderungen über die Hauptgeruchsstoffe beschrieben werden können. Reduziert sich der Odour-Betrag der Hauptgeruchsstoffe wesentlich, so ist ebenfalls von einem vergleichbaren Rückgang der Geruchskonzentration auszugehen. Diese Erkenntnis kann die Auswahl von Abluftbehandlungsverfahren für spezielle Emissionsfälle deutlich vereinfachen. Ist beispielsweise die Zusammensetzung der betrachteten Abluft bekannt, so kann nach der Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe gezielt, z.B. in der geruchsspezifischen Datenbank (Kap. 8), nach Verfahren zur Entfernung dieser Substanzen gesucht werden.

### *9.2.3 Beschreibung der Änderung des Geruchseindrucks über den Odour-Index*

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Beschreibung von Gerüchen ist die charakteristische Geruchsnote. Inwieweit eine Änderung dieser Geruchsqualität über die ermittelten Hauptgeruchsstoffe beschrieben werden kann, ist in Abb. 43 zu sehen.

Das Maß der Veränderung des Geruchseindrucks wurde über die in Kap 9.2.1, Tab. 9 aufgeführten Abluftbehandlungssysteme an den beschriebenen Abluftquellen ermittelt. Die Bestimmung der Geruchsnoten erfolgte am Olfaktometer. Dabei wurde geprüft, ob die von den Probanden bei der Geruchsmessung beschriebenen Geruchseindrücke dem ursprünglichen Anlagengeruch zugeordnet werden können, oder nicht. In Abb. 43 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Abnahme der Hauptgeruchsstoffe dargestellt. Es bleibt in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass es sich bei den Probanden nicht um für die Beschreibung von Geruchseindrücken geschultes Personal handelt. Trotzdem konnten die Anlagengerüche relativ sicher identifiziert werden.

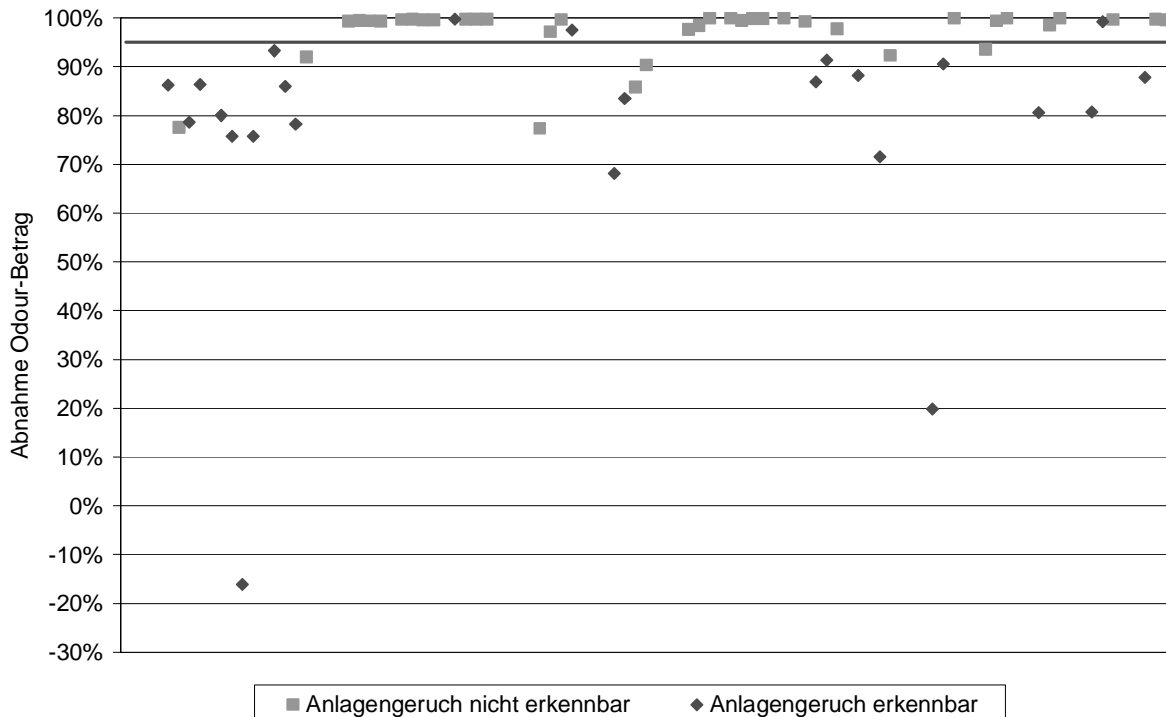


Abb. 43: Darstellung der am Olfaktometer bestimmten Wiedererkennbarkeit eines Anlagengeruches (Geruchscharakteristik der Emissionsquelle) in Abhängigkeit von der Abnahme des Odour-Betrages der Hauptgeruchsstoffe. Messungen an unterschiedlichen Versuchsanlagen an Abluft aus der Lebensmittelindustrie.

Anhand der Abb. 43 ist erkennbar, dass bei einer Reduzierung des über die Hauptgeruchsstoffe berechneten Odour-Betrags von über 95% mit mehr als 90%iger Wahrscheinlichkeit der ursprüngliche Probengeruch nicht mehr erkennbar ist. Das bedeutet, dass auch die Geruchsqualität einer Probe über die Veränderungen des Einflusses der ermittelten Hauptgeruchsstoffe beschrieben werden kann. Es ist somit möglich, anhand der chemisch-analytischen Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe eine Abluftbehandlungsanlage dahingehend zu beurteilen, ob der anlagentypische Geruch nach der Behandlung noch wahrnehmbar ist. Eine entsprechende Bewertung ist beispielsweise bei Biofiltern üblich, da auf diese Weise auch dem Einfluss des Eigengeruchs des Biofiltermaterials Rechnung getragen wird (VDI 3477, 2004). Auch die Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL, 2004) bezieht sich in erster Linie auf Gerüche, die in ihrer Herkunft eindeutig einer verursachenden Anlage zugeordnet werden können, also abgrenzbar gegenüber anderen Umgebungsgerüchen sind.

### 9.3 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass über den Odour-Index aus der Gesamtheit der mit der SPME-GC/MS-Methode nachweisbaren Substanzen einer Geruchsprobe diejenigen Hauptgeruchsstoffe bestimmt werden können, die den vermeintlich größten Einfluss auf die Geruchswirkung haben. Für die chemisch-analytische Beschreibung einer derartigen Probe konnte somit die Anzahl der relevanten Substanzen deutlich reduziert und folglich auch der Aufwand für die Auswertung verringert werden.

Anhand von Konzentrationsänderungen der Hauptgeruchsstoffe konnten sowohl bei Abluft aus der Öl- und Fettveredelung als auch aus der Schokoladenherstellung über den Odour-Betrag Veränderungen der Geruchsstärke und Geruchscharakteristik von Abluftproben beschrieben werden. Diese Erkenntnis kann zur abschätzenden Beurteilung von Abluftbehandlungsanlagen zur Geruchsreduzierung genutzt werden. So hat sich anhand zahlreicher Versuche gezeigt, dass ab einer Reduzierung des Odour-Betrags der Hauptgeruchsstoffe um ca. 98% der olfaktometrische Wirkungsgrad der betrachteten Anlage maximal um 10% von diesem Wert abweicht. Der am Olfaktometer bestimmte anlagentypische Geruch ist ab einer rechnerischen Reduzierung von 95% mit mehr als 90%-iger Sicherheit nicht mehr wahrnehmbar. Da sich demnach Geruchsemissionen über Hauptgeruchsstoffe charakterisieren lassen, kann folglich bei der Abluftbehandlung ein potenziell geeignetes Verfahren im Hinblick auf diese Substanzen ausgewählt werden.

Dieser Betrachtung liegt die Anreicherung der Geruchsstoffe auf einer SPME-Faser zugrunde. Bei dieser Methode sollte zwecks einer genaueren Beurteilung der Geruchsprobe eine übermäßige Übersättigung der Faser verhindert werden, da es sonst vermehrt zu Verdrängungseffekten unter den Analyten kommt, und somit die Gaszusammensetzung bei der Analyse nicht richtig abgebildet wird. Verstärkt wird dieser Effekt bei einer gleichzeitigen Veränderung der Stoffzusammensetzung in der Gasphase durch beispielsweise selektive Reinigungsverfahren. Beides kann zu erheblichen Fehleinschätzungen bei der Beurteilung von Geruchsemissionen über die Odour-Indices führen.

Entsprechend der hier gewonnenen Erkenntnisse über die SPME-Methode stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob sie noch weitere Optimierungsmöglichkeiten bietet. Zum einen kann zur Vermeidung der Übersättigung sicherlich die Anreicherungszeit verkürzt werden. Eine verkürzte Anreicherungszeit kann aber auch dazu führen, dass aufgrund sehr geringer Konzentrationen einzelner geruchsaktiver Substanzen in der Probe, diese nicht in ausreichender Menge für deren Detektion auf der Faser sorbieren, und somit nicht das vollständige bzw. ein noch geringeres Stoffspektrum abgebildet wird. Auch dies würde die Resultate verfälschen. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Probe vor der Anreicherung zu verdünnen, was aber ähnliche Effekte wie bei einer verkürzten Anreicherung zur Folge hätte. Weiterhin stehen auch andere Fasern zur Verfügung, die kein so starkes Verdrängungsverhalten aufweisen, jedoch zeigen diese auch ein schlechteres Anreicherungsverhalten (Kleeberg et al., 2005a).

Als weitere Methoden würden natürlich auch quantitative Anreicherungsverfahren mit beispielsweise Adsorptionsröhrchen in Frage kommen. Eine vollständige quantitative Auswertung der Inhaltsstoffe einer Probe mit diesen Methoden wäre jedoch sehr aufwendig und somit bei einem erhöhten Probenaufkommen nur schwer zu realisieren. Zwar mag eine derart intensive Analyse in einigen Fällen sinnvoll oder gar erforderlich sein, jedoch sinkt mit steigendem Analyseaufwand nachvollziehbar auch die Attraktivität einer Methode zur Charakterisierung von Geruchsproben über Hauptgeruchsstoffe. Folglich muss sehr wahrscheinlich auch in Zukunft weiterhin mit einigen Kompromissen bei der chemisch-analytischen Beschreibung von Gerüchen gelebt werden.

---

## **10 OPTIMIERUNG DER TESTSYSTEME**

Verschiedenen Autoren (Bouzalakos et al., 2004; Van Harreveld, 2004) sehen vor allem im Hinblick auf Geruch emittierende Betriebe einen unbedingten Bedarf an Techniken, mit denen man Abluftbehandlungsverfahren vor ihrer direkten großtechnischen Umsetzung auf ihre Eignung hin testen kann. Genau zu diesem Zweck sind im Rahmen dieser Arbeit Testsysteme entwickelt worden. Sie sollen dazu dienen, in Vorabexperimenten im Labormaßstab einen ersten Eindruck von der Anwendbarkeit eines potentiell geeigneten Abluftbehandlungsverfahrens zur Geruchsreduzierung für einen speziellen Emissionsfall zu erhalten. Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass reproduzierbare und nachvollziehbare Ergebnisse erhalten werden können, die eine Aussage über das Verhalten des Verfahrens im Anwendungsfall ermöglichen. Hierbei geht es jedoch nicht um die Ermittlung belastbarer Daten für eine großtechnische Auslegung, sondern viel mehr um die Möglichkeit unterschiedliche Behandlungsmethoden unter definierten und gleichen Bedingungen miteinander zu vergleichen, um das vermeidlich beste Verfahren für darauf folgende Auslegungsversuche auszuwählen.

Folglich geht es bei der Optimierung dieser Systeme darum, größtmögliche Unterschiede zwischen den eingesetzten Behandlungsverfahren bezüglich des Geruchsabbaus darzustellen. Um für dieses Problem geeignete und reproduzierbare Versuchsbedingungen festlegen zu können, müssen vorerst mögliche Einflussfaktoren auf das System untersucht werden. Während die Betriebsparameter bei dem dynamischen Testsystem an die einer kontinuierlich betriebenen Abluftbehandlungsanlage angepasst werden, müssen für das statische Testsystem die optimalen Versuchsbedingungen erst ermittelt werden.

### **10.1 Optimierung des statischen Testsystems**

Bevor eine Methode oder ein Verfahren optimiert werden kann, muss eine Zielgröße definiert werden, die man optimieren möchte. Da mit diesem statischen Testsystem Medien zur Abluftbehandlung untersucht werden sollen, gilt im weitesten Sinne die

Geruchsabbauleistung als Zielgröße. Um jedoch den größtmöglichen Unterschied der verschiedenen getesteten Materialien abbilden zu können, wird bei der statistischen Versuchsplanung zur Optimierung des statischen Systems die Standardabweichung des prozentualen Geruchsabbaus als Zielgröße verwendet. Als Maß für die Streuung der jeweiligen Messwerte um einen Mittelwert, ermöglicht die Standardabweichung eine Beurteilung des Grades der Übereinstimmung der Messwerte. Da bei der Anwendung des statischen Testsystems größtmögliche Unterschiede zwischen den Materialien bezogen auf den Geruchsabbau aufgezeigt werden sollen, sollte die Standardabweichung unter optimalen Versuchsbedingungen ein Maximum aufweisen, was eine praktische und sinnvolle Auswertung der erhaltenen Daten ermöglicht. Ein weiterer Vorteil der Verwendung der Standardabweichung als Zielgröße, ist darin zu sehen, dass problemlos auch eine größere Anzahl an Materialien verglichen und standardisiert ausgewertet werden können, was bei einem einfachen Vergleich des Geruchsabbaus unterschiedlicher Materialien beispielsweise nicht direkt möglich ist.

Der Schwerpunkt der Optimierungsversuche lag auf dem Vergleich unterschiedlicher Biofiltermaterialien für die biologische Abluftbehandlung, da der biologische Stoffabbau von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig ist (s. Kap. 4.3.1) und diese nach Möglichkeit gleich bei der Optimierung berücksichtigt werden sollten.

Als mögliche Einflussfaktoren auf die Versuchsbedingungen selbst kommen im Wesentlichen die Lagerzeit (Testdauer), das Testsubstanz zu Abluft Verhältnis, das Konzentrationsniveau der zu untersuchenden Abluft, sowie die Temperatur in Frage. Da die Versuche immer bei nahezu konstanter Labortemperatur durchgeführt wurden, wird dieser Faktor als konstant angenommen und dessen Einfluss nicht weiter untersucht.

### 10.1.1 Vorversuche (Abluft aus Schokoladenherstellung)

#### Optimierung der Testparameter für biologischen Geruchsabbau

Um die generelle Eignung des Systems vorab zu prüfen, wurde in ersten Versuchsreihen untersucht, ob es zum Testen biologischer Abluftbehandlungsverfahren einsetzbar ist. Als Biofiltermaterial kam in diesem Fall der Siebüberlauf (>20 mm) von reifem Kompost zum Einsatz. Die Abluftprobe stammte aus der Schokoladenherstellung. Bei sonst gleichen Bedingungen wurde der Geruchsabbau des Materials bei unterschiedlichen Materialmengen/Abluftvolumina-Verhältnissen und Lagerzeiten untersucht.

Für die Variation der Menge an Testmaterial wurden bei einer Abluftmenge von 5 L, 5 unterschiedliche Volumina zwischen 5 und 100 mL von reifem Kompost untersucht. In Abb. 44 ist der Geruchsabbau in Abhängigkeit vom Kompost/Abluft-Verhältnis nach 20 h Lagerungsdauer dargestellt. Bei allen Materialmengen zwischen 2 und 20 mL/L wurde eine Reinigungsleistung von 80% gemessen, während bei Materialmengen von 1 mL/L nur eine Reinigungsleistung von 70% erreicht wurde. Für die Untersuchung des Einflusses der Lagerungsdauer wurden daher Mengen von 2 und 5 mL Testsubstanz je L Abluft verwendet. Die Proben wurden direkt nach der Materialzugabe und nach den Lagerungszeiten von 1,5; 4 und 21,5 h analysiert. Die in Abb. 45 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Geruchskonzentration der Abluft auch in dem Referenzbeutel ohne Testsubstanz nach 21,5 h um 50% abnimmt. Ähnliche Ergebnisse sind auch von Van Harreveld (2003) beschrieben worden, der eine Reduzierung des Geruchs auf die Hälfte nach einer Lagerung von 30 h unter vergleichbaren Bedingungen feststellte. Laut Van Harreveld bleiben die Proben bei Lagerungen bis zu 12 h relativ unverändert. Zur Minimierung der die Geruchsprobe verändernden Störeinflüsse wie Sorption, Diffusion oder chemische Reaktionen, sollte die Testdauer daher nicht zu lange gewählt werden.

Der Geruchsabbau unterscheidet sich bei den beiden Substanzmengen nicht wesentlich voneinander, jedoch ändert sich die Geruchsnote. Sie schlägt nach 4 h Lagerungsdauer bei einer Materialmenge von 5 mL/L von schokoladig in erdig um,

während bei einer Testmenge von 2 mL/L der Schokoladengeruch weiterhin wahrnehmbar blieb.

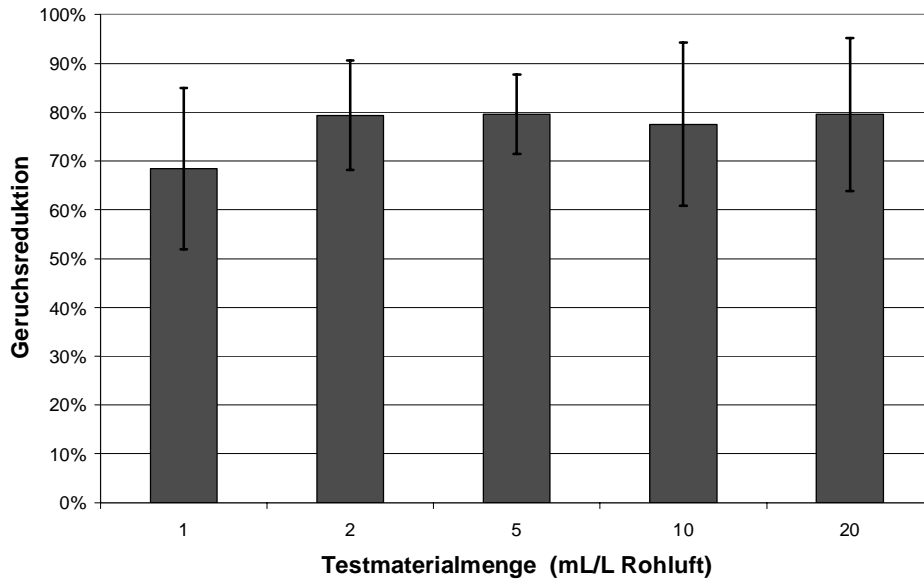


Abb. 44: Geruchsreduktion des statischen Testsystems in Abhängigkeit von der Menge Kompost als Testsubstanz je L geruchsbeladene Abluft aus der Schokoladenherstellung (Dreifachbestimmung).

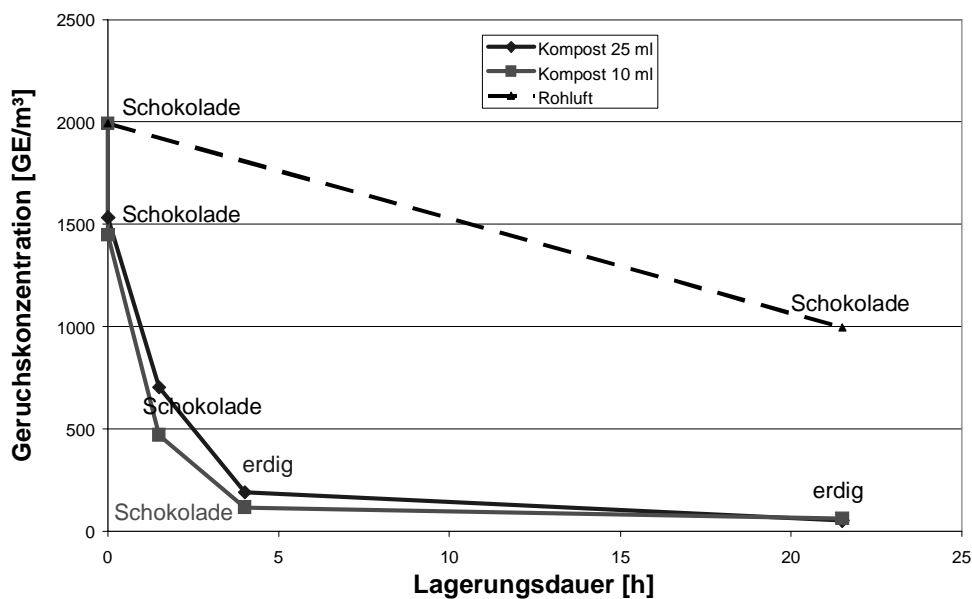


Abb. 45: Geruchskonzentration im statischen Testsystem in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (Abluft aus der Schokoladenherstellung, Einfachbestimmung).

Die Ergebnisse der olfaktometrischen Untersuchungen sind mit der SPME-GC/MS-Methode verifiziert worden (Abb. 46). Der Verbleib der identifizierten Substanzen ist als relative Peakfläche dargestellt. Direkt nach der Beaufschlagung des Materials mit Abluft konnte in beiden Versuchsansätzen die Entfernung von lediglich 5 Substanzen beobachtet werden, während nach 1,5 h Lagerungsdauer die meisten Stoffe aus der Abluft entfernt worden sind. Bei dem Ansatz mit einem Kompost zu Abluftverhältnis von 2 mL/L sind nach 4 h noch 4 Substanzen in der mit Kompost behandelten Abluft nachweisbar. Bei einem Kompost zu Abluftverhältnis von 5 mL/L sind hingegen nach 4 h Lagerungsdauer nur noch Essigsäure und Butandiol in Spuren in der Gasphase vorhanden. In beiden Fällen konnte nach 21,5 h keine wesentliche weitere Abnahme der Geruchsstoffkonzentrationen beobachtet werden.

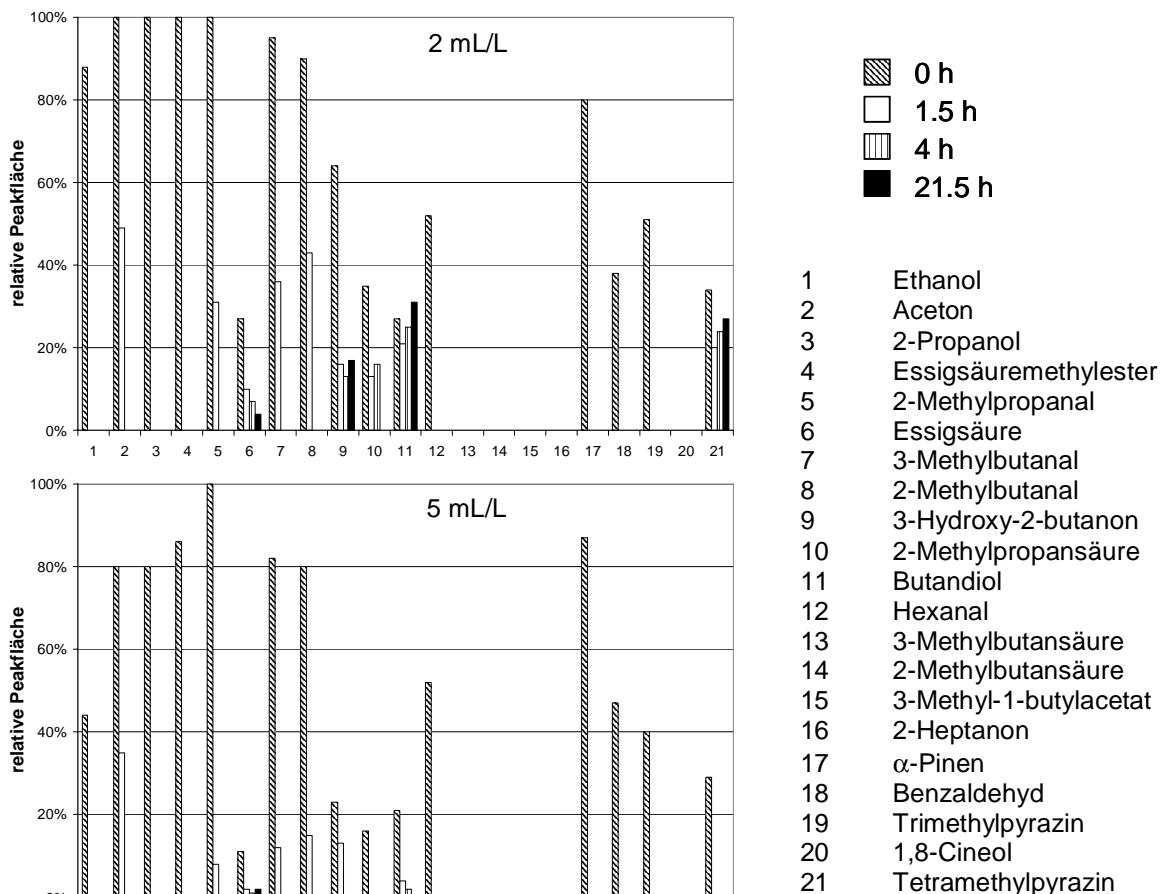


Abb. 46: Verbleib der Geruchsstoffe nach unterschiedlichen Lagerungsdauern für Testversuche mit 2 und 5 mL Kompost je L Abluft.

Die Ergebnisse bestätigen den Einfluss der Lagerungsdauer und des Material/Abluft-Verhältnisses auf die Abbauleistungen der Testsubstanz. Weiterhin ist zu erkennen, dass Unterschiede in der Reinigungsleistung dargestellt werden können. Diese Untersuchungen haben darüber hinaus ergeben, dass es erforderlich ist, die Beutelgröße an die Art der zu untersuchenden Testsubstanz anzupassen. Entscheidend ist die minimale, reproduzierbar abmessbare Materialmenge, da sonst die Testbeutel bei der Einstellung gewünschter Testmaterialmengen/Abluft-Verhältnisse schnell unhandliche Dimensionen annehmen können, oder bei festgelegter Beutelgröße im Falle von grobkörnigen Materialien das Materialvolumen bei Einhaltung des geforderten Verhältnisses zur Abluft nicht mehr repräsentativ abmessbar ist, da die Menge zu klein wird.

### Mechanismen der Geruchsreduzierung

In einer weiteren Versuchsreihe sollte überprüft werden, ob mit dem statischen Testsystem wirklich biologische Abbauvorgänge abgebildet werden, oder ob die Reduzierung des Geruchs auf beispielsweise Ab- bzw. Adsorptionsvorgänge zurückzuführen ist. Zur Darstellung reiner Adsorptionsvorgänge wurde die gleiche Menge an Wasser entsprechend des Wassergehaltes im Kompost (bei 40% Wassergehalt und 25 mL eingesetztem Material entsprechend 10 mL Wasser) in einen Testbeutel gegeben und mit der Probenluft beaufschlagt. Für einen reinen Adsorptionsversuch wurde 1 mL/L Aktivkohle verwendet. Die Testansätze wurden jeweils direkt nach der Abluftzugabe und nach einer Lagerungsdauer von vier Stunden beprobt und analysiert. Abb. 47 zeigt die relative Geruchskonzentration der unterschiedlichen Probenansätze. Die Konzentration der Rohluft wurde ebenfalls zu den angegebenen Zeiten gemessen. So konnte überprüft werden, inwieweit sich die Probe über die Zeit auch ohne den Einfluss der Testsubstanzen durch beispielsweise Undichtigkeiten im Beutel oder natürliche Zerfallsprozesse verändert. Dies dient zur besseren Einschätzung der Ergebnisse.

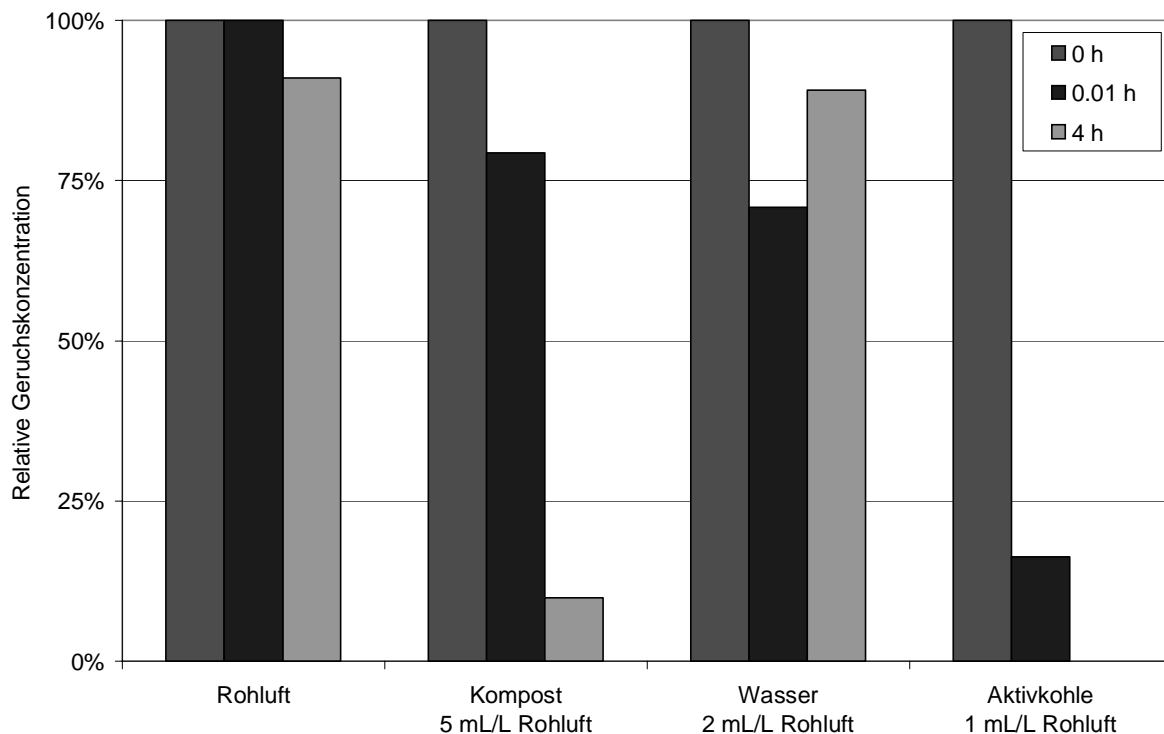


Abb. 47: Am statischen Testsystem ermittelte relative Geruchskonzentrationen nach der Beaufschlagung ausgewählter Testmedien mit Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer.

Direkt nach der Zugabe der Abluft konnte bei dem Adsorptionsversuch bereits eine Geruchsabnahme von etwa 80% beobachtet werden. Bei den Testansätzen mit Kompost und Wasser wurde der Geruch lediglich um ungefähr 25% reduziert. Während sich nach vier Stunden Lagerungsdauer die Geruchskonzentration bei dem mit Wasser gefüllten Testsystem nicht weiter verringert, konnte bei dem Kompost eine deutliche Geruchsreduzierung festgestellt werden. Bei der mit Aktivkohle behandelten Abluft konnte nach der beschriebenen Versuchsdauer kein Geruch mehr gemessen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die durch Ad- und Absorption hervorgerufene Abnahme des Geruchs im Wesentlichen sofort bei dem Kontakt mit der geruchsbelasteten Abluft erfolgt. Eine verlängerte Lagerungsdauer führt hier nicht wesentlich zu einer weiteren Reduzierung. Bei dem Adsorptionsversuch steigt die Konzentration sogar wieder leicht an, was eventuell auf eine Verdampfung des Wassers und die damit verbundene Freisetzung der Geruchsstoffe zurückzuführen ist. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass die bei dem Kompostansatz festgestellte

Geruchsabnahme innerhalb der ersten Sekunden ebenfalls durch Ad- und Absorptionsvorgänge bedingt ist. Da der Hauptanteil des Geruchs jedoch über einen weitaus längeren Zeitraum von vier Stunden abnimmt, was laut der obigen Ergebnisse nicht allein durch Ad- bzw. Absorption beschrieben werden kann, wird dies auf biologischen Abbau der Geruchsstoffe zurückzuführen sein. Folglich kann mit dem betrachteten statischen Testsystem tatsächlich biologischer Geruchsabbau gemessen und entsprechend unterschiedliche Biofiltermaterialien hinsichtlich ihrer Abbauleistung verglichen werden. Für die Optimierung der Versuchsbedingungen dieses Testsystems wurde die statistische Versuchsplanung (Kap. 5.2) angewendet.

### *10.1.2 Simultane Optimierung der Zielgröße*

Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Versuche wurde mit Hilfe der Software Statistica, Version 7.1 (Statsoft, Tulsa, USA) ausgewertet.

#### Versuchsbedingungen

Für die simultane Optimierung der Zielgröße (Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Geruchsstoffe, des Geruchs bzw. des Odour-Betrags) wurden Geruchsproben von Emissionsquellen aus dem Bereich der industriellen Öl- und Fettveredelung und der Kaffeeveredelung verwendet. Die Optimierung wurde jeweils vergleichend an zwei Biofiltermaterialien durchgeführt. Bei den Versuchen mit der Abluft aus der Öl- und Fettveredelung wurden Sojakompost und Wurzelholz verwendet, für die Kaffeearbluft Sojakompost und das Kokosfaser/Torf-Gemisch. Diese Materialien wurden für die Optimierungsversuche ausgewählt, da sich bereits im Rahmen von Vorversuchen gezeigt hat, dass sie sich in ihrem Geruchsabbauverhalten teilweise deutlich voneinander unterscheiden und eben diese Unterschiede bei der Optimierung aufgezeigt werden sollen.

In Anlehnung an die Vorversuche wurden die Einflüsse der drei Faktoren Lagerungsdauer, Material/Abluft-Verhältnis und Geruchskonzentration der Probe auf die Standardabweichung des prozentualen Geruchs- bzw. Einzelstoffabbaus der Biofiltermaterialien (Zielgröße) mit Hilfe eines Box-Behnken-Versuchsplanes (Kap. 5.2) simultan untersucht. Anhand der in Tab. 10 festgelegten Einflussfaktoren und

der entsprechenden Stufen ergibt sich der in Tab. 11 aufgestellte Versuchplan nach Box-Behnken.

Tab. 10: Ausgewählte Faktoren und die eingestellten Stufen für den Box-Behnken-Versuchsplan zur Optimierung des statischen Testsystems

Faktoren		Stufe			
		-1	0	+1	
x <sub>1</sub>	Rohluftkonz.				
	Öl und Fett	[GE/m <sup>3</sup> ]	10.000	20.000	30.000
	Kaffee	[GE/m <sup>3</sup> ]	150.000	250.000	1.000.000
x <sub>2</sub>	Lagerzeit	[h]	0	3	6
x <sub>3</sub>	Menge (Material/Abluft)	[mL/L]	2	5	10

Tab. 11: Box-Behnken-Versuchsplan für 3 Faktoren und 3 Stufen zur Optimierung des statischen Testsystems

Versuchsnummer	Faktoren			Zielgröße
	Rohluftkonz. Öl und Fett / Kaffee [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge (Material/Abluft) [mL/L]	
4	10.000 / 150.000	0	5	y <sub>4</sub>
8	10.000 / 150.000	3	2	y <sub>8</sub>
7	10.000 / 150.000	3	10	y <sub>7</sub>
3	10.000 / 150.000	6	5	y <sub>3</sub>
12	20.000 / 250.000	0	2	y <sub>12</sub>
11	20.000 / 250.000	0	10	y <sub>11</sub>
13, 14, 15	20.000 / 250.000	3	5	y <sub>13</sub> , y <sub>14</sub> , y <sub>15</sub>
10	20.000 / 250.000	6	2	y <sub>10</sub>
9	20.000 / 250.000	6	10	y <sub>9</sub>
2	30.000 / 1.000.000	0	5	y <sub>2</sub>
6	30.000 / 1.000.000	3	2	y <sub>6</sub>
5	30.000 / 1.000.000	3	10	y <sub>5</sub>
1	30.000 / 1.000.000	6	5	y <sub>1</sub>

Eine Lagerzeit von null Stunden entspricht einer sofortigen Entleerung des Testbeutels direkt nach dessen vollständiger Befüllung. In diesen Fällen kommt die Abluft nur wenige Sekunden mit dem Reinigungsmedium in Kontakt.

Optimierung an Abluft aus Öl- und Fettveredelung

In Tab. 12 sind die aus den olfaktometrischen Messungen berechneten Geruchsabbauraten für die einzelnen Versuche aufgeführt.

Tab. 12: Geruchsabbauraten für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

Versuchsnr.	Rohluftkonz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge [mL/L]	Geruchsabbau		Standartabw. Geruchsabbau
				Sojakompost	Wurzelholz	
4	10.000	0	5	4%	23%	11,31
8	10.000	3	2	60%	64%	2,83
7	10.000	3	10	85%	88%	2,12
3	10.000	6	5	89%	85%	2,83
12	20.000	0	2	36%	47%	7,78
11	20.000	0	10	58%	71%	9,19
13	20.000	3	5	89%	81%	5,66
14	20.000	3	5	87%	91%	2,83
15	20.000	3	5	86%	88%	1,41
10	20.000	6	2	85%	79%	4,24
9	20.000	6	10	93%	95%	1,41
2	30.000	0	5	4%	4%	0,00
6	30.000	3	2	59%	39%	14,14
5	30.000	3	10	81%	84%	2,12
1	30.000	6	5	85%	85%	0,00

Bei der Betrachtung der Werte wird die gute biologische Abbaubarkeit des Geruches deutlich. Schon nach wenigen Sekunden Kontaktzeit der Abluft mit dem Biofiltermaterial sind Geruchsabbaugrade von bis zu knapp 50% zu beobachten gewesen. Weiterhin zeigen auch diese Ergebnisse, dass sowohl die Lagerzeit als auch das Materialmenge/Abluft-Verhältnis einen Einfluss auf den Geruchsabbau im Testsystem haben. Dies wird ebenfalls aus dem zugehörigen Paretdiagramm der Effekte (Abb. 48) deutlich. Aus diesem Diagramm geht hervor, dass die Lagerzeit und das Materialmenge/Abluft-Verhältnis den größten Einfluss auf die Zielgröße haben, wobei dieser bei beiden Faktoren jedoch nicht signifikant ist, was in der Abbildung durch das nicht Erreichen der Signifikanzschränke ( $p=0,05$ ) deutlich wird. Weiterhin geht aus dieser Darstellung hervor, dass bei steigenden Werten der entsprechenden Einflussparameter die Standardabweichung des Geruchsabbaus der beiden Materialien sinkt (negative Regressionskoeffizienten), also der Unterschied

der Geruchsabbauleistungen geringer wird. Diese Tendenzen sind auch anhand der Darstellung der statistischen Ergebnisse im Flächenplot (Abb. 49) ersichtlich. Mit steigenden Werten der Einflussgrößen sinkt die Standardabweichung. Diese zeigt jedoch kein klares Maximum, vielmehr bilden sich die Randwerte des betrachteten Intervalls des Materialmenge/Abluft-Verhältnisses als Extremwerte heraus. Hinsichtlich einer Optimierung wären entsprechend der Grafik sehr kleine Verhältnisse zu bevorzugen, wobei der Randwert null offensichtlich keinen Sinn macht. Aus diesem Grund scheinen Materialmenge/Abluft-Verhältnisse von etwa 1 - 2 mL/L optimal. Bezüglich der Lagerungsdauer stellen sich kurze Kontaktzeiten zwischen 1 - 2 h als vorteilhaft heraus. Die Geruchskonzentration der Abluft hatte keinen Einfluss auf den Antwortflächenverlauf. Die nicht abgebildeten Flächenplots sind im Anhang (Anhang, A 10-1) dargestellt.

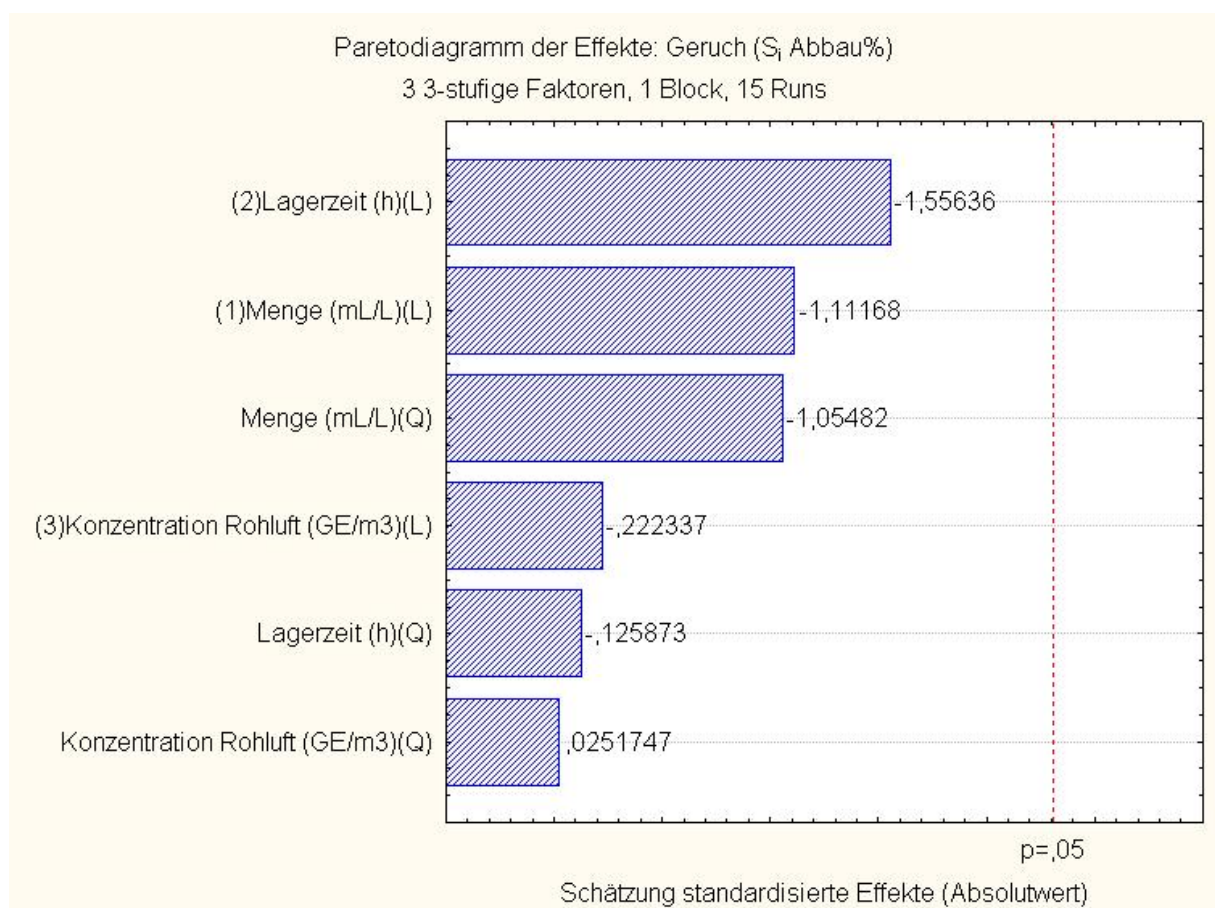


Abb. 48: Paretodiagramm der Effekte auf die Standardabweichung des prozentualen Geruchsabbaus für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

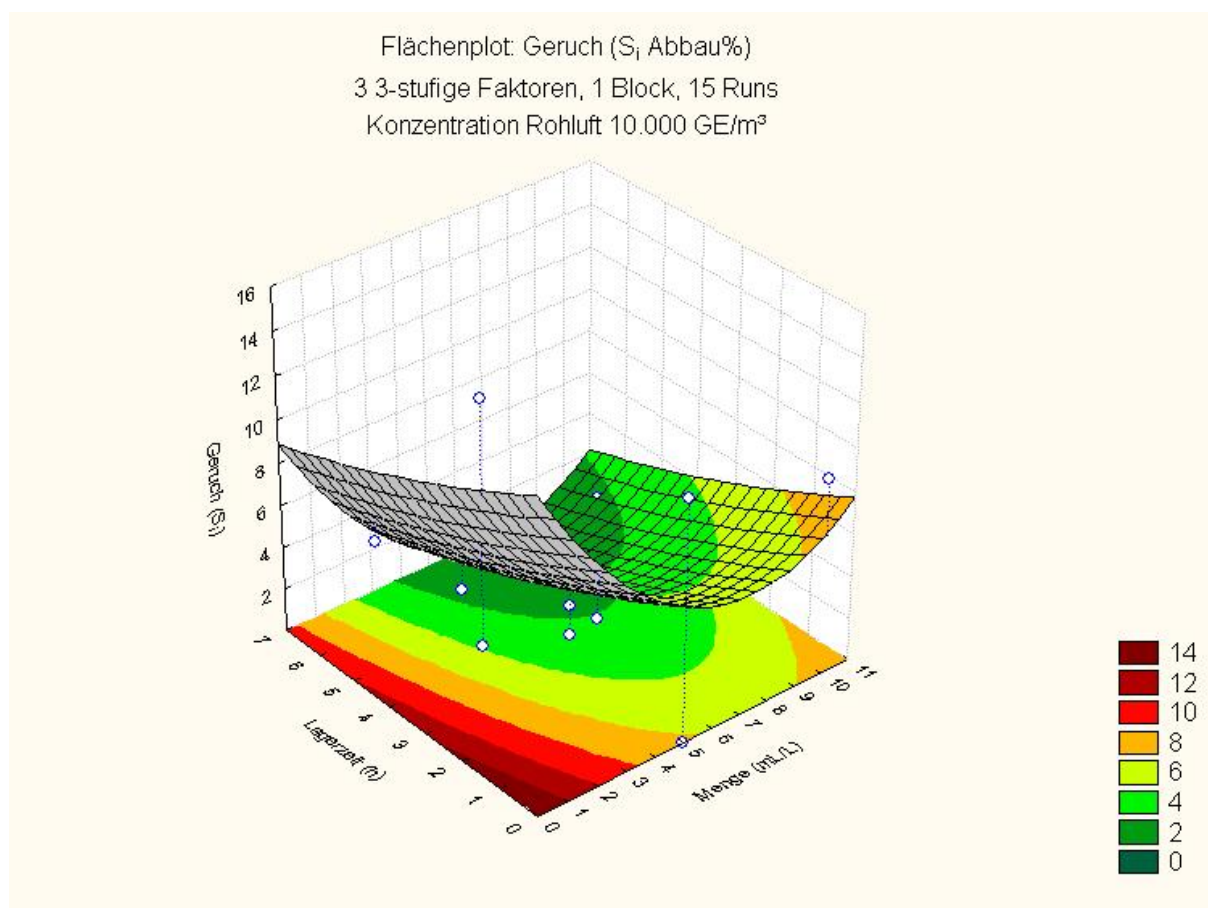


Abb. 49: Flächenplot für die Standardabweichung des prozentualen Geruchsabbaus für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei einer Rohluftkonzentration von 10.000 GE/m<sup>3</sup>

Die Lage der vermeidlich optimalen Testparameter am Rand des betrachteten Wertebereichs ist vermutlich auf die gute biologische Abbaubarkeit des Geruchs zurückzuführen. Lassen sich die Geruchsstoffe leicht abbauen, so wird auch keine besondere Anforderung an das Biofiltermaterial gestellt. Der Geruch ist schnell abgebaut und ein Unterschied zwischen verschiedenen Materialien kaum noch festzustellen. Am ehesten lassen sich dann Qualitätsvorteile eines der Materialien unter Extrembedingungen abbilden.

Als zweite mögliche Zielgröße zur Bewertung der Testmaterialien wurde die Abnahme der Einzelsubstanzen in der Probe untersucht. Für diese Betrachtung wurden die Peakflächen des GC/MS-Chromatogrammes herangezogen. Tab. 13 zeigt die Reduktion der Gesamtpeakflächen für die beiden Biofiltermaterialien in Abhängigkeit der Faktoren. Bei der Berechnung der Werte ergaben sich in einigen

wenigen Fällen negative Abnahmen der Gesamtpeakfläche. Entsprechende Werte wurden auf null gesetzt, da eine Zunahme der Geruchsstoffe in der Probe bei dieser Art der Betrachtung keinen Sinn ergibt. Der Grund für diese Beobachtung wird vermutlich auf die bereits in Kap. 9.2 beschriebenen Verdrängungseffekte zurückzuführen sein.

