

Hesse Stanzwerkzeuge GmbH
Neue Wiese 18
D-31061 Alfeld

"Biologische Abluftreinigung bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformherstellung" - BALaSSt



Abschlussbericht



Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
unter dem Az: 14752, Laufzeit 10/99 - 10/01

von Dr.-Ing. D. Hesse und Dipl.-Chem. S. Barcikowski


in Zusammenarbeit mit:

Laser Zentrum Hannover e.V.
Abt. Werkstoff- und Prozesstechnik
Leitung: Dr.-Ing. Dipl.-Chem. M. Goede
Bearbeitung: Dipl.-Chem. S. Barcikowski;
Dipl.-Ing. R. Sattari
Hollerithallee 8
D-30419 Hannover

sowie:

M+W Zander Facility Management GmbH
Dipl.-Ing. M. Flauger
Rollnerstr. 111
90408 Nürnberg

Januar 2002

11/95		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	14752	Referat	21/0	Fördersumme	335.000,00
Antragstitel		Biologische Abluftreinigung bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformherstellung			
Stichworte		Verfahren; Abluft; Laser; Holz			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
25 Monate	10/1999	10/2001	keine		
Zwischenberichte:					
Bewilligungsempfänger		Hesse Stanzwerkzeuge GmbH Neue Wiese 18 31061 Alfeld		Tel	05181/8019-0
				Fax	05181/8019-26
				Projektleitung Dr.-Ing. Hesse	
				Bearbeiter Herr Niemeyer	
Kooperationspartner		M+W Zander Facility Management GmbH Rollnerstr. 111, 90408 Nürnberg			
		Laser Zentrum Hannover e.V. Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik Hollerithallee 8, 30419 Hannover			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
Bei der lasergestützten Schichtholzbearbeitung zur Stanzformherstellung entstehen geruchsrelevante Schadstoffemissionen , die an der Bearbeitungsstelle erfasst und einem Abluftreinigungssystem zugeführt werden müssen. Ziel des Vorhabens ist die Qualifizierung einer Biotropfkörper-Filteranlage zur Schadstoff- und Geruchsminderung und Erarbeitung von Skalierungskenngrößen . Die Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Betriebe der Stanzformen herstellenden Branche steht im Vordergrund des Interesses. Optimale Betriebsparameter und Skalierungsgrößen des Verfahrens zur Geruchsminderung sollen im Langzeitversuch auch die Verträglichkeit des Filtrationsverfahrens mit Feinstaub dokumentieren. Ferner sind nachhaltige Maßnahmen zur Erhöhung der Gewerbehygiene und Abscheideleistung durch optimierte Erfassungseinrichtungen und mikrobiologische Ansätze notwendig.					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
Die Arbeiten gliedern sich in die Erfassungsgraderhöhung und Minimierung der Absaugleistung, Optimierung der Verfahrens- und Anlagentechnik, Charakterisierung der Filtrationseffizienz sowie umweltbiotechnologische Maßnahmen.					
Für die Untersuchungen steht eine Biotropfkörper-Pilotanlage zur Verfügung. Die Abluftreinigungsanlage besteht aus einem zweistufigen Biotropfkörper mit einem Nettofiltervolumen von 7,28 m ³ . Bei einem mittleren Volumenstrom von 2.600 m ³ /h und Verweilzeiten von 9 - 12 s sind maximale spezifische Filterbelastungen von 72 g/m ³ h bzw. 245 g/m ² h realisiert.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190					

Ergebnisse und Diskussion

Durch konstruktive und lufttechnische Maßnahmen wird der **Erfassungsgrad** am Entstehungsort der Emissionen erhöht. Es werden sowohl an der Bearbeitungsstelle als auch an der Ablufführung Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Durch die realisierte Obertischabsaugung (**Saugdüse**) werden im Mittel 73 Massenprozent der gasförmigen Schadstoffe erfasst. Die Erhöhung des Erfassungsgrades an der Laseranlage beträgt 107 %, so dass die gewerbehygienischen Bedingungen ohne zusätzlichen Lüftungstechnischen Aufwand wesentlich verbessert werden können. Ferner werden die Absaugstränge der 3 Laseranlagen zu bedarfsgeregelten Gruppen zusammengefasst und als Zentralabsaugung realisiert. Dies führt zur Optimierung der Schadstoffeffassung, Minderung des Lärmpegels in der Werkshalle, Minderung der Geruchsimmission und der notwendigen Gesamtlüfterleistung. Die realisierte Erfassungseinrichtung und Lüftungstechnik demonstriert ein ganzheitliches und modellhaftes Abluffertfassungssystem für die lasergestützte Stanzformenherstellung. Im Rahmen des Projektes werden optimale **Verfahrensparameter** des BTK ermittelt. So werden hohe Abbaugrade mit einer Berieselungsdichte von 0,42 m/h erzielt. Der ideale Arbeitsbereich der Nährstoffzufuhr zur Versorgung der immobilisierten Mikroorganismen beträgt 1,5 - 2,5 l/d und das maximale Wasserrückhaltevermögen entspricht 3-4 Produktionsschichten (30-45 h), wobei ein Frischwasserzufuhrzyklus von 5-8 h empfehlenswert ist. Des weiteren wird eine gute Abbaubarkeit des verfahrensbedingten Abwassers (1,55 m³/d) belegt, dessen Direkteinleitung möglich ist. Das Strömungsverhalten der Abluft in der Filterpackung zeigt sowohl dispersive als auch konvektive Eigenschaften; in den Eckbereichen des Tropfkörpers sind Totzonen vorhanden. Die Strömungscharakterisierung belegt, dass die effizienzfördernde Rückvermischung und Verweilzeitsteigerung mit einem geringen Druckverlust für diese Aufgabenstellung ideal kombiniert ist.

Die Zusammensetzung der Abluft kann in die drei Gruppen Kohlenmonoxid, VOC und Partikel eingeteilt werden. In der Gruppe der VOC werden im wesentlichen die **Leitkomponenten** durch den BTK abgeschieden, was die hohe **Selektivität** des Filtersystems belegt. Durch die im Mittel relativ geringen VOC-Konzentrationen (51 mgC/m³) ist von einer Diffusionslimitierung des Systems auszugehen. Die erzielten Ergebnisse unterstreichen die positive Wirkung der realisierten effizienten Emissionserfassung auf die Schadstoffminderung. **Geruchsrelevanten** Komponenten wie **Formaldehyd**, Acrolein, Acetaldehyd und Hexanal werden mit signifikant hohen **Abbauraten von 65-99%** gemindert. **Aromatische Kohlenwasserstoffe** werden ebenso wie **Aldehyde und Ketone** durch das biologische Abluftreinigungsverfahren selektiv umgesetzt. Aerosole werden effektiver als theoretisch erwartet abgeschieden (36%). Die Aerosolkonzentration im Reingas bewegt sich in der Größenordnung des Grenzwertes. Der BTK gewährleistet die sichere Einhaltung relevanter Grenzwerte und Unterschreitung der Grenzmassenströme der TA-Luft. Die **Geruchsminderung** durch den Biotropfkörper als zentrale Aufgabe des Filtrationssystems beträgt 42%, wobei sich die Intensität und **Hedonik / Qualität des Geruches** im Reingas wesentlich verbessert. Durch die Langzeitüberwachung der Schadstoffmassenströme und Schadstoffnebenströme kann die **Zuverlässigkeit** der Abluftreinigungsanlage dokumentiert werden. Die dauerhafte Einleitung von **Holzaerosolen** zeigt keinen nennenswerten Anstieg des Druckverlustes, wengleich der biologische Abbau von Aerosolemissionen im Labormaßstab nicht nachgewiesen werden kann. Aerosole im Substrat zeigen im Labor eine hemmende Wirkung, selbst in hoher Konzentration wirken diese jedoch nicht toxisch auf die eingesetzten Mikroorganismen. Isolierte und taxonomisch identifizierte Reinkulturen aus dem **Biofilm** des Biotropfkörpers werden in einer **Organismensammlung** im Sinne der **Nachhaltigkeit** der erzielten Projektergebnisse hinterlegt. Die **Kosten** für den Betrieb der optimierten Biotropfkörper-Anlage werden im wesentlichen durch die Nährlösung und die Frischwasserzufuhr determiniert. Sie betragen 0,49 € pro Laserbetriebsstunde.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Ein **Wissens- und Technologietransfer** in andere Branchen wie Elektronikindustrie, Kunststoffverarbeitung und Holzverarbeitung ist im Rahmen von durchgeführten **Präsentationen** und bestehenden Kooperationen realisiert.

Nach Projektende erfolgt eine **Abschlusspräsentation** für die Stanzformen herstellende Branche.

Fazit

Die realisierte Erfassungseinrichtung und Lüftungstechnik demonstriert ein **modellhaftes Abluffertfassungssystem** für die lasergestützte **Stanzformenherstellung**.

Im Vergleich mit alternativen Abluftreinigungsverfahren für die Problemstellung ist das charakterisierte Biotropfkörper-Verfahren als die **ökonomisch, technologisch und ökologisch überlegene Verfahrensvariante** einzustufen.

1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis	6
2 Verzeichnis von Bildern und Tabellen	8
2.1 Abbildungsverzeichnis	8
2.2 Tabellenverzeichnis	12
3 Verzeichnis von Formelzeichen und Definitionen	13
4 Zusammenfassung	16
5 Einleitung	20
6 Wissenschaftlicher Hauptteil	25
6.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der angewandten Methoden und Diskussion der tatsächlich erzielten Ergebnisse	25
6.1.1 Versuchsanordnung	25
6.1.2 Erfassungsgraderhöhung und Minimierung der Absaugleistung	27
6.1.2.1 Erfassungsgraderhöhung an der Laseranlage	28
6.1.2.2 Optimierung der Lüftungstechnik	34
6.1.3 Verfahrens- und Anlagentechnik	37
6.1.3.1 Grobabscheider	37
6.1.3.2 Biotropfkörper-Verfahren	38
6.1.3.3 Wasserförderung	39
6.1.3.4 Abwasseruntersuchungen	44
6.1.3.5 Ermittlung von Skalierungskenngrößen durch Charakterisierung des Strömungsverhaltens	48
6.1.4 Effizienz der Biotropfkörperanlage	52
6.1.4.1 Messtechnik und Messgrößen	53
6.1.4.2 Abscheidung von Kohlenmonoxid und Permanentgasen	54
6.1.4.3 Beurteilung der Effizienzüberwachung durch Detektion von Kohlendioxid	55
6.1.4.4 Abbauleistung von Gesamtkohlenwasserstoffen	56
6.1.4.5 Filtrationseffizienz von Leitkomponenten	59
6.1.4.6 Geruchsminderung	67
6.1.4.7 Vorabscheidung von Grobstaub	70
6.1.4.8 Abscheidung von Aerosolen / Feinstaub	71
6.1.4.9 Druckabfall und Standzeit der Anlage	76
6.1.4.10 Zusammenfassung der Abscheidecharakteristik durch das Filtersystem	78

6.1.5 Umweltbiotechnologische Maßnahmen und Charakterisierungen	81
6.1.5.1 Anreicherung spezifischer Mikroorganismen	81
6.1.5.2 Impfen des Filtermaterials, taxonomische Beschreibung und Hinterlegung der Mikroorganismen	85
6.1.5.3 Verträglichkeit mit Holzfeinstaub aus dem Laserstrahl-schneidprozess	91
6.1.5.4 Verträglichkeit mit Metallfeinstaub aus dem Laserstrahl-schneidprozess	94
6.2 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	98
6.3 Nachhaltigkeit der erzielten Ergebnisse und Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	104
7 Fazit	106
8 Literaturverzeichnis	108
9 Anhang	113
9.1 Messgerätetechnik	113
9.1.1 Gesamtkohlenwasserstoffe: Flammenionisationsdetektor	113
9.1.2 Olfaktometrie / Unterdruckprobennehmer	114
9.1.3 Multigassensorgerät (Polytektor G750)	115
9.1.4 Planfilterkopfgerät zur Bestimmung der Gesamtpartikel	116
9.1.5 Kaskadenimpaktor zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung	117
9.1.6 Respirometrie: OxiTopControl	118
9.1.7 Charakterisierung des wässrigen Milieus: Multiline P4	120
9.1.8 Gaschromatographie / Massenspektrometrie (GC/MS)	121
9.1.9 Identifizierung der hinterlegten Mikroorganismen	127
9.1.10 Angebot CO ₂ -Sensor	129
9.2 Eingesetzte Medien für die Mikrobiologie	137
9.3 Darstellung einer Messkampagne	139
9.4 Betriebsanweisung und Pflichtenheft für die Tropfkörperanlage	144

2 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

2.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Fließschema der Arbeitsschritte	23
Abbildung 2:	Isometrische Darstellung der Abluftrohrführung	25
Abbildung 3:	Photo und Prinzipskizze des Biotropfkörpers der M+W Zander Facility Management GmbH, Nürnberg.	26
Abbildung 4:	Emissionserfassungsmöglichkeiten an Laseranlagen [21]	27
Abbildung 5:	Verbesserung der Erfassung von Gefahrstoffen am Laser-Arbeitsplatz bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung	28
Abbildung 6:	Photos der Erfassungsdruckluft gestützten Absaugdüsen. Links: Vierpunktabsaugung; Rechts: Zweipunktabsaugung	29
Abbildung 7:	Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlschneiden. Links: Einstechvorgang ohne Obertischabsaugung. Rechts: Laserstrahlschneiden von Schichtholz mit optimierter Saugdüse	30
Abbildung 8:	Ermittlung des optimalen Abstandes zwischen Düse und Werkstück durch Charakterisierung der Ansauggeschwindigkeit und des Erfassungsvolumenstrom des Saugadapters. Oben: mit Druckluft. Unten: ohne Druckluft	31
Abbildung 9:	Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlperforieren entsprechend des wiederholten Einstechvorganges bei der Stanzformenherstellung	32
Abbildung 10:	Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlschneiden von Birken-	32
Abbildung 11:	Stützventilatoren zur Abluffterfassungssystem vor den Umbaumaßnahmen	34
Abbildung 12:	Schwerkraftabscheider (VDI 3676) der Fa. Müller Kunststofftechnik, Hennef-Bierth für Grobstaub und Positionslochausschnitte aus der lasergestützten Stanzformenherstellung	37
Abbildung 13:	Verfahrens- und Regelungstechnik	38
Abbildung 14:	Polyurethanschaum Füllkörpermaterial	39
Abbildung 15:	Optimaler Arbeitsbereich der Nährstoffzufuhr	40
Abbildung 16:	Nährsalze und Milieubedingungen in Frisch- und Abwasser des Biotropfkörpers im Versuchszeitraum	41
Abbildung 17:	Bilanzierung des Wasserhaushaltes: Berieselungsdichte und geförderte Wassermengen im Versuchszeitraum	42
Abbildung 18:	Ableitung von Arbeitspunkten der Berieselung durch Stillstand der Wasserförderung (Störfallsimulation). Unten: Relative Luftfeuchte und Temperatur der Fortluft. Oben: Trocknungsverlauf während des Produktions- und Abluftbetriebes	43
Abbildung 19:	Klassifizierung und Bilanzierung der luft- und wassergetragenen Stofffrachten der Biotropfkörper-Anlage	45

Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Abwasseruntersuchungen aus der Abschlämmung des BTK	47
Abbildung 21: Ermittlung des Strömungsverhaltens im Biotropfkörper zur Ableitung von Skalierungskenngrößen durch Messung der normierten Verweilzeitverteilung der Pentan-Impulsantwortfunktion	48
Abbildung 22: Biotropfkörper-Anlage: Proportionen und Messpunkte	51
Abbildung 23: Messtechnik mit den jeweils gültigen Normen für die Beurteilung des Biotropfkörpers	53
Abbildung 24: Kohlenmonoxidkonzentration im Roh- und Reingas der Biotropfkörper-Filteranlage und Korrelation zur Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration	54
Abbildung 25: Konzentration an Gesamtkohlenwasserstoffen (VOC) in der Erfassungsluft (2.600m ³ /h) im Verlauf einer Dauermessung	56
Abbildung 26: Abbau von Gesamtkohlenwasserstoffen nach der Erfassungsgraderhöhung im Messzeitraum und während der 60-stündigen Online-Messung (L)	57
Abbildung 27: Korrelation von spezifischer Filterbelastung und spezifischer Abbauleistung für Gesamtkohlenwasserstoffe	58
Abbildung 28: Abbaugrad aromatischer Leitkomponenten und lineare Regression der Konzentrationsabhängigkeit des Abbaugrades für Toluol	63
Abbildung 29: Spezifische Filterbelastungen und Massenkonzentrationen aromatischer Leitkomponenten im Roh- und Reingas des Biotropfkörpers	64
Abbildung 30: Schadstoffeliminierung geruchsrelevanter Carbonylverbindungen durch den Biotropfkörper	65
Abbildung 31: Massenkonzentration und spezifische Filterbelastung geruchsrelevanter Carbonylverbindungen durch den Biotropfkörper	66
Abbildung 32: Bewertung der Geruchsminderung anhand der Geruchsstoffkonzentration und geruchsrelevanten Substanzen	67
Abbildung 33: Bewertung der Geruchsintensität und der hedonischen Wirkung des Roh- und Reingases durch ein repräsentatives Probandenkollektiv	68
Abbildung 34: Partikelsiebfraktionsverteilung des Grobstaubes (Abluftvolumenstrom: 2.800 m ³ /h; VOC-Konzentration: 50 mgC/m ³)	70
Abbildung 35: Durch den Vorabscheider erfasste Staubfraktionen aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Links: Grobstaub > 150 µm sowie Positionslochausschnitte und Späne. Rechts: Staubfraktion der Größe 106-150 µm	71
Abbildung 36: Charakteristik der Feinstaubfraktion	72

Abbildung 37: Partikelgrößenverteilung der Aerosole aus der Schichtholz-Stanzformenherstellung. Links: Häufigkeitsverteilung des aerodynamischen Partikeldurchmessers im Rohgas und Reingas; Rechts: Prallfolien der Impaktionsstufen koagulierte Aerosolpartikel des Rohgases (1) und Reingases(2)	74
Abbildung 38: Abluftrandbedingungen und Druckverlust über der Biotropfkörper Anlage unter dauerhafter Einleitung Aerosolpartikel enthaltender, laserinduzierter Emissionen aus der lasergestützten Stanzformenherstellung	77
Abbildung 39: Mittlere Abluftzusammensetzung im Rohgas bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung	79
Abbildung 40: Mittlere Abluftzusammensetzung im Reingas des Biotropfkörper Filters bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung	79
Abbildung 41: Links: Koloniebildung des Stammes <i>Rhodococcus ruber</i> auf Medium 1. Rechts: Anreicherung in Flüssigmedium mit Zugabe von Schadstoffen (C-Quelle) über die Gasphase	84
Abbildung 42: Mikroskopisches Erscheinungsbild der zur Beimpfung der Biotropfkörper-Filterpackung eingesetzten Suspensionen (Inoculum) einzelner Stämme	87
Abbildung 43: Extrahierter Stamm MK 01358/S1 (DSMZ-Referenz)	88
Abbildung 44: Extrahierter Stamm MK01358/S2 (Referenznummer)	88
Abbildung 45: Extrahierter Stamm MK 01358/S11 (Referenznummer)	88
Abbildung 46: Hinterlegter und taxonomisch beschriebener Stamm MK 01358/S3 (DSMZ-Referenznummer)	89
Abbildung 47: Hinterlegter und taxonomisch beschriebener Stamm MK 01358/S4 (DSMZ-Referenznummer)	89
Abbildung 48: Wachstumskurve von <i>Rhodococcus ruber</i>	93
Abbildung 49: Fermentation von <i>Rhodococcus ruber</i> in unterschiedlichen Kulturmedien	93
Abbildung 50: Fermentation von <i>Rhodococcus rhodochrous</i> in unterschiedlichen Kulturmedien	94
Abbildung 51: Probe des Filtermaterials aus dem rohgasseitigen Filtersegment M2. Links: REM-Aufnahme eines belegten PUR-Steges; Rechts: Aus der Probe extrahierte Mikroorganismensuspension.	96
Abbildung 52: EDX-Analyse der anorganischen Rückstände: Rückstände nach Verglühen abgeschiedener Stofffraktionen der Filterpackung	97
Abbildung 53: Prozentuale Darstellung der Betriebskosten (ohne Personalkosten) für eine Biotropfkörper-Pilotanlage in Außenaufstellung	100
Abbildung 54: Betriebskostenverteilung der Biotropfkörper-Anlage im Jahresmittel	101

Abbildung 55: Demonstration des Abluftreinigungskonzeptes als Modellösung für die überwiegend deutschen mittelständischen Betriebe der Europäischen Stanzformen Union	104
Abbildung 56: Geruchsschwellenkennlinie und eingesetzter Unterdruckprobennehmer	114
Abbildung 57 Aufbau des Planfilterkopfgerätes	116
Abbildung 58: Links: Kaskadenimpaktor. Rechts: Darstellung einer Stufe des Niederdruck-Kaskadenimpaktors	118
Abbildung 59: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Aktivkohle-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	123
Abbildung 60: Chromatogramm der Aktivkohle-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	123
Abbildung 61: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Aktivkohle-Sorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	124
Abbildung 62: Chromatogramm der Aktivkohle-Adsorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	124
Abbildung 63: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	125
Abbildung 64: Chromatogramm der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	125
Abbildung 65: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	126
Abbildung 66: Chromatogramm der Silicagel-Sorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz	126
Abbildung 68: Abluftrandbedingungen während der Probennahme	139
Abbildung 69: Darstellung der sequentiellen VOC-Messung in verschiedenen Filterschichten	140
Abbildung 70: Darstellung der erfassten Partikelmassenkonzentration zur quantitativen Bestimmung	141
Abbildung 72: Darstellung der detektierten CO-Massenkonzentrationen im Roh- und Reingas	143
Abbildung 73: Darstellung der Anlagenkomponenten und Verfahrensbeschreibung	144

2.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Praxiskennwerte bei der Schichtholz Stanzformenherstellung mittels CO ₂ -Laserstrahlung	21
Tabelle 2:	Volumenströme während des Produktionsbetriebs vor den Optimierungsmaßnahmen	35
Tabelle 3:	Mittelwerte der Abwasseruntersuchungen aus der Abschlämmung aus dem Betrieb einer Biotropfkörperanlage im Vergleich zu Grenzwerten der kommunalen Abwassersatzung	46
Tabelle 4:	Abluftrelevante Skalierungskenngrößen der Filtersegmente	49
Tabelle 5:	Bewertete Messgrößen im Gasstrom und Prozesswasser	52
Tabelle 6:	Berechnung der notwendigen Detektorempfindlichkeit zur Anlagen-Effizienzüberwachung anhand von Kohlendioxid	55
Tabelle 7:	Konzentrationen und Abscheidegrade gasförmiger Emissionsleitkomponenten bei der Schichtholzbearbeitung	59
Tabelle 8:	Abbau unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz ($V_N = 2.200 - 2.500 \text{ m}^3/\text{h}$)	61
Tabelle 9:	Abbau unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile (und Emissionsleitkomponenten*) bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz ($V_N = 2.200 - 2.500 \text{ m}^3/\text{h}$) Adsorptionsmedium: Silicagel	62
Tabelle 10:	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe in einer Aerosolprobe	73
Tabelle 11:	Auswertung einer Partikelimpaktionsmessung	74
Tabelle 12:	Auswahl degradierender Mikroorganismenstämme und kohärente Abluftinhaltsstoffe in Hinblick auf die Biofiltration von geruchsrelevanten Komponenten und Abluftinhaltsstoffen	82
Tabelle 13:	Zur Mikroorganismenselektion angewandte Matrix	83
Tabelle 14:	Chronologie der Animpfphase	85
Tabelle 15:	Mischungsstrategie für die BSB-Messreihe	92
Tabelle 16:	Kumulierte Energiekosten	99
Tabelle 17:	Kumulierte Kosten für Frischwasser und Nährlösungskonzentrat	100
Tabelle 18:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Verfahrensvergleich	102
Tabelle 19:	Eingesetzte Messsensoren des Polytectors	115
Tabelle 20:	Ausführung der Impaktorstufen	117
Tabelle 21:	Verwendete diskontinuierliche Probenahmemedien	122
Tabelle 22:	Komponenten für die Herstellung des Mediums 65	137
Tabelle 23:	Komponenten zur Herstellung des Mediums 133	137
Tabelle 24:	Auswertung der erfassten Schadstoffmenge im Rohgas, an den Messstellen	141
Tabelle 25:	Auswertung der Partikelimpaktion	142
Tabelle 26:	Qualitative und quantitative Bestimmung der Partikelmassenkonzentration	143

3 Verzeichnis von Formelzeichen und Definitionen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
v	m/s	Reaktionsgeschwindigkeit
ε	-	Porosität
χ	$\mu\text{S/cm}$	Leitfähigkeit
Θ	-	normierte Verweilzeit
η	%	Wirkungsgrad
$\eta(\text{GE})$	%	Geruchsminderungsgrad
$\eta(\text{VOC})$	%	Abbaugrad
σ^2_{Θ}	-	normierte Varianz
τ_{ae}	s	aerodynamische Verweilzeit
φ^G	g/m^3	Dichte eines Gases
ν^G	m^2/s	kinematische Zähigkeit des Gases
v_{max}	m/s	maximale Reaktionsgeschwindigkeit
Δp	Pa	Druckdifferenz
$\Delta p(\text{O}_2)$	mbar	Differenz des Sauerstoffpartialdruckes
β_s	%	Glühverlust (organischer Anteil)
ΔT	s	Pulsdauer
a	m^2/m^3	spezifische Oberfläche
A	m^2	Strömungsquerschnitt
A_F	m^2	Filterfläche
A_{spez}	$\text{g/m}^2\text{h}$	spezifische Filterflächenbelastung
Bo	-	Bodensteinzahl
BSB_5	mgO_2/l	biologischer Sauerstoffbedarf
C_{CP}	mg/m^3	Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration
c_G	mg/m^3	Gaskonzentration
C_G	g/m^3	Substratkonzentration in der Wasserphase
c_G	GE/m^3	Geruchsstoffkonzentration
c_{GP}	mg/m^3	Gaskonzentration der Probe
C_L	g/m^3	Substratkonzentration in der Gasphase
CSB	mg/l	chemischer Sauerstoffbedarf
$C_{VPä}$	ppm	Kohlenwasserstoffkonzentration eines 80ppm konzentrierten Propangases
D	cm^2/s	Diffusionskoeffizient
d	μm	Partikeldurchmesser
DC_i/dx	$(\text{kmol/m}^3)/\text{m}$	Konzentrationsgradient
D_{ji}	m^2/s	Diffusionskonstante
d_P	mm	Porendurchmesser
d_s	mm	Wirkdurchmesser
d_s	mm	Sondendurchmesser
E	kJ/m	Streckenenergie
f_{puls}	Hz	Pulsfrequenz
g	m/s^2	Erdbeschleunigung

Zeichen	Einheit	Erläuterung
l_K	m	Länge des Kanals
m	mg/h	Massenstrom
$M(O_2)$	mg/mol	Molekulargewicht (32.000)
m_l	mg	Beladungsmenge
M_M	kg/mol	Molmasse
q_r	mg/m ³	Staubmassenkonzentration im Abgas, bezogen auf den Betriebszustand
Q_{spez}	g/m ³ h	spezifische Filtervolumenbelastung
R	mbar/mol*K	Gaskonstante (83,144)
Re	-	Reynoldszahl
rel. F.	%	relative Feuchte
t	s	Messdauer
T	K	Temperatur
T_0	K	Temperatur bei 0°C
T_{20}	K	Temperatur bei 20 °C
TOC	mg/l	Totale organic compounds
t_{puls}	%	Puls/Pulspauseverhältnis
T_s	mg/l	absetzbare Stoffe
UEG	UEG%	untere Expositionsgrenze
V_{ads}	l	Gasvolumen
$V_{Berieselungsdichte}$	m/h	Berieselungsdichte
V_{el}	l	Eluatvolumen
V_F	m ³	Gesamtfüllkörpervolumen
V_{fl}	ml	Probenvolumen
V^G	m ³ /h	Volumenstrom des Gases
V_{ges}	ml	Nennvolumen
V_N^G	m ³ _N	Normvolumenstrom
V_T	m ³ /h	Teilvolumenstrom
V_T	l/min	Teilvolumenstrom
V_z	m ³	Filtersegmentvolumen
w_G	m/s	Gasgeschwindigkeit im Messquerschnitt
w^G	m/s	Geschwindigkeit eines Gases
w_G	m/s	Strömungsgeschwindigkeit im Messquerschnitt

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e. V.
BAR	Biologische Abluftreinigung
BG	Berufsgenossenschaft
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BTK	Biotropfkörper
BTXES	Benzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzol, Styrol (aromatische Kohlenwasserstoffe)
DFG	Deutsche Forschungsgesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DNPH	2,4-Dinitrophenylhydrazin
DSMZ	Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH
EAK	Europäischer Abfallkatalog
EDAS	elektronisches Datenerfassungssystem
EDX	Elektronendispersive Analyse
FID	Flammenionisationsdetektor
GC	Gaschromatographie
GC/MS	Gaschromatographie/Massenspektroskopie
GIRL	Geruchsimmissionsrichtlinie
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
ISAH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik
KNV	Katalytische Nachverbrennung
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
Niosh	National Institute for Occupational Safety and Health
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TÜV	Technischer Überwachungsverein
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile organic compounds
WTW	Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH

4 Zusammenfassung

Bei der lasergestützten Schichtholzbearbeitung zur Stanzformenherstellung entstehen geruchsrelevante Schadstoffemissionen, die an der Bearbeitungsstelle erfasst und einem Abluftreinigungssystem zugeführt werden müssen. Ziel des Vorhabens ist die Qualifizierung einer Biotropfkörper-Filteranlage zur Schadstoff- und Geruchsminderung und Erarbeitung von Skalierungskenngrößen. Die Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Betriebe der Stanzformen herstellenden Branche steht im Vordergrund des Interesses. Optimale Betriebsparameter und Skalierungsgrößen des Verfahrens zur Geruchsminderung sollen im Langzeitversuch auch die Verträglichkeit des Filtrationsverfahrens mit Feinstaub dokumentieren. Ferner sind nachhaltige Maßnahmen zur Erhöhung der Gewerbehygiene und Abscheideleistung durch optimierte Erfassungseinrichtungen und mikrobiologische Ansätze notwendig.

Für die Untersuchungen steht eine Biotropfkörper-Pilotanlage der Fa. M+W Zander Facility Management GmbH, Nürnberg zur Verfügung. Diese Pilotanlage wird zur Filterung der auftretenden Schadstoffemissionen bei der Fa. Hesse Stanzwerkzeuge GmbH, Alfeld eingesetzt. Die wissenschaftlichen und technischen Arbeiten werden im wesentlichen durch das Laser Zentrum Hannover e.V. durchgeführt. Die Arbeiten gliedern sich in die Erfassungsgraderhöhung und Minimierung der Absaugleistung, Optimierung der Verfahrens- und Anlagentechnik, Charakterisierung der Filtrationseffizienz sowie umweltbiotechnologische bzw. mikrobiologische Untersuchungen.

Neben den Werkstoffeigenschaften sind auch die prozessbedingten Wechselwirkungen der absorbierten Laserstrahlung mit dem Werkstoff maßgeblich am Emissionsverhalten der Abluft beteiligt. Die Zusammensetzung kann in die drei wesentlichen Gruppen Kohlenmonoxid, VOC und Partikel eingeteilt werden. Die VOCs sind nach Leitkomponenten bzw. funktionellen Gruppen in Aldehyde (insbesondere Formaldehyd), Aromaten (insbesondere Benzol) und Ketone klassifizierbar. Der partikuläre Anteil besteht im wesentlichen aus Grobstaub (2,4%), Aerosolen mit aerodynamischen Durchmessern von 1-25 µm (53%) und submikronen Aerosolen (43%).

Durch konstruktive und lufttechnische Maßnahmen wird der Erfassungsgrad am Entstehungsort der Emissionen erhöht. Es werden sowohl an der Bearbeitungsstelle als auch an der Ablufführung Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Hierzu werden zwei Absaugdüsen mit unterschiedlichen fluiddynamischen Konzepten konstruiert und erprobt. Es wird gezeigt, dass sich eine druckluftunterstützte Absaugung beim Laserstrahlschneiden positiv auf die Erfassungsgraderhöhung auswirkt. So werden durch die realisierte Obertischabsaugung (Saugdüse) im Mittel 73 Massenprozent der gasförmigen Schadstoffe erfasst, wobei ein VOC-Massenstrom von 60 - 110 g/h die Saugdüse passiert. Die Erhöhung des Erfassungsgrades an der Laseranlage beträgt 107 %, so dass die gewerbehygienischen Bedingungen ohne zusätzlichen Lüftungstechnischen Aufwand wesentlich verbessert wurde. Ferner werden die Absaugstränge der Laseranlagen zu bedarfsgeregelten Gruppen zusammengefasst und als Zentralabsaugung realisiert. Die Änderung der Ablufführung der 3 Laseranlagen führt zur Optimierung der Schadstoffeffassung, Minderung des Lärmpegels in der Werkshalle, Minderung der Geruchsimmission und der notwendigen Gesamtlüfterleistung.

Die Abluftreinigungsanlage besteht aus einem zweistufigen Biotropfkörper (BTK) mit einem Nettofiltervolumen von 7,28 m³. Bei einem mittleren Volumenstrom von 2.600 m³/h

und Verweilzeiten von 9 - 12 s sind maximale spezifische Filterbelastungen von 72 g/m³h bzw. 245 g/m²h realisiert. Ein Vergleich des Strömungsverhaltens an unterschiedlichen Filtertiefen und -querschnitten trägt zur Charakterisierung der Filterpackung und Abschätzung der effektiv wirkenden Filterhöhe bei. Die Strömung zeigt sowohl dispersive als auch konvektive Eigenschaften; in den Eckbereichen des Tropfkörpers sind Totzonen vorhanden. Im durchströmten Querschnitt lassen sich keine nennenswerten Unterschiede in der Verteilung der Verweilzeit beobachten, was für eine gleichmäßige Durchströmung der Filterpackung und folglich effektive Nutzung des gesamten Querschnittes spricht. Unter Berücksichtigung konstruktiver Aspekte kann die Behältergeometrie als optimiert bewertet werden. Die Strömungscharakterisierung belegt, dass die effizienzfördernde Rückvermischung und Verweilzeitsteigerung mit einem geringen Druckverlust für diese Aufgabenstellung ideal kombiniert ist. Der gemessene Druckabfall von 2,2 hPa ist – verglichen mit anderen Filterverfahren – niedrig und verursacht nur einen geringen Anteil der Gesamtbetriebskosten. Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind bei sachgemäßen Betrieb keine Beeinträchtigungen oder Alterungserscheinungen des Filtermaterials beobachtet worden. Neben der Abscheidung von gasförmigen Schadstoffen und geruchsrelevanten Komponenten werden auch Aerosole zuverlässig im Langzeitversuch durch den BTK abgeschieden. Die hohe Standzeit des Filtermaterials ist daher insbesondere unter dem Aspekt der Multifunktionalität des Filtrationsverfahrens hervorzuheben.

In der Gruppe der VOC werden im wesentlichen die Leitkomponenten durch den BTK abgeschieden, was die hohe Selektivität des Filtersystems belegt. Da neben der Grobstaubabscheidung überwiegend mikrone Partikel durch den BTK eliminiert werden, besteht die partikuläre Fraktion im Reingas des Filters zu über 98% aus submikronen Aerosolen. Die Abscheidung der Aerosole (36%) ist höher als theoretisch erwartet und als ausreichend zu bewerten. Die Konzentration im Reingas bewegt sich in der Größenordnung des Grenzwertes, jedoch werden die gesetzlichen Grenzmassenströme sicher unterschritten. Bei geringen spezifischen Filterbelastungen (< 17 g/m³h) treten besonders hohe Schwankungen in den Wochenmittelwerten der spezifischen Abbauleistung der Gesamtkohlenwasserstoffe auf. Die hohe Schwankungsbreite in diesem Belastungsbereich äußert sich in Abbaugraden von < 5% bis 98%. Bei höheren Belastungen arbeitet der Biotropfkörper mit einer stabileren spezifischen VOC-Abscheidung, so dass die Schwankungen um den Mittelwert von 30% geringer sind. Durch die im Mittel relativ geringen VOC-Konzentrationen (51 mgC/m³) ist von einer Diffusionslimitierung des Systems auszugehen. Die erzielten Ergebnisse unterstreichen die positive Wirkung der realisierten effizienten Emissionserfassung auf die Schadstoffminderung. Dieser Sachverhalt wird insbesondere für die aromatischen Leitkomponenten wie Benzol und Toluol deutlich. Die geruchsrelevanten Komponenten Formaldehyd, Acrolein, Acetaldehyd und Hexanal werden mit signifikant hohen Abbauraten von 65-99% gemindert. Die Schadstoffeliminierung von Leitkomponenten unterstreicht die Eignung des Abluftreinigungsverfahrens zur selektiven Schadstoffminderung der mit einer komplexen Schadstoffmatrix beladenen Abluft aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Es werden sowohl unregelmäßig auftretende Schadstoffe als auch Leitkomponenten durch den Biotropfkörper abgeschieden. Aromatische Kohlenwasserstoffe werden ebenso wie Aldehyde und Ketone durch das biologische Abluftreinigungsverfahren katalytisch umgesetzt. Der BTK gewährleistet die sichere Einhaltung relevanter Grenzwerte und Unterschreitung der Grenzmassenströme

der TA-Luft. Die Geruchsminderung durch den Biotropfkörper ist die zentrale Aufgabe des Filtrationssystems. Im Mittel beträgt die Geruchsminderung 42%, wobei sich die Intensität und Hedonik / Qualität des Geruches im Reingas wesentlich verbessert. Durch die Langzeitüberwachung der Schadstoffmassenströme und Schadstoffnebenströme konnte die Zuverlässigkeit der Abluftreinigungsanlage dokumentiert werden.

Ziel des mikrobiologischen Teils der Versuchsdurchführung ist die Anreicherung spezialisierter Kulturen zur Animpfung der Filterpackung und die Charakterisierung der Verträglichkeit der eingesetzten Organismen mit den gasförmigen und partikulären Abluftinhaltsstoffen. Auf Basis der Beladungsmengen gasförmiger Leitkomponenten aus der Pilotversuchsanlage werden Mikroorganismen selektiert, in einer Schadstoffmischung enthaltenden Atmosphäre inkubiert und nach Anreicherung auf dem Biotropfkörper immobilisiert. Für die Beurteilung des ausgebildeten Biofilms werden elf verschiedene Mikroorganismenstämme aus dem Biofilm des Abluftreinigungsverfahrens isoliert. Ausgehend von der Verteilungshäufigkeit werden zwei Bakterienstämme isoliert und taxonomisch identifiziert. Die Hinterlegung der Reinkulturen in einer Organismensammlung dient der Nachhaltigkeit der erzielten Projektergebnisse. Dieser Beitrag zur Übertragbarkeit der umweltbiotechnologischen Ergebnisse ermöglicht ferner eine Verkürzung der Adaptionszeit und bildet die Basis für mögliche weitere Entwicklungen unter Nutzung der biologisch degradativ wirkenden Spezies.

Aus der ermittelten Abluftcharakteristik entsteht die Forderung nach einem Biofiltersystem, welches ein neutrales oder degradatives Verhalten gegenüber eingeleiteten Aerosol-emissionen zeigt. Das Ausmaß des Wachstums der Mikroorganismen in Suspension ist von der Zugabe an Aerosolen aus der lasergestützten Schichtholzbearbeitung abhängig. Bei einer Konzentration von 0,04 mg/l Aerosol im Substrat ist im Labormaßstab die hemmende Wirkung der Aerosole erkennbar. Wird die Konzentration an Aerosolen im Substrat weiter gesteigert, ist zu erkennen, dass die Aerosole selbst in hoher Konzentration nicht toxisch auf die eingesetzten Mikroorganismen wirken.

Die Bearbeitung von Metallen mit Laserstrahlung ist für den Stanzformherstellungsprozess nicht relevant und daher als Ausnahmeanwendung zur Produktion von Einzelstücken anderen Verwendungszweckes einzustufen. Da unter massiver Einleitung dieser Emissionen jedoch negative Auswirkungen auf die Filtration beobachtet werden, sollte der Abgasstrom im Falle einer andauernden Metallbearbeitung durch eine Bypassrohrleitung geführt werden.

Essentiell für das katalytische Medium – die immobilisierten Mikroorganismen – ist eine ausreichende Wasserversorgung durch das Biotropfkörper-Verfahren. Im Rahmen des Projektes werden optimale Verfahrensparameter des BTK ermittelt. So beträgt die optimale Berieselungsdichte 0,42 m/h. Der optimale Arbeitsbereich der Nährstoffzufuhr zur Versorgung der immobilisierten Mikroorganismen beträgt 1,5 - 2,5 l/d. Er entspricht der durchgeführten Bilanzierung der Massenströme unter Einbeziehung des biotechnologisch relevanten C:N:P Verhältnisses von 155:20:5. Zur Ableitung von Arbeitspunkten der Berechnung und Kontrollintervallen der wasserführenden Komponenten, deren einwandfreie Funktion dauerhaft sichergestellt werden muss, werden die Ergebnisse eines simulierten Störfalls herangezogen. Das Wasseraufnahmevermögen beträgt 100-150 kg/m³, so dass ca. 320 Liter Wasser von der Filterpackung reversibel aufgenommen werden können. Das maximale Rückhaltevermögen lässt sich hieraus mit 30-45 h

entsprechend 3-4 Produktionsschichten beziffern. Im Beobachtungszeitraum konnte auch bei niedrigen Berieselungsdichten keine irreversible Schädigung des Biofilms infolge einer Austrocknung der Filterpackung festgestellt werden, so dass ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Biotropfkörper-Filter sind Abwasser erzeugende Abluftreinigungsanlagen, deren Abwasser (1,55 m³/d) in eine betriebseigene oder kommunale Abwasserbehandlungsanlage geleitet werden muss. Ein Vergleich mit den Grenzwerten der Abwassersatzung und den Empfehlungen der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. dokumentiert, dass die Direkteinleitung dieser relativ geringen Stofffrachten erfolgen kann. Ferner wird durch die Untersuchungen insgesamt eine gute Abbaubarkeit des Abwassers belegt. Die abwassertechnischen Parameter entsprechen den Forderungen nach VDI 3478.

Die energetischen und ökologischen Aspekte und die Investitions- und Betriebskosten der biologischen Abluftreinigung nach dem Tropfkörper Verfahren werden erörtert und alternativen Verfahren gegenübergestellt. Im Falle einer Entsorgung des Filtermaterials nach 10 Jahren resultiert durch Deponieren, Beschaffen und Austauschen ein Aufwand von 1,8 Cent / Laserbetriebsstunde. Die Gesamtkosten für den Betrieb der optimierten Biotropfkörper-Anlage betragen ca. 3.380 €/a, entsprechend 1,46 € pro Betriebsstunde der drei Laseranlagen (49 Cent/Laser). Der Nährlösungskonzentratverbrauch und die Frischwasserzufuhr tragen mit 81% wesentlich zu den betrieblichen Kosten bei. Die vergleichende Betrachtung der Jahresbetriebskosten verdeutlicht, dass der Einsatz des Biotropfkörper-Verfahrens in Innenaufstellung die kostengünstigste Variante darstellt. Des weiteren können die lüftungsbedingten Jahresbetriebskosten durch die erzielte Verringerung des Abluftvolumenstromes ($dV = 1.800 \text{ m}^3/\text{h}$) um 1.940 Euro/Jahr gesenkt werden. Die realisierte Erfassungseinrichtung und Lüftungstechnik demonstriert ein modellhaftes Ablufterfassungssystem für die lasergestützte Stanzformenherstellung.

Die Ergebnisse zur Emissionserfassung und Abluftreinigung sind auf die Laserstrahlmaterialbearbeitung polymerer Werkstoffe und weiterer Holzwerkstoffe übertragbar. Ein Wissens- und Technologietransfer in andere Branchen wie Elektronikindustrie, Kunststoffverarbeitung und Holzverarbeitung erfolgt im Rahmen von durchgeführten Präsentationen und bestehenden Kooperationen. Nach den vorliegenden Erkenntnissen stellt das Biotropfkörper-Verfahren ein geeignetes und wirtschaftliches Abluftreinigungssystem dar, welchem eine Übertragbarkeit auf andere Stanzformen herstellende Unternehmen immanent ist. Im Vergleich mit alternativen Abluftreinigungsverfahren für die Problemstellung ist das charakterisierte Verfahren als die ökonomisch, technologisch und ökologisch überlegene Verfahrensvariante einzustufen.

Das Projekt wurde unter dem Az: 14752 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

5 Einleitung

Verpackungen aus Kartonagen sind umweltfreundliche Produkte, die vollständig recycelt werden können. Zum Herstellen von Kartonagen werden Stanzwerkzeuge benötigt. Diese bestehen aus einer Grundplatte aus hochwertigem Schichtholz, eingesetzten Schneid- und Rillmessern sowie einer Auswurfgummierung.

In Deutschland existieren ca. 120 - 130 Stanzwerkzeugbaubetriebe, von denen ca. 75 in der Europäischen Stanzform Union (ehem. Fachverband deutscher Stanzformhersteller) organisiert sind. Diese Betriebe setzen zur Produktion von Stanzformen für die Verpackungsindustrie überwiegend das Laserschneiden von Schichthölzern als Fertigungsverfahren ein. Während des Fertigungsprozesses werden in die Grundplatte mittels Laserstrahlschneiden Schlitzte eingebracht, in die Schneid- und Rillmesser eingesetzt werden. Dabei werden prozessbedingt Verbrennungsprodukte aus Holz, Leim und Harz frei, die von der Bearbeitungsstelle abgesaugt werden müssen, um die Sicherheit am Arbeitsplatz zu gewährleisten und sowohl Anlagenbediener (Immissionsschutz) als auch die optischen und mechanischen Komponenten zu schützen.

Die extrem unangenehm riechenden und größtenteils gesundheitsgefährdenden Prozessnebenprodukte in der Erfassungsluft müssen einem Abluftreinigungssystem mit dem Ziel der Geruchsminderung zugeführt werden, da sich die Produktionsstandorte der kleinen und mittelständischen Betriebe überwiegend in Mischgebieten bzw. in der Nähe von Wohngebieten befinden. Durch die Durchführung dieses Projektes wird eine Lösung des in der Branche seit Jahren nicht zufriedenstellend gelösten Problems erreicht [1, 2], ein geeignetes und wirtschaftliches Abluftreinigungssystem zu qualifizieren, welches modellhaften Charakter besitzt und die Übertragbarkeit der Pilotanwendungen auf andere Betriebe sicherstellt [3, 4, 5, 6, 7].

Das Trennen von Schichtholz mit Laserstrahlung beruht im wesentlichen auf thermischen Wechselwirkungen, so dass Verbrennung und Sublimation dominierende Emissionsprozesse sind. Die Prozessnebenprodukte fallen sowohl gasförmig (in Form zahlreicher teilweise flüchtiger organischer Kohlenwasserstoffe VOC) als auch partikelförmig (kondensierte Verbindungen, an Holzpartikeln adsorbierte Substanzen) in der Erfassungsluft und im Abluftvolumenstrom an. Als Leitkomponenten sind Formaldehyd, Acetaldehyd, Acrolein, Benzol und Toluol zu nennen. Ferner enthält die Abluft Kohlenmonoxid und eine partikuläre Fraktion mit hohem Feinstaubanteil. Charakteristisch für die Abluft ist die sehr hohe Geruchsintensität. Typische Abluftkennwerte für die industrielle Laserstrahlmaterialbearbeitung von Schichtholz sind in Tabelle 1 aufgeführt. Im Rahmen einer Eignungsprüfung der Biofiltration mit einem Schüttstofffilter (welchem ein vom Biotropfkörper-Verfahren zu unterscheidendes Verfahrensprinzip zugrunde liegt) wurden für die vorliegende Problemstellung diverse Abluftreinigungsverfahren erprobt [2]. Für die Problemstellung existieren verschiedene Lösungsvarianten, von denen insbesondere Systeme der katalytischen Nachverbrennung und Oberflächenfiltration als Komplettsysteme angeboten werden [1, 8]. Die Systeme weisen jedoch oftmals ungenügende Standzeiten auf und können hinsichtlich der Betriebskosten nicht mit umweltbiotechnologischen Verfahren konkurrieren [9, 10]. Oberflächenfilter mit automatischen Abreinigungseinheiten erweisen sich in Verbindung mit einem Pre-Coating grundsätzlich zur Aerosolfiltration geeignet, wobei die Standzeit des verwendeten Pre-Coatings (z.B. 1 kg Aktivkohlepulver auf 15 m² Filterfläche) durch

den übermäßigen Anstieg des Druckverlustes lediglich zwischen 3 und 8 Stunden liegt. Auch der Verwendung von Kalkmehl-Precoating stehen durch die adhäsiven Eigenschaften der Partikel begrenzte Standzeiten entgegen. Darüber hinaus ist dieses Verfahren nur unzureichend zur Abscheidung leichtflüchtiger gasförmiger (und geruchsrelevanter) Komponenten geeignet. Die katalytische Nachverbrennung ist in der Ausführung eines zweistufigen Filtrationsprozesses mit Partikelvorabscheidung prinzipiell geeignet, erweist sich jedoch als betriebskostenintensiv [11].

Tabelle 1: Praxiskennwerte bei der Schichtholz Stanzformenherstellung mittels CO₂-Laserstrahlung

CO₂-Laser	Leistung	1 - 2 kW
	Bearbeitungsbedingungen	häufiges Einstechen
Schichtholz	Birkensperrholz	9 - 18 mm
	Weitere Werkstoffkomponenten	Wasser, Leim, Harnstoff, NH ₄ Cl, Weizenmehl, Melaminharz
	Schnittfuge	0,7 / 1,05 / 1,5 / 2 mm
Abluft	Volumenstrom	800 -1.500 m ³ /h pro Laser
	Konzentration VOC	10 - 1.500 mgC/m ³
	Emissionsmassenstrom	0,01 - 2,7 kg/h
	Luftfeuchte	30 - 70 %
	Temperatur	20 - 30°C
	Spezifische Charakteristik	intensiver unangenehmer Geruch, adhäsiver Feinstaub

Für die biologische Abluftreinigung von Emissionen aus der Schichtholz-Laserstrahlbearbeitung sind vor allem die leicht flüchtigen Abluftkomponenten mit niedriger Geruchsschwelle und unangenehmer Geruchsqualität von Interesse. Wird der Holzstaub-Abluftgrenzwert sichergestellt, ist für die Betriebssicherheit und Standzeit des Filtrationsverfahrens relevant, dass von den Aerosolen bzw. Aerosol-Inhaltsstoffen keine toxische oder stark hemmende Wirkung ausgeht. Im Idealfall wird die vollständige Biodegradation der Aerosolpartikel durch die Biozönose des Filtermediums erzielt. Es ist daher notwendig, das bereits etablierte Biotropfkörper-Verfahren [12;13;14;15,16] einer Untersuchung zur Verträglichkeit mit Aerosolen aus der Schichtholzbearbeitung zu unterziehen, um die Standzeit der Filterpackung und Entsorgungswege ermitteln zu können.

Die **Lösungsidee** bedient sich sowohl der Kenntnis von Abluftkomponenten und dem resultierenden mikrobiologischen Ansatz der Selektion spezialisierter Mikroorganismen als auch einem -dem Stand der Technik entsprechenden- umweltbiotechnologischen Verfahrensansatz. Auch vor dem Hintergrund, dass die biologische Abluftreinigung insbesondere für Konzentrationen < 1 g/m³ bei Volumenströmen von 1.000 - 30.000 m³/h wirtschaftlich ist [13], wird diese verfahrenstechnische Methode als effiziente Lösung für die vorliegende Abluftproblematik demonstriert.

Durch die Kenntnis der komplexen Abluftzusammensetzung können Bakterienstämme ausgewählt werden, die dieses Schadstoffspektrum möglichst vollständig abzubauen vermögen [17, 18]. Nach dem Anreichern dieser Mikroorganismen und Immobilisieren auf inertem Trägermaterial zur Ausbildung eines Biofilms ist die biologische Abluftreinigung

von laserinduzierten Emissionen aus der Holzbearbeitung auf eine erfolgversprechende Grundlage gestellt. Für den bedarfsgerechten Einsatz des Verfahrens ist eine spezifische Optimierung des biologischen Schadstoffabbaus notwendig.

In Pilotversuchen zur biologischen Abluftreinigung von Emissionen aus der Polymethylmethacrylat Bearbeitung konnte die biologische Degradation von Aerosolpartikeln durch adaptierte Mikroorganismen im Vorratswasser (Sumpfwasser) eines Biotropfkörper-Filters anhand von Sauerstoffverbrauch und Zellwachstum nachgewiesen werden. Diese Laboruntersuchungen werden durch den äußerst geringen Anstieg des Druckverlustes durch den Biotropfkörper im 100-tägigem Versuchszeitraum unter Einleitung von aerosolbeladener Abluft unterstrichen [19]. Diese Untersuchung bildete den Abschluss einer Reihe von Langzeitversuchen zur Abluftreinigung laserinduzierter Emissionen [20], wobei für spezifische Filterbelastungen bis 100 g/m³h ein mittlerer Wirkungsgrad des Biotropfkörper-Verfahrens von 93,8 % mit gezielt optimierten Mikroorganismen dauerhaft eingestellt werden konnte.

Die **Zielsetzung** des Projektes verfolgt den Aufbau, der Erprobung und der Optimierung des von der M+W Zander Facility Management GmbH, Nürnberg, entwickelten Biotropfkörper-Verfahrens als Pilotanlage zur Abluftreinigung für die Emissionen aus der lasergestützten Stanzformenherstellung. Das Verfahren erzielt folgende Eigenschaften:

- effiziente Abscheidung von grenzwertrelevanten Komponenten aus der Abluft
- effiziente Abscheidung von Geruchsstoffen aus der Abluft
- minimaler Energieeinsatz
- hohe Wirtschaftlichkeit
- hohe Prozesssicherheit
- vollständige Übertragbarkeit auf Unternehmen der Stanzformen herstellenden Branche

Diese Eigenschaften orientieren sich besonders an den Bedürfnissen von kleinen und mittelständischen Unternehmen, weshalb die Erprobung in einem mittelständischen Unternehmen der Stanzformenherstellung, Firma Hesse Stanzwerkzeuge GmbH, Alfeld, erfolgt. Auf Basis der demonstrierten Ergebnisse kann den rund 80 mittelständischen Unternehmen dieser Branche in Deutschland, die in der Europäischen Stanzformen Union mit überwiegend deutschen Mitgliedern organisiert sind, ein vollständiges Konzept zur Abluftreinigung angeboten werden. Die Ergebnisse beinhalten:

- eine wirtschaftliche, auf die Stanzformenherstellung mit Laserstrahlung zugeschnittene Abluftreinigungsanlage. Diese ist im Langzeitbetrieb getestet und wird über den Kooperationspartner M+W Zander Facility Management GmbH als Drittnutzer vermarktet,
- die Hinterlegung der spezialisierten Mikroorganismen bei der Deutschen Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, um weitere Anwendungen im Bereich der Abluftreinigung für vergleichbare Problemstellungen zu ermöglichen,
- die Konzeption und Erprobung eines für die Emissionsentstehung bei der Schichtholzbearbeitung mit Laserstrahlung prozessoptimierten Absaugkopfes durch das Laser Zentrum Hannover e.V.,

- die Demonstration der Modellhaftigkeit des Anlagenkonzeptes für andere Branchen wie Holz-, Holzstaub- und Holzwerkstoff-Verbrennung sowie der Laserbearbeitung von relevanten Kunststoffen.

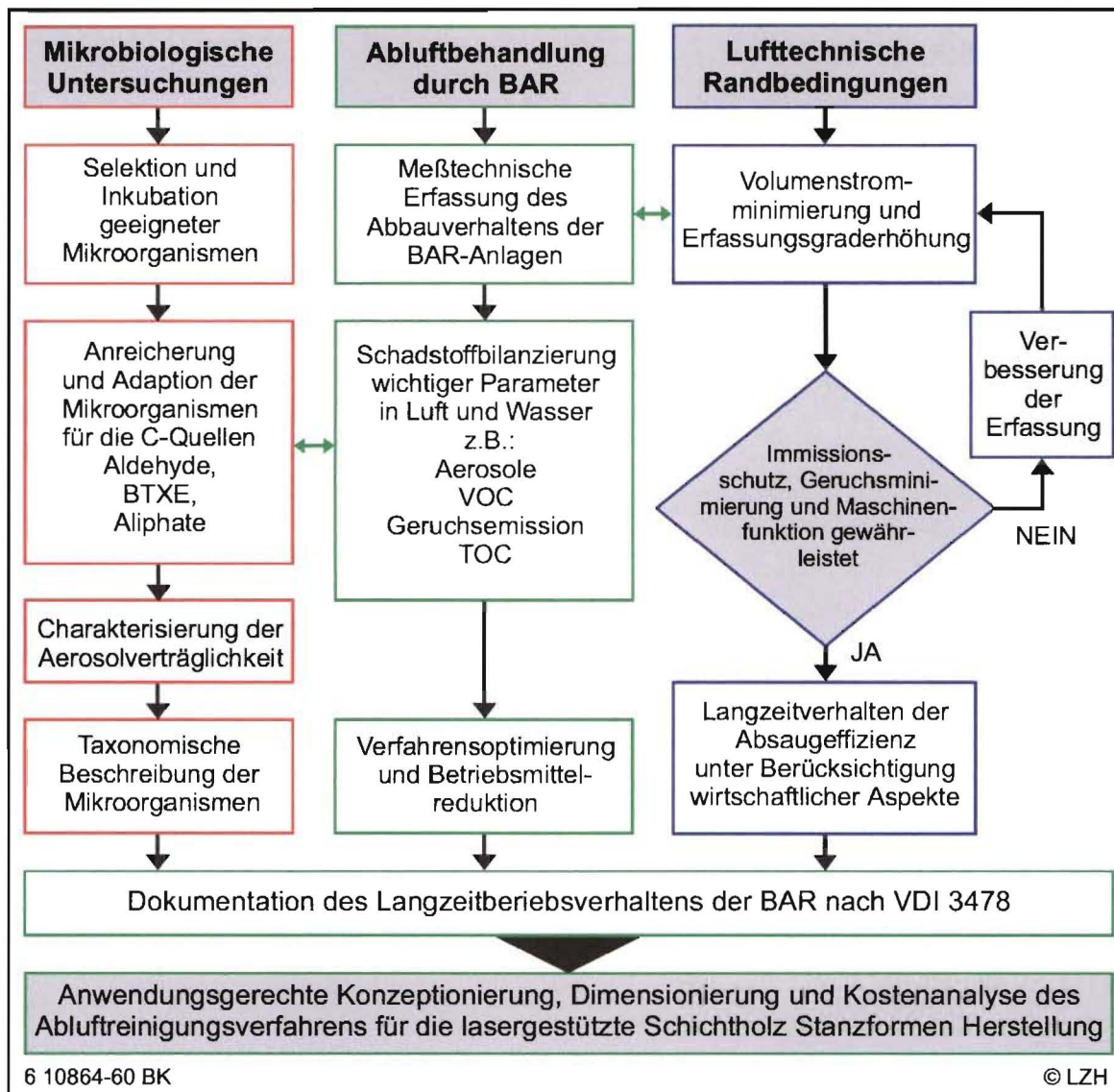


Abbildung 1: Fließschema der Arbeitsschritte

Das **Lösungskonzept** gliedert sich chronologisch in drei Phasen. Nach der Aufbau-, Inbetriebnahme- und Adaptionphase des Biotropfkörperfilters folgt die messtechnische Beurteilung des Langzeitverhaltens der Anlage nach VDI 3478 [16], um aufbauend Optimierungen und die Integration der BTK-Anlage vorzunehmen.

Thematisch kann das Lösungskonzept ebenfalls in drei Abschnitte unterteilt werden. Diese wirken aufeinander konstruktiv ein und werden simultan durchgeführt. Das Biotropfkörper-Verfahren muss installiert, messtechnisch überwacht und optimiert werden. Einhergehend sind mikrobiologische Vorversuche und Charakterisierungen bis hin zur taxonomischen Beschreibung Bestandteil der Untersuchungen. Als drittes Teilkonzept geht die Optimierung des Erfassungsgrades durch lüftungstechnische Veränderungen nahe der Emissionsquelle (Laserkopf, effiziente Abluftzusammenführung von einzelnen Lasern) in das Lösungskonzept ein.

In den Arbeitsplan sind gemäß der gutachterlichen Auflagen folgende Aufgabenstellungen integriert:

- ökologische und ökonomische Bilanzierung
- Bewertung der Aerosolabscheidung im Langzeitversuch und Abbau der schwerlöslichen Schadstoffe
- Darstellung kontinuierlicher Roh- und Reingasmessungen
- Darstellung des sequentiellen Abbaupotenzials
- Prüfung, ob die CO₂-Konzentration als mögliche Überwachung des Wirkungsgrades geeignet ist
- Darstellung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Der thematische und zeitliche Zusammenhang zwischen den Gliederungen des Lösungskonzeptes ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

6 Wissenschaftlicher Hauptteil

6.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der angewandten Methoden und Diskussion der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete der drei Projektphasen sind im folgenden im Anschluss an die Darstellung der Versuchsanordnung im thematischen Kontext der Bereiche Erfassungsgraderhöhung, Verfahrenstechnik, Effizienzbetrachtung, und Umweltbiotechnologie dokumentiert.

6.1.1 Versuchsanordnung

Die Absaugeinrichtungen von drei CO₂-Laserstationen werden durch ein gemeinsames Rohrleitungssystem gebündelt. An den einzelnen Laseranlagen sind bis zu vier Erfassungsluftrohrleitungen zu einer lüftungstechnischen Gruppe zusammengefasst. Um die maximale Arbeitsplatzkonzentration einzuhalten, beträgt der geforderte Absaugvolumenstrom der entstehenden gas- und partikelförmigen Emissionen einer Laseranlage zu Projektbeginn 1.000 – 1.200 m³/h.

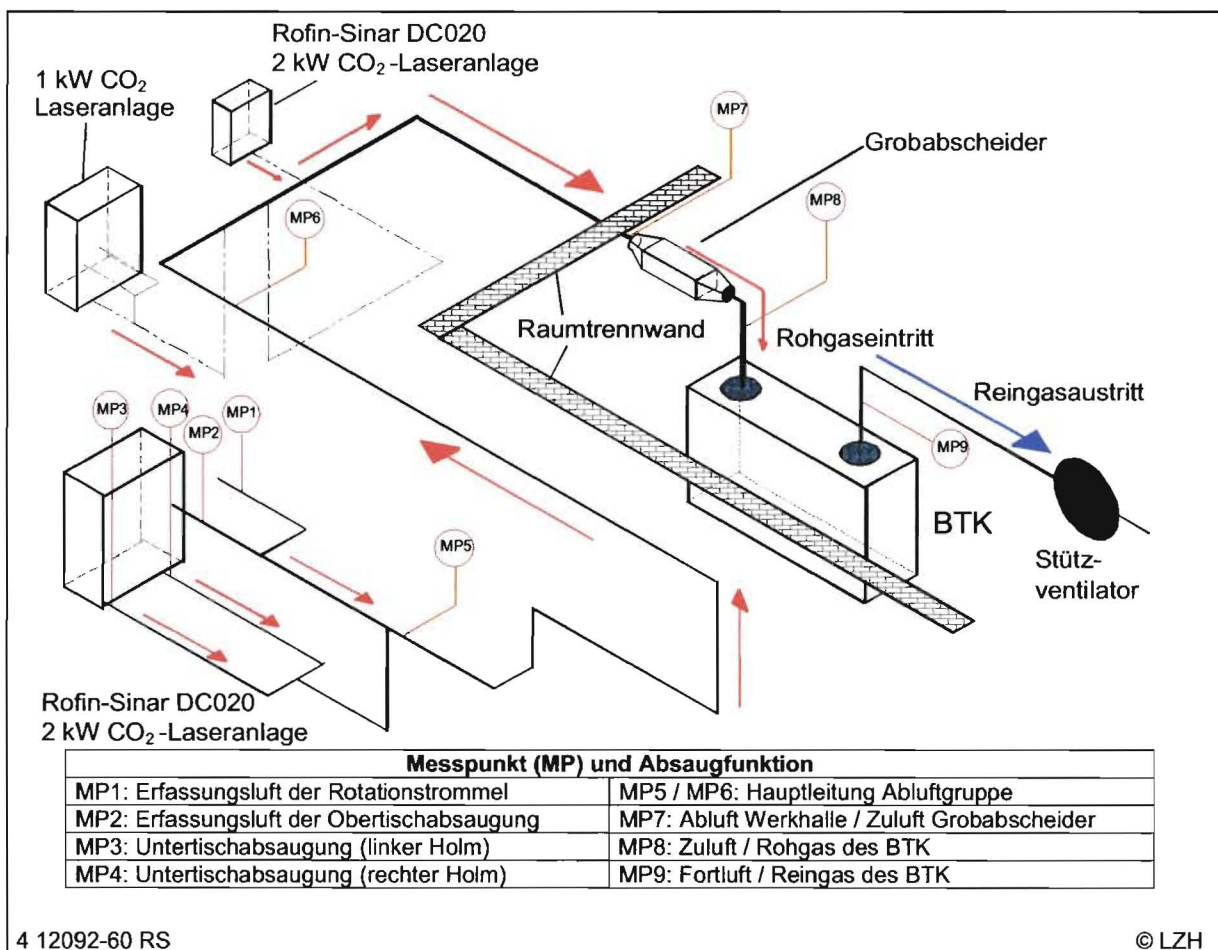


Abbildung 2: Isometrische Darstellung der Abluftrohrführung

Die vereinte Erfassungsluft wird in einem gesonderten Raum zunächst durch einen Grobabscheider (Kapitel 6.1.3.1) und anschließend durch die Biotropfkörper-Anlage (Abbildung 3) geleitet.

