

**Junker Filter GmbH**

In Zusammenarbeit mit

**Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus**

**Hocheffiziente Abscheidung von Stäuben und  
Geruchsstoffen mittels eines neuen *Bio-Elektrischen*  
*Geruchs-Abscheiders* (BEGA)**

Abschlussbericht zum Projekt, das unter dem Az.: 21479 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde

von

Jürgen Junker & Dipl.-Ing. Reiko Fischer  
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Riebel & Dipl.-Ing. Robert Mnich

Cottbus, Sinsheim, Juli 2008

# Inhaltverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>VERSUCHSANLAGE</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>ELEKTRISCHER WIND</b> .....	<b>9</b>
4.1	MESSUNG DES ELEKTRISCHEN WINDS ÜBER DEN DYNAMISCHEN DRUCK .....	10
4.2	AUSWIRKUNG DES ELEKTRISCHEN WINDS AUF DIE VERWEILZEITVERTEILUNG .....	11
4.3	AUSWIRKUNG DES ELEKTRISCHEN WINDS AUF DIE QUERVERMISCHUNG UND DIE BEAUFSCHLAGUNG DER SCHÜTTUNG .....	13
<b>5</b>	<b>KONTROLLE VON BIOFILM UND WASSERHAUSHALT</b> .....	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>KEIMEMISSION</b> .....	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>ABBAU VON VOCS UND GERÜCHEN DURCH DIE CORONA-ENTLADUNG</b> .....	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>PROTOTYPEN</b> .....	<b>33</b>
8.1	BEGA TROMMEL .....	33
8.2	BEGA SCHEIBEN.....	35
8.3	BEGA PACKUNG.....	36
8.4	TECHNISCHER VERGLEICH DER PROTOTYPSVARIANTEN.....	39
8.5	LABORVERGLEICH: BEGA TROMMEL, BEGA SCHIEBEN UND BEGA PACKUNG .....	39
8.6	INDUSTRIEVERSUCHE.....	41
8.6.1	<i>Der Industrietest Nr. 1</i> .....	41
8.6.2	<i>Der Industrietest Nr. 2</i> .....	43
8.6.3	<i>Der Industrietest Nr. 3</i> .....	46
<b>9</b>	<b>FAZIT</b> .....	<b>49</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>50</b>
	.....	<b>49</b>