Tab. 13: Abnahme der mit der SPME-Methode bestimmten Gesamtpeakfläche für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

Versuchsnr.	Rohluftkonz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge [mL/L]	Abnahme Gesamtpeakfläche		Standartabw. Peakfläche
				Sojakompost	Wurzelholz	
4	10.000	0	5	5,54%	2,19%	2,37
8	10.000	3	2	11,21%	7,75%	2,44
7	10.000	3	10	18,93%	16,61%	1,64
3	10.000	6	5	18,59%	16,92%	1,18
12	20.000	0	2	0,00%	0,00%	0,00
11	20.000	0	10	0,28%	3,32%	2,15
13	20.000	3	5	7,17%	11,37%	2,97
14	20.000	3	5	9,49%	8,41%	0,76
15	20.000	3	5	9,34%	11,96%	1,85
10	20.000	6	2	14,78%	13,60%	0,84
9	20.000	6	10	19,36%	19,89%	0,37
2	30.000	0	5	5,55%	3,11%	1,72
6	30.000	3	2	7,00%	7,07%	0,05
5	30.000	3	10	16,01%	14,18%	1,30
1	30.000	6	5	11,87%	11,77%	0,08

Auch hier wird die Signifikanz der Einflussfaktoren auf die Zielgröße anhand des entsprechenden Paretdiagramms (Abb. 50) untersucht. Anhand der Darstellung im Paretdiagramm lässt sich erkennen, dass die untersuchten Faktoren keinen signifikanten Einfluss auf die Standardabweichung der Gesamtpeakflächenabnahmen haben. Den vergleichsweise stärksten, wenn auch nicht signifikanten Einfluss hat die Rohluftkonzentration, sie übt einen negativen linearen Effekt auf die Zielgröße aus. Ein Einfluss der Konzentration ist auch bei der Betrachtung der Flächen- (Abb. 51) und Konturenplots (Abb. 52) für dieses Beispiel zu erkennen. Eine Erhöhung der Rohluftkonzentration führt zu einer schärferen Ausbildung des Maximums. Jedoch wird der Wert des Maximums mit steigender Konzentration geringer (negativer Effekt) und somit auch der Unterschied zwischen den getesteten Materialien. Die Position des Maximums hingegen verändert sich nicht in

Abhängigkeit von der Konzentration. Entsprechend kann im Hinblick auf die Abnahme der Gesamtpeakfläche der optimale Betriebspunkt aus den Konturenplots bei einem Material zu Abluftverhältnis von etwa 7 mL/L und einer Lagerdauer von 1,5 – 2 Stunden abgelesen werden. Je höher die Konzentration der Probenluft, desto wichtiger scheint es, diese Versuchsbedingungen einzuhalten.

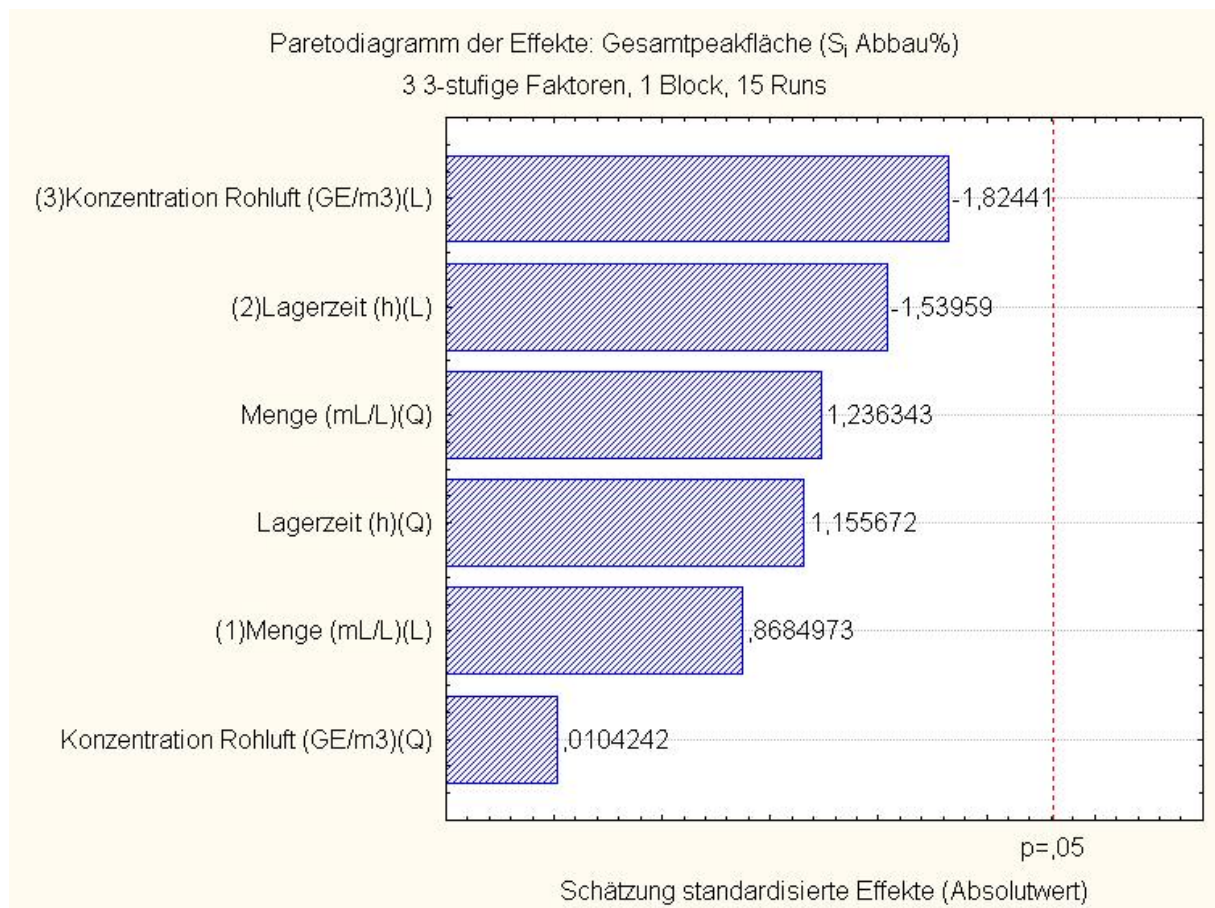


Abb. 50: Paretdiagramm der Effekte auf die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Gesamtpeakflächen für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

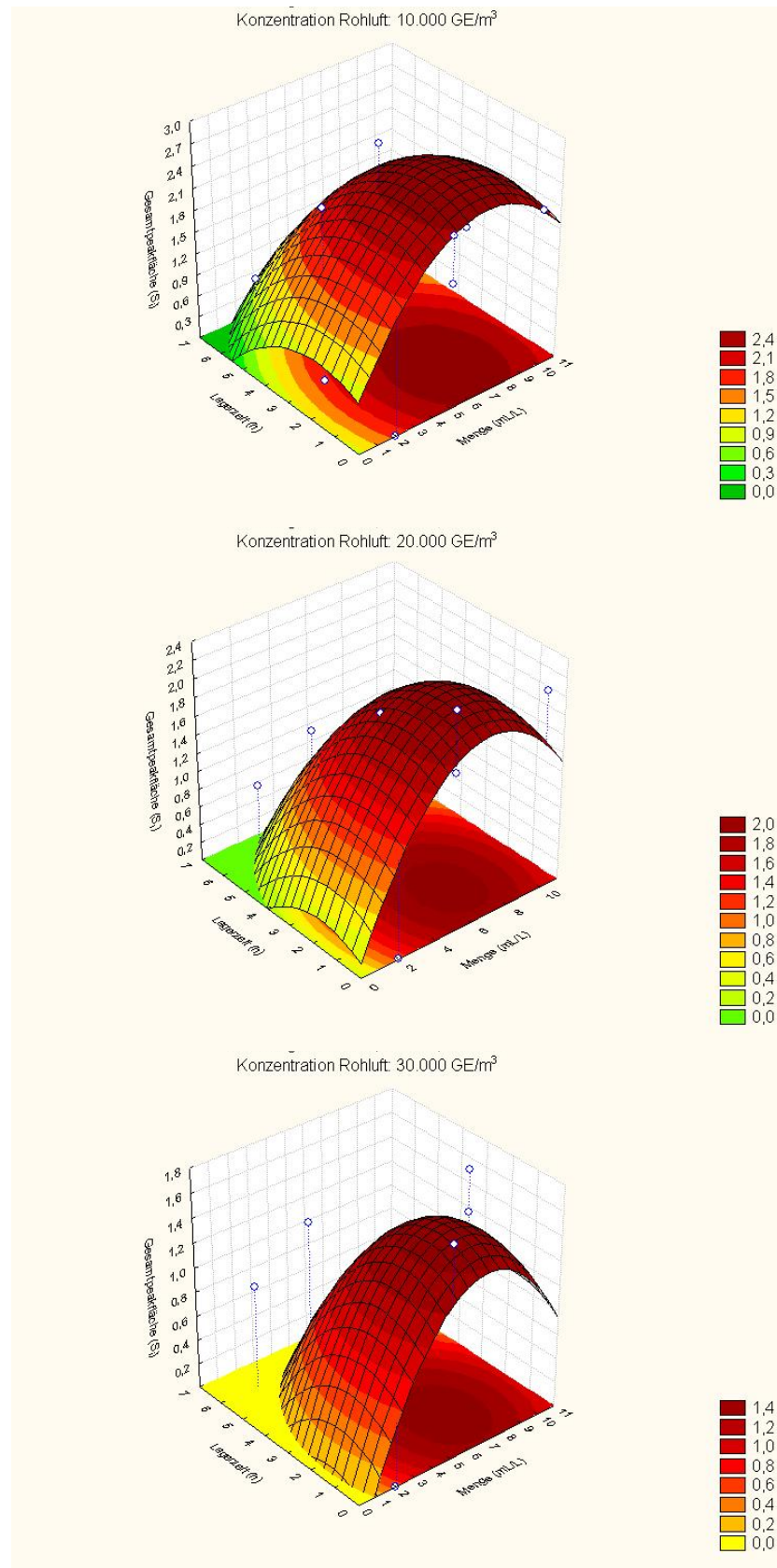


Abb. 51: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Gesamtpeakflächen für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei unterschiedlichen Konzentrationen der Rohluft

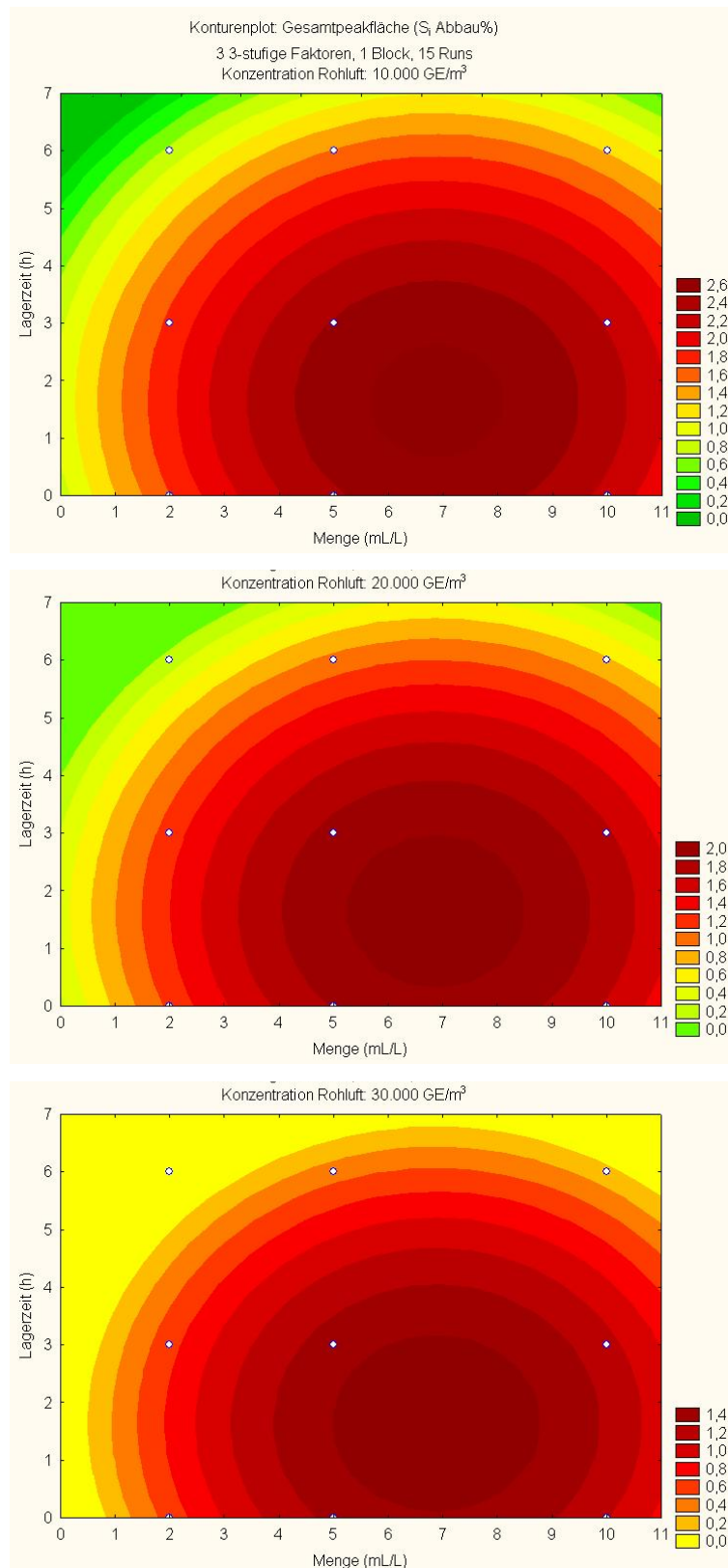


Abb. 52: Konturenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Gesamtpeakflächen für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei unterschiedlichen Konzentrationen der Rohluft

Die Ergebnisse aus der Optimierung bezüglich der Gesamtpeakfläche decken sich besonders bezogen auf das Materialmenge/Abluft-Verhältnis nicht mit den Erkenntnissen aus der Betrachtung des Geruchsabbaus. Gründe hierfür können darin liegen, dass der Geruchsabbau im Wesentlichen durch den Abbau der Hauptgeruchsstoffe beeinflusst wird, da diese den größten Einfluss auf den Summenparameter Geruch haben. Bei der Betrachtung der Gesamtpeakfläche werden auch nicht oder nur schwach riechende Stoffe in gleichem Maße mit erfasst. Sind beispielsweise die Hauptgeruchsstoffe leicht biologisch abbaubar, aber die Abluftprobe enthält einen weiteren großen Anteil an nicht riechenden, schwerer abbaubaren Substanzen, so können sich die optimalen Versuchsbedingungen für einen qualitativen Vergleich der selben Materialien deutlich voneinander unterscheiden. Abb. 53 zeigt beispielhaft die Standardabweichungen zweier Biofiltermaterialien bezüglich der Abnahme der Peakflächen zweier Einzelsubstanzen im Vergleich.

Während die Standardabweichung bei der gut biologisch abbaubaren Substanz Benzaldehyd vier Maximalwerte in den Eckpunkten des betrachteten Parameterbereichs aufweist, wird sie für das eher schlecht abbaubare 2-Pentylfuran für längere Lagerzeit und steigende Material/Abluft-Verhältnisse maximal. Wie schon erwähnt kommt der Wahl des Biofiltermaterials bei gut abbaubaren Substanzen keine besondere Bedeutung zu, da sie von wahrscheinlich allen biologisch aktiven Materialien gleichermaßen schnell reduziert werden. Am ehesten sind in diesen Fällen unter Extrembedingungen Unterschiede zwischen den Materialien erkennbar, wie beispielsweise bei ganz kurzer Lagerungsdauer, bzw. bei Verwendung nur einer ganz geringen Filtermaterialmenge. Aus diesem Grund liegt das Hauptmaximum auch in diesem Bereich. Pentylfuran hingegen ist schwer biologisch abbaubar, daher werden Materialunterschiede am besten verdeutlicht, wenn eine ausreichende Menge des Biofiltermaterials im Verhältnis zum Abluftvolumen zur Verfügung steht. Da unter diesen Bedingungen durch die erhöhte Materialmenge mit zunehmendem Maße auch die Substanzen abbauende Mikroorganismen in das Testsystem eingebracht werden, ist eine Abnahme dieses Stoffes erst dann messbar und Qualitätsunterschiede zwischen den Materialien zeichnen sich ab. Durch eine zusätzliche Verlängerung der Lagerzeit wird dieser Effekt noch verstärkt. Ist die Lagerzeit zu kurz und die Biofiltermaterialmenge zu gering, so ist die Konzentrations-

änderung des Stoffes nicht messbar und folglich unterscheiden sich die betrachteten Materialien hinsichtlich ihres Abbauvermögens nicht voneinander.

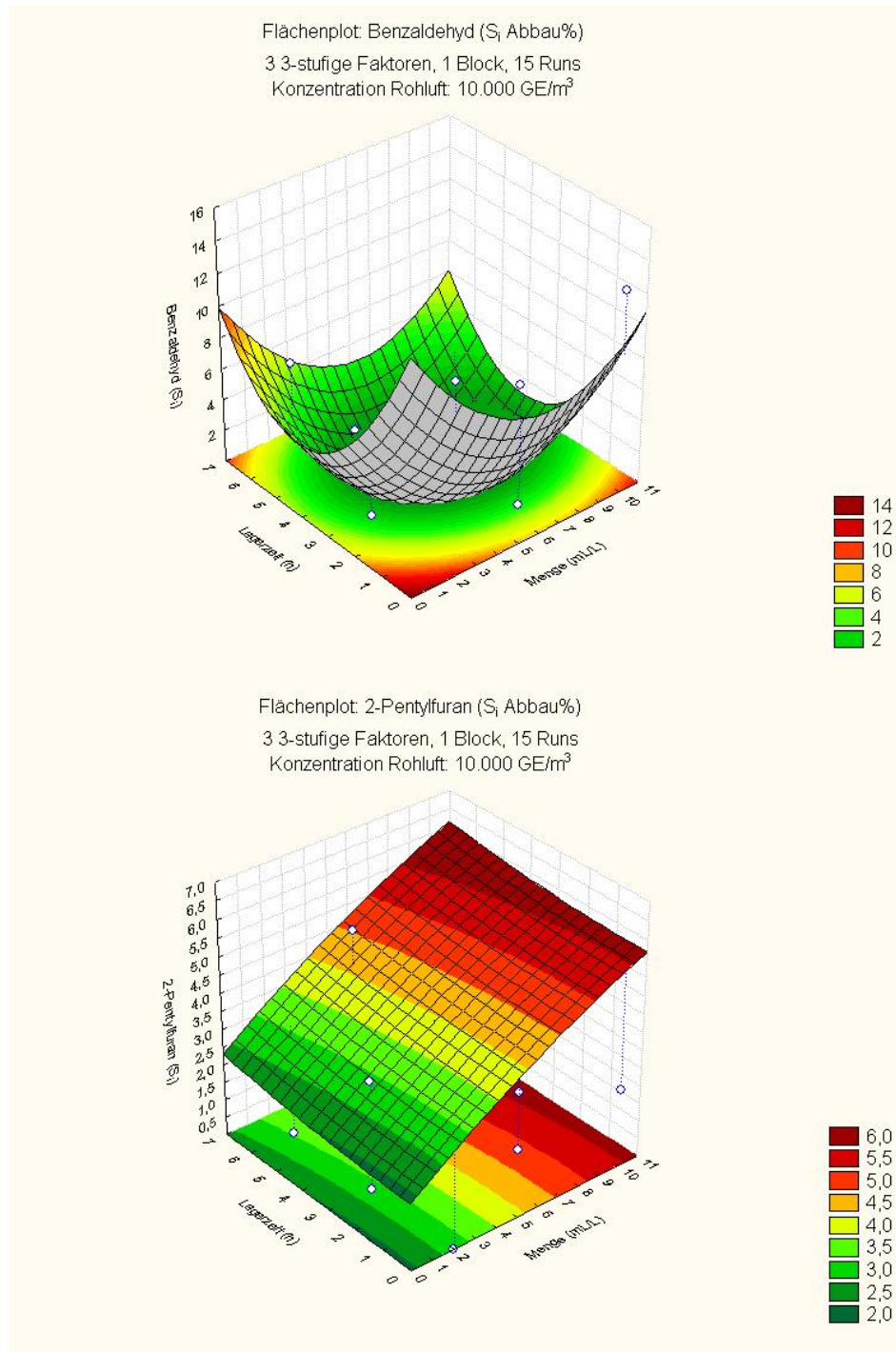


Abb. 53: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Peakflächen der Substanzen Benzaldehyd und 2-Pentylfuran für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

Bestätigt werden diese Beobachtungen auch durch die Betrachtung der zugehörigen Paretdiagramme (Abb. 54). Beim gut abbaubaren Benzaldehyd weist die Lagerzeit als Testparameter den mit Abstand signifikantesten Einfluss auf, während bei dem schlecht abbaubaren Pentylfuran neben dem Konzentrationsniveau der Probe, auf welches man bei der Durchführung der Tests einen eher geringen Einfluss hat, das Material/Abluft-Verhältnis signifikant ist.

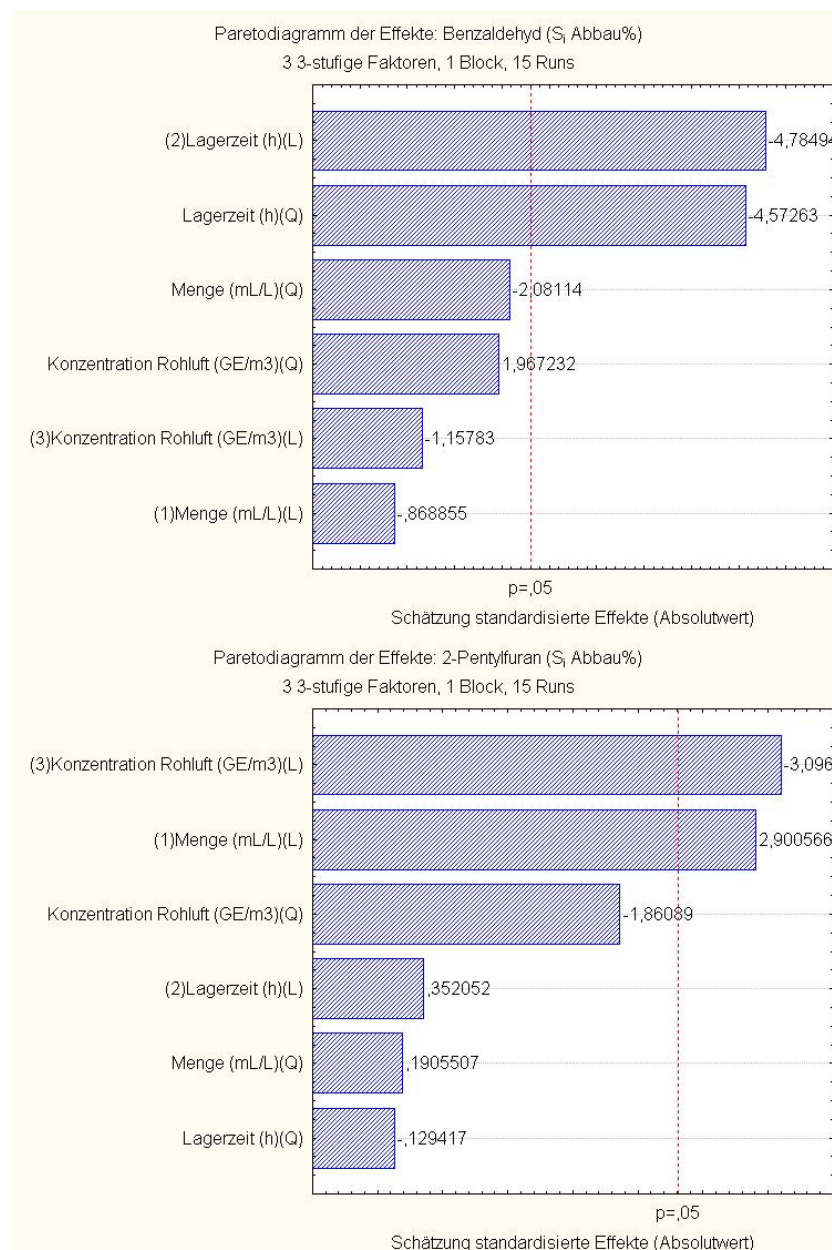


Abb. 54: Paretdiagramm der Effekte auf die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Peakflächen der Substanzen Benzaldehyd und 2-Pentylfuran für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

Möchte man das Geruchsabbauverhalten verschiedener Biofiltermaterialien auf chemisch analytische Weise vergleichen, so sollte folglich nicht die Gesamtpeakfläche des Chromatogramms herangezogen werden. Vielmehr dürfte eine alleinige Betrachtung der Hauptgeruchsstoffe des Stoffgemisches zielführend sein.

Betrachtet man für den beschriebenen Fall beispielsweise die Flächenplots der Standardabweichung für den über die Peakflächen berechneten prozentualen Abbau der Hauptgeruchsstoffe der betrachteten Probe (Abb. 55), so fällt auch hier auf, dass die Maxima ähnlich wie die für den Geruchsabbau am Rand des betrachteten Versuchsparameterbereiches liegen. Für den Hexanal- und Nonanalabbau ergeben sich optimale Versuchsbedingungen bei sehr niedrigen Materialmenge/Abluft-Verhältnissen. Betrachtet man den Nonanalabbau so werden Unterschiede zwischen den Biofiltermaterialien bei einer Lagerungsdauer gegen null am deutlichsten. Fasst man nun die 3 Hauptgeruchsstoffe in einem Diagramm zusammen und betrachtet die Summe der Abnahmen der Peakflächen (Abb. 56), so verhalten sich diese ähnlich zur Standardabweichung des olfaktometrisch bestimmten Geruchsabbaus. Bei niedriger Testdauer und bei möglichst kleinen oder aber großen Material/Abluft-Verhältnissen weist die Standardabweichung Maximalwerte auf. Entsprechend werden unter diesen Versuchsbedingungen Unterschiede zwischen den Materialien am deutlichsten sichtbar. Dargestellt sind die Zusammenhänge bei einer Geruchskonzentration der Rohluft von ca. 20.000 GE/m<sup>3</sup>. Variationen der Konzentration führen zu nahezu identischen Darstellungen. Die nicht abgebildeten Flächenplots sind im Anhang (Anhang, A 10-2)

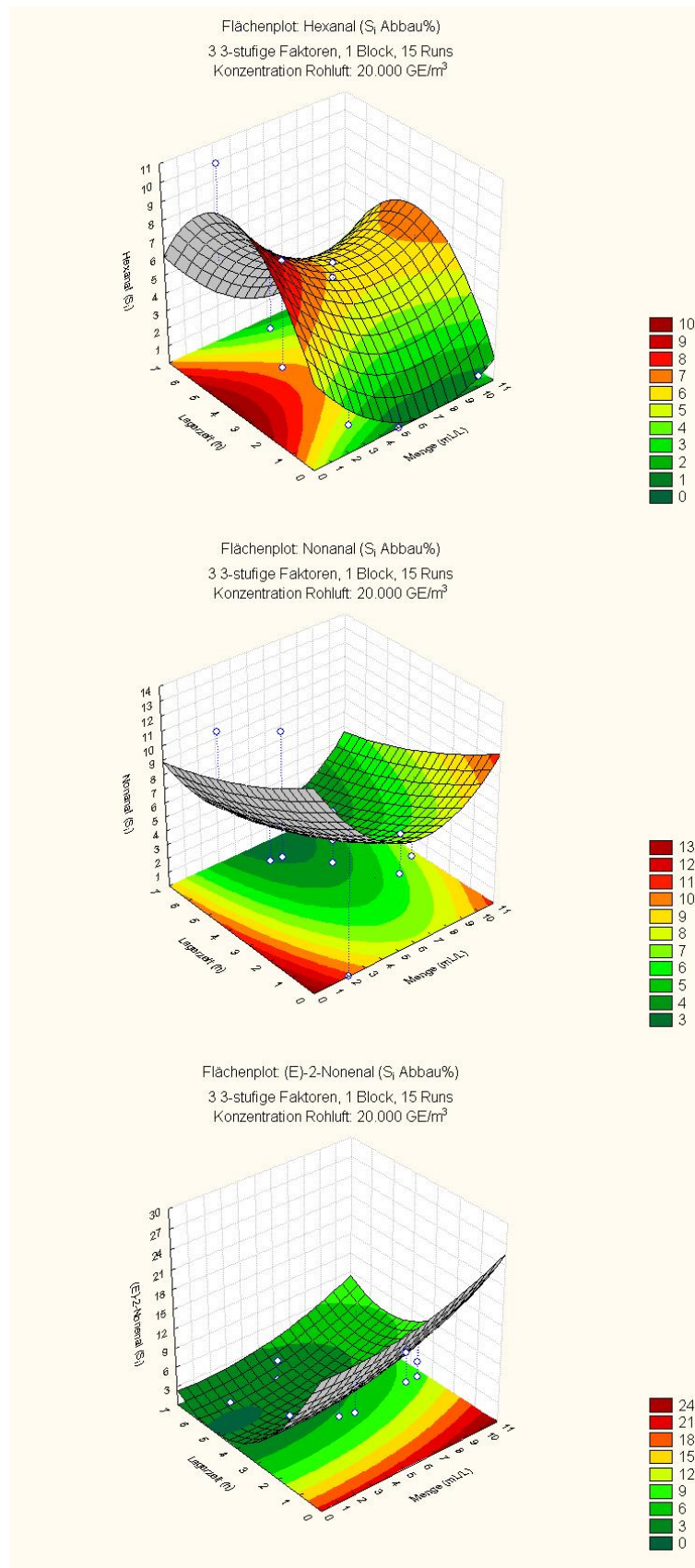


Abb. 55: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Peakflächen der Hauptgeruchsstoffe für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

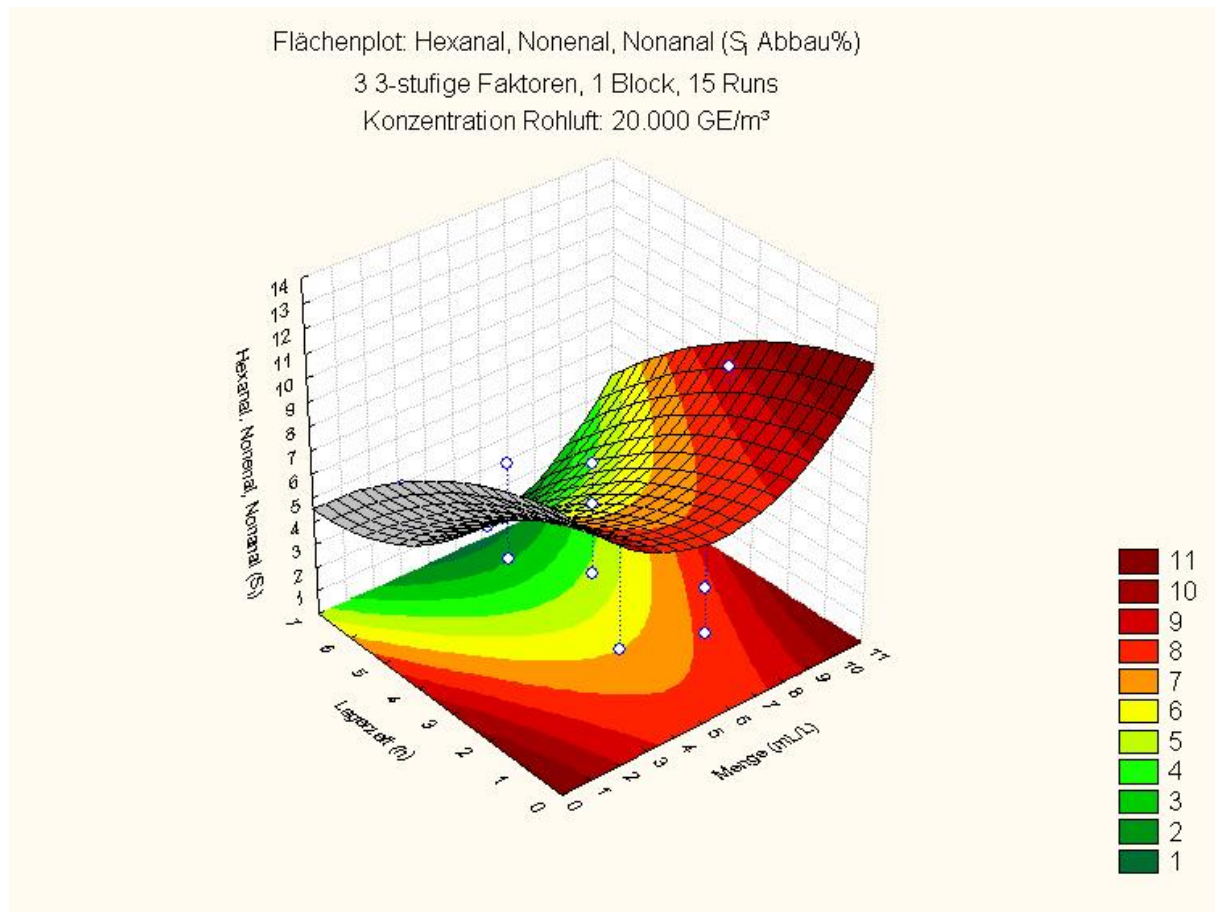


Abb. 56: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Summe der Peakflächen der Hauptgeruchsstoffe für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

### Optimierung an Abluft aus der Kaffeeveredelung

Für diesen Optimierungsversuch wurden die beiden Biofiltermaterialien Sojakompost und das Kokosfaser/Torf-Gemisch miteinander verglichen. In Tab. 14 sind die aus den olfaktometrischen Messungen berechneten Geruchsabbauraten für die einzelnen Versuche aufgeführt. Die Versuchsbedingungen für den Box-Behnken-Versuchsplan sind wiederum entsprechend der Tab. 10 eingestellt worden.

Tab. 14: Geruchsabbauraten für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung

Versuchsnr.	Rohluftkonz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge [mL/L]	Geruchsabbau		Standartabw. Geruchsabbau
				Sojakompost	Kokosfasern	
4	150.000	0	5	25%	51%	18%
8	150.000	3	2	27%	-43%	19%
7	150.000	3	10	23%	24%	1%
3	150.000	6	5	23%	31%	6%
12	250.000	0	2	34%	27%	5%
11	250.000	0	10	43%	9%	24%
13	250.000	3	5	7%	-24%	5%
14	250.000	3	5	-12%	-49%	0%
15	250.000	3	5	-13%	-69%	0%
10	250.000	6	2	-87%	-65%	0%
9	250.000	6	10	63%	-7%	45%
2	1.000.000	0	5	17%	15%	1%
6	1.000.000	3	2	50%	34%	11%
5	1.000.000	3	10	68%	68%	0%
1	1.000.000	6	5	9%	5%	3%

Entsprechend der Werte aus Tab. 14 sind hinsichtlich des Geruchsabbaus bei keinem der beiden Biofiltermaterialien klare Tendenzen in Abhängigkeit von den Testbedingungen zu erkennen. Einzig offensichtlich ist, dass die Geruchsstoffe in der Abluft nicht gut biologisch abbaubar sind. Viele der Werte weisen negative Abbauraten auf, was theoretisch auf eine Geruchszunahme durch beispielsweise das Biofiltermaterial hindeuten würde. Die Beschreibungen der Geruchscharakteristika am Olfaktometer liefern allerdings keine Anhaltspunkte für diese Annahme. Vielmehr könnten systematische Fehler bei der Versuchsdurchführung der Grund für die uneinheitlichen Ergebnisse sein. So wurden beispielsweise die Abluftproben in einem langen Schlauch gemischt und teilweise mit Neutralluft verdünnt, um die für die Box-Behnken-Optimierung erforderlichen, unterschiedlichen Konzentrationsniveaus zu erhalten. Wie sich bei der Befüllung der einzelnen Testansätze herausstellte, war die Abluftprobe in diesem Schlauch, trotz Einsatz eines kleinen Ventilators innerhalb des Schlauches, nicht immer ideal durchmischt, so dass kein einheitliches Konzentrationsniveau eingestellt werden konnte. Zwar wurde versucht, anhand von FID-Messungen das Konzentrationsniveau durch Zumischen von Proben- bzw. Neutralluft wieder anzupassen, trotzdem könnte dies zu unterschiedlichen Geruchskonzentrationen der Rohluft bei den jeweiligen Ansätzen führen. Als Folge ergeben sich dann unter Umständen Konzentrationsunterschiede in den

Testansätzen, die nicht den Geruchsabbau wiedergeben. Weitere Fehlerquellen liegen in der Verdünnung der Proben vor der olfaktometrischen Konzentrationsbestimmung. Da sowohl das Geruchskonzentrationsniveau der Rohluft als auch das der im Testsystem behandelten Abluft weit außerhalb des Messbereiches des Olfaktometers lag, mussten diese auf messbare Konzentrationen verdünnt werden. Obwohl sich die verwendete Verdünnungsmethode (Kap. 6.1.2) in der Vergangenheit bewährt hat, birgt sie mögliche Fehlerquellen, die in ihren Ausmaßen schwer einschätzbar sind. Besonders beim Befüllen und Spülen der Gasmaus ist schwer abschätzbar, ob es zu einem vollständigen Gasaustausch gekommen ist.

In Tab. 15 ist die Abnahme der Gesamtpeakfläche in Abhängigkeit der Faktoren für die beiden Biofiltermaterialien aufgeführt. Negative Abnahmewerte sind auf Null gesetzt worden, da eine Zunahme der Peakflächen keinen Sinn ergibt.

Tab. 15: Abnahme der mit der SPME-Methode bestimmten Gesamtpeakfläche für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung

Versuchsnr.	Rohluftkonz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge [mL/L]	Abnahme Gesamtpeakfläche		Standartabw. Peakfläche
				Sojakompost	Kokosfasern	
4	150.000	0	5	0%	0%	0%
8	150.000	3	2	5%	8%	0%
7	150.000	3	10	22%	28%	1%
3	150.000	6	5	14%	15%	1%
12	250.000	0	2	0%	10%	7%
11	250.000	0	10	7%	9%	2%
13	250.000	3	5	17%	23%	4%
14	250.000	3	5	16%	14%	1%
15	250.000	3	5	16%	19%	3%
10	250.000	6	2	15%	16%	1%
9	250.000	6	10	34%	29%	4%
2	1.000.000	0	5	0%	0%	0%
6	1.000.000	3	2	8%	8%	2%
5	1.000.000	3	10	19%	18%	4%
1	1.000.000	6	5	16%	15%	1%

Auch bei Betrachtung dieser Werte ist festzustellen, dass die in der Abluft vorhandenen Substanzen nicht gut biologisch abbaubar sind. Jedoch zeigen diese Ergebnisse im Vergleich zu den Werten aus dem olfaktometrisch bestimmten Geruchsabbau, eine gewisse Korrelation mit den Versuchsbedingungen. Zwar sind,

wie aus dem zugehörigen Paretdiagramm der Effekte für die Standardabweichung des Abbaus der Gesamtpeakfläche (Abb. 57) hervor geht, keine signifikanten Einflüsse zu erkennen, jedoch ist tendenziell die Rohluftkonzentration der einflussreichste Parameter.

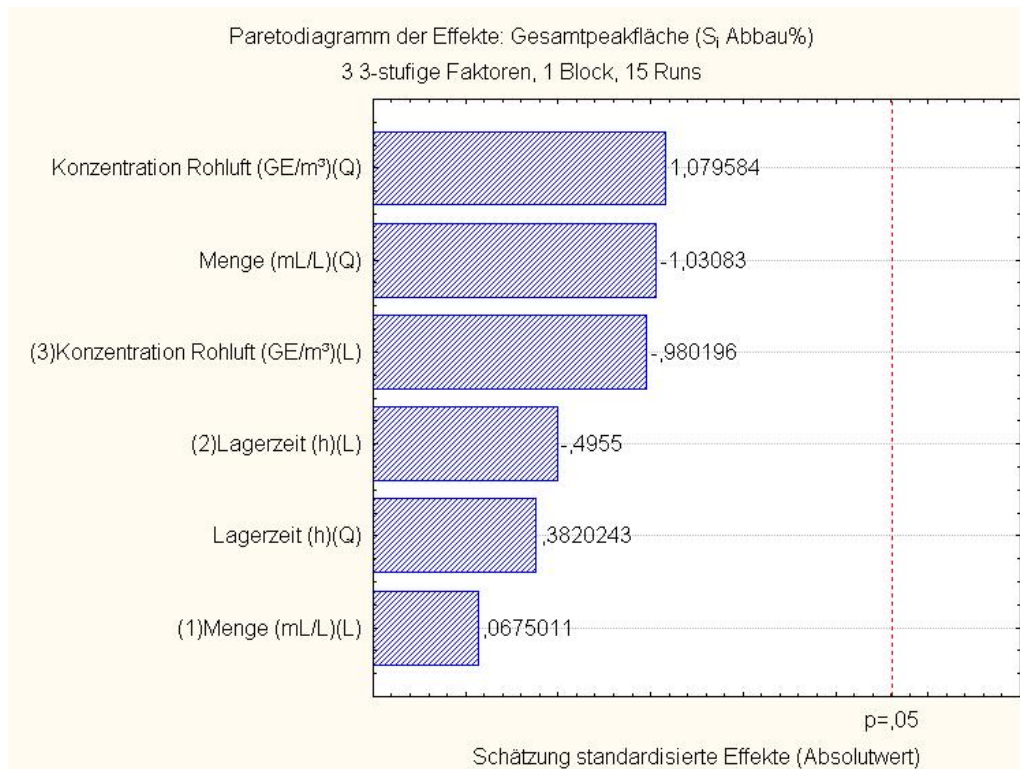


Abb. 57: Paretdiagramm der Effekte auf die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Gesamtpeakflächen für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung

Anhand der Flächenplots für die Standardabweichung der Abnahme der Gesamtpeakfläche (Abb. 58) können wiederum die optimalen Versuchsbedingungen für die vergleichende Beurteilung der beiden Materialien bestimmt werden. Da beide ein ähnlich schlechtes Abbauverhalten für die Inhaltsstoffe der Abluft also entsprechend der Reduktion der Gesamtpeakfläche aufweisen, ist hier kein klares Optimum erkennbar. Die Maxima liegen am Rand des betrachteten Parameterbereiches, bei sehr hohen und sehr niedrigen Material/Abluft-Verhältnissen. Es wird deutlich, dass die Lagerungsdauer nahezu keinen Einfluss auf die Aussagekraft des Testes hat. Mit steigender Rohluftkonzentration hingegen, werden die Unterschiede zwischen den Materialien schlechter abgebildet.

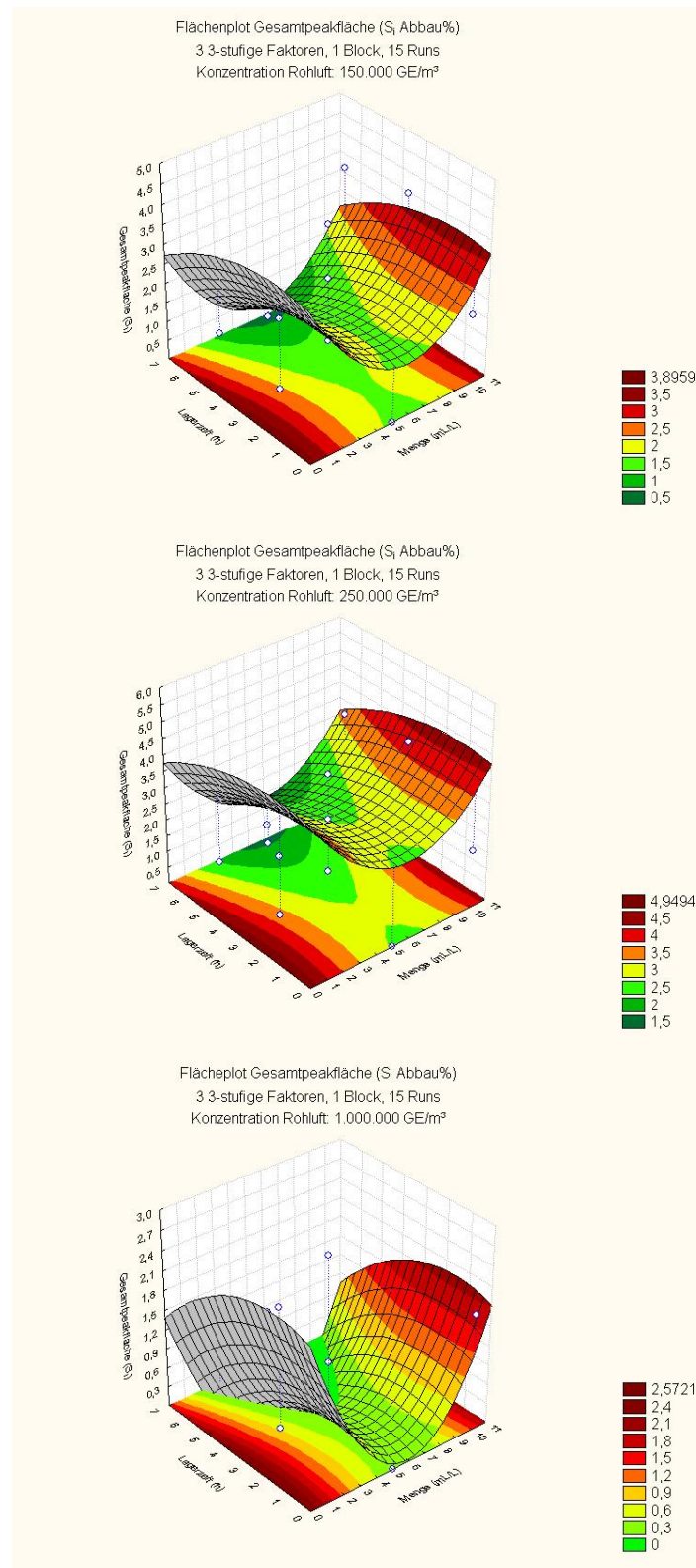


Abb. 58: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Gesamtpeakflächen für zwei Biofiltermaterialien und die drei Konzentrationsstufen im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredlung

Im Gegensatz zu der Probenvorbereitung für die Olfaktometrie, war für die Analytik mit der SPME-Methode eine Vorverdünnung der Abluftproben nicht erforderlich. Da die sich daraus ergebenden Daten deutlich plausiblere Ergebnisse liefern als jene, aus den Geruchsmessungen, liegt die Vermutung nahe, dass der wesentliche Störeinfluss bei der Betrachtung der Geruchsabbauwerte auf die Fehler bei der Anfertigung der Verdünnungen zurückzuführen ist. Weiterhin ist aber auch eine fehlende Korrelation zwischen der Gesamtpeakfläche und dem Geruch der Probe denkbar.

Um anhand der analytischen Daten einen klareren Bezug zum tatsächlichen Geruchsabbau zu erhalten, soll im Folgenden die Abnahme des Odour-Betrags (Gleichung 13, Kap. 9.2.2) der drei Hauptgeruchsstoffe dieser Abluft betrachtet werden. Als Hauptgeruchsstoffe aus der Abluft der Kaffeeveredelung konnten über die Odour-Indices die Substanzen 2-Isobutyl-3-methoxypyrazin, Furfurylmercaptan und 3-Methylbutanal identifiziert werden (Anhang, A 10-3). Der Beitrag dieser drei Stoffe zum Gesamtgeruch errechnet sich nach der in Kap. 9 beschriebenen Methode zu knapp 90%. Die Abnahme des Odour-Betrags dieser Stoffe in Abhängigkeit der Versuchsbedingungen ist der Tab. 16 zu entnehmen.