Die VDI-Richtlinie 3477 [15] schreibt Emissionsmessungen vor dem Wäscher bzw. Luftbefeuchter, zwischen Wäscher und Filter und nach dem Filterbett vor. Bei der bestehenden Anlage wird Befeuchtung des Filterbettes durch eingebaute Beregnungseinrichtungen zyklisch vorgenommen, so dass zwei Messstrecken (MP7 und MP8 in Abbildung 2), vor und nach dem Filterbett, eingerichtet wurden. Die Messkammern besitzen eine Einlauf- und Auslaufstrecke entsprechend dem vielfachen des hydrodynamischen Durchmessers und sind mit jeweils 3 Stutzen zur Probenahme im Mittelpunkt des Strömungsquerschnittes versehen. Des weiteren sind Messlanzen in die Filterpackung eingebracht (Abbildung 22) um Höhen- und Flächengradienten messtechnisch erfassen zu können. Ergänzend sind Messstellen vor dem Grobabscheider und an relevanten Punkten der Laseranlagen gemäß der isometrischen Darstellung der Abluftrohrführung (Abbildung 2) eingerichtet.

Die Abluftreinigungsanlage besteht aus einem zweistufigen Tropfkörper und der zugehörigen Wassertechnik. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wird das Rohgas von oben in die erste Stufe des Biotropfkörpers eingeleitet und durchströmt vertikal das erste Füllkörperschüttungssegment. Anschließend wird das Rohgas umgelenkt und durchströmt das zweite Segment der Füllkörperschüttung von unten nach oben, um als Reingas aus dem Biotropfkörper auszutreten. Der erforderliche Volumenstrom wird mit dem externen Ventilator realisiert, welcher dem BTK saugend nachgeschaltet ist.

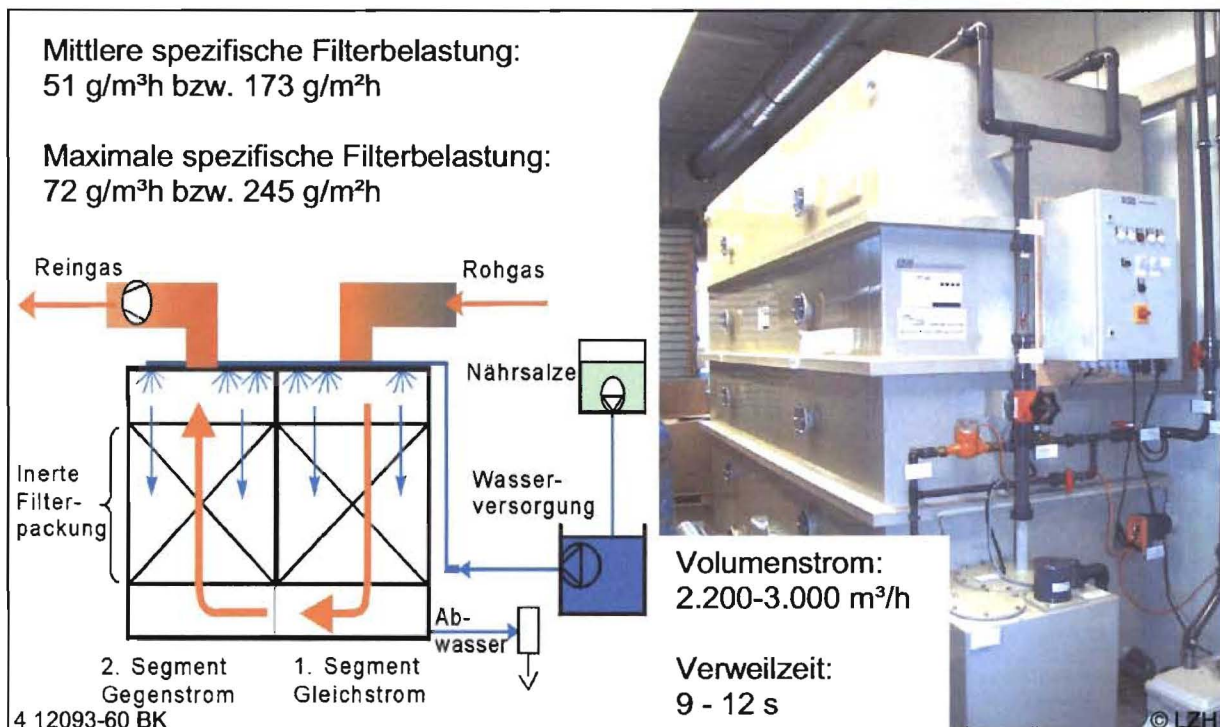


Abbildung 3: Photo und Prinzipskizze des Biotropfkörpers der M+W Zander Facility Management GmbH, Nürnberg.

Die angeströmte Filterfläche beträgt 2,14 m². Das Netto-Filtervolumen (Volumen der Polyuerthanschaumfüllung) beträgt 7,28 m³, so dass Verweilzeiten von 9 -12 s bei maximalen spezifischen Filterbelastungen 72 g/m³h bzw. 245 g/m²h bei einem mittleren Volumenstrom von 2.600 m³/h realisiert sind.

6.1.2 Erfassungsgraderhöhung und Minimierung der Absaugleistung

Die Erhöhung des Erfassungsgrades erzielt die Optimierung der Strömungsverhältnisse vom Ort der Strahl-Stoff-Wechselwirkung am Laser-Arbeitsplatz bis zum Biotropfkörper. Durch konstruktive und lufttechnische Maßnahmen wird der Erfassungsgrad am Entstehungsort der Emissionen erhöht. Der wirtschaftliche Aspekt der Einsparung von Lüfterleistung (neben ganzen Lüftungskomponenten) wirkt hierbei synergisch zur Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades des Biotropfkörper-Filters [21,22]. Folglich wird sowohl der Stoffübergang durch Erhöhen der treibenden Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Biofilm verstärkt als auch der lüftungstechnische Aufwand verringert.

Die extrem geruchsintensiven und gesundheitsgefährdenden gas- und partikelförmigen Emissionen der Laserbearbeitung von Holz müssen mittels geeigneter Abgasersassungssysteme vom Arbeitsplatz entfernt und abgeführt werden. Hierzu werden nach dem Stand der Technik Untertischabsaugungen mit hohem Absaugvolumenstrom und ergänzend Absaugeinrichtungen am Laserbearbeitungskopf eingesetzt. Zur grundsätzlichen Vermeidung von hohen Immissionskonzentrationen müssen die optimalen Prozessgrößen hinsichtlich geringen Emissionsquellstärken eingehalten werden. Da jedoch optimale Bearbeitungsergebnisse die Wirtschaftlichkeit einer Laseranlage wesentlich bestimmen, ist die Quantität laserinduzierter Emissionen nur bedingt durch Prozessstellgrößen manipulierbar. Zur Erfassung der Emissionen werden gemäß Abbildung 4 voll- und teilgekapselte Systeme eingesetzt, die folgende Nachteile aufweisen: Zur Einhaltung von Mindest-Strömungsgeschwindigkeiten müssen bei der Teilkapselung hohe Absaugvolumenströme (ca. 1.000 m³/h) realisiert sein, was wiederum hohe Ventilatorleistungen bedingt. Bei einer Vollkapselung hingegen wird die Zugänglichkeit des Bearbeitungsbereiches stark eingeschränkt.

Die gezielte Führung der Erfassungsluft durch Direktabsaugung am Laserkopf kann während des Bearbeitungsprozesses bei gleichzeitiger Einhaltung der MAK-Werte mit geringen Absaugvolumenströmen (50 - 160 m³/h) betrieben werden. Auch die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Abluftreinigungskonzeptes kann durch gezielte Emissionserfassung mit folglich höheren Schadstoffkonzentrationen sinnvoll gesteigert werden [21, 23].

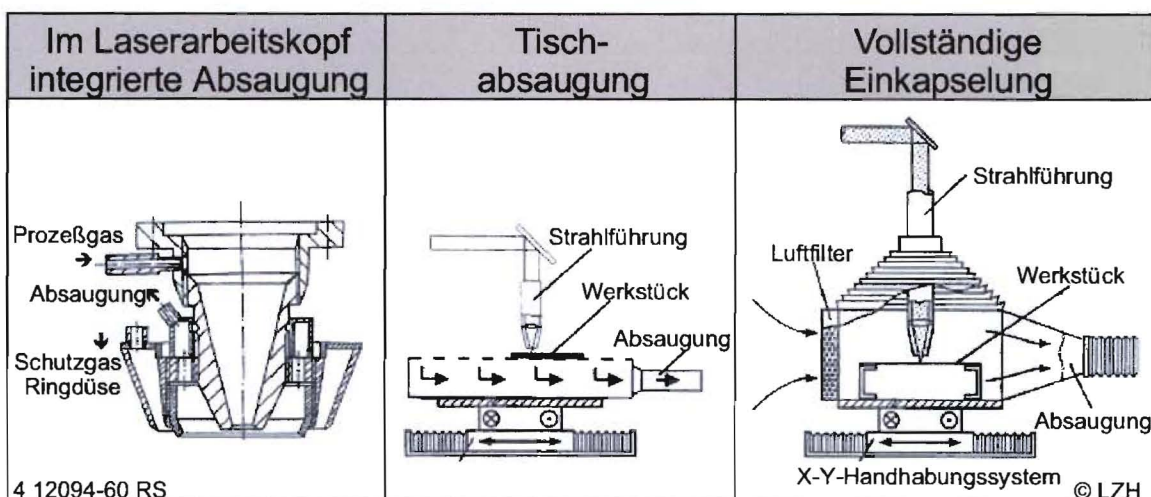


Abbildung 4: Emissionserfassungsmöglichkeiten an Laseranlagen [21]

6.1.2.1 Erfassungsgraderhöhung an der Laseranlage

Durch konstruktive und lufttechnische Maßnahmen kann der Erfassungsgrad am Entstehungsort der Emissionen erhöht werden. Es werden sowohl an der Bearbeitungsstelle als auch an der Abluftführung Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Bereits durch einfache konstruktive Maßnahmen kann die Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration in der Abluft wesentlich erhöht werden. Die Konstruktion eines Absaugkopf-Prototypen wird für die lasergestützte Schichtholzbearbeitung am Laser Zentrum Hannover erprobt [23,24] und in verbesserter Fluidodynamik in der Stanzformen-Produktion eingesetzt.

An die Laserkopfabsaugung werden folgende Anforderungen gestellt:

- Gewährung optimaler Laser-Bearbeitungsergebnisse,
- hohe Wirtschaftlichkeit durch Verringerung der Absaugleistung,
- hohe Prozesssicherheit,
- effiziente Erfassung von Gefahr- und Geruchsstoffen,
- lärmindernde Wirkung,
- vollständige Übertragbarkeit auf die Unternehmen dieser Branche.

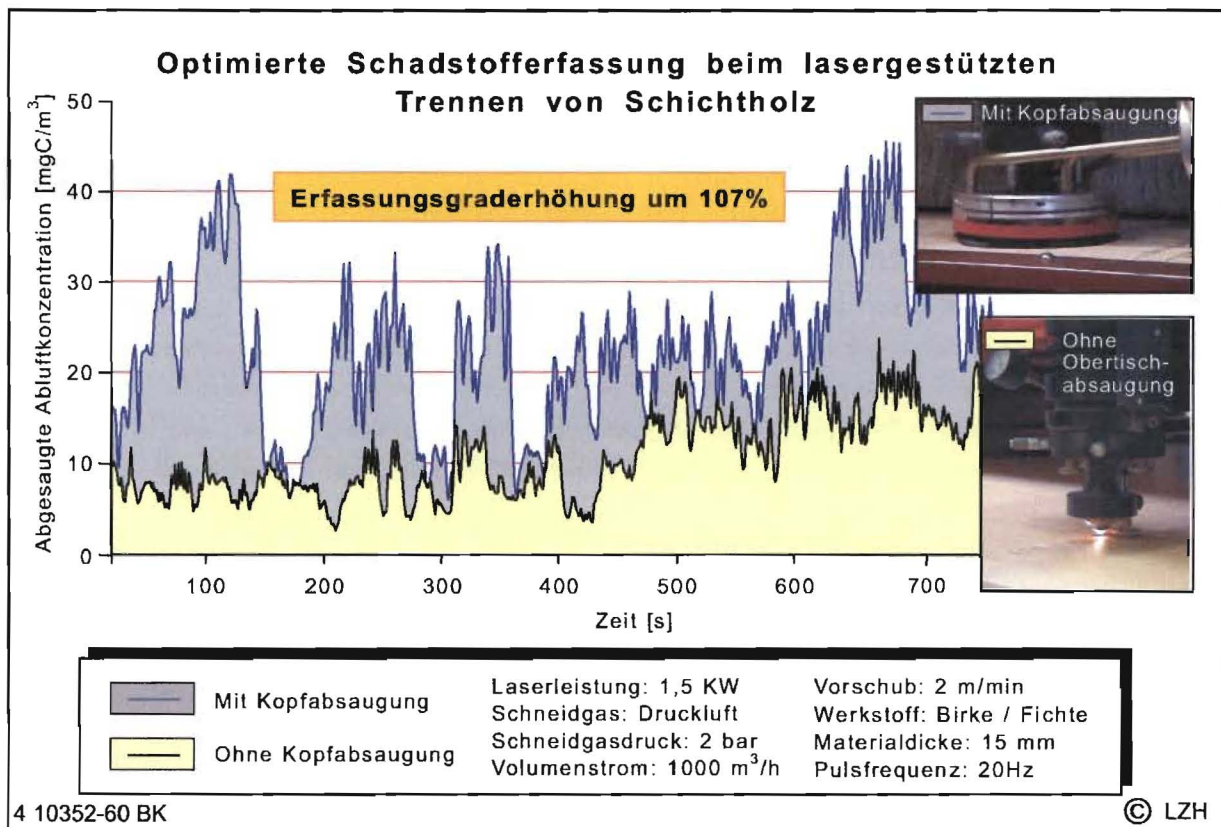


Abbildung 5: Verbesserung der Erfassung von Gefahrstoffen am Laser-Arbeitsplatz bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung

In Abbildung 5 sind die erfassten Konzentrationen gasförmiger Abluftinhaltsstoffe für eine Lasermaschine mit integrierter Obertischabsaugung der nicht optimierten Verfahrensvariante gegenüber gestellt. Unter Beachtung der Erkenntnis, dass im untersuchten Konzentrationsbereich der Stoffübergang im Biotropfkörper mit steigender Rohgaskonzentration verbessert wird, ist neben einer Steigerung des Immissionschutzes auch

die in Kapitel 6.1.3.5 dokumentierte Steigerung der Anlageneffizienz erreichbar. Es wird deutlich, dass die gewerbehygienischen Bedingungen ohne zusätzlichen Lüftungstechnischen Aufwand wesentlich verbessert werden können. Als positiver Nebeneffekt dieser Erfassungsgraderhöhung ist die erwartete Verbesserung der Produktqualität hinsichtlich am Produkt adsorbierter und geruchsrelevanter Stoffe hervorzuheben. Durch die effiziente Absaugung verringern sich die Wechselwirkungszeiten zwischen gasförmigen Komponenten und dem Produkt. Wie in Abbildung 5 zu sehen, ist eine Erhöhung der Kohlenwasserstoffeffassung um 107 % erzielt worden. Die Konstruktion erforderte aufgrund von Anhaftungen der hygroskopischen und adhäsiven Aerosole unter Produktionsbedingungen im Langzeittest ein häufiges Reinigen. Daher sind im folgenden Ergebnisse zur Minimierung des Reinigungsaufwandes und gesteigerter Erfassungseffizienz weiter optimierten Saugdüsen dargestellt. Abbildung 6 zeigt zwei realisierte Absaugdüsen. Das Konzept beinhaltet im Gegensatz zu bereits patentierten fluiddynamischen Vorrichtungen [25 -30] sowohl ein Druckvorhang als auch die in Abbildung 6 dargestellte Emissions-Erfassungsgeometrie. Typ 1 ist mit einer Vierpunktabsaugung ausgestattet und für geringere Erfassungsvolumenströme ausgelegt. Dieser Typ eignet sich beispielsweise für die Stanzformenherstellung mit Sealed-off-CO₂-Lasern, bei der durch eine geänderte Prozessführung und vergleichsweise verminderte Vorschubgeschwindigkeiten auch geringere Emissionsraten auftreten. Bei der Saugdüse Typ 2 wurde eine Zweipunktabsaugung mit geringeren Strömungswiderständen realisiert, welche im folgenden hinsichtlich Ansauggeschwindigkeit und Erfassungseffizienz charakterisiert wird.

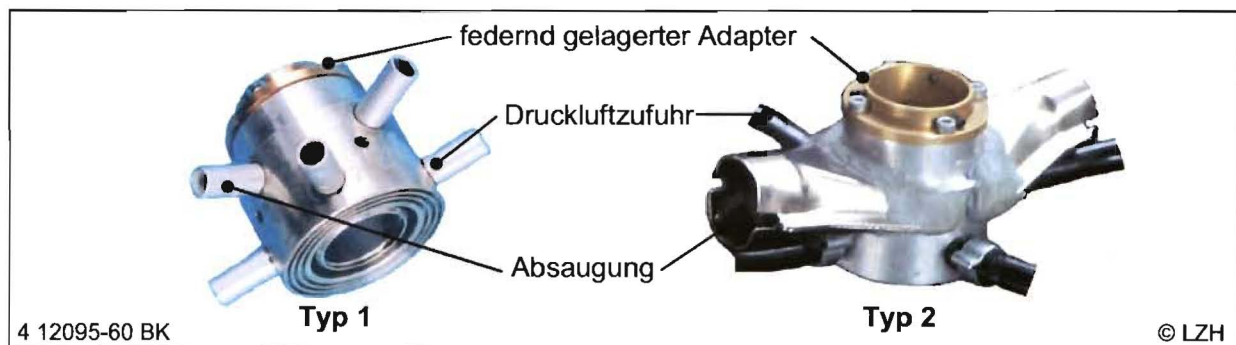



Abbildung 6: Photos der Erfassungsdruckluft gestützten Absaugdüsen. Links: Vierpunktabsaugung; Rechts: Zweipunktabsaugung

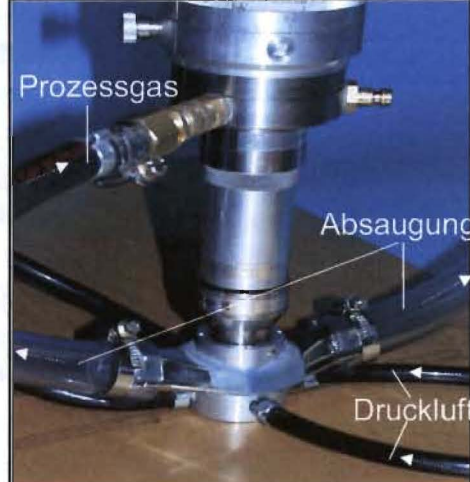
Die Druckluftzuführungen sind so ausgelegt, dass einerseits keine Störungen des Laserbearbeitungsprozesses durch unerwünschte Beeinflussung der zum Laserstrahl koaxial zugeführten Prozessgasströmung erfolgt. Andererseits erzielt die Erfassungsdruckluft eine Strömungsumkehr an der Stanzformenoberfläche, so dass Immissionen effizient erfasst und ohne relevante Saugdüsenverschmutzung abgeführt werden können. Oberhalb des Werkstückes treten zu erfassende Emissionen während der Stanzformenherstellung im wesentlichen beim Einstechvorgang (Laserstrahlbohren mit anschließendem Schneiden) auf. In Abbildung 7 ist sowohl der Einstechvorgang ohne Obertischabsaugung als auch die Lasermaterialbearbeitung von Schichtholz mit optimierter Saugdüse dargestellt. Da die Laserfokussieroptik und folglich auch der Laserkopf beim Einstechen zur Erzielung hoher Schnittgüten unter Änderung des

Abstandes zur Schichtholzoberfläche nachgeführt wird, ist es essentiell, dass das Absaugkonzept auch unter variierenden Abständen effizient funktioniert.

Lasertyp: CO ₂ -Laser	Pulsspitzenleistung: 2 kW	Material: Sperrholz
Wellenlänge: 10,6 μm	Linsenbrennweite: 7,5''	Materialstärke: 9 - 18 mm
Betriebsart: gepulst	Vorschub: 2 m/min.	Schnittfugenbreite: 0,7 mm
Pulsfrequenz: 40 Hz	Streckenenergie: ≈ 48 kJ/m	Prozessgas: Druckluft 3 MPa



Mehrfacher Einstechvorgang
(Pulsdauer 16 - 50 ms)



Erfassungsvolumenstrom: 160 m³/h
Druckvorhang: Druckluft 2 MPa

4 12096-60 BK © LZH

Abbildung 7: Erfassungsraderhöhung beim Laserstrahlschneiden. Links: Einstechvorgang ohne Obertischabsaugung. Rechts: Laserstrahlschneiden von Schichtholz mit optimierter Saugdüse

Die Ergebnisse zur Ermittlung des optimalen Abstandes zwischen Düse und Werkstück sind in Abbildung 8 dargestellt. Durch die Charakterisierung der Ansauggeschwindigkeit an vier Messstellen des Saugadapters, welche im Saugspalt zwischen Sperrholz und Saugadapter äquidistant zum Laserfokus positioniert sind, wird deutlich, dass der Erfassungsvolumenstrom mit dem Abstand bis zum Maximum bei 6 mm zunimmt. Mit zunehmendem Abstand zwischen Düse und Werkstück fällt der Erfassungsvolumenstrom um 20-30% ab.

Zur Auslegung von Erfassungseinrichtungen müssen zu erzielende Volumenströme und Schadstoffbeladungen bekannt sein, um die minimal erforderliche Strömungsgeschwindigkeit zu determinieren und eine Gefahrenabschätzung hinsichtlich Explosionsgefahr und Undichtigkeiten durchführen zu können.

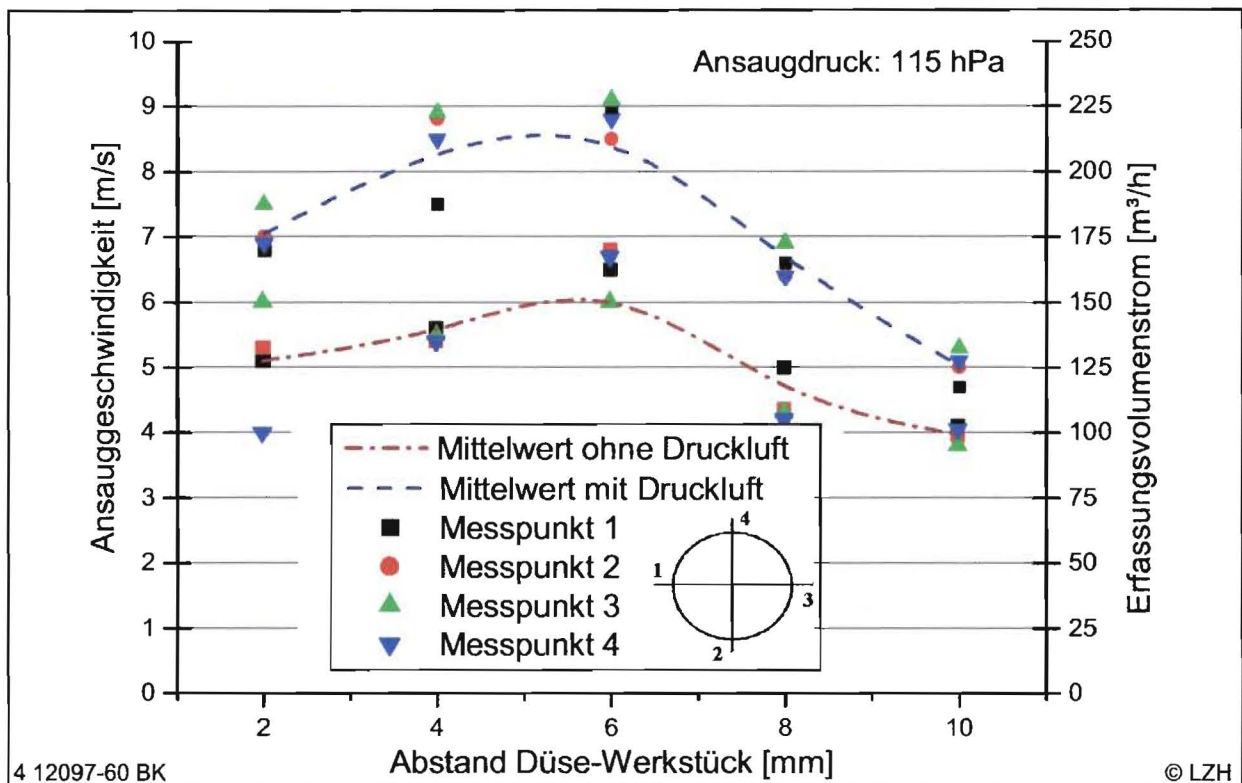


Abbildung 8: Ermittlung des optimalen Abstandes zwischen Düse und Werkstück durch Charakterisierung der Ansauggeschwindigkeit und des Erfassungsvolumenstroms des Saugadapters. Oben: mit Druckluft. Unten: ohne Druckluft

Um die lüftungstechnischen Komponenten einer Laserschneidanlage hinsichtlich Geometrie und Strömungsgeschwindigkeit optimal zu skalieren, dienen orientierende Messungen während der Prozesszustände Einstechen und Schneiden bei der lasergestützten Stanzformenherstellung. In Abbildung 9 ist die Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlperforieren entsprechend des wiederholten Einstechvorganges bei der Stanzformenherstellung in Abhängigkeit des Einsatzes von Erfassungsdruckluft dargestellt. Beim Einstechen treten in der Erfassungsluft der Saugdüse Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen von 630-900 mgC/m³ auf, wohingegen im Erfassungsluftkanal der Untertischabsaugung wesentlich geringere Konzentrationen (<130 gC/m³) auftreten. Nach Normierung auf die jeweiligen Volumenströme wird deutlich, dass durch die Saugdüse 67 - 77 Massenprozent der gesamt emittierten Schadstoffe (VOC) erfasst werden. Folglich kann der Absaugdüse eine hohe Effizienz zugesprochen werden. Obwohl der Einsatz von Druckluft beim Einstechvorgang (Laserstrahlbohren) zu einer Verringerung des Erfassungsverhältnisses zwischen Saugdüse und Untertisch führt, ist der Einsatz unterstützender Erfassungsdruckluft vor dem Hintergrund der Abstandstoleranz der Erfassung zu empfehlen. Ferner wirkt sich die Druckluftunterstützung beim Laserstrahlschneiden positiv auf die Erfassungsgraderhöhung aus.

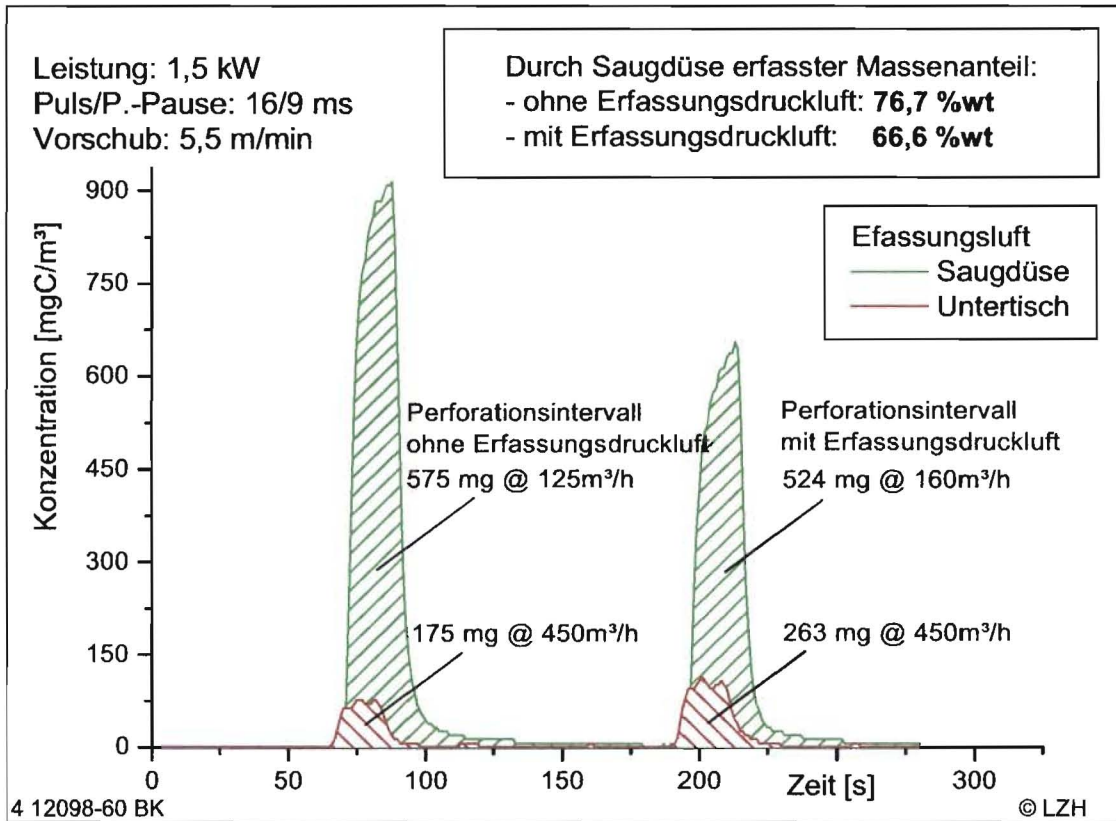


Abbildung 9: Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlperforieren entsprechend des wiederholten Einstechvorganges bei der Stanzformenherstellung

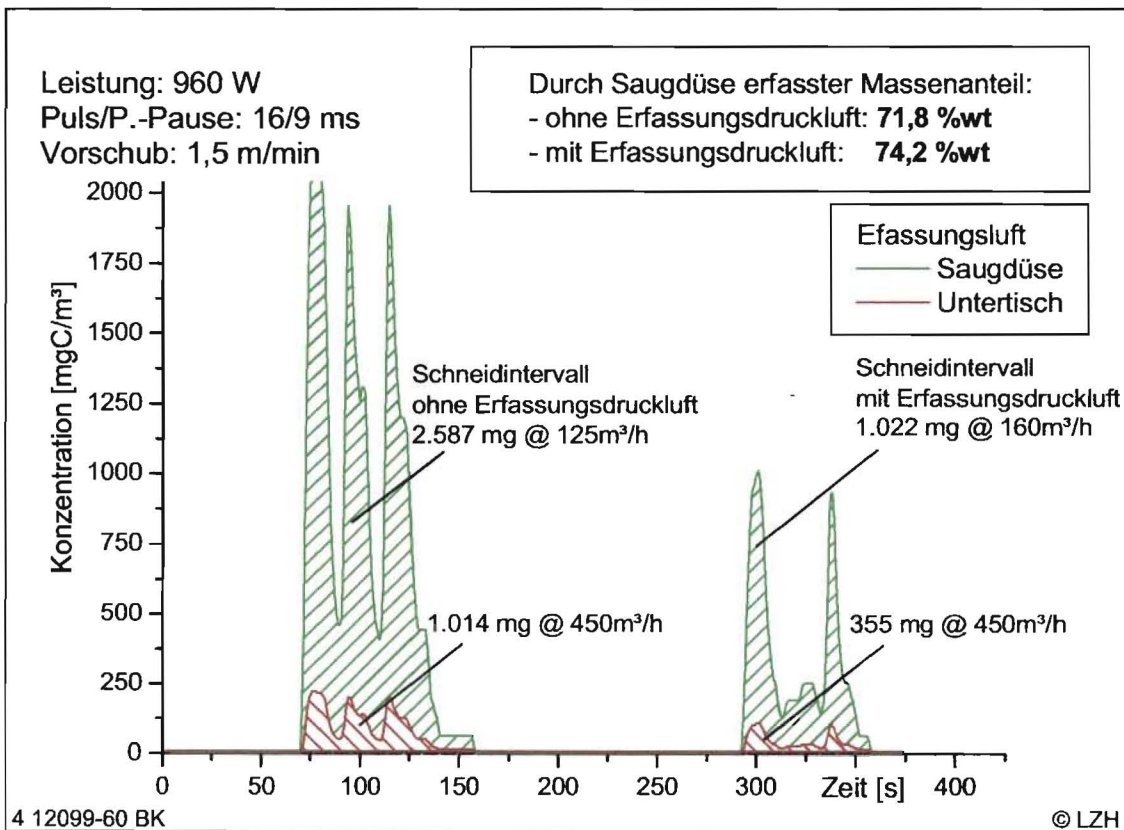


Abbildung 10: Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlschneiden von Birken-sperrholz

In Abbildung 10 ist die Erfassungsgraderhöhung beim Laserstrahlschneiden von Birkenperrholz dargestellt. Beim Laserstrahlschneiden treten in der Erfassungsluft von Saugdüse und Maschinenbettaugung aufgrund des erhöhten Materialaustrages höhere Konzentrationen als beim Laserstrahlperforieren auf. So werden durch die Saugdüse 72-74 Massenprozent der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen erfasst, wobei ein Massenstrom von 60 - 110 g/h die Saugdüse passiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die demonstrierten Absaugkonzepte zur Steigerung der Gewerbehygiene beim lasergestützten Stanzformenbau beitragen können. Ferner ist in vielen Einsatzfeldern der Laserstrahlbearbeitung von Holzwerkstoffen maßgeblich, dass von den Produkten während ihrer Einsatzdauer keine merklich und unangenehmen Gerüche ausgehen. So werden von einigen Branchen bereits Einstufungen der Produkte nach olfaktometrischen Messungen vorgenommen: Neben der Beurteilung von Möbeln anhand ihrer Emissionen [31] fordert auch die Automobilindustrie in der Richtlinie VDA 120 geringe Geruchsemissionen. Entwicklungen auf europäischer [32] und nationaler [1] Ebene haben dazu beigetragen, dass effektive Konzepte zur prozessintegrierten Minimierung von Schadstoffen bei der Laserstrahlbearbeitung Anwendung finden können. Derzeit werden am Laser Zentrum Hannover e.V. weitere Varianten der integrierten Absaugung erprobt.

6.1.2.2 Optimierung der Lüftungstechnik

Die laserinduzierten Emissionen entstehen an drei CO₂-Laserbearbeitungsstationen. Die gas- und partikelförmigen Emissionen werden über ein Rohrführungssystem zu einem Hauptstrang zusammengeführt. Die Grobstaubfraktion und die anfallenden Positionslöcher aus der Stanzformenherstellung werden durch einen Schwerkraftabscheider aus der Abluft entfernt, während die Feinstpartikelfraktion und die gasförmigen laserinduzierten Emissionen durch den nachgeschalteten Biotropfkörper metabolisiert werden. Die Erfassung der Emissionen an den jeweiligen Bearbeitungsplätzen muss sowohl oberhalb als auch unterhalb des plattenförmigen oder halbschalenförmigen Werkstoffes erfolgen. Eine Absaugung ist direkt am Laserkopf adaptiert, um die anfallenden Emissionen oberhalb der Bearbeitungsplatte zu erfassen. Die anderen beiden Punkte dienen der Erfassung der Emissionen unterhalb der Schichtholzplatte (Untertischabsaugung).

Ziel der Optimierungsmaßnahmen ist es, die Einzelabsaugungen zu Gruppenabsaugungen zusammenzufassen. Die mit einer bedarfsgeregelten Steuerung der Lüftungsgruppen über Motorklappen ausgestatteten Absauggruppen werden zu einer Zentralabsaugung zusammengefasst.

Für die Auslegung der Ventilatorleistung der zu installierenden Zentralabsaugung wurde der entstehende Druckverlust über das Rohrleitungssystem messtechnisch erfasst. Maßgebend hierfür ist die Rohrleitungsstrecke die den höchsten Druckverlust erzeugt. Die adaptierte Kopfabsaugung an der 2 kW-CO₂ Laseranlage (DC020 der Rofin-Sinar Laser GmbH) erzeugt den höchsten gemessenen Druckverlust mit 1.670 Pa. Des Weiteren wird mit einem Druckverlust des Grobabscheiders von 200 Pa und der Biotropfkörper-Anlage mit 500 Pa kalkuliert. Somit ist mit einem Gesamtdruckverlust von ca. 2.500 Pa (einschließlich Krümmer und Kreuzstücke) zu rechnen, die für die Auslegung des Ventilators maßgeblich ist. Um Staubablagerungen an den Rohrwandungen zu verhindern, sind Strömungsgeschwindigkeiten von 12 – 18 m/s erforderlich. Das Rohrleitungssystem ist so ausgelegt, dass in der Zuführung zum Biotropfkörper 17,3 m/s bei einem Rohrquerschnitt von 300 mm erreicht wird.

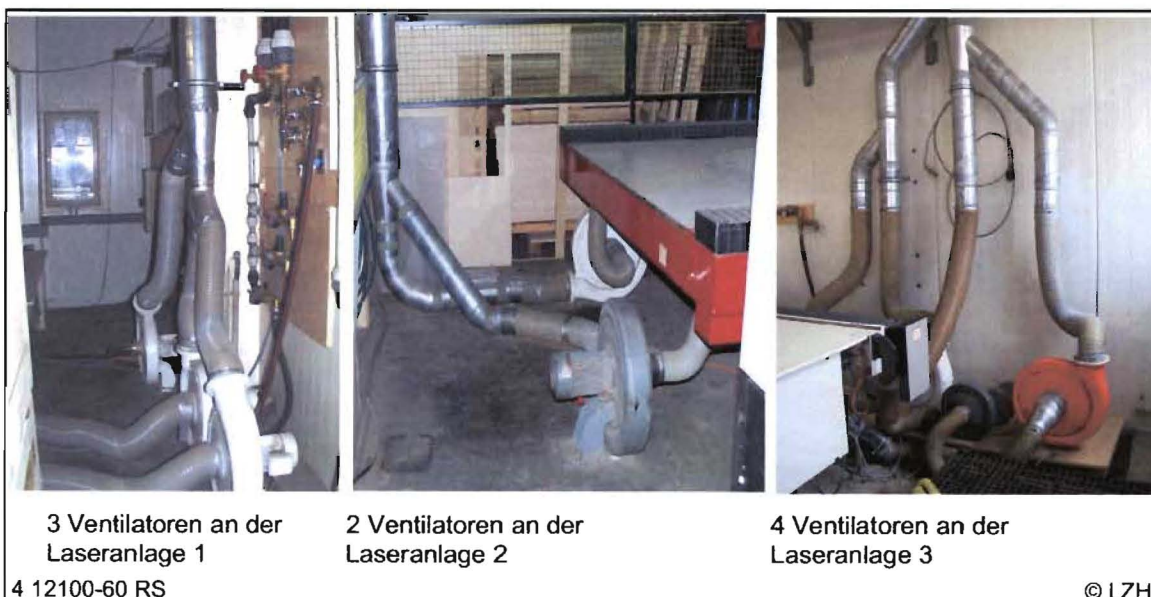


Abbildung 11: Stützventilatoren zur Ablufterfassungssystem vor den Umbau-maßnahmen

Die Erzeugung des benötigten Volumenstromes wurde vor den Umbaumaßnahmen mit Stützventilatoren realisiert, welche strömungstechnisch den Laseranlagen direkt nachgeschaltet waren (Abbildung 11), so dass die Abluft einerseits durch die Maschinenventilatoren in den Biotropfkörper eingedrückt und andererseits durch einen Stützventilator angesaugt wurde. Hierbei traten mehrere Probleme hinsichtlich der Erfassung der Abgase auf. Sobald an einer bzw. zweien der Laserbearbeitungsstationen Produktionspausen eingehalten werden, wird ein hoher Volumenanteil des Abgases aus der dritten Bearbeitungsstation in diese zwei Anlagen und verfahrenstechnisch bedingten Öffnungen der Tropfkörperanlage gedrückt, so dass eine Optimierung der Strömungsverhältnisse dringend erforderlich war. In der Tabelle 2 sind die unterschiedlichen Abluftvolumenströme vor den Umbaumaßnahmen in Abhängigkeit von dem Betrieb der jeweiligen Laseranlagen aufgelistet.

Tabelle 2: Volumenströme während des Produktionsbetriebs vor den Optimierungsmaßnahmen

Betrieb der Laseranlagen (Nummerierung wie in Abbildung 2)	Volumenstrom [m ³ /h]	
	zu Projektbeginn	nach Optimierungsmaßnahmen
Nur Stützventilator am Ausgang des BTKs	2.800	-
Laser 2	3.180	n.b.
Laser 2+Laser 3	3.490	n.b.
Laser 2+Laser 3 (inkl. Rundform)	3.560	2.700
Laser 2+Laser 3+Laser 1	4.700	3.000
Laser 1+ Laser 2+Laser 3 (inkl. Rundform)	4.800	3.000

Die Spezifikation der Biotropfkörperanlage definiert als maximalen Volumenstrom 3.500 m³/h, da andernfalls mit Einbußen in der Reinigungsleistung zu rechnen ist. Im Rahmen der Optimierungsmaßnahmen sind die 9 Stützventilatoren aus dem Rohrführungssystem entfernt worden, sodass die Absaugung der laserinduzierten Emissionen nur saugend durch einen Ventilator am Reingasaustritt der Biotropfkörperstufe erzeugt wird. Folglich kann einerseits der Abgaserfassungsgrad erhöht werden, weil das Ausblasen der Abgase über die Laserstationen verhindert wird, andererseits wird der Lärmpegel in der Werkshalle erheblich reduziert. In Tabelle 2 sind die Volumenströme vor und nach den Umbaumaßnahmen gegenübergestellt. Der mittlere Abluftvolumenstrom beträgt 3.000 m³/h, der resultierende mittlere Druckverlust über den Biotropfkörper beträgt 2 hPa und die Ablufttemperatur 25°C. Somit können die für die Effizienz der Abgasreinigungsleistung erforderlichen Abluftrandbedingungen erreicht werden. Die Verweilzeit des Abluftstromes in dem Biotropfkörper wird gesteigert, so dass die Kontaktzeit als wichtiges Kriterium für effiziente Abbauleistungen der Biotropfkörperanlage erhöht wird.

Als Folge der Maßnahmen sind die Lüftungsbedingten Betriebskosten erheblich minimiert. Durch den Ersatz eines Ventilators mit einer Leistungsaufnahme 1,5 kW anstatt den vor den Umbaumaßnahmen eingesetzten 9 Ventilatoren mit einer Leistungsaufnahme von jeweils 1,5 kW resultiert neben der Lärminderung auch eine Senkung der Energiekosten mit einer Energieeinsparung von 12 kW. Bei einer durchschnittlichen Wochenbetriebszeit von 52,5 h und 220 Arbeitstagen im Jahr ergeben sich 2.310 Jahresbetriebsstunden, so dass bei 70 Cent/kWh die Betriebskosten somit um 1.940 Euro/Jahr gesenkt werden können. Durch den Einbau von motorgesteuerten Drosselklappen werden weitere Kosteneinsparungen infolge der bedarfsgerechten Absaugung und Minderung des Wärmeentzugs sowie Senkung des Abluftvolumenstromes um 1.800 m³/h aus der Werkshalle erzielt.

Die Ergebnisse zur Erfassungsgraderhöhung und Minimierung der Absaugleistung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Lüftungstechnische Optimierungen zur Erhöhung des Erfassungsgrades führen zur Optimierung der Schadstofffassung, der Lärmemission und der notwendigen Gesamtlüfterleistung durch Änderung der Abluftführung der 3 Laseranlagen.
- Die Erhöhung des Erfassungsgrades an der Laseranlage beträgt 107 %.
- Die Erhöhung des Erfassungsverhältnisses zwischen Obertischabsaugung (Saugdüse) und Untertischabsaugung erreicht bis zu 77 Gewichtsprozent der erfassten Schadstoffströme.
- Die Schadstofffassung erfolgt bedarfsgerecht durch prozessgesteuerte Schaltung der Absauggruppen der 3 Lasermaschinen.
- Die Verringerung des Abluftvolumenstromes beträgt 1.800 m³/h.
- Die spezifische Filterbelastung und Diffusion im BTK wird verbessert und der Druckabfall über der Biotropfkörperanlage um ca. 1 hPa verringert.
- Die Lüftungsbedingten Jahresbetriebskosten werden um 1.940 Euro/Jahr gesenkt.
- Die deutliche Verringerung der Geruchsbelästigung am Laserarbeitsplatz und des Lärmpegels in der Werkshalle wird erreicht.

Die resultierenden Veränderungen zur Erzeugung des Volumenstromes demonstrieren ein modellhaftes Ablufferfassungssystem für die lasergestützte Stanzformenherstellung. Des Weiteren lassen sich die Ergebnisse auf Laserschneidanlagen der Holz- und Holzwerkstoffbearbeitung übertragen.

6.1.3 Verfahrens- und Anlagentechnik

Ziel der verfahrens- und anlagentechnischen Maßnahmen ist die Ermittlung geeigneter Betriebsparameter und Skalierungskenngrößen, welche die Senkung der Betriebskosten und Modellierung der Abluftreinigungsanlage ermöglichen. Die Arbeiten lassen sich wie folgt gliedern:

- Planung und Auslegung der Filteranlage und des Ventilators sowie des Partikel-Grobabscheiders für luftgetragene Stanzformenpositionslöcher und Grobstaub
- Aufbau und Aufstellung der Anlage beim Stanzformenhersteller Fa. Hesse Stanzwerkzeuge GmbH, Alfeld und Integration in das bestehende Abluftsystem ohne wesentlich Störung des Produktionsprozesses
- Verfahrenstechnische Optimierung des BTK-Verfahrens und Charakterisierung des Strömungsverhaltens sowie Ermittlung von Skalierungskenngrößen
- Aufbau und Integration der reduzierten BTK-Anlage zum dauerhaften Gebrauch in Hinblick auf die Serienfertigung
- Erstellung eines Pflichtenheftes

6.1.3.1 Grobabscheider

Positionslochausschnitte, die durch die Absaugeinrichtung aus dem Maschinenbereich ausgetragen werden, können den Biotropfkörper auf längere Sicht verstopfen und gleichzeitig die Biozönose schädigen. Insbesondere bei hohen Ansauggeschwindigkeiten muss ein Grobabscheider vor den Biotropfkörper geschaltet werden.

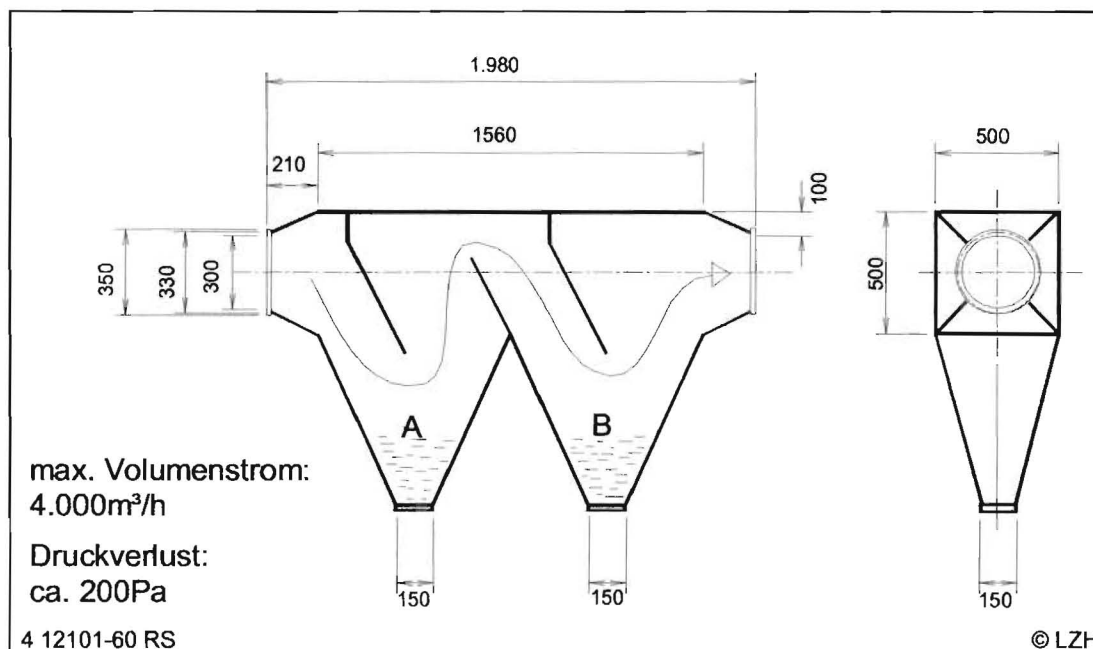


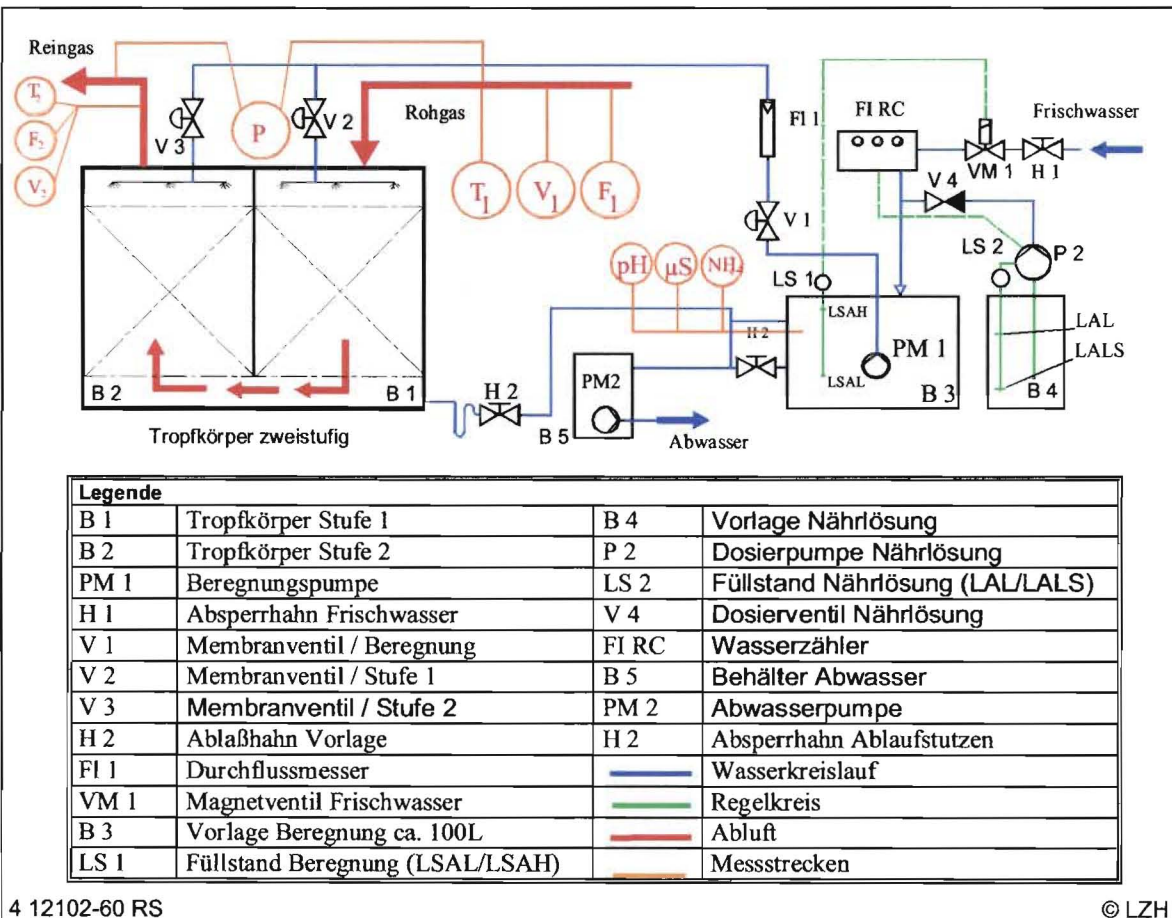
Abbildung 12: Schwerkraftabscheider der Fa. Müller Kunststofftechnik, Hennef-Bierth für Grobstaub und Positionslochausschnitte aus der lasergestützten Stanzformenherstellung

Die eingebauten Umlenkplatten des Schwerkraftabscheiders bewirken ein Umlenken des Abluftvolumenstromes. Die Grobpartikel in der Abluft können aufgrund ihrer Massenträgheit dem Abluftstrom nicht folgen und werden in zwei Vorrichtungen

abgeschieden. In zeitlichen Abständen müssen die Vorrichtungen entleert werden. In Abbildung 12 ist der Schwerkraftabscheider dargestellt.

6.1.3.2 Biotropfkörper-Verfahren

Das Biotropfkörper-Verfahren, welches verfahrenstechnische Komponenten eines Biofilters und Biowäschers besitzt, kann als Rieselbettreaktor bezeichnet werden [16, 33]. Die Nachteile des Schütttschichtfilter-Verfahrens (hoher Druckabfall, geringe Porosität, geringe Standzeit der Filterpackung, lange Adaptionsphase) und Biowäscher-Verfahrens (Schaumbildung, geringe spezifische Reaktionsfläche) können durch verfahrenstechnische Maßnahmen kompensiert werden. Das von der M+W Zander Facility Management GmbH weiterentwickelte Biotropfkörper-Verfahren wird einerseits der geringen Wasserlöslichkeit der festen und gasförmigen Emissionen durch starke Berieselung gerecht und bietet andererseits eine große spezifische Reaktionsfläche zur biologischen Oxidation flüchtiger organischer Verbindungen. Es zeichnet sich durch einen geringen Strömungswiderstand in der Filterpackung aus. Beispielsweise beträgt der Druckverlust durch eine Tropfkörper-Pilotanlage gleichen Filtermaterials mit einem Filtervolumen von 4 m³ bei 1.000 m³/h Abluftvolumenstrom auch nach mehrmonatigem Einleiten laserinduzierter Emissionen ohne Partikelvorfiltration weniger als 1 hPa [10].



4 12102-60 RS

© LZH

Abbildung 13: Verfahrens- und Regelungstechnik

Die bei der Lasermaterialbearbeitung von Schichtholz entstehenden gas- und partikelförmigen Schadstoffe werden durch die hochporöse, inerte Packung des Biotropfkörpers geleitet. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, wird der Rieselbettreaktor im ersten Segment (B1) im Gleichstrom und im zweiten Segment im Gegenstrom zur

Berieselung betrieben. Die Bauweise ermöglicht eine geringe Behälterhöhe bei einer effektiv durchströmten Filterhöhe von 3,4 m.

Die würfelförmigen Füllkörper bestehen aus Polyurethanschaum und zeichnen sich mit einer Porosität von 0,976 besonders gut für die Füllkörperschüttung aus (Abbildung 14, linkes Foto ①). Kompaktionen der unteren Füllkörperschicht aufgrund des Eigengewichtes der feuchten Filterpackung werden durch die guten Stabilitätseigenschaften des Polyurethanschaumes ausgeschlossen. Die Dichte des Materials beträgt 25-30 kg/m³.

Zur Befüllung des Biotropfkörpers mit neuem inerten PUR-Trägermaterial werden zuerst zwei Schichten aus größeren Blöcken (50*50*40) cm³ (Abbildung 14, rechtes Foto ②) zur Stabilisierung der gesamten Füllkörperschüttung geordnet auf das Gitterrost aufgebracht. In der 2. Befüllungsstufe kommen auf diese 80 cm Füllkörperhöhe mehrere Kubikmeter der kleineren würfelförmigen Fraktion mit einer durchschnittlichen Kantenlänge von 4 cm. Für die letzte Schicht der Befüllung wird mit bereits verwendeten PUR-Trägermaterial aus Voruntersuchungen zur Abluftbehandlung aus der Laserbearbeitung von Schichtholz als oberste Schicht realisiert. Diese befinden sich im Einströmbereich des ersten Filtersegmentes und sollen eine schnelle Adaption ermöglichen (Abbildung 14, dunkle Füllkörper ③). Die Filterschüttfläche beträgt 2,14 m² und das Filterschüttvolumen einer Reaktorstufe 3,64 m³ (Gesamtfüllkörpervolumen: V_F=7,28 m³). Die Druckabfallnennkurve des Filtermaterials lässt einen Druckabfall von ca. 150 Pa für das unbewachsene Filtermaterial erwarten. Es besitzt eine wirksame Oberfläche von ca. 200 m²/m³.

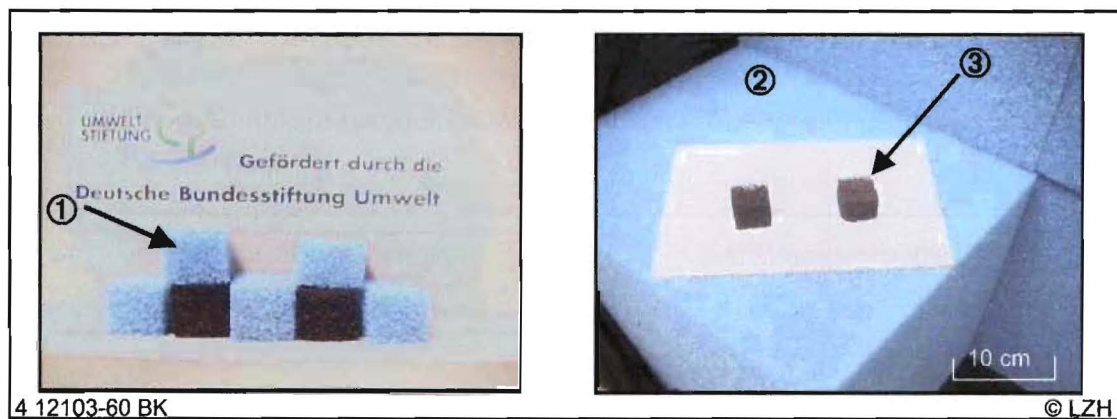


Abbildung 14: Polyurethanschaum Füllkörpermaterial

Die Anlage, die auch in Containerbauweise realisiert werden kann, ist für Abluftvolumenströme bis zu 3.000 m³_N/h und Schadstofffrachten aus 3-4 Laseranlagen konzipiert.

Auf Basis der optimalen Betriebsparameter wird ein Pflichtenheft erarbeitet. Die anliegende betriebsanweisende Checkliste (Anhang 9.4) dient der praxisgerechten Planung und Durchführung der Anlagenwartung.

6.1.3.3 Wasserförderung

Essentiell für das katalytische Medium – die immobilisierten Mikroorganismen – ist die ausreichende Wasserversorgung. Eine optimale Berieselungsdichte gewährleistet, dass Mikroorganismen auf dem inerten Material einen Biofilm ausbilden können und dass der Stoffübergang nicht durch einen zu dicken Wasserfilm vermindert wird, oder die

Mikroorganismen durch Scherkräfte entfernt werden. Über die SPS-Steuerung können die Zyklen des Wasserkreislaufes der Anlage eingestellt werden. In Abbildung 13 sind die eingebauten Ventile im Wasserkreislauf blau dargestellt. Das zweite Filtersegment sollte aufgrund der zunehmenden Luftbefeuchtung bei Durchströmung der Filterpackung schwächer beregnet werden. Die Berechnungsintervalle des Biotropfkörpers sind durch Einstellung der beiden Zeitrelais Berechnungspause und Berechnungsdauer variierbar. Neben Kohlenstoff, welcher über die Abluft zugeführt wurde, benötigen Mikroorganismen noch mehrere andere Mineralstoffe in ausreichender Konzentration. Diese Elemente, die am Aufbau der Zellsubstanz beteiligt sind, müssen in Form verwertbarer Verbindungen zur Verfügung stehen [34,35]. Kommt es zu einer Nährstofflimitierung, kann es zur Verminderung des Stoffwechsel bis zum Absterben der Organismen kommen. Die (1.000-fach) konzentrierte Nährlösung wird mittels der Dosierpumpe der Frischwasserzufuhr impulsweise zugeführt. Impulsgeber ist der Wasserzähler des Frischwassers. Für die Inbetriebnahme der Biotropfkörperanlage wird durch Einstellen der Hublänge an der Dosierpumpe die zuvor prognostizierte Menge des Nährsalzes eingestellt. Die Prognose zur Nährstoffmengeneinstellung basiert auf dem Sollverhältnis C:N:P von 100:20:1 [34]. Aus der Berechnung resultiert eine Dosierpumpenfördermenge entsprechend eines mittleren Ammoniumgehaltes von 100 - 200 ppm im Beregnungswasser. Während einer Befüllungsphase des Vorlagebehälters wird über eine Magnetdosierpumpe konzentrierte Nährlösung in den Vorlagebehälter zugegeben. Durch Einstellung der Hublänge an der Magnetdosierpumpe wird die Menge der konzentrierten Nährlösung limitiert. In der Abbildung 15 ist in der linken Darstellung die Förderleistung der Magnetdosierpumpe über die prozentuale Hublängeneinstellung aufgetragen. Im rechten Graph sind die Änderungszeitpunkte der Hublängeneinstellung bzw. das Verhältnis aus Beregnungspause zu Beregnungsdauer über den Beobachtungszeitraum dargestellt.

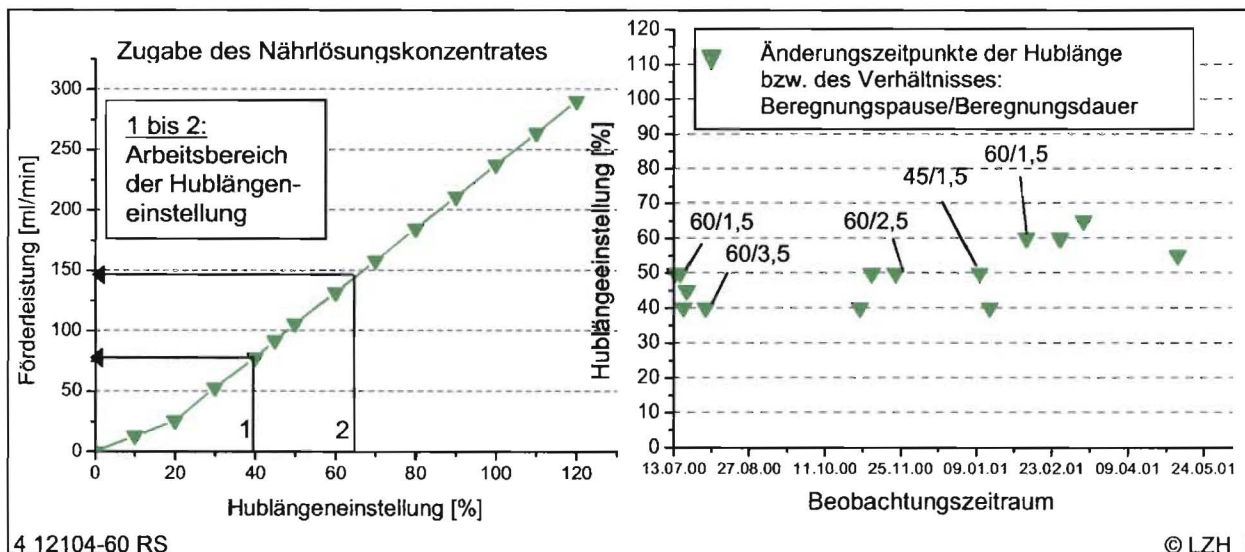


Abbildung 15: Optimaler Arbeitsbereich der Nährstoffzufuhr

Für die ausreichende Versorgung der immobilisierten Mikroorganismen mit Nährstoffen und Spurenelementen kann die zugeführte Nährstoffmenge mit der bereitgestellten Nährlösung in den Arbeitsbereichen aus der Abbildung 15 eingestellt werden. Entscheidend für einen biotechnologisch stabilen Betrieb der Anlage ist eine kontrollierte Nährstofflimitierung. In Abbildung 16 sind die Konzentrationen an Ammonium und

Phosphat im Frischwasser und Abwasser sowie die Leitfähigkeit zeitlich dargestellt. Die eingestellten Werte entsprechen den Konzentrationen der Inkubationsmedien der Mikroorganismen. Die vom Anlagenhersteller mitgelieferte Nährsalzlösung entspricht ungefähr der Zusammensetzung des Mineralmediums nach Brunner (DSMZ-Nr.457 [36]). Insbesondere in der Adaptionphase wird so einem möglichen Schock durch den Mediumwechsel entgegengewirkt. Sowohl Ammoniumkonzentration als auch Phosphatkonzentration und die Leitfähigkeit des Berieselungswassers ändern sich nur unwesentlich während des Verweilens in der Filterpackung. Der durchschnittliche Verbrauch an Nährsalzlösung durch die Mikroorganismen bestätigt die vergleichsweise geringen Massenstrom an organischem Kohlenstoff, so dass geschlossen werden kann, dass die Zugabe an Nährlösung nicht limitierend auf den Biofilm wirkt.