Tab. 16: Abnahme des mit der Odour-Index-Methode bestimmten Odour-Betrags für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung

Rohluftkonz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Lagerzeit [h]	Menge [mL/L]	Abnahme Odour-Betrag		Standartabw. Odour-Betrag
			Sojakompost	Kokosfasern	
150.000	0	5	-20%	-24%	1%
150.000	3	2	67%	63%	1%
150.000	3	10	83%	79%	0%
150.000	6	5	86%	81%	2%
250.000	0	2	-3%	27%	19%
250.000	0	10	34%	33%	0%
250.000	3	5	74%	71%	2%
250.000	3	5	74%	69%	3%
250.000	3	5	72%	69%	2%
250.000	6	2	72%	67%	3%
250.000	6	10	88%	80%	5%
1.000.000	0	5	6%	8%	0%
1.000.000	3	2	71%	70%	3%
1.000.000	3	10	94%	93%	3%
1.000.000	6	5	96%	93%	4%

Im Vergleich zur Abnahme der Gesamtpeakfläche reduziert sich der Odour-Betrag deutlich stärker über die Testphasen. Dies lässt darauf schließen, dass auch in diesem Beispiel die Gesamtpeakfläche kein gutes Maß für die Beschreibung des Geruchs ist. Weiterhin deckt sich das Abbauverhalten nicht mit den olfaktometrisch gemessenen Werten, obwohl entsprechend Kap. 9.2 eine gewisse Korrelation bestehen sollte. Wie oben bereits diskutiert, sind die Ergebnisse der Geruchsmessungen sehr wahrscheinlich fehlerhaft, so dass für die weitere Betrachtung dieses Optimierungsversuches die Änderungen des Odour-Betrags herangezogen werden. Die Einflüsse auf die Standardabweichung der Abnahme des Odour-Betrags der 3 Hauptgeruchsstoffe sind erneut dem Paretdiagramm der Effekte (Abb. 59) zu entnehmen. Aus Tab. 16 geht bereits hervor, dass sich die beiden Biofiltermaterialien auch in Bezug auf diesen Abbauparameter nicht wesentlich unterscheiden. Entsprechend haben auch die Versuchsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Standardabweichung des Odour-Betrag-Abbaus.

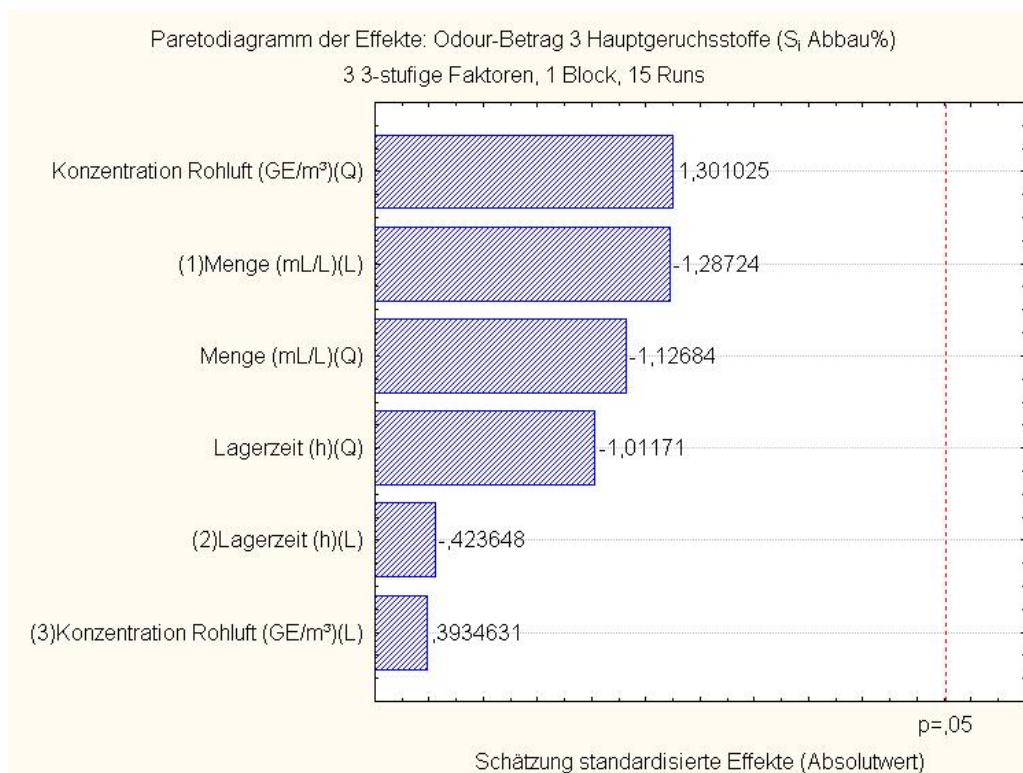


Abb. 59: Paretdiagramm der Effekte auf die Standardabweichung der prozentualen Abnahme des Odour-Betrags der 3 Hauptgeruchsstoffe 2-Isobutyl-3-methoxy-pyrazin, Furfurylmercaptan und 3-Methylbutanal für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung

Anhand eines der zugehörigen Flächenplots (Abb. 60), die beiden anderen liefern keine zusätzlichen Erkenntnisse (Anhang, A 10-4), ist auch bei der Betrachtung dieser Zielgröße ersichtlich, dass die Lagerungsdauer kaum einen Einfluss auf das Ergebnis hinsichtlich eines größtmöglichen Unterschiedes zwischen den beiden Materialien hat. Von deutlich höherer Bedeutung ist unter diesem Aspekt das Material/Abluft-Verhältnis. Vergleichbar mit dem Flächenplot für die Abnahme der Gesamtpeakfläche liegen die Maxima am Rand des betrachteten Parameterbereiches. Aus dieser Darstellung jedoch geht eindeutig ein geringes Material/Abluft-Verhältnis als optimale Testbedingung hervor, während bei der Betrachtung der Gesamtpeakfläche sowohl kleine als auch große Verhältnisse als geeignet erschienen.

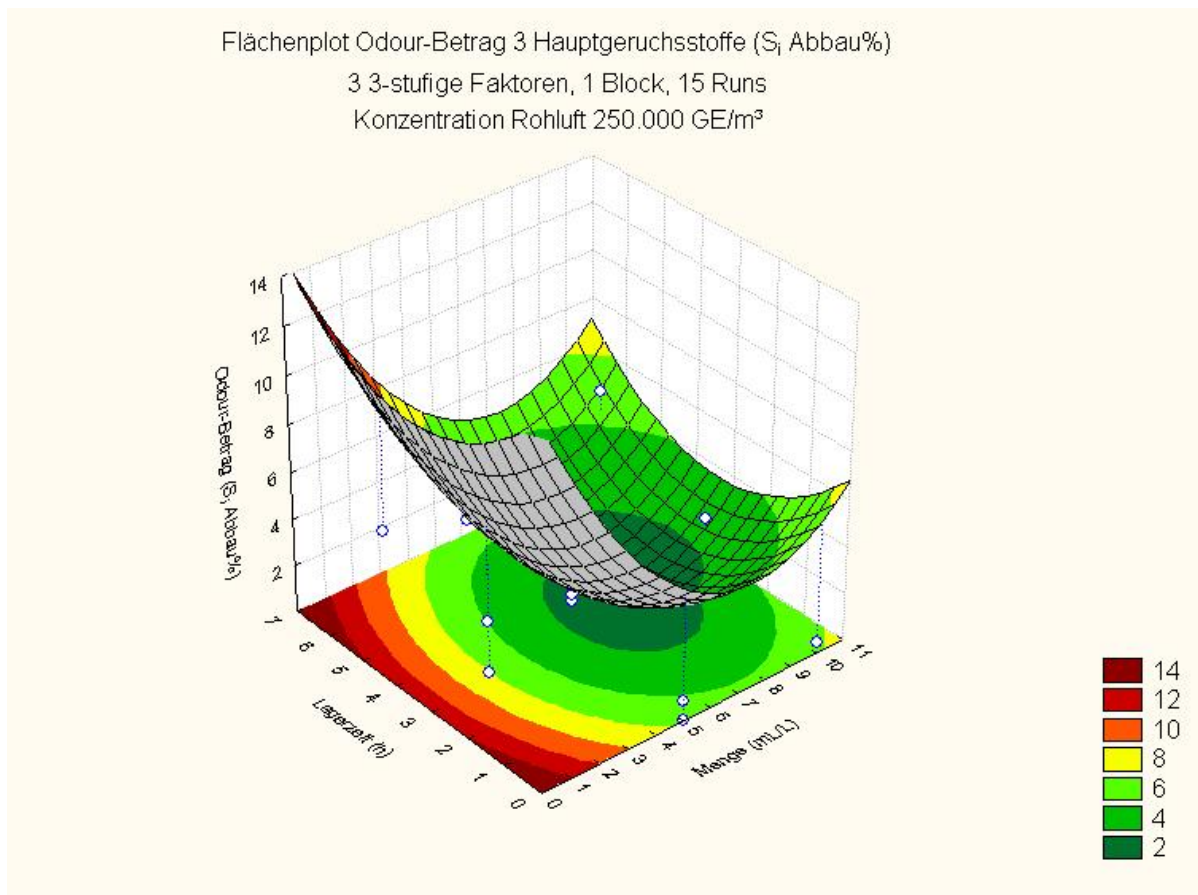


Abb. 60: Flächenplot für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme des Odour-Betrags der 3 Hauptgeruchsstoffe 2-Isobutyl-3-methoxypyrazin, Furfurylmercaptan und 3-Methylbutanal für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung bei einer Rohluftkonzentration von 250.000 GE/m<sup>3</sup>

Da aber bei dem Odour-Betrag im Gegensatz zur Gesamtpeakfläche die Geruchsstärken der einzelnen Stoffe mit berücksichtigt werden und der Geruchsabbau die Hauptzielgröße darstellt, sollten auch die sich aus dieser Betrachtung ergebenden Bedingungen als Parameter für die Optimierung herangezogen werden. Aus dem Flächenplot ergeben sich für ein Material/Abluft-Verhältnis von 1 - 2 mL/L optimale Versuchsbedingungen bei einer Lagerungsdauer zwischen 1 - 2 und 6 - 7 h. Im Hinblick auf eine ökonomische Versuchsdurchführung ist hier die kürze Lagerungszeit zu wählen.

### Optimierte Testparameter

Das statische Testsystem ist hinsichtlich geeigneter Versuchsparameter an einer gut und einer weniger gut biologisch abbaubaren Abluft für Biofiltermaterialien optimiert worden. Bei der Optimierung lag das Hauptaugenmerk auf dem Geruchsabbau innerhalb einer Testphase unter bestimmten Versuchsbedingungen. Hinsichtlich dieser Zielgröße ergaben beide Versuchsreihen, dass ein geringes Material/Abluft-Verhältnis am besten geeignet ist, Leistungsunterschiede zwischen Biofiltermaterialien aufzuzeigen. Der Lagerzeit des Testansatzes kommt hierbei keine übermäßig große Bedeutung zu. Da aber das Maximum der Standardabweichung bei der leichter biologisch abbaubaren Abluft aus der Öl- und Fettveredelung eher bei kurzen Lagerzeiten lag, sind diese vorzuziehen. Auch für die Versuchsdurchführung sind kurze Testphasen von Vorteil. Es sollte diese jedoch nicht zu kurz gewählt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass in erster Linie Ad- und Absorptionseffekte der Materialien gemessen werden.

Die einsetzbare Materialmenge je L Abluft ist im Wesentlichen durch die Praktikabilität begrenzt. Die Materialmenge muss groß genug sein, um eine repräsentative und reproduzierbare Probe verwenden zu können. Je größer aber die Probenmenge, desto größer auch die Beutelgröße des Testsystems und somit auch die benötigte Menge an Abluft. Bei den hier beschriebenen Versuchen hat sich gezeigt, dass ein Material/Abluft-Verhältnis von 2 mL/L noch praktikabel zu handhaben ist. Da, wie ebenfalls gezeigt werden konnte, die Ad- und Absorptionsvorgänge bereits in den ersten Sekunden bis Minuten nahezu abgeschlossen sind,

sollte eine Lagerzeit von 1 h ausreichen, um erste Unterschiede in der Geruchsabbauleistung der Biofiltermaterialien zu erkennen.

## 10.2 Optimierung dynamisches Testsystem

Das Ziel der Optimierung des dynamischen Testsystems liegt darin, die Betriebsbedingungen so zu wählen, dass auch hier die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren bzw. Materialien möglichst deutlich werden. Natürlich sollte darauf geachtet werden, dass die Prozessparameter im Rahmen dessen bleiben, was im industriellen Einsatz üblich ist. Wesentliche Parameter sind in diesem Zusammenhang die Belastung der Reinigungsverfahren und die Dauer einer Testphase. Die Optimierungsversuche wurde an zwei unterschiedlichen Abluftquellen durchgeführt.

### *10.2.1 Abluft aus der Öl- und Fettveredelung*

Über einen Zeitraum von 6 Wochen wurden die Geruchsabbauleistungen der Biofiltermaterialien Wurzelholz, Sojakompost, Rindenmulch und Kokos/Torf im dynamischen Testsystem verglichen. Zur Beurteilung der Abhängigkeit des Geruchsabbaus von der Belastung des Testsystems, wurden die Filterbettbelastungen stufenweise von 50, 75 auf 100 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h eingestellt. Jeder dieser Betriebszustände wurde für alle Materialien an drei unterschiedlichen Versuchstagen beprobt und die Abluft sowohl olfaktometrisch als auch chemisch-analytisch untersucht. Der olfaktometrisch bestimmte Geruchsabbau ist in Abb. 61 dargestellt.

Der Abb. 61 ist zu entnehmen, dass während der ersten Versuchswoche kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien festzustellen sind. Erst mit steigender Belüftungsrate und zunehmender Versuchsdauer zeichnen sich unterschiedlich hohe Abbauraten ab. Dies kann zum einen auf die andauernde Adaptionsphase des biologischen Systems zurückzuführen sein, zum anderen auf die Tatsache, dass aufgrund der guten biologischen Abbaubarkeit der Geruchsstoffe ähnlich wie bei der Optimierung des statischen Testsystems die Unterschiede

zwischen den Materialien unter hohen Belastungen besser hervorgehoben werden. Trotzdem liefert diese Untersuchung auf den ersten Blick keine einheitlichen Ergebnisse hinsichtlich eines favorisierbaren Biofiltermaterials, was ebenfalls darauf zurückgeführt werden kann, dass sich bei derart gut abbaubaren Geruchsstoffen alle getesteten Materialien ähnlich gut als Biofiltermaterial eignen.

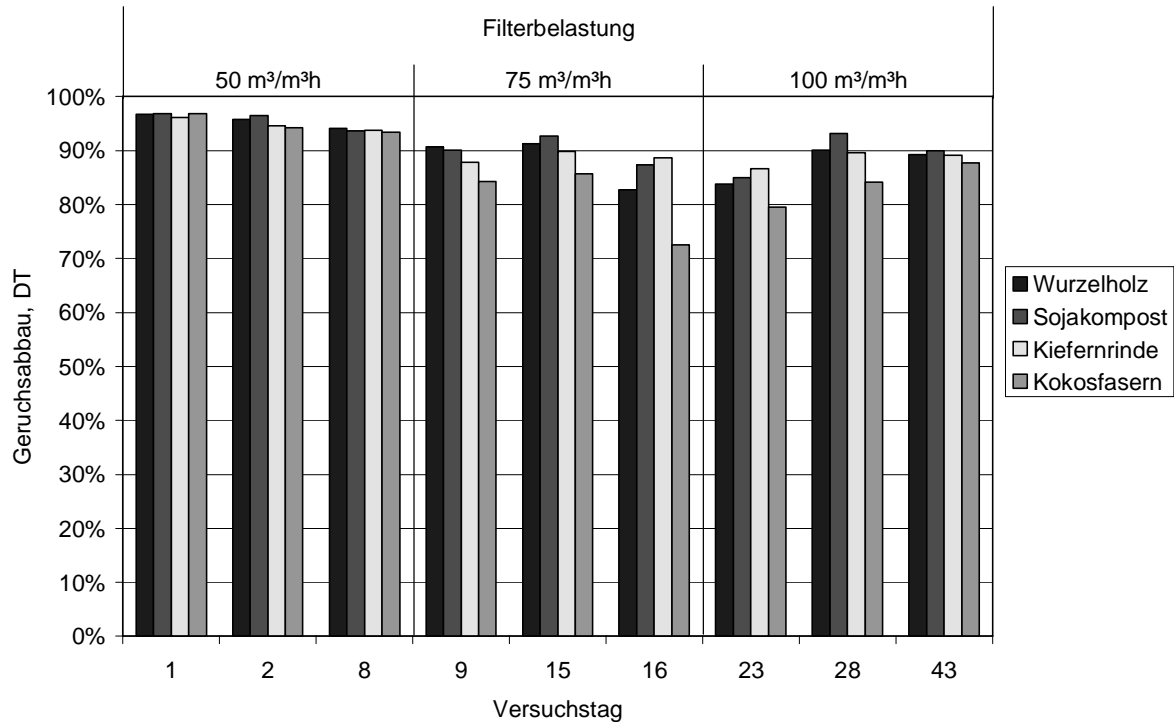


Abb. 61: Geruchsabbauleistungen unterschiedlicher Biofiltermaterialien im dynamischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

### 10.2.2 Abluft aus Schokoladenmasseherstellung

Auch an Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung wurden die Geruchsabbauleistungen von vier Biofiltermaterialien, Aktivkohle und reinem Wasser als Absorptionsmittel mit dem dynamischen Testsystem hinsichtlich dessen Optimierung untersucht. Als Biofiltermaterialien kamen für diesen Versuch Wurzelholz, Sojakompost, Kokosfasern/Torf und Kakao/Kompost zum Einsatz. Für einen Testzeitraum von knapp vier Wochen wurde der Geruchsabbau olfaktometrisch und chemisch-analytisch bei einer entsprechend der Erkenntnis aus

dem obigen Versuch relativ hohen Filterbettbelastung von  $130 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$  bestimmt (Abb. 62). Am 15. Versuchstag wurde der Messwert für das Wurzelholz nicht berücksichtigt, da das Material teilweise ausgetrocknet war und der errechnete Geruchsabbau nicht repräsentativ war.

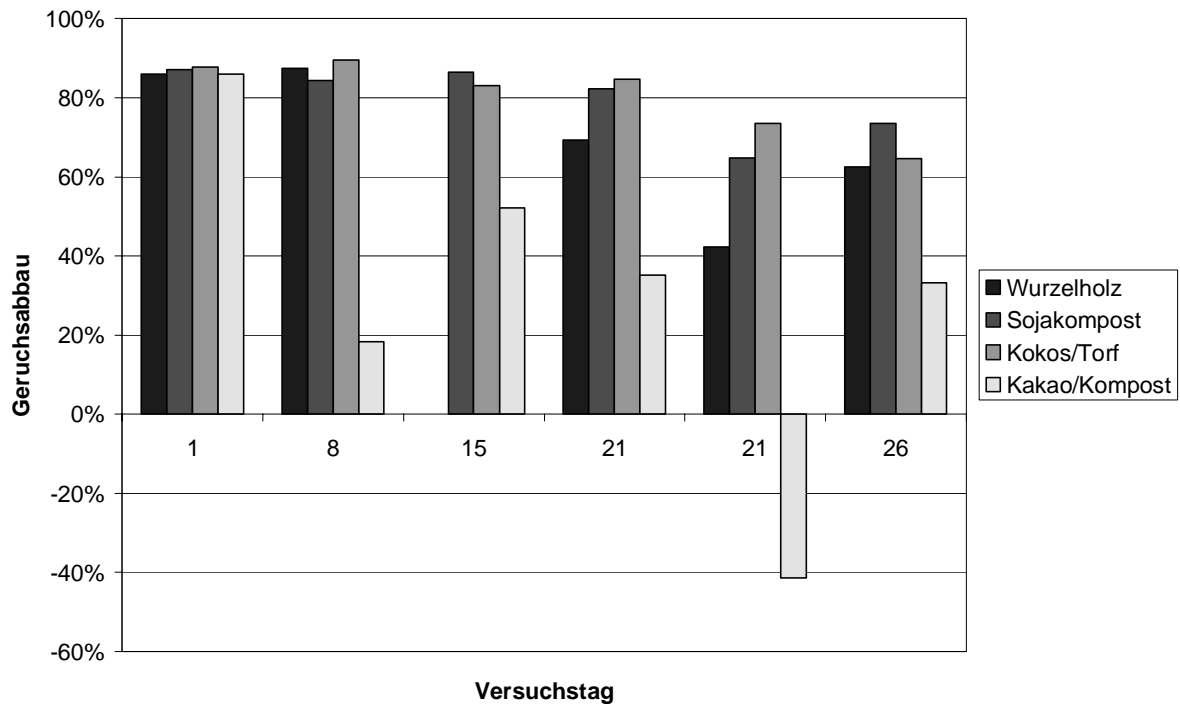


Abb. 62: Geruchsabbauleistungen unterschiedlicher Biofiltermaterialien im dynamischen Testsystem mit Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung bei einer Biofilterbelastung von  $130 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$

Vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Betrachtung mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung (Abb. 61) zeigt auch dieses Beispiel, dass erst nach einer Woche Testdauer Unterschiede zwischen den Biofiltermaterialien ersichtlich sind. Diese sind mit zunehmender Versuchsdauer deutlicher erkennbar. Insgesamt variiert der Geruchsabbau der Testsubstanzen zueinander hier stärker als in der vorherigen Betrachtung und die Abbauleistungen sind geringer, wengleich auch hier die Ergebnisse nicht einheitlich sind.

Ein Vergleich nicht biologischer Behandlungsverfahren am Beispiel der Schokoladenabluf (Abb. 63) zeigt, dass Unterschiede zwischen den Verfahren mit

dem dynamischen Testsystem auch schon früher als nach einer Woche Betriebszeit deutlich werden können. Hierbei kommt es auf die Art der Behandlungsmethode an. Während biologische Verfahren unter Umständen eine Adaptionsphase benötigen, bevor sie ihre volle Reinigungsleistung erreichen, nimmt die Minderungsleistung bei Adsorptionsverfahren bei zunehmender Betriebsdauer bis hin zum völligen Durchbruch ab. Ähnlich verhält es sich auch bei reinen Absorptionsverfahren. Entsprechend ermöglichen höhere volumetrische Belastungen des Testsystems eine schnellere Aussage über das Durchbruchverhalten von Adsorbentien bzw. die Kapazitäten von Waschflüssigkeiten.

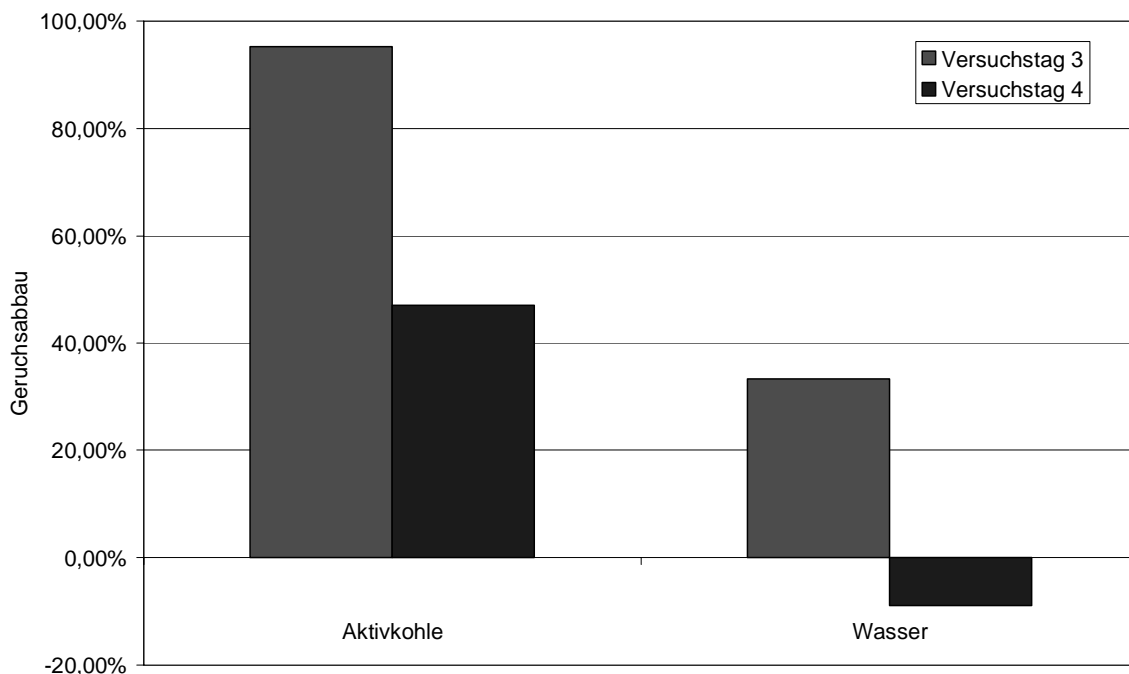


Abb. 63: Geruchsabbauleistungen eines Ad- und Absorptionsverfahrens im dynamischen Testsystem mit Abluft aus der Schokoladenmasseherstellung bei einer Belastung von  $330 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ .

### 10.2.3 Optimale Versuchsbedingungen für das dynamische Testsystem

Die Untersuchungen mit dem dynamischen Testsystem an zwei unterschiedlichen Abluftquellen haben ergeben, dass für den Vergleich von Abluftbehandlungsverfahren eine hohe volumetrische Belastung der Testeinheiten gewählt werden

sollte. Bei Ad- und Absorptionsverfahren kann so schneller eine Aussage über die maximale Beladungskapazität gemacht werden, und bei Biofiltermaterialien werden unter hohen Belastungen Unterschiede klarer abgebildet. Zu beachten ist bei biologischen Systemen allerdings, dass unter Umständen verwertbare Ergebnisse erst nach einer Woche Versuchslaufzeit erhalten werden können, was durch die Adaptionphase der Mikroorganismen an die veränderten Bedingungen zurückzuführen ist. Allerdings braucht hier nicht die komplette Adaptionphase abgewartet zu werden, die durchaus auch mehrere Wochen dauern kann, da mit diesem Test nicht eine Prognose für die Geruchsabbauleistung im späteren technischen Betrieb gestellt werden soll, sondern lediglich eine vergleichende Aussage zur Leistungsfähigkeit verschiedener Materialien gewonnen werden soll. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass sich gut geeignete Biofiltermaterialien schneller an die Betriebsbedingungen adaptieren und somit der Leistungsvorteil gegenüber anderen Medien auch schon vor der Ausbildung der vollständigen Leistungsfähigkeit ersichtlich wird.

### 10.3 Optimierte Versuchsbedingungen für die Testsysteme

In den Kap. 10.1 und 10.2 sind anhand von Optimierungsversuchen die optimalen Versuchsbedingungen für die Beurteilung des Geruchsabbaus von Materialien zur Abluftbehandlung mit dem statischen und dem dynamischen Testsystem herausgearbeitet worden. Tab. 17 zeigt eine Übersicht über die ermittelten Parameter für beide Systeme.

Tab. 17: Optimierte Versuchsbedingungen für das statische und das dynamische Testsystem




	Statisches Testsystem	Dynamisches Testsystem
Testdauer	1 h	≥ 1 Woche
Material / Abluft	2 mL/L	
Belastung		> 100 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h



## 11 BEURTEILUNG DER AUSSAGEKRAFT DER TESTSYSTEME

Im folgenden Kapitel soll gezeigt werden, in wie weit die Testsysteme eine Prognose über vermeintlich favorisierbare Behandlungsverfahren für den Geruchsabbau und über die Eignung zum Abbau einzelner Geruchsstoffe zulassen. Die Beurteilung der Aussagekraft der Testsysteme erfolgte anhand von vergleichenden Untersuchungen mit unterschiedlichen Biofiltermaterialien bei Beaufschlagung mit Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung. Verglichen wurden die Ergebnisse der Testsysteme mit Untersuchungen an der halbtechnischen Versuchsanlage. In Tab. 18 sind die verwendeten Versuchsanlagen sowie wichtige Betriebsparameter in einer Übersicht dargestellt.

Tab. 18: Zur Beurteilung der Testsysteme eingesetzte Versuchsanlagen und deren Betriebsbedingungen (Behandlungsverfahren: Biofiltration, behandelte Abluft: Emissionen aus der Öl- und Fettveredelung)

Versuchsanlage	Biofiltermaterial	Versuchsbedingungen
<u>Labormaßstab</u>		
Statisches Testsystem 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> </ul>	Material/Abluft: 2 und 10 mL/L Lagerungsdauer: 3 und 6 h
Dynamisches Testsystem 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> <li>• <i>Rindenmulch</i></li> <li>• <i>Kokosfasern/Torf</i></li> </ul>	Filterbelastung: 75 und 100 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
Containermaßstab 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> <li>• <i>Rindenmulch</i></li> <li>• <i>Kokosfaser / Torf</i></li> </ul>	Filterbelastung: 50, 75, 100 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h

## 11.1 Geruchsabbau durch Biofiltermaterialien

Im Folgenden soll festgestellt werden, welches der untersuchten Biofiltermaterialien sich an der halbtechnischen Versuchsanlage als das leistungsstärkste erweist und in wie weit dieser Sachverhalt durch die beiden Testsysteme beschrieben werden kann.

### 11.1.1 Halbtechnische Versuchsanlage

Anhand der Untersuchungen an der halbtechnischen Versuchsanlage können die Ergebnisse bezüglich der Einschätzung der getesteten Biofiltermaterialien aus den beiden Testsystemen überprüft werden. Versuche in diesem vergrößerten Maßstab kommen einem industriellen Betrieb von Biofiltern schon relativ nahe und liefern aussagekräftige Erkenntnisse über die Eignung von Biofiltermaterialien für einen speziellen Anwendungsfall (Heining, 1998).

In der halbtechnischen Versuchsanlage wurden die Biofiltermaterialien Sojakompost, Wurzelholz, Rindenmulch und Kokosfasern/Torf eingesetzt und bei Filterbettbelastungen von 50, 75 und 100 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h betrieben. Die hier betrachtete Versuchsphase belief sich auf knapp 5 Monate. Die Biofiltermaterialien waren zum Zeitpunkt der Datenerhebung bereits an die zu behandelnde Abluft adaptiert. Zur Darstellung der Leistungsunterschiede sind die Geruchsabbauraten dieser Versuchsreihen gegenüber der mittleren logarithmischen Konzentration in Abb. 64 aufgetragen. Anhand der Steigung der Ausgleichsgeraden der Messpunkte durch den Nullpunkt können die Leistungsunterschiede der Biofiltermaterialien bestimmt werden (s. Kap. 4.3.1). Wie in Abb. 64 zu sehen ist, weist der Sojakompost einen deutlichen Leistungsvorteil hinsichtlich des Geruchsabbaus gegenüber den anderen Testmaterialien auf. Das Wurzelholz und das Kokosfaser/Torf-Gemisch zeigen die schlechteste Geruchsabbauleistung.

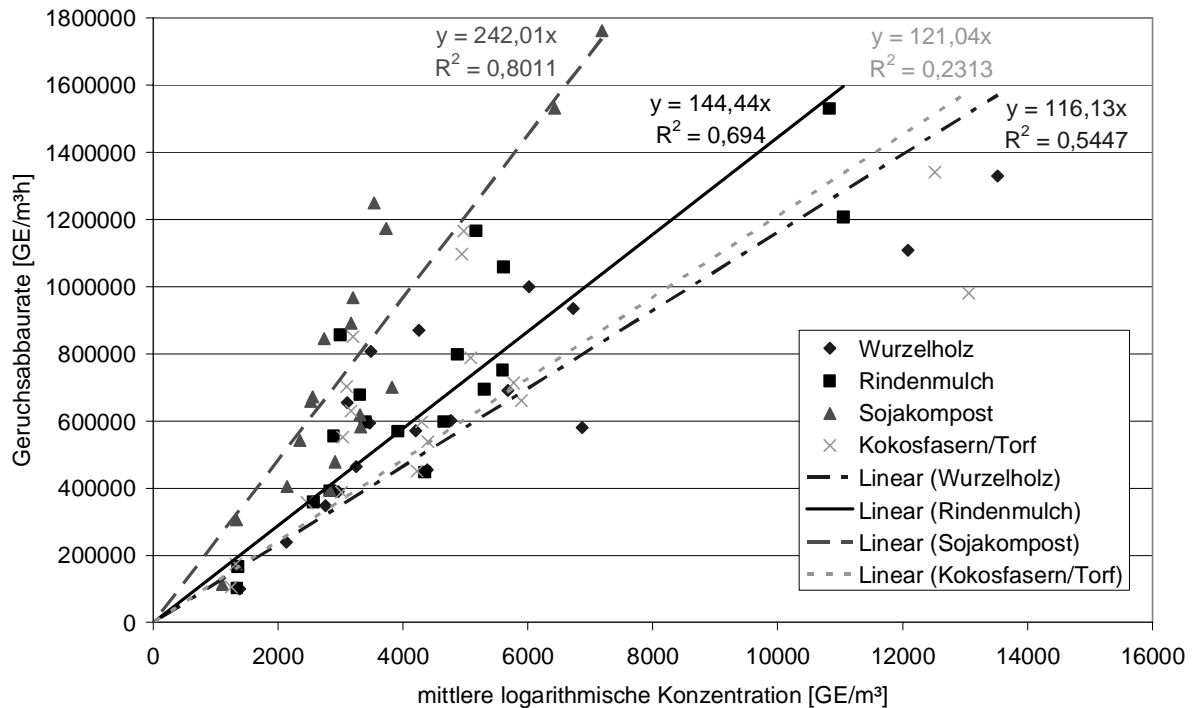


Abb. 64: Geruchsabbauraten unterschiedlicher Biofiltermaterialien an der halbtechnischen Versuchsanlage mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei Filterbelastungen von 50, 75 und 100 m³/m³h

### 11.1.2 Statisches Testsystem

Mit dem statischen Testsystem wurden in einer ersten Untersuchung die Materialien Wurzelholz und Sojakompost auf ihre Geruchsabbauleistung hin verglichen. Bei einem Material/Abluft-Verhältnis von 2 mL/L und einer Lagerungsdauer des Testsystems von 3 Stunden vor der Analyse ergaben sich im Mittel die in Abb. 65 dargestellten Geruchsabbauleistungen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Sojakompost einen leicht höheren Geruchsabbau aufweist, als das Wurzelholz. Würde man anhand dieser Testergebnisse eines der beiden Materialien für einen Biofilter auswählen, so würde die Wahl auf den Sojakompost fallen. Somit wird das selbe Material favorisiert, welches auch aus den halbtechnischen Versuchen als das leistungsstärkste hervorgeht. Das statische Testsystem scheint demnach für die vorläufige Auswahl eines Biofiltermaterials geeignet.

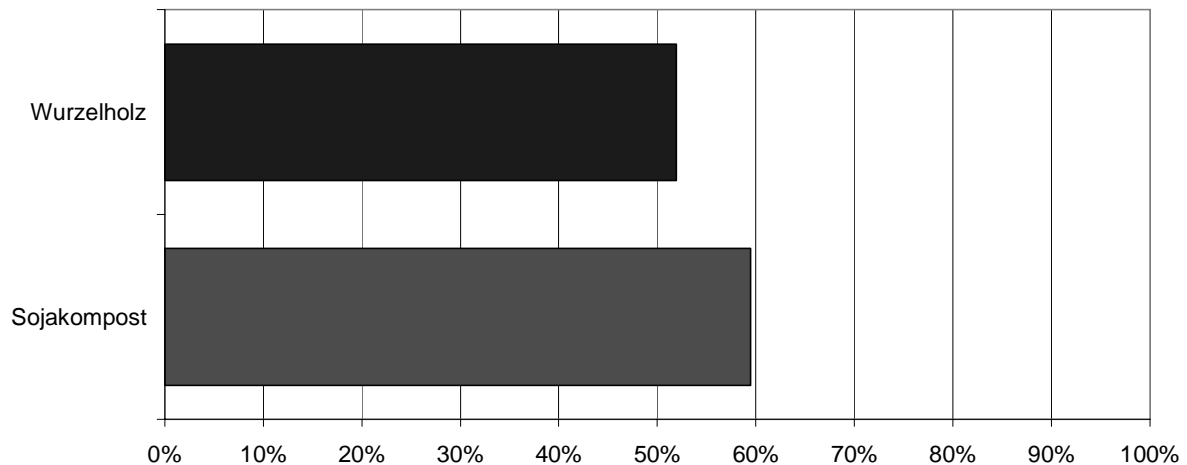


Abb. 65: Olfaktometrisch bestimmter Geruchsabbau zweier Biofiltermaterialien (statisches Testsystem, Lagerzeit: 3 h, Material/Abluft: 2 mL/L, Abluftquelle: Öl- und Fettveredelung)

### 11.1.3 Dynamisches Testsystem

In dem dynamischen Testsystem wurden analog zu den Versuchen im halbertechnischen Maßstab die Biofiltermaterialien Sojakompost, Wurzelholz, Kiefernrinde und das Kokosfaser/Torf-Gemisch bei Filterbettbelastungen von 75 und 100 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>h eingesetzt. Der Versuchszeitraum erstreckte sich über 6 Wochen, wobei aufgrund der Adaptionsphase des Biofiltermaterials nur Messergebnisse ab der zweiten Versuchswoche berücksichtigt wurden. In Abb. 66 ist entsprechend Abb. 65 die auf das Filtervolumen bezogene Geruchsabbaurate über der mittleren logarithmischen Konzentration aufgetragen.

Auch die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen zeigen, dass der Sojakompost für den Geruchsabbau bei Abluft aus der Öl- und Fettveredelung am besten geeignet ist. Wenngleich die Unterschiede zwischen den meisten Materialien nicht besonders deutlich sind, stellt sich das Kokosfaser/Torf-Gemisch als weniger geeignet heraus. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus den halbertechnischen Versuchen und macht deutlich, dass auch das dynamische Testsystem für eine Einschätzung von Filtermaterialien zum Geruchsabbau geeignet ist.

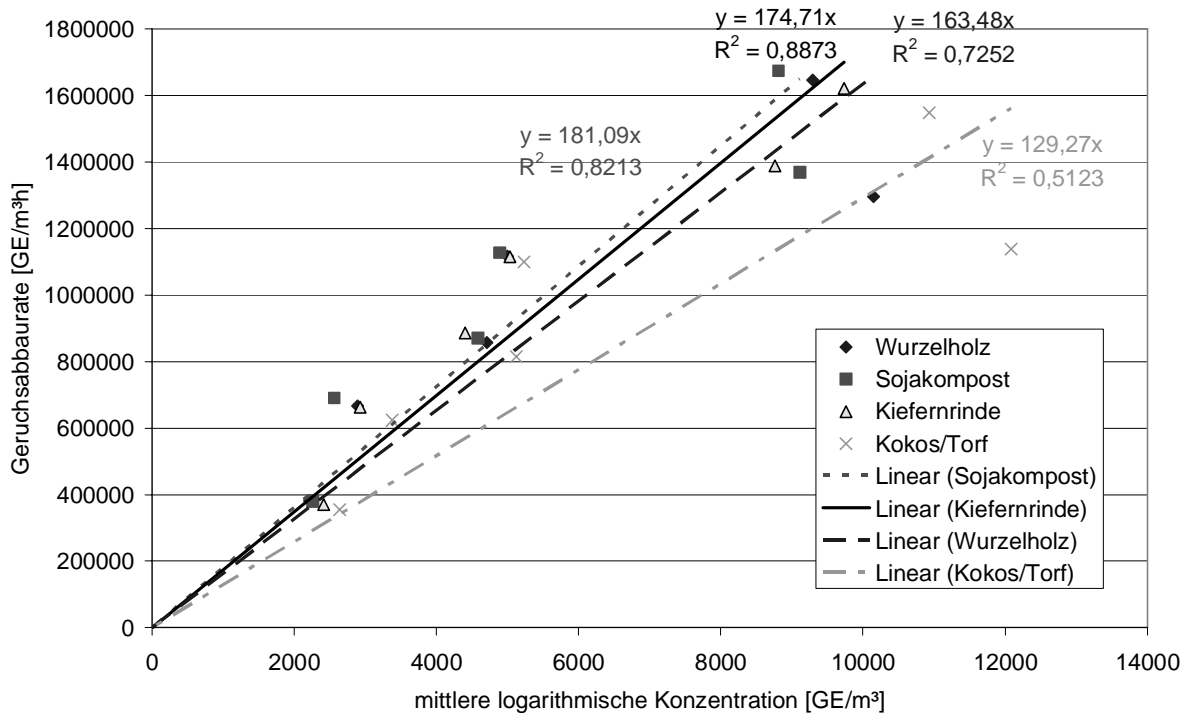


Abb. 66: Geruchsabbauraten unterschiedlicher Biofiltermaterialien im dynamischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei Filterbelastungen von 75 und 100 m³/m³h

## 11.2 Einzelstoffabbau durch Biofiltermaterialien

Anhand der chemisch-analytischen Bestimmung der Einzelsubstanzen in den Abluftproben können Aussagen über den Abbau einzelner Geruchsstoffe in den unterschiedlichen Biofiltermaterialien getroffen werden. Bei der folgenden Betrachtung soll überprüft werden, ob das im halbtechnischen Maßstab nachgewiesene Abbauspektrum geruchsaktiver Substanzen auch anhand der Ergebnisse aus den Versuchen mit den Testsystemen belegt werden kann.

Hierfür wurde der mittlere prozentuale Abbau ausgewählter Substanzen durch die Biofiltermaterialien Wurzelholz und Sojakompost in den Testsystemen mit dem in der Containeranlage verglichen (Tab. 19). Für die Auswertung wurden bei der Betrachtung des statischen Testsystems zwei verschiedene Testparameter-einstellung berücksichtigt (Lagerungszeit: 3 und 6 Std., Material/Abluft-Verhältnis: 2

und 10 mL/L). Die Ergebnisse der Testsysteme wurden als tendenziell richtig eingestuft, sofern sie um weniger als 50%-Punkte von den Abbauwerten der Containeranlage abweichen. Stärker abweichende Werte sind in der Tabelle fett und kursiv dargestellt.

Tab. 19: Prozentualer Abbau ausgewählter Geruchsstoffe durch zwei Biofiltermaterialien an dem statischen (ST), dem dynamischen (DT) Testsystem und der Containeranlage (PA)

<u>Substanz</u>	<u>Abbau [%]</u>							
	<u>Wurzelholz</u>			<u>Sojakompost</u>				
	ST	DT	PA	ST	DT	PA		
<i>Menge (mL/L)</i>	2	10			2	10		
<i>Lagerzeit (h)</i>	3	6			3	6		
Pentan	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	<b>0</b>
Methylcyclopentan	0	0	6	<b>1</b>	0	0	8	<b>3</b>
2-Pentanon	<i>0</i>	94	<i>15</i>	<b>88</b>	<i>3</i>	43	67	<b>91</b>
1-Hepten	0	0	9	<b>3</b>	0	0	13	<b>30</b>
Toluol	0	0	1	<b>9</b>	0	0	65	<b>24</b>
1-Octen	0	0	13	<b>4</b>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>14</i>	<b>76</b>
Hexanal	55	100	99	<b>100</b>	<i>48</i>	100	96	<b>100</b>
Hexannitril	<i>22</i>	100	100	<b>97</b>	<i>33</i>	75	90	<b>100</b>
2-Heptanon	<i>0</i>	84	85	<b>89</b>	<i>11</i>	57	80	<b>99</b>
Heptanal	<i>49</i>	100	100	<b>100</b>	<i>44</i>	100	99	<b>100</b>
Hexansäuremethylester	<i>14</i>	100	95	<b>98</b>	<i>14</i>	89	90	<b>100</b>
Benzaldehyd	100	100	100	<b>100</b>	100	100	100	<b>100</b>
2-Pentylfuran	0	15	33	<b>9</b>	<i>2</i>	<i>10</i>	35	<b>77</b>
1,2,3,3-Tetramethylcyclohexen	0	0	5	<b>2</b>	0	0	8	<b>0</b>
Limonen	0	0	24	<b>17</b>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>23</i>	<b>92</b>
Octansäuremethylester	43	99	88	<b>80</b>	56	97	89	<b>91</b>
1,2,3,4-Tetramethylbenzol	27	<i>59</i>	42	<b>5</b>	31	55	45	<b>26</b>
<b>Anteil richtiger Tendenzen [%]</b>	<b>71</b>	<b>94</b>	<b>94</b>	<b>-</b>	<b>47</b>	<b>82</b>	<b>88</b>	<b>-</b>

### 11.2.1 Statisches Testsystem

Bei einem Vergleich zwischen den mit dem statischen Testsystem bestimmten Abbaugraden und den Werten aus der Pilotanlage (Tab. 19) fällt auf, dass die Testbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf den Grad der Übereinstimmung der Abbauergebnisse haben. Während bei einem hohen Material/Abluft-Verhältnis und einer vergleichsweise langen Testphase das Abbauverhalten relativ gut übereinstimmt, so trifft dies für die Ergebnisse bei einem Material/Abluft-Verhältnis von 2 mL/L und einer Lagerungsdauer von 3 Std. nicht zu. Unter letzteren Bedingungen ist beispielsweise bei keinem der beiden Biofiltermaterialien ein Abbau von 2-Pentanon feststellbar. Im halbtechnischen Maßstab ist jedoch ein relativ guter Abbau zu beobachten. Ähnliche Beobachtungen können für zahlreiche weitere Stoffe bei beiden Materialien gemacht werden. Zur Beschreibung der Geruchsabbau-eigenschaften der Biofiltermaterialien im technischen Betrieb mit dem statischen Testsystem sollten daher längere Testphasen und größere Materialmengen verwendet werden. Lediglich im Fall des 1,2,3,4-Tetramethylbenzolabbaus lag das Ergebnis bei kurzer Lagerungsdauer näher an dem Abbauwert des halbtechnischen Versuchs. Unter den oben genannten Bedingungen bilden die Werte des statischen Testsystems die der Pilotanlage relativ gut ab, wenngleich dies bei dem Sojakompost für die Stoffe 1-Octen, 2-Pentylfuran und Limonen in diesem Beispiel nicht gilt. In den meisten Fällen wird der Stoffabbau mit dem statischen Testsystem bezogen auf die Pilotversuche unterschätzt. Bei Abbauraten um 50% kann in der überwiegenden Anzahl der Fälle davon ausgegangen werden, dass im technischen Betrieb ein biologischer Abbau der entsprechenden Stoffe erfolgt. Ist mit dem statischen Testsystem kein Abbau festzustellen, so werden sie mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in großtechnischen Anlagen von dem entsprechenden Material nicht abgebaut. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit dem statischen Testsystem bei einer Lagerungsdauer von 6 h und einem Material/Abluft-Verhältnis von 10 mL/L das Abbauverhalten der Biofiltermaterialien hinsichtlich Einzelgeruchsstoffe in 88% der betrachteten Fälle tendenziell richtig beschrieben wurde.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung des Testsystems ergeben sich bei dieser Betrachtung deutlich andere favorisierbare Versuchsbedingungen. Dies liegt an den unterschiedlichen Zielstellungen. Während bei der

Optimierung hinsichtlich des Geruchsabbaus möglichst große Unterschiede zwischen den Materialien aufgezeigt werden sollten, wurde hier die Aussagekraft der Testsysteme bezüglich des Einzelstoffabbaus betrachtet. Hier wird also der Frage nachgegangen, ob eine Substanz technisch mit dem betrachteten Verfahren aus der Abluft entfernt werden kann oder nicht, und ob das Testsysteme in der Lage ist, dies zu beschreiben.

### *11.2.2 Dynamische Testsystem*

Bei der Abschätzung der Abbaubarkeit der Geruchsstoffe mit dem dynamischen Testsystem zeigt sich für beide Materialien eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den Werten aus der halbtechnischen Versuchsanlage (Kap. 11.2, Tab. 19). Die Abbautendenzen stimmen hier im Mittel zu gut 90% mit denen der halbtechnischen Anlage überein. Bei den Fällen, in denen die Abbaugrade des dynamischen Testsystems wesentlich von denen der Pilotanlage abweichen, liegen die des Testsystems deutlich niedriger. Eine entsprechende Prognose anhand der Ergebnisse aus diesen Testversuchen, würde folglich die Reinigungsleistung der Materialien unterschätzen. Die Versuchsbedingungen für derartige Untersuchungen sollten stark in Anlehnung an reale Betriebsbedingungen eingestellt werden. Eine Extrembelastung der Materialien ist hier nicht vorteilhaft.

### **11.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl das statische als auch das dynamische Testsystem als relativ schnelle Methoden prinzipiell geeignet sind, Biofiltermaterialien im Hinblick auf ihre Eignung zur Behandlung der Geruchsemissionen einer konkreten Abluftquelle vergleichend zu beurteilen. Bei der Verwendung des dynamischen Testsystems muss berücksichtigt werden, dass sich die für den Geruchsabbau verantwortlichen Mikroorganismen erst in den biologisch aktiven Materialien anreichern müssen, bevor repräsentative Ergebnisse für den Geruchsabbau erreicht werden können. Bis zur vollständigen Beendigung der Adaptionsphase zu warten, macht bei der Vorabauswahl von Biofiltermaterialien

jedoch wenig Sinn. Dies ist auch nicht erforderlich, da in dieser Phase der Untersuchung noch keine Auslegungsdaten gewonnen werden sollen. Das statische Testsystem ermöglicht eine etwas schnellere Bewertung der Materialien und ist vom apparativen Aufwand her günstiger. Sehr wahrscheinlich fällt die Adaptionsphase hier weniger ins Gewicht, da die Belastung des Testmaterials deutlich unter der im dynamischen System liegt. Bei einer kontinuierlich zugeführten geruchsbeladenen Abluft nahezu konstanter Konzentration ist eine deutlich höhere Abbauleistung erforderlich, um einen messbaren Konzentrationsunterschied über die Testeinheit feststellen zu können, als bei einem konstanten Abluftvolumen mit kontinuierlich abnehmender Konzentration. Die den Geruch abbauende Mikroorganismenpopulation muss im dynamischen System folglich deutlich besser ausgebildet sein, um vergleichbare Abbauergebnisse liefern zu können. Jedoch sind mit dem dynamischen Testsystem nach einer ausreichend langen Versuchsdauer zuverlässigere Daten im Hinblick auf einen späteren kontinuierlichen Betrieb der großtechnischen Anlage zu erwarten. Dies gilt besonders für Adsorptionsverfahren, da hier bereits erste Durchbruchkurven aufgenommen werden können. Auf weitere Untersuchungen im größeren Maßstab mit dem Ziel der Ermittlung von Auslegungsdaten kann jedoch vor allem bei biologischen Systemen nicht verzichtet werden (Streese et al., 2005).

Auch die Abbaubarkeit von Einzelstoffen in Biofiltermaterialien ist mit den beiden Testsystemen nachweisbar. Für die Beschreibung des Abbauverhaltens in Biofiltern im technischen Betrieb scheint das statische Testsystem besser geeignet als das dynamische. Bei einer Auswahl von 17 Geruchsstoffen, deren Abbau an zwei Biofiltermaterialien untersucht wurde, ergaben die Bestimmungen des Stoffabbaus am statischen Testsystem bei 88% der Substanzen tendenziell die gleichen Ergebnisse wie an der Containeranlage. Das dynamische Testsystem hingegen lieferte nur in 68% der Fälle eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Containeranlage. Während mit dem statischen System die Abbaufähigkeit des Materials im technischen Betrieb eher unterschätzt wird, neigt das dynamische Testsystem bei einigen Substanzen dazu, einen zu hohen Abbau zu prognostizieren. Dennoch kann mit beiden Testsystemen in gewissen Grenzen zu etwa 90%-iger Sicherheit eine Aussage darüber gemacht werden, ob eine Substanz im technischen Betrieb abgebaut wird oder nicht. Liegt der mit dem Testsystem bestimmte

Abbaugrad unter 10%, so wird in der Regel auch kein ausreichender Abbau im großen Maßstab nachgewiesen. Bei Abbauraten über 90% an den Laboranlagen ist auch mit einem Abbau der betrachteten Substanz im technischen Biofilterbetrieb zu rechnen. Liegen die ermittelten Werte zwischen diesen Grenzen, so ist eine Prognose etwas unsicherer. Dennoch stimmen die Tendenzen in den meisten Fällen recht gut überein. Im Zweifelsfall kann auch eine eingehendere Betrachtung der Messwerte hinsichtlich beispielsweise der Größe der Peakflächen oder eine Berücksichtigung möglicher Verdrängungseffekte bei der Probenanreicherung bei einer Beurteilung des Abbauverhaltens anhand der analytischen Ergebnisse hilfreich sein.

Mit dem statischen und dem dynamischen Testsystem sind zwei kostengünstige, standardisierte Methoden entwickelt worden, die die großtechnische Erprobung in Frage kommender Abluftbehandlungsverfahren auf die aussichtsreichsten reduzieren und auch deren Abbauverhalten hinsichtlich eines Einzelstoffabbaus beschreiben können. Mit dem statischen Testverfahren können kostengünstige Voruntersuchungen durchgeführt werden, bei denen eine erste Einschätzung der Behandlungsmedien vorgenommen werden kann. Die Eignung der viel versprechensten Materialien kann dann mit dem dynamischen Testsystem näher verifiziert werden. Diese Untersuchungen bieten zudem Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten der betrachteten Verfahren im kontinuierlichen Betrieb, was mit dem statischen System nicht möglich ist. Nach erfolgreichen Tests können für das am geeignetsten erscheinende Verfahren in einem größeren Maßstab (Technikums-, Containermaßstab) Auslegungsdaten für eine großtechnische Umsetzung erhoben werden. Hierdurch wird der finanzielle Aufwand und das Risiko bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens reduziert und somit dürfte sich auch die Bereitschaft zur Lösung von Geruchsproblemen beim Verursacher erhöhen.

---

## **12 BEURTEILUNG DER REINIGUNGSLEISTUNG UNTERSCHIEDLICHER ABLUFTBEHANDLUNGSVERFAHREN**

Wie in dieser Arbeit bereits mehrfach beschrieben, gibt es zahlreiche Verfahren, die potenziell für die Reinigung geruchsbeladener Abluft geeignet sind. Die Effektivität der unterschiedlichen Behandlungsmethoden hängt dabei im Wesentlichen von der stofflichen Zusammensetzung der Gerüche ab. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der einzelnen Geruchssubstanzen sind ausschlaggebend dafür, ob sie sich gut biologisch abbauen lassen, oder durch spezielle Waschflüssigkeiten aus der Abluft entfernt werden können. Im folgenden Abschnitt werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Abluftbehandlungsverfahren dahingehend untersucht, wie gut sie in der Lage sind, unterschiedliche Stoffe und Stoffgruppen zurückzuhalten.

Die Beurteilung der Verfahren erfolgte erneut anhand des Reinigungsverhaltens bezüglich der Geruchssubstanzen in der Abluft aus der Öl- und Fettveredelung sowie aus der Schokoladenmasseherstellung. Durchgeführt wurden die Messungen an dem dynamischen Testsystem sowie den Versuchsanlagen im Technikums- und Containermaßstab. Die Schwerpunkte der Untersuchungen lagen beim biologischen Abbau der Geruchsstoffe im Biowäscher und in den bereits beschriebenen Biofiltermaterialien Wurzelholz, Rindenmulch, Sojakompost, Kokosfasern/Torf- und Kakao/Kompost-Gemisch, sowie bei der Beschreibung des Adsorptionsverhaltens der Aktivkohle.

### **12.1 Biologische Verfahren**

In Tab. 20 ist die gemittelte, prozentuale Abnahme der mit der SPME/GC-MS-Methode bestimmten Peakflächen über das jeweilige Aggregat angegeben. In dieser Aufstellung sind die einzelnen Substanzen unabhängig von der zugehörigen Emissionsquelle ihren jeweiligen Stoffgruppen zugeordnet. Ein 100%-iger Abbau bedeutet in diesem Fall, dass die betrachtete Substanz nach der biologischen Behandlung mit der verwendeten Methode nicht mehr nachweisbar ist. In Anbetracht der Tatsache, dass eine genaue quantitative Bestimmung der Inhaltsstoffe hier

nicht möglich ist, geben die Werte daher eher Aufschluss über die Größenordnung des Abbaus, nicht jedoch über exakte Abbauraten.

Tab. 20: Gemittelter Abbau von Einzelstoffen und Stoffgruppen durch Biofilter und Biowäscher (Abluft: Öl- und Fettveredelung, Schokoladenmasseherstellung; Versuchsanlagen: dyn. Testsystem, Technikums-, Containeranlage)

Verfahren	Biofilter					Biowäscher	
	Material	Soja	Wurzel	Rinde	Kokos		Kakao
<b><u>gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe</u></b>		<b><u>51%</u></b>	<b><u>50%</u></b>	<b><u>0%</u></b>	<b><u>50%</u></b>	<b><u>100%</u></b>	<b><u>0%</u></b>
2,2,4,6,6-Pentamethylheptan	100%	100%		100%	100%		
Pentan	3%	0%	0%	0%			0%
<b><u>ungesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe</u></b>		<b><u>32%</u></b>	<b><u>6%</u></b>	<b><u>3%</u></b>	<b><u>10%</u></b>		<b><u>3%</u></b>
1-Hepten	20%	5%	1%	19%			6%
1-Octen	43%	8%	5%	1%			0%
<b><u>cyclische Kohlenwasserstoffe</u></b>		<b><u>4%</u></b>	<b><u>3%</u></b>	<b><u>3%</u></b>	<b><u>1%</u></b>		<b><u>0%</u></b>
Methylcyclopentan	4%	3%	4%	1%			0%
1,2,3,3-Tetramethylcyclohexen	3%	4%	2%	1%			0%
<b><u>Aromaten</u></b>		<b><u>53%</u></b>	<b><u>28%</u></b>	<b><u>13%</u></b>	<b><u>27%</u></b>	<b><u>33%</u></b>	<b><u>1%</u></b>
1,2,3,4-Tetramethylbenzol	30%	24%	18%	20%			2%
1,2,4-Trimethylbenzol	100%	100%		100%	100%		
Benzol	11%	1%		0%	0%		
Ethylbenzol	67%	8%	13%	3%			0%
Toluol	59%	6%	6%	11%	0%		0%
<b><u>Aldehyde</u></b>		<b><u>89%</u></b>	<b><u>86%</u></b>	<b><u>98%</u></b>	<b><u>86%</u></b>	<b><u>66%</u></b>	<b><u>75%</u></b>
(E)-2-Nonenal	98%	97%	98%	94%			91%
(E,E)-2,4-Decadienal	100%	99%	100%	100%			97%
(E,E)-2,4-Nonadienal	100%	100%	100%	100%			85%
(E,Z)-2,4-Decadienal	100%	96%	100%	99%			96%
2-Butenal	0%	0%		0%	0%		
2-Methylbutanal	89%	82%		79%	72%		
2-Methylpropanal	80%	66%		88%	57%		
3-Methylbutanal	84%	75%		83%	69%		
Benzaldehyd	100%	100%	100%	100%	100%		100%
Decanal	98%	95%	99%	91%			60%
Heptanal	99%	100%	100%	95%			54%
Hexanal	99%	99%	100%	91%			67%
Nonanal	94%	86%	87%	81%			50%
Octanal	98%	97%	99%	86%			54%
Pentanal	100%	100%		100%	100%		
<b><u>Ketone</u></b>		<b><u>64%</u></b>	<b><u>51%</u></b>	<b><u>80%</u></b>	<b><u>33%</u></b>	<b><u>49%</u></b>	
2-Butanon	29%	0%		0%	11%		
2-Heptanon	98%	95%	96%	61%	84%		
2-Pentanon	95%	63%	64%	3%			0%
3-Hydroxy-2-butanon	100%	100%		100%	100%		
Aceton	0%	0%		0%	0%		

<b><u>Alkohole</u></b>	<b><u>54%</u></b>	<b><u>45%</u></b>		<b><u>74%</u></b>	<b><u>49%</u></b>	
1-Propanol	8%	13%		67%	11%	
2-Pentanol	83%	67%		<b>100%</b>	53%	
2-Propanol	18%	17%		43%	1%	
3-Methyl-1-butanol	<b>100%</b>	24%		61%	<b>100%</b>	
Ethanol	16%	50%		70%	25%	
<b><u>Carbonsäuren</u></b>	<b><u>98%</u></b>	<b><u>98%</u></b>		<b><u>99%</u></b>	<b><u>98%</u></b>	
2-Methylbutansäure	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
2-Methylpropansäure	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
3-Methylbutansäure	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Buttersäure	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Essigsäure	<b>92%</b>	<b>92%</b>		<b>93%</b>	<b>92%</b>	
<b><u>Furane</u></b>						
2-Pentylfuran	57%	21%	17%	10%		0%
<b><u>Terpene</u></b>	<b><u>45%</u></b>	<b><u>11%</u></b>	<b><u>17%</u></b>	<b><u>10%</u></b>	<b><u>2%</u></b>	<b><u>0%</u></b>
alpha-Pinen	18%	12%		18%	4%	
delta-3-Caren	49%	3%		8%	0%	
Limonen	67%	20%	17%	5%		0%
<b><u>Nitrile</u></b>						
Hexannitril	<b>96%</b>	<b>99%</b>	<b>98%</b>	83%		76%
<b><u>Ester</u></b>	<b><u>95%</u></b>	<b><u>82%</u></b>	<b><u>94%</u></b>	<b><u>77%</u></b>	<b><u>75%</u></b>	<b><u>37%</u></b>
Essigsäure-2-methyl-1-butylester	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Essigsäure-3-methyl-1-butylester	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Essigsäure-3-methyl-2-butylester	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Essigsäureethylester	80%	12%		0%	35%	
Essigsäuremethylester	<b>100%</b>	80%		<b>100%</b>	40%	
Hexansäuremethylester	<b>96%</b>	<b>97%</b>	<b>97%</b>	63%		24%
Octansäuremethylester	88%	85%	<b>91%</b>	74%		50%
<b><u>Schwefelorganische Verb.</u></b>						
Dimethyldisulfid	<b>100%</b>	11%		54%	45%	
<b><u>Pyrazine</u></b>	<b><u>100%</u></b>	<b><u>100%</u></b>		<b><u>100%</u></b>	<b><u>100%</u></b>	
Tetramethylpyrazin	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	
Trimethylpyrazin	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	<b>100%</b>	

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass aliphatische und cyclische Kohlenwasserstoffe sowie Aromaten, Terpene und das 2-Pentylfuran sich eher schlecht bis gar nicht mit den hier verwendeten biologischen Verfahren aus der Abluft entfernen lassen. Ausnahmen stellen das 2,2,4,6,6-Pentamethylheptan bei den aliphatischen Kohlenwasserstoffen und das 1,2,4-Trimethylbenzol bei den Aromaten dar. Beide Substanzen lassen sich offenbar in allen untersuchten Biofiltermaterialien abbauen. Entsprechende Ergebnisse für den Biowäscher liegen nicht vor. Ein Vergleich der unterschiedlichen Biofiltermaterialien untereinander zeigt, dass bei den hier erwähnten schlecht abbaubaren Stoffen der Sojakompost vergleichsweise hohe Abbaugrade erzielt.

Im Biowäscher konnte ein guter Abbau lediglich bei einigen Aldehyden und dem Hexannitril festgestellt werden. Die Aldehyde werden auch in den untersuchten Biofiltermaterialien gut abgebaut. Eine Ausnahme bildet das 2-Butenal, welches in keinem der Biofilter reduziert werden konnte. Die Abbauleistungen der verschiedenen Materialien unterscheiden sich hinsichtlich der Aldehyde kaum voneinander. Bei den Ketonen gibt es mit dem 3-Hydroxy-2-Butanon einen Vertreter, der sehr gut in Biofiltern abgebaut werden kann, und mit dem Aceton und dem 2-Butanon zwei Substanzen, die nicht bzw. kaum reduziert werden konnten. Bei dem 2-Heptanon und dem 2-Pentanon kommt der Auswahl des richtigen Biofiltermaterials eine größere Bedeutung zu. Während im Sojakompost beide Stoffe gut abgebaut werden, wird 2-Heptanon im Kokosfasermaterial deutlich schlechter und 2-Pentanon fast gar nicht abgebaut. Bei den Alkoholen zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Hier weist der Sojakompost im Vergleich zu den Kokosfasern fast durchweg schlechtere Abbaugrade auf. Im Allgemeinen lassen sich 1-Propanol, 2-Propanol und Ethanol eher schlecht und 2-Pentanol, 3-Methyl-1-butanol und Butandiol relativ gut in Biofiltern aus der Abluft entfernen. Gut abbaubar sind auch Carbonsäuren, Ester und Pyrazine. Bei einigen dieser Substanzen kommt der Wahl des Biofiltermaterials erneut eine etwas stärkere Bedeutung zu. So wird Essigsäureethylester im Sojakompost vergleichsweise gut und in den Kokosfasern gar nicht abgebaut. Ähnliches gilt für das Dimethyldisulfid als Vertreter der schwefelorganischen Verbindungen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Biowäscher Aldehyde und in Biofiltern Aldehyde, Carbonsäuren, Ester und Pyrazine sehr gut abbaubar sind. Dies bestätigt die Angaben in der VDI-Richtlinie zu Biofiltern (VDI 3477, 2004). Es hat sich darüber hinaus gezeigt, dass die Wahl des Biofiltermaterials neben dem bereits beschriebenen Einfluss auf den Geruchsabbau auch die stoffspezifischen Abbauleistungen des Biofilters beeinflussen kann, was auf Unterschiede der auf dem Biofiltermaterial angesiedelten Mikroorganismen zurückzuführen sein könnte.

Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der im Material angesiedelten Mikroorganismen und dem Geruchsabbau durch den Biofilter konnte jedoch nicht festgestellt werden (Abb. 67). Obwohl das Kakaoschalen/Kompost-Gemisch mit Abstand die höchste Bakteriendichte im Material aufweist, ist dessen

Geruchsabbauleistung deutlich geringer als bei den anderen Biofiltermedien. Auch bezüglich der Population mesophiler Schimmelpilze und des Geruchsabbaus ergeben sich keine Korrelationen (Anhang, A 12-1, A 12-2).

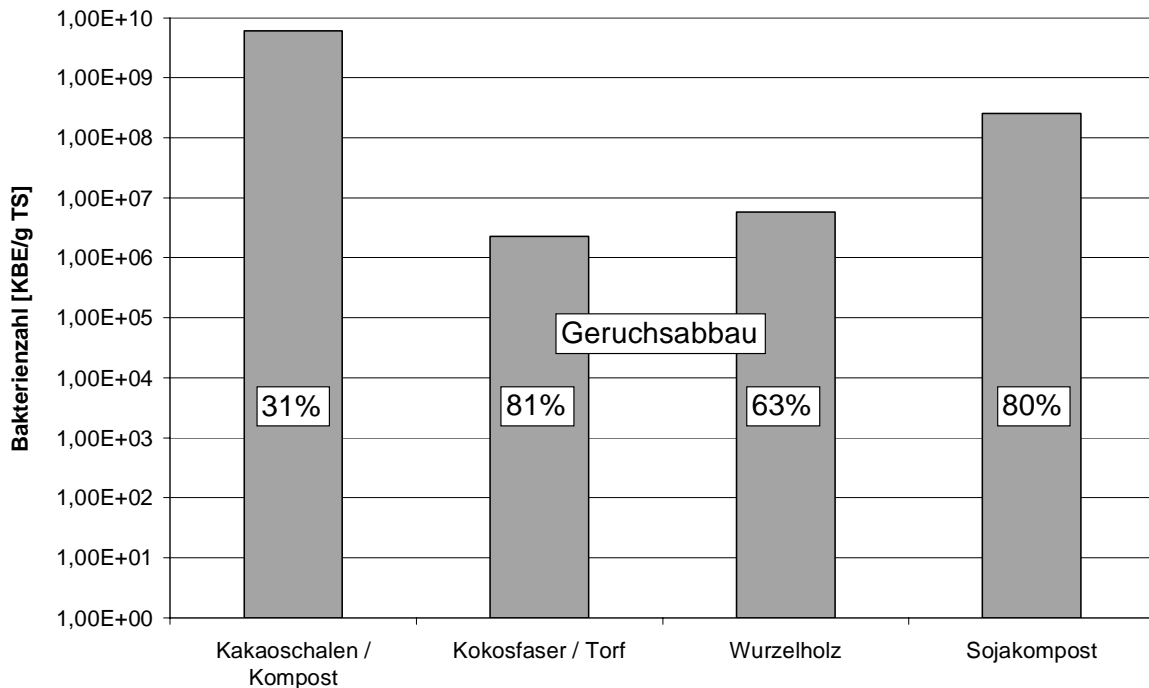


Abb. 67: Anzahl an mesophilen Bakterien je g Trockenmasse in unterschiedlichen Biofiltermaterialien und der gemessene Geruchsabbau der entsprechenden Materialien bei der Behandlung von Abluft aus der Kakaomasseherstellung (Versuchsanlage: dyn. Testsystem).

Die unterschiedlichen Mikroorganismenpopulationen in den jeweiligen Biofiltermaterialien hingegen (Abb. 68) könnten eine Erklärung für die verschiedenen stoffspezifischen Abbaueigenschaften der Medien sein. Anhand der Bilder entsteht der Eindruck, dass der Sojakompost im Vergleich zu den anderen Materialien ein breiteres Mikroorganismenspektrum aufweist. Eine genaue Bestimmung der Mikroorganismen wurde nicht durchgeführt, wäre aber ein Aspekt, der in zukünftigen Arbeiten auch näher untersucht werden könnte

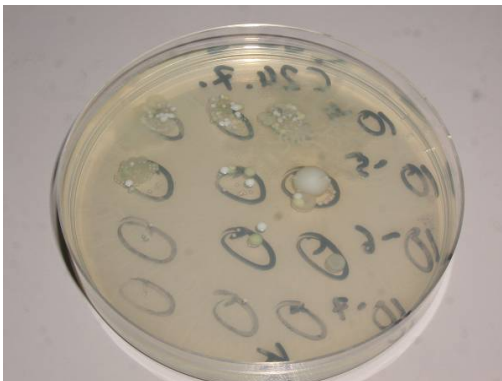
**Bakterien**

**Schimmelpilze**

Kokosfaser / Torf



Kakaokompost



Sojakompost



Wurzelholz



Abb. 68: Fotos der Bakterien- und Schimmelpilzkolonien aus Extrakten der unterschiedlichen Biofiltermaterialien im Vergleich

## 12.2 Adsorption

Eine chemisch-analytische Beurteilung der Reinigungsleistung von Aktivkohle erfolgte lediglich an der Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung in dem dynamischen Testsystem und im Technikumsmaßstab. Dabei erwies sich die Aktivkohle generell als geeignet, alle untersuchten Substanzen aus der Abluft zu entfernen. Je nach Flüchtigkeit des sorbierten Stoffes erfolgte der Durchbruch durch die Aktivkohleschüttung unterschiedlich schnell. Tab. 21 zeigt das Rückhaltevermögen der Aktivkohle im dynamischen Testsystem in Abhängigkeit von der Betriebszeit. Ein 100%-iger Abbau bedeutet, dass die betrachtete Substanz nach der Adsorptionsstufe mit der SPME/GC-MS Methode nicht mehr nachweisbar ist. Bei negativen Wirkungsgraden wurde die Reinigungsleistung auf 0% gesetzt (vergl. Kap. 9.2.2).

Tab. 21: Rückhaltevermögen der Aktivkohle hinsichtlich einzelner Substanzen aus der Abluft der Öl- und Fettveredelung in Abhängigkeit von der Betriebszeit bei einer Schütthöhe von 4,5 cm und einer Leerrohrgeschwindigkeit der Abluft von 0,07 m/s (Versuchsanlage: dyn. Testsystem)

Versuchstag	0	1	2	7	8	14	15
Pentan	100%	0%	0%	47%	5%	0%	11%
Methylcyclopentan	100%	0%	0%	30%	9%	0%	3%
2-Pentanon	100%	91%	78%	0%	0%	0%	2%
1-Hepten	100%	81%	63%	0%	0%	0%	0%
Toluol	100%	92%	80%	0%	0%	0%	0%
1-Octen	100%	95%	93%	0%	0%	0%	0%
Hexanal	100%	97%	96%	0%	0%	0%	0%
Ethylbenzol	100%	96%	92%	0%	0%	0%	0%
p-Xylol	100%	97%	96%	0%	0%	0%	0%
Hexannitril	100%	97%	96%	19%	0%	0%	0%
2-Heptanon	100%	98%	98%	0%	0%	0%	0%
Heptanal	100%	98%	99%	22%	35%	0%	0%
Hexansäuremethylester	100%	100%	98%	0%	0%	0%	0%
Benzaldehyd	100%	100%	100%	62%	68%	0%	0%
2-Pentylfuran	100%	99%	99%	70%	70%	0%	0%
1,2,3,3-Tetramethylcyclohexen	100%	97%	94%	0%	0%	0%	0%
Octanal	100%	100%	100%	85%	84%	9%	15%
Limonen	100%	97%	99%	50%	46%	0%	0%
Nonanal	100%	100%	100%	95%	94%	62%	67%
Octansäuremethylester	99%	91%	92%	94%	90%	51%	55%
1,2,3,4-Tetramethylbenzol	99%	94%	94%	94%	91%	64%	65%
(E)-2-Nonenal	100%	97%	100%	97%	95%	79%	81%
Decanal	100%	100%	100%	100%	93%	89%	90%
(E,E)-2,4-Nonadienal	100%	100%	100%	100%	95%	72%	81%
(E,Z)-2,4-Decadienal	100%	100%	100%	100%	100%	97%	96%
(E,E)-2,4-Decadienal	100%	98%	100%	100%	100%	98%	97%

Anhand der Tab. 21 ist zu erkennen, dass, nachdem die Substanzen anfangs alle zurückgehalten wurden, sie mit zunehmender Versuchsdauer mehr und mehr durchbrechen. Je leichter flüchtig die Geruchsstoffe sind, desto schneller erfolgt ihr Durchbruch. Entsprechend der in der Tabelle gewählten Reihenfolge der Stoffe nimmt die Flüchtigkeit von oben nach unten ab. Es liegt die Vermutung nahe, dass bei Adsorption eines Stoffgemisches an Aktivkohle, vergleichbar mit der an der SPME-Faser, die leichter flüchtigen von den schwerer flüchtigen Substanzen von ihren Adsorptionsplätzen verdrängt werden. Entsprechend ist die Aktivkohle für den Rückhalt von schwer flüchtigen Stoffen besser geeignet als von leichter flüchtigen.

Das Durchbruchverhalten der Aktivkohle ändert sich jedoch, wenn sich bei langen Betriebsperioden, beispielsweise begünstigt durch feuchte Milieubedingungen, Mikroorganismen innerhalb der Adsorptionsstufe ansiedeln. Unter diesen Umständen kann sie sich zu einer biologischen Stufe ausbilden. Ein solcher Fall ist in Tab. 22 beschrieben. Hier sind die Ergebnisse aus einem Adsorptionsversuch an der Technikumsanlage dargestellt, bei dem sich die Aktivkohle in Fließrichtung der Abluft hinter einem Biofilter befunden hat. Neben den Stoffen Pentan und Methylcyclopentan, die wie im obigen Beispiel auch sehr schnell durchbrechen, gibt es eine Reihe von Substanzen, die auch über einen Zeitraum von mehr als 200 Tagen noch vollständig zurückgehalten werden. Bei reinem Adsorptionsverhalten hätte jedoch ein Durchbruch erfolgen müssen. Dies deutet auf einen zusätzlichen Reinigungsmechanismus, z.B. einen biologischen Abbau, hin. Bei Substanzen wie 1-Hepten und Ethylbenzol ist deutlich zu erkennen, dass zunächst ein Durchbruch durch die Aktivkohle erfolgt. Bis zu diesem Zeitpunkt sind für die Abreinigung in erster Linie Adsorptionsmechanismen verantwortlich. Nach lange andauernder Betriebszeit steigen die Wirkungsgrade bei diesen Stoffen jedoch wieder an, was auf die Ausbildung einer auf den Abbau dieser Substanzen spezialisierten Mikroorganismenpopulation zurückzuführen ist. Andere Stoffe hingegen werden nicht abgebaut, und der Durchbruch ist dauerhaft.

Tab. 22: Rückhaltevermögen von Aktivkohle hinsichtlich einzelner Substanzen aus der Abluft der Öl- und Fettveredelung in Abhängigkeit von der Betriebszeit bei einer Schütthöhe von 13 cm und einer Leerrohrgeschwindigkeit der Abluft von 0,08 m/s (Versuchsanlage: Technikumsanlage)

Versuchstag	3	14	21	28	...	213
Pentan	0%	0%	0%	0%		0%
Methylcyclopentan	0%	0%	0%	0%		-
2-Pentanon	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
1-Hepten	<b>100%</b>	<b>100%</b>	0%	0%		<b>100%</b>
Toluol	<b>100%</b>	<b>100%</b>	0%	0%		0%
1-Octen	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>96%</b>	26%		<b>100%</b>
Hexanal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Ethylbenzol	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	17%		<b>100%</b>
p-Xylol	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>99%</b>	<b>97%</b>		0%
Hexannitril	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
2-Heptanon	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Heptanal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Hexansäuremethylester	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Benzaldehyd	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
2-Pentylfuran	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>98%</b>		0%
1,2,3,3-Tetramethylcyclohexen	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>98%</b>	<b>91%</b>		0%
Octanal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Limonen	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Nonanal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Octansäuremethylester	88%	74%	76%	81%		60%
1,2,3,4-Tetramethylbenzol	<b>92%</b>	<b>95%</b>	<b>95%</b>	<b>98%</b>		58%
(E)-2-Nonenal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
Decanal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
(E,E)-2,4-Nonadienal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
(E,Z)-2,4-Decadienal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>
(E,E)-2,4-Decadienal	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>



---

## **13 ANWENDUNG DES GERUCHSMANAGEMENTKONZEPTS AM BEISPIEL EINES ÖL- UND FETTVERARBEITENDEN BETRIEBES**

Der hier betrachtete Betrieb betreibt eine Speiseöl- und Speisefettraffinerie einschließlich Hydrieranlage für Speiseöl. Die Abluft aus der Öl- und Fettveredelung weist teilweise einen stark stechenden, ranzigen Geruchseindruck auf, der als unangenehm beschrieben wird. Entsprechend schnell können Geruchsemissionen dieser Stoffe in Wohngebieten zu Beschwerden führen.

Bei dieser Industrieanlage handelt es sich um ein über viele Jahrzehnte gewachsenes Werk, das über zahlreiche potenzielle Emissionsquellen verfügt. Der Großteil der anfallenden Prozessabluft wird derzeit weder gesammelt erfasst noch einer Behandlung zugeführt. Vereinzelt Beschwerden von Anwohnern über unangenehme Gerüche werden oftmals diesem Betrieb zugeordnet. Um Geruchsemissionen möglichst nachhaltig zu reduzieren, sollen durch Anwendung des Geruchsmanagementkonzeptes Emissionsquellen erfasst, bewertet und geeignete Abluftbehandlungsverfahren zur Geruchsreduzierung ausgewählt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird schrittweise die konzeptionelle Umsetzung dieser Ziele, von der Darlegung grundlegender Informationen bis hin zu ausgeführten Berechnungen für Lösungsansätze, beschrieben.

### **13.1 Grundlegende Informationen über Geruchsemissionen bei der Öl- und Fettveredelung**

Bei der Raffination von Speiseölen und -fetten (Abb. 69) fallen relevante Geruchsemissionen vor allem bei deren Desodorierung an. In diesem Verfahrensschritt werden unerwünschte Substanzen (sog. Ranzstoffe) im Hochvakuum aus dem Produkt abdestilliert. Bei den hier frei werdenden Substanzen handelt es sich größtenteils um typische Fettoxydationsprodukte wie organische Säuren, Aldehyde und Ketone, die in der Literatur für unterschiedliche Öle beschrieben sind (Belitz et al., 2004; Jelen et al., 2000; Dijkstra, 1999; Morales et al., 1994). Darüber hinaus finden sich z.B. Fettsäuremethylester, unterschiedliche Kohlenwasserstoffe, Terpene

und Nitrile. Einige dieser Substanzen sind nicht aus den Fetten selbst gebildet worden, sondern stammen aus fettfremden Rohstoffbestandteilen (z.B. Terpene). Auch Reste des technischen Hexans, das zur Extraktion verwendet wurde, werden hier abgeschieden. Darüber hinaus sind auch Kontaminationen aus Transport und Lagerung der Rohstoffe denkbar. Weiterführende Informationen sind unter anderen in Schlegelmilch et al. (2004) zu finden.

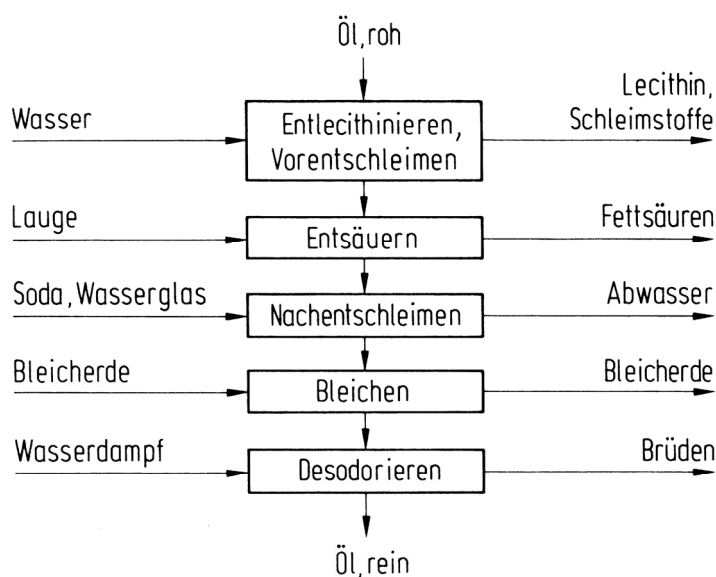


Abb. 69: Raffination von Speiseölen (Belitz und Grosch, 1992)

## 13.2 Erstellung eines Geruchskatasters

### 13.2.1 Bestimmung und Bewertung der Geruchsquellen

Für die Erstellung des Geruchskatasters wurde der entscheidende Bereich des Werkes mit orts- und fachkundigem Personal auf Geruchsemissionen hin inspiziert. Emissionsquellen wurden auf Katasterbögen (Anhang, A 13-1) charakterisiert und in einem Lageplan (Abb. 70) markiert.

In Tab. 23 sind die Hauptgeruchsquellen auf dem betrachteten Geländeabschnitt zusammengestellt. Als Hauptemissionsquellen sind die Abluft aus dem Bereich der Entfärbung (Filter und Bleicher) sowie der Seifenspaltung ausgemacht worden. Zusammen sind sie für ca. 92% der ermittelten Gesamtgeruchsfracht verantwortlich. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Abluftmengen führen die Emissionen mit Geruchskonzentrationen um 50.000 GE/m<sup>3</sup> zu einer recht hohen Geruchsbelastung der Umgebung. Der Geruchseindruck der Abluft aus den Filtern und Bleichern wird jedoch mit Spargelschalen, Kartoffelschalen und Grillanzündern assoziiert. Dies ist nicht der typische ranzige Geruch, der für gewöhnlich mit dem Werk in Verbindung gebracht wird. Die aus den Behältern der Seifenspaltung ausgasenden Gerüche (Q 10) hingegen weisen eine klare ranzige Note auf. Diese Quelle ist sicher als Hauptverursacher für die Geruchsbelästigung in der Umgebung des Werkes zu bewerten.

Eine weitere passive, diffuse Geruchsquelle stellen die Rezirkulationsbecken (Fallwassertanks) der Kalilauge aus der Desodorierung der Fette und Öle dar. Die Abluft aus der Vakuumdestillation wird über Dampfstrahl-Vakuumpumpen mit einer Wasserringpumpe als Endstufe abgesaugt. Im Fallwasserkreislauf werden die freien Fettsäuren verseift und andere Abluftinhaltsstoffe im alkalischen Fallwasser gelöst. Die im rezirkulierenden alkalischen Fallwasser gelösten Geruchsstoffe, wie z.B. Aldehyde und Ketone, werden bei Kontakt mit Umgebungsluft freigesetzt und bilden eine Geruchsquelle. Die Fallwassertanks befinden sich in einem Kellerraum, aus dem aufgrund der offenen Fenster und Türen diffus Gerüche in die Umgebung emittieren. Untersuchungen zur Auswahl eines geeigneten Behandlungsverfahrens wurden repräsentativ an diesen Emissionen durchgeführt.



Tab. 23: Aufstellung der aktiven Hauptgeruchsquellen auf dem betrachteten Geländeabschnitt des Öl und Fett verarbeitenden Werkes

Anlage (Bezeichnung)	Volumenstrom [m³/h]	Geruch [GE/m³]	Geruchsfracht [GE/h]	Anteil an Gesamtemissionen [%]	Geruchseindruck
1 Vakuumanlage Härtung	(2-)100	9.400	940.000	0,2	Gummi, Anis
2 Vakuumanlage Bleichung	8	1.200.000	9.600.000	2,3	ranzig, grün, fruchtig
3 Vakuumanlage Kontideso	12	500.000	6.000.000	1,5	stechend, ranzig
4 Reserve Vakuumanlage Deso Ringleitung	3	76.000	230.000	0,1	Teppich
5 Vakuumpumpe Umesterung	7	1.000.000	7.000.000	1,7	ranzig, alkoholisch
6 Vakuumanlage Deso 2	11	310.000	3.400.000	0,8	Kaffee, nussig
7 Vakuumanlage Bleichung / Umesterung	3	160	480	0,0	Gummi, staubig
8 Vakuumanlage Deso 1	10	380.000	3.800.000	0,9	Reinigungsmittel, fruchtig, ranzig
9 Vakuumanlage Deso 0	3	480.000	1.400.000	0,3	
<b>10 Behälter Seifenspaltung</b>	<b>2.900</b>	<b>55.000</b>	<b>160.000.000</b>	<b>38,8</b>	<b>ranzig</b>
11 Abluft aus Filter / Bleicher	4.500	48.000	220.000.000	53,4	Spargelschalen
<b>Summe</b>	<b>7486</b>		<b>412.370.480</b>	<b>100</b>	

### 13.2.2 Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe

Eine chemisch-physikalische Analyse der anlagentypischen Geruchsquellen ergab das in Tab. 24 dargestellte Spektrum an identifizierten Geruchsstoffen. Über den Odour-Index sind entsprechend Kap. 9.1 die Hauptgeruchsstoffe bestimmt worden, die einen wesentlichen Einfluss auf die Geruchsemissionen bzw. den Geruchseindruck dieser Quelle haben. Die für eine Bewertung erforderlichen Geruchsschwellenwerte in Tab. 24 sind anhand einschlägiger Literaturdaten (Rychlik et al., 1998; Devos et al., 1990; Amoore und Hautala, 1983; Van Gemert und Nettenbreijer, 1977) nach folgendem Schema festgelegt worden. Da sich die Geruchsschwellenwerte bei den unterschiedlichen Autoren teilweise deutlich voneinander unterscheiden, sind die Literaturwerte im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit gewichtet worden. Bei der Mittelwertbildung über die zur Verfügung stehenden Werte wurde berücksichtigt, aus wie vielen Einzelmessungen der veröffentlichte Wert hervorgegangen ist und eine entsprechende Gewichtung vorgenommen.

Tab. 24: Mit der SPME-GC/MS-Methode identifizierte Substanzen einer charakteristischen Abluftquelle aus der Öl- und Fettveredelung (Rohluft, Keller). Hauptgeruchsstoffe sind fett dargestellt.

Substanzklasse Substanz	Geruchsschwelle [ng/L]	Geruchseindruck	Peakfläche (a)	Peakfläche / Geruchsschwelle (OI)	Anteil an Gesamtgeruch (OI%)
<b>aliphatische Kohlenwasserstoffe</b>					
<u>gesättigt</u>					
Pentan	95499	Kohlenwasserstoff	4.006.256	42	<1%
Hexan	79433		729.523	9	<1%
Heptan	40738	Kohlenwasserstoff	1.413.877	35	<1%
Octan		Kohlenwasserstoff	2.860.555		<1%
Nonan	6761	Kohlenwasserstoff	2.108.353	312	<1%
Decan	4365	Kohlenwasserstoff	130.858	30	<1%
Undecan		Kohlenwasserstoff	562.137		<1%
2-Methylpentan					<1%
3-Methylpentan					<1%
<u>ungesättigt</u>					
2-Methyl-1-propen	28840		374.941	13	<1%
(E)-2-Penten			347.245		<1%
1,3-Pentadien			638.655		<1%
1-Hexen			182.015		<1%
1-Hepten		Kohlenwasserstoff	887.420		<1%
2-Hepten			241.324		<1%
3-Hepten			172.798		<1%
1-Octen	288	Benzin	2.939.462	10.192	<1%
(E)-2-Octen	355		1.508.844	4.253	<1%
(Z)-2-Octen	355		3.257.552	9.181	<1%
(Z)-3-Octen					<1%
1,3-Octadien			1.016.847		<1%
1,3,5-Octatrien			905.163		<1%
2,4,6-Octatrien					<1%
(E)-2-Nonen			656.240		<1%
1,3-Nonadien			1.209.052		<1%
(E,E)-2,4-Nonadien			560.893		<1%
3-Nonen			1.206.753		<1%
5-Undecen			1.855.952		<1%
<b>cyclische Kohlenwasserstoffe</b>					
Methylcyclopentan			70.980		<1%
1,2,4,4-Tetramethylcyclopentan			4.020.290		<1%
1,3-Cyclopentadien	10471		541.133	52	<1%
Cyclohexan		aromatisch			<1%
1,2,3,3-Tetramethylcyclohexen		Teppich, Lösungsmittel	4.231.636		<1%
1-Methyl-4-(1-methylethyl)-cyclohexen			7.086.343		<1%
1,3,5,5-Tetramethyl-1,3-cyclohexadien			352.557		<1%
<b>aromatische Kohlenwasserstoffe</b>					
Benzol	12023		666.371	55	<1%
Toluol	5888	Farbe	54.933.592	9.329	<1%
p-/m-Xylol	2138	Plastik, aromatisch	72.519.985	33.920	<1%
o-Xylol	3802	Plastik, aromatisch	4.370.551	1.150	<1%
1,2,4-Trimethylbenzol	776	Plastik	2.821.091	3.634	<1%
1,2,3,4-Tetramethylbenzol		aromatisch	1.589.840		<1%
<b>Ethylbenzol</b>	<b>13</b>	<b>aromatisch</b>	<b>1.668.218</b>	<b>129.495</b>	<b>1%</b>
1-Ethyl-3-methylbenzol			2.015.612		<1%
Cymol (1-Methyl-4-(1-methylethyl)-benzol)	490	Lösungsmittel, Citrus, Diesel	2.143.777	4.375	<1%
4-Ethenyl-1,2-dimethylbenzol			520.442		<1%
Propylbenzol			880.055		<1%
Butylbenzol			1.692.266		<1%
Pentylbenzol			858.302		<1%
Styrol	631	balsamisch	141.383	224	<1%
1,2,3,4-Tetrahydro-1,1,6-trimethylnaphthalen			8.753.197		<1%

<b>Aldehyde</b>					
Butanal	28	grün, stechend	103.485	3.757	<1%
Pentanal	22	stechend, Mandel, malzig	1.060.407	48.470	<1%
<b>Hexanal</b>	<b>43</b>	<b>Gras, Apfel, ranzig</b>	<b>25.744.997</b>	<b>598.721</b>	<b>5%</b>
<b>Heptanal</b>	<b>23</b>	<b>ölig, Citrus, ranzig</b>	<b>3.446.811</b>	<b>150.459</b>	<b>1%</b>
<b>Octanal</b>	<b>7,2</b>	<b>fettig, ölig</b>	<b>764.830</b>	<b>105.576</b>	<b>1%</b>
<b>Nonanal</b>	<b>4,5</b>	<b>ranzig, Citrus</b>	<b>2.176.585</b>	<b>483.686</b>	<b>4%</b>
<b>Decanal</b>	<b>5,9</b>	<b>blumig, Orangenschale</b>	<b>542.179</b>	<b>92.075</b>	<b>1%</b>
2-Propenal (Acrolein)	407	stechend	1.988.330	4.881	<1%
2-Hexenal					<1%
(E)-2-Heptenal	63	fettig, ölig, Mandel	1.081.145	17.135	<1%
(E)-2-Octenal		grün	2.240.255		<1%
<b>(E)-2-Nonenal</b>	<b>1,1</b>	<b>ranzig, Gurke</b>	<b>10.212.739</b>	<b>8.894.924</b>	<b>80%</b>
(E,E)-2,4-Nonadienal	4,9	fettig, ölig	269.480	55.021	<1%
<b>(E,E)-2,4-Decadienal</b>	<b>4,6</b>	<b>frittirt</b>	<b>1.042.401</b>	<b>228.052</b>	<b>2%</b>
(E,Z)-2,4-Decadienal	4,6	frittirt	608.556		<1%
3-Methylbutanal	3,0	malzig	134.868	44.956	<1%
Benzaldehyd	186	Bittermandel	1.266.947	6.804	<1%
<b>Ketone</b>					
Aceton	34674	Lösungsmittel, stechend, aromatisch	95.055	3	<1%
2-Butanon	61000	Ether			<1%
2-Pentanon	5495	Ether, fruchtig	1.774.840	323	<1%
2-Hexanon		Ether			<1%
2-Heptanon	676	seifig, fruchtig	3.746.187	5.541	<1%
3-Octanon		Kräuter	312.148		<1%
2-Nonanon		heiße Milch	636.681		<1%
2,2,6-Trimethylcyclohexanon			1.606.947		<1%
1-Octen-3-on*	0,6	pilzig			<1%
<b>Alkohole</b>					
1-Hexanol	186	grün, blumig, harzig			<1%
1-Octen-3-ol*	32	pilzig			<1%
<b>Carbonsäuren</b>					
Propansäure	110	fruchtig, stechend	147.903	1.349	<1%
<b>Furane</b>					
2-Methylfuran			264.525		<1%
3-Methylfuran			32.351		<1%
2-Ethylfuran		süßlich	353.469		<1%
<b>2-Pentylfuran</b>	<b>91</b>	<b>Butter, grüne Bohnen</b>	<b>9.873.818</b>	<b>108.264</b>	<b>1%</b>
<b>Terpene</b>					
Limonen	2455	Citrus	19.452.940	7.925	<1%
<b>Nitrile</b>					
Pentannitril					<1%
Hexannitril					<1%
Heptannitril					<1%
Pentandinitril			3.023.426		<1%
<b>Fettsäuremethylester</b>					
Octansäuremethylester		fruchtig	24.297.180		<1%
Hexansäuremethylester		fruchtig	2.418.105		<1%
Decansäuremethylester		Wein	3.136.630		<1%
Dodecansäuremethylester		Kokosnuss	329.101		<1%
			<b>Summe</b>	<b>11063824</b>	<b>96%</b>

\* keine eindeutige Bestimmung möglich (1-Octen-3-on und 1-Octen-3-ol besitzen nahezu identische RetentionsIndices und Geruchsnoten)

Für die in Tab. 24 als Hauptgeruchsstoffe hervorgehobenen Substanzen wurde ein relativer Odour Index von mind. 1% als Kriterium festgelegt. Nach Auswertung zahlreicher weiterer Untersuchungen an der Rohluft konnten die in Abb. 71 dargestellten 10 Hauptgeruchsstoffe identifiziert werden, die zusammen im Mittel für etwa 99% der Geruchsemissionen verantwortlich sind. Dies sind fast ausschließlich Aldehyde. Allein auf die Substanzen Nonenal, Hexanal und Nonanal fällt ein Anteil von über 90%, wobei dem Hauptgeruchsstoff Nonenal mit durchschnittlich knapp 85% rechnerisch die größte Bedeutung zukommt. Den größten Mengenanteil besitzt hingegen Hexanal. Tatsächlich wird dessen Beitrag zum Gesamtgeruch aufgrund von Übersättigungs- und Verdrängungseffekten unterschätzt (s. Kap 9.2.2). Auch die Geruchsbeschreibungen der Einzelsubstanzen decken sich mit den vorwiegend ranzigen Geruchseindrücken, die bei der Beschreibung der Emissionsquelle genannt werden. Im Hinblick auf eine Behandlung der Abluft mit dem Ziel einer Geruchsreduzierung kann folglich davon ausgegangen werden, dass bei einer erfolgreichen Verminderung der Aldehydkonzentration im Abluftstrom sich auch dessen Geruchsstärke entscheidend verringert.