Durch die gleichmäßige Zugabe der Nährlösung während des kontinuierlichen Betriebes des BTK stellt sich ein stabiler pH-Wert ein, so dass keine Säure oder Base zudosiert werden muss und folglich auf diese Regelungstechnik verzichtet werden kann.

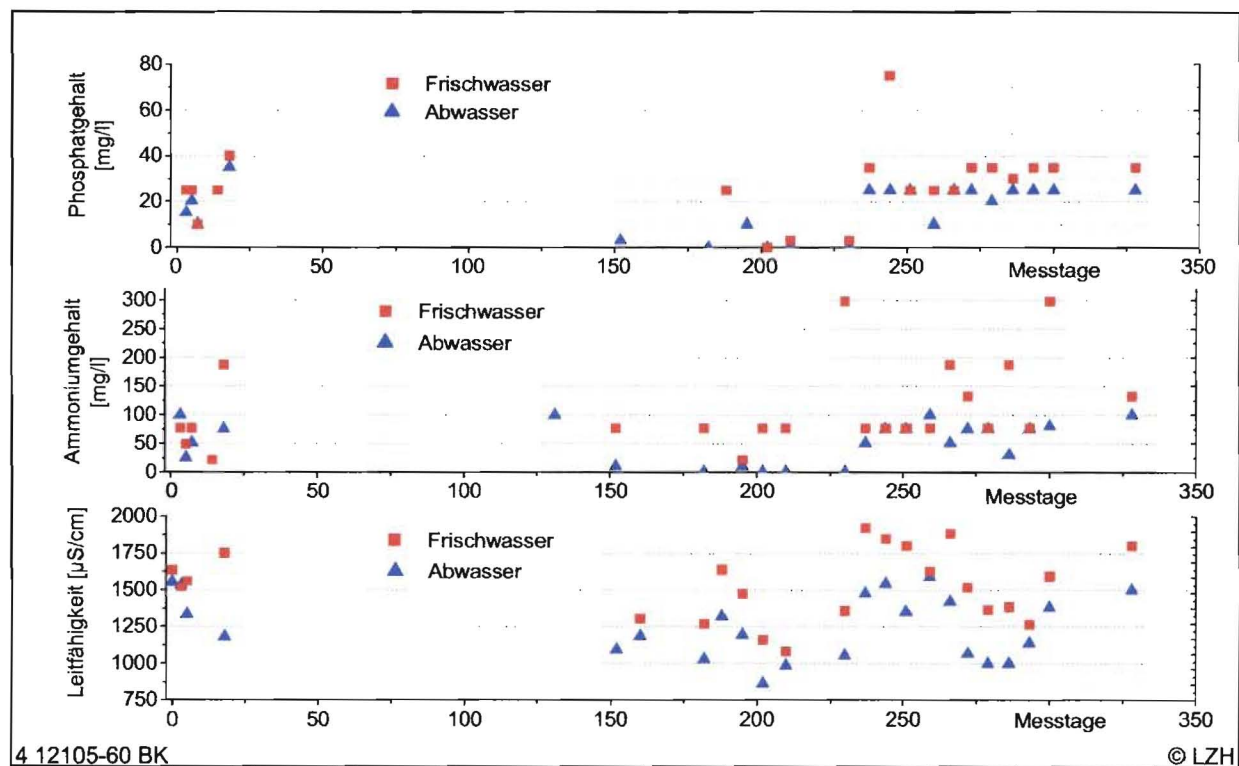


Abbildung 16: Nährsalze und Milieubedingungen in Frisch- und Abwasser des Biotropfkörpers im Versuchszeitraum

Die Nährsalzmedien werden in Kapitel 6.1.5 in Zusammenhang mit den mikrobiologischen Untersuchungen noch einmal aufgegriffen.

Auf die Einrichtung einer Abwasserrückführung ist bei der Auslegung der Anlage verzichtet worden. Folglich ist keine Regelungstechnik für pH und Leitfähigkeit (Salzzugabe) notwendig. Die Anlage stellt daher ein betriebskosten- und wartungsminimiertes praxisorientiertes Abluftreinigungsverfahren dar. Während der Adaptionphase ist der BTK zur Immobilisierung der Mikroorganismen in Wasserkreislaufführung betrieben worden. Hierzu ist die Rückführung der Abschlammung in den Frischwasserbehälter temporär

erforderlich. Zur Einstellung eines optimalen Feuchtigkeitsfilmes für die Immobilisierung der über die Frischwasserleitung zugegebenen Mikroorganismen auf der Filterpackung, wird die Berieselungsdichte variiert. Die Berieselungsdichte wird anhand des Frischwasserdurchflusses am Schwebekörperdurchflussmesser und der Beregnungszyklen an der SPS-Steuerung eingestellt. Da der Biofilm durch eine zu geringe Berieselungsdichte austrocknen kann und infolge einer möglichen irreversiblen Schädigung durch den Gasstrom vom Trägermaterial entfernt wird, ist es notwendig, die geförderten Wassermengen - insbesondere die Beregnung - ständig zu überwachen [16, 34]. In Abbildung 17 werden die geförderten Wassermengen und die Temperatur des Frischwassers im Versuchszeitraum bilanziert.

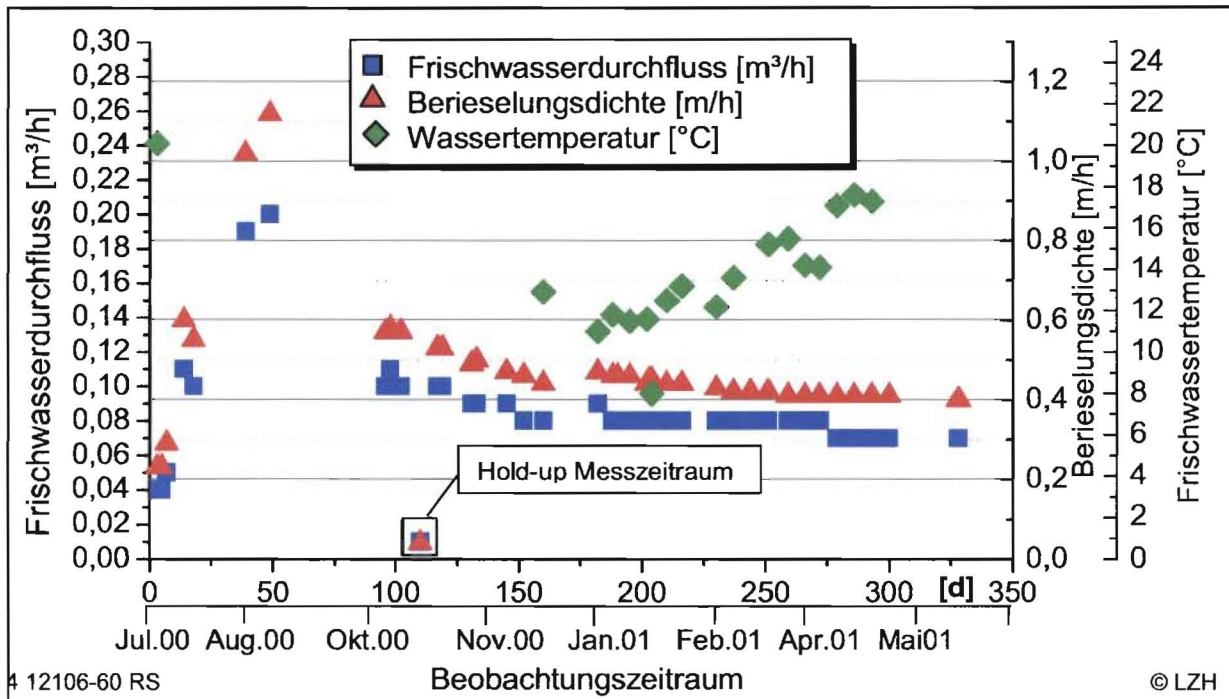


Abbildung 17: Bilanzierung des Wasserhaushaltes: Berieselungsdichte und geförderte Wassermengen im Versuchszeitraum

Hierbei wird deutlich, dass zu Beginn der Untersuchungen an der Biotropfkörper-Anlage (Adaptionsphase selektiver Mikroorganismen) eine maximale Berieselungsdichte von 1,12 m/h eingestellt wird. Um den Feuchtegehalt der Filterpackung auf ein optimales Niveau hinsichtlich der immobilisierten Mikroorganismen zu halten, wird die Berieselungsdichte im Beobachtungszeitraum auf 0,42 m/h reduziert. Dieser Wert liegt zwar weit unter dem nach VDI 3478 empfohlenen Berieselungsdichte von 5-20 m/h [16], durch Verringerung der Wasserfilmdicke wird jedoch der Schadstoffabbau von Komponenten mit großem Henry-Koeffizienten (wie Benzol) verbessert.

Die Beregnungsflüssigkeitszugabe erfolgt in zyklischen Intervallen. Bei einer am Schwebekörperdurchflussmesser und an der SPS-Steuerung (Beregnungspause : ca. 45 bis 60 min / Beregnungsdauer: 1,5 bis 3 min) vorgenommenen Einstellung ergibt sich ein über den Untersuchungszeitraum eingestellter mittlerer Volumenstrom von 1,75 m³/d. Die Frischwassertemperatur (Beregnungsflüssigkeit) ist trotz der Innenaufstellung der Biotropfkörper-Anlage geringfügig von den jahreszeitlichen Außentemperaturen abhängig. Eine Beheizung der Beregnungsflüssigkeit wird während der Untersuchungen nicht

vorgenommen. Es stellt sich eine mittlere Beregnungsflüssigkeitstemperatur von 14 °C ein.

Die Luftfeuchte im Reingas ist abhängig vom Abluftvolumenstrom und der Berieselungsdichte bzw. vom Verhältnis (Beregnungspause/Beregnungsdauer): Die Luftfeuchte beträgt im Mittel 85% bis 99%. Im Untersuchungszeitraum stellt sich ein durchschnittlicher Wasseraustrag durch Verdunstung von 0,09 bis 0,25 m³/d ein. Ausgehend von einem durchschnittlichen Wassereintrag von 1,75 m³/d werden somit 85 bis 95 % über das Abwasser ausgetragen. Der Wasseraustrag ist insbesondere von den Parametern Ablufttemperatur und Volumenstrom abhängig und kann durch Variation der Berieselungsdichte verändert werden. Die einwandfreie Funktion der Beregnung muss dauerhaft sichergestellt werden. Im folgenden werden die Ergebnisse eines simulierten Störfalls der Beregnung dargestellt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur Ableitung von Arbeitspunkten der Beregnung und Kontrollintervallen der wasserführenden Komponenten.

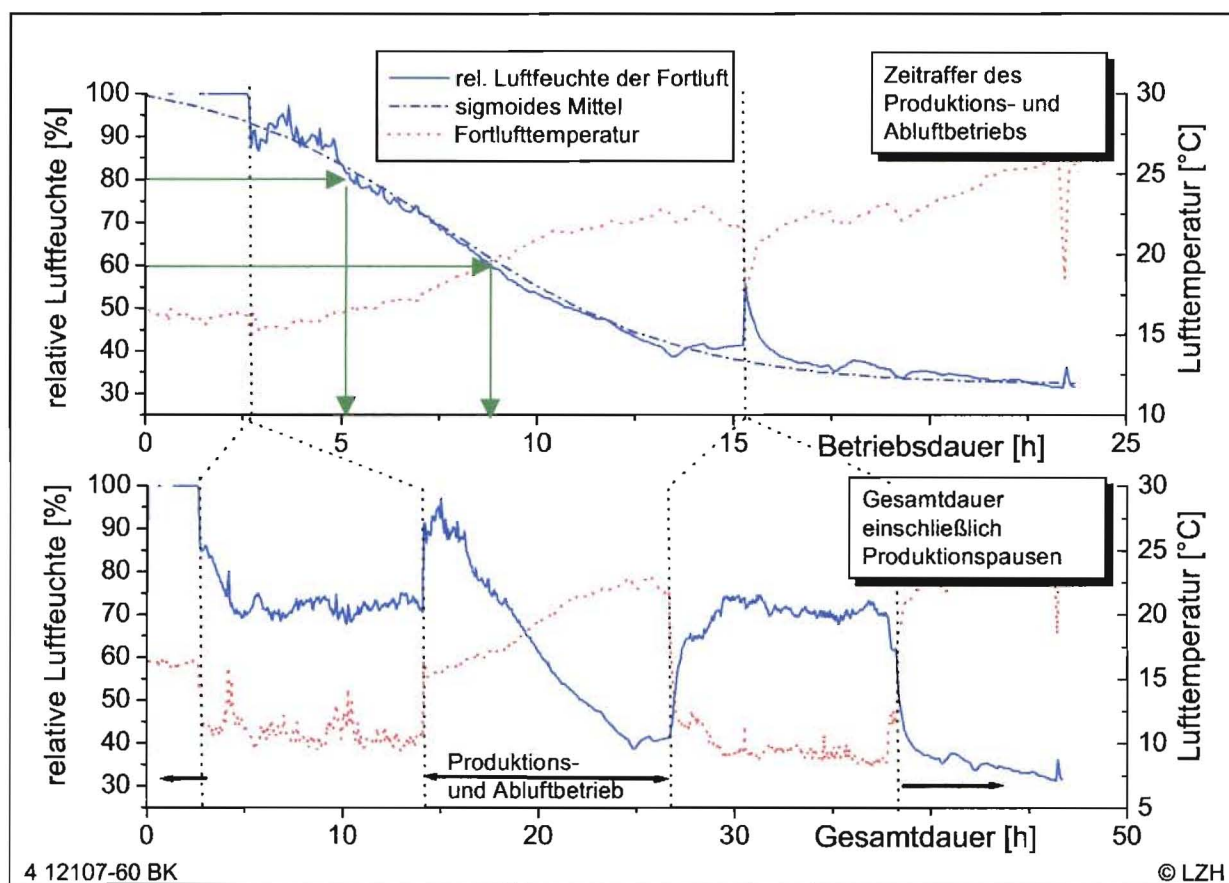


Abbildung 18: Ableitung von Arbeitspunkten der Berieselung durch Stillstand der Wasserförderung (Störfallsimulation). Unten: Relative Luftfeuchte und Temperatur der Fortluft. Oben: Trocknungsverlauf während des Produktions- und Abluftbetriebes

Bei Aussetzen der Beregnung trocknet der Biofilm auf dem Polyurethanschaum-Filtermaterial infolge der Sättigung der Abluft mit Feuchte beim Durchströmen des Tropfkörpers langsam aus. Verfahrenstechnisch von hohem Interesse ist hierbei das Wasserrückhaltevermögen (Hold-up) der Filterpackung [34]. Dieses kann durch wiederholte Entnahme und Wägung von Filterpackungselementen oder durch

Luftfeuchtenmessungen bestimmt werden. In Abbildung 18 ist die relative Luftfeuchte und Temperatur der Fortluft nach übermäßigem aussetzen (Störfallsimulation) der Beregnung zeitlich dargestellt. Im unteren Graphen ist ersichtlich, dass die Filterpackung während des Abluftbetriebes zunehmend austrocknet. Während des Produktionsstillstandes stellt sich infolge der inaktiven Ventilation ein Sättigungswert von ca. 70%rF ein. Bei einsetzendem Abluftbetrieb erreicht der Luftfeuchtegehalt in wenigen Minuten die Endwerte des Vortages. Im oberen Graphen ist der Trocknungsverlauf während des Produktions- und Abluftbetriebes unter Ausblendung der Produktionsstillstandzeiten dargestellt. Ist eine Luftfeuchte von mindestens 80%rF am Reaktorausgang gefordert, um einsetzende Schädigungen des Biofilms am trockeneren Reaktoreingang zu vermeiden, kann mittels der Ausgleichskurve in Abbildung 18 eine Beregnungspause von < 5 h abgeleitet werden. Die maximale Beregnungspause während des Abluftbetriebes entspricht der Dauer einer Produktionsschicht, so dass eine tägliche Sichtkontrolle der Beregnung empfehlenswert ist. Während der Adaptionphase konnte das Wasseraufnahmevermögen zu 100-150 kg/m³ ermittelt werden, so dass ca. 320 Liter Wasser von der Filterpackung reversibel aufgenommen werden können. Das maximale Rückhaltevermögen lässt sich folglich mit 30-45 h entsprechend 3-4 Produktionsschichten beziffern. Anhand der Störfallsimulation können die ermittelten Verfahrensparameter für den optimalen Arbeitsbereich der Frischwasserzufuhr bestätigt werden. In Abbildung 18 ist der optimale Regelbereich (grüne Pfeilmarkierung) dargestellt. Demnach sollte alle 5 - 8 h ein Beregnungszyklus eingeleitet werden.

Im Beobachtungszeitraum konnte auch bei niedrigen Berieselungsdichten keine irreversible Schädigung des Biofilms infolge einer Austrocknung der Filterpackung festgestellt werden, so dass ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann.

6.1.3.4 Abwasseruntersuchungen

Der Wasserhaushalt des Biotropfkörper-Filters gehört zu den maßgeblichen Betriebsparametern des Verfahrens. Zur Bilanzierung wird die Biotropfkörper-Anlage im Produktionsprozess betrachtet und alle umweltrelevanten ein- und ausgehenden Stoffströme untersucht. In der Abbildung 19 sind die Summenparameter der ermittelten Stoffeinträge bzw. -austräge der Abluft und Reinluft sowie des Frisch- bzw. Abwassers dargestellt. Im Mittel wird ein C:N:P-Verhältnis als $m(\text{VOC}):m(\text{NH}_4^+):m(\text{PO}_4^{3-})$ von 155:20:5 eingestellt. Dieses Verhältnis entspricht Werten vergleichbar erfolgreicher Applikationen in der Literatur [34], insbesondere für Ablüfte aus der Lasermaterialbearbeitung [9]. Da die Nährlösung, welche mit der Berieselung zugeführt wird, nicht im Kreis geführt wird, wird der Ammonium- und Phosphatgehalt im Wasserstrom nicht vollständig durch die biologische Oxidation verbraucht. Hinsichtlich Betriebskosten und Ökobilanz (Kapitel 6.2) spielt dieser Restanteil an Nährsalz eine wichtige Rolle.

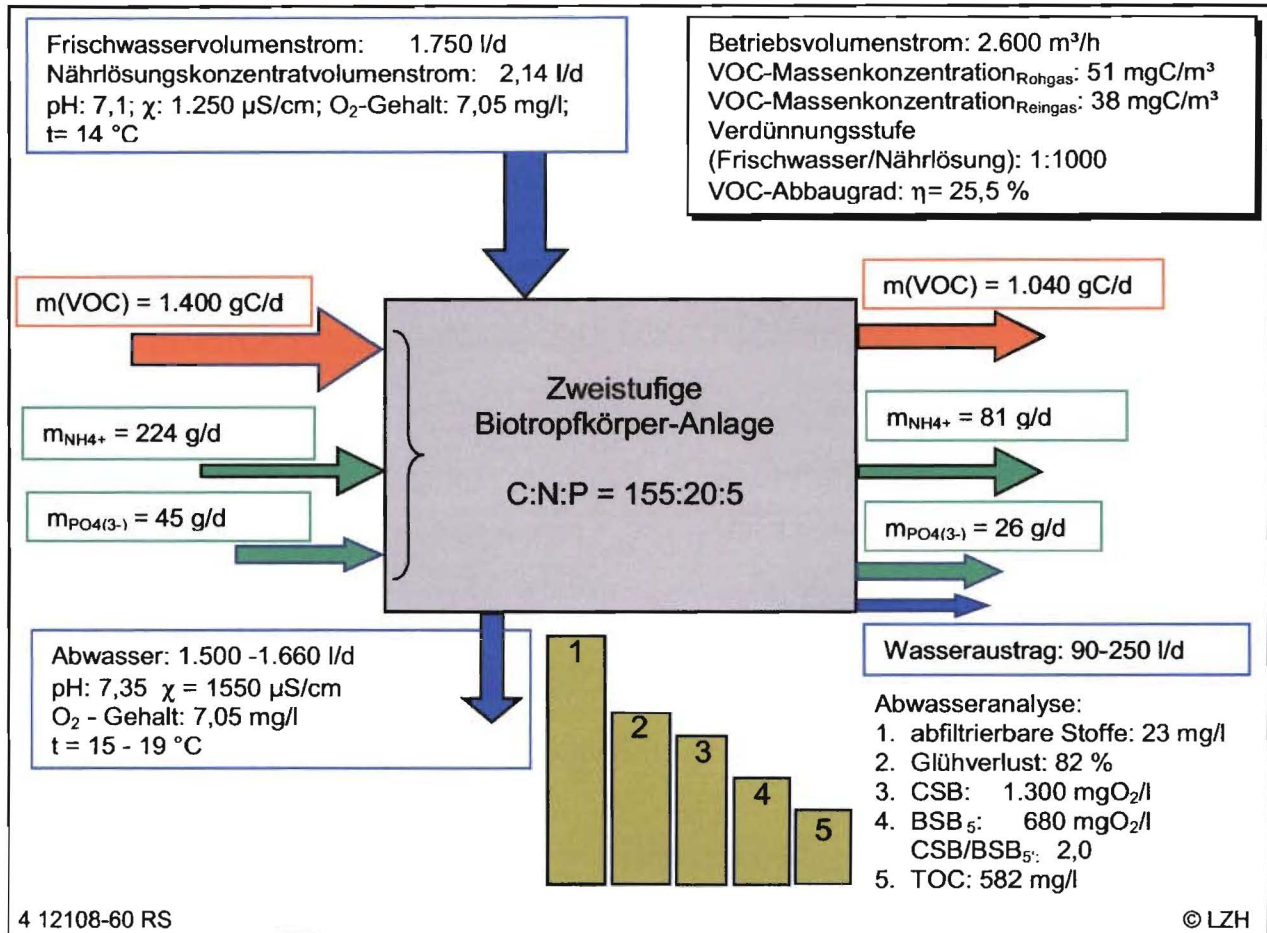


Abbildung 19: Klassifizierung und Bilanzierung der luft- und wassergetragenen Stofffrachten der Biotropfkörper-Anlage

Biotropfkörper-Filter sind Abwasser erzeugende Abluftreinigungsanlagen, deren Abwasser (20 - 500 m³ im Jahr) in eine betriebseigene oder kommunale Abwasserbehandlungsanlage geleitet werden muss. Gegebenfalls auftretender Überschuss-Schlamm sowie feine Schwebstoffe können, unter Beachtung der kommunalen Abwassersatzung, mit dem Abwasser abgeleitet werden [16]. Im täglichen Rhythmus werden im Durchschnitt ca. 1,55 m³ Abschlammwasser abgelassen. Dieser Wert variiert, aufgrund von Verdunstungseffekten, sehr stark mit der Raum- und Ablufttemperatur. Durch regelmäßige Messung verschiedener Abwasserparameter kann überprüft werden, inwieweit die Grenzwerte der kommunalen Abwassersatzung eingehalten werden. Anhand der Ergebnisse lässt sich auf den Austrag an Biomasse und gegebenenfalls Störungen im Filtersystem schließen. Gemeinsam mit den Parametern Temperatur, pH-Wert, Ammonium- und Phosphatkonzentration werden Messwerte ermittelt, die für die Abwassereinleitung von zentraler Bedeutung sind. Der chemische Sauerstoffbedarf CSB, der biologische Sauerstoffbedarf BSB₅, der organische Gesamtkohlenstoffgehalt TOC, die Masse an absetzbaren Stoffe T_s und der Glühverlust β_s wurden durch das Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Hannover (ISAH) bestimmt. Die durchschnittlichen Abwasserwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Mittelwerte der Abwasseruntersuchungen aus der Abschlammung aus dem Betrieb einer Biotropfkörperanlage im Vergleich zu Grenzwerten der kommunalen Abwassersatzung [37]

Grenzwerte	Tropfkörper-Verfahren*	Kommunale Abwassersatzung
Glühverlust (organischer Anteil) β_s	82 %	90%
Absetzbare Stoffe T_s	22,7 mg/l	11 mg/l
Gesamtkohlenwasserstoffe, organisch TOC	582 mgC/l	-250 mg/l (noch zu spezifizieren)
Chemischer Sauerstoffbedarf CSB	1.313 mgO ₂ /l	2.000 mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf BSB ₅	683 mgO ₂ /l	nicht begrenzt
pH-Wert	6,8 – 7,5	6,5 - 10
Temperatur	12-20 °C	< 35°C
*Infolge Verdunstung sind die Abwasserprobenmittelwerte aus dem Biotropfkörper-Verfahren ca. 50%ig konzentriert.		

Gemäß der Einleitungsbeschränkungen für Abwasser laut der Abwassersatzung (Landeshauptstadt Hannover, Stadtentwässerungs- und Grundstücksamt) kann anhand des Glühverlustes und des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) u.a. dokumentiert werden, dass die Werte dauerhaft unterschritten werden können. Der Summenparameter TOC und die Menge der absetzbaren Stoffe (T_s) wird im Beobachtungszeitraum teilweise überschritten. Hierbei gilt jedoch zu beachten, dass das anfallende Abwasser aus einer abwassererzeugenden biologischen Abluftreinigungsanlage in das kommunale Abwassernetz eingeleitet wird. Aufgrund dessen wird für diesen Anwendungsfall unter anderem das ATV Regelwerk A 115 „Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage“ herangezogen. Nach Rücksprache mit Ämtern für Stadtentwässerung und für Tiefbau im Landkreis Hannover und Hildesheim/Alfeld hinsichtlich des Einleitens des Abwassers kann eine Direkteinleitung dieser relativ geringen Stofffrachten erfolgen.

Für die Beurteilung des Abwassers sind nicht nur die in Tabelle 3 aufgeführten Summenparameter interessant, sondern auch das Verhältnis, in dem diese zueinander stehen. In Abbildung 20 oben ist zu sehen, dass die ermittelten CSB-Summenparameter im Beobachtungszeitraum wie auch der BSB stabil ist. Das CSB/BSB-Verhältnis beträgt 1,9. Dieser Wert gibt die gute biologische Abbaubarkeit des Abwassers wieder.

Das Verhältnis von CSB/TOC beträgt 2,25. Von Koppe [37] werden Werte von häuslichen Schmutzwasser für das Verhältnis CSB/BSB₅ von 2,2 und CSB/TOC von 3,1 genannt, so dass man bezüglich der gemessenen Summenparameter insgesamt von einer guten Abbaubarkeit des Abwassers ausgehen kann.

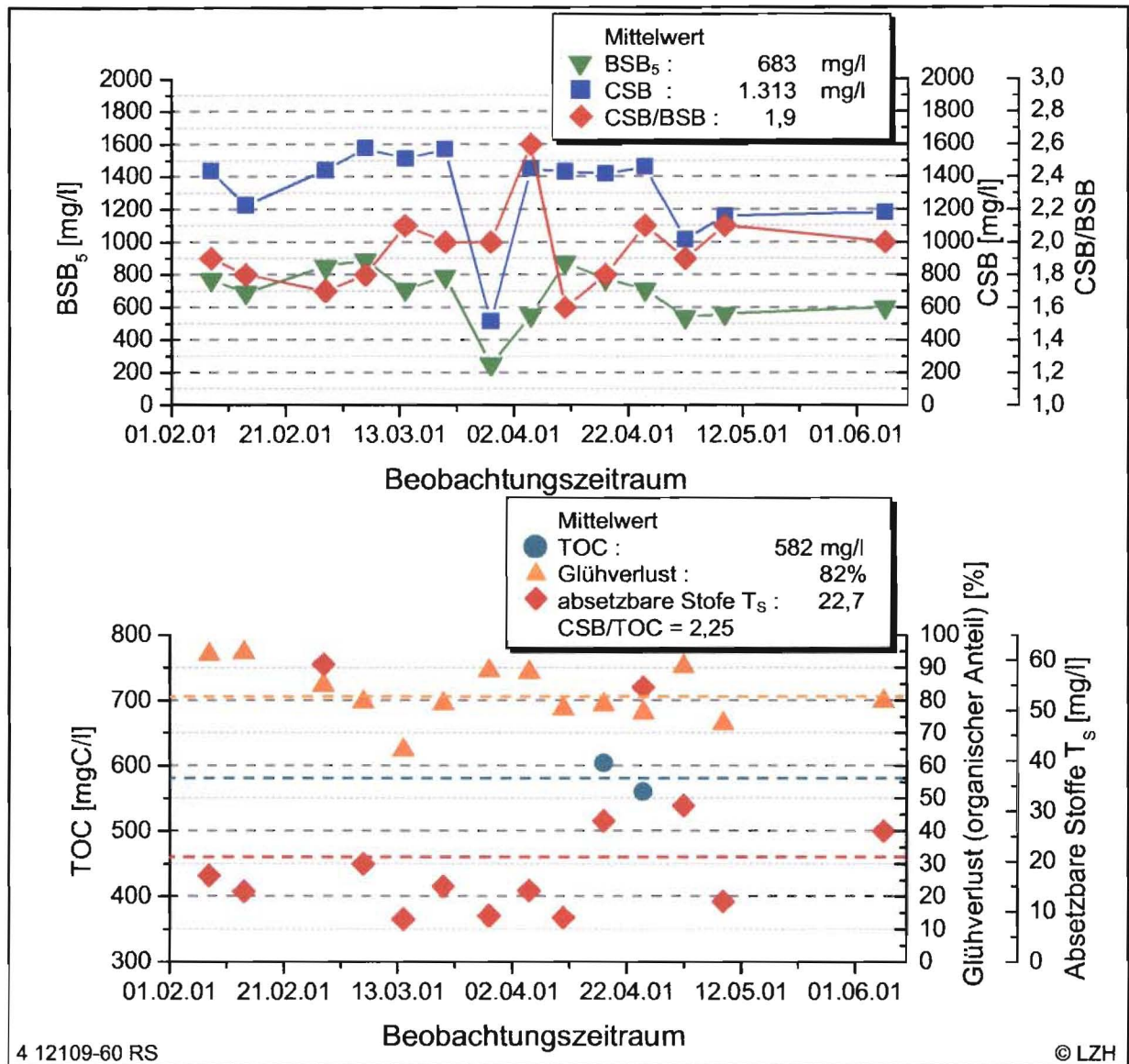


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Abwasseruntersuchungen aus der Abschlammung des BTK

Für den Anlagenbetreiber ist relevant, dass die Abwassergrenzwerte und Abwasserichtwerte durch Vermeiden der Aufkonzentrierung infolge Verdunstungseffekten (tägliches Abschlammern) sicher eingehalten bzw. unterschritten werden können und aus den Abwasserparametern auf eine gute Abbaubarkeit des Abschlammwassers geschlossen werden kann. Die abwassertechnischen Parameter entsprechen den Forderungen nach VDI 3478 [16].

6.1.3.5 Ermittlung von Skalierungskenngrößen durch Charakterisierung des Strömungsverhaltens

Zur Charakterisierung des Strömungsverlaufes und des sequentiellen Abbauverhaltens wurden zehn Messstellen im Biotropfkörper-Behälter eingerichtet. Die Messstellen innerhalb der Filterpackung sind mit jeweils drei Messlanzen versehen, um Gradienten innerhalb der durchströmten Fläche erfassen zu können. Mittels kontinuierlicher und diskontinuierlicher Probenahmeverfahren werden an den Messpunkten Proben aus dem Volumenstrom entnommen. In Abbildung 22 sind die Messstellen an der Biotropfkörper-Anlage dargestellt. Die Untersuchung des Strömungsverhaltens im BTK liefert wichtige Informationen über Eigenschaften der Filterpackung. Ein Vergleich des Strömungsverhaltens an unterschiedlichen Filtertiefen und -querschnitten trägt zur Charakterisierung der Filterpackung und Abschätzung der effektiv wirkenden Filterhöhe bei. Der sich ableitende Grad der Durchmischung der Abluft ist vor dem Hintergrund der stark schwankenden Konzentrationen der Erfassungsluft aus der Lasermaterialbearbeitung eine wichtige Kenngröße für die Filtration dieser Abluft. Da der Schadstoffabbau durch Biofiltration im allgemeinen mit den Reaktionsordnungen Null oder Eins [18] verläuft, kann der Schadstoffabbau durch möglichst frühzeitige Vermischung in der Gasphase maximiert werden [38]. Die Verweilzeitverteilung im BTK wird mittels der Momentenmethode charakterisiert. Ein einfacher Weg ist im Fall des idealen δ -Impulses als Testfunktion gegeben. Die Testfunktion wird durch Injektion von 5 ml Pentan in die Rohgasmesszelle realisiert. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Strömungscharakterisierung dargestellt.

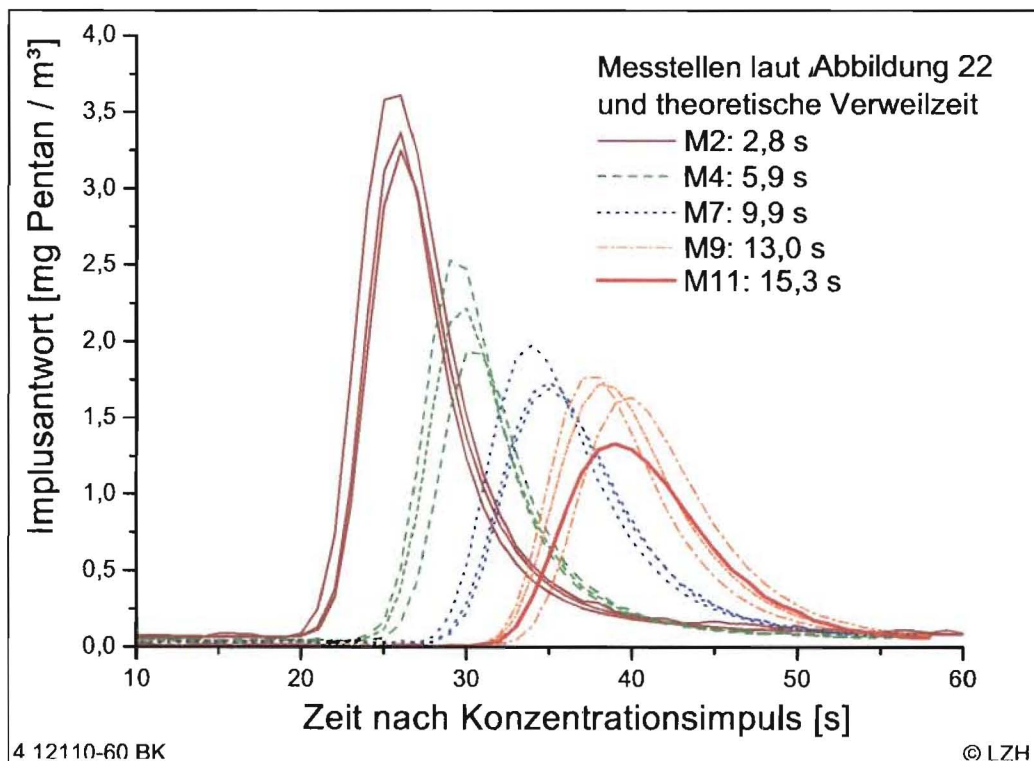


Abbildung 21: Ermittlung des Strömungsverhaltens im Biotropfkörper zur Ableitung von Skalierungskenngrößen durch Messung der normierten Verweilzeitverteilung der Pentan-Impulsantwortfunktion

Bei der Anwendung dieser Methode wird das Testsignal mit dem Antwortsignal verglichen und so die Lösung der Gewichtsfunktion und damit der Verweilzeitverteilung im Biotropfkörper-Filter geliefert. Erwartungsgemäß werden diffusive Einflüsse in axialer Strömungsrichtung durch z.B. Totzonen und Kanalbildung in der Darstellung der Verweilzeitverteilung in Abbildung 21 deutlich. Aufgrund turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen und Wirbelbildung treten Dispersionsvorgänge und Rückvermischung im Volumenstrom auf. Diese wirken konzentrationsausgleichend und folglich begünstigend auf den Stofftransport auch bei niedrigeren Filterbelastungen. Da auch nach 120 Sekunden messbare Konzentrationen an Pentan messbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass Totzonen in den Ecken des Filterbettes vorhanden sind. Im durchströmten Querschnitt lassen sich keine nennenswerten Unterschiede in der Verteilung der Verweilzeit beobachten, was für eine regelmäßige Durchströmung der Filterpackung und folglich effektive Nutzung des gesamten Querschnittes spricht.

Um einen Vergleich mit anderen Biofiltrationsverfahren und alternativen Anlagenskalierungen zu ermöglichen, werden normierte Größen an den Messpunkten errechnet. Die dimensionslosen Größen normierte Verweilzeit Θ und normierte Varianz σ^2_{Θ} werden nach Division durch die aerodynamische Verweilzeit τ_{ae} gemäß folgender Gleichung erhalten. Letztere resultiert aus dem Volumenstrom sowie der Porosität und dem Filtervolumen des betrachteten Filtersegmentes.

$$\Theta = \tau / \tau_{ae} ; \sigma^2_{\Theta} = \sigma^2 / \tau_{ae}^2 \quad \text{mit } \tau_{ae} = V_F \varepsilon / V_Z$$

Die Bodensteinzahl des Biotropfkörpers ist eine verfahrenstechnisch wichtige Größe, die den Anteil des dispersiven Strömungsanteils im Verhältnis zur Konvektion angibt [39]. Sie lässt sich mittels der messtechnisch bestimmten normierten Varianz gemäß folgender Gleichung ermitteln.

$$Bo = -(1/\sigma^2_{\Theta}) + (1/\sigma^2_{\Theta} + 8/\sigma^2_{\Theta})^{-0,5}$$

In Tabelle 4 sind die gemessene und normierte Mittelwerte von Skalierungskenngrößen an den Messstellen entlang des Abluftweges durch den Biotropfkörper dargestellt.

Tabelle 4: Abluftrelevante Skalierungskenngrößen der Filtersegmente bei einem mittleren Volumenstrom von 2.470 m³/h

Messstelle*	Volumen**	Verweilzeit	Normierte Verweilzeit	Varianz	Normierte Varianz	Bodensteinzahl
2	1,97 m ³	31,9 s	11,4	31,4 s ²	0,2	1,96
4	4,15 m ³	35 s	5,9	35,0 s ²	1,0	2,00
7	6,93 m ³	38,8 s	3,9	64,0 s ²	4,2	1,22
9	9,11 m ³	41,7 s	3,2	90,3 s ²	8,8	0,90
11	10,79 m³	42,6 s	2,8	90,5 s²	11,5	0,80

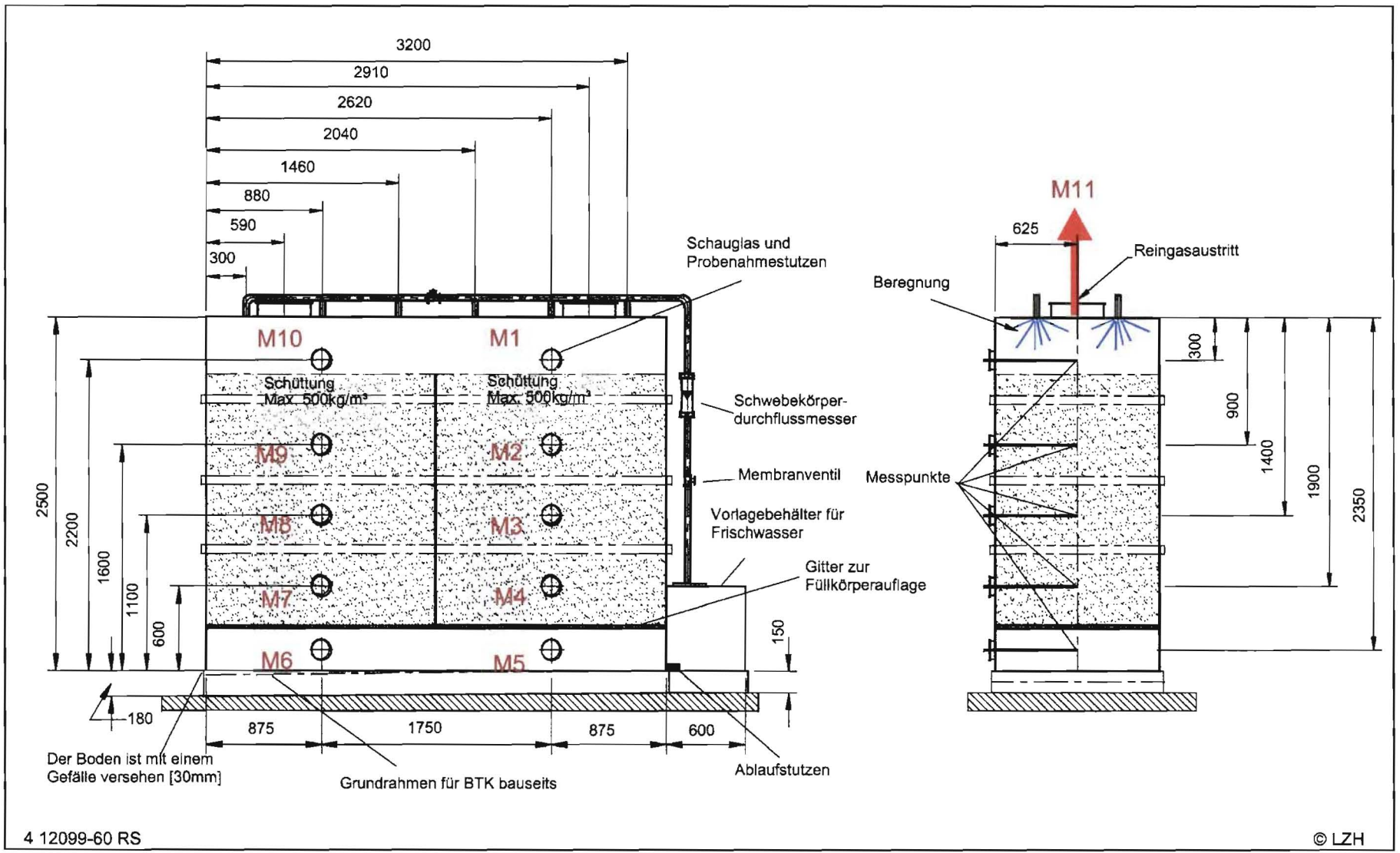
*Messstellen siehe Abbildung 22; **ab der Rohgasmessstelle durchströmtes Volumensegment

Bei einem Volumenstrom von 2.500 m³/h verweilt die mit Schadstoff beladene Abluft demnach durchschnittlich 43 Sekunden im Filter. Der Vergleich mit einer Pfropfströmung durch ein Rohr gleichen Volumens wird durch die normierte Verweilzeit und Varianz des

Biotropfkörpers deutlich. Die Durchströmung des Eintrittsvolumens des Filterbettes (Messstelle 2) bewirkt die Verteilung der Abluftverweilzeit auf das 11,4-fache eines glatten Rohres. Die Varianz von 31 s^2 an dieser Messstelle verdeutlicht den Grad der Rückvermischung und Segregation, so dass am Filterbetteintritt wesentliche Strömungsänderungen zu verzeichnen sind. Bei der Durchströmung weiterer Filtervolumensegmente durch die Abluft stellt sich ein stabiler Strömungszustand unter stetiger Zunahme der Verteilungsbreite ein. Der Reingasstrom zeigt anhand der normierten Verweilzeit von 2,8 und normierten Varianz von 11,5 sowohl dispersive als auch konvektive Eigenschaften. Die Varianz wird im wesentlichen durch das lange Abklingen der Konzentrationskurve in Abbildung 21 determiniert, so dass die Schlussfolgerung auf Anwesenheit von Totzonen in den Eckbereichen des Tropfkörpers zulässig ist. Strömungsoptimierte Behälterkonturen wie abgerundete Ecken würden einerseits Totzonen vermeiden helfen. Andererseits wäre die Behälterbestückung und Konturierung des Filtermaterials wesentlich erschwert. Insgesamt kann die Behältergeometrie als optimiert bewertet werden.

Der Umsatzgrad wird bei Gültigkeit der typischen Reaktionskinetik und Stoffübergänge für die Biologische Abluftreinigung durch die ermittelten Dispersionsgrad positiv beeinflusst. Eine extreme Verwirbelung und Rückvermischung, welche den Druckverlust erhöhen würde, kann nicht festgestellt werden. Folglich ist die effizienzfördernde Rückvermischung und Verweilzeitsteigerung mit einem geringen Druckverlust für diese Aufgabenstellung ideal kombiniert.

Abbildung 22: Biotropfkörper-Anlage: Proportionen und Messpunkte



6.1.4 Effizienz der Biotropfkörperanlage

Die Ablüfte von 3 Laser-Bearbeitungsstationen werden in den Biotropfkörper zur Schadstoffminderung geleitet. An den 3 Laser-Bearbeitungsstationen wird Schichtholz unterschiedlicher Dicke eingesetzt. Die Materialstärke des Schichtholzes variiert zwischen 12 und 18 mm. Der Schadstoffmassenstrom liegt in der Größenordnung von 1 kg/h. Für die Effizienzbetrachtung muss zuerst festgestellt werden, welche Schadstoffe in welcher Zusammensetzung bei der lasergestützten Materialbearbeitung von Schichtholz entstehen. Hierauf aufbauend wird die Abbauleistung der Biotropfkörper-Anlage unter Anwendung verschiedener analytischer Methoden bestimmt.

Die Ergebnisse und Maßnahmen zur Charakterisierung der Emissionen und der Effizienz insbesondere vor dem Hintergrund mikrobiologischer Erkenntnisse und erzielter Lüftungs- und verfahrenstechnischer Optimierungen lassen sich wie folgt untergliedern:

- Einrichten einer Messstrecke, (nach VDI-Richtlinie 2066) sowie Bestimmung der Aerosolemissionen und Abscheidegrad von Partikeln
- Charakterisierung der Roh- und Reingasemissionen unter Einbeziehung mikrobiologischer Erkenntnisse
- Installation von Messlanzen in der Tropfkörperpackung zur Überwachung Filtertiefen- und Filterquerschnittsabhängigkeit des Abbauverhaltens
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messkampagne zur Beurteilung der Filtrationseffizienz

Tabelle 5: Bewertete Messgrößen im Gasstrom und Prozesswasser

Im Gasstrom	Im Wasserkreislauf	
Gesamt-Kohlenwasserstoffemissionen	Chemischer Sauerstoffbedarf	
Gasförmige Einzelkomponenten	Biologischer Sauerstoffbedarf	
Bestimmung von CO, CO ₂ und NO _x	Wassertemperatur	
Gesamtaerosolemissionen	Wasserverlust durch Verdunstung	
Bestimmung der Aerosolgrößenverteilung	pH-Wert-Messung	
Abluftvolumenstrom	Gesamtzellzahl im Vorratswasser	
Druckverlust des Biotropfkörpers	TOC-Gehalt	
Zustandsgrößen der Abluft	Absetzbare Stoffe und deren Glühverlust	
Luftfeuchte	Nährsalzkonzentration (NH ₄ ⁺ , PO ₃ ³⁻)	
Olfaktometrie	Filterpackung:	REM, EDX, Feuchte

In Tabelle 5 sind die zu bewertenden Messgrößen sowohl für die Gasphase als auch für das Prozesswasser dargestellt. Die Wasserproben werden aus der Abschlämzung (Sumpf) entnommen. Vor Ort wird die Temperatur des Abwassers, die Ammonium- und Phosphatkonzentration und der pH-Wert überprüft. Durch diskontinuierliche und Online-Messungen im Roh- und Reingas wird neben wichtigen Größen in Tabelle 5 der Abbaugrad des Biotropfkörpers bestimmt, so dass im Projektzeitraum die einwandfreie Funktion des BTK stetig überwacht werden und Schritte zu Verfahrensoptimierung durchgeführt werden können.

6.1.4.1 Messtechnik und Messgrößen

Die Methoden zur Charakterisierung der Erfassungs- und Abluft sind in der Abbildung 23 zusammengefasst. Abweichend von DIN 1946 Teil 1 [40] wird in der Abluftreinigung die Erfassungsluft nach Durchströmung des Grobabscheiders als Rohgas und die filtrierte Fortluft als Reingas bezeichnet.

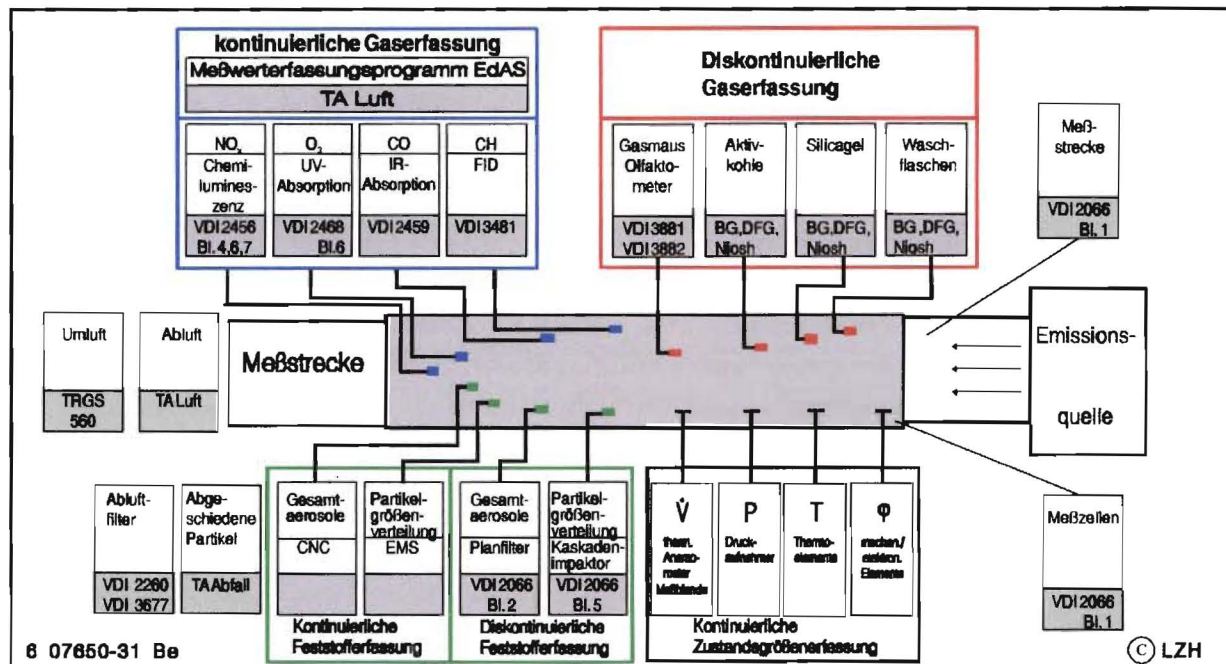


Abbildung 23: Messtechnik mit den jeweils gültigen Normen für die Beurteilung des Biotropfkörpers

Die Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen im Roh- und Reingas werden mit Hilfe von Flammenionisationsdetektoren (FID) kontinuierlich ermittelt und auf einen Datenschreiber übertragen. Zur Bestimmung der qualitativen und quantitativen Abluftzusammensetzung bzw. des Abbaugrades des Biotropfkörpers werden Proben diskontinuierlich aus dem Roh- und Reingas an Aktivkohle, Silicagel und DNPH-Waschflaschen sorbiert und anschließend gaschromatographisch analysiert. Anhand eines Unterdruckprobennehmers erfolgt die Befüllung von Probenahmebeutel mit Geruchsstoffemissionen, die anschließend zur Auswertung einem auserwählten Probandenkollektiv über ein Olfaktometer zugeführt werden. Somit können die Schadstoffemissionen hinsichtlich ihrer Geruchintensität und hedonischen Wirkung beurteilt und mit Tabellen verglichen werden. Die quantitative Verifizierung mit Planfilterkopfgeräten gibt Aufschluss über die Menge der partikelförmigen Emissionen im Abluftstrom, während die qualitative Abluftzusammensetzung der Partikelgröße mit Kaskadenimpaktoren ermittelt werden können.

Die eingesetzte Messgerätetechnik und angewandten messtechnischen Methoden sind in Kapitel 9.1 des Anhangs ausführlich dargestellt.

6.1.4.2 Abscheidung von Kohlenmonoxid und Permanentgasen

Das zur Detektion von Permanentgasen eingesetzte Multigasensorgerät Polytektor G750 der Fa. GFG, Dortmund, welches Kohlenmonoxid infrarotspektroskopisch erfasst, ist in Kapitel 9.1.3 des Anhangs dargestellt. Darüber hinaus wird die Konzentration von Kohlendioxid, Sauerstoff und Stickoxiden mit diesem Gerät kontinuierlich überwacht. Stickoxide können in der Erfassungsluft der Laserbearbeitung von Schichthölzern nicht detektiert werden. Auch die Sauerstoffkonzentration ändert sich nur unwesentlich beim durchströmen der Filterpackung. Die geringe Sauerstoffkonzentrationsdifferenz resultiert aus der vergleichsweise geringen Filterbelastung und hängt folglich mit dem geringen Anteil an mikrobiell aufgenommenem Sauerstoff am im der Abluft insgesamt vorhandenen Sauerstoff zusammen.

Der in Abbildung 24 dargestellte Kohlenmonoxidanteil an der Abluft ist mit im Durchschnitt 190 mg/m^3 (170 ppm) beachtenswert, da Kohlenmonoxid als Nervengas beim Menschen Sauerstoffmangel und Schädigungen des Erbgutes verursachen kann. Es ist daher dringend notwendig, bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz zur Herstellung von Stanzformen für eine ausreichende Absaugung zu sorgen.

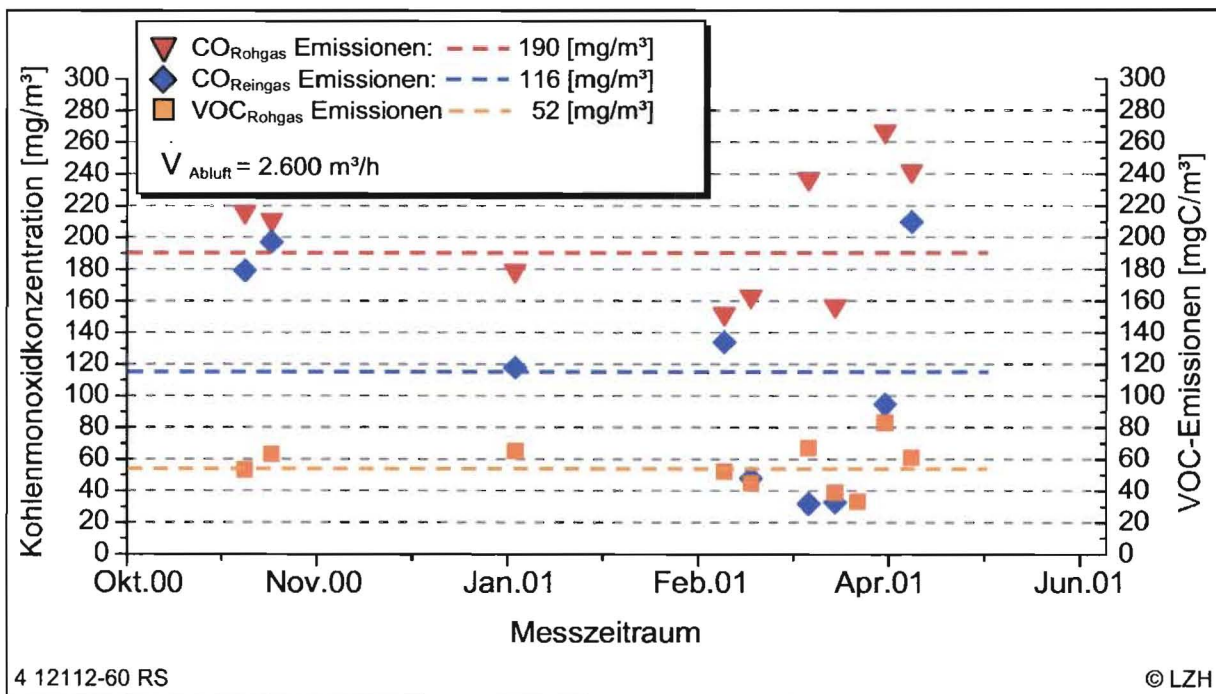


Abbildung 24: Kohlenmonoxidkonzentration im Roh- und Reingas der Biotropfkörper-Filteranlage und Korrelation zur Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration

Eine Minderung der Kohlenmonoxidemissionen ist nach geltenden Vorschriften unter den genannten Massenströmen und Konzentrationen nicht erforderlich. Umweltbiotechnologisch ist jedoch von Interesse, dass die Biologische Abluftreinigung auch bei Anwesenheit des konzentrationsabhängig zytotoxischen Kohlenmonoxids einwandfrei funktioniert. Die in Kapitel 6.1.5 dargestellte Mikroorganismenselektion lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein Animpfen der Filterpackung mit Kohlenmonoxid degradierenden Organismen wie *Oligothropa carboxidovorans* [36] nicht sinnvoll ist. Bei spezifischen Filterbelastungen von $45 \text{ g/m}^3\text{h}$ erzielt das Biotropfkörperverfahren ohne Inkubation mit CO-degradierenden Organismen gemäß Abbildung 24 Abbauleistungen

von 15 g/m³h. Des weiteren ist in Abbildung 24 dargestellt, dass die Kohlenmonoxidkonzentration mit der Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration auch unter wechselnden Produktionsbedingungen korreliert. Die Bildung eines Korrelationsfaktors für die Laserbearbeitung von Schichtholz zwischen den beiden Signalen gemäß folgender Gleichung ermöglicht einen Rückschluss auf den gesamten Schadstoffmassenstrom in der Erfassungsluft anhand der Kohlenmonoxidkonzentration, so dass kostengünstige spektroskopische Sensoren zur Überwachung ungefilterter Emissionen zum Einsatz kommen können.

$$\text{Konzentration (CO) / Konzentration (VOC)} = F_{CO} \approx 3,7$$

Aufgrund der geringen Abmessungen der verfügbaren Sensoren wäre die Integration von Kohlenmonoxidsensoren in Lasermaschinen für den Stanzformenbau zur Detektion von Störungen in der Absaugung aus sicherheitstechnischer Sicht empfehlenswert.

6.1.4.3 Beurteilung der Effizienzüberwachung durch Detektion von Kohlendioxid

Vor dem Hintergrund der Prozesssicherheit der Abluftreinigung und Minimierung des Wartungsaufwandes ist eine automatische Effizienzüberwachung der biologischen Abluftreinigung von hohem Interesse. Im folgenden wird geprüft, ob die Messung der CO₂-Konzentration im Roh- und Reingas geeignet ist, den Wirkungsgrad der Anlage zu überwachen.

Tabelle 6: Berechnung der notwendigen Detektorempfindlichkeit zur Anlagen-Effizienzüberwachung anhand von Kohlendioxid

Stoffübergangsprodukte	Definition	Prognose
gebildete CO ₂ -Konzentration aus Erhaltungsstoffwechsel (Oxidation)	$c_{CO_2,erh.} = \frac{V_{mn} \cdot \left(\frac{\dot{m}^{deg.}}{M_c} \right)}{\dot{V}} \cdot \eta_{erh.}$	ca. 60 ppm
CO ₂ -Hintergrundkonzentration	-	300 ppm
Resultierende CO ₂ -Konzentration	$c_{res} = c_{CO_2,erh.} + c_{CO_2,umgeb.}$	360 ppm

In Tabelle 6 sind die Grundlagen zur Bestimmung der notwendigen Leistungsfähigkeit des CO₂-Messgerätes dargestellt. Durch die mikrobielle Oxidation der gasförmigen Abluftinhaltsstoffe erhöht sich die CO₂-Konzentration theoretisch um ca. 50 - 100 ppm auf 350 - 400 ppm. Als zentrale Anforderung an den Gassensor leitet sich folglich ein Messbereich von 300 - 500 ppm mit einer Auflösung von 3 - 5 ppm zur sicheren Effizienzüberwachung ab. Für diese Aufgabenstellung prinzipiell geeignet sind (infrarot-) spektroskopische Messverfahren [41]. Für die Überwachung der Biotropfkörper-Filteranlage beim Einsatz zur Abluftreinigung in der lasergestützten Stanzformenherstellung bedingen neben der hohen erforderlichen Messgeräteaauflösung sowohl die Querempfindlichkeit des Messverfahrens gegenüber Kohlenmonoxid als auch der typische Feinstaubgehalt der Abluft den messgerätetechnischen Aufwand. In Kapitel 9.1.10 des Anhangs ist eine entsprechende Gerätekonfiguration dargestellt. Neben Referenzküvetten zur Differenzierung der Querempfindlichkeit gegenüber Begleitgasen ist eine effektive Schutzvorrichtung des Sensors vor Aerosolen durch beispielsweise einer Feinfiltration oder Kondensationsstufe im Pneumatikmodul des Analysators notwendig. Insgesamt ist

durch den resultierenden Wartungsaufwand und die hohen Investitionskosten die automatische Effizienzüberwachung mit dieser Methode als nicht empfehlenswert zu erachten. Vielmehr ist die Überwachung mittels kontinuierlicher Druckverlustmessung über dem Filterbett und gegebenenfalls den Einsatz von elektronischen Nasen denkbar.

6.1.4.4 Abbauleistung von Gesamtkohlenwasserstoffen

Ziel der summarischen Bestimmung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) ist primär die zeitliche Charakterisierung der Abluftbeladung des Filtersystems. Eine Korrelation zwischen Geruchseinheiten und VOC ist insbesondere im Reingas nicht möglich, so dass aus dem VOC-Minderungsgrad nicht der Geruchsminderungsgrad ableitbar ist. Die Bestimmung der Gesamtkohlenwasserstoffe (VOC) erfolgt mit den in Kapitel 9.1.1 dargestellten Flammenionisationsdetektoren (FID) der Fa. Bernath-Atomic, Wennigsen. Bei der Schichtholzbearbeitung mit Laserstrahlung treten prozesstypische Konzentrationsschwankungen auf, welche sich mittels eines FID messtechnisch erfassen lassen. In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass bei der lasergestützten Stanzformenherstellung starke Konzentrationsschwankungen von 10 - 200 mgC/m³ in der Erfassungsluft vorhanden sind. Es wird deutlich, dass die Emissionen mit dem 1½-Schichtbetrieb der Stanzformenherstellung korrelieren und zyklisch in der Abluft auftreten, so dass auch der Biotropfkörper zyklisch mit Filterbelastungen von 5 bis 72 g/m³h beaufschlagt wird.