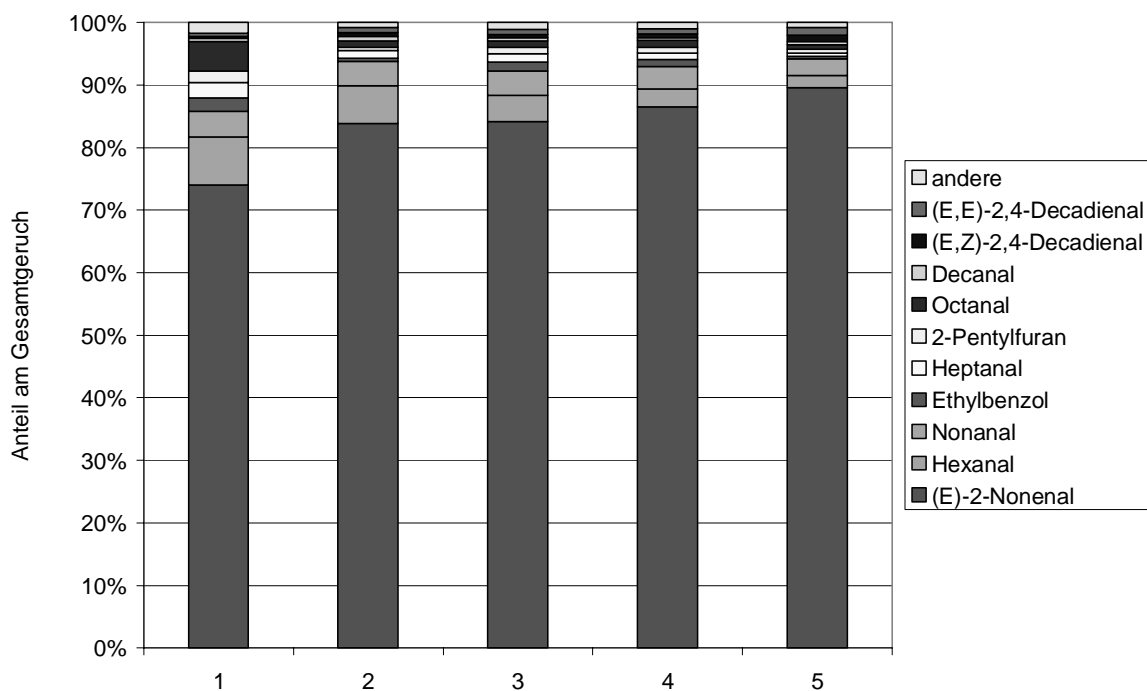

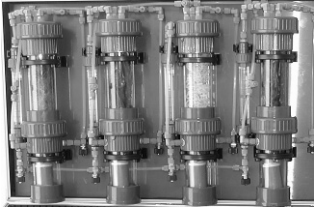




Abb. 71: Über den Odour-Index errechneter Anteil der Hauptgeruchsstoffe am Gesamtgeruch von Prozessabluft aus der Öl- und Fettveredelung an 5 Messtagen

### 13.3 Auswahl geeigneter Behandlungsverfahren

Aus der Literatur ist bekannt, dass biologische Verfahren bereits mit Erfolg bei Öl- und Fett verarbeitenden Betrieben eingesetzt worden sind (VDI 2592, 2000; Böse et al., 1997; Eitner, 1992). Neben der Biofiltration wurden weiterhin die Einsatzmöglichkeiten von Ab- und Adsorptionsverfahren untersucht. Bei den hierfür erforderlichen Versuchsreihen kamen die in Tab. 25 aufgelisteten Versuchsanlagen zum Einsatz.

Tab. 25: Zur Reduzierung von Geruchsemissionen aus der Öl- und Fettveredelung verwendete Versuchsanlagen und Behandlungsverfahren

Versuchsanlage	Behandlungsverfahren	Belastungen
<u>Labormaßstab</u>		
Statisches Testsystem 	Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> </ul>	5 mL/L (Material / Abluftvolumen)
Dynamisches Testsystem 	Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> <li>• <i>Rindenmulch</i></li> <li>• <i>Kokosfasern/Torf</i></li> </ul> Wäscher <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wasser</i></li> </ul> Adsorption <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Aktivkohle</i></li> </ul>	4 x 75 L/h
<u>Technikumsmaßstab</u>		
	Kombination Biowäscher Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Grünschnittkompost</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> </ul> Adsorption <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Aktivkohle</i></li> </ul>	1-3,5 m³/h
<u>Containermaßstab</u>		
	Kombination Biowäscher Biofilter <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wurzelholz</i></li> <li>• <i>Sojakompost</i></li> <li>• <i>Rindenmulch</i></li> <li>• <i>Kokosfasern/Torf</i></li> </ul>	400-1000 m³/h

### 13.3.1 Voruntersuchungen mit Testsystemen

Die biologische Abbaubarkeit der Geruchsstoffe dieser Abluft war bereits aus den Optimierungsversuchen der Testsysteme bekannt. Mit dem statischen Testsystem konnten Geruchsabbauleistungen von etwa 90% bei den Biofiltermaterialien Wurzelholz und Sojakompost festgestellt werden (Kap.10.1). Im Folgenden wird geprüft, ob auch weitere Verfahren potenziell für die Reinigung der Abluft geeignet sind.

Mit dem dynamischen Testsystem wurden unterschiedliche Abluftbehandlungsverfahren parallel untersucht. Zum Einsatz kamen Wasser als reines Absorptionsverfahren, Aktivkohle als Beispiel für ein Adsorptionsverfahren und das Biofiltermaterial Sojakompost. Für die Absorptionseinheit wurden 2 Testeinheiten in Reihe geschaltet. Um ein Austrocknen des Biofiltermaterials zu verhindern, wurde die durch den Wäscher befeuchtete und vorbehandelte Luft in die Biofiltereinheit geleitet. Dies entspricht einer gängigen Konditionierung der Abluft beim Betrieb von Biofiltern. Die Betriebsparameter für diese Versuchsreihe sind der nachfolgenden Tab. 26 zu entnehmen.

Tab. 26: Versuchsparameter für Voruntersuchungen mit dem dynamischen Testsystem zur Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

<u>Versuchsanlage:</u>	dynamisches Testsystem
<u>Versuchszeitraum:</u>	5 Tage
<u>Behandlungsverfahren:</u>	Adsorption (Aktivkohle) Absorption (Wasser) Biofilter (Sojakompost)
<u>Abluftvolumenstrom (je Einheit):</u>	75 L/h
<u>Belastungen</u>	
Aktivkohle:	375 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
Wäscher (Leerohrgeschwindigkeit):	0,01 m/s
Biofilter:	180 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h

In Abb. 72 sind die Geruchsminderungsgrade der unterschiedlichen Abluftbehandlungsverfahren dargestellt. Bei der Betrachtung des Biofilters wurde die Reinigungsleistung des Wäschers direkt mit einbezogen. Die Ergebnisse zeigen,

dass der Biofilter und die Aktivkohle für die Behandlung der Abluft geeignet erscheinen. Die Absorptive Reinigung mit Wasser hingegen lieferte keine viel versprechenden Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt nachfolgender Untersuchung auf biologische Verfahren und die Adsorption gelegt.

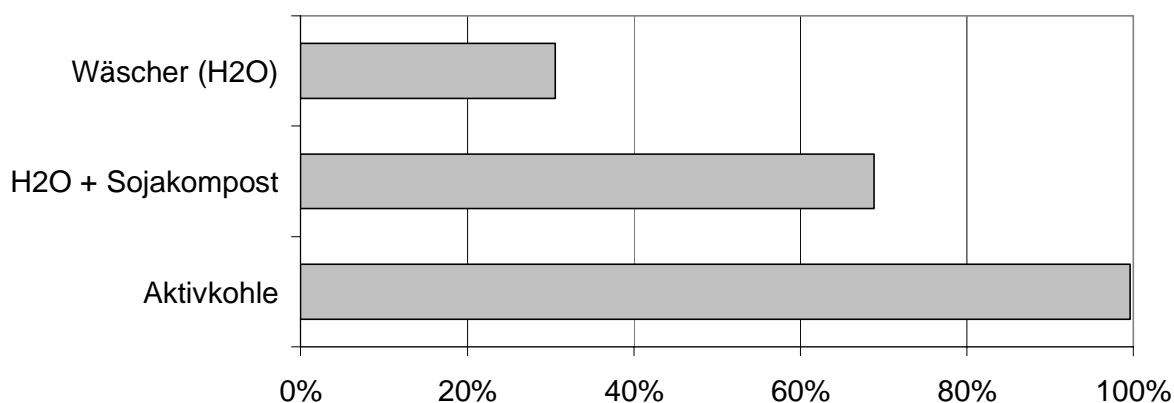


Abb. 72: Geruchsminderungsgrade unterschiedlicher Abluftbehandlungsverfahren als Resultate von Untersuchungen mit dem dynamischen Testsystem (Messwerte im Anhang, A 13-2)

In weiterreichenden Forschungsarbeiten zur Absorption hat Freudenthal et al. (2006) in vergleichbaren statischen und dynamischen Testreihen an derselben Abluft vier Waschflüssigkeiten untersucht. Zum Einsatz kamen Wasser, eine wässrige Huminstoff-Lösung, ein Mineralöldestillat (HC 10) und Tetraethylenglycoldimethyl-ether (TEGDE). Die höchste Geruchsreduzierung von 97 und 98% wurde mit den Waschlösungen HC10 und TEGDE erreicht. Die Reduzierung mit Hilfe der Huminstoff-Lösung lag mit 42% (stat.) bzw. 70% (dyn.) im mittleren Bereich. Beim Test mit Wasser trat eine starke Diskrepanz zwischen den ermittelten Reduzierungsleistungen mit dem statischen Verfahren (32%) und dem dynamischen Test (88%) auf (Freudenthal et al., 2006). Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Versuchen wurden die Waschflüssigkeiten in diesem Fall beim dynamischen Testsystem nicht im Kreislauf geführt, sondern nur einmal mit der Gasphase in Kontakt gebracht.

### 13.3.2 Überprüfung bisheriger Ergebnisse im Technikumsmaßstab

In dieser Versuchreihe wurden die biologischen Abluftbehandlungsverfahren und die Adsorption näher auf ihre Eignung zur Geruchsreduzierung für den beschriebenen Anwendungsfall untersucht. Mit dem Ziel, die Geruchsemissionen der betrachteten Abluft auf ein Minimum zu reduzieren und entsprechend den Informationsgewinn aus diesen Versuchen zu optimieren, wurden die Verfahren phasenweise miteinander kombiniert.

#### Adsorption

Für die nähere Beurteilung der Effektivität von Adsorptionsverfahren ist das Durchbruchverhalten der zu behandelnden Geruchsstoffe durch das jeweilige Adsorbens von entscheidender Bedeutung. An dem dynamischen Testsystem wurden für eine ausgewählte Aktivkohle (Chemviron KI 3-P kaliumjodiert) bei unterschiedlichen Belastungszuständen die Durchbruchkurven olfaktometrisch für den Geruch und chemisch-analytisch für einzelne Geruchsstoffe bestimmt. Die eingestellten Versuchsbedingungen sind in Tab. 27 aufgezeigt.

Tab. 27: Am dynamischen Testsystem eingestellte Versuchsparameter bei der Bestimmung der Durchbruchkurven von Geruch aus der Öl- und Fettveredelung mit Aktivkohle bei unterschiedlichen Belastungszuständen

<u>Versuchsanlage:</u>	dyn. Testsystem			
<u>Versuchszeitraum:</u>	5 Wochen			
<u>Behandlungsverfahren:</u>	Adsorption (Aktivkohle)			
	<u>DT-1</u>	<u>DT-2</u>	<u>DT-3</u>	<u>DT-4</u>
Menge [mL]	400	100	200	200
Abluftvolumenstrom [L/h]	500	500	500	300
Beladung [L/mL h]	1,25	5	2,5	1,5
Schütthöhe [cm]	18	4,5	9	9
Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]	0,07	0,07	0,07	0,04

In Kap. 9.2.2 wurden bereits die Durchbruchkurven für Einzelsubstanzen diskutiert. In Abb. 73 sind die Durchbruchkurven für den Geruch durch die Aktivkohle bei den

unterschiedlichen Ansätzen über die Zeit dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Testeinheit DT-1 zwei Tage nach den anderen befüllt wurde und somit die x-Achse für diese Datenreihe entsprechend verschoben ist. Diese Darstellung ermöglicht einen besseren Vergleich der Ergebnisse mit der Rohluftkonzentration am Probenahmetag.

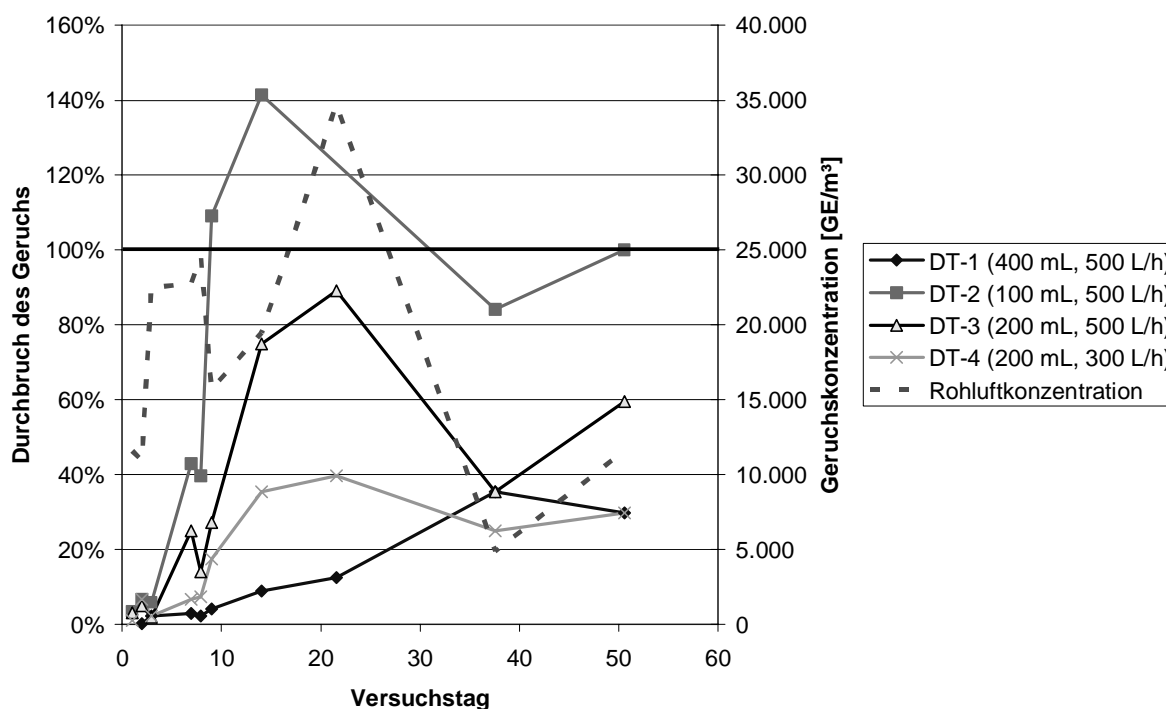


Abb. 73: Durchbruchkurven für Geruch bei Adsorption an Aktivkohle bei unterschiedlichen Belastungszuständen

Deutlich ist in Abb. 73 zu erkennen, dass mit sinkender Aktivkohlemenge und auch mit steigender Belastung der Geruch schneller durchbricht. Offensichtlich hat die Rohluftkonzentration einen starken Einfluss auf das Durchbruchverhalten der unterschiedlichen Schüttungen. Dies resultiert in nicht unerheblichen Schwankungen im Kurvenverlauf, welche besonders nach dem vollständigen bzw. nahezu vollständigen Durchbruch der Testeinheiten mit der höchsten Belastung (DT-2, DT-3) zu beobachten waren. Weniger Einfluss haben derartige Störeinflüsse auf die noch nicht voll beladenen Aktivkohleschüttungen (DT-1, DT-4), da noch genügend Kapazität an freien aktiven Zentren vorhanden ist. Dennoch erscheint allgemein die Aktivkohle unter den gegebenen Bedingungen nicht besonders gut geeignet, den

Geruch in der Abluft zu behandeln, da nach nur wenigen Tagen der Geruch schon zu etwa 10% durchgebrochen ist. Diese Feststellung wird durch einen Blick auf die Geruchskonzentrationen der behandelten Abluft in Abb. 74 bestätigt. In dieser Darstellung sind die laufenden Versuchstage von DT-1 an die der anderen Testeinheiten angepasst.

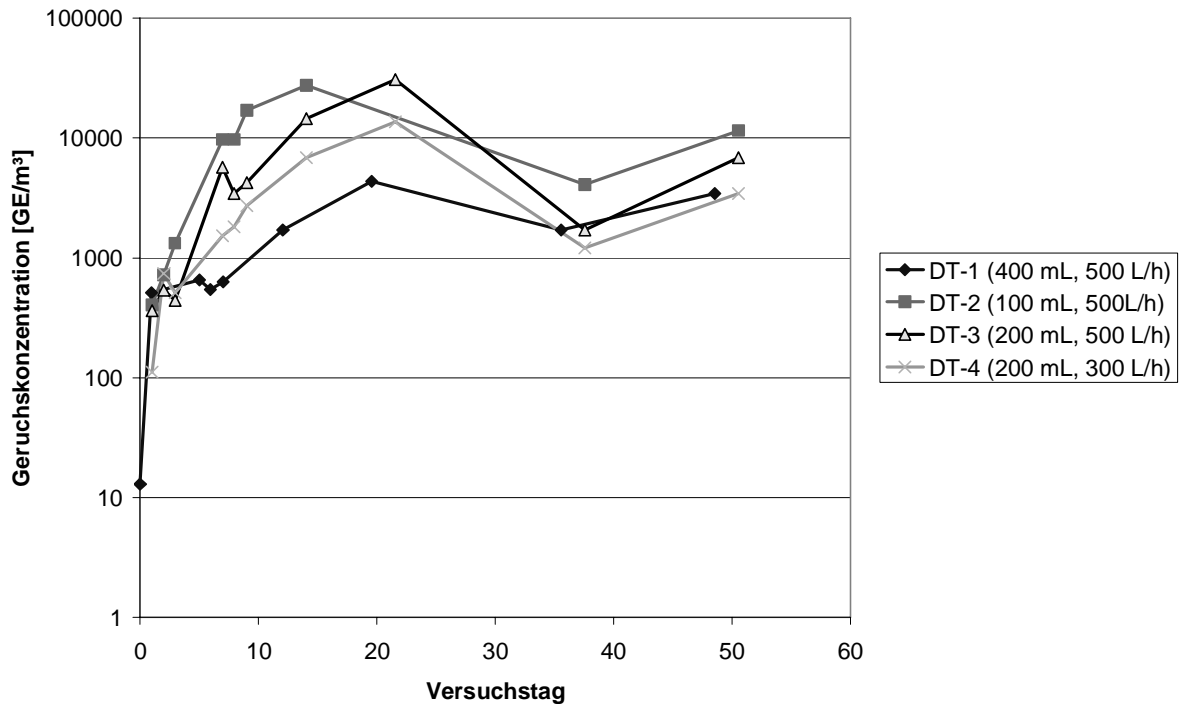


Abb. 74: Konzentrationsverläufe von durch Aktivkohle behandelte Abluft

Es ist zu sehen, dass schon nach 10 Versuchstagen die Konzentration bei allen Testeinheiten oberhalb von 1.000 GE/m<sup>3</sup> liegt. Dies ist keine Größenordnung, die für Reingaswerte einer Abluftbehandlungsanlage mit dem Ziel der Geruchsreduzierung akzeptabel ist. Eine reine Adsorptionsanlage zur Reduzierung der Geruchsemissionen ist für diesen Anwendungsfall folglich nicht geeignet, zumal die Leerrohrgeschwindigkeit der Abluft in den Testeinheiten mit ca. 0,07 m/s noch unterhalb der durchaus üblichen 0,1 – 0,5 m/s (VDI 3674, 1998) liegen.

Kombination: Biowäscher/Biofilter/Adsorption

Für die hier beschriebenen Versuche wurde, wie allgemein üblich, ein Biofilter mit einer Luftbefeuchtungseinheit kombiniert, die in diesem Fall als Biowäscher ausgeführt ist. Es wurden zwei Versuchsreihen mit einem nur leicht veränderten Versuchsaufbau durchgeführt (Technikumsversuche 1 und 2).

Bei der ersten Versuchsreihe wurde nach etwa einem halben Jahr die Versuchsanlage um eine weitere Reinigungsstufe ergänzt. Die hinter den Biofilter geschaltete Aktivkohlestufe sollte letzte, im Biofilter nicht abgebaute Geruchsstoffe aus der Abluft entfernen. Betriebsparameter können der Tab. 28 entnommen werden. Abb. 75 zeigt die Ergebnisse der Geruchsmessungen an der Versuchsanlage.

Tab. 28: Versuchsparameter der Technikumsversuche 1 zur Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

<u>Versuchsanlage:</u>	Technikumsmaßstab
<u>Versuchszeitraum:</u>	1 Jahr
<u>Behandlungsverfahren:</u>	Biowäscher Biofilter (Grünschnittkompost) Adsorption (Aktivkohle)
<u>Abluftvolumenstrom:</u>	3 m <sup>3</sup> /h
<u>Belastungen</u>	
Biofilter:	80 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
Wäscher (Leerrohrgeschwindigkeit):	0,2 m/s
Aktivkohle:	2300 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h

Nach einer Adaptionsphase des biologischen Systems an die Abluft wurde ein sehr guter Abbau der Geruchsstoffe erreicht. Das System arbeitete stabil und erreichte allein durch die biologische Stufe Wirkungsgrade von zeitweilig über 99%. Der wesentliche Teil des Geruchsabbaus erfolgte hierbei durch den Biowäscher. Die Geruchsstoffkonzentration wurde in diesem Anlagenteil von über 20.000 GE/m<sup>3</sup> auf durchschnittlich unter 5.000 GE/m<sup>3</sup> reduziert. Hinter dem Biofilter lagen die Konzentrationen deutlich unter 1.000 GE/m<sup>3</sup>. Die Adsorptionsstufe reduzierte die Geruchsemissionen anfangs auf nicht mehr wahrnehmbare Konzentrationen. Nach

dem Durchbruch der Geruchsstoffe durch die Adsorptionsstufe gelang weiterhin eine Reduzierung auf Konzentrationen unterhalb 100 GE/m<sup>3</sup>. Der qualitative Geruchseindruck der Abluft veränderte sich während der Passage durch die Abluftbehandlungsanlage (Tab. 29).

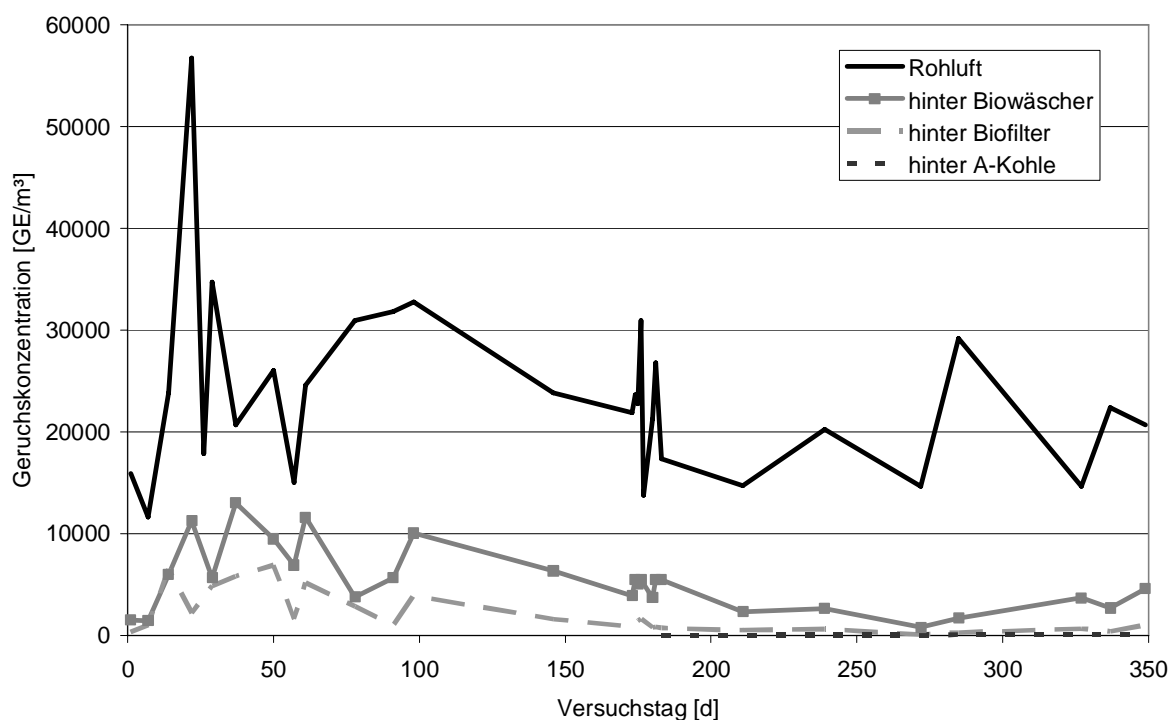


Abb. 75: Geruchskonzentrationen an ausgewiesenen Probenahmestellen der Technikumsanlage (1) bei der Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung (Messwerte im Anhang, A 13-3)

Tab. 29: Am Olfaktometer wahrgenommene Geruchseindrücke der Abluft nach entsprechenden Verfahrensschritten bei der Behandlung von Emissionen aus der Öl- und Fettveredelung

Ort der Probenahme	Geruchseindrücke
Rohluft	ranzig, fettig
Hinter Biowäscher	ranzig, Holzbeize, Spülmittel, Fäkalien, Laub, erdig
Hinter Biofilter	Laub, erdig, Gras, grün, Aschenbecher, Spargelschalen, muffig, Zitrone, Kaffee
Hinter Aktivkohle	muffig, Teppich, Laub, fruchtig

Die Veränderungen der Geruchsnoten im Verlaufe der Behandlung lassen sich sehr anschaulich anhand einer chemischen Analyse der Abluftproben beschreiben. In Abb. 76 sind die FID/Sniffing-Chromatogramme von unbehandelter und behandelter Abluft dargestellt.

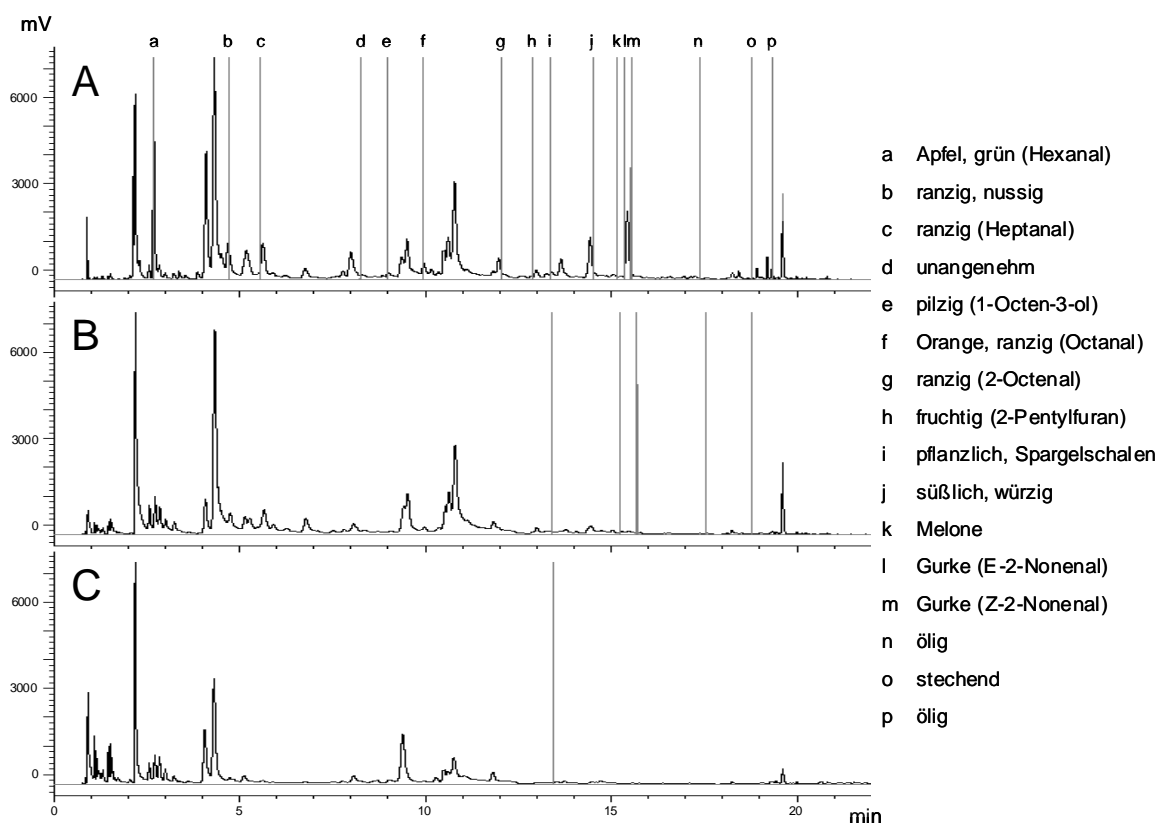


Abb. 76: GC-FID/Sniffing-Chromatogramme von Abluft vor und nach der biologischen Abluftbehandlung (A: Rohluft, B: hinter Biowäscher, C: hinter Biofilter); a – p: Geruchseindrücke am Sniffing-Port-Detektor

Bei den GC-FID-Chromatogrammen ist deutlich die schrittweise Abnahme der Anzahl der Signale und zum Teil auch der Signalintensität der Substanzen in der Abluft nach jeder Behandlungsstufe zu erkennen. Diese Ergebnisse korrelieren mit den olfaktometrischen Messungen (Abb. 75).

Die von den Probanden beschriebenen Geruchseindrücke zeigen, dass die meisten Geruchsstoffe mit vorwiegend ranzigen und fettigen Geruchseindrücken bereits durch die Biowäscher-Behandlung abgebaut werden. Nach der Biowäscherbehandlung waren nur noch der pflanzliche Geruch nach Kartoffel- bzw.

Spargelschalen, die beiden Gerüche nach Gurke (2-Nonenal) ein stechender und ein ölig-er Geruch am Sniffing-Port wahrnehmbar. Nach weiterer Biofilter-Behandlung blieb nur der pflanzliche Geruch wahrnehmbar, der ebenfalls durch die Probanden am Olfaktometer beschrieben wurde. Durch die Untersuchung der behandelten Abluft mittels GC-MS konnte bestätigt werden, dass durch die Biowäscherbehandlung die Hauptgeruchsträger Aldehyde, Ketone und Alkohole fast vollständig aus der Abluft entfernt werden.

In dem auf den Biowäscher folgenden Biofilter wurde beim Großteil der in der Abluft enthaltenen Substanzen ein Abbau teilweise bis unter die Nachweisgrenze der SPME-GC/MS-Messmethode festgestellt. Hierbei handelt es sich vor allem um aliphatische, cyclische und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Terpene und Furane.

Nach der biologischen Abluftbehandlung im Biofilter sind nur noch geringe Mengen vor allem cyclischer und aromatischer Verbindungen in der Abluft enthalten. Diese werden anfangs vollständig durch die Aktivkohle aus der Abluft entfernt. Bei Adsorptionsverfahren erwartet man in der Regel eine Durchbruchkurve, bei der sich nach einer Beladung des Adsorbens die Ausgangskonzentration der Eingangskonzentration annähert. Dies konnte jedoch bei dieser Versuchsreihe nicht beobachtet werden. Vielmehr blieb die Geruchskonzentration nach dem Durchbruch bei schwankenden Eingangskonzentrationen nahezu konstant unterhalb von 100 GE/m<sup>3</sup> (Abb. 75). Der Grund hierfür könnte in der Ausbildung von Mikroorganismenkulturen innerhalb der Adsorbensschüttung liegen, die sich auf die wenigen in dem Biofilter nicht abgebauten Substanzen spezialisiert haben. Abb. 77 zeigt die auf der Aktivkohle angesiedelten Mikroorganismenkolonien.

In einer weiteren Versuchsreihe (Tab. 30) konnte die gute Reinigungsleistung dieser Verfahrenskombination bestätigt werden. In Abb. 78 sind die olfaktometrisch gemessenen Geruchskonzentrationen an den beschriebenen Probenahmestellen abgebildet. Wieder zeigt der diesmal mit Sojakompost befüllte Biofilter nach Überwinden der Adaptionphase eine sehr gute Geruchsabbauleistung. Die Aktivkohle weist erwartungsgemäß von Anfang an eine gute Reinigungsleistung auf. Zwischen dem 21. und dem 28. Versuchstag erfolgt jedoch wieder ein Durchbruch der Geruchsemissionen. Dieser Durchbruch ist aber, wie in der vorangegangenen

Versuchsreihe auch, nicht vollständig. Die Austrittskonzentration liegt mit ca. 100 GE/m<sup>3</sup> noch deutlich unterhalb der in die Adsorptionsstufe eintretenden Konzentration von 300-400 GE/m<sup>3</sup>. Wieder konnte die Bildung von Mikroorganismenkolonien in der Aktivkohle beobachtet werden.



Abb. 77: Foto der mit Mikroorganismen bewachsenen Aktivkohle

Tab. 30: Versuchsparameter der Technikumsversuche (2) zur Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

<u>Versuchsanlage:</u>	Technikumsmaßstab
<u>Versuchszeitraum:</u>	7 Wochen
<u>Behandlungsverfahren:</u>	Biowäscher Biofilter (Sojakompost) Adsorption (Aktivkohle)
<u>Abluftvolumenstrom:</u>	3 m <sup>3</sup> /h
<u>Belastungen</u>	
Biofilter:	60 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h
Wäscher (Leerrohrgeschwindigkeit):	0,2 m/s
Aktivkohle:	2150 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h

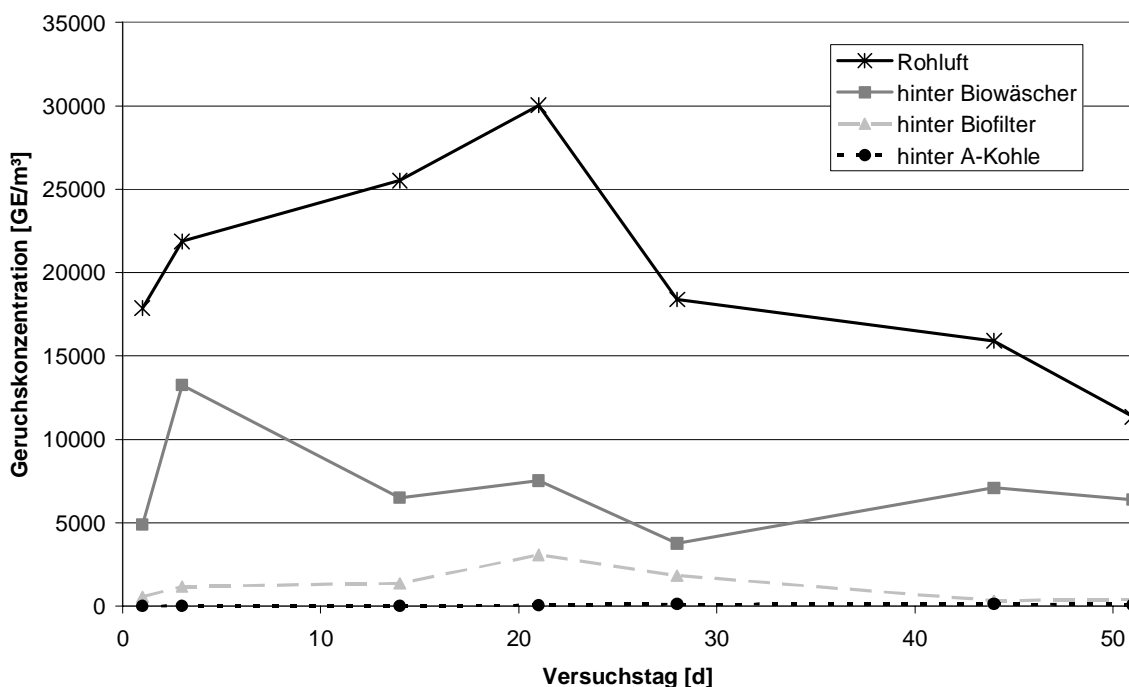


Abb. 78: Geruchskonzentrationen an ausgewiesenen Probenahmestellen der Technikumsanlage (2) bei der Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung (Messwerte im Anhang, A 13-4)

Dass sich der Geruchsabbau über die einzelnen Behandlungsschritte auch anhand der Betrachtung der Hauptgeruchsstoffe verdeutlichen lässt, zeigt Abb. 79. Hier sind die auf die Rohluft bezogenen relativen Peakflächen von 7 ausgewählten Hauptgeruchsstoffen dargestellt. Die Säulen zeigen den hinter einer Behandlungsstufe noch verbliebenen, prozentualen Rest der betrachteten Substanz an. Entsprechend kann die Abnahme bestimmt werden. Zum Vergleich ist die Abnahme des Geruchs bezogen auf die Eingangskonzentration dargestellt.

In einigen Fällen waren die Peakflächen im Chromatogramm hinter einer Reinigungsstufe größer als vorher. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Da es sich um ein geschlossenes System handelt, gibt es keine zusätzliche Quelle für anlagentypische Abluftinhaltsstoffe, zumal es sich in der Regel nicht um mögliche Stoffwechselprodukte handelt. Es ist jedoch vorstellbar, dass Behandlungsverfahren als Puffer agieren und angereicherte Stoffmengen verspätet wieder abgeben. Die wahrscheinlichste Ursache sind jedoch die bereits beschriebenen Verdrängungseffekte der Substanzen untereinander bei der Anreicherung auf der SPME-Faser (Kap. 9.2.2).

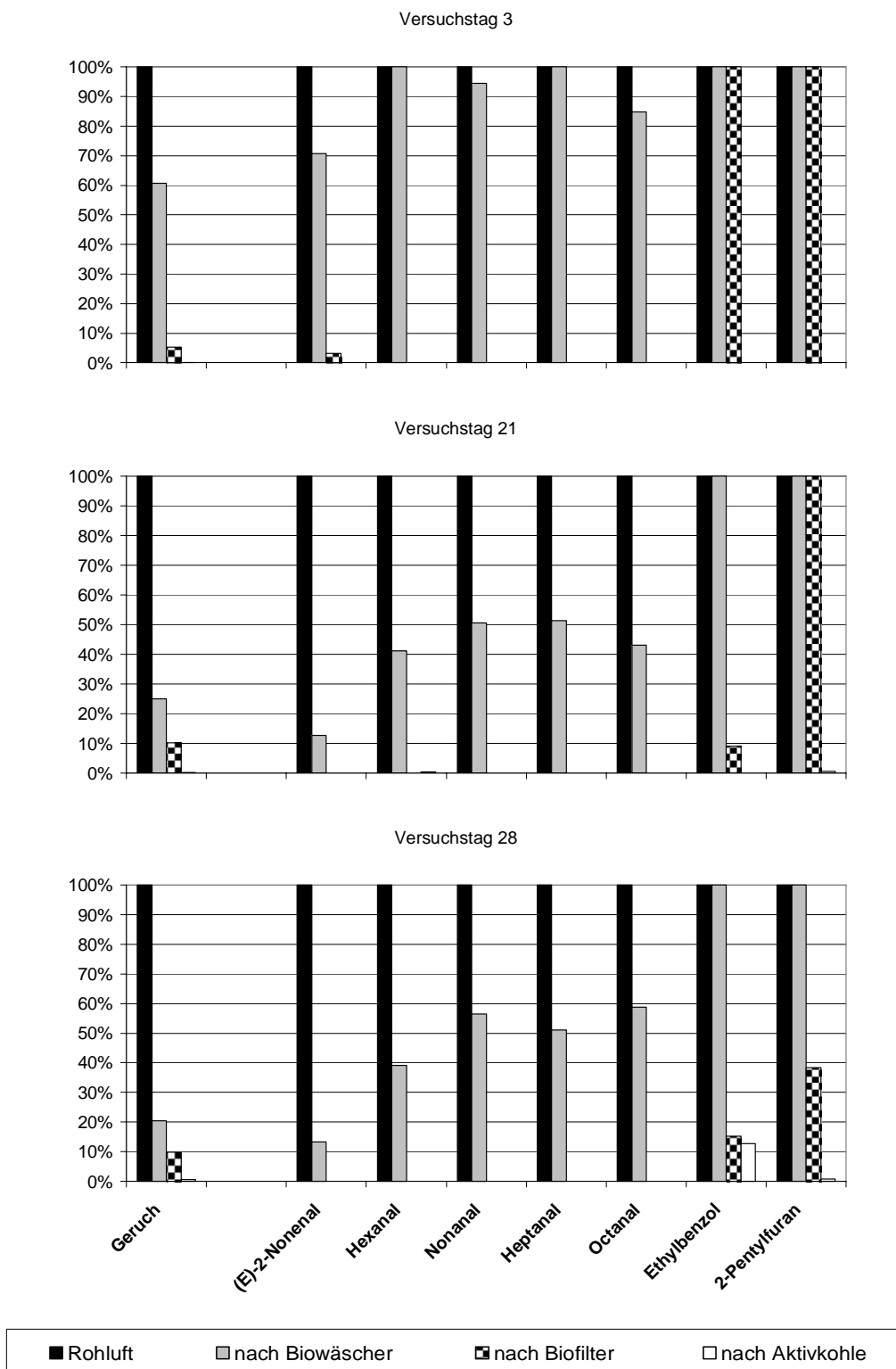


Abb. 79: Darstellung der jeweils auf die Rohluft bezogenen relativen Peakflächen ausgewählter Hauptgeruchsstoffe und relativen Geruchskonzentration an ausgewiesenen Probenahmestellen der Technikumsanlage (2) bei der Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung (Messwerte im Anhang, A 13-5)

Da eine Zunahme wie oben beschrieben nicht sinnvoll erscheint, wurde bei einer Erhöhung der Peakfläche über ein Behandlungsaggregat die Konzentration der entsprechenden Substanz als unverändert angenommen. Bei einer Verringerung der Peakfläche hingegen kann von einem realen Konzentrationsrückgang ausgegangen werden.

Deutlich ist in Abb. 79 der Konzentrationsrückgang der 7 Hauptgeruchsstoffe in der Abluft an den drei ausgewählten Versuchstagen zu erkennen. Dabei werden die einzelnen Substanzen unterschiedlich gut von den jeweiligen Reinigungsverfahren zurückgehalten. Anfangs ist nur eine recht schwache Reinigungsleistung des Wäschers zu beobachten, die sich aber im weiteren Versuchsverlauf verbessert. Die Aldehyde als wichtige Untergruppe der Hauptgeruchsstoffe werden spätestens im Biofilter vollständig abgebaut. Da sie den wesentlichen Anteil des Geruchs ausmachen, spiegelt sich diese Abnahme auch direkt in einer Geruchsreduzierung wider. Hinter dem Biofilter sind bereits 90% des Geruchs abgebaut, dies entspricht in etwa dem relativen Odour Index der Aldehyde. Ethylbenzol und 2-Pentylfuran werden anfangs gar nicht durch den Biofilter zurückgehalten. Erst mit fortschreitender Versuchslaufzeit werden diese Substanzen im Biofilter abgebaut. Auch bezüglich des Nonenalabbaus ist der Wirkungsgrad des Biofilters anfangs noch geringer. Beides sind Zeichen für die Adaptionsphase, die ein Biofilter bei Inbetriebnahme durchläuft. Die aus dem Biofilter emittierenden Geruchsstoffe werden nahezu vollständig durch die Adsorptionsstufe aus der Abluft entfernt. Lediglich bei Ethylbenzol ist nach 4 Wochen ein merklicher Durchbruch durch die Aktivkohle zu beobachten. Gleichzeitig steigt auch die hinter der Aktivkohle gemessene Geruchskonzentration leicht an.

Der typische Anlagengeruch ist bereits nach der Biofilterbehandlung nicht mehr wahrnehmbar. Zwar weist der Biofilter am 21. Versuchstag mit gut 3.000 GE/m<sup>3</sup> noch relativ hohe Geruchsemissionen auf, jedoch sind diese kaum auf die Hauptgeruchsstoffe zurückzuführen. Bei einem Rückgang des Odour-Betrags der Hauptgeruchsstoffe um 99% sind nach Kap. 9.2.3 keine anlagentypischen Gerüche mehr zu erwarten. Tatsächlich wird der Geruch am Olfaktometer als säuerlich und nicht mehr als ranzig beschrieben. Folglich müssen für diesen Geruch andere Substanzen wie beispielsweise Stoffwechselprodukte aus den biologischen Abbau-

vorgängen im Biofilter, Eigengerüche des Biofiltermaterials oder andere bei der Analyse der Rohluft als unbedeutend eingestufte Substanzen verantwortlich sein. Letztere Annahme ist eher unwahrscheinlich, da als Kriterium für Hauptgeruchsstoffe ein Geruchsanteil von 1% (>0,5%) ausgewählt wurde. Der Konzentrationsbeitrag einer solchen Substanz wäre maximal 150 GE/m<sup>3</sup>. Folglich müssten etwa 20 dieser Stoffe, ohne abgebaut zu werden, durch den Biofilter gelangen, um den beobachteten Effekt zu erzielen. Voraussetzung für diese Annahme ist natürlich, dass entsprechende Stoffe mit dieser Methode auch erfassbar sind bzw. sie nicht aufgrund von Verdrängungseffekten bei der Analyse der Rohluft unberücksichtigt blieben.

Die aus dem Biofilter emittierenden Stoffe werden weitestgehend an der Aktivkohle adsorbiert. Auch die Abluft nach der adsorptiven Behandlung weist keine anlagentypischen Geruchscharakteristika mehr auf. Die Abluft hinter der Aktivkohle wird als eher lösungsmittelartig beschrieben. Dieser Geruch könnte auf den leichten Durchbruch des Ethylbenzols zurückzuführen sein, dessen Geruchsnote als aromatisch beschrieben wird. Die gemessene Geruchskonzentration bleibt mit knapp über 100 GE/m<sup>3</sup> nach dem Durchbruch deutlich unterhalb des Grenzwertes von 500 GE/m<sup>3</sup> (gilt für Abfallbehandlungsanlagen) und führt so zu einer sehr guten Reinigungsleistung des Verfahrens, welches über die Entfernung der Hauptgeruchsstoffe nicht nur die Geruchskonzentration deutlich reduziert sondern auch den Anlagengeruch zurückhält.

Im Anschluss an diese Versuchsreihe wurde die Anlage nach einer fünfmonatigen Stillstandsphase wieder in Betrieb genommen. Hierdurch konnten mögliche Auswirkungen von Stressbedingungen wie z.B. Anlagenausfälle auf das Behandlungssystem untersucht werden. In Abb. 80 sind die Geruchskonzentrationen an den ausgewiesenen Probenahmestellen während dieser erneuten Anfahrphase dargestellt.

Es ist zu sehen, dass das System nach dem Stillstand zwar nicht sofort, jedoch nach einer erneuten kurzen Adaptionsphase seine ursprüngliche Reinigungsleistung wiedererlangt. Besonders gilt dies für die Abbauleistung des Biofilters. Aber auch hinter der Aktivkohle werden zunehmend niedrigere Konzentrationen gemessen. Die aus der Adsorptionsstufe emittierenden Werte liegen nach 60 Tagen bereits wieder

deutlich unterhalb von  $100 \text{ GE/m}^3$ . Zwar wird auch das Konzentrationsniveau am Eintritt in diese Stufe geringer, jedoch ist eine Reinigungsleistung erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass mikrobiologische Prozesse innerhalb der Aktivkohle für einen Abbau der Geruchsstoffe sorgen. Eine weitere Möglichkeit wäre eine durch die geringere Belastung der im Biofilter vorbehandelten Abluft deutlich höhere Standzeit der Aktivkohle im Vergleich zu reinen adsorptiven Verfahren. In jedem Fall stellt die Adsorptionsstufe einen effektiven Sicherheitsfilter bei möglichen Störungen im Biofilterbetrieb dar.

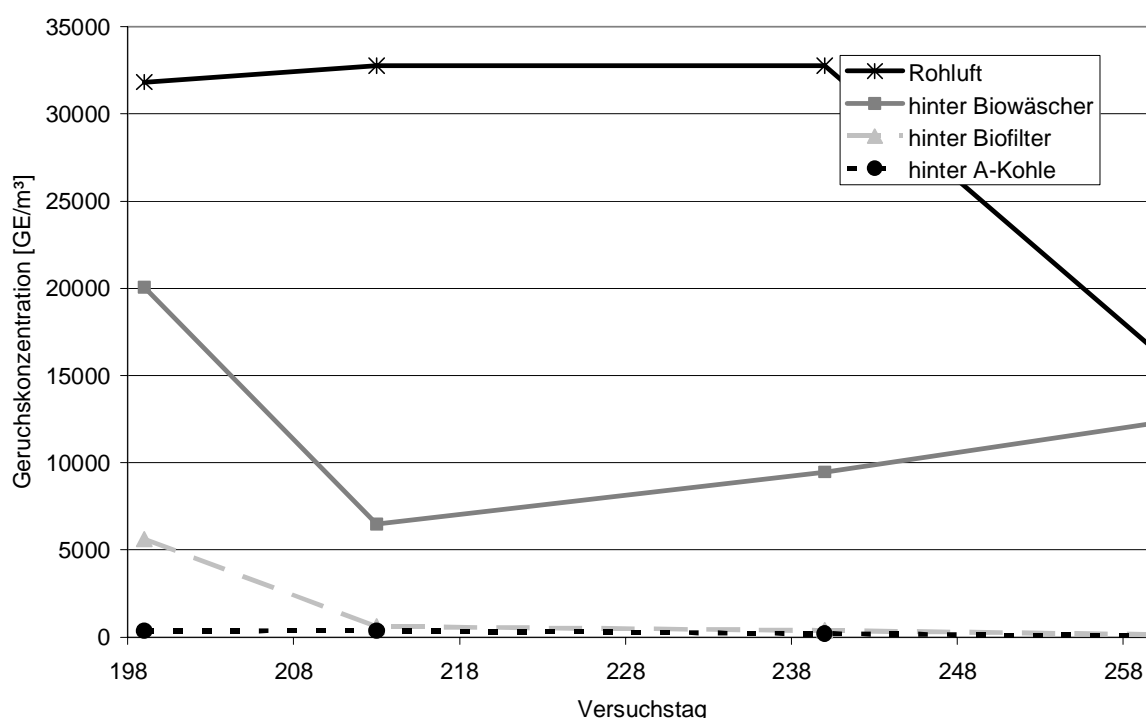


Abb. 80: Geruchskonzentrationen an ausgewiesenen Probenahmestellen der Technikumsanlage (2a) bei der Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung nach fünfmonatiger Betriebsunterbrechung (erneute Inbetriebnahme: Versuchtag 198, Messwerte im Anhang, A 13-4)

In den hier beschriebenen Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass mit der Kombination von biologischen und adsorptiven Verfahren prozesseigene Gerüche aus der Abluft der Öl- und Fettveredelung effektiv entfernt werden können. Die quelltypischen Geruchsstoffe werden bereits weitestgehend im Biofilter abgebaut. Entsprechend ändert sich der Geruchseindruck von ranzig in erdig, säuerlich,

lösungsmittelartig. Durch Aktivkohle sind die Konzentrationen der Hauptgeruchsstoffe größtenteils bis unter die Nachweisgrenze reduziert worden. Abb. 81 zeigt zusammenfassend, in welcher Behandlungsstufe die verschiedenen Substanzklassen auf nicht mehr nachweisbare Konzentrationen reduziert wurden.

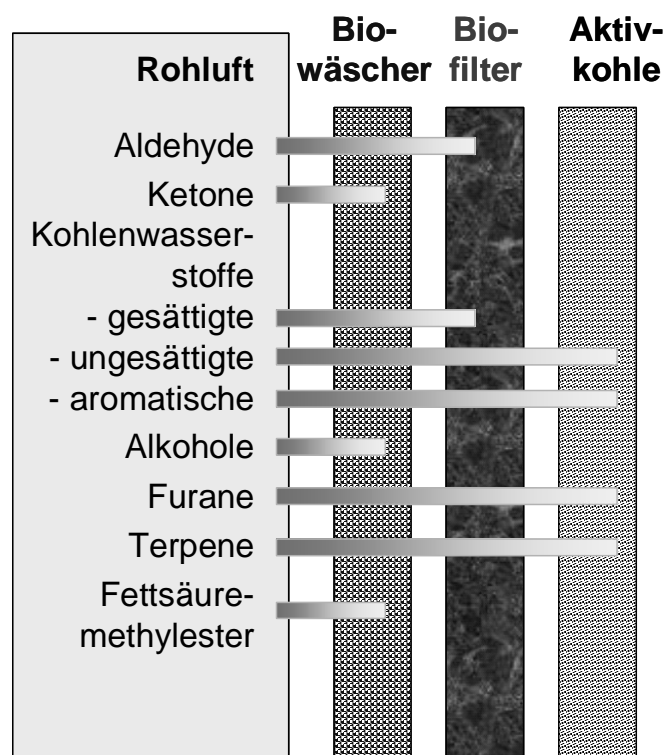


Abb. 81: Abscheidung von Geruchsstoffen in unterschiedlichen Reinigungsstufen einer Versuchsanlage bei der Behandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

### 13.3.3 Vergleich von Biofiltermaterialien im Pilotmaßstab

Es hat sich gezeigt, dass Biofilter generell ein geeignetes Verfahren zur Behandlung von geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung darstellen. Nun gilt es, für eine mögliche Anlagenauslegung von der Vielzahl der auf dem Markt erhältlichen Biofiltermaterialien das am besten geeignete auszuwählen. Hierfür wurden an einer halbtechnischen Versuchsanlage 3 kommerziell erhältliche und ein neuartiges Biofiltermaterial hinsichtlich ihrer Geruchsabbauleistung getestet. Die Versuchsparameter sind der Tab. 31 zu entnehmen.

Tab. 31: Versuchsparameter der Pilotversuche zur Geruchsbehandlung von Abluft aus der Öl- und Fettveredelung

<u>Versuchsanlage:</u>	Pilotanlage
<u>Versuchszeitraum:</u>	6 Monate
<u>Behandlungsverfahren:</u>	Biowäscher / Biofilter
<u>Biofiltermaterialien</u>	gerissenes Wurzelholz (BF1) Rindenmulch (BF2) Sojakompost (BF3) Kokosfasern/Torf (BF4)
<u>Abluftvolumenstrom:</u>	400 – 1000 m <sup>3</sup> /h
<u>Filterbettbelastungen:</u>	45 – 115 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h

Der Vergleich der Materialien erfolgt über die Abbauraten ( $r$ ) und die mittlere logarithmische Konzentration ( $c_m$ ) wie in Kap. 4.3.1 beschrieben. Um ein möglichst breites Belastungsspektrum der Biofiltermaterialien zu erhalten, wurde der zu behandelnde Abluftstrom stufenweise variiert. Der eingestellte Volumenstrom je Biofilterelement lag zwischen 100 - 250 m<sup>3</sup>/h. Die gemessenen Volumenströme sind in Abb. 82 dargestellt. Unter „Summe BF1-BF4“ sind rechnerisch die Einzelwerte der 4 Biofilter zusammengefasst. Durch den Vergleich dieser Summe mit dem Volumenstrom der Zuluft können die einzelnen Messwerte auf Plausibilität geprüft werden. Ebenfalls aufgezeichnet wurden für diesen Versuchszeitraum die Temperaturen in den Biofiltern (Abb. 83). Aus beiden Darstellungen ist ersichtlich, dass die Volumenbelastung und die Temperatur für alle Biofilter nahezu identisch ist.

Anhand der Volumenströme können die jeweiligen Belastungen der Biofilter zum Zeitpunkt der Messung bestimmt werden. Da die Werte nur stündlich aufgezeichnet werden und sie mess- und regelungsbedingten Schwankungen unterworfen sind, wurde für die Berechnung der Abbauraten jeweils ein Mittelwert über die gespeicherten Volumenströme der letzten 10 Stunden gebildet. Zum Vergleich der Biofiltermaterialien ist in Abb. 64 (Kap. 11.1.1) die Geruchsabbaurate gegenüber der mittleren logarithmischen Konzentration aufgetragen. Je größer die Steigung (Kinetikkonstante) der Ausgleichsgerade desto besser die Abbauleistung des jeweiligen Biofiltermaterials. Deutlich ist zu erkennen, dass der Sojakompost ein wesentlich besseres Abbauverhalten gegenüber den anderen getesteten Materialien aufweist. Dies bestätigt die bereits mit den Testsystemen gewonnenen Ergebnisse.

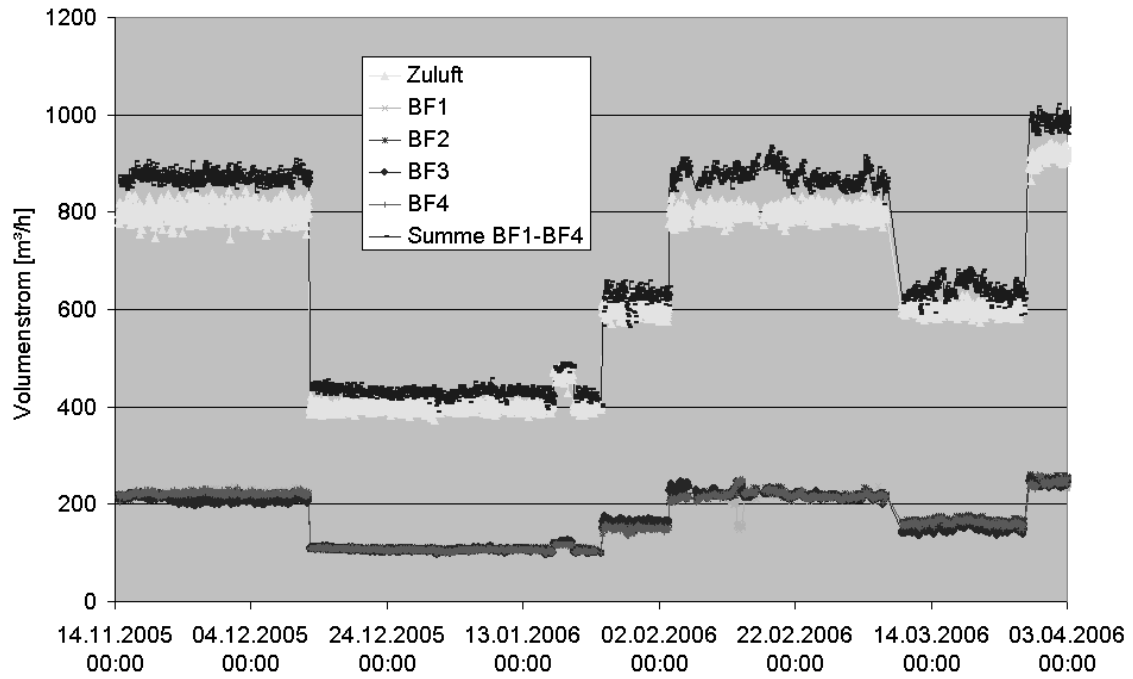


Abb. 82: An der Containeranlage gemessene Abluftvolumenströme in der Zuluft und am Ausgang der einzelnen Biofilter (BF1 - BF2) sowie die Summe der Einzelströme zur Kontrolle.

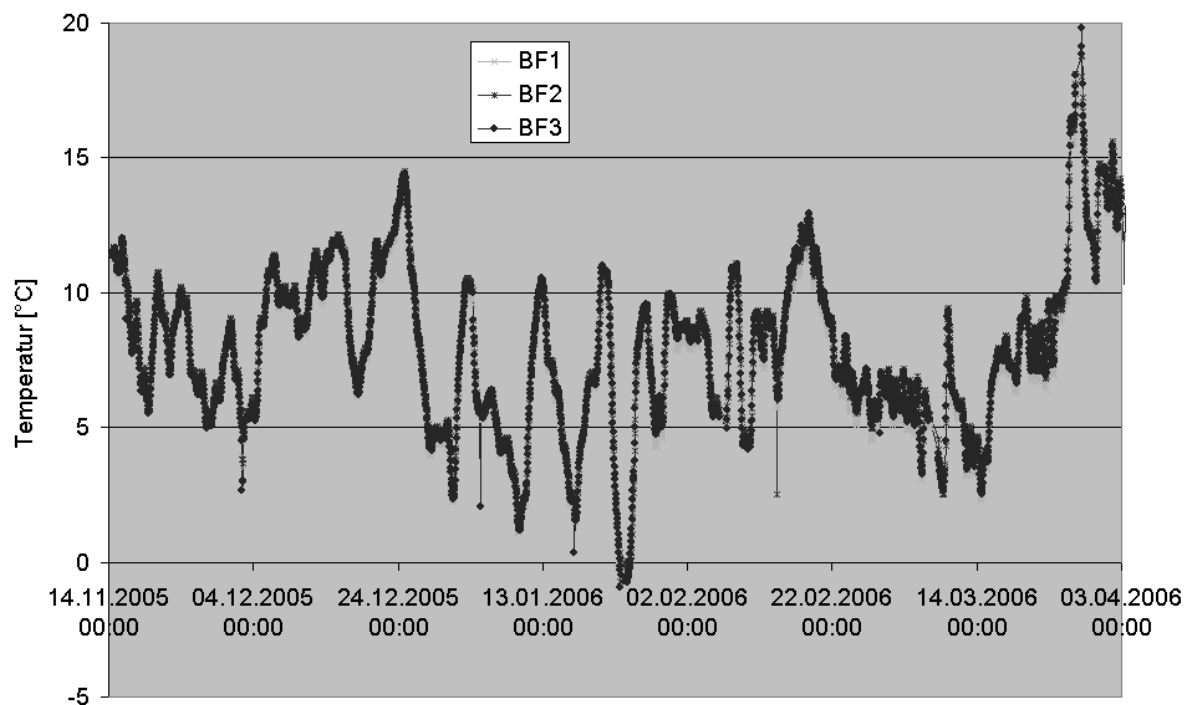


Abb. 83: An der Pilotanlage gemessene Temperaturen in den Biofiltermaterialien der einzelnen Biofiltern

### 13.4 Auslegungsberechnungen anhand von Messwerten aus Pilotversuchen

Basierend auf den Ergebnissen aus den Pilotversuchen können nun mit entsprechenden Dimensionierungsansätzen großtechnische Anlagen geplant werden. Am Beispiel einer prozesstypischen Abluftquelle werden nun folgend für einen Biofilter und eine Adsorberstufe Auslegungsmöglichkeiten dargestellt.

Die zu behandelnde Abluft wird über den Regenerationsbecken der Seifenspaltung erfasst und über die Emissionsquelle Q 10 abgeleitet (Kap. 13.2.1, Tab. 23). Sie weist ein nahezu identisches Geruchsstoffspektrum wie die Gasphase über den Fallwassertanks auf. Entsprechend der Angaben in Tab. 23 wird für die Quelle ein Abluftstrom von etwa 3.000 m<sup>3</sup>/h bei einer Geruchskonzentration von 55.000 GE/m<sup>3</sup> angenommen. Als Zielvorgabe für die zu erreichende Reingaskonzentration sollen hier die häufig geforderten 500 GE/m<sup>3</sup> angesetzt werden.

#### 13.4.1 Auslegung eines Biofilters

Nach Kap. 4.3.1 errechnet sich das erforderliche Biofiltervolumen bei einer Abbaukinetik 1. Ordnung zu:

$$V_{Filter} = \frac{\dot{V}_{Luft}}{k_1} * \ln \frac{c_e}{c_a} \quad (14)$$

mit  $k_1$ : Kinetikkonstante [1/h]

$V_{Filter}$ : Volumen der Filtermaterialschüttung [m<sup>3</sup>]

$\dot{V}_{Luft}$ : zu behandelnder Abluftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h]

$c_e$ : eingehende Geruchsstoffkonzentration [GE/m<sup>3</sup>]

$c_a$ : ausgehende Geruchsstoffkonzentration [GE/m<sup>3</sup>].

Die erforderlichen Kinetikkonstanten für die unterschiedlichen Biofiltermaterialien wurden bereits in Untersuchungen an der Containeranlage bestimmt (Abb. 64, Kap. 11.1.1). Die Auslegungsrechnung soll hier am Beispiel der beiden Biofiltermaterialien Sojakompost und gerissenes Wurzelholz durchgeführt werden. Für diese beiden Materialien sind daher die zur Ermittlung der Kinetikkonstanten erforderlichen Daten

in Abb. 84 erneut graphisch dargestellt. Die Kinetikkonstanten entsprechen der Steigung der Ausgleichsgeraden durch den Nullpunkt und lauten hier entsprechend  $242,01 \text{ h}^{-1}$  für Sojakompost und  $116,13 \text{ h}^{-1}$  für Wurzelholz.

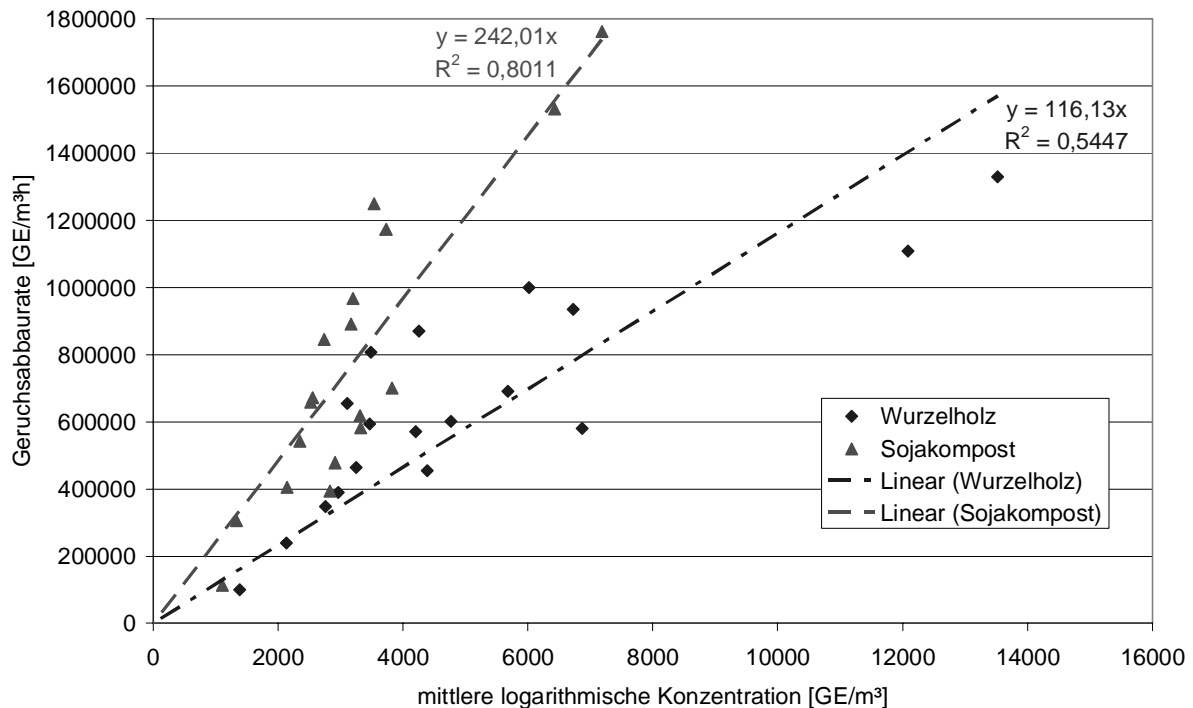


Abb. 84: Geruchsabbauraten zweier Biofiltermaterialien an der Containeranlage mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei Filterbelastungen von 50, 75 und  $100 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$

In Abb. 85 ist das nach Gleichung 14 unter den obigen Randbedingungen erforderliche Biofiltervolumen in Abhängigkeit von der geforderten Reinluftkonzentration für die Biofiltermaterialien Wurzelholz und Sojakompost dargestellt. Die Dimensionierungsgrößen können aus diesem Diagramm direkt abgelesen werden, oder nach Gleichung 14 berechnet werden.

$$\text{Sojakompost: } V_{\text{Filter}} = \frac{\dot{V}_{\text{Luft}}}{k_1} * \ln \frac{c_e}{c_a} = \frac{3.000 \text{ m}^3 / \text{h}}{242,01 \text{ h}^{-1}} * \ln \frac{55.000 \text{ GE} / \text{m}^3}{500 \text{ GE} / \text{m}^3} = 58,27 \text{ m}^3$$

$$\text{Wurzelholz: } V_{\text{Filter}} = \frac{\dot{V}_{\text{Luft}}}{k_1} * \ln \frac{c_e}{c_a} = \frac{3.000 \text{ m}^3 / \text{h}}{116,13 \text{ h}^{-1}} * \ln \frac{55.000 \text{ GE} / \text{m}^3}{500 \text{ GE} / \text{m}^3} = 121,43 \text{ m}^3$$

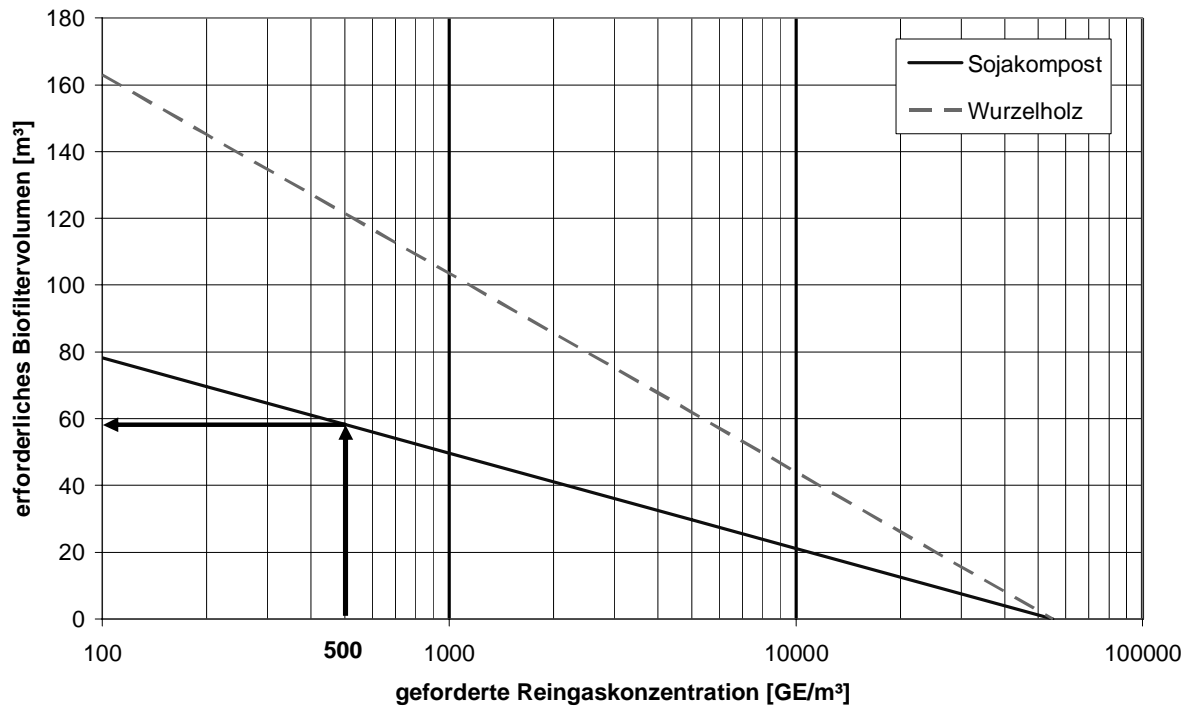


Abb. 85: Diagramm zur Bestimmung des erforderlichen Biofiltervolumens für den Geruchsabbau an Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung am Beispiel zweier Biofiltermaterialien

Bei einer geforderten Reingaskonzentration von 500 GE/m<sup>3</sup> ergibt sich für einen mit Sojakompost gefüllten Biofilter ein erforderliches Reaktionsraumvolumen von knapp 60 m<sup>3</sup>. Soll das etwas leistungsschwächere Wurzelholz als Biofiltermaterial verwendet werden, so beträgt das benötigte Volumen bereits 120 m<sup>3</sup>, also etwa doppelt so viel. Dieses Beispiel zeigt, dass der Wahl des Biofiltermaterials bei der Auslegung einer Biofilteranlage eine entscheidende Bedeutung zukommt. An dieser Stelle sei kurz erwähnt, dass die Daten für die Auslegung unter für biologische Abbauprozesse eher ungünstigen Bedingungen erhoben wurden. Die Versuche wurden in den Wintermonaten bei Temperaturen zwischen -1 und 12 °C durchgeführt. Bei etwas steigenden Temperaturen ist von einem verbesserten Abbau der Geruchsstoffe auszugehen. Somit ist von diesem Gesichtspunkt her bei der Dimensionierung eine kleine Reserve enthalten.

### 13.4.2 Auslegung einer Adsorptionsstufe

Die Auslegung der Adsorptionsstufe erfolgte anhand der Daten aus dem dynamischen Testsystem. Zur besseren Vergleichbarkeit der unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen betriebenen Adsorptionsstufen im dynamischen Testsystem sind in Abb. 86 die Reinigungsleistungen über den jeweiligen Belastungszustand der Aktivkohle als behandeltes Abluftvolumen je Materialmenge dargestellt.

Trotz der variierenden Festbetthöhen und der unterschiedlichen Leerrohrgeschwindigkeiten ist das Durchbruchverhalten bezogen auf die spezifische Abluftbelastung aller Testeinheiten besonders für die Versuchsphase mit hohen Wirkungsgraden relativ ähnlich. Bei zunehmender Beladung scheint der Wirkungsgrad bei höheren Schüttungen etwas langsamer abzusinken.

Für eine geforderte Reinluftkonzentration von 500 GE/m<sup>3</sup> ergibt sich nach Kap. 5.1 für den benötigten Wirkungsgrad der Adsorptionsstufe

$$\eta[\%] = \frac{c_{roh} - c_{rein}}{c_{roh}} * 100 = \frac{55.000 - 500}{55.000} = 99\%$$

mit  $\eta$ : Wirkungsgrad [%]

$c_{roh}$ : Geruchsstoffkonzentration Rohgas [GE/m<sup>3</sup>]

$c_{rein}$ : Geruchsstoffkonzentration Reingas [GE/m<sup>3</sup>].

Aus Abb. 86 ist zu entnehmen, dass bei dieser Anwendung derart hohe Geruchsminderungsgrade im günstigsten Fall bis zu einer Belastung der Aktivkohle von maximal 100 L/g erreicht werden können. Bei einem Abluftvolumenstrom von 3.000 m<sup>3</sup>/h ergibt sich ein Aktivkohleverbrauch von 30 kg/h bzw. 1,5 m<sup>3</sup>/d. Dieser hohe Materialverbrauch bestätigt die obige Annahme, dass dieses Verfahren alleine nicht zur Behandlung der betrachteten Abluft geeignet ist.

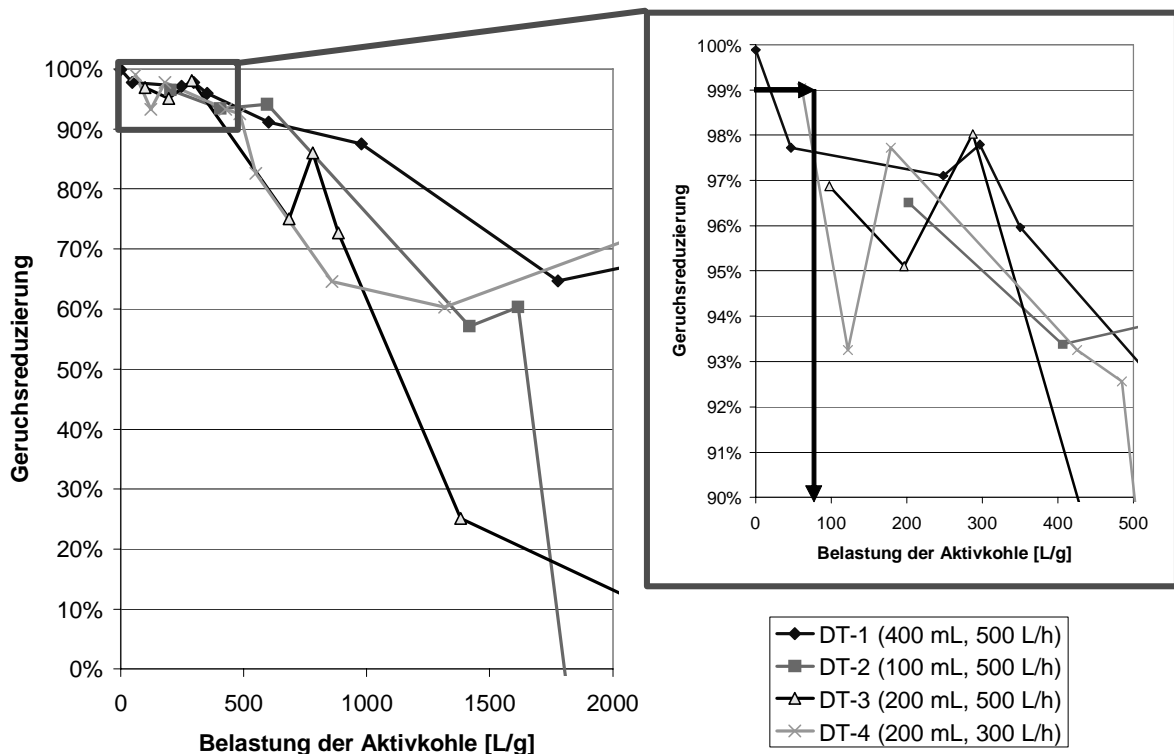


Abb. 86: Geruchsreduzierung durch Adsorption an Aktivkohle bei unterschiedlichen Belastungszuständen. Der Kasten rechts zeigt eine Ausschnittsvergrößerung.

### 13.5 Kostenabschätzung für die technische Umsetzung

Nachfolgend wird eine Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten für drei mögliche Abluftbehandlungsanlagen zur Geruchsreduzierung für das obige Beispiel vorgenommen. Die angesetzten Kosten orientieren sich an unverbindlichen Preisanfragen bei einschlägigen Firmen und an Beispielrechnungen in Deviny et al. (1999) und Streese (2005). Nicht berücksichtigt wurden die Kosten für Rohrleitungen inkl. Installation von der Emissionsquelle zur Abluftbehandlungsanlage. Die Preise verstehen sich ohne die gesetzliche Mehrwertsteuer.

### 13.5.1 Biofilter

Der Biofilter wird in modularer Containerbauweise ausgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Containerstellplatz auf einem erschlossenen Betriebsgelände vorhanden ist und entsprechend eine Baugrundvorbereitung entfällt. Es werden die Berechnungen beispielhaft für zwei unterschiedliche Biofiltermaterialien durchgeführt (Tab. 32 und Tab. 33). Für den Sojakompost wird aufgrund von erhöhten Verdichtungserscheinungen im Betrieb sicherheitshalber nur von einer Materialstandzeit von 3 Jahren ausgegangen, während Wurzelholz nur alle 5 Jahre gewechselt werden muss.

Tab. 32: Abschätzung der Investitionskosten für eine Biofilteranlage in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung in Abhängigkeit vom Filtermaterial

<b>Biofilteranlage (3.000 m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Sojakompost (50 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Wurzelholz (100 m<sup>3</sup>)</b>
Biofiltercontainer in Modulbauweise, inkl. Verdichter, Abluftkonditionierung, Technikraum	<b>37.500 €</b>	<b>52.500 €</b>

Tab. 33: Abschätzung der jährlichen Betriebskosten für eine Biofilteranlage in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung in Abhängigkeit vom Filtermaterial

<b>Biofilteranlage (3.000 m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Sojakompost (50 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Wurzelholz (100 m<sup>3</sup>)</b>
Elektrizität (0,15 €/kWh)	5256 €/a (4,0 kW)	5519 €/a (4,2 kW)
Wasser (1,46 €/m <sup>3</sup> ; 260 m <sup>3</sup> /a)	380 €/a	380 €/a
<i>Biofiltermaterial</i>		
Befüllung (Material, Einbau – 50 €/m <sup>3</sup> )	2.500 €/3a	5.000 €/5a
Entleerung + Entsorgung (4,50 €/m <sup>3</sup> )	270 €/3a	540 €/5a
Wartung (1 h/Monat á 30 €/h)	360 €/a	360 €/a
Ersatzteile	500 €/a	500 €/a
Abschreibung (10% der Investitionskosten)	3.750 €/a	5.250 €/a
Zinsen (6% der Investitionskosten)	2.250 €/a	3.150 €/a
<b>Summe Betriebskosten</b>	<b>~13.400 €/a</b>	<b>~16.300 €/a</b>

### 13.5.2 Adsorption

Trotz der bereits gewonnenen Erkenntnis, dass eine Behandlung der Abluft allein durch Adsorption an Aktivkohle wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, soll hier nochmals zur Verdeutlichung eine Kostenabschätzung für zwei unterschiedliche Dimensionierungsmöglichkeiten durchgeführt werden (Tab. 34 und Tab. 35). Aufgrund des hohen Verbrauchs an Aktivkohle und den damit verbundenen häufigen Wechselintervallen sollte die Adsorptionsanlage als Wechselbettadsorber ausgeführt werden (zwei parallele Adsorptionslinien). So kann ein kontinuierlicher Betrieb auch während des Wechsels des beladenen Materials sichergestellt werden. Die Dimension der Anlage bestimmt direkt die Häufigkeit der erforderlichen Materialwechsel. Die eine Variante stellt eine Minimalgröße mit zwei Behältern dar, bei der die Wechselintervalle in Verbindung mit den gängigen Liefermengen gerade noch durchführbar erscheint (alle zwei Tage). Die zweite Dimensionierung lehnt sich an die Modular-konzepte aus der Biofilterberechnung an. Auch hier wird davon ausgegangen, dass ein Containerstellplatz auf einem erschlossenen Betriebsgelände vorhanden ist und entsprechend eine Baugrundvorbereitung entfällt. Der Container ist in zwei separate Kammern aufgeteilt, von denen das Material einer Kammer jeweils alle 17 Tage gewechselt werden muss. Es wird davon ausgegangen, dass die Aktivkohle nach der Beladung entsorgt und nicht vor Ort regeneriert wird.

Tab. 34: Abschätzung der Investitionskosten für Adsorptionsstufen in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung in Abhängigkeit von der Anlagengröße

<b><u>Aktivkohlestufe (3.000 m<sup>3</sup>/h)</u></b>	<b>2 x 3 m<sup>3</sup></b>	<b>2 x 25 m<sup>3</sup></b>
Adsorptionsstufen in Modulbauweise, inkl. Verdichter und Frequenzumrichter	<b>12.500 €</b>	<b>17.500 €</b>

Tab. 35: Abschätzung der jährlichen Betriebskosten für Adsorptionsstufen in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung in Abhängigkeit von der Anlagengröße

<b>Aktivkohlestufe (3.000 m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>2 x 3 m<sup>3</sup></b>	<b>2 x 25 m<sup>3</sup></b>
Elektrizität (0,15 €/kWh)	3942 €/a (3 kW)	3942 €/a (3 kW)
<i>Austausch der Aktivkohle</i>		
Entleerung + Entsorgung (4,50 €/m <sup>3</sup> )	2.465 €/a	2.465 €/a
Material (547,5 m <sup>3</sup> /a, 1.000 €/m <sup>3</sup> )	547.500 €/a	547.500 €/a
Befüllung + Wartung (Stundensatz: 30 €)	5.475 €/a (1 h/2d)	645 €/a (1 h/17d)
Ersatzteile	500 €/a	500 €/a
Abschreibung (10% der Investitionskosten)	1.250 €/a	1.750 €/a
Zinsen (6% der Investitionskosten)	750 €/a	1.050 €/a
<b>Summe Betriebskosten</b>	<b>~561.400 €/a</b>	<b>~557.900 €/a</b>

### 13.5.3 Biofilter/Adsorption-Kombination

Als Grundlage für die Kostenabschätzung der Biofilter/Adsorption-Kombination (Tab. 36 und Tab. 37) dient eine Verschaltung des Sojakompost-Biofilters mit einer vergleichsweise kleinen nachgeschalteten Adsorptionsstufe. Als Festbettvolumen der Aktivkohleschüttung werden basierend auf Erfahrungswerten 2 m<sup>3</sup> als ausreichend angenommen. Ob die sich als biologische Stufe ausbildende Aktivkohle im Langzeitbetrieb gewechselt werden muss, ist noch nicht absehbar. Ein Wechselintervall zusammen mit dem Biofiltermaterial wird sicherheitshalber angenommen. Alle weiteren Annahmen entsprechen den obigen Angaben.

Tab. 36: Abschätzung der Investitionskosten für eine Biofilter/Adsorption-Kombination in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung

<b>Biofilter/Adsorption-Kombination (3.000 m<sup>3</sup>/h)</b>	
Biofiltercontainer in Modulbauweise (50 m <sup>3</sup> ), inkl. Verdichter, Abluftkonditionierung, Technikraum	37.500 €
Adsorptionsstufe (2 m <sup>3</sup> )	5.000 €
<b>Summe Investitionskosten</b>	<b>42.500 €</b>

Tab. 37: Abschätzung der jährlichen Betriebskosten für eine Biofilter/Adsorption-Kombination in Modulbauweise zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung

<b>Biofilter/Adsorption-Kombination (3.000 m³/h)</b>	
Elektrizität (0,15 €/kWh)	5256 €/a (4,0 kW)
Wasser (1,46 €/m³; 5 m³/w)	380 €/a
<i>Austausch des Materials (alle 3 Jahre)</i>	
Entleerung + Entsorgung (4,50 €/m³)	90 €/a
Befüllung (Material, Einbau)	1.500 €/a
Wartung (1 h/Monat á 30 €/h)	360 €/a
Ersatzteile	500 €/a
Abschreibung (10% der Investitionskosten)	4.250 €/a
Zinsen (6% der Investitionskosten)	2.550 €/a
<b>Summe Betriebskosten</b>	<b>~14.900 €/a</b>

### 13.6 Zusammenfassung

Entsprechend der im Geruchsmanagementkonzept vorgeschlagenen Vorgehensweise ist die Geruchsemissionssituation bei dem betrachteten Öl und Fett verarbeitenden Betrieb evaluiert worden. Nach einer detaillierten Charakterisierung der Hauptemissionsquelle, die ihren Ursprung in der Seifenspaltung hat, wurde nach geeigneten Behandlungsmethoden zur Reduzierung der Geruchsemissionen gesucht. Für diese Untersuchungen standen Versuchsanlagen in unterschiedlichen Maßstäben zur Verfügung. Nach Voruntersuchungen mit einfachen Testsystemen wurden die Adsorption an Aktivkohle und der Abbau in Biofiltern als potenziell geeignete Verfahren identifiziert.

Tab. 38 zeigt eine Übersicht der voraussichtlichen Investitions- und Betriebskosten der unterschiedlichen Verfahrensvarianten. Es wird erneut deutlich, dass allein aufgrund der hohen Betriebskosten, die sich aus dem enorm hohen Aktivkohleverbrauch ergeben, für diesen Anwendungsfall die Adsorption nicht konkurrenzfähig betrieben werden kann. Die finanziell günstigste Variante stellt die Behandlung der Abluft mit einem Biofilter inklusive Abluftkonditionierung dar. Die Verfahrens-

kombination weist im Vergleich etwas höhere Investitionskosten auf, bietet aber durch die nachgeschaltete Adsorptionsstufe eine höhere Betriebssicherheit. Diese Verfahrensvariante wäre für Anwendungen sinnvoll, bei denen auch kurzweilige Emissionsspitzen unbedingt vermieden werden müssen. Diese könnten bei der Inbetriebnahme und insbesondere beim Durchbruch des Biofilters auftreten. Der Aktivkohlefilter kann derartige Konzentrationsspitzen abpuffern und ermöglicht so einen störungsunanfälligeren Betrieb der Anlage.

Tab. 38: Vergleich der Kosten für unterschiedliche Abluftbehandlungsverfahren zur Behandlung geruchsbeladener Abluft aus der Öl- und Fettverarbeitung

<b><u>Abluftvolumenstrom (3.000 m<sup>3</sup>/h)</u></b>	Investitionskosten	Betriebskosten
Biofilter (50 m <sup>3</sup> Sojakompost)	37.500 €	13.400 €/a
Biofilter/Adsorption (50 m <sup>3</sup> Sojakompost, 2 m <sup>3</sup> Aktivkohle)	42.500 €	14.900 €/a
Adsorption (50 m <sup>3</sup> Aktivkohle)	17.500 €	557.900 €/a



---

## 14 AUSBLICK

Das Ausmaß der Nutzbarkeit der geruchspezifischen Datenbank hängt stark von dem Umfang und der Aktualität der in ihr enthaltenen Daten ab. Je umfangreicher die verwalteten Informationen, desto effektiver ist sie als hilfreiches Instrument im Rahmen des Geruchsmanagementkonzeptes einsetzbar und desto besser in der Lage zusätzliche Untersuchungen bei der Lösung von Geruchsproblemen zu ersetzen. Aus diesem Grund soll kontinuierlich mit der Erschließung und Eingabe neuer Daten fortgefahren werden. Auch die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Informationen soll erweitert werden. So ist beispielsweise für den Themenbereich Analytik geplant, zusätzliche Angaben und Suchoptionen zum gezielten Nachweis und zur Identifizierung einzelner Substanzen zu ergänzen. Durch die Internetpräsenz und die ständige Weiterentwicklung der Datenbank soll gewährleistet werden, dass sie als stets aktuelles, weitreichend einsetzbares Hilfsmittel im Bereich der Geruchsanalytik und der Geruchsminderung international genutzt werden kann.

Die als Teil des Geruchsmanagementkonzeptes entwickelten Testsysteme sind an unterschiedlichen Abluftquellen für diverse Behandlungsverfahren bereits optimiert worden. Im Gegensatz zu dem statischen Testsystem wurden mit dem dynamischen Testsystem in erster Linie Vergleichsmessungen ohne simultane Optimierung der Versuchsparameter mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Ein vergleichbares Vorgehen mit statistischer Absicherung wäre sicherlich auch noch für das dynamische System denkbar. Obwohl die im Rahmen der Optimierung gesammelten Daten zeigen, dass diese Systeme für Auswahlversuche von Abluftbehandlungsverfahren geeignet sind, müssen sich diese erst noch in der Praxis bei ständig wechselnden Anforderungen bewähren, bevor sie als wirklich zuverlässige Instrumente im Rahmen des Geruchsmanagements standardisiert eingesetzt werden können.

Im Bereich der Geruchsmessung ist es das Ziel vieler Forschungsarbeiten, eine Methode bzw. ein Gerät zu entwickeln, welches die personal- und zeitaufwendigen, diskontinuierlichen olfaktometrischen Messungen ersetzen kann. Als Beispiel seien hier die bereits in dieser Arbeit diskutierten gassensitiven Sensorarrays genannt. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, anhand der

Odour-Beträge Änderungen der Geruchskonzentration und der Geruchscharakteristik zu beschreiben. Eingesetzt werden kann diese Erkenntnis beispielsweise bei der Abschätzung der Wirksamkeit von Geruchsminderungsmaßnahmen, was zu einer reduzierten Anzahl an olfaktometrischen Messungen bei der Wirkungsgradbestimmung führen kann. Jedoch ist trotz dieser Korrelation deutlich geworden, dass eine Bestimmung der Geruchskonzentration über die ermittelten Odour-Indices nicht möglich ist. Zu vergleichbaren Schlussfolgerungen kamen auch Pagé et al. (2007) im Rahmen einer Studie zur Bewertung der Geruchsemissionen aus Deponien. Die Hauptursache für die fehlende Korrelation ist sicherlich darin zu sehen, dass es nur schwer möglich ist, mit vertretbarem Aufwand gleichermaßen exakt eine quantitative Bestimmung aller geruchsaktiven Substanzen in einer Abluftprobe durchzuführen. Sollte es gelingen, eine Analysemethode zu entwickeln, die in der Lage ist, schnell und zuverlässig über ein großes Konzentrationsspektrum die gasförmigen Inhaltstoffe einer Probe zu quantifizieren, dann wäre ein großer Schritt zur olfaktometriefreien Geruchsmessung getan. Jedoch besteht weiterhin das Problem, dass über die Wechselwirkungen der Geruchsstoffe untereinander zu wenig bekannt ist, um deren Einflüsse bei der Konzentrationsberechnung berücksichtigen zu können. Zusätzlich bleibt natürlich als grundlegende Bedingung für eine derartige Methode, dass die Geruchsschwellenwerte der fraglichen Substanzen bekannt sein müssen. Zwar gibt es umfangreiche Datensammlungen mit Geruchsschwellenwerten von Einzelstoffen (z.B.: Wagner, 1999; Rychlik et al., 1998; Devos et al., 1990, Amoores und Hautala, 1983; Van Gemert und Nettenbreijer, 1977), jedoch kann eine solche Zusammenstellung nicht das komplette Stoffspektrum umfassen. Darüber hinaus weichen die von unterschiedlichen Autoren genannten Geruchsschwellenwerte oftmals um mehrere Zehnerpotenzen voneinander ab, was eine uneinheitliche Beurteilung der nachgewiesenen Substanzen zu Folge hat. Entsprechend wären für diese Methode eine Überprüfung und Vereinheitlichung der vorhandenen und die Bestimmung weiterer Geruchsschwellenwerte erforderlich. Solange es für die letztgenannten Punkte keine vielversprechenden Lösungsansätze gibt, wird auch zukünftig im Bereich des Geruchsmanagements nicht auf die menschliche Nase als Sensor zur Beurteilung von Geruchsemissionen verzichtet werden können.

---

## 15 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Geruchsmanagementkonzept erarbeitet, welches zum Ziel hat, mit möglichst geringem Aufwand effektive und zuverlässige Lösungen für spezielle Geruchsprobleme zu finden. Das Konzept umfasst den gesamten Bereich von der Aufnahme der Emissionssituation über deren detaillierte Charakterisierung und Bewertung bis hin zur apparativen Beseitigung der Geruchsemissionen. Beispielhaft angewendet wurde es an einem Betrieb der Öl- und Fettveredelung. Im Rahmen dieses Konzeptes wurde für das Werksgelände ein Geruchskataster erstellt, um die Hauptgeruchsquellen zu lokalisieren. In diesem Fall erwies sich die Abluft aus der Seifenspaltung als Hauptverursacher der Geruchsemissionen. Nach einer detaillierten Charakterisierung dieser Emissionsquelle wurden, basierend auf den Ergebnissen von Untersuchungen mit Abluftbehandlungsanlagen im Labor-, Technikums- und Containermaßstab, Dimensionierungen und Kostenabschätzungen für technische Lösungen zur Verminderung der Geruchsemissionen dieses Betriebes durchgeführt. Während sich ein reines Adsorptionsverfahren mit Aktivkohle aus technischer und aus ökonomischer Sicht nicht als geeignet erwies, zeigten Biofilter und Biofilter/Adsorption-Kombinationen ein gutes Reinigungsverhalten bei vergleichsweise geringem Kostenaufwand.