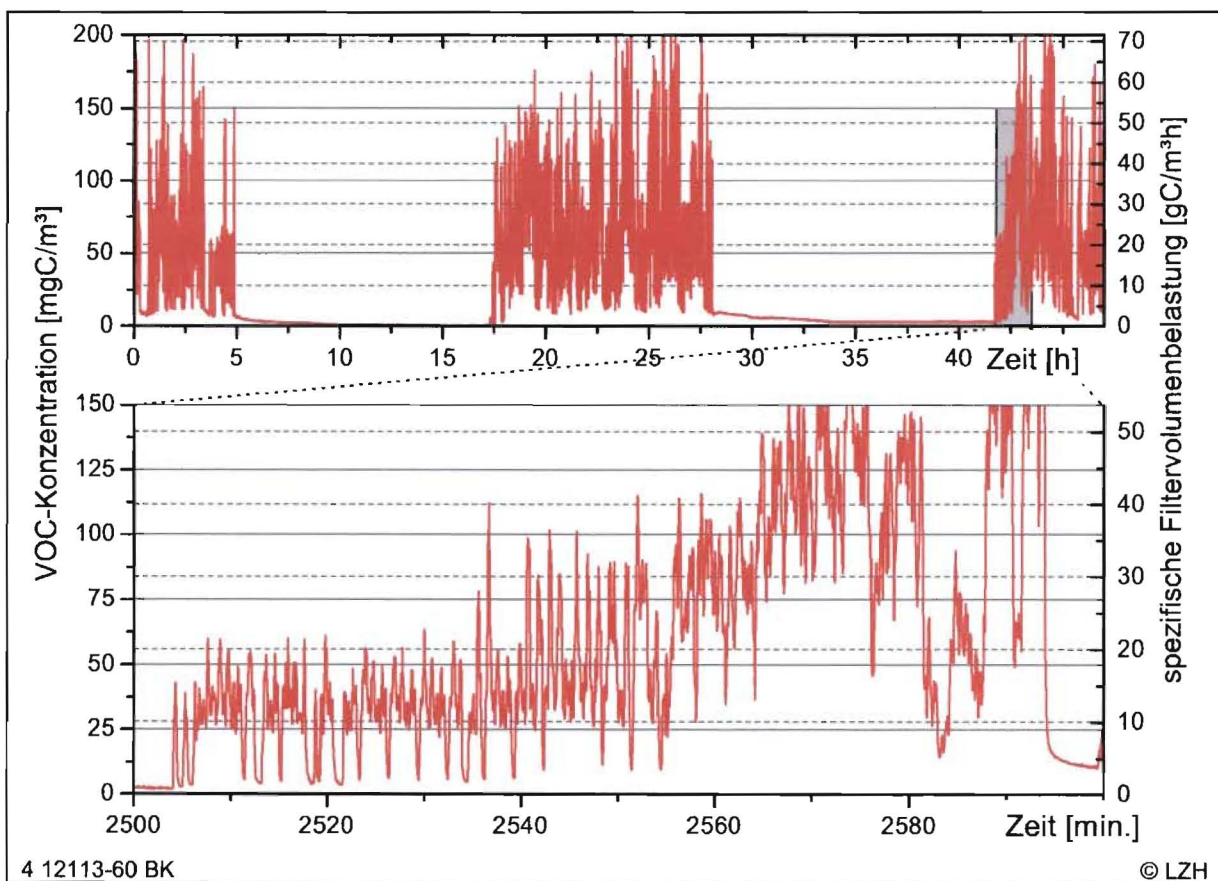


Abbildung 25: Konzentration an Gesamtkohlenwasserstoffen (VOC) in der Erfassungsluft (2.600m³/h) im Verlauf einer Dauermessung

In Abbildung 26 ist die Abbauleistung von Gesamtkohlenwasserstoffen nach den Maßnahmen zur Erfassungsgraderhöhung zeitlich dargestellt. Die durchschnittliche Rohgaskonzentration von 51,4 mgC/m³ wird im Mittel bei einem Volumenstrom von

2.600 m³/h um 26% zu einer Reingaskonzentration von 38,0 mgC/m³ gemindert. Im Versuchszeitraum treten starke Schwankungen in der Roh- und Reingaskonzentration um diese Mittelwerte auf. Ferner bewirken die in Abbildung 25 erkennbaren Produktionspausen ein im Tagesmittel geringes Konzentrationsniveau. Da der Wirkungsgrad eines biologischen Abluftreinigungssystems unter diesen Bedingungen mit der Rohgaskonzentration korreliert, ist die mittlere Schadstoffminderung während der Langzeitmessung (Punkt L in Abbildung 26) erwartungsgemäß niedrig.

Der normierte Geruchsminderungsgrad (vgl. Kapitel 6.1.4.6) beträgt im gleichen Zeitraum 42%.

Durch Auftragung der logarithmischen spezifischen Abbauleistung gegen die spezifische Filterbelastung in Abbildung 27 kann die Limitierung des biologischen Abluftreinigungssystems bezüglich der summarischen Minderung von Gesamtkohlenwasserstoffen abgeleitet werden.

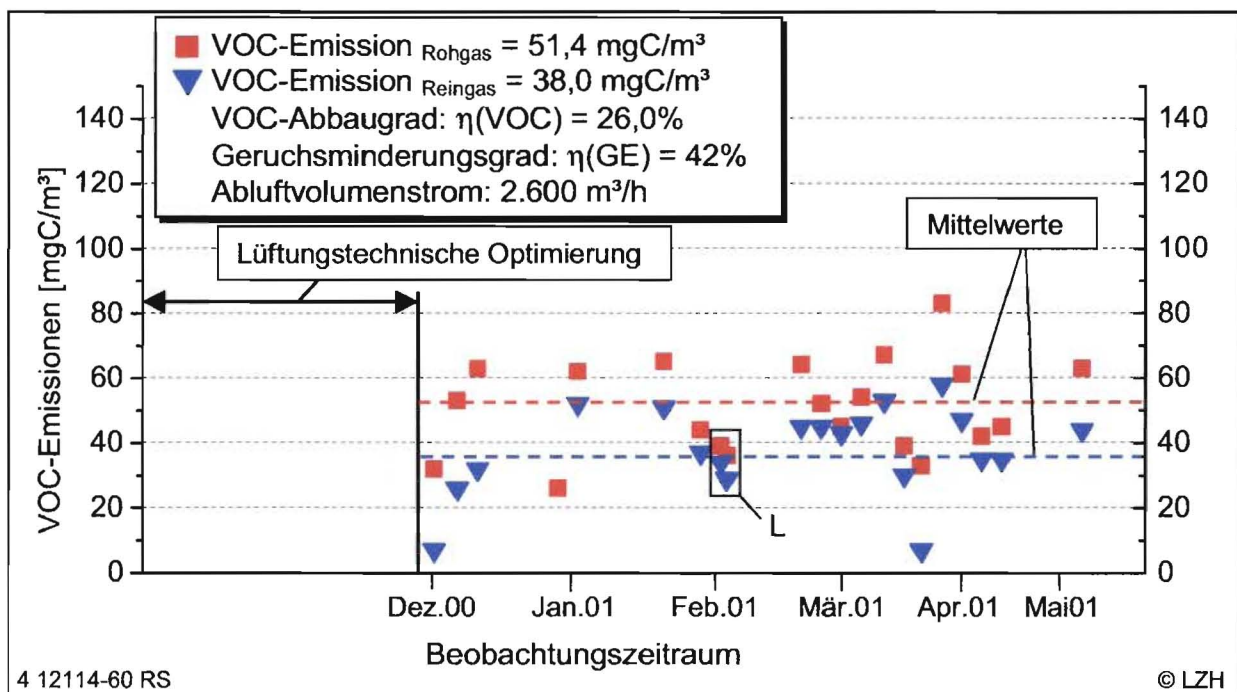


Abbildung 26: Abbau von Gesamtkohlenwasserstoffen nach der Erfassungsgrad-erhöhung im Messzeitraum und während der 60-stündigen Online-Messung (L)

In Abbildung 27 ist der mittlere VOC-Abbaugrad logarithmisch dargestellt. Bei geringen spezifischen Filterbelastungen (< 17 g/m³h) treten besonders hohe Schwankungen in den Wochenmittelwerten der spezifischen Abbauleistung auf. Die hohe Schwankungsbreite in diesem Belastungsbereich äußert sich in Abbaugraden von < 5% bis 98%. Bei höheren Belastungen arbeitet der Biotropfkörper mit einer stabileren spezifischen VOC-Abscheidung, so dass die Schwankungen um den Mittelwert geringer sind. Eine konzentrationsbedingte Limitierung des Systems, die in einem Grenzwert der Tendenzkurve als maximale Abbauleistung erkennbar wäre, kann für den charakterisierten Abluftreinigungsprozess nicht beobachtet werden. Vielmehr ist durch die im mittel relativ geringen VOC-Konzentrationen (51 mgC/m³) von einer Diffusionslimitierung des Systems auszugehen.

Neben der Erfassung der Rohgas- und Reingascharakteristik können ortsabhängige Messungen an verschiedenen Stellen der Filterpackung der Filtereffizienzbetrachtung dienen. Die Ortsabhängigkeit des VOC-Abbauverhaltens wird maßgeblich von der Momentankonzentration der Abluft (Abbildung 25) bestimmt. In Kapitel 9.3 ist die Konzentrationsänderung als Funktion der Filterhöhe beispielhaft dargestellt. In Ermangelung eines stationären Zustandes können aus den Ergebnissen jedoch keine fundierten Rückschlüsse über den Abbaumechanismus – sequentiell oder parallel – gezogen werden, welche auch Aufschluss über das Mikroorganismenspektrum als Funktion der Ortskoordinate im Filterbett geben könnten.

Die Ergebnisse aus der summarischen VOC-Bestimmung können nur orientierende Aussagen liefern. Dies liegt zum einen am komplexem Zusammenhang zwischen VOC-Summenkonzentration und Messgeräteresponsefaktor der Einzelkomponenten. Die Ableitung von Geruchsstoffkonzentration aus diesen Daten und insbesondere für die Intensität und Hedonik eines Geruches ist nicht quantitativ darstellbar. Da jedoch eine wesentliche Zielsetzung des Vorhabens die effektive Geruchsminderung der Abluft aus dem lasergestützten Stanzformenbau ist, wird im folgenden die Effizienz des Abluftreinigungsverfahrens für Einzelkomponenten näher betrachtet.

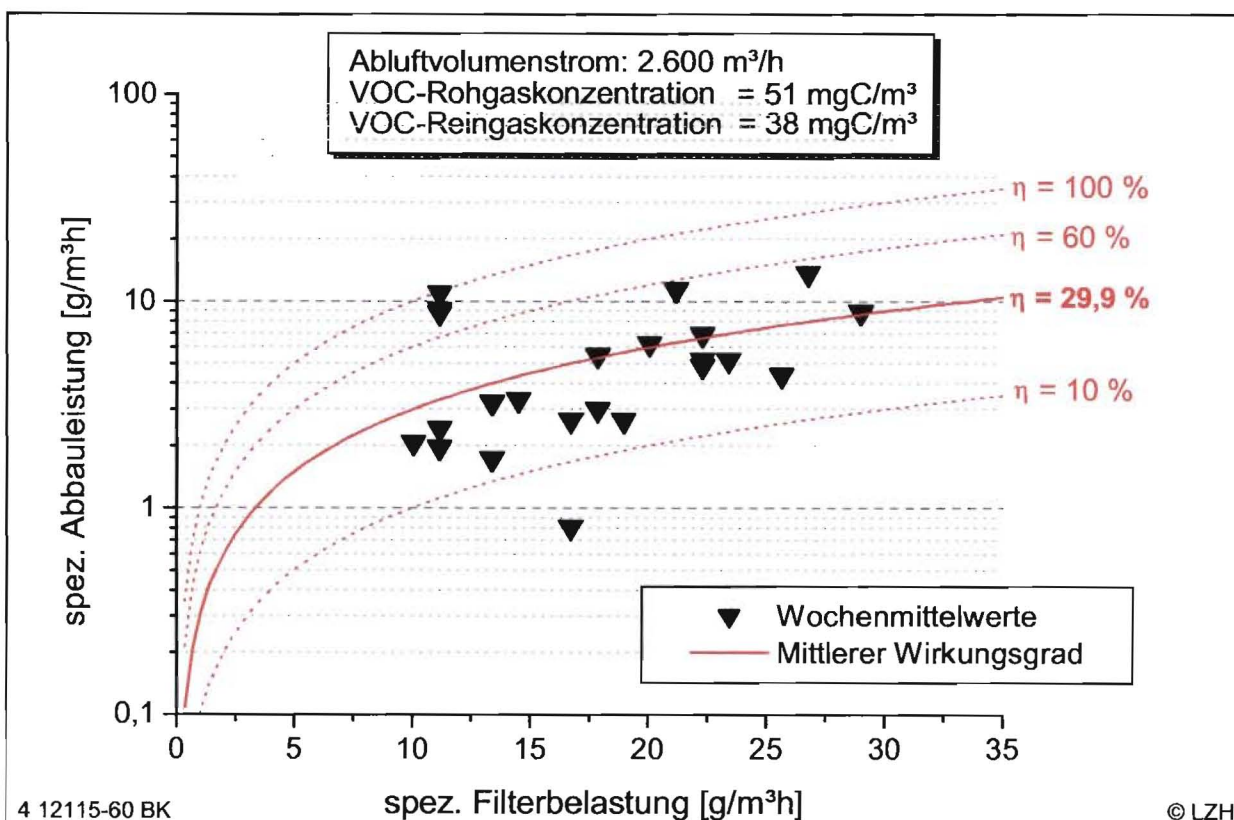


Abbildung 27: Korrelation von spezifischer Filterbelastung und spezifischer Abbauleistung für Gesamtkohlenwasserstoffe

6.1.4.5 Filtrationseffizienz von Leitkomponenten

Die Leitkomponenten in der Erfassungsluft leiten sich aus den Größen Gefährdungspotenzial, Geruchsrelevanz und Konzentration ab. In der vorliegenden Abluftmatrix sind im wesentlichen Komponenten der Substanzklassen der Aldehyde und Ketone sowie aromatischen Kohlenwasserstoffe neben 1,3-Butadien und Aerosolen als Leitkomponenten definierbar.

Die diskontinuierliche sorptive Probenahme ist bei den typischerweise stark schwankenden Emissionsquantitäten im Abluftstrom unter Berücksichtigung der Gesamtkohlenstoffemissionen durch Normierung auf das VOC-Konzentrationsniveau zu beurteilen. Die an Aktivkohle und Silicagel adsorbierten aromatischen Kohlenwasserstoffe und andere organische Einzelkomponenten werden nach Solvensextraktion gemäß der in Kapitel 9.1.8 dargestellten Methode chromatographisch und massenspektroskopisch charakterisiert. Die Chromatogramme aus der Aktivkohle-Adsorption und Silicagel-Adsorption sind ebenfalls in Kapitel 9.1.8 des Anhangs dargestellt.

Tabelle 7: Konzentrationen und Abscheidegrade gasförmiger Emissionsleitkomponenten bei der Schichtholzbearbeitung ($V_N = 2.340 \text{ m}^3/\text{h}$)

	Rohgas (Filter)		Reingas (Filter)		Abbaugrad [%]	Grenzwert	
	Emissionsmassenstrom [g/h]	Massenkonzentration [mg/m ³]	Emissionsmassenstrom [g/h]	Massenkonzentration [mg/m ³]	Biotropfkörperanlage [%]	TA-Luft [mg/m ³]	
						[mg/m ³]	[g/h]
Aldehyde / Ketone							
Formaldehyd	6,5	2,77	1,1	0,46	83	20	100
Acrolein	6,3	2,69	0,6	0,26	91	20	100
Acetaldehyd	14,8	6,34	6,8	2,89	54	20	100
Crotonaldehyd	0,9	0,4	0,5	0,2	50	150	3000
Hexanal	0,8	0,35	0,1	0,05	87	100	2000
Propionaldehyd	1,6	0,7	0,4	0,19	73	100	2000
Aceton	0,3	0,15	0,2	0,08	45	150	3000
Methylethylketon	0,1	0,06	0,1	0,04	34	150	3000
Aromatische Kohlenwasserstoffe							
Benzol	4,8	2,04	2,9	1,244	39	5	25
Toluol	3,9	1,67	1,5	0,652	61	100	2000
Ethylbenzol	0,3	0,14	0,2	0,094	32	100	2000
m-Xylol	0,2	0,07	0,1	0,04	43	100	2000
p-Xylol	0,06	0,025	0,03	0,014	43	100	2000
o-Xylol	0,06	0,024	0,04	0,018	26	100	2000
Styrol	0,4	0,155	0,2	0,069	55	100	2000

In Tabelle 7 sind die Wirkungsgrade für die flüchtigen Emissionsleitkomponenten aus der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz dargestellt. Es ist erkennbar, dass Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein als Leitkomponenten der Aldehyde zu nennen sind. Speziell Formaldehyd (intensiver Geruch, giftig, kanzerogen verdächtig) sowie Hexanal und Methylethylketon (hochintensiver Geruch, narkotisierend) sind als Gefahrstoffe zu nennen. Ferner sind Benzol, Toluol und Ethylbenzol als aromatische Leitkomponenten zu nennen.

Prinzipiell ist festzustellen, dass alle detektierten Leitkomponenten abgebaut werden. Besonders gute mittlere Abbauraten werden für Formaldehyd (83%), Acrolein (91%) und Hexanal (87%) erzielt. Auch für die Gruppe der Aromaten werden befriedigende Ergebnisse erzielt, wohingegen Methylethylketon (34%) und o-Xylol (26%) nur mäßig abgebaut wird.

In Tabelle 8 und Tabelle 9 ist die Minderung unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz dargestellt. Diese Komponenten treten unregelmäßig auf und sind nicht als Leitkomponenten zu definieren. Die Aufzählung kann nicht als vollständig betrachtet werden, da durch Schwerflüchtigkeit, Response oder Polarität sich einige Substanzen dem gaschromatographischen Nachweis entziehen. Ein Großteil der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen ist aus der Struktur der Holzpolymere Lignin, Cellulose und Hemicellulose ableitbar. Durch die Laserstrahlung werden die chemischen Bindungen aufgebrochen und reagieren zu Sekundärprodukten weiter. Beim Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit anderen Arbeiten [42, 43, 44, 45], beispielsweise für die Laserbearbeitung von Massivhölzern, kann festgestellt werden, dass speziell langkettige Kohlenwasserstoffe (i-Octan, Heptadecan, Octadecan) im Rahmen dieser Untersuchungen nicht detektiert werden. Allerdings kann übereinstimmend mit der Literatur Methylcyclohexan [42] bestimmt werden. Auch die Aldehyde und Ketone, wie z.B. Formaldehyd, Aceton, Acetaldehyd und Crotonaldehyd mit unterschiedlichen Analyseverfahren im Rohgas und Reingas einheitlich detektiert werden. Die bei der lasergestützten Stanzformenherstellung analysierten aromatischen Komponenten werden durch die Literaturergebnisse bestätigt [42]. Aromatische Kohlenwasserstoffe, welche mittels diskontinuierlicher Probenahme in der Abluft aus dem Laserschneidprozess detektierbar sind, lassen sich direkt von den Grundbausteinen des Holzinhaltsstoffes Lignins herleiten. Die in Aerosolen nachgewiesenen Fragmente des Lignins wie Syringaaldehyd und Vanillin (Abbildung 36, Seite 72) können dagegen in der Abluft durch dieses Probenahmeverfahren nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 8: Abbau unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile (und Emissionsleitkomponenten*) bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz (Volumenstrom: 2.200 - 2.500 m³/h) Adsorptionsmedium: Aktivkohle

Peak **	Substanz	Rohgas (Filter)	Reingas (Filter)		Grenzwert	
		√=(detektiert)	Abbau (teilweise)	Abbau (vollständig)	TA-Luft (eingehalten)	
					[mg/m ³]	[g/h]
	Andere					
1	Isopropylamin	√	√		√	√
2	Pentenin	√	√		√	√
3	2,3 Dimethyl-1-pentanol	√	√		√	√
4	2,2,3-Trimethylbutan	√	√		√	√
5	Methylcyclopentan	√	√		√	√
6	2,4-Dimethylpentan	√	√		√	√
7	<i>Benzol*</i>	√	√		√	√
8	Cyclohexan	√	√		√	√
9	2-Methylhexan	√	√		√	√
10	3-Methylhexan	√	√		√	√
11	Dimethylcyclopentan	√	√		√	√
12	Heptan	√	√		√	√
13	Methylcyclohexan	√	√		√	√
14	<i>Toluol*</i>	√	√		√	√
15	Essigsäurebutylester	√	√		√	√
16	Methylheptanol	√	√		√	√
17	<i>Ethylbenzol</i>	√	√		√	√
18	<i>p-Xylol*</i>	√	√		√	√
19	Phenylethin	√	√		√	√
20	<i>Styrol*</i>	√	√		√	√
21	<i>o-Xylol*</i>	√	√		√	√
22	1-Propinylbenzol	√	√		√	√
23	Methyl(methylethyl)benzol	√	√		√	√
24	Methyl(methylethenyl)benzol	√	√		√	√
25	(Methylenpropenyl)benzol	√		√	√	√
26	Naphthalin	√		√	√	√
27	(Dimethylethyl)methoxyphenol	√	√		√	√
28	Diethylphthalat	√	√		√	√

*Die massenspektrometrisch detektierten Emissionsleitkomponenten sind der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgeführt

**Die Peaknummern entsprechen den Chromatogrammen in Kapitel 9.1.8 des Anhangs

Tabelle 9: Abbau unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile (und Emissionsleitkomponenten*) bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz ($V_N = 2.200 - 2.500 \text{ m}^3/\text{h}$) Adsorptionsmedium: Silicagel

Peak **	Komponente	Rohgas (Filter)	Reingas (Filter)		Grenzwert	
		\checkmark =(detektiert)	Abbau (teilweise)	Abbau (vollständig)	TA-Luft (eingehalten)	
					[mg/m ³]	[g/h]
	Andere					
1	2-Butanon*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
2	Methylethylketon	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
3	Methylfuran	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
4	Ethylacetat	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
5	2,5-Dihydrofuran	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
6	Benzol*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
7	Toluol*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
8	Butandiol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
9	Methylheptanol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
10	Ethylbenzol*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
11	p/m-Xylol*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
12	Phenylethin	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
13	Styrol*	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
14	Propinylbenzol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
15	Methyl(methylethyl)benzol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
16	Methyl(methylethenyl)benzol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
17	(Methylenpropenyl)-benzol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
18	Naphthalin	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
19	(Dimethylethyl)- methoxyphenol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
20	2,6-Di-tert-butyl-3- methylphenol	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark
21	Butendisäuredibutylester	\checkmark	\checkmark	-	\checkmark	\checkmark

*Die massenspektrometrisch detektierten Emissionsleitkomponenten sind der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgeführt

**Die Peaknummern entsprechen den Chromatogrammen in Kapitel 9.1.8 des Anhangs

Aus der in Tabelle 7 und Tabelle 9 dargestellten Minderungscharakteristik wird deutlich, dass sämtliche Komponenten partiell durch das Tropfkörpersystem abgeschieden werden. Die quantitative Angabe der Effizienz unregelmäßig auftretender Emissionsbestandteile ist aufgrund der starken Rohgaskonzentrations- und Effizienzschwankungen nicht möglich.

Zur Beurteilung des Abbauverhaltens ist die Betrachtung der Konzentrationsabhängigkeit des Abbaugrades sinnvoll. In Abbildung 28 sind die Filtrationseffizienz des Biotropfkörpers für die aromatischen Leitkomponenten Benzol, Toluol, m-Xylol, Ethylbenzol und Styrol in logarithmischer Abhängigkeit von der Konzentration bei einem Abluftvolumenstrom von $2.600 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Insgesamt wird deutlich, dass die Abhängigkeit der Abbauleistung von der Massenkonzentration mit zunehmendem Emissionsmassenstrom der betrachteten Komponente an Gültigkeit gewinnt. Während für die Komponente m-Xylol keine eindeutige Abhängigkeit zwischen Konzentration und Effizienz erkennbar ist, korrelieren die Abbaugrade der Komponenten Ethylbenzol, Styrol und Benzol mit der

Rohgaskonzentration. Für Toluol lässt sich eine lineare Regression dieses Zusammenhangs mit ausreichendem Bestimmtheitsmaß (> 95%) durchführen.

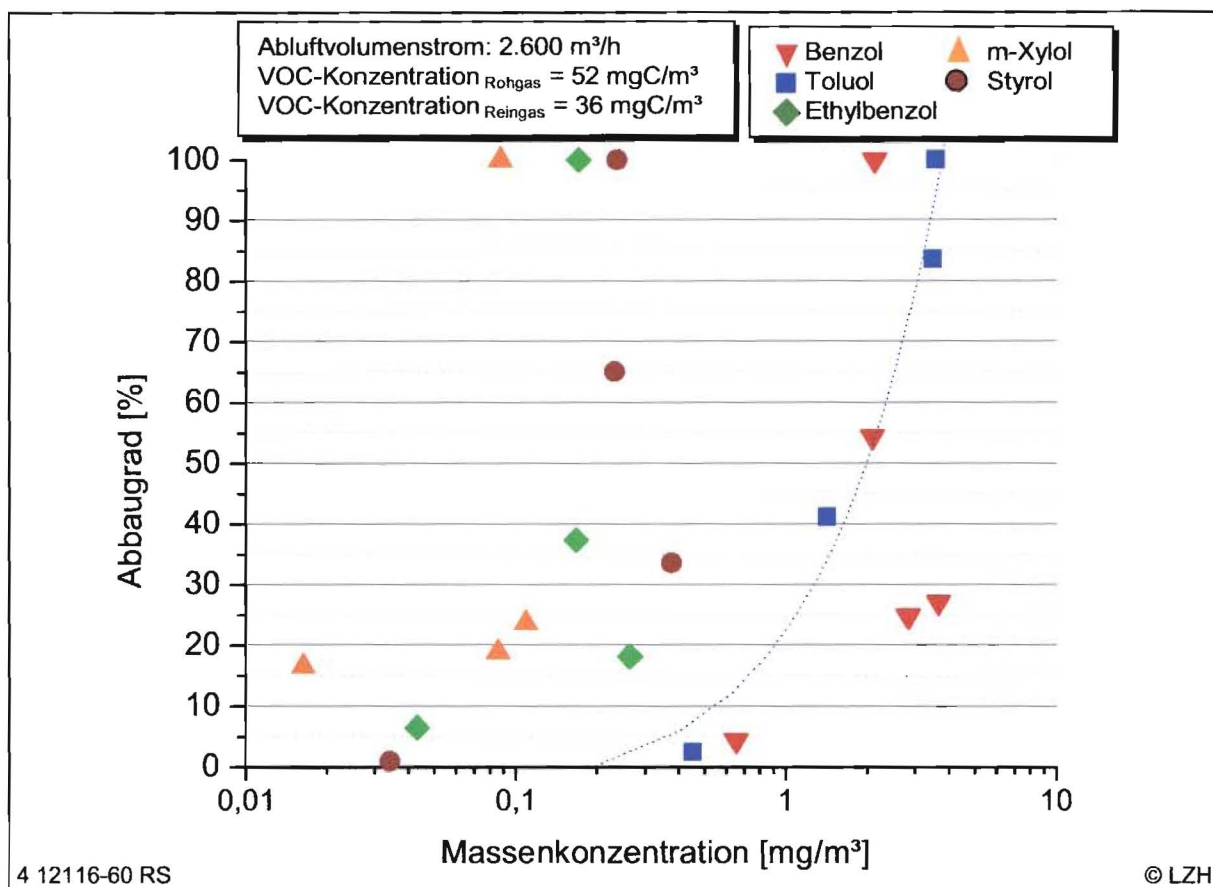


Abbildung 28: Abbaugrad aromatischer Leitkomponenten und lineare Regression der Konzentrationsabhängigkeit des Abbaugrades für Toluol (blaue Linie)

Die Ergebnisse unterstreichen die positive Wirkung der Konzentrationserhöhung in der Erfassungsluft – resultierend aus der effizienten Emissionserfassung – auf die Schadstoffminderung. Dieser Sachverhalt wird auch in der zeitlichen Darstellung der spezifischen Filterbelastungen und Massenkonzentrationen aromatischer Leitkomponenten im Roh- und Reingas des Biotropfkörpers in Abbildung 29 deutlich.

Aus der logarithmischen Darstellung ist zu erkennen, dass die aromatischen Leitkomponenten Benzol, Toluol und Styrol nach den Maßnahmen zur Erfassungsgrad-erhöhung effizient abgeschieden werden.

Auffällig ist, dass ca. 14 Tage nach Zugabe einer Mikroorganismensuspension (vgl. Kapitel 6.1.5) Schadstoffminderungsgrade > 98% für die dargestellten Aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Styrol und Toluol erreicht werden. Zeitgleich zum Anstieg des Wirkungsgrades für diese vergleichsweise schlecht wasserlöslichen Komponenten sinken die Abbaugrade für die Stoffgruppe der Aldehyde und Ketone, so dass die Umstellung in der Selektivität des Biotropfkörpers in der Einstellung der Berieselungsdichte (Dicke des Wasserfilms; vgl. Kap. 6.1.3.3) und der Mikroorganismenpopulation des Biofilms (Selektivität) zu suchen ist. Die Bewertung des Abbauverhaltens nach

umweltbiotechnologischen Aspekten unter Einbeziehung der jeweils zum Animpfen genutzten selektiven Organismensuspensionen erfolgt in Kapitel 6.1.5.

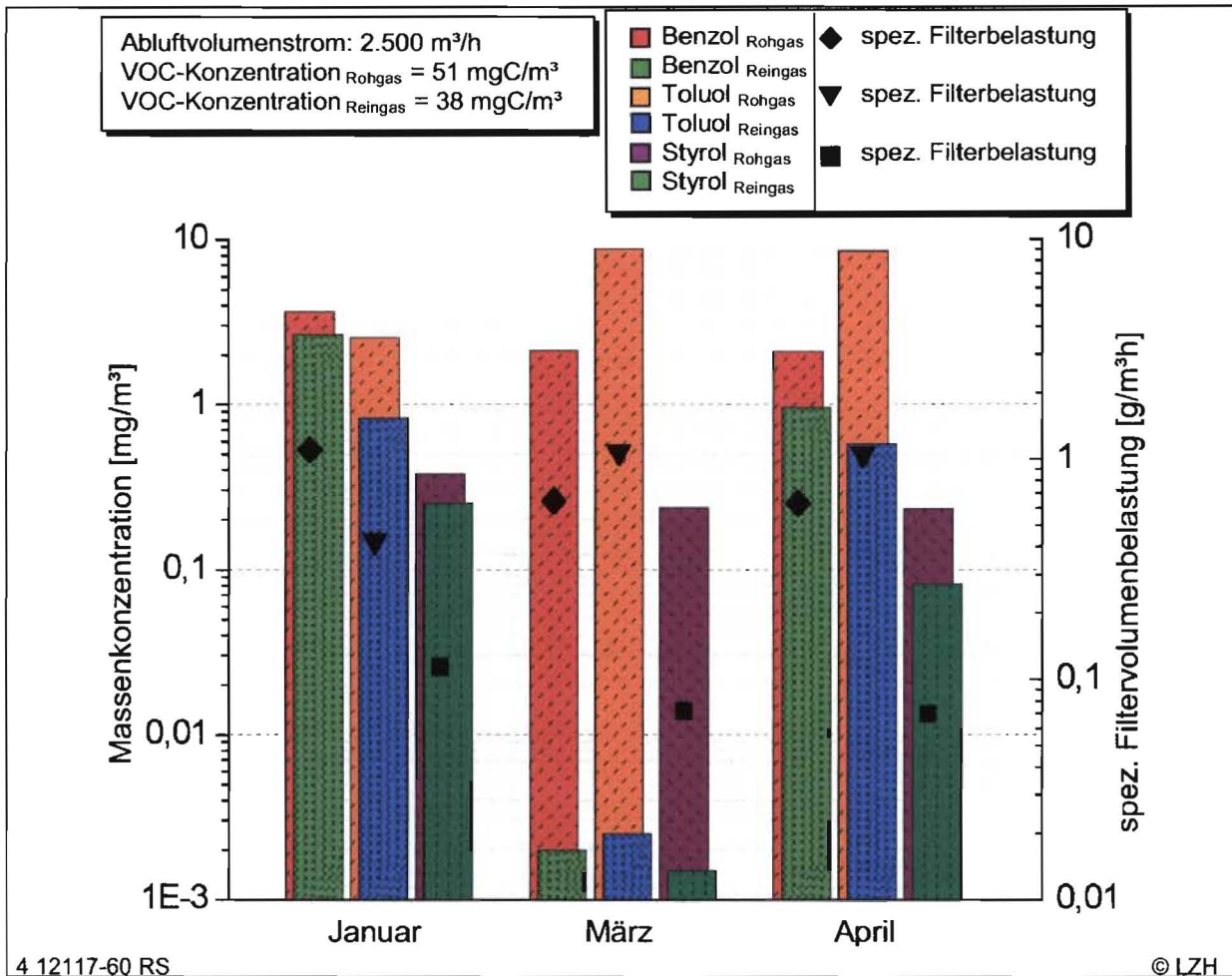


Abbildung 29: Spezifische Filterbelastungen und Massenkonzentrationen aromatischer Leitkomponenten im Roh- und Reingas des Biotropfkörpers

Da nach Bewertung der deutschen Stanzformenhersteller der äußerst unangenehme, charakteristische Geruch der Abluft als ein zentrales Problem zu nennen ist, wird bei der Untersuchung der Abbauleistung des BTK neben olfaktometrischen Messungen insbesondere auf die Beseitigung von Aldehyden aus der prozessbedingten Abluft geachtet. Diese Schadstoffe werden diskontinuierlich durch Absorption und Derivatisierung mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) und Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) qualifiziert und quantifiziert. Das notwendige Teilvolumen von ca. 30 l wird mit einem Volumenstrom von 2 l/min mit Hilfe von Membranpumpen erzeugt.

Die hohe Selektivität und Effizienz des Filtersystems für die Minderung der geruchsrelevanten Carbonylverbindungen ist in Abbildung 30 dargestellt.

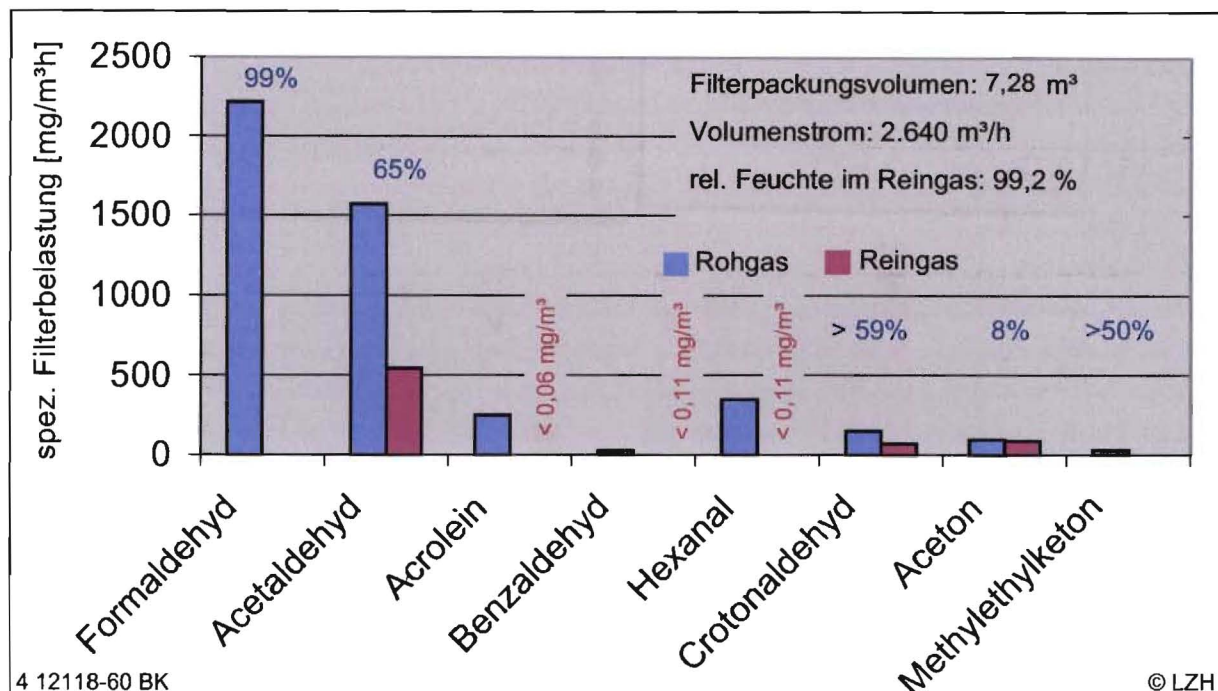


Abbildung 30: Schadstoffeliminierung geruchsrelevanter Carbonylverbindungen durch den Biotropfkörper

Insbesondere die geruchsrelevanten Komponenten Formaldehyd, Acrolein, Acetaldehyd und Hexanal werden mit signifikant hohen Abbauraten von 65-99% gemindert. In Abbildung 31 sind für die geruchsrelevanten Aldehyde beispielhaft zwei Leitkomponenten über die Messstage dargestellt. Der Vergleich der Massenkonzentration von Formaldehyd und Acrolein im Roh- und Reingas des Biotropfkörper-Filters verdeutlicht die effiziente Minderung der Komponenten mit geringen Geruchsschwellwerten. Im logarithmisch skalierten Diagramm in Abbildung 31 ist erkennbar, dass die Rohgaskonzentration die Geruchsschwellen der Carbonyl-Leitkomponenten Formaldehyd und Acrolein teilweise bis zu einer Größenordnung überschritten werden. Durch die biologische Abluftreinigung werden die Massenkonzentrationen der Komponenten im Mittel weit unter die Geruchsschwelle der Einzelkomponenten gemindert. Aus dem in Abbildung 31 dargestellten schlechteren Ergebnis im Messzeitraum März und dem anschließenden Anstieg auf befriedigende Abscheideleistungen kann geschlossen werden, dass die Abbauleistung bezüglich der geruchsintensiven Carbonylverbindungen noch weiter gesteigert werden kann. In der März-Messung sind insgesamt jedoch befriedigende Schadstoffminderungen zu verzeichnen, da in diesem Zeitraum besonders hohe Aromaten-Abscheideleistungen zu verzeichnen sind.

Die Ergebnisse zur Schadstoffeliminierung von Leitkomponenten unterstreichen die Eignung des Abluftreinigungsverfahrens zur selektiven Schadstoffminderung der mit einer komplexen Schadstoffmatrix beladenen Abluft aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Es werden sowohl unregelmäßig auftretende Schadstoffe als auch Leitkomponenten durch den Biotropfkörper abgeschieden. Aromatische Kohlenwasserstoffe werden ebenso wie Aldehyde und Ketone durch das biologische Abluftreinigungsverfahren katalytisch umgesetzt.

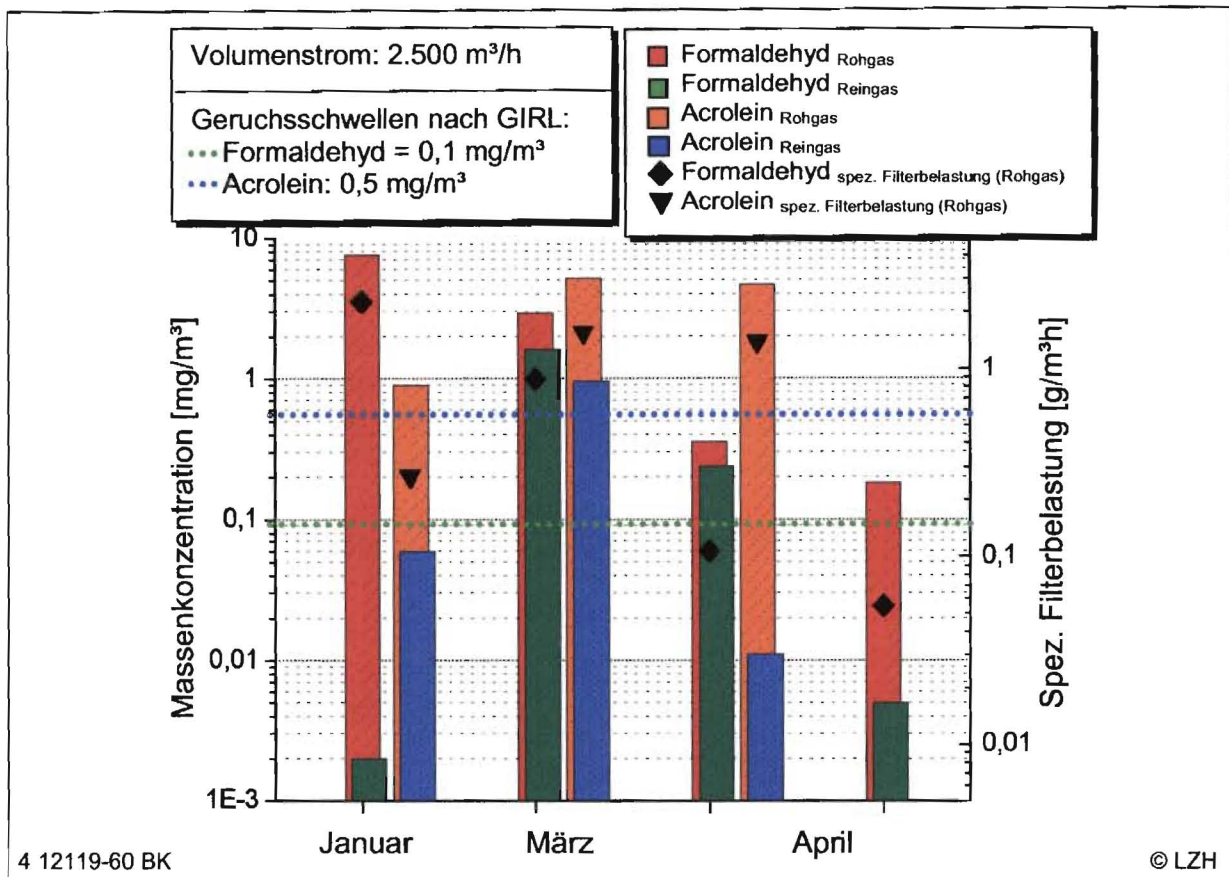


Abbildung 31: Massenkonzentration und spezifische Filterbelastung geruchsrelevanter Carbonylverbindungen durch den Biotropfkörper

Nach dem Stand der Technik ist es nicht möglich, von der Konzentration einzelner Komponenten und Komponentengemische zuverlässig auf die Geruchsstoffkonzentration zu schließen. Dieser Sachverhalt bedingt die Notwendigkeit, zur Charakterisierung eines geruchsmindernden Abluftreinigungsverfahrens olfaktometrische Methoden und Techniken einzusetzen. Die olfaktometrischen Messergebnisse ermöglichen die Durchführung einer Ausbreitungsrechnung nach den Richtlinien zum Geruchsimmissionsschutz.

6.1.4.6 Geruchsminderung

Wesentliches Ziel der Abluftbehandlung ist die effektive Geruchsminderung, so dass Geruchsimmissionen in der Nachbarschaft des Produktionsstandortes dauerhaft vermieden werden. Die Beurteilung des qualitativen und quantitativen Geruchsminderungsgrades bildet die Grundlage für eine mögliche Ausbreitungsrechnung gemäß der Geruchsimmissionsschutzrichtlinie GIRL der technischen Anleitung zu Reinhaltung der Luft. Das Ausmaß der Geruchsminderung durch den Biotropfkörper wird mittel eines eigens für diese Aufgabe konzipierten Unterdruckprobennehmers realisiert. Die olfaktometrische Probenahme- und Versuchstechnik ist in Kapitel 9.1.2 des Anhangs beschrieben.

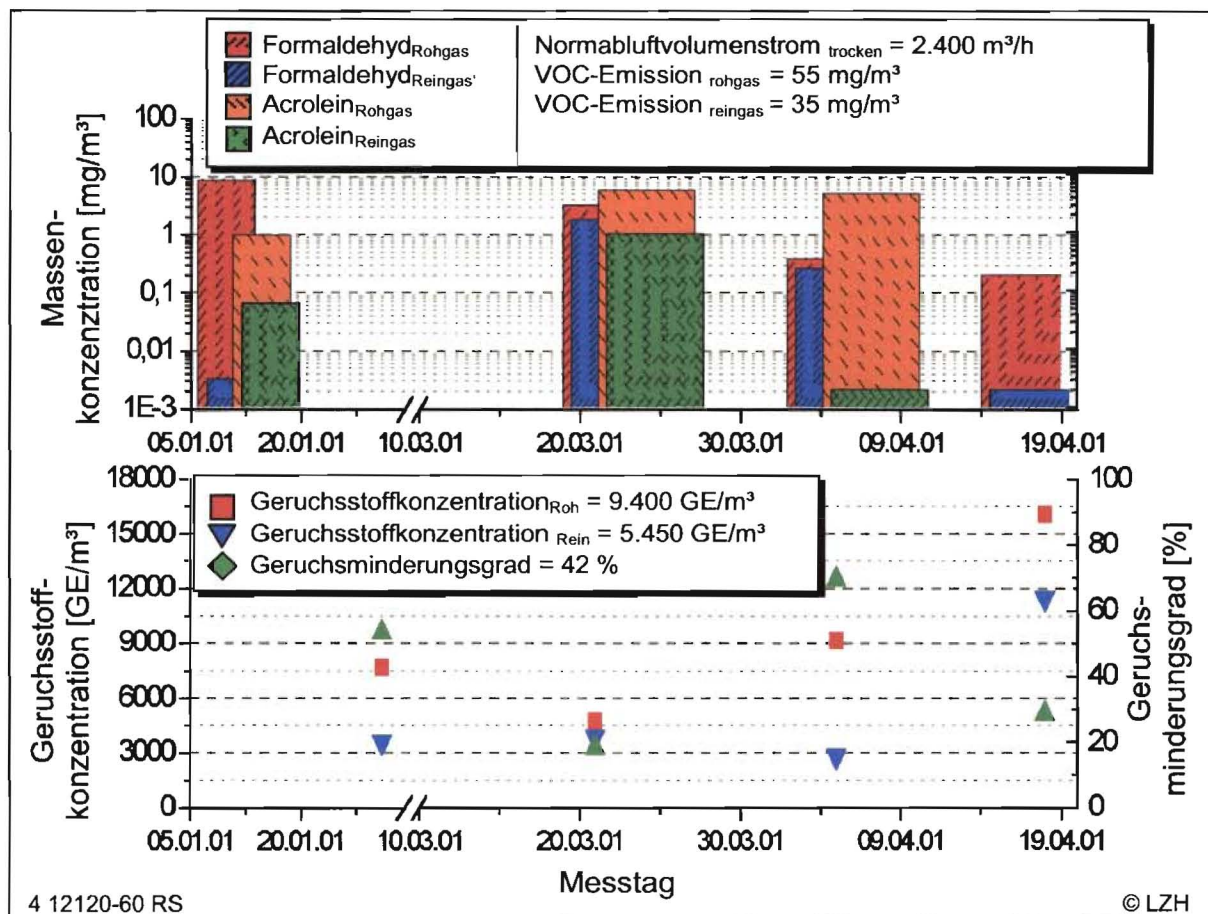


Abbildung 32: Bewertung der Geruchsminderung anhand der Geruchsstoffkonzentration und geruchsrelevanten Substanzen

Während der diskontinuierlichen Probenahme des Roh- und Reingases an der Biotropfkörper-Anlage (aktive Punktquelle) durch Befüllen von Probenahmebeutel mittels Unterdruckprobennehmer, werden zeitgleich kontinuierlich die VOC-Konzentrationen aus dem Roh- und Reingas mit FID's und die Abluftrandbedingungen mit einem Datenlogger erfasst. Somit kann nach der Auswertung der anschließenden olfaktometrischen Untersuchung der Gesamtemissionsmassenstrom bestimmt werden. Zusätzlich wird ein Teilvolumenstrom an den jeweiligen Messstellen entnommen und DNPH-Kartuschen

beaufschlagt, um bei der Auswertung der olfaktometrischen Untersuchung Rückschlüsse auf Aldehyde und Ketone ziehen zu können.

Zur Überprüfung der möglichen Korrelation zwischen geruchsrelevanten Komponenten und Geruchsstoffkonzentration sind detektierte geruchsrelevante Aldehydmassenkonzentrationen im oberen Teil der Abbildung 32 logarithmisch aufgetragen. Im unteren Teil der Abbildung 32 sind die olfaktometrisch bestimmten Geruchsstoffkonzentrationen im Roh- und Reingas über die Messreihen aufgetragen. In den ersten beiden Messreihen scheint eine Korrelation zwischen Formaldehyd und Acroleinkonzentration einerseits und der Geruchsstoffkonzentration andererseits nachweisbar. Eine höhere Aldehydkonzentration im Rohgas bedingt neben höherer Geruchsstoffkonzentration im Rohgas auch einen höheren Geruchsminderungsgrad von 45%. In den folgenden Messungen kann dieser Zusammenhang jedoch nur insofern bestätigt werden, als dass höhere Aldehydkonzentrationen einen höheren Geruchsminderungsgrad bedingen. Von einer permanenten Korrelation insbesondere zwischen der geruchsrelevanten Leitkomponente Formaldehyd und der Geruchsstoffkonzentration ist nach den vorliegenden Ergebnissen nicht auszugehen. Im Versuchszeitraum variiert der Geruchsminderungsgrad abhängig von der Rohgaskonzentration um ca. 20% vom mittleren Geruchsminderungsgrad von 42%. Insgesamt kann bei einer spezifischen Filterbelastung von $18 \text{ gC/m}^3\text{h}$ eine Geruchsminderung durch das Biotropfkörper-Verfahren von bis zu 70% festgestellt werden. Zur Beurteilung der Geruchsimmission werden neben der Quantifizierung der Geruchsstoffkonzentration (Geruchseinheiten) auch qualitative Aspekte des Geruches bewertet [46]. In Abbildung 33 ist die Bewertung der Geruchsintensität und der hedonischen Wirkung des Roh- und Reingases durch ein repräsentatives Probandenkollektiv graphisch dargestellt.

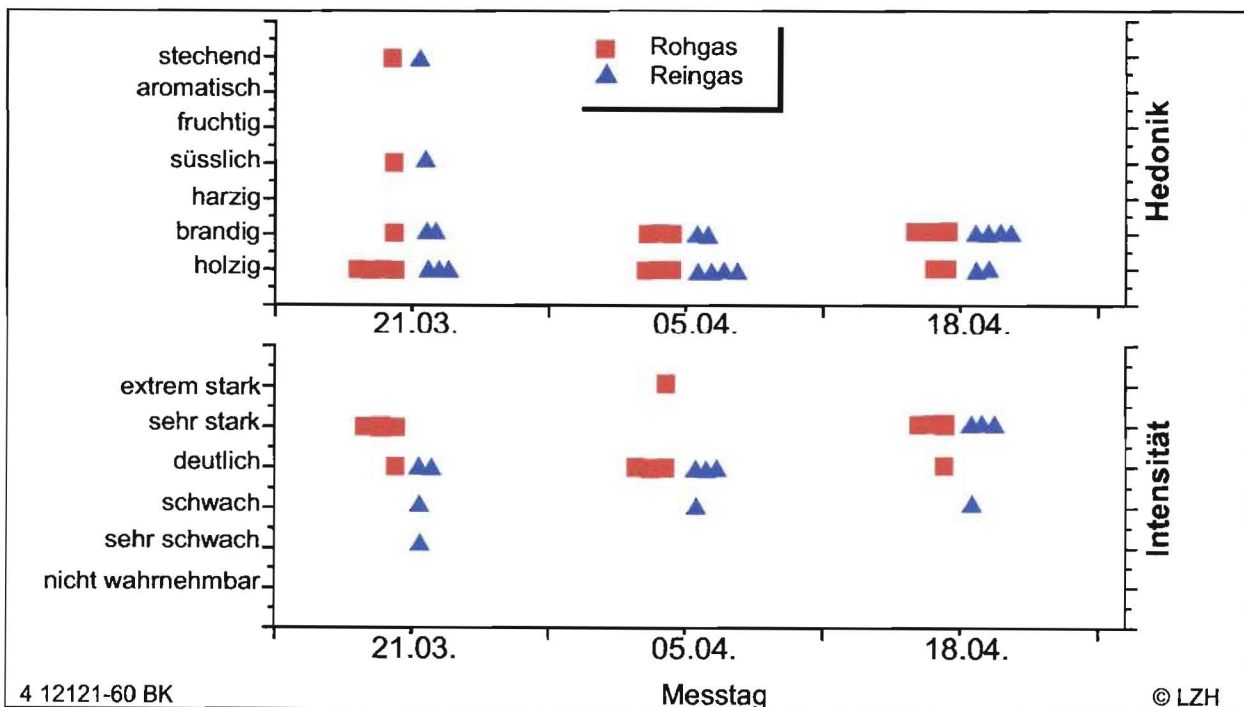


Abbildung 33: Bewertung der Geruchsintensität und der hedonischen Wirkung des Roh- und Reingases durch ein repräsentatives Probandenkollektiv

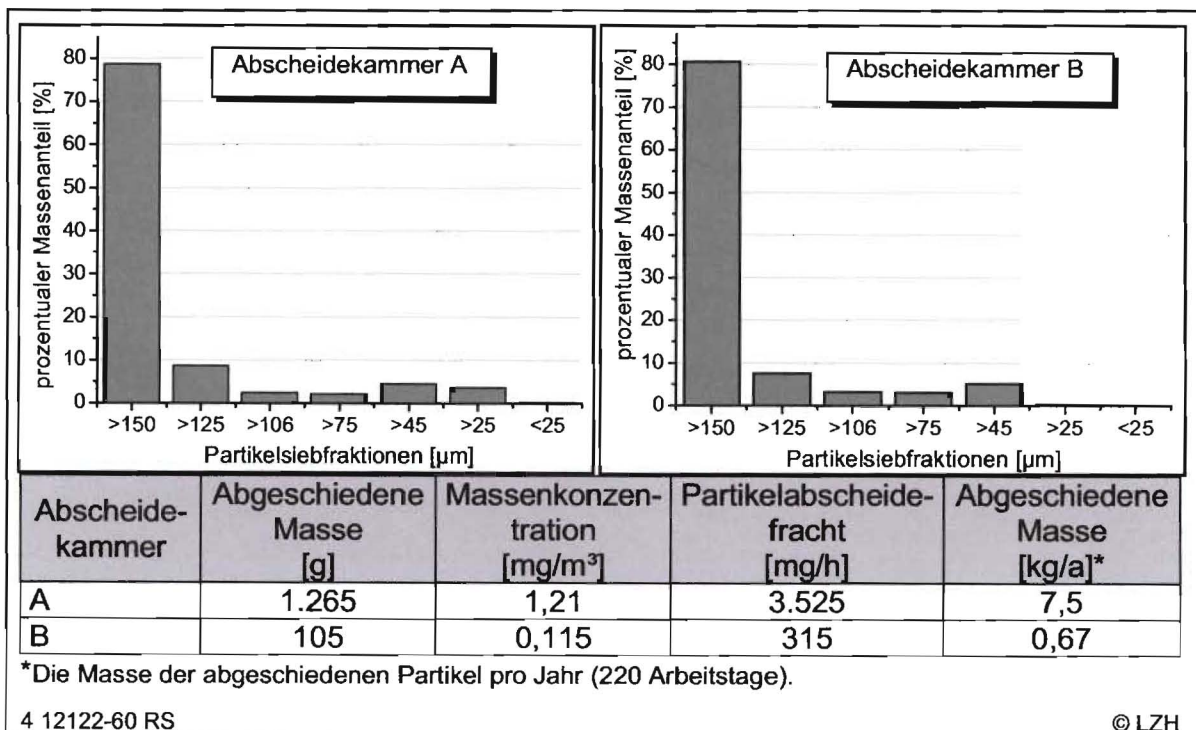
Die Hedonik der Luftproben sowohl des Rohgases als auch des Reingases ist im Mittel als "brandig-holzig" zu bezeichnen. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass für das Reingas in einigen Fällen auch "erdig" als hedonische Beschreibung gewählt wurde. Eine stärkere Differenzierung des Geruches von Rohgas und Reingas wird in der unabhängigen Bewertung der Intensität des Geruches deutlich. Wie im unteren Teil der Abbildung 33 dargestellt, wird die Geruchsintensität des Rohgases vom Probandenkollektiv überwiegend als "sehr stark" eingestuft. Die Reingasproben werden hingegen überwiegend als "schwach bis deutlich" charakterisiert.

Folglich wird durch das Biotropfkörper-Verfahren neben der Minderung der Geruchsstoffkonzentration eine positive qualitative Änderung der Geruchsintensität erreicht.

6.1.4.7 Vorabscheidung von Grobstaub

Zur vollständigen Effizienzbetrachtung wird in den folgenden drei Kapiteln die Abscheidung von Grobstaub und Feinstaub sowie der Druckverlust über der Filterpackung bewertet.

Positionslochausschnitte und Grobstäube müssen mittels des in Kapitel 6.1.3.1 beschriebenen Grobabscheiders vor Erreichen des Biotropfkörpers abgeschieden werden. Zur quantitativen Beurteilung der Staubabscheidung werden definierte Mengen der abgeschiedenen Partikel in Mikrosiebe unterschiedlicher Lochweite gegeben. Durch eine Siebzeit von 90min bei einer Siebvibrationsamplitude von 3,00 mm erhält man sechs Fraktionen. Die Massenanteile der fraktionierten Staubpartikel sind bezogen auf den Gesamteintrag in der Abbildung 34 dargestellt. Die Sammlung der Partikelabscheidung wurden in zwei Messreihen über einen Zeitraum von 44 bzw. 33 Arbeitstagen (427 h bzw. 320 h) durchgeführt. Im Abscheidebehälter für die Fraktion A fallen 93 % der gesamt abgeschiedenen Partikel an. Die mittlere Massenkonzentration der gesamt abgeschiedenen Partikelfraktion beträgt $1,3 \text{ mg/m}^3$. Bei einer Partikelmassenkonzentration von 28 mg/m^3 entstehen somit $29,3 \text{ mg/m}^3$ laserinduzierte Gesamtpartikel. Dies entspricht $76,2 \text{ g/h}$ bei einem mittleren Erfassungsvolumenstrom von $2.600 \text{ m}^3/\text{h}$ aus der Absaugung von drei CO_2 -Laserstationen. Die mittlere abgeschiedene Partikeljahresfracht in der Abscheidekammer A ist links in der Abbildung 34 dargestellt. Sie beträgt $7,5 \text{ kg}$ Grobstaub pro Jahr. Die rechts dargestellte Abscheideeffizienz der Kammer B beträgt $0,67 \text{ kg}$ Grobstaub pro Jahr.



4 12122-60 RS

© LZH

Abbildung 34: Partikelsiebfraktionsverteilung des Grobstaubes (Abluftvolumenstrom: $2.800 \text{ m}^3/\text{h}$; VOC-Konzentration: 50 mgC/m^3)

Aus den beiden Messreihen wird ersichtlich, dass die Partikelfraktion $d > 150 \mu\text{m}$ mit ca. 75 % die weitaus größte abgeschiedene Partikelrate durch den Schwerkraftabscheider ausmacht. Die Partikelfractionen $d < 150 \mu\text{m}$ werden nur zu einem geringen Teil in den Abscheidebehältern A und B separiert. Folglich werden Partikelfractionen $< 150 \mu\text{m}$ dem Biotropfkörper zugeführt. In der Abbildung 35 sind beispielhaft links die Siebfraction $> 150 \mu\text{m}$ und rechts die Siebfraction $> 106 \mu\text{m}$ fotografisch dargestellt.

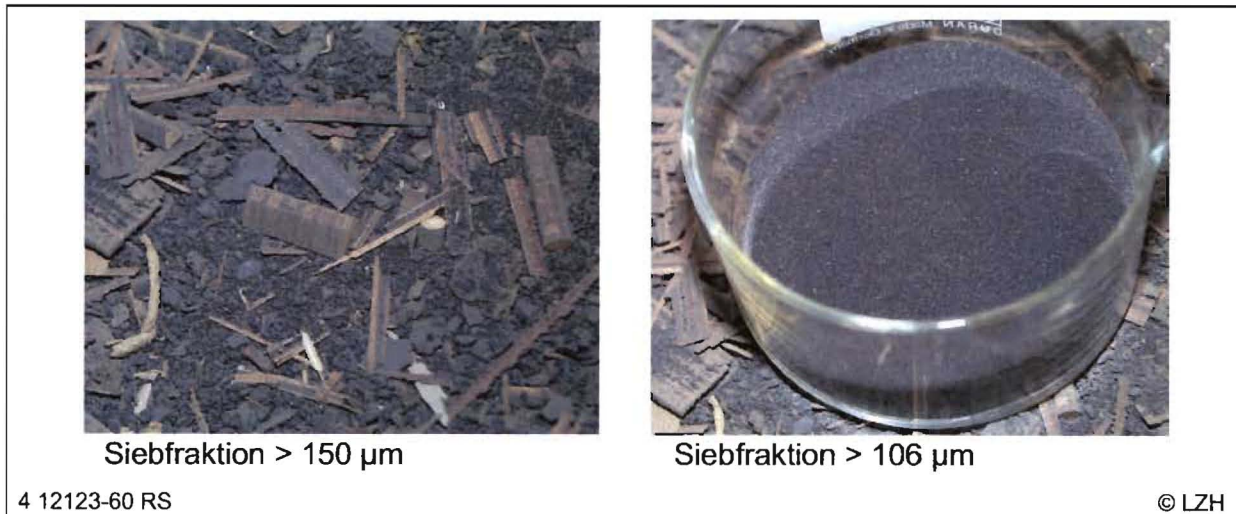


Abbildung 35: Durch den Vorabscheider erfasste Staubfraktionen aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Links: Grobstaub $> 150 \mu\text{m}$ sowie Positionlochausschnitte und Späne. Rechts: Staubfraktion der Größe $106\text{-}150 \mu\text{m}$

6.1.4.8 Abscheidung von Aerosolen / Feinstaub



Durch den Grobstaubabscheider werden Partikel mit Durchmessern $< 150 \mu\text{m}$ nur teilweise abgeschieden. Die nicht abgeschiedenen Aerosole werden ohne weitere Vorfiltration in den Biotropfkörper geleitet. Mit einem Anteil bis zu 20 % bilden die Aerosole eine charakteristische Größe der Gesamtemissionszusammensetzung aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Sie bestehen aus Gasen mit fein verteilten Flüssigkeiten oder Feststoffen, wie Rauch und Staub.

Der Gesamtaerosolanteil wird mittels der in Kapitel 9.1.4 des Anhangs beschriebenen Versuchstechnik mit dem Planfilterkopfgerät unter isokinetischer Probenahme eines Teilvolumenstroms aus dem Hauptvolumenstrom bestimmt. Die Partikelgrößenverteilung des Feinstaubes im Rohgas wird mittels Kaskadenimpaktion bestimmt. Die Partikel werden in einem Körngrößenbereich von $0,015$ bis $16 \mu\text{m}$ erfasst und in 11 Stufen separiert.

Die Gesamt-Aerosolkonzentrationen wird gravimetrisch mit Hilfe von Quarzfaser-Planfiltern beurteilt. Die Aerosole werden nicht nach anorganischen und organischen Bestandteilen getrennt. Sie repräsentieren somit Rauchanteile, die durch ein eventuelles Verdampfen/Sublimieren des Grundwerkstoffes Birkenchichtholz sowie durch Zersetzung von Zuschlagstoffen entstehen. Die Partikel-Emissionsrate beträgt $(13,0 \pm 1,3) \text{ mg / s}$. Die Partikelkonzentration im Rohgas beträgt $17,7 \text{ mg/m}^3$ und im Reingas $14,5 \text{ mg/m}^3$. Der prozentuale Massenkonzentrationsanteil der partikelförmigen Emissionen zu den VOC-Emissionen ist im Rohgas (52 %) höher als im Reingas (45 %).

Bei den partikelförmigen Emissionen wird der Grenzwert für den Gesamtstaub von 20 mg/m^3 (bei Vorhandensein von org. Stoffen der Klasse I gemäß Anhang E der TA-Luft, was wahrscheinlich ist) bzw. 50 mg/m^3 für nichttoxischen Staub angewendet. Der Grenzwert für Gesamtstaub wird folglich unter Einhaltung der zugrunde liegenden Prozessparameter eingehalten. Zu überprüfen ist, ob der Grenzwert für krebserzeugende Stoffe der Klasse I gemäß TA-Luft (gleichgültig ob gasförmig oder partikelgebunden) von $0,1 \text{ mg/m}^3$ und der relevante Grenzmassenstrom dieser – durch an den Partikeln gebundener Komponenten – von $0,5 \text{ g/h}$ überschritten ist. In Abbildung 36 und Tabelle 10 sind die Ergebnisse dieser Überprüfung zusammengefasst.

Die chromatographische Analyse extrahierbarer, partikelgebundener Komponenten charakterisiert organische Substanzen, die an Aerosolpartikeln aus der Stanzformenherstellung absorbiert vorliegen. Aus der Produktion von Schichtholz-Stanzformen mittels Laserstrahlung werden aus der prozessbedingten Abluft Aerosolpartikel entnommen und analysiert. Die Ergebnisse der qualitativen gaschromatographischen und massenspektrometrischen (GC-MS) Analyse dieser Aerosole sind in Abbildung 36 zusammengefasst.

Lösungsmittel	Extrahierte Komponente	
CS₂	4-Hydroxy-benzonitril	 <p>Aerosole auf einer Kaskadenimpaktor Prallfolie</p>
	2,3-Dihydroxy-1H-inden-5-ol	
	7-Methyl-benzofuran	
	2,6-Dimethoxy-phenol	
	2-Methyl-benzofuran	
	4-Hydroxy, 3-methyl-benzaldehyd	
	3,5-Dimethoxy-4-hydroxy-benzaldehyd	
Cyclohexan	3,5-Dimethoxy-4-hydroxy-benzaldehyd	 <p>Aerosole auf einem Glasfaserfilter</p>
	Phtalsäure-bis-2-ethylhexylester	
CH₃Cl₂	3,5-Dimethoxy-4-hydroxy-benzaldehyd	

<u>CO₂-Laser Parameter:</u> Laserleistung 1,5 kW Vorschub: 1,3 m/min. Brennweite: 190 mm	<u>Prozessparameter:</u> Prozessgas: Druckluft Schnittfuge: 0,7 mm <u>Material:</u> Birkenesperrholz, 15 mm
--	---

4 12124-60 BK © LZH

Abbildung 36: Charakteristik der Feinstaubfraktion

Unter genauerer Betrachtung der Emissionskomponenten kommt man zu dem Schluss, dass diese sich wie z.B. 4-Hydroxy, 3-methoxy-benzaldehyd (Vanillin) und 3,5-Dimethoxy-4-hydroxy-benzaldehyd (Syringaldehyd) größtenteils vom Holzbestandteil Lignin ableiten lassen. Als einzige massenspektroskopisch erfasste, stickstoffhaltige Aerosolkomponente ist 4-Hydroxy-benzonitril zu nennen. Auffallend ist, dass zyklische Verbindungen mit Stickstoff als Heteroatom, die bei der unvollständigen Verbrennung von Melamin-Formaldehydharz entstehen können, in keinem Aerosol-Extrakt eluierbar und detektierbar sind. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Werkstoffkomponente Melaminharz

laserinduziert in leichtflüchtige Bestandteile fragmentiert. Die Abluftzusammensetzung ist folglich weitestgehend unabhängig von der Lackierung des Schichtholzes, so dass die biologische Abluftreinigung sowohl für lackierte als auch für unlackierte Schichthölzer in gleicher Weise konzeptionierbar ist. Aufbauend auf der bereits nachgewiesenen Biodegradation von Lignin und Ligninfragmenten wird die Verträglichkeit des biologischen Abluftreinigungssystems mit den Aerosolen aus dem Laserschneidprozess in Kapitel 6.1.5.3 erörtert. Bedeutend für die Grenzwertbetrachtung ist, dass keine krebserzeugenden Komponenten wie das in der Abluft vorhandene Benzol durch Solvensextraktion-GC/MS nachgewiesen werden können.

Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) können an der Oberfläche von Partikeln absorbiert werden. Die in Tabelle 10 zusammengefassten Untersuchungen auf PAK im Aerosol ergaben in Zusammenarbeit mit dem TÜV-Nord, Hannover, einen Massenanteil von 70 ppm an Aerosolen gebundenen PAKs im Rohgas. Bezogen auf einen Abluftvolumenstrom von 2.500 m³/h beträgt die Gesamtmasse emittierter Polyaromatischer Kohlenwasserstoffe 37 mg/d. Benzo[a]pyren, welches als Maßstab für die karzinogene Umweltbelastung durch die gesamte PAK-Gruppe angesehen wird, tritt mit einem Massenanteil von 5 ppm und einer Quellstärke von 2,6 mg/d auf. Als Größenordnung sei benannt, dass die Masse an Benzo[a]pyren im Teer einer Schachtel Zigaretten ca. 400 ng beträgt.

Tabelle 10: Polyaromatische Kohlenwasserstoffe in einer Aerosolprobe von 123 mg

Substanz im Aerosol	µg/Probe	Anteil
Fluoranthen	1,90	0,0015 %
Pyren	2,00	0,0016 %
Benz(a)anthracen	0,901	0,0007 %
Chrysen	0,994	0,0008 %
Benzo(b)fluoranthen	0,322	0,0003 %
Benzo(K)fluoranthen	0,199	0,0002 %
Benzo(a)pyren	0,650	0,0005 %
Ideno(1,2,3-cd)pyren	0,934	0,0008 %
Dibenzo(a,h)anthracen	0,259	0,0002 %
Benzo(g,h,i)perylen	0,446	0,0004 %
Summe PAK Gesamt		7,0 x 10⁻⁵

Zur Gewinnung arbeitshygienischer und arbeitsmedizinischer Beurteilungsgrößen muss eine Aussage über die Größenverteilung der Partikel aus dem Laserschneidprozess getroffen werden. Wie in Tabelle 11 dargestellt, beträgt der Mediandurchmesser der laserinduzierten Partikel im Rohgas 0,21 µm. Die Aerosole des Reingases besitzen eine Häufigkeitsverteilung, die sich mit einem Mediandurchmesser von 0,16 µm auszeichnet, so dass im Reingas feinere Partikel häufiger sind als im Rohgas. Der überwiegende Teil (>71%) der Rauche ist alveolengängig, d.h. sie sind atembar und lagern sich in den Alveolen der Lunge ab. Zudem lässt sich durch Adsorption der in Abbildung 36 und Tabelle 10 aufgeführten Komponenten auf der Oberfläche der Partikel als weitere Gefahr für die Gesundheit des Menschen darlegen, sodass eine nach dem Stand der Technik maximale Ablufferfassung während des Laserprozesses unabdingbar ist.

Tabelle 11: Auswertung einer Partikelimpaktionsmessung

Probe	Median- durchmesser in [μm]	geometrische Standardabweichung in [μm]	Alveolengängige Fraktion nach ACGIH* in [%]	Konzentration [mg/m^3]
Schichtholz (Rohgas)	0,21	3,29	78,30	17,65
Schichtholz (Reingas)	0,16	3,53	71,89	14,5

*American Conference of Governmental Industrial Hygienists (respirable portion) [47]

In Abbildung 37 ist die relative Häufigkeit der laserinduzierten partikelförmigen Emissionen im Rohgas über die aerodynamischen Durchmesser aufgetragen. Neben der bereits beschriebenen Verringerung des Mediandurchmessers ist auch eine qualitative Änderung der Partikelradienverteilung Folge der Durchströmung der Filterpackung. Während die Radienverteilung der Rohgaspartikel ein monodisperses Spektrum mit einem Häufigkeitsmaximum bei $0,2 \mu\text{m}$ aufweist, zeigt die Partikelradienverteilung der Aerosole des Reingases zwei Maxima (bei $0,13 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$). Folglich werden im wesentlichen Partikel mit Radien von $0,25$ - $3 \mu\text{m}$ durch den Biotropfkörper-Filter abgeschieden. Andererseits lässt sich eine Verbreiterung der Häufigkeitsverteilung durch Separation und Agglomeration von Aerosolen aus den dargestellten Ergebnissen folgern.

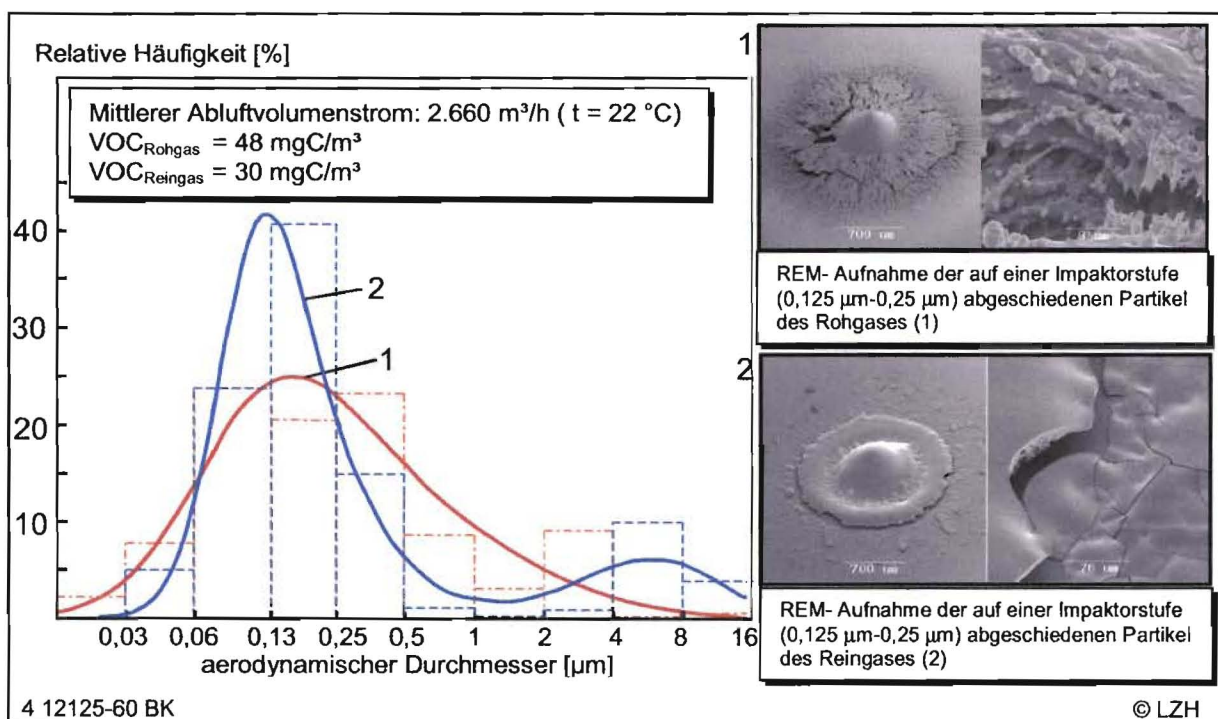


Abbildung 37: Partikelgrößenverteilung der Aerosole aus der Schichtholz-Stanzformenherstellung. Links: Häufigkeitsverteilung des aerodynamischen Partikeldurchmessers im Rohgas und Reingas; Rechts: Prallfolien der Impaktionsstufen koagulierte Aerosolpartikel des Rohgases (1) und Reingases (2)

Bei der Auswertung der REM-Aufnahmen (Bild 1 und Bild 2 der Abbildung 37) fällt auf, dass die Partikel nach dem Auftreffen auf die Impaktorstufen verkleben. Dieses Verhalten weist auf die starke Neigung der Partikel zur Agglomeration hin. Das äußere

Erscheinungsbild des Filterkuchens lässt ferner auf einen – verglichen mit der Laserbearbeitung von anderen organischen oder natürlichen Polymeren – hohen hygroskopischen Charakter der Partikel schließen. Insbesondere im Reingas lässt sich das trocknungsbedingte Reißen des Films aus agglomerierten Partikeln erkennen. Die Neigung dieser Partikel zur Agglomeration lässt sich auch für das Rohgas (Bild 1 der Abbildung 37) dokumentieren. Zu erkennen sind zu größeren Einheiten verklebte Kleinstpartikel. Die Koagulation der Partikel verringert einerseits die Partikelanzahl, andererseits wird deren durchschnittliche Größe erhöht.

Das unbewachsene Filtermaterial besitzt hinsichtlich der Partikelabscheidung homogen strukturierte Eigenschaften. Der theoretische Durchmesser der größten Kugel, die gerade noch durch die Poren fällt, beträgt 2 mm. Die Abscheidung von Feinstaub in der Filterpackung basiert auf den Mechanismen Sperreffekt, Brown'sche Bewegung bzw. Diffusion und Impaktion, welche bei den vorgegebenen Filtrationsbedingungen im Biotropfkörper im wesentlichen abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit in der Filterpackung und den (aerodynamischen) Partikeldurchmessern sind. Partikel aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz mit einem aerodynamischen Durchmesser von $0,25 \mu\text{m}$ treten sowohl im Rohgas als auch im Reingas mit einer Häufigkeit von ca. 20% auf. Über die Einzelfaser-Abscheideeffizienz [48] kann der Erwartungswert für die Biotropfkörperpackung berechnet werden. Für die Aerosole aus dem lasergestützten Stanzformenbau beschreiben die ermittelten Kennzahlen slip-korrigierte ($C_c = 1,46$) Stokes Zahl für Partikel ($S_{tk(p)} = 3,55 \times 10^{-4}$), Peclet Zahl ($P_e = 3,58 \times 10^6$) und Reynolds Zahl für Partikel ($R_{e(p)} = 4,8 \times 10^{-4}$) die Beiträge der einzelnen Abscheidemechanismen Diffusion, Sperreffekt und Impaktion zur Aerosolabscheidung. Unter Einbeziehung der makroskopischen Filtrationsbedingungen wie Strömungsgeschwindigkeit, Druck, Temperatur und Filtermaterialporosität kann die Filtrationseffizienz unter idealen Bedingungen berechnet werden. Die Gesamtabscheideleistung für das Biotropfkörper-Filterssystem beträgt gemäß dieser Methode 5 – 10 %. Nach dem Modell von Lee and Lui [48] kann die minimale Gesamtabscheideeffizienz für die charakterisierten Aerosole auf Basis der dominanten Mechanismen Sperreffekt und Diffusion berechnet werden. Unter Einbeziehung des Kuwabara Faktors ($K_u=1,03$), der freien Weglänge der Dichte der Filterpackung ($1-\epsilon=\alpha=0,03$) berechnet sich die erwartete Abscheideleistung für Aerosole zu 18 – 25% bei gegebener Strömungsgeschwindigkeit in der Filterpackung ($U_o=0,4 - 0,5 \text{ m/s}$).

Der gemessene mittlere Partikelabscheidegrad an Aerosolen im Biofilter beträgt während der Messkampagne 36%. Dieser Abscheidegrad lässt durch Variation der Strömungsgeschwindigkeit bei der vorgegebenen Filterpackungsgeometrie nur geringfügig beeinflussen. Lediglich Koagglomeration der Partikel durch z.B. höhere Luftbefeuchtung mittels der Berieselungseinrichtung wirkt sich steigend auf die Abscheideleistung aus.

Ziel des Einsatzes der Biofiltration für die vorliegende Problemstellung ist jedoch nicht die Abscheidung von Aerosolen, sondern vielmehr ein ökoeffizientes und betriebswirtschaftlich vorteilhaftes Verfahren zur Geruchsminderung unter Einhaltung relevanter Grenzwerte.

Der Grenzwert nach TA-Luft [49] von 20 mg/m^3 wird für inhalierbaren Holzstaub im Reingas deutlicher als im Rohgas unterschritten.

6.1.4.9 Druckabfall und Standzeit der Anlage

Der Druckabfall im benutzten Filtersystem ist als wichtiger Parameter für die Beurteilung der Anlage zu nennen. Er steht im engen Zusammenhang mit den aufzuwendenden Betriebskosten, da Lüftungstechnische Maßnahmen einen wichtigen Kostenpunkt bei der energetischen Anlagenauslegung einnehmen.

Von der charakterisierten Anlage müssen größere Staubmengen aufgenommen werden, als normalerweise für einen Biofilter üblich. In Gegensatz zu konventionellen, partikelgefüllten Biofiltern handelt es sich bei der Tropfkörper-Filterpackung um Polyurethanschaum, welcher unbewachsen eine Porosität von $> 0,95$ besitzt, so dass einer schnellen Verstopfung durch Aerosolpartikel bereits durch die Struktur der Packung entgegen gewirkt wird. Wie in Abbildung 14 dargestellt, erfüllt das Filtermaterial folgende Bedingungen:

- Hohe Oberfläche. Daraus resultiert eine größere Kontaktfläche für enzymkatalysierte Reaktionen und somit ein höherer Schadstoffabbau.
- Niedriger Druckabfall. Dadurch wird für das Gebläse eine geringere Leistung benötigt und somit die Anschaffungs- und Betriebskosten verringert.

Durch das Ausbilden eines Biofilms aus Mikroorganismen auf dem inerten Filtermaterial sollte mit steigender Betriebsdauer und sinkender Porosität der Druckabfall steigen. Insbesondere in der Adaptionsphase ist für die untersuchte Filterpackung aus Polyurethanschaum ein Anstieg des Druckverlustes zu erwarten. In Abbildung 38 sind die Abluftrandbedingungen und Druckverlust über der Biotropfkörper-Anlage unter dauerhafter Einleitung Aerosolpartikel enthaltender, laserinduzierter Emissionen aus der lasergestützten Stanzformenherstellung dargestellt. Während der Adaptionsphase des Biotropfkörper-Filters kommt es aufgrund Lüftungstechnischer Optimierungen und der realisierten Erfassungsgraderhöhung zur Verringerung des Volumenstroms und folglich des Druckverlustes über der Filterpackung. In Abbildung 38 wird die sukzessive Verringerung des normierten Abluftvolumenstromes um $1.800 \text{ m}_N^3/\text{h}$ und des Druckverlustes um $1,5 \text{ hPa}$ während der ersten 100 Messtage deutlich.

Um die Standzeit bei verfahrensgerechtem Betrieb der Anlage zu beurteilen, wird ein Versuchszeitraum von 230 Tagen betrachtet. In diesem Zeitraum stieg der Druckabfall nicht über $2,70 \text{ hPa}$. Der normierte Volumenstrom beträgt unter diesen stabilen Bedingungen im Mittel $2.400 \text{ m}_N^3/\text{h}$. Abhängig von der Anzahl der betriebenen und abgesaugten Laseranlagen variiert der Erfassungsvolumenstrom von 1.700 bis $2.500 \text{ m}_N^3/\text{h}$.

Das eingesetzte Trägermaterial kann durch die Mikroorganismen praktisch nicht zersetzt werden. Das Filtermaterial ist in einer Anwendung am Laser Zentrum Hannover über ein Zeitraum von mehr als 2 Jahren ohne nennenswerte Beeinträchtigungen oder Alterungserscheinungen getestet worden [1, 10]. So ist im Idealfall mit einer sehr hohen Standzeit (10 Jahre oder mehr bei intensiver Nutzung) zu rechnen. Eine Überwucherung durch Mikroorganismen tritt nach bisherigen Erfahrungen nur bei unkontrollierter Nährstoffzugabe auf. Sowohl über die Nährstoffdosierung als auch über die Berieselungsdichte wird das Wachstum verfahrenstechnisch kontrolliert. Auto-regulative Mechanismen und das biologische Gleichgewicht im Tropfkörper wirken ebenfalls stabilisierend auf die Biofilmdicke. Anhand des stabilen Druckverlustes während der Beaufschlagung mit Emissionen aus der Schichtholzbearbeitung ist der Biofilm als stabil zu bezeichnen.

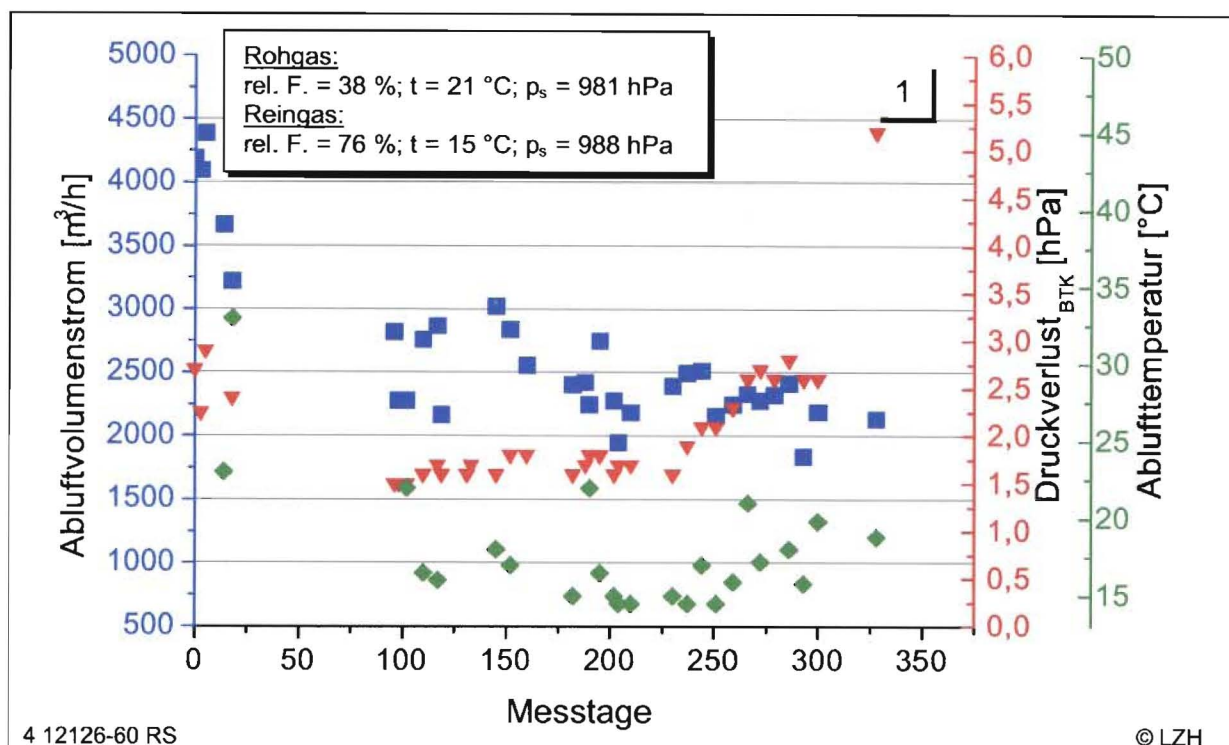


Abbildung 38: Abluftrandbedingungen und Druckverlust über der Biotropfkörper-Anlage unter dauerhafter Einleitung Aerosolpartikel enthaltender, laserinduzierter Emissionen aus der lasergestützten Stanzformenherstellung

Ferner lässt sich aus der Darstellung des korrelierenden Druckverlustes entnehmen, dass an Position 1 ein Störfall an der Biotropfkörper-Anlage festzustellen ist. Der gravierende Anstieg des Druckverlustes von 2,3 hPa auf 5,2 hPa wird durch eine partielle Verstopfung des Filtermaterials in ersten Segment hervorgerufen. Die Ursache des Druckverlustanstieges ist die Beaufschlagung des Filtermaterials mit einem hohen Maß (bis zu 30% der Gesamtemissionen) laserinduzierter Metallfeinstpartikel. Maßnahmen zur Untersuchung des Störfalles werden eingeleitet, nachdem der Druckverlust auf 10 hPa angestiegen ist. In Kapitel 6.1.5.4 wird dieser Sachverhalt im Rahmen der Ergebnisdarstellung zur Verträglichkeit mit Rauchen aus der lasergestützten Metallbearbeitung erörtert.

Der gemessene Druckabfall ist – verglichen mit anderen Filterverfahren – niedrig und verursacht daher nur einen geringen Anteil der Gesamtbetriebskosten. Eventuelle Störungen im mikrobiologischen System können leicht über den Druckabfall überwacht und dokumentiert werden.

Die Standzeit der Anlage wird durch die Standzeit der Filterpackung determiniert. Im Fall der Biotropfkörperanlage wird ein inertes Material (speziell geformter Polyurethanschaum) eingesetzt. Dieses Trägermaterial kann im Gegensatz zu organischem Material, welches in einem Schütttschicht-Biofilter Anwendung findet, nicht von Mikroorganismen zersetzt werden. Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind bei sachgemäßen Betrieb keine Beeinträchtigungen oder Alterungserscheinungen des Filtermaterials beobachtet worden, so dass für den Idealfall eine nahezu unendliche Standzeit für die Filterpackung abzuschätzen ist, diese aber mindestens 10 Jahre bei intensiver Nutzung des BTK beträgt

(Gewährleistung des Herstellers). Die Entsorgung des - mit den speziell bei der Laserbearbeitung von verleimten Schichthölzern auftretenden Schadstoffen - belasteten Schüttmaterial ist nach den heute gültigen Richtlinien auf Hausmülldeponien möglich [50]. Mit Ausnahme des nur geringfügig unterschrittenen DOC-Index liegen die ermittelten Werte weit unterhalb der Grenzwerte [10]. Wird dennoch eine Deponierung der Filterpackung notwendig, so ist, bezogen auf diesen Anwendungsfall, mit 7-8 m³ entsprechend einem Trockengewicht (ca. 30 kg/m³) von ca. 250 kg zu entsorgendem Filtermaterial zu rechnen. Lediglich 10% (25 kg) des Trockengewichtes der Filterpackung besteht aus verfahrensspezifischem organischem Material. Die Akkumulation von deponiekritischen Stoffen ist auf dem Trägermaterial analytisch nicht nachzuweisen [20], so dass die Deponierungskosten des Packungsmaterials am Ende der Standzeit unter dem Abfallschlüssel 57110 des Niedersächsischen Abfallkatalogs (bzw. voraussichtlich Abfallschlüssel 03 01 99 nach der "Verordnung zur Einführung des Europäischen Abfallkatalogs" EAK ab 01.01.1999) mit Euro 40,- (150,-/t) zu beziffern ist. Die Beschaffung neuen Filtermaterials ist mit 400 €/m³ zu veranschlagen, wobei der durch einen Subunternehmer vorgenommene Austausch mit Euro 1.000,- zu veranschlagen ist. Am Ende der Standzeit entstehen folglich durch Deponieren, Beschaffen und Austauschen des Filtermaterials insgesamt Kosten in der Höhe von Euro 4.040,- entsprechend ca. 540 Euro/m³. Der Entsorgungskostenanteil beträgt bezogen auf die Jahresgesamtnutzungsdauer in zehn Jahren 0,17 Euro / Betriebsstunde. Im Falle einer Entsorgung des Filtermaterials nach 10 Jahren resultiert durch Deponieren, Beschaffen und Austauschen ein Aufwand von 0,057 Euro / Laserbetriebsstunde.

6.1.4.10 Zusammenfassung der Abscheidecharakteristik durch das Filtersystem

Neben den Werkstoffeigenschaften sind auch die prozessbedingten Wechselwirkungen der absorbierten Laserstrahlung mit dem Werkstoff maßgeblich am Emissionsverhalten der Abluft beteiligt. In Abbildung 39 ist die Abluftzusammensetzung bei der Laserbearbeitung von Schichtholz dargestellt. Die Zusammensetzung kann in die drei wesentlichen Gruppen Kohlenmonoxid, VOC und Partikel eingeteilt werden. Die VOCs sind nach Leitkomponenten bzw. funktionellen Gruppen in Aldehyde (insbesondere Formaldehyd), Aromaten (insbesondere Benzol) und Ketone klassifizierbar. Der partikuläre Anteil besteht im wesentlichen aus Grobstaub (2,4%), Aerosolen mit aerodynamischen Durchmessern von 1-25 µm (53%) und submikronen Aerosolen (43%). In Abbildung 40 ist die mittlere Abluftzusammensetzung im Reingas des Biotropfkörper-Filters dargestellt. In der Gruppe der VOC werden im wesentlichen die Leitkomponenten abgeschieden, was die hohe Selektivität des Filtersystems belegt. Da neben der Grobstaubabscheidung überwiegend mikrone Partikel durch den BTK eliminiert werden, besteht die partikuläre Fraktion im Reingas des Filters zu über 98% aus submikronen Aerosolen. Die Abscheidung der Aerosole ist als ausreichend zu bewerten. Die Konzentration im Reingas bewegt sich in der Größenordnung des Grenzwertes; jedoch werden die gesetzlichen Grenzmassenströme sicher unterschritten.

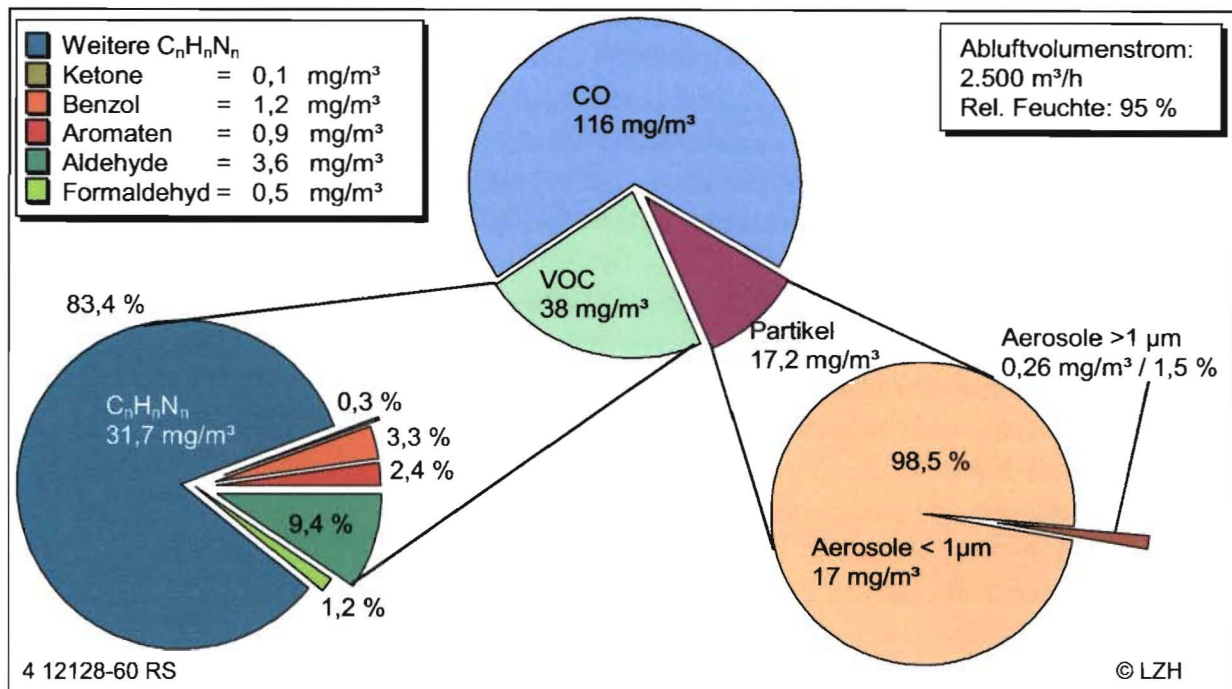


Abbildung 39: Mittlere Abluftzusammensetzung im Reingas bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung

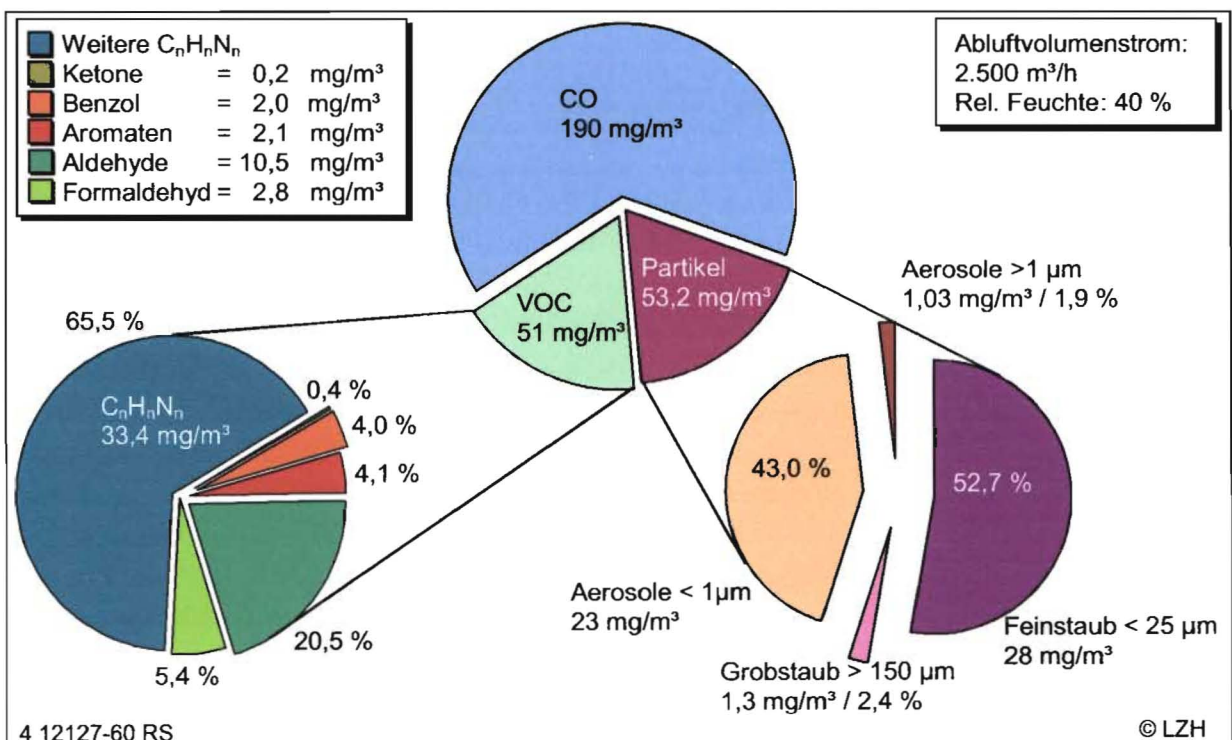


Abbildung 40: Mittlere Abluftzusammensetzung im Rohgas des Biotropfkörper-Filters bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung

Bei geringen spezifischen Filterbelastungen ($< 17 \text{ g/m}^3\text{h}$) treten besonders hohe Schwankungen in den Wochenmittelwerten der spezifischen Abbauleistung der Gesamtkohlenwasserstoffe auf. Die hohe Schwankungsbreite in diesem Belastungsbereich äußert sich in Abbaugraden von $< 5\%$ bis 98% . Bei höheren Belastungen arbeitet der Biotropfkörper mit einer stabileren spezifischen VOC-Abscheidung, so dass die Schwankungen um den Mittelwert von 30% geringer sind. Eine konzentrationsbedingte Limitierung des Systems, die in einem Grenzwert der Tendenzkurve als maximale Abbauleistung erkennbar wäre, kann für den charakterisierten Abluftreinigungsprozess nicht beobachtet werden. Vielmehr ist durch die im Mittel relativ geringen VOC-Konzentrationen (51 mgC/m^3) von einer Diffusionslimitierung des Systems auszugehen. Die erzielten Ergebnisse unterstreichen die positive Wirkung der Konzentrationserhöhung in der Erfassungsluft – resultierend aus der effizienten Emissionserfassung – auf die Schadstoffminderung. Dieser Sachverhalt wird insbesondere in der zeitlichen Darstellung der Massenkonzentrationen aromatischer Leitkomponenten wie Benzol und Toluol im Roh- und Reingas des Biotropfkörpers deutlich.

Die geruchsrelevanten Komponenten Formaldehyd, Acrolein, Acetaldehyd und Hexanal werden mit signifikant hohen Abbauraten von $65\text{-}99\%$ gemindert. Die Ergebnisse zur Schadstoffeliminierung von Leitkomponenten unterstreichen die Eignung des Abluftreinigungsverfahrens zur selektiven Schadstoffminderung der mit einer komplexen Schadstoffmatrix beladenen Abluft aus dem Laserstrahlschneiden von Schichtholz. Es werden sowohl unregelmäßig auftretende Schadstoffe als auch Leitkomponenten durch den Biotropfkörper abgeschieden. Aromatische Kohlenwasserstoffe werden ebenso wie Aldehyde und Ketone durch das biologische Abluftreinigungsverfahren katalytisch umgesetzt.

Der BTK gewährleistet die sichere Einhaltung relevanter Grenzwerte und Unterschreitung der Grenzmassenströme der TA-Luft. Die Geruchsminderung durch den Biotropfkörper ist abhängig von der Filterbelastung. Im Mittel beträgt die Geruchsminderung 42% , wobei sich die Intensität und Hedonik (Qualität) des Geruches im Reingas wesentlich verbessert. Durch die Langzeitüberwachung der Schadstoffmassenströme und Schadstoffnebenströme konnte die Zuverlässigkeit der Abluftreinigungsanlage dokumentiert werden.

6.1.5 Umweltbiotechnologische Maßnahmen und Charakterisierungen

Ziel des mikrobiologischen Teils der Versuchsdurchführung ist einerseits die Anreicherung spezialisierter Kulturen zur Animpfung der Filterpackung. Andererseits werden die eingesetzten Organismen in ihrem Abbauverhalten und Verträglichkeit mit Abluftinhaltsstoffen charakterisiert. Die mikrobiologischen Untersuchungen und Maßnahmen lassen sich wie folgt untergliedern:

- Anreicherung spezifischer Mikroorganismen
- Biotechnologische Adaptionsphase
- Abbaubarkeit biologisch schwer abbaubare Anteile
- Charakterisierung des Biofilms und taxonomische Beschreibung

6.1.5.1 Anreicherung spezifischer Mikroorganismen

Die Arbeiten zur Anreicherung von Mikroorganismen mit Degradationsspezifikationen für die Abluft aus der Laserbearbeitung von Birkenperrholz lassen sich in folgende Aktivitäten unterteilen:

- Selektion der degradierenden Mikroorganismenstämme
- Inkubation der Stämme im Flüssigmedium als Monokulturen
- Anreicherungen in schadstoffhaltigen Nährlösungen und Agarmedien
- Selektive Anreicherung der Mikroorganismenstämme in einem Fermenter durch Begasung mit Abluftmodellsubstanzen (geruchsrelevante Aldehyde und Aromaten)
- Verifizierung der mikrobiellen Degradationsfähigkeit der von der DSMZ gelieferten Reinkulturen durch respirometrische Messungen im industriellen Nährsalzmedium des Projektpartners M+W Zander Facility Management GmbH, Nürnberg

Um eine kurze Adaptionszeit zu erreichen und somit schnell zu einem stabilen und effizienten Abbauverhalten zu gelangen, werden ausgewählte Mikroorganismenstämme in den Biotropfkörper eingebracht. Somit kann sichergestellt werden, dass bereits zu Versuchsbeginn auf die Abluftzusammensetzung spezialisierte Mikroorganismen im Biotropfkörper vorliegen und immobilisiert werden können.

Die Zusammensetzung der Abluft bildet die Grundlage zur Auswahl von degradierenden Bakterienstämmen, wobei für einfache Abluftzusammensetzungen durch umfangreiche Bakterienkataloge [36] Hilfestellung geleistet wird. Für die Selektion geeigneter Mikroorganismenstämme zur Degradation der Schadstoffe aus der Laserbearbeitung von Schichtholz werden Schadstoffleitkomponenten bestimmt. In der Tabelle 12 sind die Mikroorganismenstämme mit den zu degradierenden Substanzen aufgelistet. Ausschlaggebend für die Kultivierung der Mikroorganismen sind gleiche Anzuchtbedingungen sowie keine pathogene Gefahren für den Menschen.

Tabelle 12: Auswahl degradierender Mikroorganismenstämmen und kohärente Abluftinhaltsstoffe in Hinblick auf die Biofiltration von geruchsrelevanten Komponenten und Abluftinhaltsstoffen bei der Laserbearbeitung von Schichtholz

Mikroorganismen	Temp. [°C]	Degradierte Leitkomponente	Medien	pH	Bemerkung
PP: <i>Pseudomonas putida</i> var. <i>narensis</i>	26	Formaldehyd	Medium3	7,0	Bildet Formaldehyd-dehydrogenase
RH: <i>Rhodococcus rhodochrous</i>	28	n-Alkane (C ₆ -C ₁₀) Toluol	Medium1	6,9	Toluol über Inkubationsatmosphäre zugeben
RR: <i>Rhodococcus ruber</i>	25	n-Alkane (C ₅ -C ₁₆), Toluol, Benzol	Medium1	6,9	Naphthalin über Gasphase zugeben
PS: <i>Pseudomonas sp.</i>	30	Toluol, Benzol	Medium1	6,9	2,5 mmol 4-Hydroxybenzoesäure
PH: <i>Pseudonocardia hydrocarbonoxidans</i>	28	Aldehyd (Hexanal, Acetaldehyd)	Medium2	7,2	Mit (KOH pH-Wert einstellen)
OC: <i>Oligothropa carboxidovorans</i>	30	Kohlenmonoxid	Medium 133	7,0	80-20% CO

Die Möglichkeit gleicher Anzuchtbedingungen wird durch die in Tabelle 12 angegebenen Medien und pH-Werte maßgeblich bestimmt. Die Medien sind in Kapitel 9.2 des Anhangs beschrieben. So lassen sich beispielsweise sämtliche in Tabelle 12 aufgeführte Spezies prinzipiell im gleichen Mineralmedium anreichern (Mineralmedium nach Brunner; DSMZ-Nr. 457). Da im Vorrats- und Beregnungswasser des Biotropfkörpers über die Nährlösungsdosierung das gleiche Medium eingestellt wird, sind die suspendierten Mikroorganismen während des Animpfens keinem Medienwechsel ausgesetzt. Weiterhin wird bei der Mikroorganismen-Auswahl darauf geachtet, dass der bevorzugte pH-Bereich bei 7 (Leitungswasser) und der optimale Temperaturbereich bei 20-30°C (Hallenluft) liegt, um Betriebskosten und den Aufwand für Regelungstechnik gering zu halten. Der Kohlenmonoxid degradierende Stamm *Oligothropa carboxidovorans* bildet hier eine Ausnahme. Zum einen ist dieser mit den Anzuchtbedingungen der anderen Organismen in Tabelle 12 nur schwer harmonisierbar. Zum anderen lässt die Abluftkonzentrationen der von diesem Organismus zu degradierenden C-Quelle Kohlenmonoxid keine Aufbaustoffwechselaktivität erwarten: Bei der Oxidation von 50% des Kohlenmonoxids in der Abluft müsste eine Abbaurate von 225 mmol / min. erreicht werden. Unter Einbeziehung des spezifischen Abbauvermögens der CO-Dehydrogenase von 1 µmol / Minute / mg Protein müssten ca. 2 kg Organismenfeuchtgewicht im Biofilm des Tropfkörpers Aufbau- und Erhaltungsstoffwechselaktivität zeigen. Der Einsatz dieses Organismus ist erst ab Konzentrationen im Volumenprozentbereich als effizient anzusehen. Die dargestellte Betrachtung lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein Animpfen der Filterpackung mit *Oligothropa carboxidovorans* als einzige bei der Zentralstelle für Mikroorganismen verfügbaren Kohlenmonoxidabbauer nicht sinnvoll ist.

Tabelle 13: Zur Mikroorganismenselektion angewandte Matrix

Leitkomponenten	Eingesetzte Mikroorganismen			Beladung (Pilotanlage) [mg/m ³]
	Selektierte Stämme in Tabelle 12	Taxonomie- DSMZ- Referenz	DSMZ Nr.	
Aldehyde				
Formaldehyd	PP	1842	1991	9,204
Acetaldehyd	PH	1300/3401	43281	2,935
Crotonaldehyd	PH	1300/3401	43281	1,881
Acrolein	PH	1300/3401	43281	0,464
Hexanal	PH	1300/3401	43281	0,206
Benzaldehyd	PH	1300/3401	43281	0,105
Ketone				
Aceton	PH	1300/3401	43281v	0,247
Butenon	PH	1300/3401	43281	0,2
MEK	PH	1300/3401	43281	0,358
Aromaten				
Benzol	RR,PS	4885,5097	7512/6611	0,819
Toluol	RR, PS,RH		7512/6611/11097	0,316
Styrol	PS		6611	0,077
ungesättigte KW				
1,3-Butadien	RR, RH	4885,5097/ 2184	7512/11097	0,3
Alkane				
n-Heptan	RR, RH	4885,5097/ 2184	7512/11097	0,991
Hexan	RR, RH	4885,5097/ 2184	7512/11097	
Kohlenmonoxid	OC		1227	123

In der Tabelle 13 ist die zur Mikroorganismenselektion angewandte Matrix auf Basis der Beladungsmengen gasförmiger Leitkomponenten aus der Pilotversuchsanlage aufgeführt. Nach Inkubation der gefriergetrockneten Kulturen wird das Schadstoffgemisch auf Basis der Abluftzusammensetzung und Beladungsmengen in Tabelle 13 zur Einleitung in die Anreicherungssuspension hergestellt.

Zur Anreicherung der Mikroorganismen werden die gelieferten gefriergetrockneten Pellets mit 1 ml des entsprechenden Mediums aufgefüllt und zum Quellen in den Brutschrank gestellt. Nach einer durchschnittlichen Quellzeit von 2 bis 3 Stunden werden mit einer Impföse unter sterilen Arbeitsbedingungen geringe Mengen entnommen und in Inkubationsgefäße überführt. Zusätzlich wird 1 ml entsprechendes Medium und 1 µl der zugehörigen Schadstoffkomponente als C-Quelle hinzugegeben. 5 Tage später können die erste Anreicherungen auf Agarmedien und im Schüttelkolben durchgeführt werden.

Für die Ausplattierung werden die Mikroorganismen mit Hilfe einer sterilen Impföse direkt auf das entsprechende Nährmedium in Petrischalen ausgestrichen und zur Kultivierung in einen mit 30°C konstant beheizten Brutofen eingelagert. Die Petrischalen werden mit Parafilm verschlossen, um mögliche Pilzinfektionen auf dem Nährmedium zu unterbinden. Zugleich schützt der Parafilm vor Feuchtigkeitsverlust. Zur Vermeidung von

Austrocknungserscheinungen der angereicherten Medien wird zusätzlich ein mit gesättigter Kochsalzlösung gefülltes Gefäß in den Brutofen gestellt. Im Anschluss werden die Petrischalen mit den gewachsenen Reinkulturen im Kühlschrank konserviert. Für eine Neuanreicherung des jeweiligen Stammes können mit einer sterilen Impföse geringe Mengen von dem Bewuchs entnommen werden. Im linken Teil der Abbildung 40 ist die Bildung von Kolonien des Stammes *Rhodococcus ruber* während einer Inkubationszeit von 4 Wochen bei 30°C dokumentiert. Typisches Merkmal dieses Stammes ist die leicht rötliche Färbung der Zellkolonien, die auch im Flüssigmedium in Erscheinung tritt.

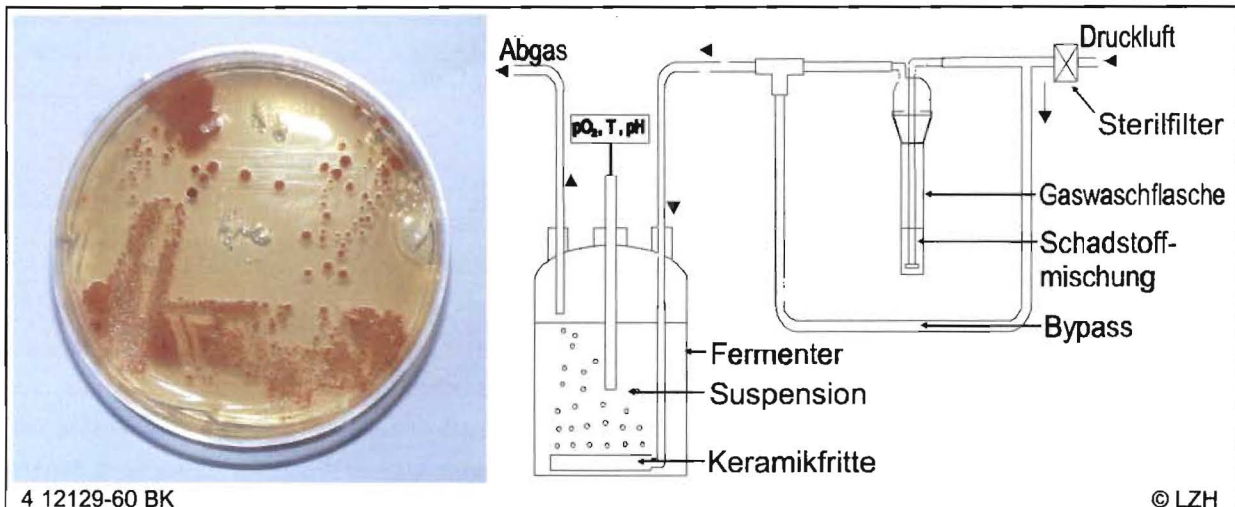


Abbildung 41: Links: Koloniebildung des Stammes *Rhodococcus ruber* auf Medium 1. Rechts: Anreicherung in Flüssigmedium mit Zugabe von Schadstoffen (C-Quelle) über die Gasphase

Im rechten Teil der Abbildung 41 ist der Fermentationsaufbau zur Anreicherung der Mikroorganismen in flüssigem Medium mit Zugabe von Schadstoffen (C-Quelle) über die Gasphase prinzipiell dargestellt. Beispielsweise wird für den Stamm *Pseudomonas putida* var. *narensis* Paraformaldehyd und für *Pseudonocardia hydrocarbonoxidans* eine Mischung aus Aldehyden entsprechend der Abluftzusammensetzung und Mikroorganismenspezifikation in die Gaswaschflasche gegeben. Die Schadstoffdosis kann über einen Bypass eingestellt werden.

6.1.5.2 Impfen des Filtermaterials, taxonomische Beschreibung und Hinterlegung der Mikroorganismen

Die Matrix in Tabelle 13 und das angewendete Anreicherungsprinzip verdeutlicht, dass zum Animpfen eine Mischung aus adaptierten Reinkulturen zum Einsatz kommt. Bei der Immobilisierung und beim Wachstum der Mischkulturen auf inerten Trägermaterial muss eine evtl. auftretende Diauxie (zeitabhängiger Effekt des Stoffwechselprozesses) berücksichtigt werden, nach der Mikroorganismen zuerst die besser verwertbaren Substrate verstoffwechseln. Sinkt die Konzentration der ersten Substratstufe unter einen bestimmten Grenzwert, metabolisieren die Mikroorganismen die schwerer verwertbaren Schadstoffe. Bei Animpfung des Trägermaterials mit den vorkultivierten Mikroorganismen wird auf eine geeignete Verteilung auf die beiden Reaktorbehälter des Tropfkörpers geachtet.

In der Tabelle 14 sind die Zeitpunkte der Zugabe der selektiv angereicherten Mikroorganismen (Zelldichte $KBE \leq 10^7 \text{ ml}^{-1}$) bzw. des zusätzlich eingesetzten Belebtschlammes chronologisch aufgelistet. Der Belebtschlamm wird aus einer im stabilen Betrieb eingesetzten Biowäscheranlage entnommen. Die Biowäscheranlage dient zur Abluftreinigung für Rauchgasemissionen aus der Holzverbrennung. Der Belebtschlamm weist eine hohe Zelldichte $\leq 10^{12} \text{ KBE/ml}$ mit hoher biologischer Aktivität auf. Zudem ist bei dem zur Animpfung eingesetzten Belebtschlamm von degradativ wirksamen Mischkulturen der Mikroorganismen auszugehen, da sich die Biozönose in einer vergleichbaren Abluftzusammensetzung ausgebildet hat.

Tabelle 14: Chronologie der Animpfphase

Datum der Zugabe	Menge [l]	Eingesetzte mikrobiologische Suspension zur Animpfung der Biotropfkörper-Filterpackung	Animpfbedingungen
14.07.2000	5	<i>Pseudomonas putida var. narensis</i>	pH = 7,4 $\chi = 1.550 \mu\text{S/cm}$
	1	<i>Pseudonocardia hydrocarbonoxidans</i>	4,4 mgO ₂ /l ; t = 20,1 °C
28.07.2000	60	Belebtschlamm	pH = 6,98
	5	<i>Pseudomonas putida var. narensis</i>	$\chi = 1.180 \mu\text{S/cm}$ 3,4 mgO ₂ /l ; t = 15,2 °C
22.11.2000	60	Belebtschlamm	pH = 7,23
	5	<i>Pseudomonas sp.</i>	$\chi = 1.480 \mu\text{S/cm}$ 4,05 mgO ₂ /l ; t = 12,3 °C
06.12.2000	5	<i>Rhodococcus ruber</i>	pH = 7,17 $\chi = 1.350 \mu\text{S/cm}$ 4,95 mgO ₂ /l ; t = 11,5 °C
08.02.2001	5	<i>Pseudonocardia hydrocarbonoxidans</i>	pH = 7,13 $\chi = 986 \mu\text{S/cm}$ 7,15 mgO ₂ /l ; t = 10 °C
11.04.2001	60	Belebtschlamm	pH = 7,23 $\chi = 1.065 \mu\text{S/cm}$ 5,4 mgO ₂ /l ; t = 15,5 °C
25.04.2001	5	<i>Pseudonocardia hydrocarbonoxidans</i>	pH = 7,24 $\chi = 998 \mu\text{S/cm}$ 4,32 mgO ₂ /l ; t = 14,1 °C

Im Anschluss an die Animpfphase und einer hinreichenden Stabilisierungszeit des Biofilms von mindestens 3 Monaten werden Probekörper der mit Biofilm bewachsenen Polyurethanschamwürfel aus beiden Segmenten der Biotropfkörper-Anlage entnommen. Es folgen mikrobiologische Untersuchungen, um einen möglichen Nachweis für die Existenz der selektiv angereicherten Stämme, die zur Animpfung des Abluftfilters benutzt werden, zu erbringen sowie durch Isolation und der mikroskopischen Darstellung von Mikroorganismen, die sich während des Betriebes der Biotropfkörper-Anlage angesiedelt haben, aufzuzeigen.

Zur Isolation von Mikroorganismen werden Polyurethanschamwürfel der zwei Segmente der Anlage getrennt zur Ablösung und zum Resuspendieren der anhaftenden Partikel mit jeweils 250 ml sterilem Leitungswasser intensiv geschüttelt. Proben der resultierenden, dunkel gefärbten Suspension werden anschließend mittels einer Impföse auf jeweils drei Nähragarplatten (Standard I-Nährmedium, E. Merck) ausgestrichen. Gleichzeitig werden jeweils 100 µl dieser Suspension auf Nähragarplatten ausgespatelt. Die Nähragarplatten werden im Anschluss 48 h bei 30 °C bebrütet.

Von den Nähragarplatten werden Proben der morphologisch verschiedenen Einzelkolonien entnommen, wiederum auf Nähragarplatten überimpft und für 48 bzw. 72 h bei 30 °C bebrütet. Nach dem Bebrütungszeitraum wird die Morphologie der Ausstriche einer makroskopischen und mikroskopischen Überprüfung unterzogen. Wenn die Einheitlichkeit der gebildeten Kolonien sowie des mikroskopischen Bildes festgestellt werden, werden wiederum Einzelkolonien auf Nähragarplatten überimpft und das mikroskopische Bild fotografisch dokumentiert. Bei Feststellung eines heterogenen Bildes auf den Nähragarplatten bzw. im Mikroskop wird das Verfahren wiederholt.

Die Abbildung 42 zeigt mikroskopische Bilder der zur Beimpfung der Biotropfkörper-Filterpackung eingesetzten Bakterienstämme.

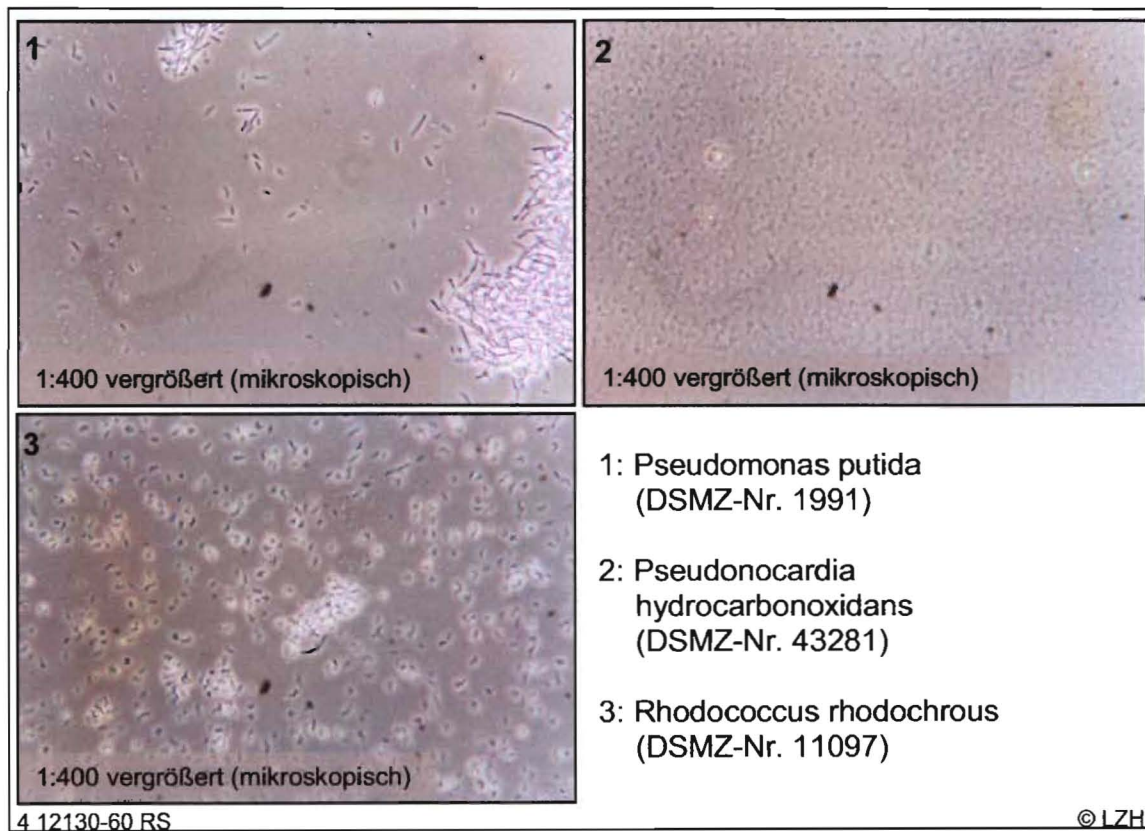


Abbildung 42: Mikroskopisches Erscheinungsbild der zur Beimpfung der Biotropfkörper-Filterpackung eingesetzten Suspensionen (Inoculum) einzelner Stämme

Für die makroskopische bzw. mikroskopische Beurteilung der Mikroorganismenkolonien werden elf verschiedene Mikroorganismenstämmen aus dem Biofilm des Abluftreinigungsverfahrens isoliert, von denen mit großer Wahrscheinlichkeit drei mit den Impfstämmen identisch sind. Die Identitäten beziehen sich auf den einzigen mit den Polyurethanschaumwürfel aus Segment 1 (Rohgaseintritt) nachgewiesenen Bakterienstamm MK 01358/S1 (Abbildung 43), der als *Pseudomonas putida var. narensis* identifiziert werden konnte sowie auf die in den Polyurethanschaumwürfel aus Segment 2 (Reingasaustritt) nachgewiesenen Bakterienstämme MK 01358/S2 (Abbildung 48), bei dem es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um den Impfstamm *Pseudonocardia hydrocarbonoxidans* handelt und MK 01358/S11 (Abbildung 45), der sehr große Ähnlichkeit mit dem für die Beimpfung verwendeten *Rhodococcus rhodochrous*-Stamm besitzt.

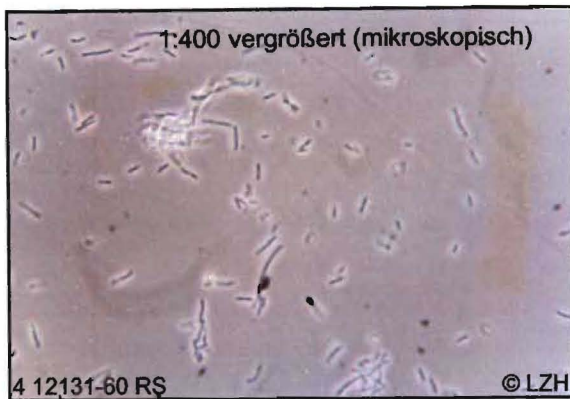


Abbildung 43: Extrahierter Stamm MK 01358/S1 (DSMZ-Referenz)

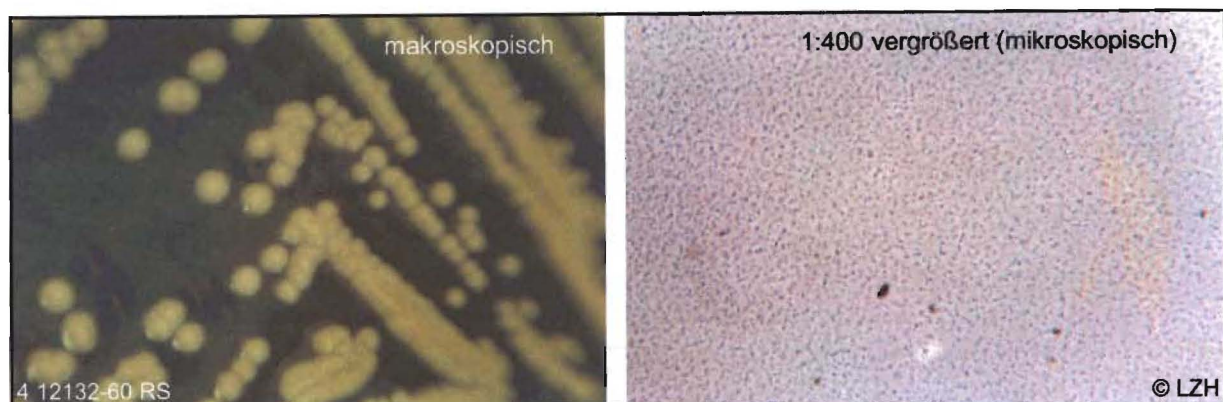


Abbildung 44: Extrahierter Stamm MK01358/S2 (Referenznummer)

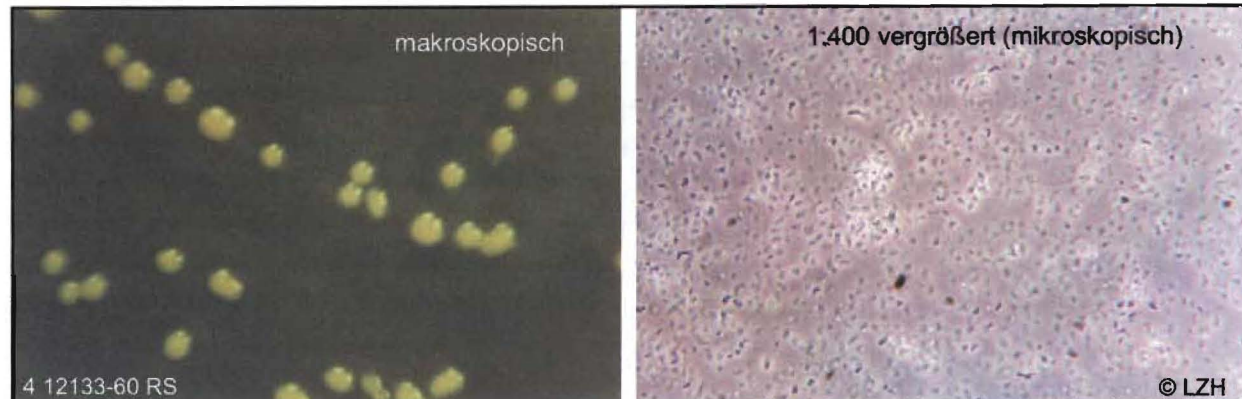


Abbildung 45: Extrahierter Stamm MK 01358/S11 (Referenznummer)

Die restlichen acht Isolate des Biofilms der Polyurethanschaumwürfel stellen sich ausnahmslos als kaum bewegliche Kurzstäbchen dar.

Zusammenfassend können mit den mikrobiologischen Untersuchungen 11 Bakterienstämme aus den Polyurethanschaumwürfel isoliert werden, von denen drei mit den Impfstämmen identisch zu sein scheinen. Von den restlichen acht isolierten Bakterienstämmen werden zwei Stämme ausgewählt. Ausgehend von der Verteilungshäufigkeit der isolierten Bakterienstämme kommen die Bakterienstämme MK 01358/S3 (Abbildung 46) und MK 01358/S4 (Abbildung 47) hierfür in Betracht.



Abbildung 46: Hinterlegter und taxonomisch beschriebener Stamm MK 01358/S3 (DSMZ-Referenznummer)



Abbildung 47: Hinterlegter und taxonomisch beschriebener Stamm MK 01358/S4 (DSMZ-Referenznummer)

In Zusammenarbeit mit der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (DSMZ) in Braunschweig wird eine taxonomische Identifizierung und eine anschließende Hinterlegung der Mikroorganismen nach dem anerkannten Patentverfahren (Budapester Vertrag) durchgeführt. Die Identifizierung und taxonomische Beschreibung der isolierten Bakterienstämme dient der Nachhaltigkeit der erzielten Projektergebnisse.