Für eine aussagekräftige Charakterisierung von Geruchsquellen wurde eine Bewertungsmethode über einen Odour-Index entwickelt. Der Odour-Index setzt die mittels GC/MS gemessene Peakfläche einer Substanz mit dessen Geruchsschwelle ins Verhältnis. Über den relativen Odour-Index, der das Verhältnis des Odour-Index einer Substanz zur Summe der Odour-Indices aller Geruchsstoffe einer Probe beschreibt, können dann die Hauptgeruchsstoffe einer Emissionsquelle identifiziert werden. Als eine weitere neue Größe wurde der Odour-Betrag eingeführt. Mit dem Odour-Betrag wird die Summe der Odour-Indices von betrachteten Hauptgeruchsstoffen zusammengefasst. In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass anhand von Konzentrationsänderungen der Hauptgeruchsstoffe auch Veränderungen der Geruchsstärke und Geruchscharakteristik von Abluftproben beschrieben werden können. Diese Erkenntnis kann zur abschätzenden Beurteilung von Abluftbehandlungsanlagen zur Geruchsreduzierung genutzt werden.

Als wichtige Instrumente des Geruchsmanagementkonzepts wurden ein statisches und ein dynamisches Testsystem zur Erstbeurteilung ausgewählter Abluftbehandlungsverfahren zur Geruchsreduzierung entwickelt und an Abluft aus der Öl- und Fettveredelung, der Schokoladenherstellung und der Kaffeeveredelung mittels statistischer Versuchsplanung optimiert. Der Schwerpunkt der Optimierungsversuche lag auf der Beurteilung von Biofiltermaterialien, aber auch die Anwendbarkeit für Adsorptionsverfahren wurde untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass beide Systeme als relativ schnelle Methoden prinzipiell geeignet sind, Biofiltermaterialien und andere Abluftbehandlungsverfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Behandlung der Geruchsemissionen einer konkreten Abluftquelle vergleichend zu beurteilen. In der Praxis zeigte sich, dass die aus den Testsystemen als leistungsstärkste Abluftbehandlungsverfahren hervorgegangen Methoden auch im Containermaßstab die besten Geruchsminderungsraten erzielten. Es können folglich potenziell geeignete Behandlungsverfahren schon vor der Durchführung von Dimensionierungsversuchen im größeren Maßstab zielgerichtet ausgewählt werden. Die Testsysteme bieten somit ein hohes finanzielles Einsparungspotenzial, da durch ihren Einsatz Untersuchungen im großtechnischen Maßstab zur Erhebung von Auslegungsdaten auf ein Minimum reduziert werden können.

Damit bei der Bewertung und Beseitigung von Geruchsemissionen gezielt auf bereits vorhandene Erfahrungen zurückgegriffen werden kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine geruchsspezifische Datenbank erstellt. Diese Datenbank bildet das Kernstück des Geruchsmanagementkonzeptes, da in ihr detaillierte Informationen rund um das Thema Geruch in strukturierter Form verwaltet und so dem Benutzer wertvolle Hinweise für die Lösung von Geruchsproblemen übermittelt werden. Neben der Bereitstellung stoffspezifischer Parameter wie Geruchsschwellen und Geruchseindrücken zu aufgeführten Substanzen bietet die Datenbank die Möglichkeit, die Geruchsstoffe möglichen Emissionsquellen, aber auch geeigneten Verfahren zu deren Behandlung zuzuordnen. Weitere verwaltete Informationen beinhalten Analyseverfahren, allgemeine Beschreibungen von aufgeführten Verfahren sowie Verweise auf entsprechende Anlagenbauer. Durch die kontinuierliche Erweiterung der Datensätze mit aktuellen Erkenntnissen entsteht ein ständig wachsender Wissenspool zu geruchsspezifischen Fragestellungen, der einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Verminderung von Geruchsemissionen leisten kann.

---

## 16 LITERATUR

30. BImSchV (2001): Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen – 30. BImSchV – Artikel 2 der Verordnung vom 20. Februar 2001, BGBl. I S. 305.

Acree, T.E.; Barnard, J. und Cunningham, D.G. (1984): A procedure for the sensory analysis of gas chromatographic effluents. *Food Chemistry* 14, S. 273-286.

Acree, T., und Arn, H. (2004): Flavornet: Gas chromatography-olfactometry (GCO) of natural products. Cornell University, NY, USA, <http://www.flavornet.org/flavornet.html>.

Alef, K. (1991): Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie: Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. ecomed verlagsgesellschaft mbh, Landsberg/Lech, ISBN: 3-609-65960-2.

Alpendurada, M. F. (2000): Solid-phase microextraction: a promising technique for sample preparation in environmental analysis, *Journal of Chromatography A* 889, S. 3-14.

Amoore, J. E. und Hautala, E. (1983): Odor as an aid to chemical safety: Odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution. *Journal of Applied Toxicology* 3, Nr. 6, S. 272-290.

Ampuero, S. und Bosset, J. O. (2003): The electronic nose applied to dairy products: a review, *Sensors and Actuators B* 94, S. 1-12.

Arora, G.; Cormier, F. und Lee, B. (1995): Analysis of odour-active volatiles in cheddar cheese headspace by multidimensional GC/MS/Sniffing, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 43, S. 748-752.

Bahn Müller, H. (1984): Olfaktometrie von Dibutylamin, Acrylsäureethylester, Isoamylalkohol und eines Spritzverdünners für Autolacke, *Ergebnisse eines VDI-Ringvergleichs, Staub – Reinhaltung der Luft* 44, Nr. 7/8, S. 352-258.

Bardtke, D. (1990): Mikrobiologische Voraussetzungen für die biologische Abluftreinigung. In: *Biologische Abluftreinigung*, Fischer, K.; Bardtke, D.; Eitner, D.; Homans, J.; Janson, O.; Kohler, H.; Sabo, F. und Schirz, S. (Hrsg.). Expert Verlag, ISBN: 3-8169-0428-9, S. 1-12.

Bathen, D. und Schmidt-Traub, H. (1999): Elektrothermische Regeneration von Adsorbern - Ein Überblick über den Stand von Forschung und Entwicklung. *Chemie Ingenieur Technik* 71, Nr. 12, S. 1359-1363.

Belitz, H.-D. und Grosch, W. (1994): *Leerbuch der Lebensmittelchemie*. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 3-540-55449-1.

Belitz, H.-D.; Grosch, W. und Schieberle, P. (2004): Food Chemistry. 3rd Edition. Springer-Verlag, Berlin.

Bidlingmaier, W. und Müskens, J. (1993): Emissionsgeschehen in Behandlungsanlagen für Bio- und Restabfall. In: BMFT-Statusseminar "Neue Techniken zur Kompostierung". Tagung 22.-23. Nov. 1993 in Hamburg, Umweltbundesamt (Hrsg.), S. 101-120.

BImSchG (2002): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. BGBl. I Nr. 71 vom 04.10.2002, S. 3830; zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2819).

Blank, I.; Sen, A. und Grosch, W. (1992): Potent odorants of the roasted powder and brew of Arabica coffee. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung 195, S. 239-245.

Boisch, A. (2001): Geruchsmanagement am Beispiel des Kompostwerkes Bützberg. Abluft 2001, In: Biologische Abfallbehandlung – Emissionen und deren Behandlung, Dokumentation der Fachtagung vom 05.-06.11.2001 in Hamburg. Stegmann, R.; Doedens, H. und Hensel, A. (Hrsg.), Hamburger Berichte 17, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9806505-9-6, S. 183-191.

Böse, M.; Berkmen, M. I. und Sitzmann, W. (1997): Biologische Reinigung organisch verschmutzter Abluftströme. Fett/Lipid 99, S. 2-10.

Both, R. (2004): Messen und Bewerten von Gerüchen. In: Messung und Minimierung von Gerüchen. Dokumentation des Seminars vom 09.-10.09.2004 in Hamburg. Niemeyer, Robers, Thiesen (Hrsg.) Hamburger Berichte Bd. 23, Verlag Abfall aktuell, ISBN 3-9808180-6-3, S. 77-90.

Bouzalakos, S.; Jefferson, B.; Longhurst, P. J. und Stuetz, R. M. (2004): Developing methods to evaluate odour control products. Water Science and Technology 50, Nr. 4, S. 225-232.

Bowly, S.W. (2003): An assessment of current methods for quantifying landfill odours. In: Christensen, T. H.; Cossu, R. und Stegmann, R. (Hrsg.): SARDINIA 2003, 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings. CISA, Cagliari.

Buck, L. und Axel, R. (1991): A novel multigene family may encode odorant receptors: A molecular basis for odor recognition. Cell 65, Nr. 1, S. 175-187.

Bücking, M. (1999): Freisetzung von Aromastoffen in Gegenwart von retardierenden Substanzen aus dem Kaffeegetränk. Dissertation 1999, Universität Hamburg, <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/1999/188/pdf/disse.pdf>.

Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (1994): Methodenbuch zur Analyse von Kompost. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln. 3. Aufl. März 1994, Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart, ISBN 3-928179-32-2.

- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (1998): Methodenbuch zur Analyse von Kompost. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln. 4. Aufl. Juli 1998, Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart, ISBN 3-928179-32-2.
- Buonicore, A. J. (1992a): Adsorption. In: Air Pollution Engineering Manual, Buonicore, A. J. und Davis, W. T. (Hrsg.). Van Nostrand Reinhold, New York, S. 31-52.
- Buonicore, A. J. (1992b): Absorption. In: Air Pollution Engineering Manual, Buonicore, A. J. und Davis, W. T. (Hrsg.). Van Nostrand Reinhold, New York, S. 15-31.
- Cartellieri, A., Thiesen, P.H. und Niemeyer, B. (2005): Development of a Basic Procedure to Design Sorption Processes. Waste Management 25 (9), S. 127-135.
- Chai, M. und Pawliszyn, J. (1995): Analysis of environmental air samples by solid-phase microextraction and gas chromatography/ion trap mass spectrometry, Environmental Science and Technology 29, S. 693-701.
- Cho, H.-J.; Baek, K.; Lee, H.-H.; Lee, S.-H. und Yang, J.-W., (2003): Competitive extraction of multi-component contaminants in water by Carboxen-polydimethylsiloxane fiber during solid-phase microextraction. Journal of Chromatography A 988, S. 177-184.
- Counet, C.; Callemien, D.; Ouwerx, C. und Collin, S. (2002): Use of gas chromatography-olfactometry to identify key odorant compounds in dark chocolate. Comparison of samples before and after conching. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50, Nr. 8, S. 2385-2391
- Czerny, M.; Mayer, F. und Grosch, W. (1999): Sensory study on the character impact odorants of roasted Arabica coffee. Journal of Agricultural and Food Chemistry 47, Nr. 2, S. 695-699.
- Czerny, M. und Grosch, W. (2000): Potent odorants of raw Arabica coffee. Their changes during roasting. Journal of Agricultural and Food Chemistry 48, Nr. 3, S. 868-872.
- Dalton, P. (2003): How people sense, perceive and react to odors. BioCycle, Nr. 11, S. 26-29.
- Dammann, B.; Wiese, B.; Heining, K. und Stegmann, R. (1996): Weitergehende Elimination von Gerüchen aus Kompostwerken. In: Neue Techniken der Kompostierung. Hamburger Berichte 10, Stegmann, R. (Hrsg.). Economica, S. 459-476.
- Dammann, B. und Stegmann, R. (1999): Dimensioning of bioscrubber/biofilter-combinations for odour treatment at compost facilities. In: Bidlingmaier, W.; de Bertolde, M. und Papadimitriou, E. K. (Hrsg.): Organic Recovery and Biological Treatment, Band II, Rhombos Verlag, Berlin, S. 645-651.
- Devinny, J. S.; Deshusses, M. A. und Webster, T. S. (1999): Biofiltration for air pollution control. CRC Press, Boca Raton.

Devos, M.; Gemert, L.J. van; Patte, F. und Rouault, J. (1990): Standardized human olfactory thresholds, Oxford University Press, New York.

Dijkstra, A. J. (1999): Integrated pollution control in seed oil refining. Fett - Lipid 101, Nr. 4, S. 132-137.

DIN 38404-5 (2005): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen - Bestimmung des pH-Wertes (C 5). Beuth Verlag, Berlin.

DIN 38409-1 (1987): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1), Beuth Verlag, Berlin.

DIN 38409-28 (1992): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung von gebundenem Stickstoff; Verfahren nach Reduktion mit Devardascher Legierung und katalytischem Aufschluß (H 28), Beuth Verlag, Berlin.

DIN 38414-4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente - Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 12880 (2001): Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 12880:2000. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 13725 (2003): Luftbeschaffenheit – Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie (Air quality – Determination of odour concentration by dynamic olfactometry). Deutsche Fassung EN 13725:2003. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1484 (1997): Wasseranalytik - Anleitungen zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC); Deutsche Fassung, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 27888-8 (1993): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (C8), Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 10304-2 (1996): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der gelösten Anionen mittels Ionenchromatographie - Teil 2: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Nitrat, Nitrit, Orthophosphat und Sulfat in Abwasser (ISO 10304-2:1995); Deutsche Fassung EN ISO 10304-2:1996, Beuth Verlag, Berlin.

Dräger (1997): Dräger-Röhrchen Handbuch, 11. Auflage, Drägerwerk AG, Lübeck.

Eitner, D. (1990): Biofilter in der Praxis. In: Biologische Abluftreinigung, Fischer, K.; Bardtke, D.; Eitner, D.; Homans, J.; Janson, O.; Kohler, H.; Sabo, F. und Schirz, S. (Hrsg.). Expert Verlag, ISBN: 3-8169-0428-9, S. 88-73.

- Eitner, D. (1992): Emissionsminderung in Ölmühlen durch Biofilter – Erfahrungsbericht. In: Dragt, A. J. und van Ham, J. (Hrsg.): *Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies*. Studies in Environmental Science 51. Elsevier, Amsterdam, ISBN 0-444-89263-x, S. 197-205.
- Emmel, C. und Zoubek, G. (2002): Gefahrstoff-Screening mittels SPME auf Baustellen – ein Erfahrungsbericht, *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 62, S. 307-313.
- Ergas, S. J. und Cárdenas-González, B. (2004): Biofiltration: past, present and future directions. *Biocycle*, Nr. 6, S. 35-39.
- Esbensen, K., Schonkopf, S., Midtgaard, T. (1996): *Multivariate Analysis in Practice*, CAMO ASA, Trondheim.
- Ettre, L. S. (2003): Retention index expressions. *Chromatographia* 58, Nr. 7/8, S. 491-494.
- Fischer, K. (1990): Biofilter: Aufbau, Verfahrensvarianten, Dimensionierung. In: Fischer, K.; Bardtke, D.; Eitner, D.; Homans, J.; Janson, O.; Kohler, H.; Sabo, F. und Schirz, S. (Hrsg.): *Biologische Abluftreinigung*. Expert Verlag, ISBN: 3-8169-0428-9, S.35-54.
- Fischer, K. (2001): Nichtbiologische Verfahren zur Geruchselimination. In: *Abluft 2001*. Hamburger Berichte 17, Stegmann, R.; Doedens, H. und Hensel, A. (Hrsg.). Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart, S. 193-204.
- Fischer, K. (2004): Methoden zur Geruchsminderung. In: *Geruch – Messung, Wirkung, Minderung–*, 71. Darmstädter Seminar –Abfalltechnik– am 24.6.2004 in Darmstadt. Verein zur Förderung des Instituts WAR der TU Darmstadt e.V. (Hrsg.), Schriftenreihe WAR 157, ISSN: 0721-5282, ISBN: 3-932518-53-5, S. 65-76.
- Flament, I. (1989): Coffee, Cocoa, and Tea. *Food Review International* 5, S. 617-669.
- Frechen, F.-B. (1993): Sensorische Methoden – Olfaktometrie und Begehung. In: *Bewertung von Geruchsemissionen und Geruchsimmissionen*. Schriftenreihe WAR 68, ISBN: 3-923419-61-9, S. 13-26.
- Frechen, F.-B. (2004): Geruchsemissionen aus Abwasseranlagen. In: *Messung und Minimierung von Gerüchen*. Dokumentation des Seminars vom 09.-10.09.2004 in Hamburg. Niemeyer, Robers, Thiesen (Hrsg.) *Hamburger Berichte* Bd. 23, Verlag Abfall aktuell, ISBN 3-9808180-6-3, S. 1-37.
- Freudenthal, K.; Otterpohl, R. und Behrendt, J. (2004): Entwicklung eines selektiven Absorptionsverfahrens zur Reinigung geruchsbeladener Abluft aus Lebensmittelbetrieben. In: *Messung und Minimierung von Gerüchen*. Dokumentation des Seminars vom 09.-10.09.2004 in Hamburg. Niemeyer, Robers, Thiesen (Hrsg.), *Hamburger Berichte*, Bd. 23, Verlag Abfall aktuell, ISBN 3-9808180-6-3, S. 221-238.

Freudenthal, K.; Otterpohl, R. und Behrendt, J. (2005): Absorption of odorous substances using selective gas-liquid separation processes, *Waste Management* 25 (9), S. 975-984.

Freudenthal, K.; Behrendt, J. und Otterpohl, R. (2006): Selektive Absorption von Geruchsstoffen. In: *Minimierung von Gerüchen; Dokumentation des Seminars vom 24.04.2006 in Hamburg; Niemeyer/Matz/Otterpohl/Stegmann/Steinhart (Hrsg.). Hamburger Berichte Bd. 30, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 1-23.*

Gardner, J. W. und Bartlett, P. N. (1994): A brief history of electronic noses, *Sensors and Actuators B* 18, S. 221-228.

GIRL (1998): Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie) in der Fassung vom 13. Mai 1998.

GIRL (2004): Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie - GIRL -) in der Fassung vom 21. September 2004.

Goldstein, N. (2001): New frontiers for odor research. *Biocycle*, September, S. 46-51, Online-Version: <http://www.jgpress.com/BCArticles/2001/090146.html>.

Grosch, W. (1993): Neuere Entwicklungen in der Aromaforschung. *Lebensmittelchemie* 47, S.129-134.

Guillen, M. D.; Cabo, N.; Ibargoitia, M. L. und Ruiz, A. (2005): Study of both sunflower oil and its headspace throughout the oxidation process. Occurrence in the headspace of toxic oxygenated aldehydes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, Nr. 4, S. 1093-1101.

Gust, M.; Sproenberg, F. und Schippert, E. (1979): Grundlagen der biologischen Abluftreinigung. Teil IV: Abgasreinigung durch Mikroorganismen mit Hilfe von Biowäschern. *Staub – Reinhaltung der Luft* 39, Nr. 9, S. 308-314.

Guth, H. G. (1991): Verderb von Sojaöl unter Einwirkung von Licht und Sauerstoff - Identifizierung der Aromastoffe und Vorläufer. Dissertation, Technische Universität München, Garching.

Hahne, J. und Vorlop, K.-D. (1999): Spurengasemissionen in der Landwirtschaft. *Entsorgungspraxis*, Nr. 1, S. 32-36.

Hansmann, K. (1999): Rechtsprobleme bei der Bewertung von Geruchsimmissionen. *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)*, Heft 11, S. 1158-1165.

Heining, K.; Wiese, B.; Dammann, B. und Stegmann, R. (1997a): Weitergehende Elimination von Gerüchen aus Kompostwerken – Abschlussbericht. Verbundvorhaben „Neue Techniken der Kompostierung“, Teilvorhaben 4, Förderkennzeichen: 1450638 C8, Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin.

Heining, K.; B. Wiese, R. Stegmann (1997b): Die Auslegungsrechnung von Biofiltern. *Wasser, Luft und Boden* 41, Nr. 3, S. 45-49.

Heining, K. (1998): Biofilter und Biowäscher – Die Geruchseliminierung bei Kompostwerken, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburger Berichte 14, Economica Verlag GmbH, Bonn, ISBN 3-87081-158-7.

Heining, K. und Wiese, B. (2000): Elektronische Geruchsmessung – Systeme und Anwendbarkeit im Immissionsschutz, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 60, S. 195-200.

Hekmat, D. und Vortmeyer, D. (1999): Biologischer Abbau von schwer wasserlöslichen, flüchtigen aromatischen Verbindungen aus Abluft. Chemie Ingenieur Technik 71, Nr. 11, S. 1290-1294.

Hübner, R. und Saake, M. (1989): Einsatz von Biofiltern zur Behandlung lösemittelhaltiger Abluft. VDI Berichte Nr. 735. Tagung 23. und 24. Mai 1989, Köln. VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3-18-0900735-5, S. 277-284.

Jelen, H. H.; Obuchowska, M.; Wojtasiak, R. und Wasowicz, E. (2000): Headspace solid-phase microextraction use for the characterization of volatile compounds in vegetable oils of different sensory quality, Journal of Agricultural and Food Chemistry 48, S. 2360-2367.

Jordan, M. J.; Margaria, C. A.; Shaw, P. E. und Goodner, K. L. (2003): Volatile components and aroma active compounds in aqueous essence and fresh pink guava fruit puree (*Psidium guajava* L.) by GC-MS and multidimensional GC/GC-O, Journal of Agricultural and Food Chemistry 51, S. 1421-1426.

Kennes, C. und Thalasso, F. (1998): Waste gas biotreatment technology. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 72, S. 303-319.

Kleeberg, K. K. (2002): Identifizierung von Aminosäure-Radiolyseprodukten und sensorischen Veränderungen in  $\gamma$ -bestrahlten Nordseegarnelen und anderen eiweißreichen Lebensmitteln. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Fachbereichs Chemie der Universität Hamburg ([http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=966133439&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=966133439.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=966133439&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=966133439.pdf)).

Kleeberg, K.; Liu, Y.; Schlegelmilch, M.; Streese, J. und Stegmann, R. (2003): Potential of Solid-Phase Microextraction (SPME) for the characterisation of odorous waste gas emissions. In: Christensen, T. H.; Cossu, R. und Stegmann, R. (Hrsg.): SARDINIA 2003, 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings. CISA, Cagliari.

Kleeberg, K. K.; Liu, Y.; Jans, M.; Schlegelmilch, M.; Streese, J. und Stegmann, R. (2005a): Development of a simple and sensitive method for the characterisation of odorous waste gas emissions by means of solid-phase microextraction (SPME) and GC-MS/olfactometry, Waste Management 25 (9), S. 872-879.

Kleeberg, K. K.; Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Steinhart H. und Stegmann, R. (2005b): Odour abatement strategy for a sustainable odour management. In: Proceedings (CD-ROM) of Sardinia 2005 – 10th International Waste Management and Landfill Symposium. Cossu, R. Stegmann, R. (ed.). Session G4; CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy, 03-07.10.2005.

König, W. A. und Werner, F. (2004): Cyclodextrine als selektive Adsorbentien. In: Messung und Minimierung von Gerüchen. Hamburger Berichte 23. Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 109-126.

Koziel, J.; Jia, M. und Pawliszyn, J. (2000): Air sampling with porous solid-phase microextraction fibers, *Analytical Chemistry* 72, S. 5178-5186.

Koziel, J. A. und Pawliszyn, J. (2001): Air sampling and analysis of volatile organic compounds with solid phase microextraction, *Journal of Air and Waste Management Association* 51, S. 173-184.

Krautwurst, D. und Shirokova, E. (2004): Geruchsstoff-Rezeptor-Erkennung im zellulären Messsystem HeLa/Olf. In: Minimierung von Gerüchen; Dokumentation des Seminars vom 24.04.2006 in Hamburg; Niemeyer/Matz/Otterpohl/Stegmann/Steinhart (Hrsg.). *Hamburger Berichte* Bd. 30, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 53-64.

Kuchta, K. und Jager, J. (1993): Geruchsproblematik: Analytik, Behandlung und Erfolgskontrolle. In: Tagungsband des BMFT-Statusseminars „Neue Techniken der Kompostierung“ vom 22. – 23. 11. 1993 in Hamburg, S. 87-100.

Lee, S.-J. und Noble, A. C. (2003): Characterization of odour-active compounds in californian chardonnay wines using GC-olfactometry and GC-mass spectrometry, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, S. 8036-8044.

Leffingwell & Associates (2007): Flavor-Base, <http://www.leffingwell.com>

Marsili, R. (2002): Flavor, fragrance, and odor analysis, Marcel Dekker, Inc., New York.

Matheis, G. (1993): Geschmack, Geruch, Aroma und Flavour. In: Dragoco Berichte für Geschmacksstoffe verarbeitende Industrien 3-1993, Klein und Partner, Holzminden.

Matz, G.; Schröder, W. und Ollesch, T. (2004): Bewertung und Quantifizierung von Leitsubstanzen aus der geruchstragenden Abluft von Lebensmittelbetrieben und der Ferkelaufzucht. In: Erfassung und Minimierung von Gerüchen. *Hamburger Berichte* 23, Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, S. 91-108.

Matz, G.; Schröder, W. und Ollesch, T. (2005): New methods for fast on-site measurement of odorous compounds. *Waste Management* 25 (9), S. 864-871.

Maxeiner, B. und Mannebeck, D. (2004): Round Robin Test Olfactometry 2003. International Conference „Environmental Odour Management“, VDI-Berichte, 1850, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3-18-091850-0, S. 137-151.

Mayer, J. (1990): Geruchsstoffe bei der Heißrotte von Hausmüll. Dissertation, Universität Tübingen.

Mayer, F.; Czerny, M. und Grosch, W. (1999): Influence of provenance and roast degree on the composition of potent odorants in Arabica coffee. *European Food Research and Technology* 209, S. 242-250.

- Mayer, F.; Czerny, M. und Grosch, W. (2000): Sensory study of the character impact aroma compounds of a coffee beverage. *European Food Research and Technology* 211, S. 272-276.
- Mombaerts, P.; Wang, F.; Dulac, C.; Chao, S. K.; Nemes, A.; Mendelsohn, M.; Edmondson, J. und Axel, R. (1996): Visualizing an olfactory sensory map. *Cell* 87, Nr. 4, S. 675-686.
- Morales, M. T.; Aparicio, R. and Rios, J. J. (1994): Dynamic headspace gas chromatographic method for determining volatiles in virgin olive oil, *Journal of Chromatography A* 668, S. 455-462.
- Münchmeyer, W. und Walte, A. (2004): Erfassung von Gerüchen mit Gassensorenarrays. In: *Erfassung und Minimierung von Gerüchen*. Hamburger Berichte 23, Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, S. 39-51.
- Murray, R. A., (2001): Limitations to the use of solid-phase microextraction for quantitation of mixtures of volatile organic sulfur compounds. *Analytical Chemistry* 73, S. 1646-1649.
- Namiésnik, J.; Zygmunt, B. und Jastrzebska (2000): Application of solid-phase microextraction for determination of organic vapours in gaseous matrices, *Journal of Chromatography A* 885, S. 405-418.
- Nijssen, L. M.; Visscher, C. A.; Maarse, H.; Willemsens, L. C. und Boelens, M. H. (1996): *Volatile Compounds in Foods. Qualitative and Quantitative Data*, 7. Auflage. TNO Nutrition and Food Research Institute, Zeist, The Netherlands, S. 72.1-72.23.
- NIST (National Institute of Standards and Technology) (2005): Standard Reference Database Number 69, June 2005, <http://webbook.nist.gov/chemistry>.
- Ottengraf, S. P. P. (1986): Exhaust gas purification. In: *Biotechnology*, Band 8, Rehm, H. J. und Reed, G. (Hrsg.), VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, S. 425-452.
- Otto, M. (1997): *Chemometrie: Statistik und Computereinsatz in der Analytik*. VCH Verlagsgemeinschaft mbH, Weinheim, ISBN 3-527-28837-6.
- Pagé, T.; Narjoux, A.; Guy, C.; Caron, R.F. und Fécil, B. (2007): Impact evaluation of landfills on air quality: odours and toxic compounds. In: *Proceedings (CD-ROM) of SARDINIA 2007 - 11th International Waste Management and Landfill Symposium*, Cossu, R., Diaz, L.F. und Stegmann, R. (Hrsg.), CISA, Cagliari.
- Paul, H. und Nisi, D. (1996): Biofilteranlage in einer Gießerei – 3 Jahre Betriebserfahrung. In: *Kommission Reinhaltung der Luft (Hrsg.): VDI-Bericht 1241: Fortschritte bei der thermischen, katalytischen und biologischen Abgasreinigung*. VDI Verlag, Düsseldorf, S. 493-510.
- Price, D. W. und Schmidt, P. S. (1998): VOC recovery through microwave regeneration of adsorbents: process design studies. *Journal of Air and Waste Management Association* 48, S. 1135-1145.

- Qian, M. und Reineccius, G. (2002): Identification of aroma compounds in Parmigiano-Reggiano cheese by gas chromatography/olfactometry, *Journal of Dairy Science* 85, S. 1362-1369.
- Ramel, M. und Nomine, M. (2000): Physicochemical characterisation of odours, *Analisis* 28, S. 171-179.
- Ranau, R. und Steinhart, H. (2004): Bewertung und Quantifizierung von Leitsubstanzen aus der geruchstragenden Abluft von Lebensmittelbetrieben und der Ferkelaufzucht. In: Erfassung und Minimierung von Gerüchen. *Hamburger Berichte* 23, Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, S.147-165.
- Ranau, R.; Kleeberg, K. K.; Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Stegmann, R. und Steinhart, H. (2005): Analytical determination of the suitability of different processes for the treatment of odorous waste gas, *Waste Management* 25 (9), S. 908-916.
- Ressler, K. J.; Sullivan, S. L. und Buck, L. B. (1994): Information coding in the olfactory system - evidence for a stereotyped and highly organized epitope map in the olfactory-bulb. *Cell* 79, Nr. 7, S. 1245-1255.
- Robers, A.; Thiesen, P. H. und Niemeyer, B. (2004): Innovative Adsorptionstrennverfahren zur Geruchsminimierung. In: Erfassung und Minimierung von Gerüchen. *Hamburger Berichte* 23, Stegmann, R. (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart. S. 139-254.
- Rosenkranz, H. S. und Cunningham, A. R. (2003): Environmental odors and health hazards. *The Science of the Total Environment* 313, S. 15-24
- Rothe, M. und Thomas, B. (1963): Aromastoffe des Brotes. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 119, S. 302-310.
- Rychlik, M.; Schieberle, P. und Grosch, W. (1998): Compilation of odour thresholds, odour qualities and retention indices of key food odorants. Institut für Lebensmittelchemie, Technische Universität München.
- Schaller, E.; Bosset, J. O. und Escher, F. (1998): „Electronic noses“ and their application to food, *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 31, S. 305-316.
- Schippert, E. (1994): Biowäschertechnologie. VDI-Bericht 1104: Biologische Abgasreinigung. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 39-56.
- Schlegelmilch, M., Kleeberg, K., Streese, J., Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement – Ein Anwenderhandbuch mit Beispielen aus der Lebensmittelindustrie. *Hamburger Berichte* 24, Verlag Abfall aktuell, ISBN 3-9808180-7-1.
- Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Biedermann, W.; Herold, T. und Stegmann, R. (2005): Odour control at biowaste composting facilities. *Waste Management* 25 (9), S. 917-927.

- Schnermann, P. und Schieberle, P. (1997): Evaluation of key odorants in milk chocolate and cocoa mass by aroma extract dilution analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45, Nr. 3, S. 867-872.
- Schön, M. und Hübner, R. (1996): *Geruch - Messung und Beseitigung*. 1. Aufl., Vogel Verlag, Würzburg, ISBN: 3-8023-1561-8.
- Semmelroch, P.; Laskawy, G.; Blank, I. und Grosch, W. (1995): Determination of potent odorants in roasted coffee by stable isotope dilution assays. *Flavour and Fragrance Journal* 10, S. 1-7.
- Semmelroch, P. und Grosch, W. (1996): Studies on character impact odorants of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44, Nr. 2, S. 537-543.
- Shusterman, D. (2001): Odor-associated health complaints: Competing explanatory models. *Chemical Senses* 26, S. 339-343
- Sigma-Aldrich (2003): *Flavours & Fragrances, International Edition 2003-2004*.
- Stegmann, R. und Hensel, A. (2004): Schwerpunkt Bioabfallverwertung: Biologische Abluftreinigung bei der Kompostierung. In: *Initiativen zum Umweltschutz*. Band 60, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Erich Schmidt Verlag, Berlin. ISBN 3-503-07894-0
- Stockinger, J. (2004): Messunsicherheiten bei der Olfaktometrie. In: *Geruch: Messung-Wirkung-Minimierung*, 71. Darmstädter Seminar –Abfalltechnik– am 24. Juni 2004 in Darmstadt, Verein zur Förderung des Institutes WAR (Hrsg.), TU Darmstadt e.V. –WAR–. Schriftenreihe WAR 157, ISSN: 0721-5282, ISBN: 3-932518-53-5, S. 51-63.
- Streese, J. (1997): *Untersuchungen zum Abbau von Methan in Biofiltern*. Diplomarbeit im Studiengang Verfahrenstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Streese, J. (2005): *Abbau von Methan in aktiv durchströmten Biofiltern*. Dissertation (TUHH), *Hamburger Berichte* 25, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-0-2.
- Streese, J.; Schlegelmilch, M.; Heining, K. und Stegmann, R. (2005): A macrokinetic model for dimensioning of biofilters for VOC and odour control. *Waste Management* 25 (9), S. 965-974.
- TA-Luft (2002): *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft*. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 24. Juli 2002. (GMBI. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605).
- Taurino, A. M.; Distante, C.; Siciliano, P. und Vasanelli, L. (2003): Quantitative and qualitative analysis of VOCs mixtures by means of a microsenors array and different evaluation methods, *Sensors and Actuators B* 93, S. 117-125.

Thiesen, P. H.; Mahlke, I. T. und Niemeyer, B. (2005): Klassifizierung von Geruchstoffen - Ein Ansatz zur wissensbasierten Auswahl von Modellsubstanzen. *Chemie-Ingenieur-Technik* 77, Nr. 7, S. 920-924.

Tuduri, L.; Desauziers, V. und Fanlo, J. L. (2001): Potential of solid-phase microextraction fibers for the analysis of volatile organic compounds in air, *Journal of Chromatographic Science* 39, S. 521-529.

Tuduri, L.; Desauziers, V. und Fanlo, J. L. (2002): Dynamic versus static sampling for the quantitative analysis of volatile organic compounds in air with polydimethylsiloxane-Carboxen solid-phase microextraction fibers. *Journal of Chromatography A* 963, S. 49-56

Ullrich, F. und Grosch, W. (1987): Identification of the most volatile flavour compounds formed during autoxidation of linoleic acid. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 184, S. 277-282.

Van den Dool, H. und Kratz, P. D. (1963): A Generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography. *Journal of Chromatography A* 11, S. 463-471.

Van Gemert, L. J. und Nettenbreijer, A. H. (1977): Compilation of odour threshold values in air and water, National Institute for Water Supply, Voorburg, Netherlands, Central Institute for Nutrition and Food Research, Zeist, Netherlands.

Van Harreveld, A.P. (2003): Odour concentration decay and stability in gas sampling bags, *Journal of the Air & Waste Management Association* 53, S. 51-61.

Van Harreveld, A. P. (2004): Odour management tools - filling the gaps. *Water Science and Technology* 50, Nr. 4, S. 1-8

Van Liere, H.C.; van Groenestijn (2003): Thermophilic Biofiltration (THERBOTM): Biological cleaning of hot and fatty waste gases. In: *VDI-Berichte 1777, Biologische Abgasreinigung – Gase, Gerüche, Keime, Kolloquium, Leipzig, 8.-9.10.2003*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, ISBN: 3-18-091777-5, S. 275-279.

Vassar, R.; Chao, S. K.; Sitcheran, R.; Nunez, J. M.; Vosshall, L. B. und Axel, R. (1994): Topographic organization of sensory projections to the olfactory-bulb. *Cell* 79, Nr. 6, S. 981-991.

VDI 2100 Blatt 1 (2001): Messung gasförmiger Verbindungen in der Außenluft, Messen von Innenraumluftverunreinigungen, Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen – Grundlagen, *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5*, VDI-Verlag, Düsseldorf.

VDI 2457 Blatt 1 (1997): Messung gasförmiger Emissionen – Chromatographische Bestimmung organischer Verbindungen, Grundlagen, *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5*, VDI-Verlag, Düsseldorf.

VDI 2467 Blatt 2 (1991): Messen gasförmiger Immissionen; Messen der Konzentration primärer und sekundärer aliphatischer Amine mit der Hochleistungs-

Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC). VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft - Band 5: Analysen- und Messverfahren, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2592 Blatt 1 (2000): Emissionsminderung - Anlagen zur Gewinnung pflanzlicher Öle und Fette. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft. Bd. 3. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3477 (2004): Biologische Abgasreinigung: Biofilter. VDI -Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3478 (1996): Biologische Abgasreinigung: Biowäscher und Rieselbettreaktoren. VDI -Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3674 (1998): Abgasreinigung durch Adsorption, Prozessgas und Abgasreinigung. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3790 Blatt 1 (2003): Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Grundlagen. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3790 Blatt 2 (2000): Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Deponien. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3893 (1989): Emissionsminderung – Kakao- und Schokoladenindustrie. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 3, Beuth Verlag, Berlin.

VDLUFA (1991): Methodenbuch – Die Untersuchung von Böden. Band 1, Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

Wagner, R.; Czerny, M.; Bielohradsky, J. und Grosch, W. (1999): Structure-odour-activity relationships of alkylpyrazines. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung A 208, S. 308-316.

Wiley (2000): Registry of Mass Spectral Data, 7th Edition.

Winneke, G.; Sucker, K. und Both, R. (2004): Population odour annoyance is influenced by the hedonic quality of industrial odours. International Conference „Environmental Odour Management“, 17.-19.11.2004, VDI-Berichte, 1850, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3-18-091850-0, S. 9-12.

Witherspoon, J. R.; Adams, G.; Cain, W.; Cometto-Muniz, E.; Forbes, B.; Hentz, L.; Novack, J. T.; Higgins, M.; Murthy, S.; McEwen, D.; Ong, H. T. und Daigger, G.T. (2004): Anaerobic digestion and related processes, odour and health effects study. Water Environment Research Foundation (WERF), Water Science and Technology 50, Nr. 4, S. 9-16.

Wolsteinholme, Ph. (1998): Foul air collection and conveyance. In: Odor and VOC control handbook. Rafson, H. J. (Hrsg.), McGraw-Hill, New York, ISBN 00-07-052523-4, S. 7.1-7.16.

Yeretzian, C.; Jordan, A.; Badoud, R. und Lindinger, W. (2002): From the green bean to the cup of coffee: Investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. *European Food Research and Technology* 214, S. 92-104.

Zou, Z. H.; Horowitz, L. F.; Montmayeur, J. P.; Snapper, S. und Buck, L. B. (2001): Genetic tracing reveals a stereotyped sensory map in the olfactory cortex. *Nature* 414, Nr. 6860, S. 173-179.

---

## 17 EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN

### *Referierte Veröffentlichungen*

Herold, T., Schlegelmilch, M., Dammann, B., Streese, J., Stegmann, R. und Hensel, A. (2001): Keimrückhaltung bei der Behandlung von Intensivrotteabluft in einem kombinierten Biowäscher/Biofiltersystem. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 61, Nr. 6, S. 255-260

Herold, T.; Biedermann, W.; Schlegelmilch, M. und Hensel, A. (2002): Einfluss verschiedener Filtermaterialien auf den Wirkungsgrad von Biofiltern zur Reinigung von Rotteabluft einer Kompostierungsanlage. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 62, Nr. 4, S. 147-153.

Kleeberg, K.K., Liu, Y., Jans, M., Schlegelmilch, M., Streese, J., Stegmann, R. (2005): Development of a simple and sensitive method for the characterisation of odorous waste gas emissions by means of solid-phase microextraction (SPME) and GC-MS/olfactometry. Waste Management 25, Issue 9, 872-879.

Körner, I., Braukmeier, J., Heerenklage, J., Leikam, K.; Ritzkowski, M.; Schlegelmilch, M.; Stegmann, R. (2003): Investigation and Optimization of Composting Processes - Test Systems and practical Applications. Waste Management Journal 23, S. 17-26.

Ranau, R., Kleeberg, K.K., Schlegelmilch, M., Streese, J., Stegmann, R., Steinhart, H. (2005): Analytical determination of the suitability of different processes for the treatment of odorous waste gas. Waste Management 25, Issue 9, 908-916.

Schlegelmilch, M., Herold, T., Streese, J., Hensel, A.; Stegmann, R. (2005): The potential to reduce emissions of airborne microorganisms by means of biological waste gas treatment systems. Waste Management 25, Issue 9, 955-964.

Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Biedermann, W.; Stegmann, R. (2005): Odour Control at Biowaste Composting Facilities. Waste Management 25, Issue 9, 917-927.

Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Stegmann, R. (2005): Odour Management and Treatment Technologies – an overview -. Waste Management 25, Issue 9, 928-939.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese, J. und Stegmann, R. (2006): Odour Treatment Test Systems as Important Tools in a New Database Supported Odour Management Strategy. In: Proceedings of Enviro 06 – Conference and Exhibition, 9-11 May 2006, Melbourne. DVD, paper e6130, ISBN 0-9775223-0-X.

Schlegelmilch, M., Streese-Kleeberg, J. und Stegmann, R. (2007): Ammonia and Odour Removal from Waste Gases of Composting Processes. In: Ammonia Emissions in Agriculture, G.J. Monteny, E. Hartung (Ed), Wageningen Academic Publishers, ISBN: 978-90-8686-029-6, S. 235-236.

Streese, J.; Schlegelmilch, M.; Heining, K. und Stegmann, R. (2005): A macrokinetic model for dimensioning of biofilters for VOC and odour treatment. *Waste Management* 25, Nr. 9, S. 965-974.

Wang, H.; Kimberly, M. O., Schlegelmilch, M. (2003): Biosolids-derived nitrogen mineralization and transformation in forest soils. *Journal of Environmental Quality* 32, S. 1851-1856.

*Nicht referierte Veröffentlichungen*

Herold, T. und Schlegelmilch, M. (2001): Einflussfaktoren auf die mikrobiellen Emissionen aus Biofiltern (Modelluntersuchungen). In: *Abluft 2001. Hamburger Berichte* 17. Stegmann, R.; Doedens, H., Hensel, A. (Hrsg.). S. 291-302. Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart. ISBN 3-9806505-9-6

Kleeberg, K.K.; Liu, Y.; Schlegelmilch, M.; Streese, J.; Stegmann, R. (2003): Potential of Solid-Phase Microextraction (SPME) for the Characterisation of Odorous Waste Gas Emissions. In: *Proceedings (CD-ROM) of Sardinia 2003 - Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*. Christensen, T.H.; Cossu, R. Stegmann, R. (ed.). Session D12, S. 406-407; CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy, 06-10.10.2003.

Kleeberg, K.K., Schlegelmilch, M., Streese, J., Steinhart, H., Stegmann, R. (2005): Odour abatement strategy for a sustainable odour management. In: *Proceedings (CD-ROM) of Sardinia 2005 - Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Cossu, R. Stegmann, R. (Eds.). Session G4: Odour analyses, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy, 03-07.10.2005.

Körner, I.; Schlegelmilch, M. und Stegmann, R. (1999): Regulation of Nitrogen contents of composts during composting - First experimental results In: *Organic Recovery & Biological Treatment - Part 1: Research in and Implementation of process technology; Proceedings of the International conference ORBIT 99*, 2-4. sept. 1999 in Weimar, W. Bidlingmaier, M. de Bertoldi, L.F. Diaz und E.K. Papadimitriou (Hrsg.), Rhombos-Verlag: Berlin 1999, S. 123-129; ISBN: 3-930894-20-3.

Körner, I., Braukmeier, J., Heerenklage, J. Leikam, K., Ritzkowski, M., Schlegelmilch, M, Stegmann, R. (2000): Overview of Commercially used Composting systems and Methods to Investigate and Optimize Composting Processes. In: *Proceedings of the Compost Down Under 2000 Conference*, 14.-15. 11.2000, RMIT University, Department of Civil and Geological Engineering (Hrsg.), Melbourne, Australia.

Schlegelmilch, M.; Herold, T.; Illigner, F. und Stegmann, R. (2001): Keimrückhaltung bei der biologischen Abluftreinigung - Untersuchungen an Biowäscher/Biofilter-Systemen unter Praxisbedingungen. In: *Abluft 2001. Hamburger Berichte* 17. Stegmann, R.; Doedens, H., Hensel, A. (Hrsg.). S. 303-315. Verlag Abfall Aktuell, Stuttgart. ISBN 3-9806505-9-6

Schlegelmilch, M.; Dammann, B.; Herold, T.; Illigner, F.; Streese, J.; Hensel, A., Stegmann, R. (2001): Reduction of Airborne Germs in Biological Waste Gas Treatment. In: Proceedings of Sardinia 2001 - Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. Christensen, T.H.; Cossu, R. Stegmann, R. (ed.). Vol. V. Waste Management of Municipal and Industrial Waste. pp 425-434. CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy.1-5.10.2001

Schlegelmilch, M.; Dammann, B.; Herold, T.; Streese, J.; Hensel, A.; Stegmann, R. (2002): Rückhaltung von Keimen bei der biologischen Abluftreinigung. In: Bioabfallverwertung – Know-how-Transfer aus Forschung und Praxis. Internationaler Workshop für osteuropäische Länder (2001). Kleinke, Bidlingmaier (Hrsg.). Initiativen zum Umweltschutz Bd. 49, Erich Schmidt Verlag, S. 173-188, ISBN 3-503-07025-7.

Schlegelmilch, M.; Dammann, B.; Herold, T.; Streese, J.; Hensel, A.; Stegmann, R. (2002): Reduction of Airborne Germs in Biological Waste Gas Treatment. In: Biological Waste Treatment – Know-how-Transfer from Research and Practice. International Workshop for Eastern European Countries (2001). Kleinke, Bidlingmaier (Hrsg.). Initiativen zum Umweltschutz Bd. 49, Erich Schmidt Verlag, S. 158-170, ISBN 3-503-07026-5.

Schlegelmilch, M.; Bockreis, A.; Herold, T.; Kleeberg, K.; Steinberg, I.; Streese, J.; Stegmann, R. (2003): Aktuelle Projekte im Bereich der biologischen Abluftbehandlung. In: Biologische Abgasreinigung Gase, Gerüche, Keime – Kolloquium, Leipzig, 8.-9.10.2003. Kommission Reinhaltung der Luft (KRDL) im VDI und DIN, VDI-Berichte Nr. 1777. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 191-201, ISSN 0083-5560, ISBN 3-18-091777-5.

Schlegelmilch, M.; Herold, T.; Stegmann, R. (2003): Hygienic aspects of exhaust management at composting facilities. In: Pullammanappallil, P.; McComb, A.; Diaz, L.F.; Bidlingmaier, W. (Hrsg.): ORBIT 2003: Organic Recovery and Biological Treatment; Proceedings of the Fourth International Conference of ORBIT Association on Biological Processing of Organics: Advances for a Sustainable Society, Part II, S. 622-637, ISBN 3-935974-04-3.

Schlegelmilch, M.; Herold, T.; Stegmann, R. (2003): Reducing airborne emissions of composting facilities by means of biological waste gas treatment. In: Proceedings (CD-ROM) of Sardinia 2003 - Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. Christensen, T.H.; Cossu, R. Stegmann, R. (Hrsg.). Postersession PB, S. 572-573; CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy, 06-10.10.2003.

Schlegelmilch, M.; Biedermann, W.; Hempel, O.; Herold, T.; Streese, J. (2004): Biologische Abluftreinigung bei der Kompostierung. In: Initiativen zum Umweltschutz 60, Stegmann/Hensel (Hrsg.), Abschlussbericht, Erich Schmidt Verlag Berlin, ISBN 3-503-07894-0.