Die aussagekräftige Dokumentation zur Identifizierung der Mikroorganismenstämme kann unter der Referenz MK01358/S3 (DSMZ-ID 01-952) bzw. MK01358/S4 (DSMZ-ID 01-953) bei der DSMZ angefordert werden. Ein Auszug aus der taxonomischen Beschreibung ist in Kapitel 9.1.9 des Anhangs dargestellt. Auf Basis der Zuordnung zu den 16S rDNA Datenbankeinträgen der beschriebenen Bakterienart, ist davon auszugehen, dass es sich in beiden Fällen um neue Spezies dieser Gattungen handelt.

Die Zuordnungen der beiden Isolate können anhand der vorliegenden 16S rDNA Sequenzierungsdaten und Untersuchungen zur Fettsäureanalyse (FAME) und weiterer Testergebnisse getroffen werden. Das Isolat MK01358/S3 (DSMZ-ID 01-952) kann als Vertreter der α 4-Proteobacteria eingeordnet werden. Die partielle Sequenzierung zeigt eine Ähnlichkeit von 94% bis 97% zu verschiedenen Stämmen der Gattung *Ochrobactrum* sp. und von 97% zu *Brucella melitensis*. Das Profil der zellulären Fettsäuren und die Ergebnisse der physiologischen Tests weisen auf die Gattung *Ochrobactrum* sp. hin. Hinsichtlich der Identifizierung kann keine eindeutige Unterscheidung getroffen werden, ob der Stamm ein Vertreter von *Ochrobactrum* sp. oder *Brucella melitensis* ist. In der Literatur

(JSB48 in [51]) wird über den hohen Verwandtschaftsgrad zwischen diesen beiden Gruppen berichtet. Anhand einer makroskopischen Charakterisierung des Isolats können Daten unter anderem für eine mikrobiologische selektive Anreicherung gewonnen werden. Die Biozönose sollte feucht und dunkel sein. Die auf Nähragarplatten angereicherten Kolonien weisen eine vollständige kreisförmige schwach konvexe glatte und milchig-dunkle Form auf (folglich Abbildung 46) mit einem Durchmesser von ca. 1 mm nach einer Inkubationszeit von 24 h. Untersuchungen zur Morphologie des Stammes ergeben, dass es sich um gram-negative aerobe vielförmige, kurzstäbige und hoch selbstbewegliche polnahe Mikroorganismen handelt. Die Stäbchen weisen eine Zellform mit einer Breite von 0,5-0,7 µm und einer Länge von 1,0-2,5 µm auf; zur selbstständigen Fortbewegung dienen Geißeln. *Ochrobactrum sp.* lassen sich in einem pH-Bereich von 6-7 bei einer Temperatur um 30 °C optimal anreichern.

Das Isolat MK01358/S4 (DSMZ-ID 01-953) kann mit Hilfe der Ergebnisse als Vertreter des Stammes *Microbacterium sp.* zugeordnet werden. Die partielle Sequenzierung zeigt eine Ähnlichkeit von 98,5% zum Stamm *Microbacterium phyllosphaerae*. Dabei sind Ähnlichkeiten zu weiteren Vertretern dieser Gattung geringer. Die Analyse der zellulären Fettsäuren ergeben ein für diese Gattung typisches Muster. Die physiologischen Daten entsprechen in mehreren Tests nicht den für diese Spezies beschriebenen Merkmalen. Hinsichtlich der Identifizierung kann aufgrund der relativ niedrigen Ähnlichkeit der partiellen Sequenzen und der Unterschiede in den physiologischen Merkmalen keine eindeutige Zuordnung zu der oben genannten Art oder zu einer anderen Art innerhalb der Gattung *Microbacterium sp.* getroffen werden. Der Mikroorganismusstamm *Microbacterium phyllosphaerae* ist bei der DSMZ in Braunschweig unter der Referenz 8148 registriert .. Hierbei können Daten unter anderem für eine mikrobiologische selektive Anreicherung gewonnen werden. Die morphologischen und physiologischen Eigenschaften des gram-positiven streng aeroben Stammes *Microbacterium phyllosphaerae* lassen sich als nicht sporenförmige, unregelmäßig geformte Stäbchen zusammenfassen. Die unregelmäßigen Kurzstäbchen weisen eine Zellform mit einer Breite von 0,5-0,7 µm und einer Länge von 1,0-2,5 µm auf. Gelegentlich bilden sich V-Formen, die frei beweglich sind, aufgrund eines einzelnen polaren oder lateral angeordneten Geißel. Die auf Nähragarplatten angereicherten Kolonien weisen eine creme-weiße, glänzende und kreisförmige geringfügig konvexe Form auf mit einer vollständigen Randzeile (folglich Abbildung 47). *Microbacterium phyllosphaerae* lassen sich in einem bei einer Temperatur um 25 °C optimal anreichern.

Die Hinterlegung der neuen Spezies stellt die Verfügbarkeit dieser spezialisierten Schadstoffabbauer für die typischerweise kleinen und mittelständischen Unternehmen der Stanzformen herstellenden Branche dauerhaft sicher. Dieser Beitrag zur Übertragbarkeit der umweltbiotechnologischen Ergebnisse ermöglicht eine Verkürzung der Adaptionszeit und bildet die Basis für mögliche weitere Entwicklungen und auf Basis der biologisch degradativ wirkenden Spezies.

6.1.5.3 Verträglichkeit mit Holzfeinstaub aus dem Laserstrahlschneidprozess

Aus der ermittelten Abluftcharakteristik und den eigenen intensiven Vorarbeiten zu Abluftreinigungsverfahren bei der Lasermaterialbearbeitung entsteht die Forderung nach einem Biofiltersystem, welches ein neutrales oder degradatives Verhalten gegenüber eingeleiteten Aerosolemissionen zeigt. Ein solches Verfahren muss die geringen Betriebskosten der biologischen Abluftreinigung mit Partikelverträglichkeit verbinden. Ziel der Arbeiten zur Abbaubarkeit biologisch schwer abbaubarer Anteile sind:

- Verträglichkeit mit Holzfeinstaub (Aerosolen) aus dem Laserstrahlschneidprozess
- Verträglichkeit mit Metallfeinstaub (Rauche) aus dem Laserstrahlschneidprozess

Bereits in Pilotversuchen zur biologischen Abluftreinigung von Emissionen aus der Polymethylmethacrylat-Bearbeitung kann die biologische Degradation von Aerosolpartikeln durch adaptierte Mikroorganismen im Vorratswasser (Sumpfwasser) eines Biotropfkörper-Filters anhand von Sauerstoffverbrauch und Zellwachstum nachvollzogen werden [1, 9, 10]. Diese Laboruntersuchungen werden durch den äußerst geringen Anstieg des Druckverlustes durch den Biotropfkörper unter Einleitung von aerosolbeladener Abluft unterstrichen.

Für die Verträglichkeitsuntersuchung mit Holzfeinstaub aus dem Laserstrahlschneidprozess sind folgende Eigenschaften der Aerosole relevant:

- die Aerosole treten – je nach Abluftrandbedingungen (rel%, T, P) und Probenahmeverfahren fest oder tropfenförmig auf
- die biologische Abbaubarkeit der aus den Aerosolen mit unpolaren Solvens extrahierten Komponenten ist wahrscheinlich und für Einzelsubstanzen nachgewiesen
- die Aerosole sind zu ca. 80 Massenprozent wasserlöslich
- der PAK-Anteil beträgt ca. 7 mg/g Aerosol (Planfilterprobe)
- die Aerosole enthalten Ruß

Im Rahmen der mikrobiologischen Voruntersuchung und Selektion werden Fermentationsversuche mit aus der Abluft entnommenen Aerosolpartikeln durchgeführt. Erfolgversprechend ist diesbezüglich die Tatsache, dass das Substanzspektrum von aus Schichtholz-Aerosolpartikeln mit verschiedenen Solvens extrahierbare organische Kohlenstoffverbindungen Übereinstimmungen mit der Abluftzusammensetzung zeigt (siehe Abbildung 36, Seite 72).

Die Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs ist eine wichtige Größe zur Feststellung der biologischen Aktivität der Mikroorganismen. Die Messwerte geben Kenntnis über die Aktivität der zu spezifizierenden Mikroorganismen. In einer BSB-Versuchsreihe wird die Aerosolverträglichkeit der Mikroorganismenstämme überprüft. Dazu werden die Holzstaubemissionen aus der Feinpartikelfraktion eingesetzt. Für die Untersuchung mit sechs BSB-Probeflaschen werden mehrere Mischungszusammensetzungen ausgewählt, um möglichst gute Aussagen über die Aktivität der Mikroorganismen hinsichtlich der Aerosolverträglichkeit treffen zu können. Das Medium 1 wird für die Suspension eingesetzt. In der Tabelle 15 wird die Mischungsstrategie dargestellt.

Tabelle 15: Mischungsstrategie für die BSB-Messreihe

Messkopf	Medium1 [ml]	Schadstoff-Mixtur	Glucose	Holzaerosole
1 Blindprobe	432	-	-	-
2	400	2 ml	-	-
3	400	2 ml	-	1 g/400 ml
4	400	2 ml	-	-
5	400	-	5 g/l	1 g/400 ml
6	400	-	5 g/l	-

Für die respirometrische Messung ist ein definiertes Probevolumen zusammen mit der Luft in der Messflasche eingeschlossen. Durch tropfenartige Zudosierung von Nitrifikationshemmern wird die Bildung von Nitrat unterbunden und somit ausschließlich der Sauerstoffverbrauch durch den mikrobiellen Abbau der Kohlenwasserstoffe erfasst. Damit in der Messflasche kein Überdruck durch das Freisetzen von Kohlendioxid entsteht, dass das Ergebnis verfälschen könnte, werden in einem Gummiköcher, der sich ebenfalls im Luftraum in der Flasche befindet, Natriumhydroxidplättchen zugegeben. Das Natriumhydroxid bindet chemisch das Atmungsprodukt Kohlendioxid. Durch ein fortlaufendes Rühren der Probe mit Magnetrührer wird für einen ungehinderten Stoffaustausch gesorgt. Der Sauerstoffverbrauch in der Messflasche erzeugt letztendlich eine Druckabnahme. Der piezoresistiv arbeitende Silicium-Absolutdrucksensor registriert diese Druckabnahme und die Messung wird vom System in dem Messkopf gestartet und die Messwerte werden bei einer Messrate von 20 min automatisch in einem Speicher

$$BSB = \frac{M(O_2)}{R \cdot T_{20}} \cdot \left(\frac{V_{ges} - V_{fl}}{V_{fl}} + \alpha \frac{T_{20}}{T_0} \right) \cdot \Delta p \cdot (O_2)$$

eingelogg. Die Messdaten werden am Ende eine BSB₅-Messung mit einem Steuerelement ausgelesen und können anhand einer Software grafisch dargestellt werden. Der dargestellte Verlauf des Graphen ist ein direktes Maß für den Sauerstoffverbrauch über die Zeit. Hierfür gilt die folgende Gleichung als Berechnung des BSB-Wertes.

Die Genauigkeit der Messergebnisse aus einer BSB-Messung werden entscheidend von der Temperatur und des Wasserdampfdruckes beeinflusst. Die erforderliche Anpassungsvorgänge werden bei diesem System automatisch registriert. Die BSB-Messreihen mit den fünf Mikroorganismenstämmen laufen jeweils über einen Zeitraum von 2 bis 5 Tagen.

Ferner werden Fermentationsversuche unter Zusatz von Abschlammwasser aus dem Tropfkörpersystem sowie unter Zusatz von – verglichen mit den Realbedingungen - großen Mengen an Aerosolen durchgeführt. Wie in den folgenden Abbildungen dargestellt, dient die Kultivierung mit Glucose als Wachstumsreferenz.

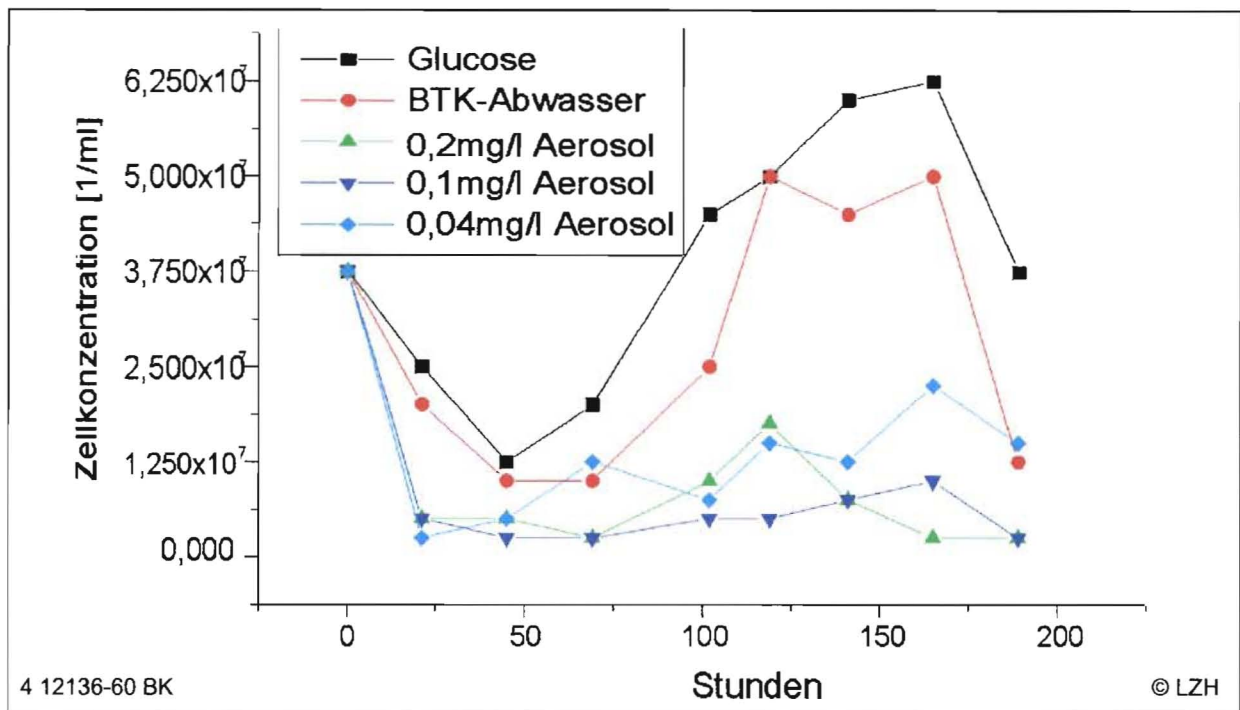


Abbildung 48: Wachstumskurve von *Rhodococcus ruber*

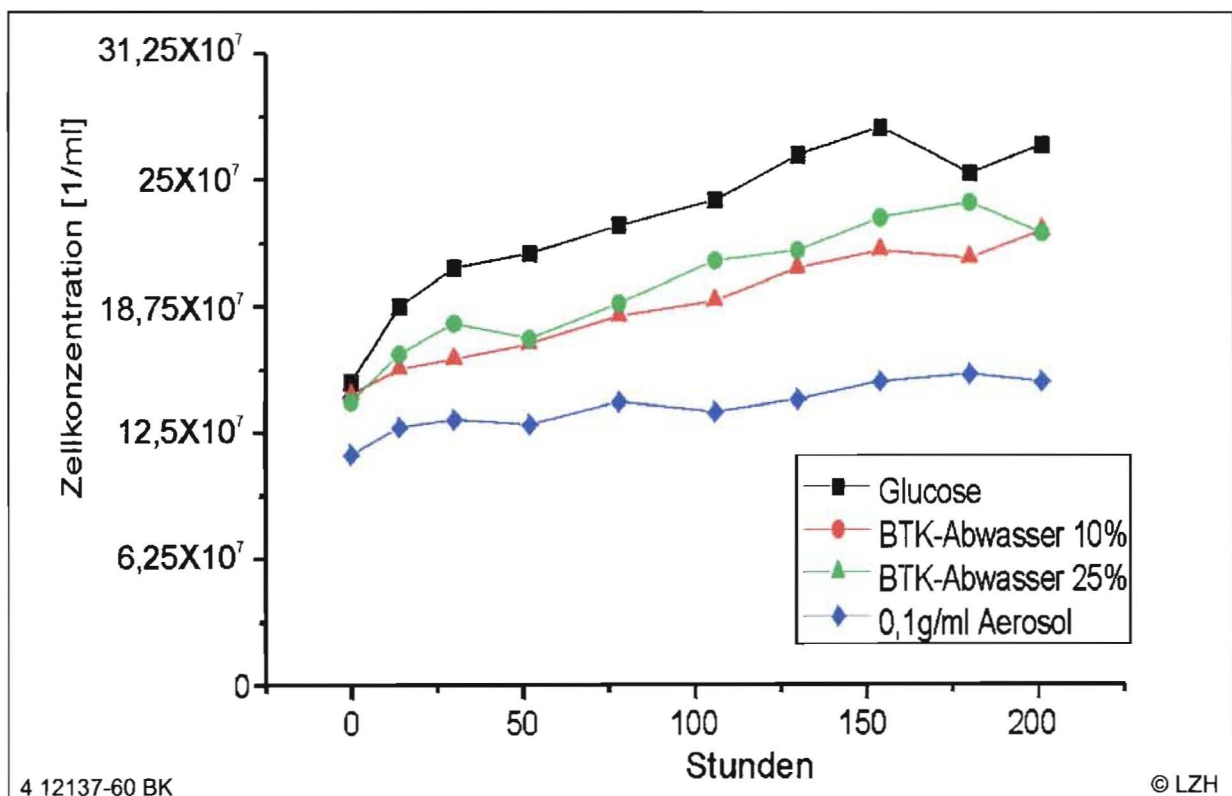


Abbildung 49: Fermentation von *Rhodococcus ruber* in unterschiedlichen Kulturmedien

In Abbildung 48 sind die zeitlichen Verläufe der Zellkonzentrationen von *Rhodococcus ruber* in verschiedenen Medien dargestellt. In Glucoselösung (Referenz) und im Abschlammwasser enthaltenden Medium ist ein normaler Wachstumsverlauf zu erkennen. Nach Zugabe von 0,04 mg/l Aerosol ist eine Hemmung zu beobachten. Bei Fermentationsversuchen mit Aerosol, welches aus dem Vorabscheider der Laseranlage

entnommen wird, und verschiedenen Konzentrationen Vorratswasser in der Kultur, ist die Abhängigkeit von Schadstoffkonzentrationen, die für die Hemmung des Wachstums der Mikroorganismen verantwortlich sind, zu erkennen (Abbildung 49).

In Abbildung 50 ist zu erkennen, dass *Rhodococcus rhodochrous* im Vergleich zu *Rhodococcus ruber* eine schlechtere Populationsrate unter diesen Bedingungen besitzt. Dieser Zustand ist auf eine geringere Animpfkonzentration zurückzuführen. Wenn man lediglich die Steigung der Wachstumskurve berücksichtigt, ist eine ähnlicher Wachstumsverlauf erkennbar.

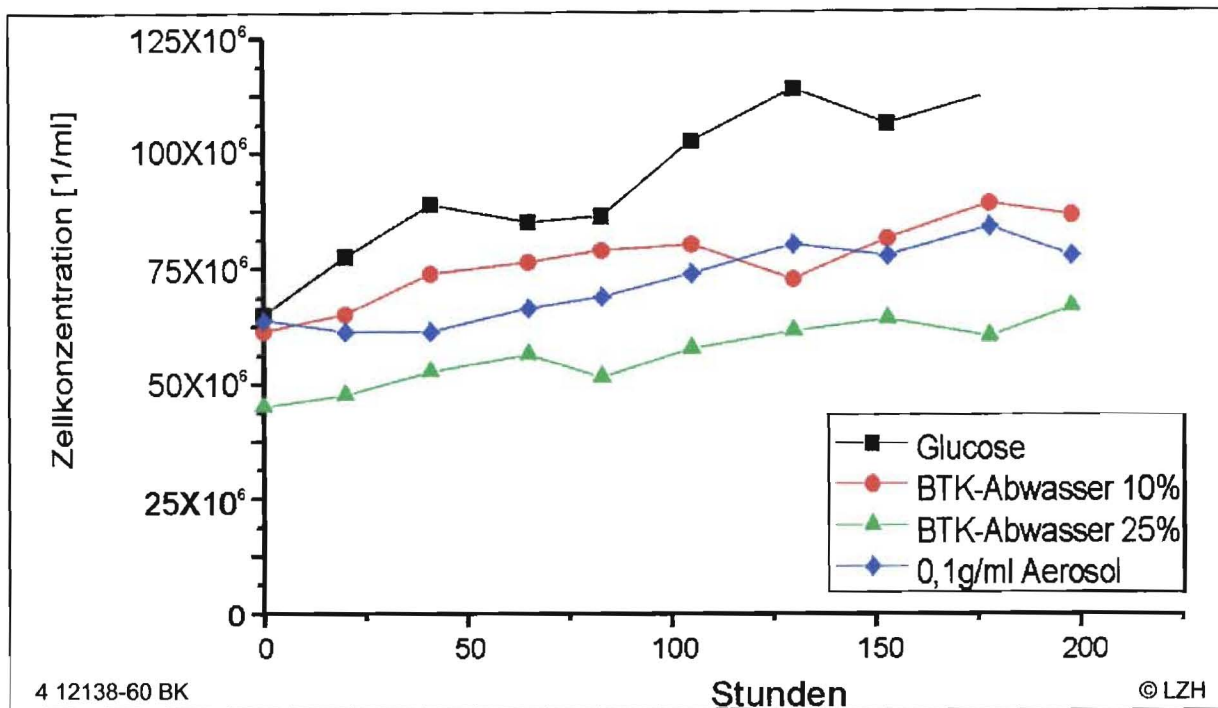


Abbildung 50: Fermentation von *Rhodococcus rhodochrous* in unterschiedlichen Kulturmedien

Die Versuche zur Bestimmung des Wachstumsverlaufes der eingesetzten Mikroorganismen geben wieder, in wie weit Substanzen oder Substanzgruppen Einfluss auf den mikrobiologischen Abbau von Emissionen aus der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz haben. Als Referenz für alle aufgeführten Wachstumskurven wird Glucose als Substrat eingesetzt. Zusammenfassend ist festzustellen:

Die Zugabe von Anschlämmwasser führt nicht zu einer Beeinträchtigung des mikrobiologischen Wachstums. Auch durch die Zugabe von 25 % Sumpfwasser (Abwasser des BTK) können keine hemmenden Wirkungen festgestellt werden.

Das Ausmaß des Wachstums der Mikroorganismen in Suspension ist von der Zugabe an Aerosolen abhängig. Schon bei einer Konzentration von 0,04 mg/l Aerosol im Substrat ist die hemmende Wirkung der Aerosole erkennbar. Wird die Konzentration an Aerosol im Substrat weiter gesteigert, ist zu erkennen, dass die Aerosole selbst in hoher Konzentration nicht toxisch auf die eingesetzten Mikroorganismen wirken.

6.1.5.4 Verträglichkeit mit Metallfeinstaub aus dem Laserstrahlschneidprozess

Die Bearbeitung von Metallen mit Laserstrahlung ist für den Stanzformherstellungsprozess nicht relevant und daher als Ausnahmeanwendung zur Produktion von Einzelstücken

anderen Verwendungszweckes einzustufen. Da diese vereinzelt auftretenden Emissionen jedoch essentielle Auswirkungen auf die Biozönose haben können, werden diese in die Untersuchungen einbezogen. Zur Ableitung von Grenzbelastungen werden Auswirkungen eines simulierten Störfalls im Form massiver Einleitung von Rauchen aus der Metallbearbeitung untersucht.

Die Charakterisierung der Verträglichkeit mit Metallfeinstaub aus dem Laserstrahlschneidprozess beinhaltet folgende Maßnahmen:

- Bereits zu Projektbeginn werden mikrobiologische Laboruntersuchungen zur Bewertung der Verträglichkeit mit Metallstaub aus der Edelstahlbearbeitung durchgeführt.
- Eine etwaige Beeinträchtigung des biologischen Systems wird durch Analysen der Abschlämmung, speziell des Glührückstandes der absetzbaren Substanzen kontrolliert.
- Emissionen aus der Metallbearbeitung werden über einen Zeitraum von einigen Wochen regelmäßig in die Abluftreinigungsanlage eingeleitet.
- Filterpackungselemente werden insbesondere aus dem Einströmbereich des Tropfkörpers entnommen und deren Auswaschung lichtmikroskopisch charakterisiert

Als werkstoffspezifische Emissionskomponenten werden beim Laserstrahlschneiden von Metallen nahezu ausschließlich partikelförmige Emissionen in Form metalloxidischer Feinstäube freigesetzt. Die Gasemissionen (Stickstoffoxide und Ozon) sind in diesem Zusammenhang von untergeordneter Bedeutung, ihre Werte liegen im allgemeinen bei 1‰ der Staubemissionen. Mehr als 95% der emittierten Stäube besitzen geometrische Durchmesser von etwa 1 µm und sind daher als Feinstäube einzustufen. Die ermittelten Staubemissionsraten betragen beim Laserstrahlschneiden bis zu 20 mg/s [53]. Dies entspricht 400 mg Aerosol pro Meter getrennten Stahl. Der Bearbeitungsumfang von nicht aus Holz bestehenden Materialien im Stanzformenbau kann mit wenigen Metern pro Jahr beziffert werden. Aus der hohen Porosität des inerten Materials resultiert weiterhin eine geringe Verweilzeit (einige Sekunden) cytotoxischer Substanzen in der Filterpackung. Grobe Metallspäne werden aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Massenträgheit nachweislich bereits vom Grobabscheider aus der Abluft abgeschieden.

Im Rahmen der Messkampagne wird wöchentlich der Differenzdruckverlust über die Biotropfkörperanlage kontrolliert und protokolliert. In Abbildung 38 (Seite 77) ist der Verlauf des Druckabfalls über die Biotropfkörperanlage dargestellt. Anhand der Messergebnisse wird der unverhältnismäßig hohe Druckverlust von 5,2 hPa deutlich. Ursächlich für den erhöhten Druckverlust sind Metallstaubpartikel (Schweißrauche) aus der Laserbearbeitung von Metallen. Zur Dokumentation werden Proben des Filtermaterials aus verschiedenen Filterschichten der Filterpackung entnommen. An den Filterproben werden die Trockenmassen der abgeschiedenen Stoffe bestimmt. Ferner werden REM-Aufnahmen zur optischen Beurteilung der abgeschiedenen Stoffe erstellt und der Glühverlust des Filtrates ermittelt. Aufschlussreich für eine evtl. Verstopfung des BTKs ist die Untersuchung des Filtermaterials. Die Analyse der abgeschiedenen Stoffmasse pro Filtervolumen ergibt 32,5 kg/m³. Bezogen auf das Filtervolumen von 3,64 m³ des Filtersegmentes rohgasseitig beträgt die abgeschiedene Masse 118 kg auf einem BTK-

Segment. Die REM-Aufnahme links in Abbildung 51 belegt die hohe Massenkonzentration der abgeschiedenen Partikel auf der Filterpackung.

Die mikroskopische (REM) Charakterisierung des Filterpackungsmaterials dokumentiert einen Biofilm ausreichender Dicke sowie die Impaktion luftgetragener Stäube. Einzelne Partikel weisen einen Durchmesser von ungefähr $0,3 \mu\text{m}$ auf, welches auf die charakteristische Aerosolfraktion der laserinduzierten Fein- bzw. Feinstfraktion aus der Schichtholzbearbeitung schließen lässt. Die eingesetzten Mikroorganismen sind eine Größenordnung größer ($2-8 \mu\text{m}$). Von einem direkten Kontakt zwischen Biofilmschicht und Gasphase ist nach der massiven Einleitung von Metallrauchen nicht mehr auszugehen.

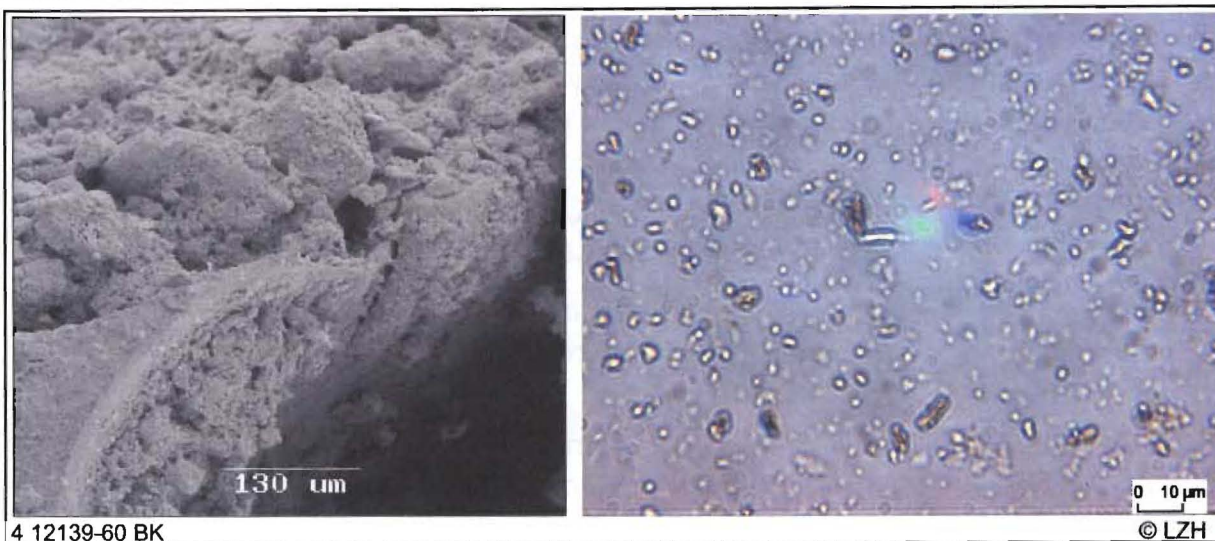


Abbildung 51: Probe des Filtermaterials aus dem rohgasseitigen Filtersegment M2. Links: REM-Aufnahme eines belegten PUR-Steges; Rechts: Aus der Probe extrahierte Mikroorganismensuspension.

Die in Lösung überführten Stoffmassen eines partikelimpaktierten PUR-Schaumwürfels sind rechts in Abbildung 51 dargestellt. Im dargestellten Filtersegment sind Mikroorganismen mit einer Zellzahl von 10^7 koloniebildenden Einheiten auswaschbar. Es kann geschlossen werden, dass die Mikroorganismenpopulation trotz Beaufschlagung der Filteranlage mit Stäuben aus der Stahlbearbeitung in hoher Zelldichte erhalten bleibt.

Die zunehmende Laserbearbeitung von Baustahlplatten und die resultierend hohe Menge abgeschiedener Schweißrauche auf der Filterpackung wird auch in der Bestimmung des anorganischen Probenanteils deutlich. Der Glührückstand beträgt im Mittel 17,2%. Bezogen auf das Filtervolumen eines Filtersegmentes werden somit mindestens 20,3 kg anorganische Substanzen auf dem rohgasseitigen Segment abgeschieden.

Durch EDX-Analyse der anorganischen Rückstände aus dem Glühen des Filtrates kann der hohe Eisenoxidenanteil in der Zusammensetzung der Biotrockenmasse belegt werden. Danach sind ca. 60 % der anorganischen Rückstände Eisenoxidbestandteile. Die rotbraune Färbung des Rückstandes im rechten Teil der Abbildung 52 ist ein Indikator, dass eine hohe Masse an Eisenoxiden auf der Filterpackung vorliegen. Ferner entspricht die Partikelmorphologie in der REM-Aufnahme des Glührückstandes der Filterprobe in Abbildung 52 der typischen Morphologie von Rauchen aus dem Laserstrahlschneiden von Metallen.

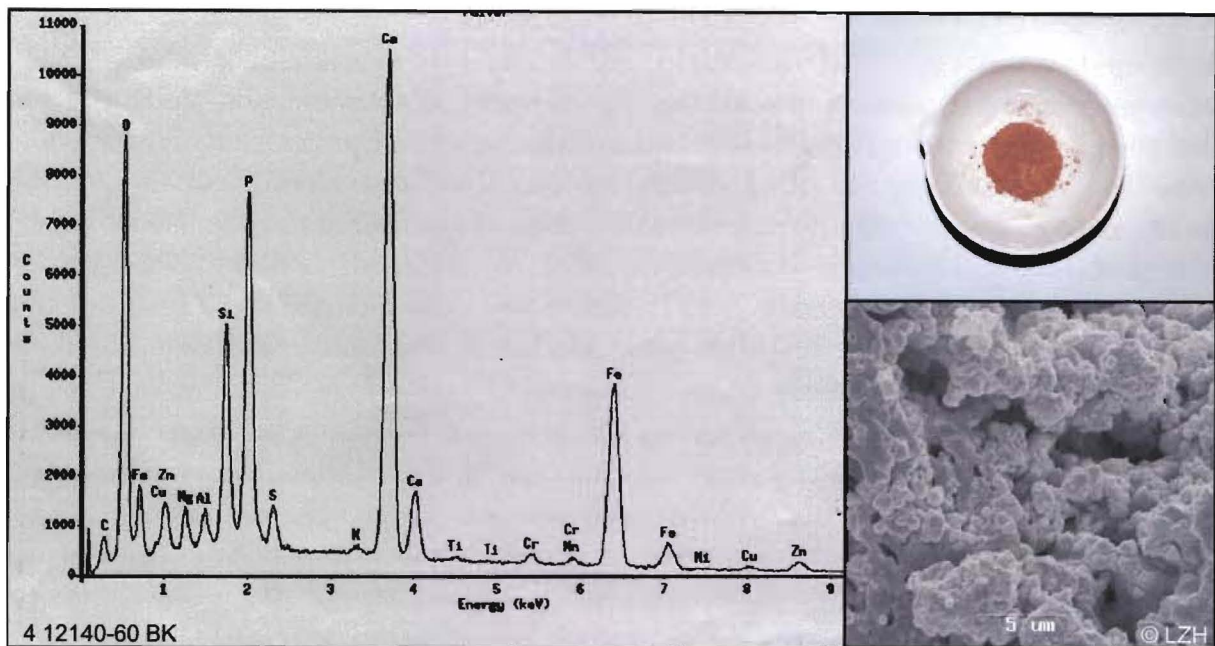


Abbildung 52: EDX-Analyse der anorganischen Rückstände: Rückstände nach Verglühen abgeschiedener Stofffraktionen der Filterpackung

Zusammenfassend lässt sich folgern, dass zur Agglomeration neigende Feinstpartikel und der massive Anteil laserinduzierter Eisenoxide hervorgerufen durch die Laserbearbeitung von Verbundwerkstoffen und Baustahl Auslöser für die Minimierung der Porosität der Filterpackung und folglich der Grund für den überproportionalen Anstieg des Druckverlustes sind. Die lichtmikroskopische Untersuchung nach Probenahme von Filterpackungselementen aus dem Einströmbereich des Tropfkörpers und deren Auswaschung konnte eine vitale Mischkultur nachweisen.

Für den stabilen Betrieb der Biotropfkörperanlage und nicht zuletzt für die betriebssichere Stanzformenherstellung sollte eine Bypassabluftrohrleitung zur Biotropfkörperanlage an das vorhandene Rohrleitungsnetz im Falle einer längeren Produktionsphase der lasergestützten Metallbearbeitung adaptiert werden. Wahlweise kann der Abgasstrom durch Umschaltung durch eine Bypassrohrleitung geführt werden, sobald an einer der drei CO₂-Laseranlagen Stähle in hoher Stückzahl bearbeitet werden.

6.2 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Als grundsätzlich zur Abluftreinigung gasförmiger Prozessnebenprodukte beim Laserstrahlbearbeiten organischer Werkstoffe geeignet anzusehen sind Verfahren der adsorptiven, thermischen, katalytischen und biologischen Abluftbehandlung. Insbesondere Verfahren zur biologischen und katalytischen Abluftbehandlung wurden in der Vergangenheit intensiv für die Anwendung bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung untersucht [8, 11]. Im folgenden werden sowohl die energetischen und ökologischen Aspekte als auch die Investitions- und Betriebskosten der biologischen Abluftreinigung nach dem Tropfkörper-Verfahren erörtert und alternativen Verfahren nach dem Stand der Technik gegenübergestellt.

Die Ökobilanz umfasst die Aufstellung der Umweltauswirkungen eines Verfahrens [54]. Eine Unterteilung der Ökobilanz lässt sich in vier Typen vornehmen. Für eine Öko-Bilanzierung der im Rahmen des Forschungsvorhabens zur biologischen Abluftreinigung bei der Laserbearbeitung von Schichtholz zur Stanzformenherstellung eingesetzten Biotropfkörper-Filteranlage wird die Prozessbilanz angewandt. Zur Bilanzierung müssen die Systemgrenzen der Anlage zuvor exakt definiert werden.

Aus Gründen der Arbeitssicherheit und Gewerbehygiene und zur Einhaltung der gesetzlich festgelegten MAK-Grenzwerte muss in jedem Fall eine Absaugeinrichtung installiert werden. Deshalb werden die Systemgrenzen so gelegt, dass nur der zusätzliche Energieaufwand für die Filtration der Abluft betrachtet wird. Für die energetische Bewertung der Filteranlage wird gemäß VDI-Richtlinie 4600 die Methode des kumulierten Energieaufwandes verwendet. Für den Betrieb des vorliegenden Anwendungsfalles wird die benötigte Nutzenergie des BTK bei einem Wirkungsgrad von 0,34 (Nutzenergie/Primärenergie) ermittelt und als kumulierter Energieaufwand pro Jahr angegeben.

Bilanziert wird über den Zeitraum eines Jahres mit 220 Arbeitstagen bei einer durchschnittlichen Betriebsstundendauer von 10,5 Betriebsstunden sowie 145 freien Arbeitstagen. Die Versorgung der Mikroorganismen mit Nährsalzen und Frischwasser muss auch während der Prozessstillstandzeiten wie Betriebsurlaub oder Ausfall von Laseranlagen erfolgen, um die notwendigen Umgebungsbedingungen, wie pH-Werteinstellung, Zugabe von Spurenelementen und Einstellung der Berieselungsdichte für die immobilisierten Mikroorganismen zu schaffen. Durch eine optimierte Dosiereinstellung des Nährsalzkonzentrats zur Aufkonzentrierung des Beregnungsfrischwassers wird bei definierten Flussraten die Beregnungsflüssigkeit auf die zweistufige Biotropfkörper-Anlage aufgegeben. Die Wasserpumpe dient der Beregnung und soll permanent betrieben werden. Bei einer durchschnittlichen Beregnungszeit von 2 min/h entfallen 292 Betriebsstunden pro Jahr auf die Wasserpumpe. Aufgrund der Innenraumaufstellung dieser Biotropfkörperanlage kann auf eine Wasserbeheizung bei niedrigen Außentemperaturen verzichtet werden.

Für eine Absaugleistung im Vollastbetrieb wird ein durchschnittlicher Betriebsvolumenstrom von 2.600 m³/h erzeugt. Der messtechnisch erfasste Druckverlust über die Biotropfkörper-Anlage beträgt bei Betriebsbedingungen 250 Pa.

In Tabelle 16 sind die anfallenden kumulierten Energiekosten pro Jahr der Anlagenelemente Wasserpumpe und Ventilator zusammengefasst.

Tabelle 16: Kumulierte Energiekosten

Energetische Betriebskenndaten	Bio-tropfkörper	Oberflächenfilter
Jährliche Gesamtnutzungsdauer	2.310 h	1.840 h
Absaugleistung im Vollastbetrieb	2.600 m ³ /h	2.500 m ³ /h
Druckverlust Biotropfkörper	250 Pa	keine technische Analogie
Entsprechende zusätzliche Absaugleistung	1,39 kW	
Aufnahme Ventilatorleistung (1,76 kW / Wirkungsgrad 0,79)*	1,76 kW	
Aufgenommene Ventilatorleistung (1,5 kW / Wirkungsgrad 0,85)	1,1 kW	
Leistungsaufnahme der Wasserpumpe (Leistungsdatentab. EBARA)	0,017 kW	
Leistungsaufnahme der Magnetdosierpumpe (Leistungsdatentab.)		

*Kennlinie des Hochdruck-Radialventilators Typ HG 25/58

Der stündliche Bedarf an Nutzenergie bei Betrieb der Biotropfkörper-Anlage summiert sich aus der aufgenommenen Ventilatorleistung und den Leistungen der Wasser- und der Magnetdosierpumpe und beträgt somit 2,88 kW. Der Wirkungsgrad bei einer Energieerzeugung mit Kohlekraftwerken von Primärenergie zu Nutzenergie beträgt 0,34. Der jährliche kumulierte Energieaufwand der Nutzung resultiert aus der zusätzlichen Absaugleistung von 1,39 kW, bzw. der aufgenommenen Ventilatorleistung von 1,76 kW und der Leistungsaufnahme der Wasserpumpe von 1,1 kW und der Magnetdosierpumpe bei einer jährlichen Betriebsdauer von 438 h. Die benötigte Primärenergie beträgt

$$(2.310 \text{ h} \times 1,76 \text{ kW} + 438 \text{ h} \times (1,1 + 0,017) \text{ kW}) / 0,34 = 13,4 \text{ MWh.}$$

Für den Betreiber einer solchen Anlage, das Stanzformen herstellende Unternehmen, sind im wesentlichen die direkten Betriebskosten relevant, welche im folgenden erörtert werden. Für eine ökonomische Betrachtung ist die zusätzliche Absaugleistung von 1,39 kW (resultierend aus dem Druckverlust über die Biotropfkörper-Anlage; 2.310 Betriebsstunden) sowie die Leistungsaufnahme der Wasserpumpe von 1,1 kW und die Leistungsaufnahme der Magnetdosierpumpe von 0,017 kW bei einer jährlichen Betriebsdauer 438 h maßgebend. Eine Kilowattstunde (Sondertarif Überlandwerk Leinetal) kostet 0,07 €. Die resultierenden Betriebskosten für die aufgewendete Leistung betragen folglich

$$4555 \text{ kWh} \times 0,07 \text{ €} = 318 \text{ €/a.}$$

Für die biologische Abluftbehandlungsanlage entstehen weitere Betriebskosten für die Aufrechterhaltung der Biozönose im Reaktor. Zur ständigen Befeuchtung des Biofilms bei gleichzeitiger Versorgung der Mikroorganismen mit wichtigen Nährstoffen (Stickstoff, Ammonium und Phosphat) muss in zuvor definierten Berechnungszyklen eine Flüssigkeitsberieselung stattfinden. In der Tabelle 17 sind die anfallenden Kosten für den täglichen Frischwasser- und den Nährlösungsverbrauch ermittelt.

Tabelle 17: Kumulierte Kosten für Frischwasser und Nährlösungskonzentrat

	Verbrauch	Kosten	Kosten pro Jahr [€]
Frischwasser	1.750 l/d	1,19 €/m ³ (* ¹)	759
Nährlösungskonzentrat	2,14 l/d	2,56 €/l(* ²)	2.000
	Summe		2.760

*¹: Frischwasserkosten für das Gewerbegebiet Alfeld

*²: Preis der konzentrierten Nährlösung laut Herstellerangaben

Die Standzeit der Anlage wird durch die Standzeit der Filterpackung determiniert. Bei intensiver Nutzung des Biotropfkörpers wird eine Mindeststandzeit der inertierten PUR-Schaumwürfel von 10 Jahren vom Hersteller garantiert. Für eine ökonomische Bewertung der Biotropfkörper-Anlage fließen demnach die Kosten für die Entsorgung des alten Filtermaterials von (153 €/t) und die Kosten für die Beschaffung neuen Filtermaterials mit Euro 410,-/m³ in die Betriebskostenberechnung ein.

- Entsorgungskosten: $153 \text{ €/t} \times 30,12 \text{ kg/m}^3 \times 7,28 \text{ m}^3 = 33,54 \text{ €}$
- Beschaffungskosten: $410 \text{ €/m}^3 \times 7,28 \text{ m}^3 = 2.983 \text{ €}$

Am Ende der Standzeit entstehen folglich durch Deponieren, Beschaffen und Austauschen des Filtermaterials insgesamt Kosten in Höhe von 3.016 € entsprechend ca. 414 €/m³.

Im Rahmen der Untersuchungen an einer Biotropfkörper-Pilotanlage in Außenaufstellung wurden die Betriebskosten der Anlagenkomponenten bilanziert. Die betrieblichen Kosten für die permanent zu betreibende Wasserpumpe waren für diese Anlage mit über 50 % Anteil an den Gesamtbetriebskosten (ca. 1.750 €/a) am höchsten (Abbildung 53), so dass für die optimierte Anlage die in Abbildung 13 beschriebene Verfahrenstechnik realisiert wurde. Insbesondere wird auf eine pH-Wert Regelung und permanente bzw. intermittierende Wasserkreislaufführung verzichtet.

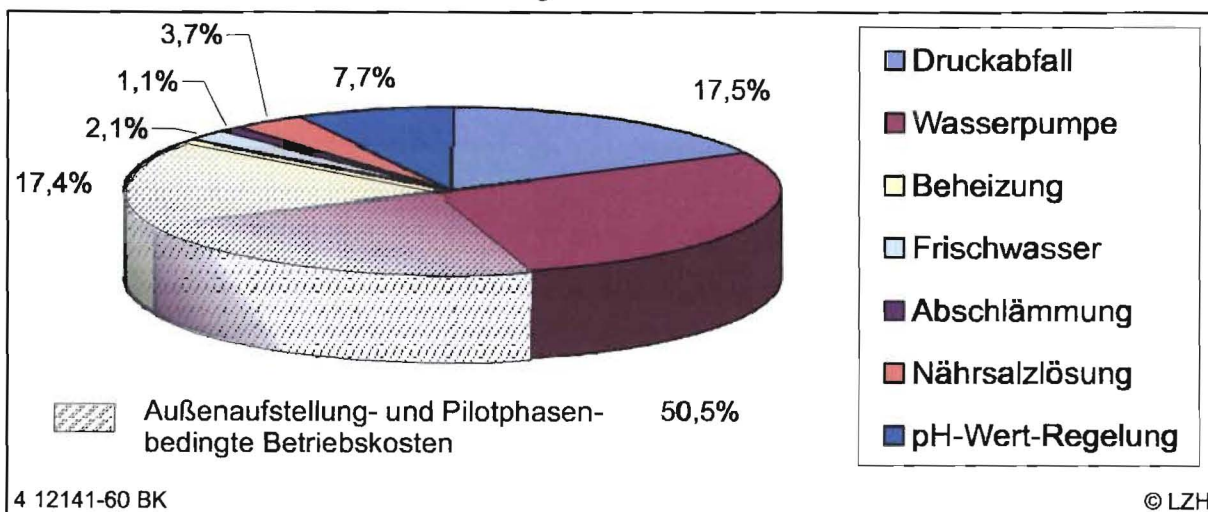


Abbildung 53: Prozentuale Darstellung der Betriebskosten (ohne Personalkosten) für eine Biotropfkörper-Pilotanlage in Außenaufstellung

Bei der praxisorientierten und optimierten Biotropfkörper-Anlage wird die Kreislaufführung der Beregnungsflüssigkeit nur für die Adaptionsphase der mikrobiologischen Suspension auf das Filtermaterial eingesetzt. Somit entfällt der hohe Energiekostenanteil für einen

ständigen Betrieb der Wasserpumpe. Die Gesamtkosten für den Betrieb der optimierten Biotropfkörper-Anlage belaufen sich auf 3.380 €/a. Die Betriebskosten werden zur besseren Veranschaulichung auf den Abluftstrom normiert. Sie betragen 1,5 € pro Betriebsstunde der drei Laseranlagen bzw. 49 Cent/Laser. In der Abbildung 54 sind die jährlichen prozentualen Anteile der anfallenden Betriebskosten für das optimierte Biotropfkörper-Verfahren dargestellt.

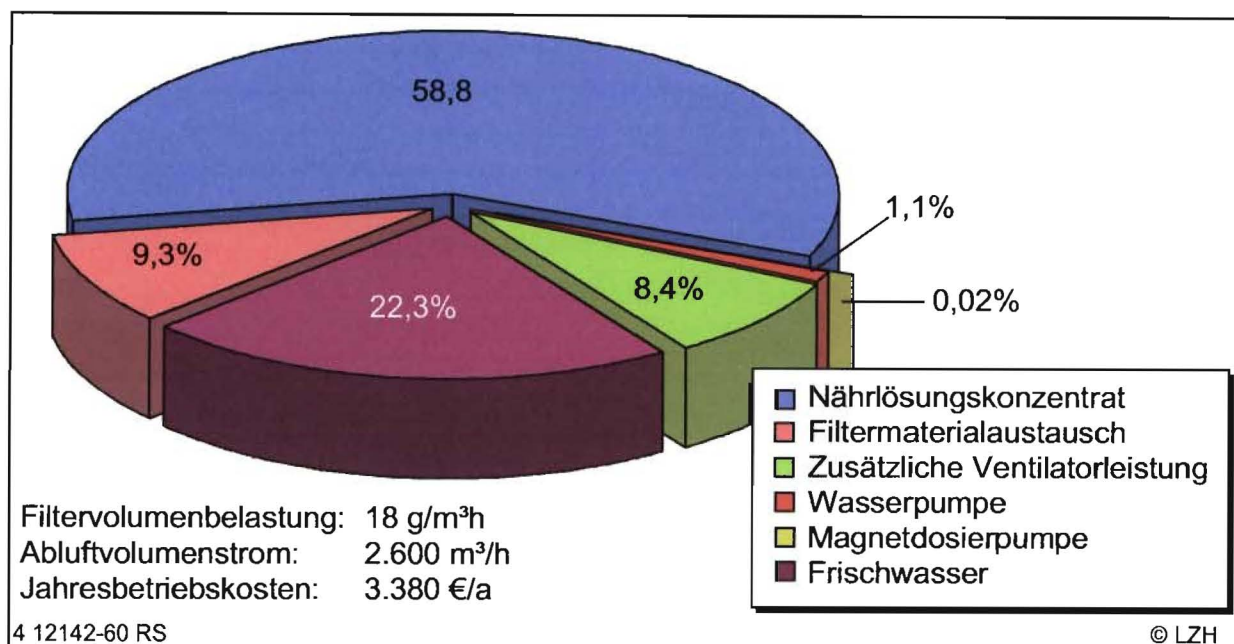


Abbildung 54: Betriebskostenverteilung der Biotropfkörper-Anlage im Jahresmittel

Bei der Berechnung der Betriebskosten kann festgestellt werden, dass der Nährlösungskonzentratverbrauch und die Frischwasserzufuhr mit 81% maßgeblich zu den betrieblichen Kosten beitragen.

In der Tabelle 17 ist der Verfahrensvergleich von Abluftreinigungsanlagen für die Laserbearbeitung von Schichtholz aufgeführt. Die Kohlenwasserstoffbelastung für die Auslegung der Anlagen soll $< 1 \text{ gC}_{\text{org}}/\text{m}^3_{\text{N}}$ betragen. Maßgebende Unterschiede der Abluftreinigungsverfahren sind die sehr unterschiedlichen Ansprechzeiten. Die katalytische Nachverbrennung weist schnelle Ansprechzeiten auf. Diese Anlagenverfahren können jederzeit deaktiviert werden (z.B. während Produktionspausen). Jedoch können Katalysatorgifte diese Verfahren nicht irreversibel schädigen. Als mögliche Katalysatorgifte in der Abluft aus dem Stanzformbau sei die Edelstahl- oder Kunststoffbearbeitung (insbesondere PVC) zu nennen. Im Rahmen der Untersuchung des Biotropfkörper-Verfahrens wird die Standzeit und die Filterbelastung gegenüber Emissionen aus der Laserbearbeitung von Metallen qualifiziert. Im Zuge der Messkampagne an der Biotropfkörper-Anlage muss mit einer durchschnittlichen Beaufschlagung des Filters mit metallischen Inhaltsstoffen von einem Werktag pro Woche gerechnet werden. Folglich können katalytische Nachverbrennungsverfahren für das komplexe Abluftspektrum nur eingeschränkt eingesetzt werden. Ferner ist die katalytische Verbrennung der Aerosole als problematisch anzusehen.

Tabelle 18: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Verfahrensvergleich

System Kostenart	Biotropfkörper-Verfahren		Katalytische Nachverbrennung	Precoating- Oberflächenfilter mit Aktivkohle- adsorber
	Innenauf- stellung	Außenauf- stellung		
Investitions- kosten	76.600 €	61.000 €	113.000 €	25.000 €*
Betriebskosten	3.380 €/a	14.100 €/a	10.240 €/a	12.400 €/a
Leistungs- aufnahme	2,88 kW	< 3,6 kW	ca. 70 kW	4 kW
Standzeit	Filterpackung		Katalysator- modul 15.000 h	Oberflächenfilter: (1.130h) A-Kohle: (920h)
	> 87.600 h	> 87.600 h		
Austausch des Filtermaterials	3.430 € (414 €/m³ Packung)	1.242 € (414 €/m ³ Packung)	6.100 € (3 T€/Kammer)	A-Kohle: 1.330 €/m ³
Hersteller	M+W Zander Fac. Eng., Nürnberg	M+W Zander Fac. Eng., Nürnberg	Kranz TKT, Aachen	Keller Lufttechnik GmbH+Co. KG; Herding GmbH
Zinssatz (6 %)	4.600 €	3.660 €	6.780 €	1.500 €
Abluftvolumen- strom	3.000 m³/h	1.000 m ³ /h	1.000-2.500 m ³ /h	
VOC- Konzentration	Rohgas < 1 gC/m ³ ; Reingas: < 100 mg/m ³			
Laserbetriebs- stunden	2.310 h/a		1.840 h/a	2.310 h/a
Abluftreinigungs- verursachte Betriebskosten	1,5 €/h* bzw. 0,49 €/h**	0,77 €/h*	5,57 €/h**	5,37 €/h**

*Für die Behandlung von Ablüften einer CO₂-Laseranlage
** Für die Behandlung von Ablüften von einer bis zwei CO₂-Laseranlagen
** Für die Behandlung von Ablüften aus drei CO₂-Laseranlagen

Bei der Gegenüberstellung der in Tabelle 17 dargestellten Abluftbehandlungsanlagen werden die relativ hohen Investitionskosten der Biotropfkörper-Verfahren und vor allem der katalytischen Nachverbrennung gegenüber dem Precoating-Oberflächenfilter deutlich:

Für ein Precoating-Oberflächenfiltrationsverfahren und einem nachgeschalteten Aktivkohleadsorber mit ähnlicher Problemstellung bezüglich der Abluftzusammensetzung berechnet sich der elektrische Gesamtenergiebedarf zu 7.360 kWh/a und die aufzuwendende Primärenergie zu 21,65 MWh/a. Die energetischen Betriebskosten belaufen sich zu 1.515 €/a. Der Verbrauch an Calciumcarbonat als Precoatingmittel beträgt unter Annahme einer mittleren Precoatingmittelmenge 3 kg pro Precoatingvorgang. Dabei wird von einer mittleren Filtrationsphase von 1,5 h ausgegangen. Die Bereitstellungskosten für das Precoatingmittel betragen entsprechend den Herstellerpreisen 0,51 €/kg zzgl. Transport. Der Jahresverbrauch an Calciumcarbonat berechnet sich bei einer Jahresnutzungsdauer von 2.310 h zu 4.600 kg entsprechend 2.360 €/a. Für die adsorptive Reinigung der gasförmigen Komponenten der Abluft für vergleichbare Anwendungsbereiche in der Abluftreinigung mit VOC-Massenkonzentrationen < 1g/m³ wird ein Aktivkohleadsorber eingesetzt, der dem Precoating-Oberflächenfilter nachgeschaltet ist. Die Aktivkohle sollte feinporig sein und

eine Rütteldichte von 400-500 kg/m³ besitzen, um optimale Abscheideleistungen zu erzielen. Ein Austausch und die anschließende Reaktivierung einer 75 Gew% beladenen Aktivkohle inkl. Transport und Bereitstellung ist mit einem hohen technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Bei einer Regenerierung der beladenen Aktiv-Kohle entstehen Kosten durch Transport und Handling für das Ein- und Ausfüllen in die Adsorberbehälter, energetische Reaktivierungskosten und Ergänzung der Reaktivierungsverluste. Ein 2 m³ Adsorber inkl. der Regenerierung der Aktivkohle wird dementsprechend mit einem Pauschalkostenbetrag in Höhe von 2.660 € pro Austausch zzgl. Transportaufwand kalkuliert. Die zu erwartende Standzeit eines Austauschaggregates beträgt im Mittel 115 Arbeitstage. Bei 220 Arbeitstagen im Jahr müssen somit Betriebskosten von ca. 5.100 € für die Aktivkohle einkalkuliert werden. Es entstehen summarisch Betriebskosten für Ersatzteile, Precoatingmittel, Aktivkohlebereitung und Staubentsorgung von 10.850 €/a.

Bei der vergleichenden Betrachtung der Betriebskosten pro Jahr wird deutlich, dass der Einsatz des Biotropfkörper-Verfahrens für die Innenaufstellung die kostengünstigste Variante darstellt. Die Betriebskosten des Oberflächenfilters sind um 63 % höher. Neben den wesentlich höheren Betriebskosten der katalytischen Nachverbrennung KNV ist zu erwähnen, dass bei der KNV die Direkteinleitung von Partikeln (im Gegensatz zum Tropfkörper-Verfahren) bis heute nicht hinreichend untersucht ist. Bei Anwendung dieses Verfahrens entsteht folglich ein zusätzlicher Aufwand durch die Eignungsprüfung in Hinblick auf eine mögliche Partikelabscheidung.

Der Einsatz des Biotropfkörpers erreicht mit geringem energetischen Aufwand, geringen Betriebskosten und hoher Standzeit der Filterpackung bei moderaten Investitionskosten die effiziente Minderung der geruchsproblematischen gas- und partikelförmigen Emissionen der Abluft. Das charakterisierte Biotropfkörper-Verfahren ist im Verfahrensvergleich für die Problemstellung als die ökonomisch, technologisch und ökologisch überlegene Verfahrensvariante einzustufen.

6.3 Nachhaltigkeit der erzielten Ergebnisse und Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Demonstration der Vorhabensergebnisse erfolgte unter den Prämissen der Nachhaltigkeit und Modellhaftigkeit der erarbeiteten Lösungen. Wie in Abbildung 55 dargestellt, konnte eine Rahmenlösung aufbauend auf einem Abluftreinigungskonzept demonstriert werden, die nach der erfolgten Verfahrensoptimierung als Modelllösung für den Fachverband präsentiert wurde. Die Skalierung zur Serienreife durch die Fa. M+W Zander Facility Management GmbH bietet kunden- und produktionsspezifische Einzellösungen für die überwiegend mittelständischen Betriebe der Europäischen Stanzformen Union.

Die gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Ergebnisse wurden dem Fachverband der Stanzformenhersteller durch die Fa. Hesse Stanzwerkzeuge GmbH zugänglich gemacht. Die Übertragung der Ergebnisse auf sämtliche Stanzformen herstellenden Unternehmen wird durch die fortbestehende Kooperation der Projektpartner ermöglicht. Aus Dialogen mit dem Nordamerikanischen und dem Europäischen Verband der Stanzformenhersteller leitet sich ein hohes branchenweites Interesse an den Projektergebnissen ab.

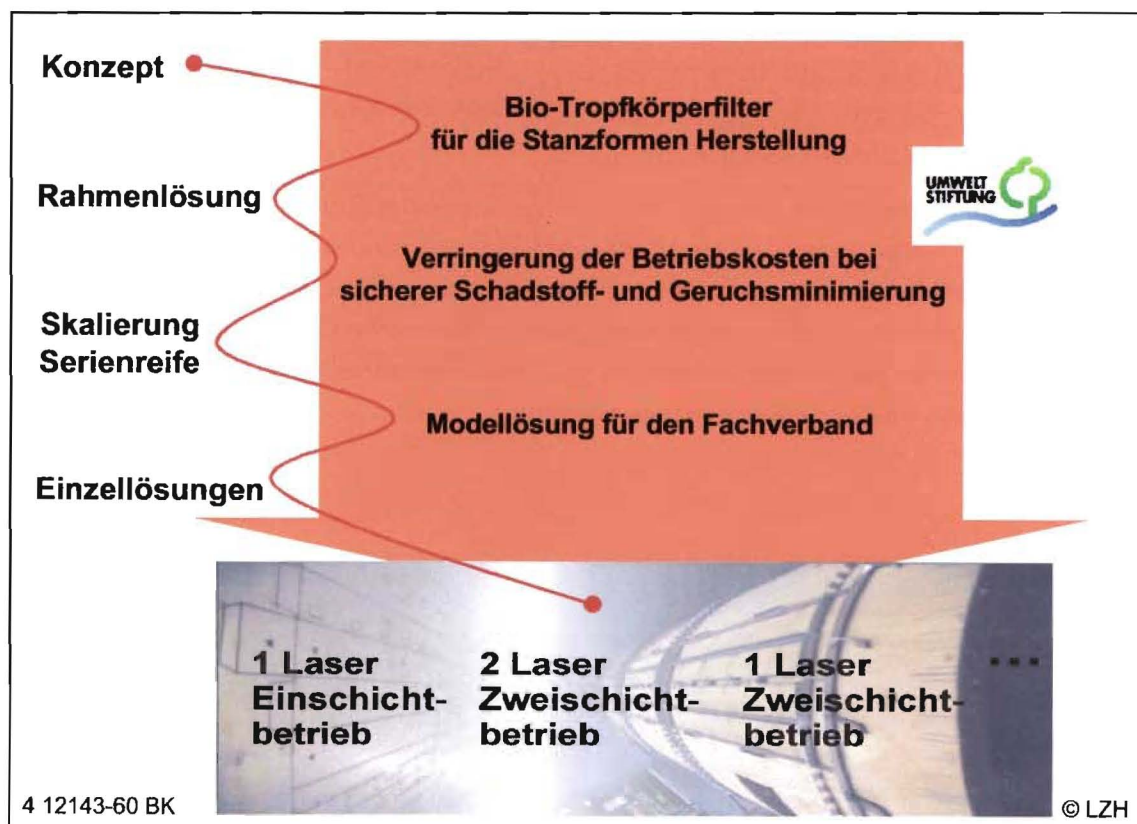


Abbildung 55: Demonstration des Abluftreinigungskonzeptes als Modelllösung für die überwiegend deutschen mittelständischen Betriebe der Europäischen Stanzformen Union

Ferner wurde der prozessoptimierte, für die Emissionsentstehung bei der Schichtholzbearbeitung mit Laserstrahlung konzeptionierte Absaugkopf durch das Laser Zentrum Hannover e.V. für weitere Applikationen mit gewerbehygienischen und umwelttechnischem Nutzen weiterentwickelt [23].

Die an die Schadstoffmatrix der Abluft aus der lasergestützten Stanzformenherstellung adaptierten Mikroorganismen wurden bei einer Zellbank hinterlegt [36]. Somit ist die Verfügbarkeit dieser spezialisierten Schadstoffabbauer für die typischerweise kleinen und mittelständischen Unternehmen der Stanzformen herstellenden Branche garantiert.

Durch projektbezogene nationale und internationale Konferenzbeiträge [3, 4, 5, 6, 7, 9, 45] konnten die Projektergebnisse in andere Branchen transferiert werden. Die neue Strategie zur umweltbiotechnologischen Vorgehensweise [3, 9] wurde ebenso wie die Multifunktionalität des Abluftreinigungsverfahrens [5] einem breiten Publikum zugänglich gemacht. Auf Basis der dargestellten Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Laserstrahlmaterialbearbeitung polymerer Werkstoffe und weiterer Holzwerkstoffe wurden die Ergebnisse anderen Branchen wie Elektronikindustrie [4], Kunststoffverarbeitung [6, 7, 11, 45] und Holzverarbeitung [23, 24] präsentiert.