Schlegelmilch, M.; Herold, T.; Stegmann, R. (2004): Controlling airborne emissions at Composting Facilities. Proceedings of the 1st seminar on applied aerobiology. 20th May 2004, Murcia, Spain, Ed.: M.Á. Sánchez-Monedero, A. Roig. ISBN: 84-688-6721-7, 39-50.

Schlegelmilch, M., Kleeberg, K.K.; Streese, J.; Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement - Ein Anwenderhandbuch mit Beispielen aus der Lebensmittelindustrie. Hamburger Berichte 24, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN: 3-9808180-7-1.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese, J.; Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement-konzept zur Verminderung von Emissionen. Wasser, Luft und Boden (5), 40-43.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese, J.; Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement in der Praxis. In: Geruch: Messung-Wirkung-Minimierung, 71. Darmstädter Seminar –Abfalltechnik- am 24. Juni 2004 in Darmstadt. Hrsg.: Verein zur Förderung des Institutes WAR, TU Darmstadt e.V. –WAR-. Schriftenreihe WAR 157, ISSN: 0721-5282, ISBN: 3-932518-53-5, S. 117-128.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese, J.; Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement in der Lebensmittelindustrie am Beispiel eines öl- und fettverarbeitenden Betriebes. In: Stegmann, R. (Hg.): Erfassung und Minimierung von Gerüchen. Hamburger Berichte 23. Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN: 3-9808180-6-3, S. 185-201.

Schlegelmilch, M., Streese, J.; Biedermann, W.; Herold, T.; Stegmann, R. (2005): Reducing odorous emissions from biowaste composting Plants by means of biological waste gas treatment systems. In: Proceedings (CD-ROM) of Sardinia 2005 - Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. Cossu, R. Stegmann, R. (Eds.). Session D9: Odour, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula, Cagliari. Italy, 03-07.10.2005.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Kummrow, V.; Streese, J. und Stegmann, R. (2006): Geruchsmanagement bei der Öl- und Fettveredelung. In: Minimierung von Gerüchen; Dokumentation des Seminars vom 24.04.2006 in Hamburg; Niemeyer/Matz/Otterpohl/ Stegmann/Steinhart (Hrsg.). Hamburger Berichte Bd. 30, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 159-173.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Lindenberg, K.; Streese, J. und Stegmann, R. (2006): Geruchsmanagement bei der Kakaomasseherstellung. In: Minimierung von Gerüchen; Dokumentation des Seminars vom 24.04.2006 in Hamburg; Niemeyer/Matz/Otterpohl/ Stegmann/Steinhart (Hrsg.). Hamburger Berichte Bd. 30, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 175-184.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese, J. und Stegmann, R. (2006): Testsysteme als wichtige Instrumente eines datenbankgestützten Geruchsmanagementkonzeptes. In: Minimierung von Gerüchen; Dokumentation des Seminars vom 24.04.2006 in Hamburg; Niemeyer/Matz/Otterpohl/Stegmann/Steinhart (Hrsg.). Hamburger Berichte Bd. 30, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9810064-5-3, S. 141-157.

Schlegelmilch, M.; Kleeberg, K.; Streese-Kleeberg, J. and Stegmann, R. (2007): A new odour specific database and its central role in odour control management. In: Cossu, R.; Diaz, L. F. und Stegmann, R. (Hg.): SARDINIA 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings. CISA, Cagliari.

Stegmann, R.; Schlegelmilch, M. (2003): Geruchsmanagement in der Lebensmittelindustrie, insbesondere in der Schokoladenherstellung und bei der Öl- und Fettveredelung. In: Erfassung und Verminderung von Geruchsemissionen aus Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie. Uniforschung, Forschungsmagazin der Universität der Bundeswehr Hamburg, 13. Jahrgang, Ausgabe 2003, S. 10-11, ISSN 0940-8061.

Streese, J.; Schlegelmilch, M. und Stegmann, R. (2004): Geruchsmanagement. Konzepte und Verfahren zur Emissionsminderung. In: Stegmann, R. (Hg.): Erfassung und Minimierung von Gerüchen. Hamburger Berichte 23. Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, S. 127-145.

Streese, J.; Schlegelmilch, M.; Stegmann, R. (2006): Industrial waste gas treatment. HavanaVerde 2006, Workshop on Treatment and Management of Solid Waste and Wastewater, Havana, Kuba, 10.-12.05.2006. ISBN 959-7136-43-0.

#### *Studien- und Diplomarbeit*

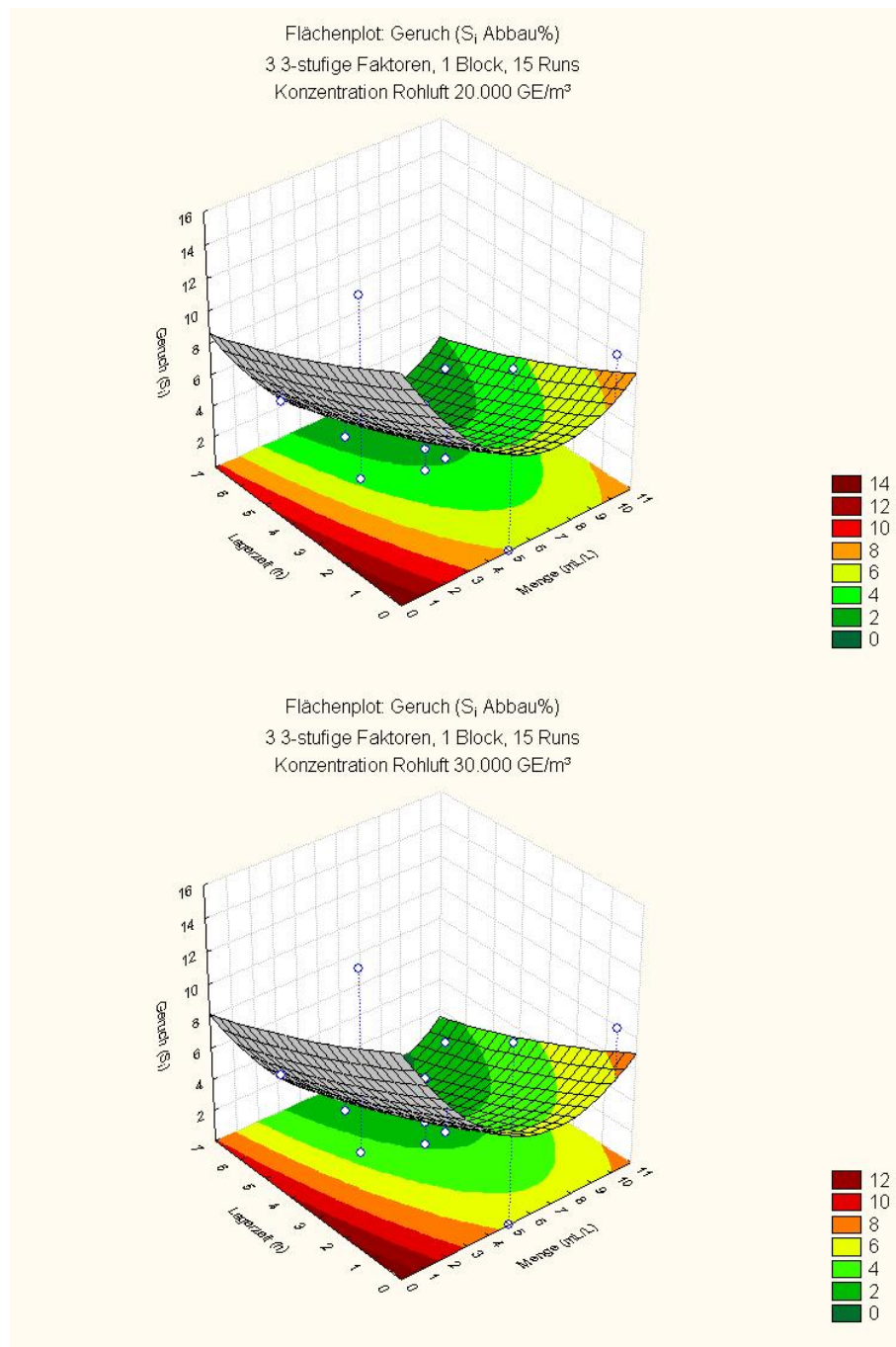
Schlegelmilch, M. (1999): Möglichkeiten zur Regulierung des N-Austrages bei der Kompostierung. Studienarbeit im Studiengang Verfahrenstechnik an der TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Abfallwirtschaft.

Schlegelmilch, M. (2000): Untersuchungen zur Rückhaltung luftgetragener Keime in Biowäschern und Biofiltern. Diplomarbeit im Studiengang Verfahrenstechnik an der TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Biotechnologie II.

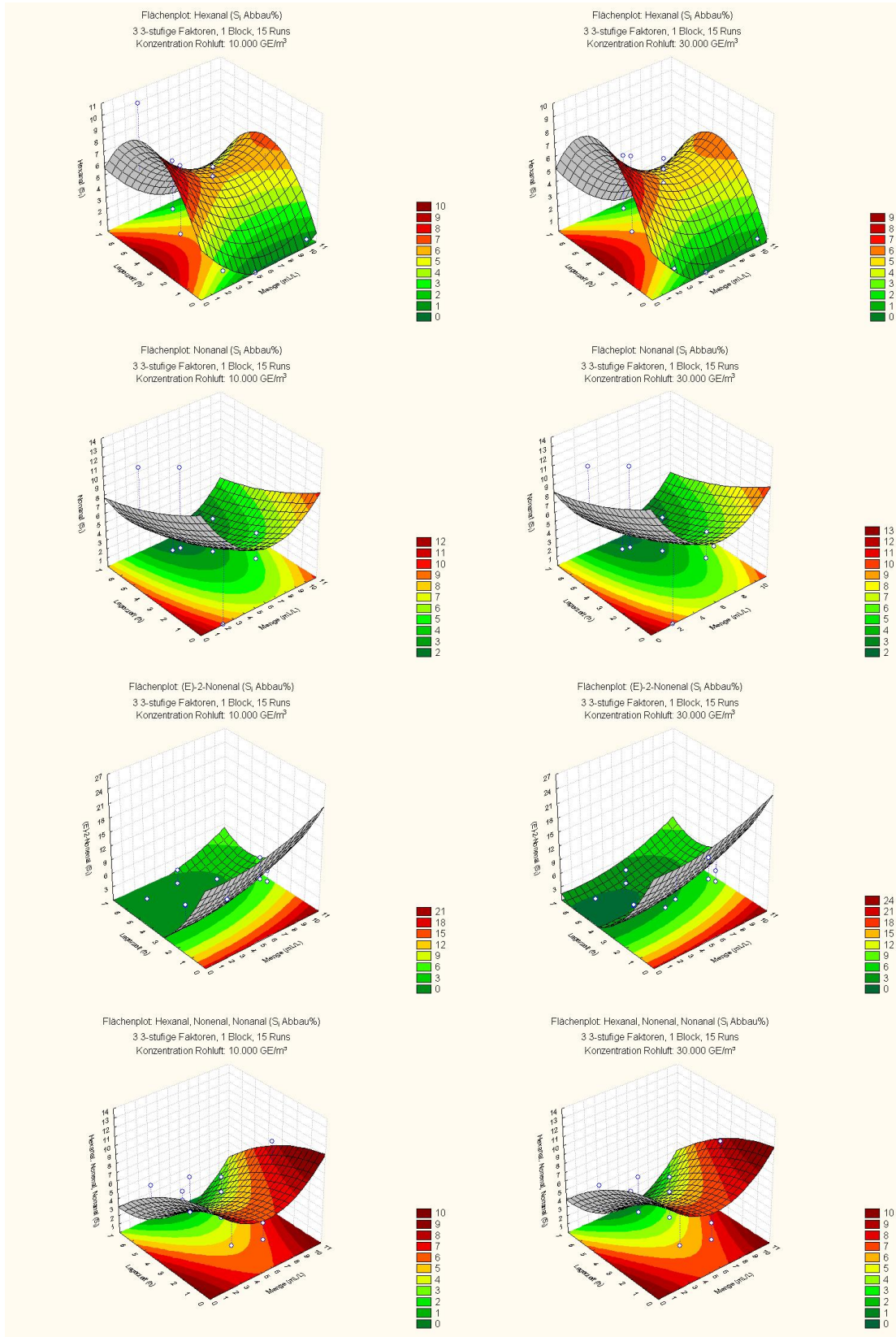


## 18 ANHANG

A 10-1: Flächenplot für die Standardabweichung des prozentualen Geruchsabbaus für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei einer Rohluftkonzentration von 20.000 und 30.000 GE/m<sup>3</sup>



A 10-2: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme der Peakflächen der Hauptgeruchsstoffe für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Öl- und Fettveredelung bei einer Rohluftkonzentration von 10.000 und 30.000 GE/m<sup>3</sup>

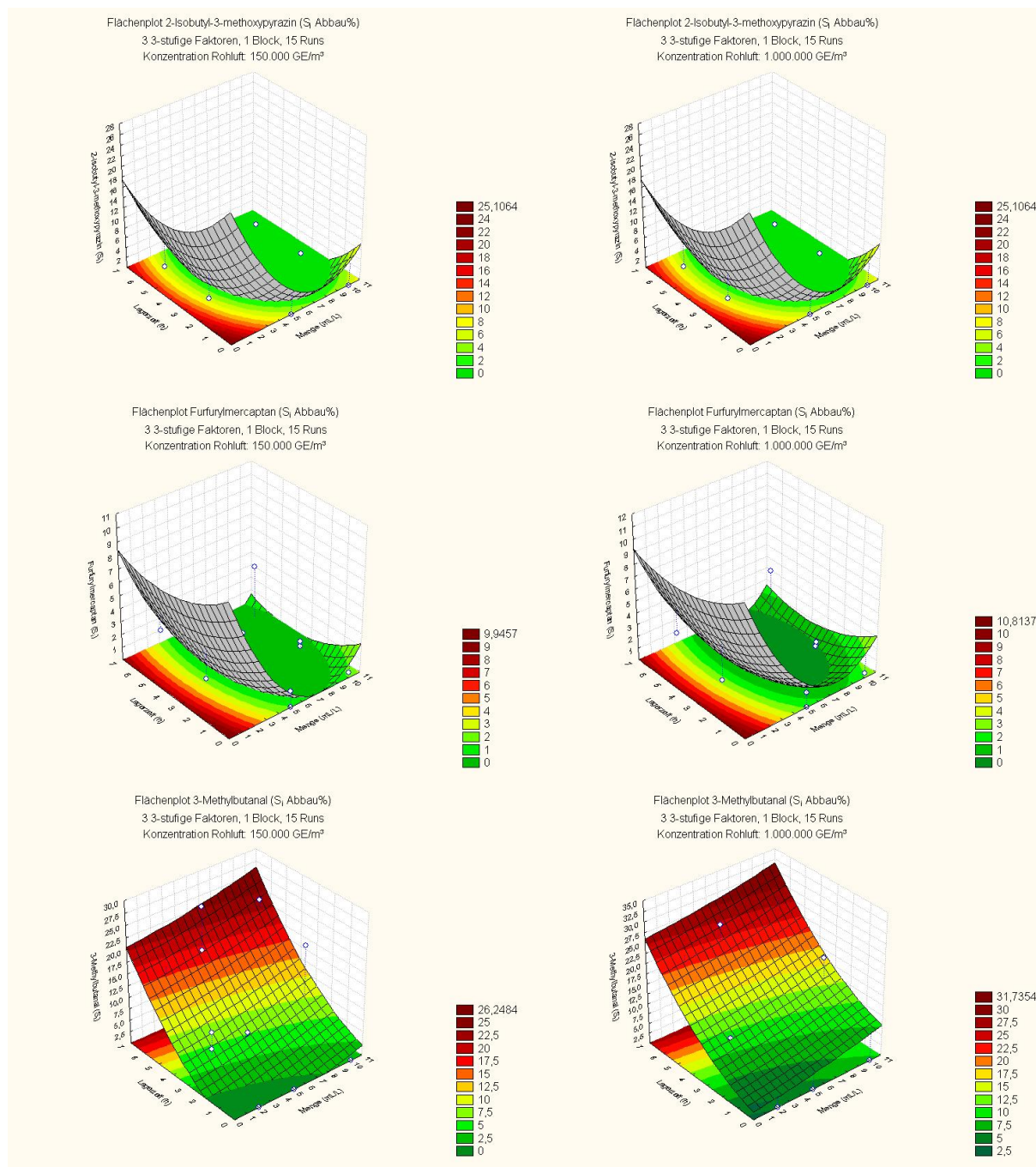


A 10-3: Relative Odour-Indices (OI%) der in der Abluft aus der Kaffeeveredelung nachgewiesenen Substanzen zur Bestimmung der Hauptgeruchsstoffe

	Substanzname	Geruchsschwelle (ng/L)	CC-Rohluft Area	OI	OI%
1.	Schwefeldioxid	2647	112372	42	0%
2.	Acetaldehyd	237	7704318	32543	0%
3.	2-Methyl-1-propen	22380	1870033	84	0%
<b>4.</b>	<b>Methanthiol</b>	<b>2,46</b>	<b>5275424</b>	<b>2144023</b>	<b>3%</b>
5.	Aceton	31750	6857208	216	0%
6.	Furan		15772768		
7.	(Z)-1,3-Pentadien		1364303		
8.	Dimethylsulfid	7,9	1811095	228130	0%
9.	Essigsäuremethylester		3358486		
10.	Dichlormethan	578162	2089725	4	0%
11.	Schwefelkohlenstoff	375	3433119	9160	0%
12.	2-Methylpropanal	127	9343557	73427	0%
13.	2-Methyl-2-propenal		350680		
<b>14.</b>	<b>2,3-Butandion</b>	<b>12,7</b>	<b>8479976</b>	<b>669824</b>	<b>1%</b>
15.	Essigsäure	1384	956535	691	0%
16.	2-Butanon	33925	4565677	135	0%
17.	3-Methylfuran		67514095		
18.	2-Methylfuran		4528210		
19.	(Z)-3-Methyl-1,3-pentadien		1761347		
20.	(E)-3-Methyl-1,3-pentadien		741237		
21.	(E)-2-Butenal	399	557981	1397	0%
<b>22.</b>	<b>3-Methylbutanal</b>	<b>6,3</b>	<b>39567578</b>	<b>6280568</b>	<b>9%</b>
23.	1-Hydroxy-2-propanon		588004		
<b>24.</b>	<b>2-Methylbutanal</b>	<b>15</b>	<b>29957567</b>	<b>1997171</b>	<b>3%</b>
25.	Thiophen	4614	1587610	344	0%
26.	2-Pentanon	19134	604060	32	0%
<b>27.</b>	<b>2,3-Pentandion</b>	<b>35</b>	<b>12293278</b>	<b>352748</b>	<b>1%</b>
28.	2-Ethylfuran		2319493		
29.	2,5-Dimethylfuran		6393951		
30.	2,4-Dimethylfuran		1298722		
31.	3-Methyl-2-cyclopenten-1-on		1355028		
32.	3-Methylpyridazin		5059153		
33.	Pyrazin		282680		
34.	3-Penten-2-on (E)		189173		
35.	Methylpyrrol		2595274		
36.	2-Methyl-2-butenal		497973		
37.	Dimethyldisulfid	36	3161162	87286	0%
38.	1H-Pyrrol		876322		
39.	Toluol	9481	5436765	573	0%
40.	1-Hydroxy-2-butanon		Spur		
41.	2-Methylthiophen		2672445		
42.	3-Methylthiophen		332150		
43.	3-Methylbutansäuremethylester	159	348768	2190	0%
44.	3-Methoxythiophen		802662		
45.	2,4-Dimethyl-3-pentanon		903247		
46.	2-Propylfuran		234417		
<b>47.</b>	<b>Hexanal</b>	<b>51</b>	<b>36131279</b>	<b>708090</b>	<b>1%</b>
48.	Dihydro-2-methyl-3(2H)-furanon		935418		
49.	Ethylpyrrol		438156		
50.	2-Methylpyrazin	2000	1030672	515	0%
51.	Furfural	1587	11290945	7116	0%
52.	3-Methyl-2-butensäuremethylester		142442		
53.	3-Methylbutansäure	8,9	276659	30971	0%
54.	2-(2-Propenyl)-furan		276310		
55.	3-Methylbutansäureethylester	633	508599	804	0%

	Geruchsschwelle	CC-Rohluft		
Substanzname	(ng/L)	Area	OI	OI%
56. Ethylbenzol	4535	777452	171	0%
57. 2-Methylbutansäure	7,9	485979	61516	0%
58. p-Xylol	2318	2337556	1008	0%
59. Styrol	1192	1320296	1108	0%
60. o-Xylol	3783	598704	158	0%
61. 2-Heptanon	1060	1330657	1256	0%
62. Heptanal	46	6864948	149547	0%
63. 2,5-Dimethylpyrazin	946	463738	490	0%
<b>64. Furfurylmercaptan</b>	<b>0,015</b>	<b>327027</b>	<b>21801800</b>	<b>32%</b>
65. 2-Acetylfuran		244609		
66. 2,6-Dimethylpyrazin	1720	482407	280	0%
67. 2-Ethylpyrazin	2000	513906	257	0%
68. 2,3-Dimethylpyrazin	880	137417	156	0%
69. 3-Methyl-2-butensäureethylester		428975		
70. alpha-Pinen	989,9	207555	210	0%
71. 1-Methoxy-2-methylbenzol		351124		
72. 1-Methoxy-4-methylbenzol	48	187249	3909	0%
73. Benzaldehyd	812	327121	403	0%
74. 1-Methoxy-3-methylbenzol		356478		
75. 1-Ethyl-3-methylbenzol		161763		
76. 5-Methylfurfural		630294		
<b>77. Dimethyltrisulfid</b>	<b>5,4</b>	<b>2917941</b>	<b>543716</b>	<b>1%</b>
78. 1,3,5-Trimethylbenzol (Mesitylen)	1626	230648	142	0%
79. beta-Pinen	2000	Spur		
80. 2-Methyl-5-(methylthio)-furan		477223		
81. 1-Ethyl-2-methylbenzol		303406		
82. 1-Octen-3-ol	32	297342	9260	0%
83. 3-Octanon	162	377443	2323	0%
84. 2-Pentylfuran	181	8672093	48018	0%
85. 1,2,4-Trimethylbenzol	619	1383870	2237	0%
86. Benzofuran		241092		
87. 2-Furanmethylacetat		Spur		
88. 2-Ethyl-6-methylpyrazin		197696		
89. 2-Ethyl-5-methylpyrazin		207339		
90. 2-Ethyl-3-methylpyrazin	35	195888	5597	0%
91. delta-3-Caren		319446		
92. 1,2,3-Trimethylbenzol		399361		
93. Cymol	172	574325	3349	0%
94. Limonen	717	1060172	1478	0%
95. 2-Acetyl-5-methylfuran		74809		
96. 2,2'-Bifuran		156465		
<b>97. Phenylacetaldehyd</b>	<b>0,9</b>	<b>490615</b>	<b>545128</b>	<b>1%</b>
98. 3-Ethyl-2,5-dimethylpyrazin	3,2	88469	27475	0%
99. Undecan	12842	517770	40	0%
100. Nonanal	12,1	314795	25920	0%
101. 1,2,3,4-Tetramethylbenzol		234978		
<b>102. (E)-2-Nonenal</b>	<b>1,2</b>	<b>518210</b>	<b>436062</b>	<b>1%</b>
<b>103. 2-Isobutyl-3-methoxypyrazin</b>	<b>0,003</b>	<b>95116</b>	<b>31705333</b>	<b>47%</b>
104. N-Furfurylpyrrol		311599		
105. Naphthalin	261	131370	504	0%
106. Dimethyltetrasulfid		382632		
107. Dodecansäuremethylester	2,0	110922	55600	0%
<b>Summe</b>		<b>358654398</b>	<b>68062536</b>	<b>100%</b>

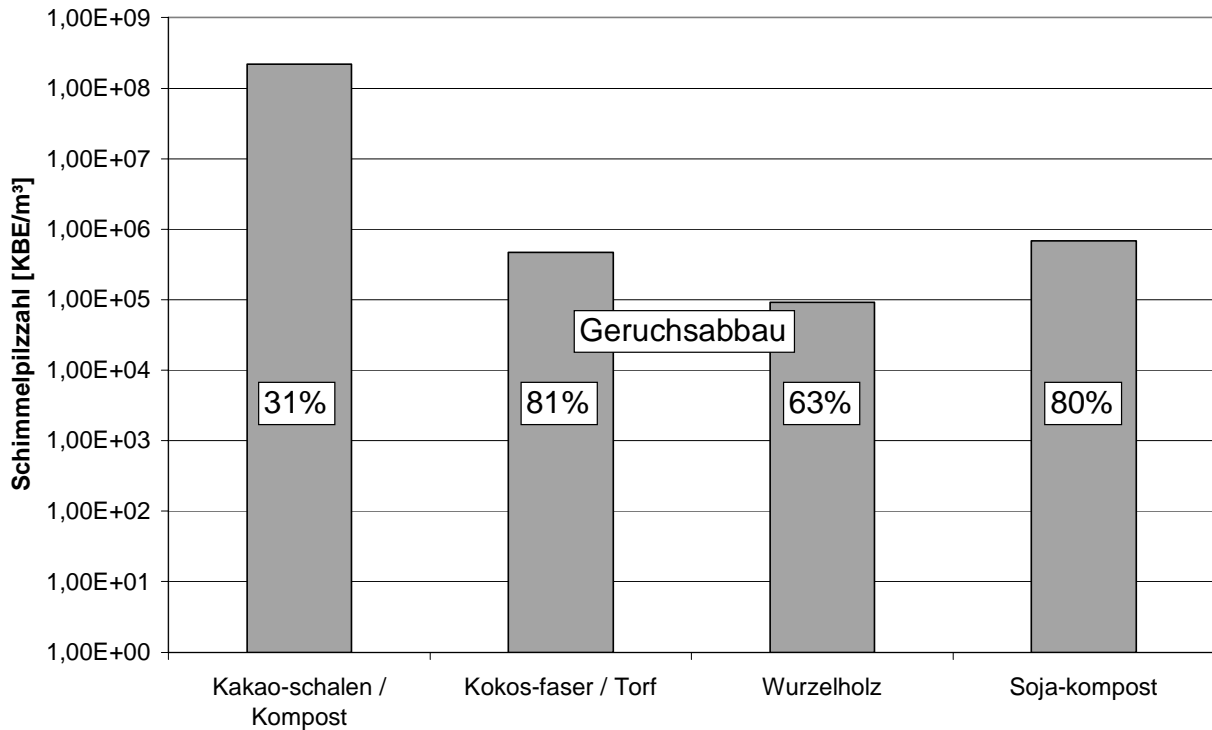
A 10-4: Flächenplots für die Standardabweichung der prozentualen Abnahme des Odour-Betrags der 3 Hauptgeruchsstoffe 2-Isobutyl-3-methoxy-pyrazin, Furfurylmercaptan und 3-Methylbutanal für zwei Biofiltermaterialien im statischen Testsystem mit Abluft aus der Kaffeeveredelung bei einer Rohluftkonzentration von 150.000 und 1.000.000 GE/m<sup>3</sup>



A 12-1: Datenblätter für die Auszählung der Anzahl an mesophilen Bakterien und Schimmelpilzen in unterschiedlichen Biofiltermaterialien

Probe:	Kakaoschalen/Kompost			Kokosfasern/Torf 1			Kokosfasern/Torf 2			Wurzelholz			Sojakompost		
Vorlage Material [g FS]:	20	20	20	20	20	20	20	20	20	30	30	30	20	20	20
Trockenmasse [%]	42,05%	42,05%	42,05%	25,78%	25,78%	25,78%	25,78%	25,78%	25,78%	41,79%	41,79%	41,79%	29,29%	29,29%	29,29%
Vorlage Material [g TS]:	8,41	8,41	8,41	5,16	5,16	5,16	5,16	5,16	5,16	12,54	12,54	12,54	5,86	5,86	5,86
Vorlage Lsg [ml]:	200	200	200	200	200	200	200	200	200	300	300	300	200	200	200
Tropfengröße (Nährboden) [µl]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Bakterien (CASO)</b>	Auswertung: 27.7.			Auswertung: 27.07.			Auswertung: 28.7.			Auswertung: 27.7.			Auswertung: 27.7.		
Verdünnungsstufe:	1,00E-05	1,00E-06	1,00E-07	1,00E-01	1,00E-02	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-03		1,00E-02	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-05	
Keimzahlen:	20	2	0	1	0	0	6	0	0	21	1	0	4	1	0
	15	4	1	4	1	1	10	2	2	15	2	0	1	1	1
	27	1	0	20	4	0	7	1	1	13	4	1	0	2	2
Mittelwert	20,666667	2,33333333	0,33333333	20	3	0,333333	7,666667	1	1	16,33333	2,333333	0,333333	1,666667	1,333333	0,333333
Bakterien / g TS	4,91E+09	5,55E+09	7,93E+09	7,76E+05	1,16E+06	1,29E+06	2,97E+06	3,88E+06	3,88E+06	3,91E+06	5,58E+06	7,98E+06	5,69E+07	4,55E+08	4,55E+08
<b>Mittelwert Bakt/g TS</b>	<b>6,13E+09</b>			<b>1,08E+06</b>			<b>3,43E+06</b>			<b>5,82E+06</b>			<b>2,56E+08</b>		
<b>Schimmelpilze /DG18)</b>	Auswertung: 3.8.			Auswertung: 3.8.			Auswertung: 3.8.			Auswertung: 3.8.			Auswertung: 3.8.		
Verdünnungsstufe:	1,00E-04	1,00E-05		1,00E-01	1,00E-02		1,00E-01	1,00E-02	1,00E-03	1,00E+00	1,00E-01	1,00E-02	1,00E-01	1,00E-02	1,00E-03
Keimzahlen:	15	0	0	5	0	0	9	3	0	10	8	0	13	2	1
	13	1	1	3	0	0	6	0	1	9	5	0	9	3	0
	7	1	1	3	2	2	6	2	0	19	8	1	7	0	0
Mittelwert	11,666667	0,6666667	0,6666667	3,666667	0,666667	0,666667	7	1,6666667	0,3333333	12,66667	7	0,333333	9,666667	1,666667	0,333333
Schimmelpilze / g TS	2,77E+08	1,59E+08	1,59E+08	1,42E+05	2,59E+05	2,59E+05	2,72E+05	6,46E+05	1,29E+06	3,03E+04	1,68E+05	7,98E+04	3,30E+05	5,69E+05	1,14E+06
<b>Mittelwert Pilze/g TS</b>	<b>2,18E+08</b>			<b>2,00E+05</b>			<b>7,37E+05</b>			<b>9,25E+04</b>			<b>6,79E+05</b>		


A 12-2: Anzahl an mesophilen Schimmelpilzen je g Trockenmasse in unterschiedlichen Biofiltermaterialien und der gemessene Geruchsabbau der entsprechenden Materialien bei der Behandlung von Abluft aus der Kakaomasseherstellung.



# A 13-1a: Geruchskatasterbögen der Emissionsquellen auf dem Gelände des betrachteten Öl und Fett verarbeitenden Betriebes

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg

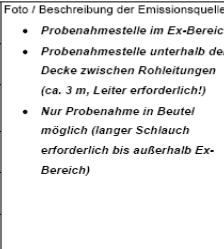
**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
6		Öl- und Fettveredelung
Datum: 4.8.04	Uhrzeit: 10:15	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle 1	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle 4. Obergeschoss	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Probenahmestelle im Ex-Bereich</li> <li>• Probenahmestelle unterhalb der Decke zwischen Rohrleitungen (ca. 3 m, Leiter erforderlich!)</li> <li>• Nur Probenahme in Beutel möglich (langer Schlauch erforderlich bis außerhalb Ex-Bereich)</li> </ul>
Herkunft der Abluft (Prozess) Wasserringpumpe, Vakuumanlage Härtung	
Vorbehandlung der Abluft? <input type="checkbox"/> nein <input checked="" type="checkbox"/> nicht bekannt	
Maße / Querschnittsfläche Ø mm	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	ḡ [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
	2-100*		
Geruch [GE/m³]	Geruchsfracht [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
9.374	18.748 - 937.400	13	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges Geruchseindruck: Fahrradschlauch, Luftballon, Lakritz, Anis Achtung: H <sub>2</sub> in der Abluft möglich!			
*max. Volumenstrom 100 m³/h 1750 Std. pro Jahr min. Volumenstrom 2 m³/h 8000 Std. pro Jahr			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
1		Öl- und Fettveredelung
Datum: 3.8.2004	Uhrzeit: 9:25	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle G3	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle Dach	
Herkunft der Abluft (Prozess) Vakuumanlage Bleiche	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt	
Maße / Querschnittsfläche Ø75 mm / 4,418*10 <sup>-3</sup> m²	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	ḡ [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
0,5 m/s	8 m³/h	29,5 °C	
Geruch [GE/m³]	Geruchsfracht [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
1.163.190 GE/m³	9.305.520 GE/h	181.865 mg C/m³	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
		Öl- und Fettveredelung
Datum: 3.8.2004	Uhrzeit: 9:30	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle C4	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle Dach	
Herkunft der Abluft (Prozess)	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt	
Maße / Querschnittsfläche Ø70 mm / 3,848*10 <sup>-3</sup> m²	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	ḡ [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
0,9 m/s	12,5 m³/h	31,5 °C	
Geruch [GE/m³]	Geruchsfracht [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
502.580 GE/m³	6.282.250 GE/h	87.797 mg C/m³	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
3		Öl- und Fettveredelung
Datum: 3.8.2004	Uhrzeit: 9:40	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**

Bezeichnung der Messstelle C5	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle Dach	
Herkunft der Abluft (Prozess)	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt	
Maße / Querschnittsfläche Ø70 mm / 3,848*10 <sup>-3</sup> m²	


**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	ḡ [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
0,25 m/s	3,5 m³/h	33,5 °C	
Geruch [GE/m³]	Geruchsfracht [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
75.620 GE/m³	264.670 GE/h	8.336 mg C/m³	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

A 13-1b: Geruchskatasterbögen der Emissionsquellen auf dem Gelände des betrachteten Öl und Fett verarbeitenden Betriebes

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr. <b>4</b>	Betrieb	Art des Betriebes <i>Öl- und Fettveredelung</i>
Datum: <b>3.8.2004</b>	Uhrzeit: <b>9:45</b>	Durchführung: <b>MS</b>

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle <b>C6</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle 
Lage der Messstelle <b>Dach</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess)	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø70 mm / 3,848*10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup></b>	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s] <b>0,5 m/s</b>	V' [m³/h] <b>7 m³/h</b>	θ [°C] <b>30 °C</b>	rF [%]
Geruch [GE/m³] <b>1.027.890 GE/m³</b>	Geruchsfracht [GE/h] <b>7.195.230 GE/h</b>	TOC [mg C/m³] <b>37.788 mg C/m³</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
Chemische Zusammensetzung der Abluft			<input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Temp. fraglich, eher heißerer Dampf</b>			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr. <b>5</b>	Betrieb	Art des Betriebes <i>Öl- und Fettveredelung</i>
Datum: <b>3.8.2004</b>	Uhrzeit: <b>9:55</b>	Durchführung: <b>MS</b>

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle <b>C7</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle 
Lage der Messstelle <b>Dach</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess)	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø70 mm / 3,848*10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup></b>	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s] <b>0,8 m/s</b>	V' [m³/h] <b>11 m³/h</b>	θ [°C] <b>33,8 °C</b>	rF [%]
Geruch [GE/m³] <b>309.533 GE/m³</b>	Geruchsfracht [GE/h] <b>3.404.863 GE/h</b>	TOC [mg C/m³] <b>31.517 mg C/m³</b>	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
Chemische Zusammensetzung der Abluft			<input checked="" type="checkbox"/> s. Anhang
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg

**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr. <b>1</b>	Betrieb	Art des Betriebes <i>Öl- und Fettveredelung</i>
Datum: <b>4.8.04</b>	Uhrzeit: <b>9:35</b>	Durchführung: <b>MS</b>

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle <b>8</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle 
Lage der Messstelle <b>Dach</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Wasserringpumpe, Vakuumanlage Bleichung Umesterung (Bl. 11 + 12)</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input type="checkbox"/> nein <input checked="" type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø 70 mm</b>	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s] <b>0,24</b>	V' [m³/h] <b>3,3</b>	θ [°C] <b>32,5</b>	rF [%] <b>38,3</b>
Geruch [GE/m³] <b>161</b>	Geruchsfracht [GE/h] <b>535</b>	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
Chemische Zusammensetzung der Abluft			<input type="checkbox"/> s. Anhang
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Geruchseindrücke: Radiergummi, staubig, Schlauchboot</b>			

**TUHH Geruchskataster**  
Technische Universität Hamburg-Flensburg


**Geruchskataster**  
Erfassungsbogen



abfallwirtschaft

Bogen Nr. <b>2</b>	Betrieb	Art des Betriebes <i>Öl- und Fettveredelung</i>
Datum: <b>4.8.04</b>	Uhrzeit: <b>9:40</b>	Durchführung: <b>MS</b>

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**

Bezeichnung der Messstelle <b>9</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle 
Lage der Messstelle <b>Dach</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Wasserringpumpe, Vakuumanlage Deso Krupp 1</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø 55 mm</b>	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s] <b>1,2</b>	V' [m³/h] <b>10,3</b>	θ [°C] <b>34,6</b>	rF [%] <b>47,2</b>
Geruch [GE/m³] <b>374.960</b>	Geruchsfracht [GE/h] <b>3.848.433</b>	TOC [mg C/m³] <b>19.148</b>	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
Chemische Zusammensetzung der Abluft			<input type="checkbox"/> s. Anhang
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Geruchseindrücke: Reinigungsmittel, fruchtig, Bohnerwachs, (Cargill)</b>			

A 13-1c: Geruchskatasterbögen der Emissionsquellen auf dem Gelände des betrachteten Öl und Fett verarbeitenden Betriebes

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
3		Öl- und Fettveredelung
Datum: 4.8.04	Uhrzeit: 9:45	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle <b>10</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle <b>Dach</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Wasserringpumpe, Vakuumanlage Deso Krupp 0</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
<input type="checkbox"/> Kamin / Schornstein <input checked="" type="checkbox"/> Stutzen <input type="checkbox"/> Abluftrohr	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø 70 mm</b>	

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	V' [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
0,23	3,2	36,5	58,5
Geruch [GE/m³]	Geruchslast [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
482.195	1.536.523	44.901	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges			

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
4		Öl- und Fettveredelung
Datum: 4.8.04	Uhrzeit: 10:00	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**


Bezeichnung der Messstelle <b>11</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle <b>4. Obergeschoss (unterm Dach)</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Be- / Entlüftung, alle Behälter Seifenspaltung</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
<input type="checkbox"/> Kamin / Schornstein <input checked="" type="checkbox"/> Stutzen <input checked="" type="checkbox"/> Abluftrohr	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø 500 mm</b>	<b>Probenahmestelle am Abluftrohr Abluft entweicht konvektiv über das Dach</b>

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	V' [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
4	2827		
Geruch [GE/m³]	Geruchslast [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
50.396	142.469.492	194	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Geruchseindruck: (Cargill)</b>			

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
5		Öl- und Fettveredelung
Datum: 4.8.04	Uhrzeit: 10:05	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**

Bezeichnung der Messstelle <b>12</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle <b>4. Obergeschoss</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Ventilator Auslass, Abluft aus Filter / Bleicher über Wäscher</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input checked="" type="checkbox"/> ja, <b>alkalischer Wäscher</b>	
<input type="checkbox"/> Kamin / Schornstein <input type="checkbox"/> Stutzen <input checked="" type="checkbox"/> Abluftrohr	
Maße / Querschnittsfläche <b>Ø 150 mm</b>	<b>Probenahmestelle am Abluftrohr Unterdruck</b>

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	V' [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
	4.500		
Geruch [GE/m³]	Geruchslast [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
48.082	216.369.000	242	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Geruchseindruck: Spargelschalen, Kartoffelschalen, Grillanzünder</b>			

Bogen Nr.	Betrieb	Art des Betriebes
7		Öl- und Fettveredelung
Datum: 4.8.04	Uhrzeit: 10:30	Durchführung: MS

**I. Beschreibung der Messstelle/Emissionsquelle**

Bezeichnung der Messstelle <b>A</b>	Foto / Beschreibung der Emissionsquelle
Lage der Messstelle <b>Erdgeschoss</b>	
Herkunft der Abluft (Prozess) <b>Fußtank für Kreislaufwasser Vakuumpumpen</b>	
Vorbehandlung der Abluft? <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht bekannt <input type="checkbox"/> ja	
<input type="checkbox"/> Kamin / Schornstein <input type="checkbox"/> Stutzen <input checked="" type="checkbox"/> offener Behälter	
Maße / Querschnittsfläche <b>2,3 x 3,0 m</b>	<b>offener Tank im Gebäude mit off offenen Türen und Fenstern</b>

**II. Charakterisierung der Abluft**

v [m/s]	V' [m³/h]	θ [°C]	rF [%]
		27,2	49,7
Geruch [GE/m³]	Geruchslast [GE/h]	TOC [mg C/m³]	<input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Rauch <input type="checkbox"/> Staub
154.671	2.631	2.631	
Chemische Zusammensetzung der Abluft <input type="checkbox"/> s. Anhang			
Beschreibung der Geruchsqualität / Sonstiges <b>Geruchseindruck: Reinigungsmittel Probenahme oberhalb Flüssigkeitsspiegel (s. Foto)</b>			

A 13-2: Geruchskonzentrationen und Geruchsminderungsgrade (Abluft: Öl- und Fettveredelung, Versuchsanlage: dynamisches Testsystem)

Datum	Versuchstag	Probanden	Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]				Belastung [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> h]		Geruchsminderungsgrad [%]			
			Rohluft	Wäscher (H <sub>2</sub> O)	Sojakompost	Aktivkohle	Sojakompost	Aktivkohle	Wäscher (H <sub>2</sub> O)	Sojakompost	Wäscher + Sojakompost	Aktivkohle
16.10.2006												
18.10.2006	2	Gruppe 1	6137	7512			180	350				
18.10.2006	2	Gruppe 2			12634	23	180	350	-22,41%			
18.10.2006	2	Gruppe 3	25512	20882			180	350	18,15%			
<b>18.10.2006</b>	<b>2</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>15825</b>	<b>14197</b>	<b>12634</b>	<b>23</b>	<b>180</b>	<b>350</b>	<b>10,28%</b>		<b>20,16%</b>	<b>99,85%</b>
20.10.2006	4	Gruppe 1		4664	2080		180	350		55,40%		
20.10.2006	4	Gruppe 2	5997		2099		180	350			65,00%	
20.10.2006	4	Gruppe 3	8679			26	180	350				99,70%
20.10.2006	4	Gruppe 4	5467				180	350				
<b>20.10.2006</b>	<b>4</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>6714</b>	<b>4664</b>	<b>2090</b>	<b>26</b>	<b>180</b>	<b>350</b>	<b>30,54%</b>		<b>68,88%</b>	<b>99,61%</b>

A 13-3: Geruchskonzentrationen [GE/m<sup>3</sup>] (Abluft: Öl- und Fettveredelung, Versuchsanlage: Technikumsanlage, Versuchsreihe 1)

Datum	Versuchstag	Rohluft	hinter Biowäscher	hinter Biofilter	hinter A-Kohle
27.02.2002					
28.02.2002	1	15918	1491	287	
06.03.2002	7	11585	1448	1024	
13.03.2002	14	23849	5962	6502	
21.03.2002	22	56720	11255	2170	
25.03.2002	26	17867			
28.03.2002	29	34716	5628	4871	
05.04.2002	37	20643	13004	5793	
18.04.2002	50	26008	9465	6889	
25.04.2002	57	15024	6889	1579	
29.04.2002	61	24548	11585	5161	
16.05.2002	78	30929	3756	2814	
29.05.2002	91	31835	5628	995	
05.06.2002	98	32768	10027	3866	
23.07.2002	146	23849	6317	1579	
19.08.2002	173	21870	3866	861	
20.08.2002	174	23621	5468	1218	
21.08.2002	175	22728	5014	1448	
22.08.2002	176	30929	5468	1594	
23.08.2002	177	13777			
26.08.2002	180	21247	3688	736	
27.08.2002	181	26770	5468	813	
29.08.2002	183	17358	5468	724	1
26.09.2002	211	14673	2299	497	1
24.10.2002	239	20249	2630	609	45
26.11.2002	272	14596	759	49	
09.12.2002	285	29193	1673	249	
20.01.2003	327	14596	3649	645	60
30.01.2003	337	22381	2656	395	72
11.02.2003	349	20643	4598	977	72

A 13-4: Geruchskonzentrationen [GE/m<sup>3</sup>] (Abluft: Öl- und Fettveredelung, Versuchsanlage: Technikumsanlage, Versuchsreihe 2)

Datum	Versuchstag	Rohluft	hinter Biowäscher	hinter Biofilter	hinter A-Kohle
23.01.2006					
24.01.2006	1	17867	4871	558	-
26.01.2006	3	21870	13257	1172	10
06.02.2006	14	25512	6502	1367	10
13.02.2006	21	30048	7512	3068	51
20.02.2006	28	18390	3756	1825	117
08.03.2006	44	15918	7090	323	140
15.03.2006	51	11364	6378	378	73
10.08.2006	199	31835	20055	5628	356
24.08.2006	213	32768	6468	609	362
20.09.2006	240	32768	9465	373	192
10.10.2006	260	16384	12274	136	60
17.10.2006	267	26008	9211	83	81
19.10.2006	269	18390	6596	500	126
20.10.2006	270	6714		418	
04.12.2006	315	35734	15918	279	192
07.05.2007	469	8679		34	209

A 13-5: Peakflächen der mit der SPME-GC/MS-Methode bestimmten Hauptgeruchsstoffe (Abluft: Öl- und Fettveredelung, Versuchsanlage: Technikumsanlage, Versuchsreihe 2)

Messdatum	File	Probe	Gesamtfläche	Hexanal 6,71	Ethylbenzol 9,26	Heptanal 11,01	2-Pentylfuran 14,51	Octanal 14,94
26.01.2006	2060	Rohluft	1.324.637.446	82.650.761	6.780.011	14.564.910	40.526.887	8.717.806
	2061	nach Biowäscher	1.307.701.257	112.186.063	6.906.613	15.422.812	46.007.923	7.397.545
	2062	nach Biofilter	1.315.804.582	n.n.	10.060.543	n.n.	52.626.072	n.n.
	2063	nach Aktivkohlestufe 1	124.654.078	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
	2064	nach Aktivkohlestufe 2	1.446.262.005	n.n.	10.198.926	n.n.	42.876.453	n.n.
13.02.2006	2154	Rohluft	1.082.131.772	75.272.073	8.005.183	12.432.048	37.276.382	3.300.708
	2155	nach Biowäscher	1.035.682.631	31.007.993	9.249.235	6.395.420	49.913.277	1.423.971
	2156	nach Biofilter	596.710.331	n.n.	722.998	n.n.	40.119.710	n.n.
	2157	nach Aktivkohlestufe 1	271.787.403	307.733	n.n.	n.n.	168.887	n.n.
	2158	nach Aktivkohlestufe 2	746.764.985	n.n.	3.109.174	n.n.	57.112.388	n.n.
20.02.2006	2207	Rohluft	1.082.492.391	63.652.636	7.053.600	11.904.766	42.508.158	4.032.317
	2208	nach Biowäscher	1.012.114.097	24.956.316	7.970.673	6.087.170	51.313.254	2.373.105
	2209	nach Biofilter	528.753.737	n.n.	1.073.247	n.n.	16.319.339	n.n.
	2210	nach Aktivkohlestufe 1	440.053.982	n.n.	893.126	n.n.	325.176	n.n.
	2211	nach Aktivkohlestufe 2	602.308.027	n.n.	1.852.232	n.n.	26.508.554	n.n.