Darüber hinaus sind im Anschluss an das Projekt weitere Publikationen und Ergebnispräsentationen geplant:

- Es ist geplant, die Projektergebnisse im Rahmen der „International Conference on Biofiltration USC-TRG 2002“ zeitnah einem internationalem Publikum zu präsentieren.
- Die Veröffentlichung der Ergebnisse aus der Geruchsminderung werden in deutschen Fachzeitschriften für Abluftreinigung (z.B. in „Wasser, Luft und Boden“) und Bioverfahrenstechnik (z.B. in „Biochemical Engineering“) praxisorientiert dargestellt.
- Nach Projektende ist eine Abschlusspräsentation in Rahmen der Jahrestagung der Europäischen Stanzformen Union geplant. Neben der Präsentation der erzielten Ergebnisse soll auch die Besichtigung der Abluftreinigungsanlage durch die Fa. Hesse Stanzwerkszeuge GmbH ermöglicht werden.
- Die Ergebnisse werden in der „Fachzeitschrift der Europäischen Stanzformen Union“ insbesondere unter kmU-typischen Aspekten und branchenspezifischen Anforderungen dargestellt.

7 Fazit

Bei der lasergestützten Schichtholzbearbeitung zur Stanzformenherstellung entstehen geruchsrelevante Schadstoffemissionen, die an der Bearbeitungsstelle erfasst und einem Abluftreinigungssystem zugeführt werden müssen. Durch die realisierte Obertischabsaugung (Saugdüse) werden im Mittel 73 Massenprozent der gasförmigen Schadstoffe erfasst. Die im Rahmen dieses Projektes erreichte Erhöhung des Erfassungsgrades an der Laseranlage beträgt 107 %, so dass die gewerbehygienischen Bedingungen ohne zusätzlichen Lüftungstechnischen Aufwand wesentlich verbessert werden können. Die konstruktiven und lufttechnischen Maßnahmen führen zur Minderung des Lärmpegels in der Werkshalle, Minderung der Geruchsimmission und der notwendigen Gesamtlüfterleistung. Des Weiteren wird die spezifische Filterbelastung des Biotropfkörpers durch diese Maßnahmen erhöht, was sich positiv auf die Abscheideeffizienz auswirkt. Die geruchsrelevanten Komponenten Formaldehyd, Acrolein, Acetaldehyd und Hexanal werden mit signifikant hohen Abbauraten von 65 - 99% gemindert. Aromatische Kohlenwasserstoffe werden ebenso wie Aldehyde und Ketone durch das biologische Abluftreinigungsverfahren selektiv umgesetzt. Die Abscheidung der Aerosole (36%) ist höher als theoretisch erwartet und als ausreichend zu bewerten. Das Verfahren ist tolerant gegenüber der dauerhaften Einleitung von Holzaerosolen. Auf Filterelementen, die mit einem dichtem Aerosolfilm beaufschlagt sind, können katalytisch wirksame Organismen in hoher Zelldichte nachgewiesen werden. Der BTK gewährleistet die sichere Einhaltung relevanter Grenzwerte bzw. Unterschreitung der Grenzmassenströme der TA-Luft. Die Geruchsminderung durch den Biotropfkörper als zentrale Aufgabe des Filtrationssystems beträgt 42%, wobei sich die Intensität und Hedonik / Qualität des Geruches im Reingas wesentlich verbessert.

Die Regelung des Wasserhaushaltes und der Nährstoffzufuhr sind determinierende Verfahrensparameter des BTK. Die ermittelten optimalen Arbeitsbereiche für die Berieselungsdichte, das maximale Wasserrückhaltevermögen, die Abwassereinleitung und Nährstoffzufuhr gewährleisten einen zuverlässigen und effizienten Betrieb der Filteranlage.

Die Kosten für den Betrieb der optimierten Biotropfkörper-Anlage werden im wesentlichen durch die Nährlösung und die Wasserversorgung determiniert. Sie betragen 1,46 € pro Betriebsstunde des BTK bzw. 49 Cent pro Laserbetriebsstunde. Mögliche neue BTK Anlagen können in kurzer Zeit adaptiert werden, da dominante Stämme des Biofilms konserviert und jederzeit verfügbar sind.

Im Vergleich zu alternativen Abluftreinigungsverfahren für die Problemstellung ist das charakterisierte Biotropfkörper-Verfahren als die ökonomisch, technologisch und ökologisch vorteilhafte Verfahrensvariante einzustufen.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse lassen sich zukünftige Einsatzfelder und mögliche Entwicklungsarbeiten ableiten. Da die Abluftzusammensetzung durch die Werkstoffhauptkomponente Holz determiniert wird, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Laserbearbeitung verschiedener Holzfaserverwerkstoffe zu erwarten. Für die möglichen Anwendungsbereiche der Abluftreinigung anderer Branchen wie Holz-, Holzstaub- und Holzwerkstoff-Verbrennung wird durch Hinterlegung der optimierten Mikroorganismen eine Verwertung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse für ähnliche Abluftzusammensetzungen ermöglicht.

Die realisierte Erfassungseinrichtung und Lüftungstechnik demonstriert ein modellhaftes Abluftfassungssystem für die lasergestützte Stanzformenherstellung. Die gewonnenen Erkenntnisse können zukünftig konsequent zur Erhöhung der Universalität des Saugadapters für den Einsatz in der 3D-Lasermaterialbearbeitung und folglich zu neuen Einsatzfeldern dieser umwelttechnisch effizienten Komponenten beitragen.

8 Literaturverzeichnis

- 1 VON ALVENSLEBEN, F.; BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M. et al.: Effektive Geruchsbeseitigung und Luftreinhaltung durch biologische Abluftreinigung: Kosten und Nutzen für Schichtholz-Stanzformenhersteller. Verband deutscher Stanzformenhersteller 4, 1998
- 2 FELD, A.; HAMPE, A.; LZH e.V.: *Erprobung der Biofiltration und diverser Abluftreinigungsverfahren für Aerosole bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichthölzern. Untersuchungsbericht für den Fachverband deutscher Stanzformenhersteller.* Hannover, 1993. - Firmenschrift
- 3 BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.; WALTER, J.: Environmental Biotechnology for waste gas treatment of particular and volatile emissions from laser material processing of natural polymers. Poster presentation; In: Proceedings of 4th International Congress on Biochemical Engineering: Kongressband; Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2000
- 4 BARCIKOWSKI, S.; FELD, A.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.: Laser Material Processing in Electronics: Control of Its Environmental Impacts. In: Joint International Congress and Exhibition „*Electronics Goes Green 2000+*“, Berlin, 11.-13. September 2000, Proceedings Volume 1, Technical Lectures, VDE Verlag Berlin, S. 613-617
- 5 BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.: Waste Gas Treatment of Particular and Volatile Emissions from Laser Material Processing of Polymers - Comparison of Multifunctional Filtration Concepts. In: Proceedings 2000 USC-TRG Conference on Biofiltration, Los Angeles/California, USA, 19./20. Oktober 2000, S. 115-122
- 6 BARCIKOWSKI, S.; BURMESTER, T., GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.; PÜSTER, T.: Controllo Sicuro Dei Contaminanti Generati Nelle Lavorazioni Laser Di Polimeri. In: Proceedings *Deformazione Expo laser, 8 e 9 Novembre 2000, Vicenza, Italia*, Hrsg. Publitec, ohne Seitenangaben
- 7 BARCIKOWSKI, S.; BURMESTER, T., GOEDE, M. et al.: The fume hazard in laser cutting and how to deal with it. In: Proceedings *AILU Workshop "Processing plastics with lasers"*, 15. November 2000, Coventry, UK, Hrsg. AILU, ohne Seitenangaben
- 8 GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.; SEEBAUM, D.: *Untersuchungen von Abluftreinigungsverfahren für die Laserstrahlbearbeitung organischer Werkstoffe.* Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V., AIF 10379: 9/95 - 8/97
- 9 BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.: Bioremediation of micron and submicron particular emissions exhausted from laser material processing of polymers. In: *Biotechnology 2000, 3.-8. September 2000, Berlin*, S. 354
- 10 VON ALVENSLEBEN, F.; BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M. et al.: Ablüfte aus der Laserbearbeitung richtig filtrieren. *Laser Magazin*, Juni 1998
- 11 GOEDE, M.: *Entstehung und Minderung der Schadstoffemissionen bei der Laserstrahlbearbeitung von Polymerwerkstoffen.* Hannover, Universität, Fachbereich Maschinenbau, Diss., Uni Hannover 2000
- 12 GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.: Erfolgreich: Biotropfkörper reinigt Abluftreinigung beim CO₂- Laserstrahlschneiden von Acrylatkunststoffen. *Laser Magazin*, 5 (1997), S. 21 - 25
- 13 OECD (ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT): *Biotechnology for a clean environment- Prevention, Detection, Remediation.* Paris, Publication Service OECD, 1994

- 14 LESON, G.; VAN LITH, C.; MICHELSEN, R.: Evaluating Design Options for Biofilters. In: *Journal of the Air & Waste Management Association* Vol. 47 (1997), S. 37-48
- 15 VDI 3477. *Biologische Abgas-/Abluftreinigung: Biofilter*, 1991
- 16 VDI 3478. *Biologische Abgasreinigung: Biowäscher und Rieselbettreaktoren*, 1996
- 17 BARDTKE, D.; HIPPCHEM, B.: *Untersuchungen über den Einfluß der Rohgaszusammensetzung auf das Artenspektrum und die Adaptionsfähigkeit der Mikroflora von Biofiltern*. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Ba 551/9-1, Universität Stuttgart 1985
- 18 BARDTKE, D.; FISCHER, K.: *Untersuchungen zur Abbaubarkeit und Abbaukinetik ausgewählter anorganischer und organischer Abluftinhaltsstoffe beim Biofilterverfahren*. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Ba 551/10-1, Universität Stuttgart 1986
- 19 VON ALVENSLEBEN, F.; BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M.: Biologische Abluftreinigung bei der Bearbeitung von Kunststoffen mit CO₂-Lasern. *Wasser, Luft und Boden*: Vol. 3, 1998
- 20 HAMPE, A; LZH e.V.: *Untersuchung zur Direkteinleitung partikelförmiger Aerosole in einen Biofilter im Labormaßstab; Aufzeigen von Entsorgungswegen für das Filtermaterial*. Untersuchungsbericht für den Fachverband deutscher Stanzformenhersteller. Hannover, 1994. - Firmenschrift
- 21 GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.; SEEBAUM, D.: *Untersuchungen zur Erfassung, Filtration und Entsorgung von Gefahrstoffen bei der Laserstrahlbearbeitung*. Forschungsvorhaben EUROLASER - Safety in the Industrial Applications of Lasers EU 643, FKZ 13 EU 109, LZ 1/92 - 6/95
- 22 CONVERTI, A.; FABIANO, B.; FERRAILOLO A. ZILLI, M.: Macro-Kinetic Investigation on Phenol Uptake from Air by Biofiltration: Influence of Superficial Gas Flow Rate and Inlet Pollutant Concentration. In: *Biotechnology and Bioengineering* (1996) Vol. 49, S. 391-398
- 23 BARCIKOWSKI, S.; BUNTE, J.; HAFERKAMP, H.: Safety first...Sicherheits- und Optimierungsaspekte lasergestützter Bearbeitung von Furnier und Birkenesperrholz, *Furnier Magazin 2000*, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen Dezember 2000, S. 18-23
- 24 BARCIKOWSKI, S.; SCHWARTZ, J.: Lasers Won't Give Shavings: *Europhotonics*, Ausgabe Oktober/November 2001, Laurin Publishing Co. Inc., Pittsfield MA, USA
- 25 Schutzrecht DE 199 46177A1 (1999-09-21). Anordnung zur Entfernung von Ablations-Abprodukten
- 26 Schutzrecht DE 43 36 010 C2 (1993-10-21). Laserstrahlbearbeitungskopf für eine Schneidbearbeitung, insbesondere einen Bearbeitungskopf für eine Laserbearbeitungs-vorrichtung gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Laserbearbeitungs-vorrichtung
- 27 Schutzrecht EP 03 30 565 A1 (1989-02-22). Appareil de coupe laser muni d'un dispositif d'evacuation des fumees
- 28 Schutzrecht DE 39 23 829 C2 (1989-07-19) Absauganlage
- 29 Gebrauchsmuster (1985-12-09). Bezeichnung des Gegenstandes Absaughaube
- 30 Offenlegungsschrift DE 198 52706A1 (1998-11-16). Absaugvorrichtung, welche luftgetragene oder luftgelöste Abfallprodukte einer chirurgischen Behandlung mit einem stromgetriebenen Chirurgieinstrument insbesondere mit einem Laserskalpell absaugt, mit einer Aktivierungseinheit

- 31 MARUTZKY, R.; SALTHAMMER, T.: Emissionen organischer Verbindungen aus Möbeloberflächen II, *Holz-Zentralblatt*, Nr. 6, (1996), S. 57-58
- 32 FRIEDRICH, G.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H. et al.: *Untersuchungen der Emissionen beim Laserstrahltrennen organischer Werkstoffe – Sicherheitstechnische und medizinische Aspekte bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung*: Broschüre zur Ergebnispräsentation der nationalen Teilvorhaben aus dem EUREKA-Verbundprojekt EUROLASER-Safety in the Industrial Applications of Laser INDAL (EU 643), VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf 1995
- 33 SCHULTES, M.: *Abgasreinigung: Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Vergleichsverfahren*; Springer-Verlag, 1996
- 34 DESHUSSES, M. A.; DEVINNY, J. S.; WEBSTER, T. S.: *Biofiltration for Air Pollution Control*, CRC Press 1999
- 35 THIEBEN, N.: *Schadstoffabbau auf hohem Niveau: Biologische Abluftreinigung mit kombinierten Filterstufen*, Chemieanlagen und Verfahren, 1997
- 36 DSMZ: Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, *Catalogue of Strains* 6.ed., 1988
- 37 KOPPE, P., STOZEK, A.: *Kommunales Abwasser*. Vulkan-Verlag, 1986
- 38 LEVENSPIEL, O.: *Chemical reaction engineering*, 3. ed. New York, NY: Wiley, 1999 ISBN: 0-471-25424-X
- 39 SCHÜGERL, K.: *Technische Reaktionsführung I/II*, Institut für technische Chemie, Universität Hannover, 1996
- 40 Norm DIN 1946 Oktober 1988: Teil 1: *Raumlufttechnik; Terminologie und graphische Symbole (VDI-Lüftungsregel)*.
- 41 BIBEAU, L.; ELMRINI, H.; HEITZ, M.; JORIO, H.: Biofiltration of Air Polluted with Xylenes: An Experimental Study. In: *Proceedings 2000 USC-TRG Conference on Biofiltration, Los Angeles/California, USA, 19./20. Oktober 2000*, S. 99-106
- 42 FRIEDRICH, G.; MAISENHÄLDER, F.; OPOWER, H.; STÄHLE, H.-J.: *Untersuchung der Emissionen, die bei der Lasermaterialbearbeitung von Hölzern, Papier- und Kartonmaterialien entstehen*. Broschüre zur Ergebnispräsentation der nationalen Teilvorhaben aus dem EUREKA-Verbundprojekt EUROLASER-Safety in the Industrial Applications of Laser INDAL (EU 643), Institut für Technische Physik, DLR Stuttgart, 1996
- 43 FAIX, O., MEIER, D.: Thermal degradation products of wood. Gas chromatography separation and mass spectrometric characterisation of monomeric lignin derived products. *Holz Roh-Werkst* 48, S.281-285
- 44 FAIX, O., MEIER, D.: Thermal degradation of wood. A collection of EI mass spectra of monomeric lignin derived products. *Holz Roh-Werkst* 48, S. 351-354
- 45 BARCIKOWSKI, S.; GOEDE, M.; HAFERKAMP, H.: Laser generated Air Contaminants - Incorporating environmental aspects in quality control of laser material processing. In: *Proceedings Laser 2001 World of Photonics - Lasers in Manufacturing. Dezember 2001*, Hrsg. AT-Fachverlag GmbH, Stuttgart, S. 716 - 726
- 46 HÜBNER, R.; SCHÖN, M.: *Geruch - Messung und Beseitigung*-. Vogel-Verlag, Würzburg 1996
- 47 REIST, P.C.: *Aerosol science and technology*. McGraw-Hill Inc., New York, St. Louis, 1993, S. 115ff.
- 48 HINDS, WILLIAM C.: *Aerosol technology : Properties, behavior, and measurement of airborne particles*. - 2. ed. - New York, NY: Wiley, 1999.

- 49 JOST, D.: *Die neue TA-Luft*. WEKA-Fachverlag, August 1998
- 50 NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE: *Richtlinie zur Zulassung von gewerblichen und industriellen Abfällen für die Entsorgung auf Siedlungsabfalldeponien* 1992
- 51 ACHOUAK, W., BARAKAT, M.; BERGE, O. et al.: Taxonomic characterization of *Ochrobactrum* sp. Isolates from soil samples and wheat roots, and description of *Ochrobactrum tritici* sp. nov. and *Ochrobactrum grignonense* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2000; p. 2207-2223
- 52 BEHRENDT, U.; SCHUMANN, P.; ULRICH, A.: Description of *Microbacterium foliorum* sp. nov. and *Microbacterium phyllosphaerae* sp. nov. isolated from the phyllospheres of grasses and the surface litter after mulching the sward, and reclassification of *Aureobacterium resistens* 1998 as *Microbacterium resistens* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001; S. 1267-1276
- 53 BACH, FR.-W.; GOEDE, M.; GEBUR, J. et al.: *Charakterisierung und Vergleich der Schadstoffemissionen beim Schweißen und Schneiden mit Laserstrahl- und Plasmaverfahren* Hannover, LZH e.V., 1995
- 54 KENSY, P.: *Oekobilanzen: eine kritische Bestandsaufnahme*, CUTEC-Schriftenreihe 9, Cuvillier Goettingen, 1993

9 Anhang

9.1 Messgerätetechnik

9.1.1 Gesamtkohlenwasserstoffe: Flammenionisationsdetektor

Für die Messungen werden zwei Gesamtkohlenwasserstoff-Analysatoren der Fa. *Bernath Atomic* (Modell 3005 und 3006) verwendet. Bei Schadstoffgemischen ist grundsätzlich keine selektive, sondern allein eine summarische Bestimmung der Komponenten mit dem FID möglich. Mit den Messergebnissen können folglich keine differenziert umweltrelevanten Aussagen getroffen werden. Dieser massenstromabhängige Detektor ist zur kontinuierlichen Überwachung industrieller Anlagen geeignet, um das Emissionsverhalten organischer Verbindungen zu beurteilen. So ist am untersuchten BTF die dauerhafte Installation eines FIDs und dessen Steuerung über Magnetventile bereits vorgesehen.

Als Messeffekt wird die Ionisation organisch gebundener Kohlenstoffatome in einer Wasserstoffflamme genutzt. Der auftretende Ionenstrom, dessen Stärke in erster Näherung proportional der Anzahl der Kohlenstoffatome der verbrannten Kohlenwasserstoffe ist, wird elektrisch verstärkt und angezeigt.

Die Massenkonzentration der detektierten Substanz $c_{m,X}$ lässt sich unter Annahme, dass für X das ideale Gasgesetz gilt, mit folgender Gleichung bestimmen.

$$c_{m,X} = \frac{3 c_{P\bar{A}} M_X}{n_X r_p 22,4} = f_{FID} c_{P\bar{A}}$$

An jeder Messstelle des Versuchsaufbaus in Abbildung 22 wird der Erfassungsgrad gemäß folgender Gleichung ermittelt.

$$\gamma_X = \frac{\int_{t=0}^{t_E} \dot{m}_{X,FID}(t) dt}{\Delta m_{wt}}$$

Nach einem Kalibriervorgang des Null- bzw. Endpunktes des Flammenionisationsdetektors wird das Messgerät zur Bestimmung der Gesamt-Kohlenwasserstoffe im Roh- bzw. Reingas der Abluft eingesetzt. Ein definiertes Volumen pro Zeiteinheit wird von dem FID mittels einer integrierten Pumpe aus dem Probegas angesaugt und die gesamtorganischen Kohlenwasserstoffe in einer Wasserstoffflamme (Brenngas) ionisiert. Der somit erzeugte Ionenstrom wird einem Signalverstärker zugeführt und als Messgröße ausgegeben. Die Messanzeige entspricht der Konzentration der Kohlenwasserstoffe eines 80ppm konzentrierten Propangases. Folglich gibt das Messsignal die Konzentration als Propanäquivalent in ppm an. Zur Umrechnung des Messwertes in mg organisch gebundener Kohlenstoff pro Normkubikmeter [mgC/m³], wird bei unbekannter Zusammensetzung der gezogenen Abluftprobe der Faktor 1,608 herangezogen:

$$C_{CP} = CV_{P\bar{A}} \times 1,608$$

Die relative Unsicherheit infolge der Ablesefehler durch Parallaxe wird zu 2 % eingestuft.. Die von der Firma Bernath Atomic eingesetzten Flammenionisationsdetektoren sind so konfiguriert, dass Kohlenmonoxidkonzentrationen in der Wasserstoffflamme nicht erfasst werden und somit auch keinen Ionenstrom erzeugen.

9.1.2 Olfaktometrie / Unterdruckprobennehmer

Die Olfaktometrie wird zur Beschreibung der subjektiven Geruchsempfindung des Menschen eingesetzt. Die folgenden Parameter werden olfaktometrisch bestimmt:

- Geruchsstoffkonzentration (Stärke des Geruchreizes)
- Geruchsart/Qualität/Charakteristik (es riecht nach...)
- Intensität des Geruches (es riecht stark,...deutlich,...schwach)
- hedonische Wirkung (es riecht angenehm,...neutral,...unangenehm)

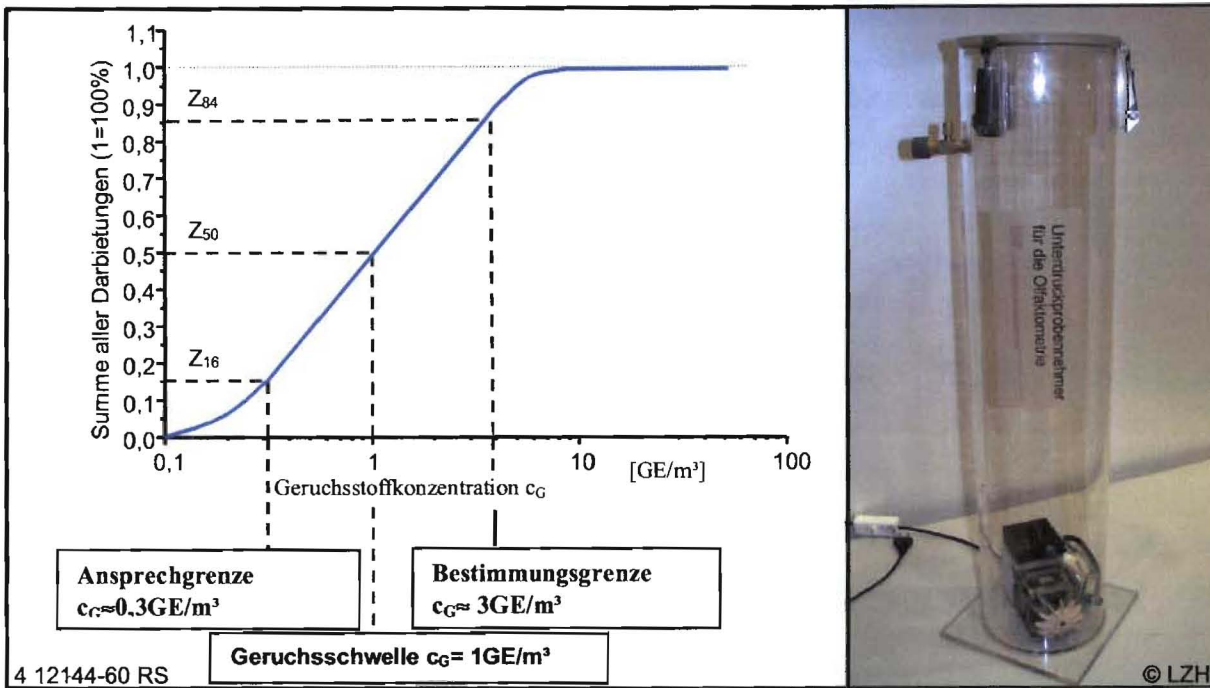


Abbildung 56: Geruchsschwellenkennlinie und eingesetzter Unterdruckprobennehmer [46]

Die Geruchsstoffkonzentration einer Abgasprobe wird durch Verdünnung mit synthetischer Luft bis zur Geruchsschwelle (Wahrnehmungsschwelle) ermittelt. Die resultierende Stoffkonzentration dieser Gasmischung wird mit der Einheit: Geruchseinheit [GE] pro Volumeneinheit [m^3] angegeben. Eine Geruchseinheit $1 \text{ GE}/\text{m}^3$ beschreibt die Anzahl der Teilchen in 1 m^3 Neutralluft die gerade eine Geruchsempfindung auslöst. In Abbildung 56 ist die Geruchsschwellenkennlinie dargestellt. Aus der Abbildung lässt sich entnehmen, dass erst bei hohen Geruchsstoffkonzentrationsänderungen im Bereich von $90 \text{ GE}/\text{m}^3$ Änderungen der Geruchsintensität zu erwarten sind. Erfassungsluft- und Abluftproben werden an der Emissionsquelle diskontinuierlich mit einem Unterdruckprobennehmer entnommen. Dazu werden geruchsneutrale Kunststoffbeutel (5 l Fassungsvermögen) durch Herstellung eines Unterdruckes indirekt gefüllt und anschließend bis zur Auswertung am Olfaktometer verschlossen. Über Nasenmasken wird dem Probandenkollektiv das Gasgemisch angeboten. Die 5 bis 6 ausgewählten Probanden im Alter zwischen 18 und 50 Jahren übermitteln durch Tastendruck ihre persönliche Geruchsschwelle einem Auswertungsrechner. Zusätzlich zur Geruchsstoffkonzentration wird die Geruchsintensität zur Bewertung herangezogen. Die hedonische Wirkung einer Geruchsprobe beschreibt in einer neunteiligen Skala von „äußerst angenehm“ bis „äußerst unangenehm“ die subjektive Empfindung eines Probanden.

9.1.3 Multigassensorgerät (Polytektor G750)

Das kompakte handliche Messgerät zur Erfassung von fünf Gasen (NO_x , CO , CO_2 , O_2 , CH_4), wird im eigentlichen Sinne zur Überprüfung der Einhaltung von MAK-Werten eingesetzt und gibt bei Überschreitung eines definierten Grenzwertes der Gase ein akustisches und optisches Signal. Es hat sich auch für Messungen von Abgasen als geeignet erwiesen. Die elektrochemischen Messzellen dienen zur Messung von CO und O_2 . Hierbei wird bei der Umwandlung des Messgases an der Grenzfläche zwischen einem Elektrolyten und der Arbeitselektrode (Anode) ein zur Gaskonzentration proportionales Signal erzeugt. Die Einflüsse der Messungenauigkeiten, hervorgerufen durch schwankenden Luftdruck und Temperatur werden kompensiert. Der Messbereich für den CO -Sensor liegt im Bereich 0 bis 500 ppm und vom O_2 -Sensor von 0 bis 25,0 Volumenprozent. Methankonzentrationen registriert das Gerät nach dem Messprinzip der Wärmetönung. Das Gas strömt an einer beheizten Drahtspule entlang und verändert die durch katalytische Verbrennung entstehende Wärme an der Drahtspule, den elektrischen Widerstand des Drahtes welches als Messsignal eingeloggt wird. Der Messbereich für den CH_4 -Sensor liegt im Bereich von 0 bis 100% UEG. Diese Messzellen besitzen eine geringe Querempfindlichkeit gegenüber Ethan und Propan. Ähnliches Messprinzip wird bei der Wärmeleitung eingesetzt. Das Probengas wird an ein beheizten Draht geleitet, wobei die je nach Gaskonzentration den Draht erwärmt oder abkühlt. Somit ändert sich der elektrische Widerstand des Drahtes und kann als Messsignalausgabe aufgezeichnet werden. Der Messbereich für den NO_x -Sensor liegt im Bereich von 0 bis 25,0 Volumenprozent.

Tabelle 19: Eingesetzte Messsensoren des Polytektors

Sensor	Messbereich	Einheiten	Messprinzip
CO_2	0..5,0 Vol%	Vol%	Infrarot
CO	0..500 ppm	ppm	elektrochemisch
UEG (CH_4)	0..100%UEG	%UEG	Wärmetönung
O_2	0..25,0 Vol%	Vol%	elektrochemisch

Das zu analysierende Gas wird durch eine integrierte Pumpe kontinuierlich aus dem Hauptvolumenstrom entnommen und durch einen Gasansaugstutzen in die Messkammer geleitet.

9.1.4 Planfilterkopfgerät zur Bestimmung der Gesamtpartikel

Die Abscheidung von Partikeln durch Filtration beruht im wesentlichen auf den Mechanismen Impaktion, Sperreffekt, Diffusion und elektrostatischen Effekten. Einen hohen Abscheidegrad für Feinstaub weist das Plankopffiltergerät auf, dessen Staubspeichervermögen jedoch begrenzt ist. Experimentell werden Planfilter aus Quarzfaser für Staubgehalte von 0,2 bis 20 mg/m³ eingesetzt, die einen mittleren Abscheidegrad von 99,99% besitzen. Es wird zur gravimetrischen Bestimmung der Gesamtpartikel-Aerosolkonzentration von ca. 1 bis 1.000 mg/m³ in strömenden Gasen eingesetzt.

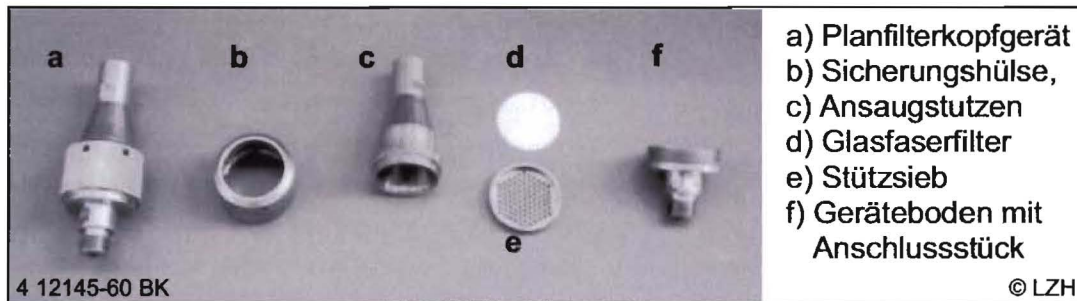


Abbildung 57 Aufbau des Planfilterkopfgerätes

Bei der isokinetischen Probenahme wird durch eine Pumpe mit Schwebekörperdurchflussmesser, Thermometer und Manometer ein definierter Teilstrom des Abgases mit einer Sonde entnommen. Die festen Teilchen werden auf dem Glasfaserfilter abgeschieden. Nach 24-stündiger Trocknung im Exsikkator wird die Massenzunahme durch die Probenahme bestimmt. Der Planfilterkopf besteht aus einem Ansaugstutzen, einer Sicherungshülse, einem Stützsieb, einem Spanning und einem Geräteboden mit Anschlussstück an das Absaugaggregat. Zur quantitativen Bestimmung der Partikelkonzentration und zur Analyse der adsorbierten gebundenen PAKs aus der Laserbearbeitung von Schichthölzern werden Quarzfaserfilter verwendet, die einen mittleren Abscheidegrad von 99,99% aufweisen. Die filtrierenden Effekte der Quarzfaser lassen sich durch Impaktion, Sperreffekte, Diffusion und Elektrostatik erklären. Für eine geschwindigkeitsgleiche Teilstromentnahme muss eine definierte Teilstrom-Geschwindigkeit zur Hauptstromgeschwindigkeit eingestellt werden. Bei bekannten Volumenströmen kann mit der folgenden Gleichung der Wirkdurchmesser der Entnahmesonde errechnet werden.

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_m}{\pi \cdot w_G}}$$

Die Sondenform beeinflusst die Trennung von Haupt- und Teilvolumenstrom und kann das Messergebnis verfälschen. Messungenauigkeiten können u.a. durch Schwankungen der Gasgeschwindigkeiten im Haupt- bzw. Teilstrom entstehen. Die Filter werden vor der Messung im Exsikkator getrocknet und erst kurz vor Messbeginn in den Planfilterkopf eingesetzt. Einflussgrößen zur Umrechnung des am Gasmengenzählers gemessenen Volumens sind Temperatur, Druck und Feuchtegehalt des Gases.

9.1.5 Kaskadenimpaktor zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung

Unter der Ausnutzung von Trägheitskräften können mit dem Kaskadenimpaktor partikelgrößenabhängige Staubfraktionen separiert werden. Die unterschiedliche Trägheit von Partikeln ermöglicht mit einem Kaskadenimpaktor nach VDI 2066, Bl.5 die qualitative Analyse von Aerosolkonzentrationen in den Partikelgrößenbereichen von 0,015 bis 16 µm in 10 hintereinander angeordneten Stufen. Eine Impaktorstufe besteht prinzipiell aus den Elementen Düse und Prallplatte. Die Partikel werden in der Düse beschleunigt und Partikel mit ausreichender Trägheit treffen auf die Aluminiumfolien auf. Ausschlaggebende Faktoren des Systems für die Trennung der Partikel in partikelgrößenabhängige Fraktionen sind neben der Teilstromgeschwindigkeit die Düsenweite, die Düsenlänge und der Abstand zwischen Prallplatte und Düse. In den nachfolgenden Stufen werden Partikel geringerer Trägheit abgeschieden. Nach der ähnlichen Verfahrensweise wie bei der Gesamtaerosolbestimmung durch Wägen der Filter (vorher und nachher), werden auch hierbei die Aluminiumfolien vor und nach der Beaufschlagung gravimetrisch bestimmt. Zur Angabe des in den Fraktionen erfassten Partikelgrößenbereiches werden die Abscheidewirkungsgrade der zehn in Tabelle 20 dargestellten Stufen benötigt. Der Einsatz eines Vorabscheiders muss in die Messanordnung eingebaut werden, falls 15 % der erfassten Partikel größer als 10 µm sind.

Tabelle 20: Ausführung der Impaktorstufen

Impaktor- stufe	Trenndurchmesser [µm]	Mittlerer Durchmesser [µm]	Düsen- durchmesser [mm]	Anzahl der Düsen
1	0,015	0,021	0,30	250
2	0,030	0,042	0,30	125
3	0,060	0,087	0,25	125
4	0,125	0,180	0,40	25
5	0,250	0,350	0,50	18
6	0,500	0,710	0,60	25
7	1,000	1,400	0,71	46
8	2,000	2,800	1,10	44
9	4,000	5,700	2,10	24
10	8,000	11,300	4,20	12
11	16,000	-----	15,10	1

Bei der Auswahl der Entnahmesonde wird abhängig vom Teilvolumenstrom der geeignete Sondendurchmesser berechnet, wobei der abzusaugende Teilvolumenstrom für den gewählten Sondendurchmesser mit folgender Gleichung ermittelt wird.

$$\dot{V}_r = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot w_G$$

Die Dauer einer Messreihe für die angestrebte Beladungsmenge wird mit folgender Gleichung bestimmt.

$$t = \frac{m_1}{q_r \cdot \dot{V}_m}$$

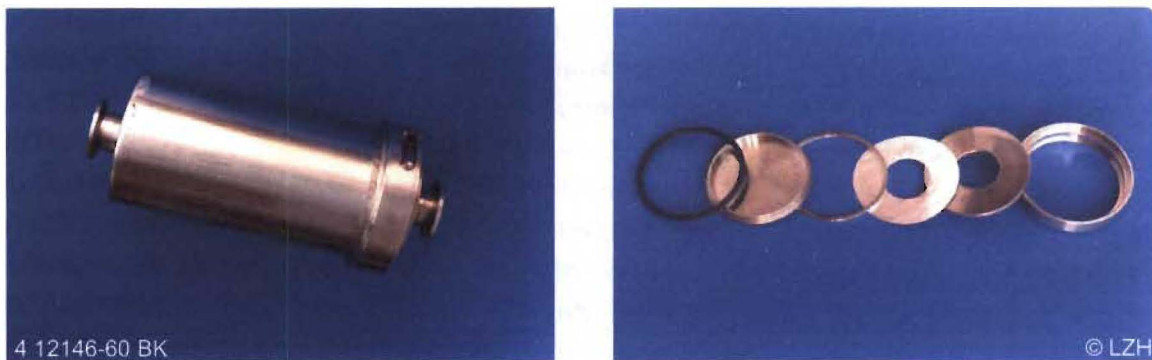


Abbildung 58: Links: Kaskadenimpaktor. Rechts: Darstellung einer Stufe des Niederdruck-Kaskadenimpaktors

Im Anschluss einer Beaufschlagungsreihe werden die Impaktorfolien entnommen und anhand der Differenzwägung kann eine quantitative Verteilung hinsichtlich der Partikeldurchmesser auf den Folien festgestellt werden. Außerdem ergibt sich durch die Trenngrenze der Impaktorstufe der Medianwert des aerodynamischen Durchmessers.

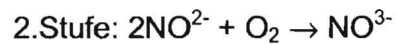
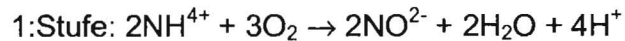
Mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) wird die Struktur der Aerosole beaufschlagter Planfilter bzw. Impaktorfolien visualisiert.

9.1.6 Respirometrie: OxiTopControl

Für die im Rahmen der mikrobiologischen Forschungsarbeiten zur selektiven Anreicherung spezieller Mikroorganismenstämme ist die Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs eine wichtige Größe zur Feststellung der biologischen Aktivität der selektiv angereicherten Mikroorganismen. Die Messwerte geben Kenntnis über die Aktivität der zu spezifizierenden Mikroorganismen. Dazu wird das Messsystem "OxiTop[®] OC 100" des Herstellers WTW eingesetzt. Das System besteht aus dem Controller "OxiTop[®] OC 100", der zur zentralen Probenverwaltung, Probenfortschrittsanzeige, integriertem Datenlogger, Berechnung, Auswertung und graphischer Darstellung des BSB-Wertes eingesetzt wird und dem "OxiTop[®] IS 6" (Inductive Stirring System) mit 6 Messplätzen mit den zugehörigen Messköpfen "OxiTop[®] -C".

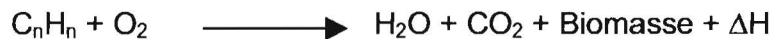
Die Messung selbst kann entweder nach einem Standardverfahren realisiert werden oder wie in diesem Fall nach der respirometrischen Methode. Für die respirometrische Messung ist ein definiertes Probevolumen zusammen mit der Luft in der Messflasche eingeschlossen. Zur Vorbereitung einer BSB₅-Routinemessung wird der zu erwartende BSB abgeschätzt, sofern es sich um eine unbekannte Probe handelt. Annähernd kann der BSB bei bekanntem CSB mit 80% angenommen werden. Somit erhält man für ein definiertes Probevolumen den zugehörigen Messbereich. Demnach wird für einen gering zu erwartenden biochemischen Sauerstoffbedarf ein entsprechend größeres Probevolumen veranschlagt. Für die Bestimmung des biochemischen Sauerstoffverbrauches sollte die Oxidation der Kohlenwasserstoffverbindungen einziges Messwertkriterium sein. Der Sauerstoffverbrauch kann unter anderem auch durch eine Nitrifikation stattfinden, sobald eine ausreichende Sauerstoffmenge von 2 bis 2,5 mg/l in der Probe vorhanden ist. Die Oxidation der Kohlenwasserstoffverbindungen ist bei hohen Schadstoffkonzentrationen zwar dominierend, jedoch kann die Nitrifikation in diesem Fall einen limitierenden Faktor hervorrufen. Die Nitrifikanten verstoffwechseln in Wasser

gelöste Stickstoffverbindungen über Nitrit zu Nitrat nach den beiden folgenden Oxidationsstufen:



Durch tropfenartige Zudosierung von Nitrifikationshemmern, in entsprechenden Mengen bezüglich des Probevolumens, wird die Bildung von Nitrat unterbunden und somit ausschließlich der Sauerstoffverbrauch durch den mikrobiellen Abbau der Kohlenwasserstoffe erfasst.

Nach der biochemischen Oxidationsreaktion



benötigen aerobe Mikroorganismen Sauerstoff für die Metabolisierung der zugegebenen Schadstoffe und verstoffwechseln die Substanzen zu den Produkten Kohlendioxid, Wasser, Biomasse und Energie in Form von Wärme. Damit in der Messflasche kein Überdruck durch das Freisetzen von Kohlendioxid entsteht, dass das Ergebnis verfälschen könnte, werden in einem Gummiköcher, der sich ebenfalls im Luftraum in der Flasche befindet, Natriumhydroxidplättchen zugegeben. Das Natriumhydroxid bindet chemisch das Atmungsprodukt Kohlendioxid. Durch ein fortlaufendes Rühren der Probe mit Magnetrührern wird für einen ungehinderten Stoffaustausch gesorgt. Der Sauerstoffverbrauch in der Messflasche erzeugt letztendlich eine Druckabnahme. Der hochwertige piezoresistiv arbeitende Silizium-Absolutdrucksensor im Messkopf registriert diese Druckabnahme und die Messung wird vom System in dem Messkopf gestartet und die Messwerte werden bei einer Messrate von 20 min automatisch in einem Speicher eingeloggt. Die Messdaten werden am Ende einer BSB₅-Messung mit dem Controller "OxiTop® OC 100" ausgelesen und können anhand einer Software grafisch dargestellt werden. Der dargestellte Verlauf des Graphen ist ein direktes Maß für den Sauerstoffverbrauch über die Zeit. Hierfür gilt die folgende Gleichung als Berechnung des BSB-Wertes.

$$\text{BSB} = \frac{M(\text{O}_2)}{R \cdot T_{20}} \cdot \left(\frac{V_{\text{ges}} - V_{\text{fl}}}{V_{\text{fl}}} + \frac{T_{20}}{T_0} \right) \cdot p \cdot (\text{O}_2)$$

Jeder Messkopf hat eine eigene Identifikationsnummer und schließt daher das Verwechseln von BSB-Proben aus.

Die Genauigkeit der Messergebnisse aus einer BSB-Messung werden entscheidend von der Temperatur und des Wasserdampfdruckes beeinflusst. Die erforderlichen Anpassungsvorgänge werden bei diesem System automatisch registriert. Das System vergleicht in gleichen zeitlichen Abständen den Luftdruck in der Flasche mit dem zeitlich vorherigen Wert und startet die Messung sobald der zuletzt registrierte Messwert kleiner als der vorherige ist.

9.1.7 Charakterisierung des wässrigen Milieus: Multiline P4

Zur Charakterisierung des wässrigen Milieus (Frischwasser und Abwasser) wird das Messgerät MultiLine P4 eingesetzt. Mit dem Messgerät werden die Parameter pH, Sauerstoffgehalt [mg O₂/l], Leitfähigkeit χ [μ S/cm] und Temperatur [°C] bestimmt. Im folgenden werden die separaten Messsensoren erläutert.

pH-Einstabmesskette SenTix 41

Mit der pH-Einstabmesskette SenTix41 mit integriertem Temperaturmessfühler können pH-Werte in einem Bereich von 0 - 14 bei einem Temperaturbereich von 0 - 80 °C detektiert werden.

Sauerstoffsensor CellOx 325

Mit dem Sauerstoffsensor CellOx 325 können Sauerstoffkonzentrationen in einem Bereich von 0 – 50 mgO₂/l bei einem Temperaturbereich von 0 bis 50 °C detektiert werden. Der membranbedeckte galvanische Sensor besteht aus einem Membrankopf WP 90. Der Membrankopf umschließt die darunter befindliche Arbeitselektrode (Goldkathode), der Gegenelektrode (Bleianode) und einem Isolator. Die Messgenauigkeit korreliert mit der Eintauchtiefe in die wässrige Lösung und variiert in einem Bereich von 1 –10%.

Standard-Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon® 325

Mit der Standard-Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon® 325 mit integriertem Temperaturmessfühler können Leitfähigkeitsmesswerte in einem Bereich von 1 μ S/cm – 2 S/cm bei einem Temperaturbereich von -5 - +100 °C detektiert werden. In Verbindung mit dem Controller MultiLine P4 beträgt der Messbereich 1 μ S/cm – 500 mS/cm. Die Zellkonstante liegt im Bereich von 0,475 cm⁻¹ \pm 1,5%. Zur Temperaturmessung wird der integrierte NTC (30 Ohm / 25 °C) mit einer Fühlergenauigkeit von \pm 0,2 K eingesetzt.

9.1.8 Gaschromatographie / Massenspektrometrie (GC/MS)

Gaschromatographisch werden solche Stoffe getrennt, die unzersetzt in den Gaszustand überführt oder unter Zersetzung reproduzierbar verdampft werden können. Der Trennprozess lässt sich als multiplikative Verteilung jeder Probenkomponente zwischen der stationären und der mobilen Phase verstehen. Der Transport der Komponenten erfolgt dabei ausschließlich in der Gasphase, die Trennung in der stationären Phase. Daher ist das Ziel dieser Methode bezüglich der biologischen Abluftreinigung insbesondere die Beurteilung von Emissionen komplexer Gemische auch mit Einzelkomponenten geringer Konzentration.

Ergänzend zur Ermittlung der Summenkonzentration durch den FID können durch Teilvolumenstromentnahme unter Adsorption an Aktivkohle bzw. Silicagel weitere quantitative sowie qualitative Informationen gewonnen werden. Die zu erfassenden Abluftinhaltsstoffe passieren ein genormtes Sorptionsröhrchen (Sammelröhrchen Typ NIOSH, *Drägerwerke AG*), wobei die Zustandsgrößen Druck und Temperatur des angesaugten Gasvolumens zur Reproduzierbarkeit gemessen werden. Nach 24-stündiger Extraktion mit Schwefelkohlenstoff (Aktivkohle) bzw. Aceton (Silicagel) auf einer Schüttelvorrichtung können Teilvolumina (1µl; 2µl) zur gaschromatographischen und massenspektroskopischen Analyse in das GC-MS überführt werden.

Die Qualifizierung einer durch das Massenspektrometer detektierten Substanz ist mit Hilfe einer elektronischen Bibliothek (*NIST*) unter Beachtung der Nettoretentionszeit und dem Kapazitätsverhältnis möglich. Zur Quantifizierung ist es notwendig, Kalibrierstandards anzusetzen und diese unter gleichen Bedingungen wie die Probe zu injizieren.

Die Massenkonzentration einer Verbindung im angesetzten Standard

$$c_m(x) = \frac{V_x \delta_x}{V_{ges}}$$

wird mit den detektierten Signalen (Peakflächen) verglichen, so dass für jede Verbindung ein Umrechnungsfaktor $f_{GC}(x)$

$$c_{m,P}(x) = f_{GC}(x) A_P(x) = \frac{A_P(x)}{A_{ST}(x)} c_m(x)$$

linear regressiert werden kann. Schließlich kann die Massenkonzentration in der Gasphase $c_{m,g}(x)$ mit Gleichung 2.5 bestimmt werden, wobei das Eluatvolumen V_{el} wie auch das Gasvolumen V_{ads} , welches durch das Sorptionsröhrchen geführt wird, bestimmt werden müssen.

$$c_{m,g}(x) = \frac{c_{m,P}(x) V_{el}}{V_{ads}}$$

Die eingesetzten Probensammler unterteilen sich in adsorptiv und absorptiv wirkende Sammelmedien.

Tabelle 21: Verwendete diskontinuierliche Probenahmemedien

Gassammlertyp	Probenahme durch	Erfassbare Substanzen
Aktivkohleröhrchen	Adsorption	Aromate, Aliphate, Halogenierte KW
Silicaröhrchen	Adsorption	Phenole, Kresole, Polare KW
DNPH-Flaschen	Absorption	Aldehyde, Ketone

Eine Analyse mit GC/MS und GC/FID lässt qualitative bzw. quantitative Aussagen über die Verbindungen des Abgases zu. Für die diskontinuierliche Probenahme kommen Sammelmedien nach den Prinzip der Adsorption und Absorption zum Einsatz. Aktivkohle- und Silicagelröhrchen beinhalten feste Sammelmedien, wobei die unpolaren Kohlenwasserstoffe Aromaten, Aliphaten und die Gruppe der halogenierten Kohlenwasserstoffe von der Aktivkohle adsorptiv erfasst werden, die polaren Kohlenwasserstoffe, wie Phenole, Kresole, Aldehyde und Ester auf das Silicagelröhrchen adsorptiv angereichert werden. Die Substanzgruppen Aldehyde und Ketone werden ergänzend durch Absorption in DNPH-Waschflaschen gezogen. Die hohe spezifische Oberfläche der festen Sammelmedien erlaubt ein ebenfalls hohes Adsorptionsvermögen. Sie eignen sich daher gut zur Bindung organischer Substanzen und letzten Endes einer hochauflösenden Trennung mit einem Gaschromatographen. Die adsorptiv beaufschlagten Sorptionsröhrchen werden zur Vorbereitung der qualitativen und quantitativen Analyse eluiert. Das feste Trägermaterial wird aus den Röhrchen entnommen und in membranverschließbare Glasgefäße gegeben. Um die Schadstoffe vom Trägermaterial zu extrahieren, wird der Aktivkohle 1 ml hochreiner Schwefelkohlenstoff und 1 ml Aceton für die Extraktion der Schadstoffe aus Silicagel hinzugefügt. Anschließend müssen die Proben mind. 4 Stunden auf eine Schüttelvorrichtung gestellt werden, bevor 1 µl Eluat auf die Säule des GC/MS bzw. GC/FID zugeführt wird. Für eine qualitative bzw. quantitative Aussage der zu analysierenden Substanzen wird die Datenbibliothek von „NIST“ herangezogen. Außerdem müssen Kalibrierstandards angesetzt werden. Diese Standards sollten die gleichen Verbindungen und Konzentrationsbereiche aufweisen, wie die zu quantifizierenden Proben.

Der Nachweis der Aldehyde und Ketone kann durch die Absorption in Waschflaschen erfolgen. Diskontinuierlich wird ein Teilvolumenstrom des Abgases entnommen und durch eine Waschflasche gezogen, die mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) befüllt ist. In der ablaufenden Reaktion werden Aldehyde und Ketone mit der salzsauren Lösung in Kontakt gebracht und in Hydrazone überführt. Um die gelösten Hydrazone zu erfassen, wird die Lösung mit Kohlenstofftetrachlorid (CCl₄) extrahiert. Aufgrund der thermisch-labilen Eigenschaften der Hydrazone muss die Analyse mit einem Hochleistungsflüssigchromatographen (HPLC) durchgeführt werden.

Zur Beurteilung hinsichtlich der quantitativen Erfassung der diskontinuierlichen Probenahme ist eine zeitgleiche Messung der Gesamt-Kohlenwasserstoffe hilfreich, da während des Laserschneidprozesses Schwankungen der Gesamtemissionen hervorgerufen werden.

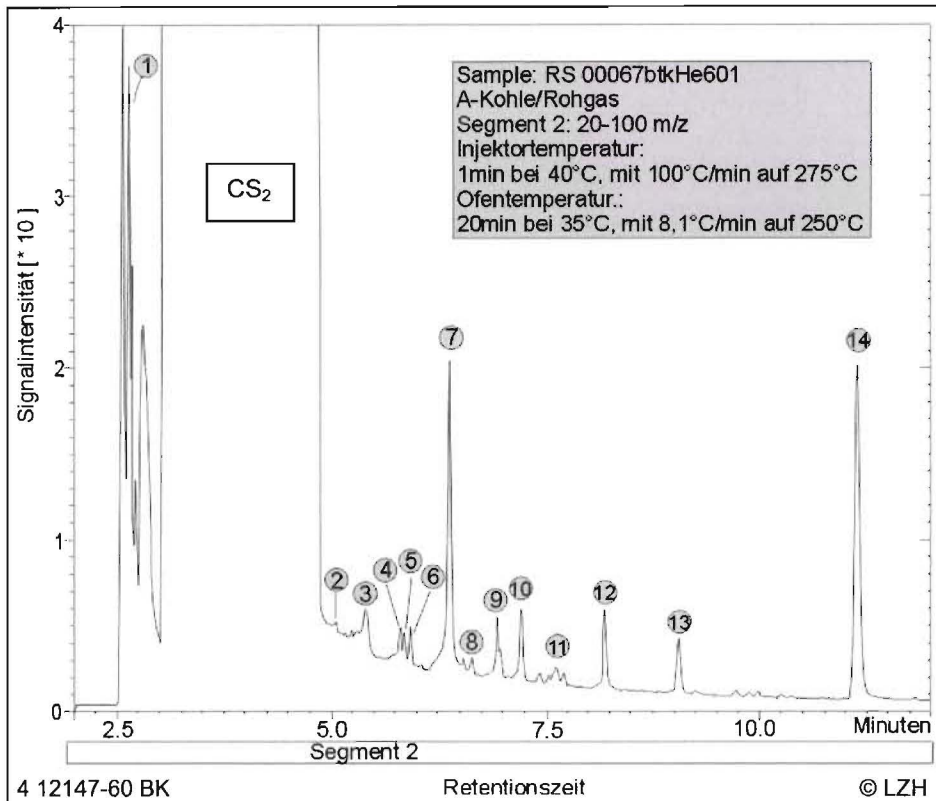


Abbildung 59: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Aktivkohle-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

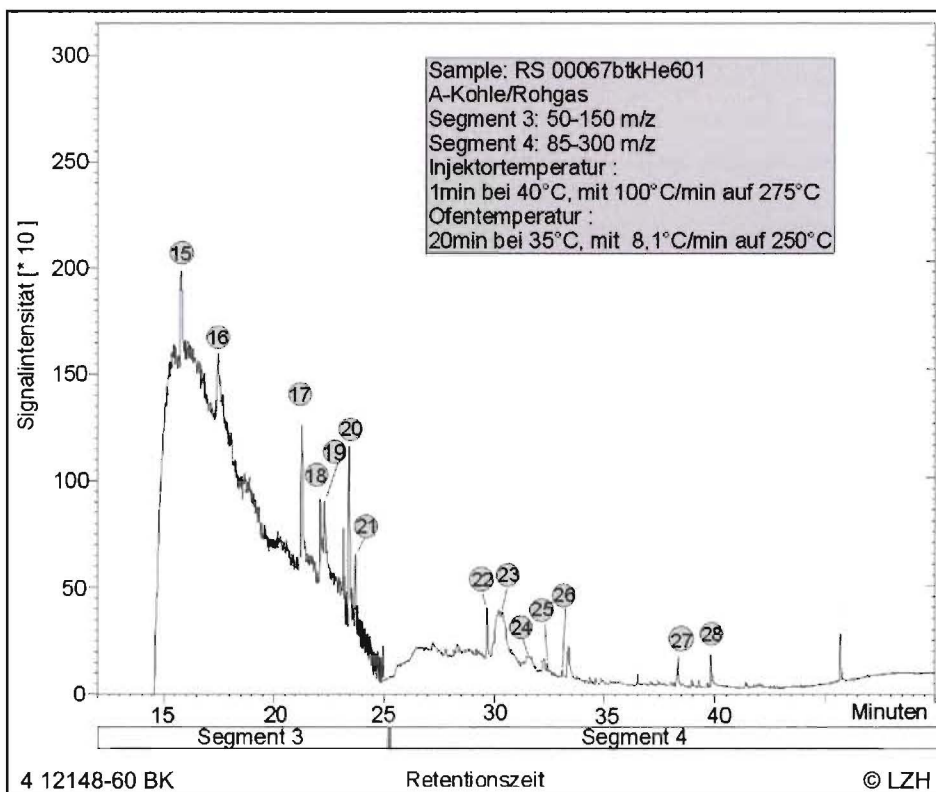


Abbildung 60: Chromatogramm der Aktivkohle-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

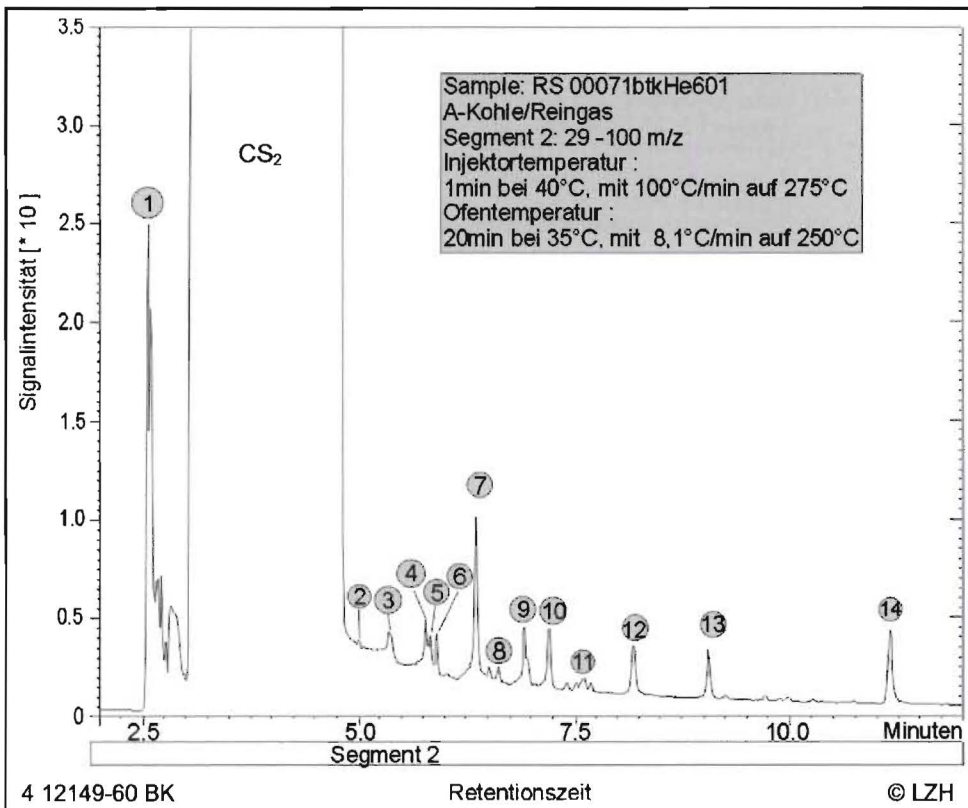


Abbildung 61: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Aktivkohle-Sorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

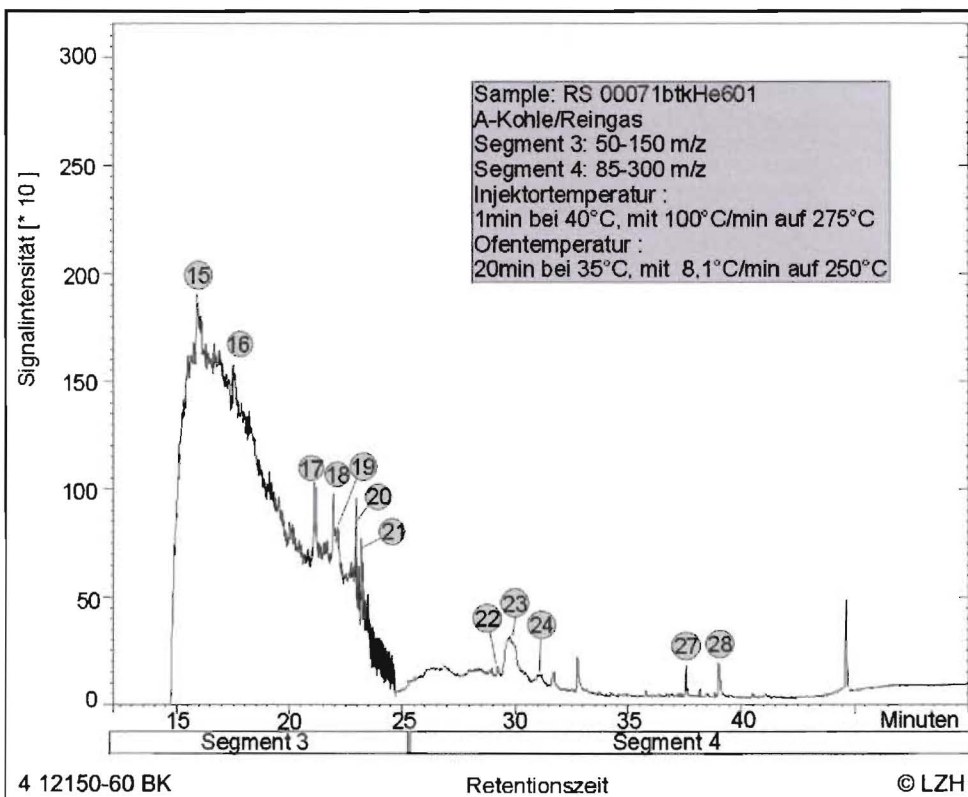


Abbildung 62: Chromatogramm der Aktivkohle-Adsorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

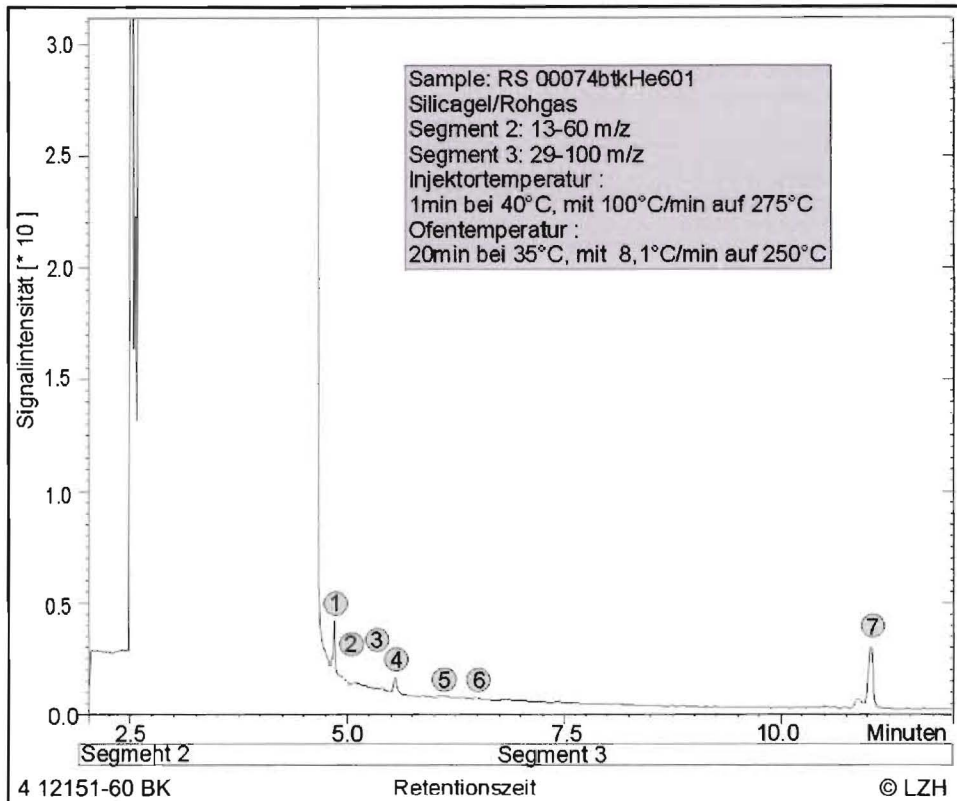


Abbildung 63: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

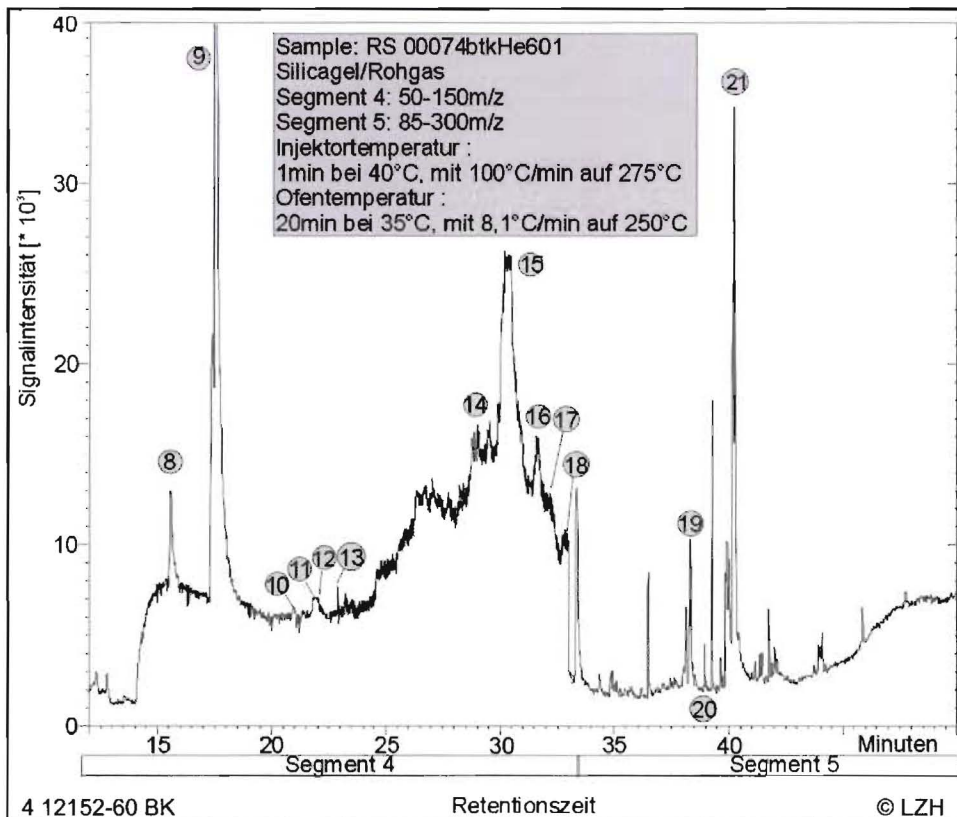


Abbildung 64: Chromatogramm der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

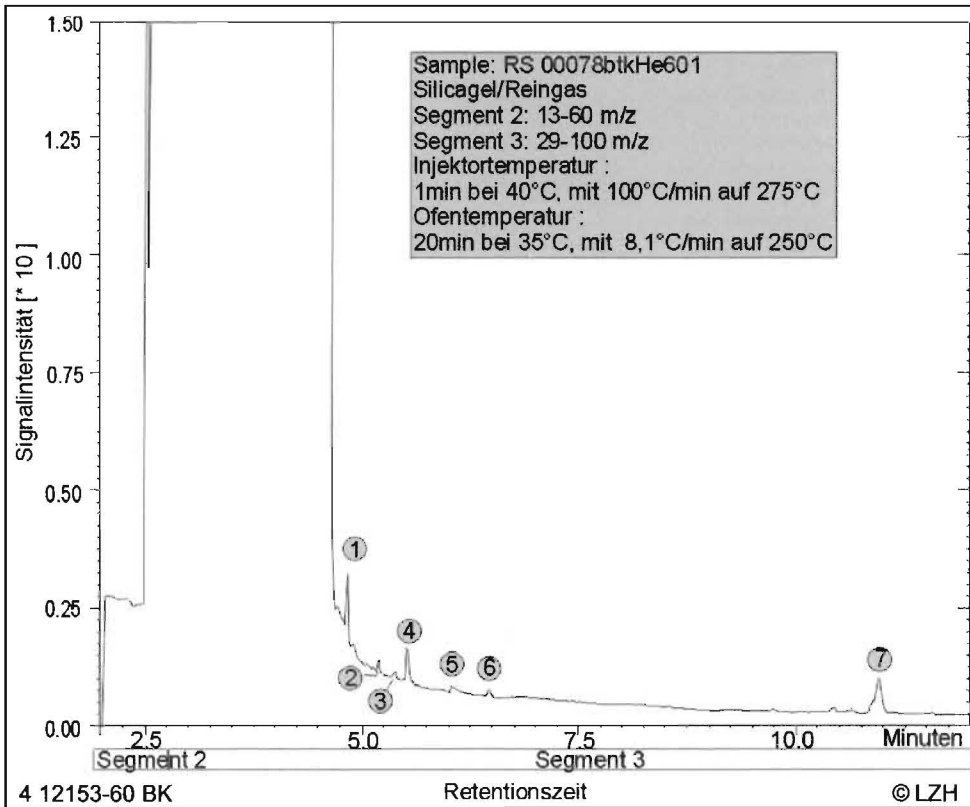


Abbildung 65: Chromatogramm niedriger Retentionszeiten der Silicagel-Sorption aus dem Rohgas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

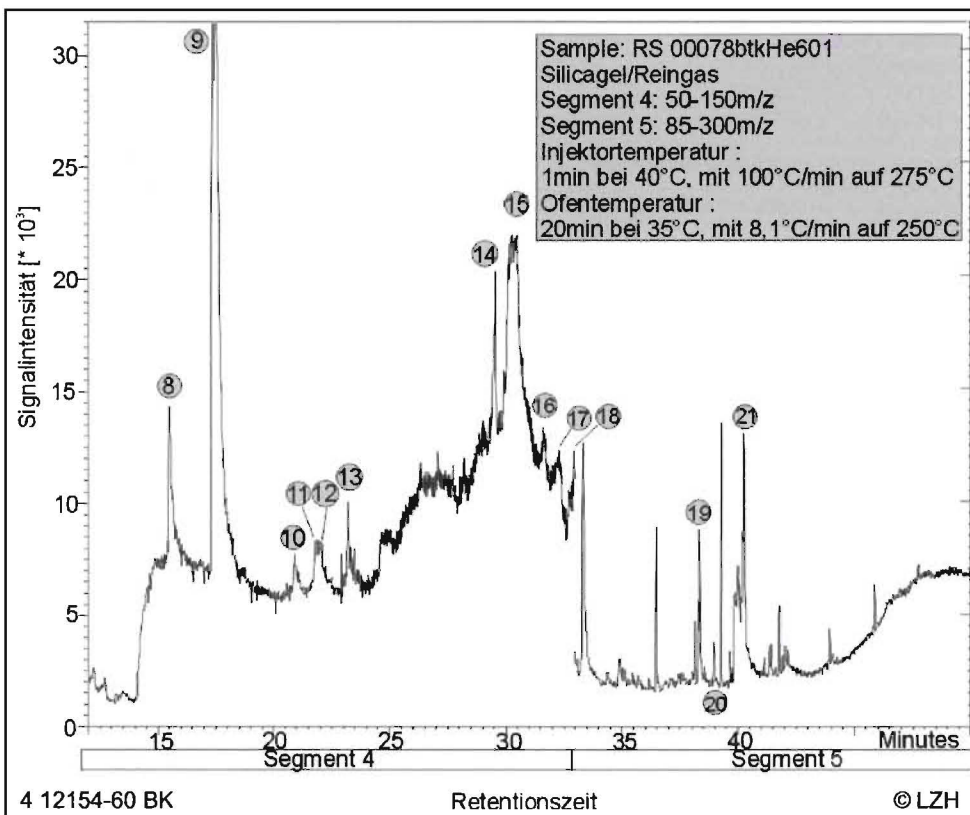


Abbildung 66: Chromatogramm der Silicagel-Sorption aus dem Reingas des BTK bei der Laserstrahlbearbeitung von Schichtholz

9.1.9 Identifizierung der hinterlegten Mikroorganismen

DSMZ

Deutsche Sammlung von
Mikroorganismen und
Zellkulturen GmbH



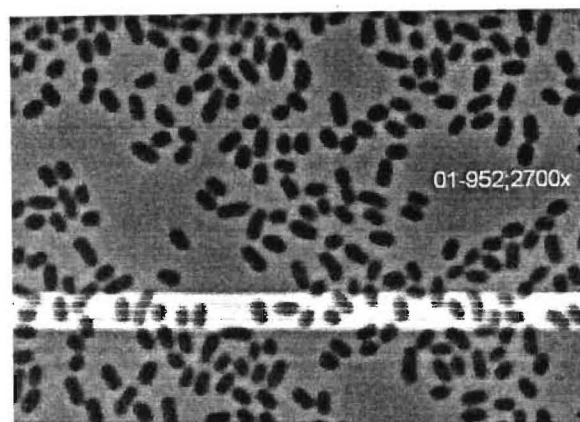
15. Januar 2002

Identifizierung des Stammes MKO1358/S3-LZH, LZH
(DSM ID 01-952)

Vertreter der α 4-Proteobacteria
(nahe verwandt zur Gattung *Ochrobactrum* und zu *Brucella melitensis*)

Eigenschaften des Stammes

Zellform	Stäbchen	Säure aus	
Breite μm	0,5-0,7	Glucose	+
Länge μm	1,0-2,5	Fructose	+
		Xylose	+
Gram-Reaktion	-	Rhamnose	+
Lyse durch 3% KOH	+	Arabinose	+
Aminopeptidase (Cerny)	+	Raffinose	-
		Ethanol	+
Oxidase	+	ERGBNIS: Stamm MKO1358/S3-LZH	
Catalase	+	= Vertreter der α 4-Proteobacteria	
ADH	-	Die partielle Sequenzierung zeigte eine	
Urease	+	Ähnlichkeit von 94,9% bis 97,3% zu	
Nitratreduktion	+	verschiedenen Stämmen der Gattung	
		<i>Ochrobactrum</i> und von 96,6% zu <i>Brucella</i>	
Hydrolyse von Gelatine	-	<i>melitensis</i> .	
von Esculin	-	Das Profil der zellulären Fettsäuren und die	
von Tween 80	-	Ergebnisse der physiologischen Tests weisen	
von DNA	-	auf die Gattung <i>Ochrobactrum</i> hin.	
von Stärke	-	Aber trotzdem ist nicht eindeutig zu entscheiden,	
Wachstum auf McConkey	+	ob der Stamm ein Vertreter von <i>Ochrobactrum</i>	
Indolreaktion	-	oder von <i>Brucella melitensis</i> ist.	
Substratverwertung		Über die hohe Verwandtschaft zwischen diesen	
Glucose	+	beiden Gruppen wurde mehrfach publiziert (z.B.	
Arabinose	+	IJSB48: 759-768, 1998).	
Maltose	+	Vergrößerung ~2700x	
Malat	+		
Mannose	+		
Phenylacetat	-		
Citrat	+		
Adipat	-		
N-Acetylglucosamin	+		
β -Hydroxybutyrat	+		
Methanol	-		
Trimethylamin	-		



DSMZ

Deutsche Sammlung von
Mikroorganismen und
Zellkulturen GmbH



Identifizierung des Isolates MKO1358/S4-LZH
(DSM ID 01-953)

15. Januar 2002

Microbacterium sp.

Eigenschaften des Stammes

Zellform	unregelmäßige Kurzstäbchen
Breite μm	0,5-0,7
Länge μm	1,0-2,5
Gram-Reaktion	+
Lyse durch 3% KOH	-
Aminopeptidase (Cerny)	-
Katalase	+
Pigmentation	creme-weiß
Beweglichkeit	+
Wachstum bei 37°C	-
Säurebildung aus (aerob)	
Glukose	+
Mannose	+
Saccharose	+
Rhamnose	-
Inosit	-
Sorbit	-
Arginindihydrolase	-
Urease	-
Voges Proskauer	+
Hydrolyse von Gelatine	+
Substratverwertung	
Arabinose	-
Citrat	-
Phenylacetat	-
Malat	+
N-Acetylglucosamin	+
Malat	+
Phenylacetat	-

Ergebnis: *Microbacterium* sp.

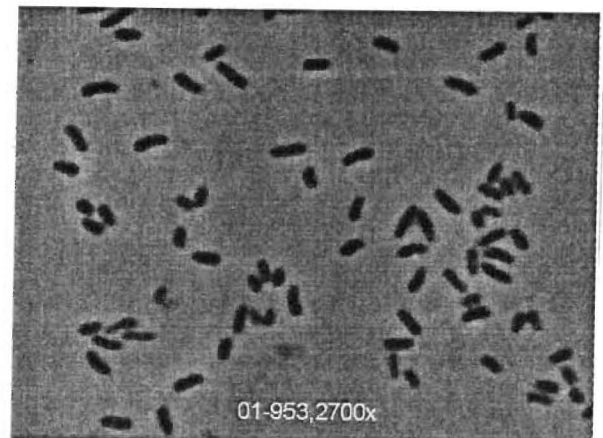
Die partielle Sequenzierung der 16SrDNA ergab eine Ähnlichkeit von 98,5% zu *Microbacterium phyllosphaera*. Die Ähnlichkeiten zu weiteren Vertretern dieser Gattung sind geringer.

Die Analyse der zellulären Fettsäuren ergab ein für diese Gattung typisches Muster.

Die physiologischen Daten entsprechen in mehreren Tests nicht den für diese Spezies beschriebenen Merkmalen.

Eine eindeutige Zuordnung zu der oben genannten Art oder zu einer anderen Art innerhalb der Gattung *Microbacterium* ist aufgrund der relativ niedrigen Ähnlichkeit der partiellen Sequenzen und der Unterschiede in den physiologischen Merkmalen nicht möglich.

Vergrößerung: ca. 2700 x



9.1.10 Angebot CO₂-Sensor

Im folgenden ist ein Angebot eines CO₂-Sensors zur möglichen Überwachung der Biotropfkörper-Filteranlage beim Einsatz zur Abluftreinigung in der lasergestützten Stanzformenherstellung beispielhaft dargestellt.

Gemäß der in Kapitel 6.1.4.3 dargestellten erforderlichen Messgeräteaflösung, der Querempfindlichkeit des Messverfahrens gegenüber Kohlenmonoxid sowie des messgerätetechnischen Aufwandes zur Abscheidung des typischen Feinstaubgehaltes der Abluft sind auch Geräte anderer Hersteller wie Ultramat 21P und 22P der Fa. Siemens für diese Aufgabenstellung geeignet [41].

29-JAN-2001 12:20

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.02

ABB

Laser Zentrum Hannover e.V.
 Hollerithallee 8
 30419 Hannover

Beleg-Nr.	Datum	Seite
AVH/20015622 /	29.01.2001	2/ 8

Bestelleingang.

Besondere Vermerke:

Projekt: Biologische Abluftreinigung

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
 Heerdter Landstraße 193
 40549 Düsseldorf

Postanschrift:
 Heerdter Landstraße 193
 40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
 Eschhorn

Registergericht: Frankfurt/Main
 Handelsregister: HRB 49651
 Company CIT-Code: DEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
 Bengt Pini
 Geschäftsführung:
 Uwe Alwardt (Vorsitz)
 Erik Huggare
 Burkhard Glauk

Bankverbindung:
 Commerzbank Frankfurt
 BLZ: 600 400 00
 Kto.: 589 6352 00
 Swift-Code: COBADE33
 Ust.Id.Nr.: DE116300097

29-JAN-2001 12:20

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.03



Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
AVH/20015622 / 29.01.2001 3/ 8

Pos.	Material	Menge	Bezeichnung	Preis	Preiseinheit	Wert in EUR
------	----------	-------	-------------	-------	--------------	-------------

000100 V24031A

1 ST

Advance Optima System
(siehe Datenblatt 10/24-1.10 DE)

Mit folgender Konfiguration:

1 1 Systemgehäuse
1 mit 1 Analysatormodul
1 Elektronikmodul mit System Controller
1 mit 1 Pneumatikmodul
19-Zoll Gehäuse: 1
zum Advance Optima System gehören:
s. Pos. 0110
s. Pos. 0120
s. Pos. 0130
s. Pos. 0140

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
Heardter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Postanschrift:
Heardter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
Eschborn

Registergericht: Frankfurt/Main
Handelsregister: HRB 49661
Company CIT-Code: DEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Bangl Pihl
Geschäftsführung:
Uwe Alwardt (Vorsitz)
Erik Huggers
Burkhard Block

Bankverbindung:
Commerzbank Frankfurt
BLZ: 500 400 00
Kto.: 589 4362 00
Swift-Code: COBADE33
Ust.Id.Nr.: DE115300097

29-JAN-2001 12:20

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.04

ABB

Laser Zentrum Hannover e.V.
 Hollerithallee 8
 30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
 AVH/20015622 / 29.01.2001 4/ 8

Pos.	Material	Menge	Bezeichnung	Preis	Preiseinheit	Wert in EUR
------	----------	-------	-------------	-------	--------------	-------------

000110 V24511A

1 ST

Uras 14

Infrarot-Analysatormodul

(siehe Datenblatt 10/24-1.10 DE, Seite 14)

Mit folgender Konfiguration:

1 1 Messkomponente
 1 1 Kalibriereinheit
 1 Standardmessküvette
 2 verschl. Viton, f. int. Pneum.m.1x3/2 MV
 2 mit Thermostat
 1 für 19-Zoll-Gehäuse
 2 2. Montageplatz im System
 1. Messkomponente: CO2
 Messbereich 1:0..600ppm
 Messbereich 2:0..2000ppm
 Bezugsmessbereich 1. Komponente:
 BZ-MB Komp. 1: 0..3000ppm
 Begleitgase:
 CO 400ppm, Luft 100Vol%
 eingebaut in: Auftrag/Pos.: 20015622-0100

Statistische Warennummer: 90273000

Ursprungsland: Deutschland

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
 Heerdt/Landstraße 193
 40549 Düsseldorf

Postanschrift:
 Heerdt/Landstraße 193
 40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
 Eschborn

Registriergericht: Frankfurt/Main
 Handelsregister: HRB 49451
 Company CIT-Code: DEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
 Bengt Pihl
 Geschäftsführung:
 Uwe Alwardt (Vorsitz)
 Erik Huggare
 Burkhard Block

Bankverbindung:
 Commerzbank Frankfurt
 BLZ: 500 400 00
 Kto.: 589 8332 00
 Swift-Code: COBADE33
 Ust.Id.Nr.: DE116300097

29-JAN-2001 12:21

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.05



Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
AVH/20015622 / 29.01.2001 5/ 8

Pos.	Material	Menge	Bezeichnung	Preis	Preiseinheit	Wert in EUR
------	----------	-------	-------------	-------	--------------	-------------

000120 V24311A

1 ST

Systemgehäuse

(siehe Datenblatt 10/24-1.10 DE, Seite 12)

Mit folgender Konfiguration:

1	19 Zoll-Gehäuse ohne Gehäusespülung (IP 20 bei Elektronikmodul oder internem Netzteil)
3	mit Anzeige- und Bedieneinheit vorbereitet für Analysatormodul
1	Ausführung: EN
0	Energieversorgung ohne Energieversorgung, bzw. über Elektronik-Netzteil
1	Gehäuse Nr. 1 Bestandteil von: Auftrag/Pos.: 20015622-0100

Statistische Warennummer: 90279080

Ursprungsland: Deutschland

000130 V24411A

1 ST

Elektronikmodul

(siehe Datenblatt 10/24-1.10 DE, Seite 7)

Mit folgender Konfiguration:

1	Elektronikmodul mit System Controller
1	mit Netzteil 230 V, 48 ... 62 Hz
1	Ethernetschnittstelle 10 BASE-T mit RJ 45, 8 polig
0	Keine digitale Schnittstelle bei Ex
1	für 19-Zoll-Gehäuse
1	1. Montageplatz im System eingebaut in: Auftrag/Pos.: 20015622-0100

Statistische Warennummer: 90279080

Ursprungsland: Deutschland

000140 V24171A

1 ST

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Postanschrift:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
Essborn

Registriergericht: Frankfurt/Main
Handelsregister: HRB 49861
Company CIT-Code: OEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Bengt Pini
Geschäftsführung:
Uwe Alwardt (Vorsitz)
Erik Huggare
Burkhard Block

Bankverbindung:
Commerzbank Frankfurt
BLZ: 500 400 00
Kto.: 589 636 00
Swift-Code: COBADE33
Ust.Id.Nr.: DE118300097

29-JAN-2001 12:21

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.06

ABB

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
AVH/20015622 / 29.01.2001 6/ 8

Pos.	Material	Menge	Bezeichnung	Preis	Preiseinheit	Wert in EUR
------	----------	-------	-------------	-------	--------------	-------------

Pneumatikmodul
(siehe Datenblatt 10/24-1.10 DE, Seiten 28/29)
Mit folgender Konfiguration:
0 ohne O2-Sensor
1 mit Feinfilterung im 1. Messgasweg
1 Prüfgasaufschaltung 1 x 3/2-Wege-Magnetventil
1 mit Pumpe
1 Durchfluss Gasweg 1 Messbereich 0 ... 100 l/h
1 für 19-Zoll-Gehäuse
1 1. Gehäuse im System
eingebaut in: Auftrag/Pos.: 20015622-0100

Statistische Warennummer: 90279080
Ursprungsland: Deutschland

000160 8018419

1 ST

Säurefilter
Gehäusewerkstoffe
- Oberteil PVDF
- Unterteil Glas
Filterelement
- Microfaser Borsilicatglas
Gasanschlüsse
- Einschraubverschraubung G 1/4 DIN ISO 228
(siehe Datenblatt 10/23-5.40 DE, Seite 5)

Statistische Warennummer: 84212990
Ursprungsland: Deutschland

000200 T23070CC

1 ST

Messgaskühler Advance SCC-C
B-Nr. 23070-0-101211100000
Mit folgender Konfiguration:
1 Aufbaugehäuse, 1/2 19-Zoll, 6 HE
1 Glas

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Postanschrift:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
Eschborn

Registergericht: Frankfurt/Main
Handelsregister: HRB 49651
Company CIF-Code: OEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Birgit Pfir
Geschäftsführung:
Uwe Alwardt (Vorsitz)
Erik Huggars
Burkhard Block

Bankverbindung:
Commerzbank Frankfurt
BLZ: 800 400 00
Kto.: 689 8352 00
Swift-Code: COBADE33
Ust.Id.Nr.: DE115300097

29-JAN-2001 12:21

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.07

ABB

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
AVH/20015622 / 29.01.2001 7/ 8

Pos.	Material	Menge	Bezeichnung	Preis	Preiseinheit	Wert in EUR
	2		1 Gasweg 125 l/h			
	1		1 Schlauchpumpe			
	1		Digitalanzeige und Grenzwert			
	1		Energieversorgung 230 V, 50/60 Hz			
Statistische Warennummer: 90279080						
Ursprungsland: Deutschland						

Netto Angebotswert 8.000,00
Angebotswert 8.000,00

Die Mehrwertsteuer ist in den genannten Preisen nicht enthalten.
Sie wird zusätzlich in Rechnung gestellt.

Allgemeine Haftung:

Der Auftragnehmer und seine Erfüllungsgehilfen haften dem Auftraggeber dem Grunde nach für schuldhaft zugefügte Sach- und Personenschäden. Der Höhe nach ist die Haftung des Auftragnehmers begrenzt auf DM 1.000.000,00 p. a.

Nach Ablauf der Gewährleistungsfrist wird der Auftraggeber keine Forderungen mehr stellen.

Für eine etwaige Freistellung bei Ansprüchen Dritter gilt diese Regelung entsprechend.

Gewährleistung:

Für Mängel, zu denen das Fehlen zugesicherter Eigenschaften zählt, haftet der Auftragnehmer abschließend derart, daß die mangelhafte Lieferung / Leistung kostenlos repariert oder neu erbracht wird. Die Gewährleistung beträgt 12 Monate ab Inbetriebnahme, max. 18 Monate nach Versandbereitschaftsmeldung.

Indirekte und Folgeschäden:

Ungeachtet anderslautender Vorschriften in diesem Vertrag haftet der Auftragnehmer nicht für indirekte und Folgeschäden oder Verluste, wie z. B. Ausfall von Einnahmen, Nutzungsausfall, Produktionsausfall, Kapitalkosten oder Kosten, die mit einer Betriebsunterbrechung verbunden sind.

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Postanschrift:
Heerdter Landstraße 193
40549 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
Eschborn

Registerrichter: Frankfurt/Main
Handelsregister: HRB 49651
Company CIT-Code: DEAPR-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Bengt Pflü
Geschäftsführung:
Uwe Alwardt (Vorsitz)
Erik Huggare
Burkhard Block

Bankverbindung:
Commerzbank Frankfurt
BLZ: 500 400 00
Kto.: 589 6362 00
Swift-Code: COBADE33
Ust. Id. Nr.: DE116300097

29-JAN-2001 12:22

ABB AUTOMATION PRODUCTS

+49 211 5007 7277 S.08

ABB

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Beleg-Nr. Datum Seite
AVH/20015622 / 29.01.2001 8/ 8

Verzugsentschädigung:

Die Verzugsentschädigung beträgt je vollendete Woche 0,5% des verspäteten Teils bis max. 5% des Gesamtbestellpreises. Damit ist der Verzug abschließend geregelt. Es steht dem Auftraggeber jedoch frei, nach Ablauf einer angemessenen Nachfrist, vom Vertrag zurückzutreten.

Exportkontrolle:

Die ABB-Lieferungen und Leistungen unterliegen deutschen und evtl. ausländischen Ausfuhrbestimmungen. Aus diesem Grunde erhält ABB mit Inkrafttreten des Vertrages eine Kopie der schriftlichen Erklärung des Endverbrauchers über den Endverbleib und die nicht-militärische bzw. nicht-nukleare Endverwendung.

Im übrigen gelten die "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen für Erzeugnisse und Lieferungen der Elektroindustrie" in der jeweils gültigen Fassung.

Mit freundlichen Grüßen

ABB Automation Products GmbH

Dieser Beleg wurde maschinell erstellt und ist auch ohne Unterschrift gültig.

ABB Automation Products GmbH

Adresse:
Hoerder Landstraße 193
40649 Düsseldorf

Postanschrift:
Hoerder Landstraße 193
40649 Düsseldorf

Sitz der Gesellschaft:
Eschborn

Registergericht: Frankfurt/Main
Handelsregister: HRB 49851
Company CIT-Code: DEAPA-E

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Bengt Pihl
Geschäftsführung:
Uwe Alwardt (Vorsitz)
Erik Huggare
Burkhard Block

Bankverbindung:
Commerzbank Frankfurt
BLZ: 500 400 00
Kto.: 509 6352 00
Swift-Code: COBADE33
Ustr.Id.Nr.: DE116300097

9.2 Eingesetzte Medien für die Mikrobiologie

Mit Ausnahme der Mikroorganismen *Pseudomonas putida* und *Pseudonocardia hydrocarbonoxidans* werden alle Stämme auf dem Medium 1 (Mineralmedium nach Brunner, DSMZ-Nr. 457+125) angereichert. Zur Herstellung des Mineralmediums müssen die in Tabelle 22, Tabelle 23 und der folgenden Abbildung dargestellten Substanzen mit den entsprechenden Massen zugesetzt werden. Eine konzentrierte Lösung mit den aufgeführten Substanzen werden in 3 Litern destilliertem Wasser aufgelöst und anschließend mit 50 Litern dest. Wasser verdünnt. Der geforderte pH-Wert von 6,9 des Mineralmediums wird durch Zugabe von NaOH eingestellt.

Für die Kultivierung der Mikroorganismen *Pseudonocardia hydrocarbonoxidans* wird das Nährmedium 2 (Mineralmedium nach Brunner, DSMZ-Nr. 65) verwendet. Zur Herstellung von ebenfalls 50 Liter werden die in den folgenden Tabellen aufgeführten Substanzen und die entsprechende Masse angesetzt. Der pH-Wert von 7,2 des Nährmediums 65 wird mit Zugabe konzentrierter KOH-Lösung eingestellt. Anschließend wird durch Zugabe von 12 g/l Agar ein festes Nährmedium zur Ausplattierung der Mikroorganismen bereitgestellt. Die Autoklavierung der Medien erfolgt bei einer Temperatur von 131°C in einem Zeitraum von 10 min. Zur Konservierung fertiger Nährmedienpräparate werden die Petrischalen mit Parafilm verschlossen.

Tabelle 22: Komponenten für die Herstellung des Mediums 65

Substanz	Masse in [g/l]	Masse in [g/50l]
Glucose	5	200
Hefeextrakt	5	200
Malz	10	500
CaCO ₃	2	100

Tabelle 23: Komponenten zur Herstellung des Mediums 133 für *Pseudomonas putida*

Substanz	Masse in [g/l]	Masse in [g/50l]
Fleischextrakt	3	150
Pepton	5	250
dest. Wasser	1000 ml	

Abbildung 67: Verfahren zur Herstellung des Mediums 1 (Mineralmedium nach Brunner, DSMZ-Nr. 457+125)

Salzlösung SL-6 für (1 Liter)	
Substanz	Masse in [g]
ZnSO ₄ *7H ₂ O	0,1
MnCl ₂ *4H ₂ O	0,03
H ₃ BO ₃	0,3
CoCl ₂ *6H ₂ O	0,2
CuCl ₂ *2H ₂ O	0,01
NiCl ₂ *6H ₂ O	0,02
Na ₂ MoO ₄ *2H ₂ O	0,03
Destilliertes H ₂ O	1000ml

1/10 der Salzlösung SL6 wird für die Herstellung von 1 Liter der Salzlösung SL4 benötigt

Salzlösung SL-4 für (1 Liter)	
Substanz	Masse in [g]
EDTA	0,5
FeSO ₄ *7H ₂ O	0,2
SL-6	100ml
Destilliertes H ₂ O	900ml

Substanzen Masse in [g/l]			
Na ₂ PO ₄	2,44	CuSO ₄ *5H ₂ O	5*10 ⁻⁶
KH ₂ PO ₄	1,52	H ₃ BO ₃	10*10 ⁻⁶
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,5	MnSO ₄ *5H ₂ O	10*10 ⁻⁶
MgSO ₄ *7H ₂ O	0,2	ZnSO ₄ *7H ₂ O	70*10 ⁻⁶
CaCl ₃ *2H ₂ O	0,05	MoO ₃	10*10 ⁻⁶
KNO ₃	1	SL-4	500ml
FeSO ₄ *7H ₂ O	1*10 ⁻³		

1/2 der Salzlösung SL4 wird für die Herstellung von 1 Liter des Mediums 457+125 benötigt

9.3 Darstellung einer Messkampagne

Im folgenden sollen Ergebnisse einer Tagesmessung einer durchgeführten Messkampagne zur Erfassung der gas- und partikelförmigen Emissionen aus der Laserbearbeitung exemplarisch dargestellt werden.

In der Abbildung 2 ist die Ablufferfassungsrohrleitung dargestellt, die zur Abführung der prozessbedingten Laseremissionen von der Bearbeitungsstelle bzw. Zuleitung zum Schwerkraftabscheider bzw. dem Biotropfkörper dient.

Um detaillierte Aussagen über die sequentielle Minderung der VOC-Massenkonzentration in den Filterschichten beider Segmente im Biotropfkörper treffen zu können, wird die folgende Messdurchführung vorgenommen. Dazu werden zwei FIDs der Firma *Bernath Atomic* eingesetzt. Der FID 3005 erfasst an der Messstelle (M0 in Abbildung 22) kontinuierlich die VOC-Massenkonzentration im Rohgas der laserinduzierten Emissionen während der Stanzformenherstellung und der FID 3006 erfasst die VOC-Massenkonzentration an den Messstellen 4, 7, 9 und 11. Zur Charakterisierung der Einzelsubstanzen im Roh- bzw. Reingasstrom werden Aktivkohle- und Silicagelsorptionsröhrchen eingesetzt. Für die Beaufschlagung der Sorptionsröhrchen werden mit Unterdruckpumpenkoffern zuvor definierte konstante Ansaugvolumenströme im Bereich von 0,7 bis 1,2 l/min eingestellt. Nach der diskontinuierlichen Erfassung und anschließenden Analyse mit GC/MS und GC/FID können qualitative bzw. quantitative Aussagen über die Verbindungen von Einzelsubstanzen des Abgases getroffen werden. An jeder der Messstellen werden die VOC-Emissionen für einen Zeitraum von 30 min gemessen und die Messdaten einem Auswertungsrechner zugeführt. Der aufgrund des Stützventilators hervorgerufene Volumenstrom durch den BTK wird zeitgleich anhand einer Messsonde und einem Datenlogger aufgezeichnet.

An der Messstelle 11 werden die Abluftrandbedingungen erfasst. Der erzeugte Ansaugvolumenstrom wird mit einem Flügelradanemometer registriert. Die Auswertung ist in der Abbildung 68 dargestellt.

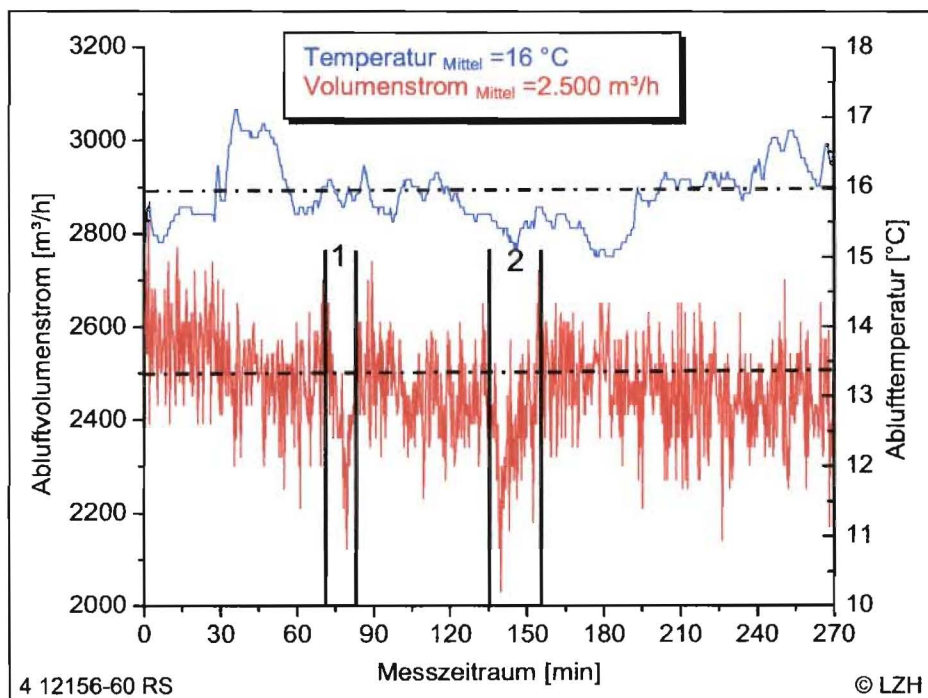


Abbildung 68: Abluftrandbedingungen während der Probennahme

In den Produktionshauptzeiten wird ein durchschnittlicher Gesamtabzugsvolumenstrom von 2.500 m³/h (Schwankungsbreite \pm ca. 100 m³/h) bei einer mittleren Ablufttemperatur von 16 °C während der Messkampagne ermittelt. Der Einbau bzw. die Funktion der motorgesteuerten Drosselklappe an der 1 kW CO₂- Laseranlage bewirkt eine Abnahme des Volumenstromes um ca. $\Delta V = 400$ m³/h (Abbildung 68; Beobachtungszeitraum 1 bzw. 2). Die Zeitverzögerung für den Schließ- bzw. Öffnungsvorgang der Drosselklappe bewirkt eine stetige Abnahme bzw. Zunahme des Volumenstromes. Das Schließen der Drosselklappe bewirkt dementsprechend eine Erhöhung der VOC-Massenkonzentration im Abgasstrom. Deutlich wird besonders aus der Darstellung der Messung an der Messstelle 4 (Abbildung 69), dass hohe VOC-Konzentrationen einen Anstieg des VOC-Minderungsgrades mit sich führt. In der Abbildung 69 sind die sequentiellen VOC-Vergleichsmessungen mit jeweils einer Messdauer von 30 min an der Messstelle 0 gegenüber den Messstellen 4, 7 und 9 dargestellt. Es wird der Anstieg des VOC-Minderungsgrades mit zunehmender Filterschichthöhe erkennbar.

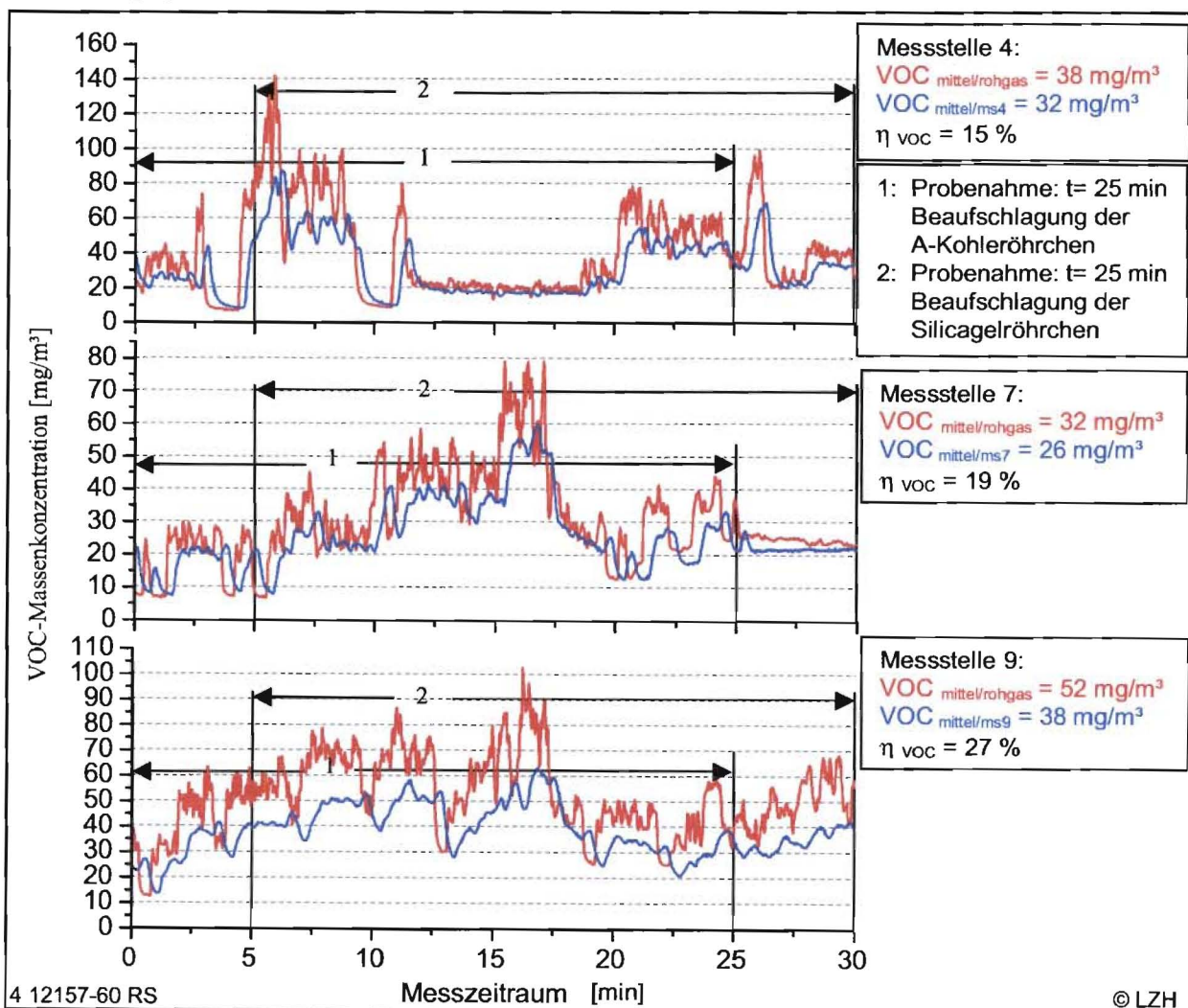


Abbildung 69: Darstellung der sequentiellen VOC-Messung in verschiedenen Filterschichten

In der Tabelle 24 sind die erfassten und ermittelten Randbedingungen während der Probenahme der Aktivkohle- bzw. Silicagelsorptionsröhrchen aufgelistet. Die Randbedingungen dienen der Ermittlung der Quantität analysierter Einzelsubstanzen.

Zudem werden Abgasproben an verschiedenen Stellen der Querschnittsfläche an den jeweiligen Filterschichten entnommen.

Tabelle 24: Auswertung der erfassten Schadstoffmenge im Rohgas, an den Messstellen

Bezeichnung	Messreihe	Probenahmedauer [min]	Erfasstes Volumen [l]	VOC _{mittel} im Erfassungszeitraum [mg/m ³]	theor. max.erfasste VOC-Masse [µg]
MS 4/1	A-Kohle	25	17,3	31	530
MS 4/2	Silicagel	25	16,5	32	528
MS 7/1	A-Kohle	25	17,1	24	410
MS 7/2	Silicagel	25	17,1	27	462
MS 9/1	A-Kohle	25	18,4	40	736
MS 9/2	Silicagel	25	16,4	36	590

Darüber hinaus wird eine VOC-Messung an der Messstelle 0 gegenüber Messstelle 11 durchgeführt und diskontinuierlich Probenahmen zur quantitative und qualitative Bestimmung der partikelförmigen Emissionen durchgeführt. Hierfür werden über eine Probenahmedauer von $t = 25$ min mit Hilfe von Unterdruckpumpen Impaktorfolien bzw. Planfilter mit einem definierten Teilvolumenstrom des Abgases beaufschlagt. In der Abbildung 70 ist die detektierte VOC-Massenkonzentration über die Beobachtungszeit dargestellt und entsprechend die Zeitregime der Partikelprobennahme aufgetragen. Somit können Rückschlüsse auf die VOC-Hintergrundkonzentration zur erfassten Partikelmassenkonzentration gewonnen werden.

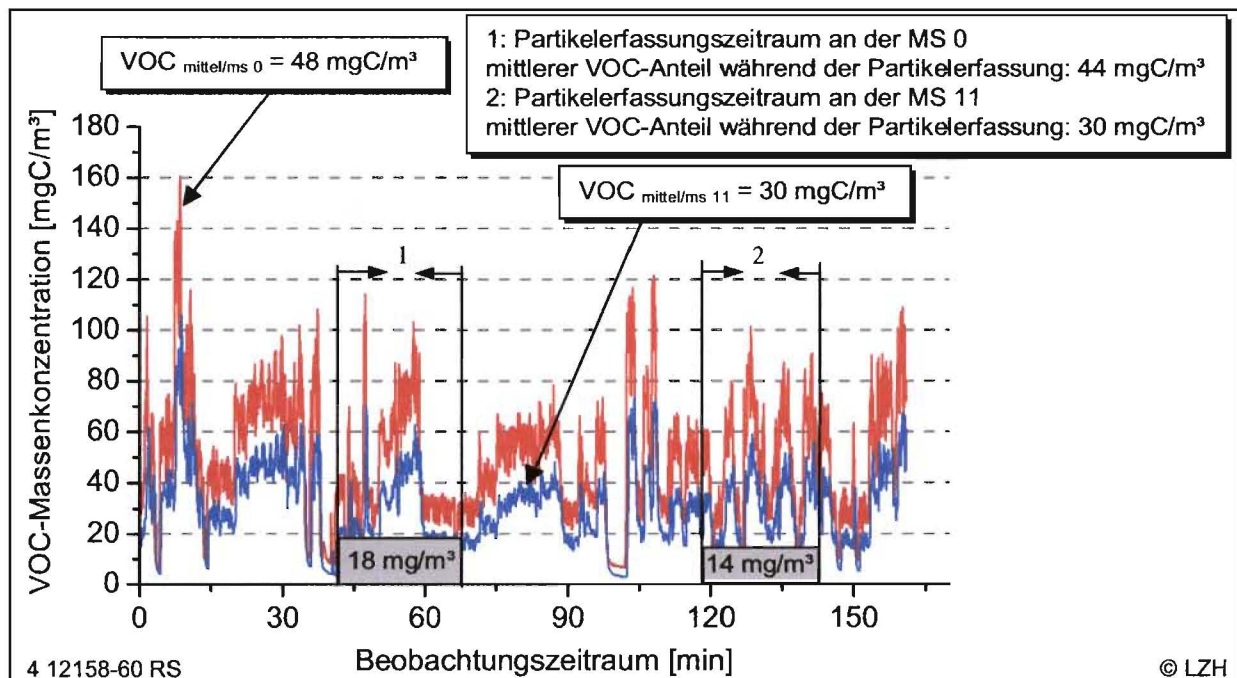


Abbildung 70: Darstellung der erfassten Partikelmassenkonzentration zur quantitativen Bestimmung

Der mittlere VOC-Massenstrom im Rohgas an der MS 0 beträgt 120 g/h, bei einer mittleren VOC-Massenkonzentration von 48 mg/m³. Der mittlere VOC-Massenstrom im Reingas an der MS 11 beträgt 75 g/h, bei einer mittleren VOC-Massenkonzentration von 30 mgC/m³. Es werden 38 % der VOC-Schadstofffracht pro Stunde abgebaut.

Die Partikelmassenkonzentration im Rohgas kann anhand der quantitativen Partikelerfassung mit dem Planfilterkopfgerät zu 18 mgC/m³ bestimmt werden. Der prozentuale Partikelanteil zum VOC-Anteil im Rohgas beträgt (während der Partikelerfassung: mittlere VOC-Massenkonzentration 44 mgC/m³) im Rohgasabluftstrom 41 %. Die Partikelmassenkonzentration im Reingas kann anhand der quantitativen Partikelerfassung mit dem Planfilterkopfgerät zu 14 mg/m³ bestimmt werden. Es werden 22 % der partikelförmigen laserinduzierten Emissionen vom BTK zurückgehalten. Der prozentuale Partikelanteil im Reingas zum VOC-Anteil beträgt (während der Partikelerfassung: mittlere VOC-Massenkonzentration 30 mg/m³) im Reingas 47 %. Die gasförmigen Emissionen werden im Vergleich zur Abscheidung der partikelförmigen Emissionen um 16 % effizienter abgeschieden.

Mit der Impaktor-Probennahme wird die Häufigkeitsverteilung verschiedener Partikelfraktionen bestimmt. Die mit Hilfe von Niederdruckimpaktoren ermittelten mittleren aerodynamischen Partikeldurchmesser, geometrischen Standardabweichung, alveolengängigen Fraktionen und die ermittelten Partikelmassenkonzentrationen sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Auswertung der Partikelimpaktion

Probe	Median-durchmesser in [µm]	geometrische Standardabweichung in [µm]	Alveolengängige Fraktion nach ACGIH* in [%]	Konzentration [mg/m ³]
Schichtholz (Rohgas)	0,25	2,04	81,66	23,87
Schichtholz (Reingas)	0,24	2,00	81,35	12,37

*American Conference of Governmental Industrial Hygienists (respirable portion) [47]

Bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 9,8 m/s und einem Rohrinnendurchmesser von 300 mm muss bei einer Teilvolumenstromentnahme von 26,5 l/min für die Impaktorbeladung ein erforderlicher Sondendurchmesser $d_s = 7\text{mm}$ eingesetzt werden. Mit der folgenden Formel wird der erforderliche Sondendurchmesser berechnet:

$$d_s = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot V_T}{\pi \cdot v_{\max} \cdot 3600}}$$

d_s :	erforderlicher Sondendurchmesser	[mm]
V_T :	durch die Entnahmesonde gesaugter Teilvolumenstrom	[m ³ /h]
v_{\max} :	Gasgeschwindigkeit im Messquerschnitt	[m/s]

Aus durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung bei der Lasermaterialbearbeitung von Schichtholz wurde ein Mediandurchmesser von 0,34 µm ermittelt. In der Tabelle 26 sind die ermittelten Partikelmassenkonzentrationen gegenübergestellt.

Tabelle 26: Qualitative und quantitative Bestimmung der Partikelmassenkonzentration

Massenkonzentration [mg/m ³]	Impaktor Massenkonzentration [mg/m ³]	Planfilter Massenkonzentration [mg/m ³]
Reingas	12	14
Rohgas	24	17

In der

Abbildung 71 sind die mit einem Gaswarngerät Polytektor G750 detektierten CO-Massenkonzentrationen im Roh- und Reingas dargestellt.

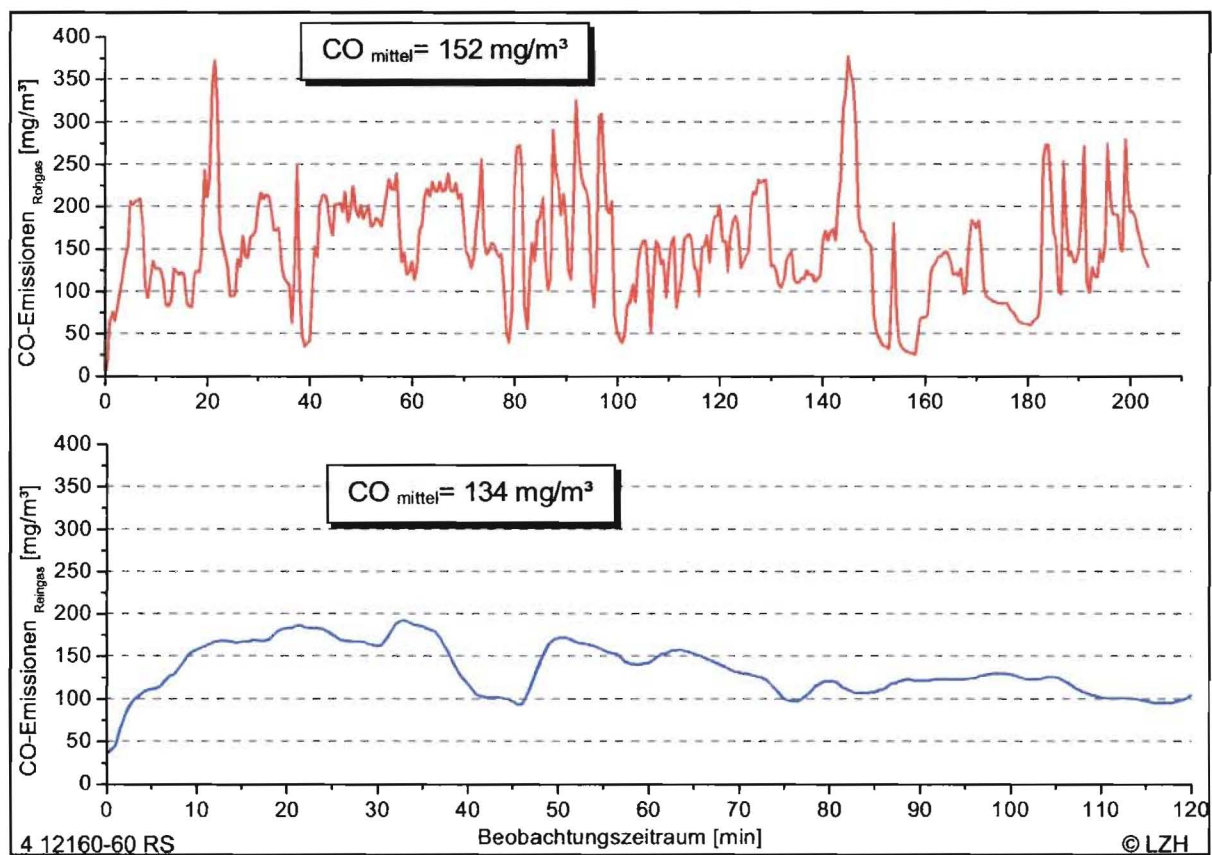


Abbildung 71: Darstellung der detektierten CO-Massenkonzentrationen im Roh- und Reingas

9.4 Betriebsanweisung und Pflichtenheft für die Tropfkörperanlage

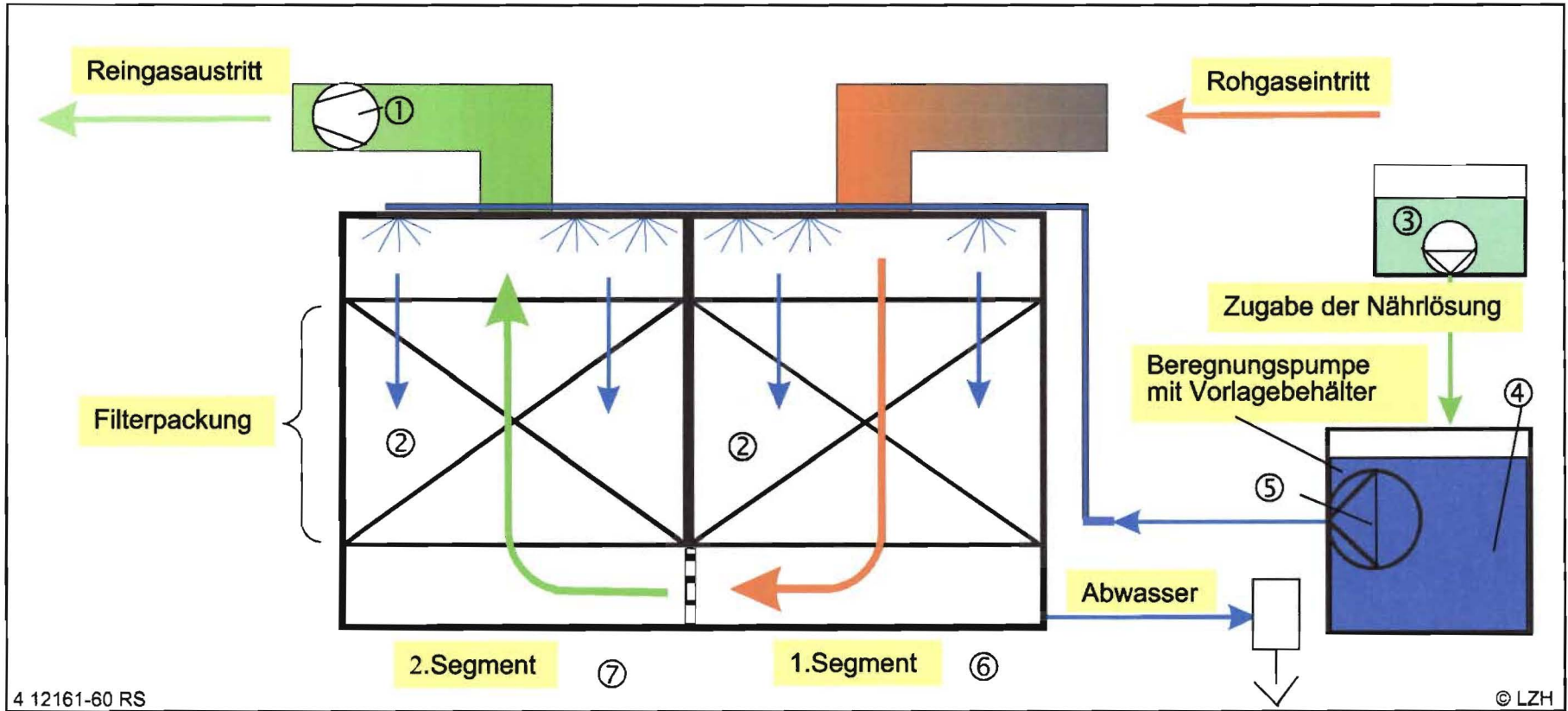


Abbildung 72: Darstellung der Anlagenkomponenten und Verfahrensbeschreibung

Kurzbeschreibung der Biotropfkörperanlage:

Die bei der Lasermaterialbearbeitung als Prozessnebenprodukt entstehenden laserinduzierten gas- und partikelförmigen Emissionen müssen zur Einhaltung der gesetzlich festgelegten Abluftgrenzwerte (MAK/TA-Luft) vom Arbeitsplatz entfernt werden und aus dem Rohgas abgeschieden werden. Dazu wird die Abluft durch den zweistufigen Biotropfkörper geleitet. Die Erzeugung des erforderlichen Volumenstromes wird mit dem externen Stützventilator^① realisiert, welcher dem BTK saugend nachgeschaltet ist.

Der Schwerkraftabscheider entfernt Grobpartikel aus der Abluft, die den Biotropfkörper in seiner Gesamtabbauleistung einschränken würden oder das Filtermaterial verstopfen könnten.

Während der Durchströmung der Abluft werden die Aerosole und die gasförmigen Emissionen von spezialisierten Mikroorganismen im Biotropfkörper zu Kohlendioxid, Wasser und neuer Biomasse verstoffwechselt. Die Mikroorganismen sind als Biofilm auf einem porösen inerten Trägermaterial (Polyurethanschaum^②) angesiedelt und müssen zusätzlich mit einer Nährlösung^③ versorgt werden. In der Zuleitung zum Vorlagebehälter^④ wird die konzentrierte Nährlösung dem Frischwasser in einem einstellbaren Verhältnis beigemischt und durch die Förderpumpe^⑤ über dem Trägermaterial versprüht. Die Beregnungsflüssigkeit wird im ersten Segment^⑥ des Biotropfkörpers im Gleichstrom zur Abluft geführt, hingegen im zweiten Segment^⑦ im Gegenstrom.

Um eine maximale Abbauleistung zu gewährleisten, müssen verfahrenstechnische Wartungsarbeiten bzw. Kontroll-

messungen in regelmäßigen Zeitabständen an der Gesamtanlage durchgeführt werden.

a) Tägliche Checkliste:

1. SPS-Steuerung auf Fehler überprüfen
2. Ventilator auf Funktion überprüfen
3. Wasserpumpe auf Funktion überprüfen
4. Füllstände des Vorlagebehälters und des Nährlösungsbehälters überprüfen
5. Sichtkontrolle auf Undichtigkeiten (Behälter, Rohrleitungen, Schläuche)
6. Gegebenenfalls manuelle Beregnung auslösen
7. Funktion der Dosierpumpe überprüfen
8. Sichtprüfung des Filtermaterials
9. Schwerkraftabscheider auf Funktion überprüfen

b) Wöchentliche Checkliste:

1. Sichtkontrolle der Beregnungsdüsen auf Verstopfung
2. pH- bzw. Ammoniumkonzentration-Schnelltest mit Teststäbchen im Vor- und Rücklauf, Leitfähigkeit
3. Differenzdruckmessung am Tropfkörper

Erläuterungen der täglichen Checkliste:

1. SPS-Steuerung

Die Bedienung der Anlage erfolgt über die SPS-Steuerung an der Schaltschrankfrontseite.

1.1 Hauptschalter einschalten

Den dreistufigen Bedienschalter für die Beregnungspumpe mit den Schalterstellungen EIN/AUS/AUTO auf Schalterstellung „EIN“ stellen. Die Beregnungspumpe wird eingeschaltet **Achtung!!**: Hierbei besteht Trockenlaufgefahr der Beregnungspumpe, wenn die Beregnungspumpe länger als 2,5 min in Betrieb ist. Aufgrund dessen sollte der Füllstand des Vorlagebehälters ständig überwacht werden. Zudem besteht Gefahr des Überlaufens des Abwasserbehälters.

An den PVC-Sichtfenstern ist eine Sichtkontrolle vorzunehmen, wobei auf eine gleichmäßige Wasserverteilung zu achten ist. Bei Störungen soll unbedingt ein kurzer Vermerk in der Protokollliste eingefügt und gegebenenfalls die Anlage abgeschaltet werden.

Mit der Schalterstellung „AUS“ wird die Beregnungspumpe abgeschaltet. Dabei bitte den Füllstand des Vorlagebehälters kontrollieren.

Mit der Schalterstellung „AUTO“ wird die Beregnungspumpe mit den eingebauten Zeitrelais geschaltet. Sobald die eingestellte Pausenzeit abgelaufen ist wird die Beregnungspumpe über die eingestellte Beregnungsdauer des zweiten Zeitrelais eingeschaltet. Die Pausenzeit ist als Stundenzyklus wählbar, während die Beregnungsdauer in Minuten Takt eingestellt wird.

2. Meldeleuchten Beregnungspumpe: Rot Störung, Weiß Betrieb; Meldeleuchten Magnetventil AUF/ZU. Bei geöffnetem Magnetventil wird der Vorlagebehälter mit Frischwasser gefüllt und durch die Meldeleuchte angezeigt.
3. Taster Leuchtetest

Erläuterungen der wöchentlichen Checkliste:

1. Die Beregnungsdüsen müssen auf erkennbare Verstopfungen geprüft werden. Zum anderen soll die Beregnungsflüssigkeit sich gleichmäßig über die gesamte Filterfläche verteilen. Zum Testen der Düsen während einer Beregnungspause wird der dreistufige Wahlschalter am Schaltschrank auf EIN gestellt. **Achtung**: Trockenlaufgefahr der Beregnungspumpe!!
2. Die Ammoniumkonzentration im Beregnungswasser wird als Leitkomponente für die Nährstoffversorgung der Mikroorganismen herangezogen. Die Leitfähigkeitsmessung

soll eine unzulässige Aufsatzung der Flüssigkeit überprüfen. Nach der Anfahrphase stellt sich ein pH-Wert von 6-8 ein. Abweichungen von diesem Wert können auf Störungen im System hindeuten (Schaumbildung). Vorgehensweise der Messung:

- Das Messgefäß mit dem Frischwasser bzw. Abwasser spülen und bis zur 5ml Markierung füllen.
- 10 Tropfen Natronlauge zugeben und vorsichtig umschwenken.
- Ein Ammonium-Teststäbchen aus der Packung entnehmen (Testfeld nicht mit den Fingern berühren) und für 5sek. in die Prüflösung eintauchen und mit der Farbskala vergleichen.
- Ablesewert in die Liste eintragen

Gebrauchte Teststäbchen in den vorgesehenen Behälter entsorgen und Packung vollständig an den Platz zurücklegen!!

Vorgehensweise der Phosphat-Messung:

- Das Messgefäß mit dem Frischwasser bzw. Abwasser spülen und bis zur 5ml Markierung füllen.
- 5 Tropfen Phosphat-1 zugeben und vorsichtig umschwenken.
- Reagenzglas in die Vertiefung der Tiefzieheinlage stellen und mit sechs Tropfen Phosphat-2 füllen.
- Ein Teststäbchen aus der Packung entnehmen (Testfeld nicht mit den Fingern berühren) und für 15sek. in die Prüflösung eintauchen und mit der Farbskala vergleichen.

- Anschließend das Teststäbchen für 15 Sek. In das Reagenzglas stellen.
- Nach weiteren 60 Sek. Testfeld ablesen und mit der Farbskala vergleichen.
- Ablesewert in die Liste eintragen

Gebrauchte Teststäbchen in den vorgesehenen Behälter entsorgen und Packung vollständig an den Platz zurücklegen!!

3. Funktion des Ventilators

Der Ventilator ist auf einen gleichmäßigen Lauf zu prüfen. Der Ventilator ist in periodischen Zeitabständen zu säubern. Evtl. erkennbare Luftleckagen an Geräteverbindungen etc. umgehend abdichten.

4. Funktion der Beregnungspumpe

5. Füllstände des Vorlagebehälters und des Nährlösungsbehälters kontrollieren

7. Funktion der Dosierpumpe

Der dreistufige Wahlschalter (extern/stop/test) muss auf extern stehen, damit die vom Wasserzähler eingehenden Impulse verarbeitet werden können. Die Menge geförderte Nährlösung während des Befüllens des Vorlagebehälters mit Frischwasser ist mit dem Einstellen der Hublänge und der Hubfrequenz auf eine definierte Dosiermenge der konzentrierten Nährlösung eingestellt. Durch halten des Wahlschalters auf test kann die Funktion der Dosierpumpe geprüft werden. Störungen an der Dosierpumpe werden durch eine rote Leuchte angezeigt. Hat der Nährlösungsbehälter den MIN-Stand erreicht wird dies durch eine orange Leuchte angezeigt.

Anlagenelement	Tägliche Vorgehensweise	Istwert	Sollwert	Maßnahmen
Beregnungspumpe	Manuelles Einschalten (t<2min), Durchflussmesser ablesen		1,9 bis 2,5m³/h	
SPS-Steuerung	Funktion der Meldeleuchten testen		alle müssen aufleuchten	
Füllstand Nährlösung	Behälterfüllung ablesen		orange Leuchte an der Dosierpumpe darf nicht an sein	
Füllstand Vorlagebehälter	Behälterfüllung ablesen		muss über MIN-Stand sein	
Dosierpumpe	Auf „test“-Modus schalten; Dosiereinstellung eintragen		muss Nährlösung in den Vorlagebehälter fördern	
Filtermaterial	Sichtprüfung auf gleichmäßige Beregnungsverteilung		Sprühbild sollte an allen Düsen gleichmäßig vorhanden sein	
Schwerkraftabscheider	Auf „Zusetzen“ und Abscheidung prüfen		in wöchentlichen Abständen sollten Grobstaub in den Behältern sein	
Ventilator	Auf Funktion prüfen		gleichmäßiger Lauf muss vorhanden sein; Vergleich mit Druckverlustschwankungen	
Rohrleitung	Auf Leckagen achten		Keine Leckagen	
Schläuche	Auf Dichtigkeit prüfen		Dichtigkeit muss gewährleistet sein	
Anlagenelement	Wöchentliche Vorgehensweise	Istwert	Sollwert	Maßnahmen
Sichtkontrolle der Beregnungsdüsen	Auf mögliche Verstopfungen testen		Sprühbild sollte an allen Düsen gleichmäßig vorhanden sein	
pH- bzw. NH ₄ ⁺ -Konzentration PO ₄ ³⁻ -Konzentration	Teststäbchenmessung im Frischwasser und Abwasser		Frischwasser: pH: 6-8/ NH ₄ ⁺ : 75-125 mg/l PO ₄ ³⁻ : 15-25 mg/l Abwasser: pH: 6,5-10/ NH ₄ ⁺ : 75-300 mg/l PO ₄ ³⁻ : 25-60 mg/l	
Differenzdruckmessung	Druckverlust vom Eintritt bis Austritt BTK		Δp= 200-400 hPa	