## Verzeichnis der Bilder und Tabellen

ABB. 2.1.: BISHERIGE LÖSUNG ZUR ABSCHIEDUNG VON STÄUBEN UND GERÜCHEN [ROO89] .....	6
ABB. 3.1: VERSUCHSANLAGE .....	8
ABB. 4.1: VERMISCHUNG DER STRÖMUNG DURCH DEN ELEKTRISCHEN WIND .....	9
ABB. 4.2: VERSUCHSANORDNUNG BEI MESSUNGEN DES DYNAMISCHEN DRUCKS VOM ELEKTRISCHEN WIND .....	10
ABB. 4.3: VERTEILUNG DES DRUCKS IM BEGA, MIT/OHNE SPANNUNG, $U_{LR}=0,05\text{M/S}$ , $U=-35\text{kV}$ .....	11
ABB. 4.4: VERSUCHANLAGE FÜR TRACERVERSUCHE .....	12
ABB. 4.5: VERWEILZEITVERTEILUNG IM BEGA ALS FUNKTION DER ANGELEGTEN HOCHSPANNUNG, $U_{LR}=0,05\text{M/S}$ .....	12
ABB. 4.6: VERSUCHANORDNUNG BEI MESSUNGEN ZUR TRACERVERTEILUNG IN DER SCHÜTTUNG .....	14
ABB. 4.7: VERTEILUNG DES TRACERS IN DER SCHÜTTUNG, DIE KONZENTRATIONEN IN EINZELNEN PUNKTEN SIND AUF DIE REINGASKONZENTRATION BEZOGEN (NACH DER VOLLEN VERMISCHUNG, 200PPM), FÜLLKÖRPER RALU RING 25, SE – BANDFÖRMIG, $U_{LR}=0,05\text{M/S}$ , $U=0\text{kV}$ , KOORDINATEN S. ABB. 4.6 .....	15
ABB. 4.8: VERTEILUNG DES TRACERS IN DER SCHÜTTUNG, DIE KONZENTRATIONEN IN EINZELNEN PUNKTEN SIND AUF DIE REINGASKONZENTRATION BEZOGEN (NACH DER VOLLEN VERMISCHUNG, 200PPM), FÜLLKÖRPER RALU RING 25, SE – BANDFÖRMIG, $U_{LR}=0,05\text{M/S}$ , $U=30\text{kV}$ , KOORDINATEN S. ABB. 4.6 .....	15
ABB. 4.9: EINFLUSS DES ELEKTRISCHEN WINDS AUF DIE BEAUFSCHLAGUNG DER SCHÜTTUNG MIT DEM TRACER .....	17
ABB. 5.1: SCHÜTTUNG NACH 1-MONATIGEN OPTIMALEN WACHSTUM OHNE BIOMASSEAUSTRAG (RECHTS) MIT ZUGEHÖRIGER DRUCKVERLUSTKURVE (RECHTS) .....	18
ABB. 5.2: BEGA PACKUNG, ABREINIGUNG DER BIOMASSE MIT DEM WASSERSTRAHL .....	20
ABB. 6.1: KONZENTRATION VON BAKTERIEN IM ROH/REINGAS DES BEGA FÜR VERSCHIEDENE GESCHWINDIGKEITEN, SPANNUNGEN UND POLARITÄTEN .....	22
ABB. 6.2: KONZENTRATION VON SCHIMMELPILZEN IM ROH/REINGAS DES BEGA FÜR VERSCHIEDENE GESCHWINDIGKEITEN, SPANNUNGEN UND POLARITÄTEN .....	23
ABB. 6.3: KONZENTRATION VON BAKTERIEN IM REINGAS DES AUSGETROCKNETEN BEGA FÜR VERSCHIEDENE SPANNUNGEN UND POLARITÄTEN .....	23
ABB. 7.1: VERSUCHSANLAGE ZU UNTERSUCHUNGEN DES ABBAUS VON GERÜCHE ÜBER OZON .....	24
ABB. 7.2: STRUKTURFORMEL DES ISOPRENS .....	25
ABB. 7.3: ROHERGEBNISSE DES FID ZUR ABSCHIEDUNG DES ISOPRENS IM ELEKTROABSCHIEDER, NEGATIVE UND POSITIVE POLARITÄT, $U_{LR}=0,041\text{M/S}$ , TROCKEN-EA .....	26
ABB. 7.4: PARTIKELHERSTELLUNG IM ELEKTROABSCHIEDER BEI NEGATIVER POLARITÄT BEI VERSCHIEDENER KONZENTRATION DES ISOPRENS, $U=22\text{ kV}$ , $U_{LR}=0,041\text{ M/S}$ , TROCKEN-EA .....	27
ABB. 7.5: PARTIKELHERSTELLUNG IM ELEKTROABSCHIEDER BEI POSITIVER POLARITÄT BEI VERSCHIEDENER KONZENTRATION DES ISOPRENS, $U=22\text{ kV}$ , $U_{LR}=0,041\text{ M/S}$ , TROCKEN-EA .....	27
ABB. 7.6: KOHLENSTOFFKONZENTRATION (FID-MESSUNG, REIN- UND ROHGAS) UND PARTIKELANZAHLKONZENTRATION (SMPS-MESSUNG, REINGAS), $C_{ROH}= 20\text{ PPM}$ , $U_{LR}=0,041\text{ M/S}$ , NEGATIVE/POSITIVE KORONA, TROCKEN-ELEKTROABSCHIEDER .....	28
ABB. 7.7: REINGASKONZENTRATION VON KOHLENSTOFFKONZENTRATION (FID-MESSUNG) UND PARTIKELANZAHLKONZENTRATION (SMPS-MESSUNG) UND ABSCHIEDUNG ÜBER DER ISOPREN-ROHGASKONZENTRATION IM TROCKEN-EA, $U_{LR}=0,009\text{M/S}$ ( $T_{VWZ}=32\text{s}$ ), $U=22\text{ kV}$ , NEGATIVE/POSITIVE POLARITÄT .....	29
ABB. 7.8: REINGASKONZENTRATION VON KOHLENSTOFFKONZENTRATION (FID-MESSUNG) UND PARTIKELANZAHLKONZENTRATION (SMPS-MESSUNG) UND ABSCHIEDUNG ÜBER DER ISOPREN-ROHGASKONZENTRATION IM NASS-EA, $U_{LR}=0,009\text{M/S}$ ( $T_{VWZ}=32\text{s}$ ), $U=22\text{ kV}$ , NEGATIVE/POSITIVE POLARITÄT .....	30
ABB. 7.9: VERGLEICH DER OZONKONZENTRATION NASS- UND TROCKEN-EA, $U_{LR}=0,041\text{M/S}$ .....	31
ABB. 7.10: PARTIKELKONZENTRATION (REINGAS) UND OZONKONZENTRATION ÜBER DER STROMSTÄRKE IM NASS-EA, $C_{ROH}= 20\text{ PPM}$ , $U_{LR}=0,041\text{ M/S}$ , NEGATIVE/POSITIVE KORONA .....	32
ABB. 8.1: BEGA TROMMEL .....	34
ABB. 8.2: PROTOTYP BEGA TROMMEL, LINKS: GESAMTER BLICK, RECHTS: TROMMEL MIT FÜLLKÖRPER .....	34
ABB. 8.3 BEGA SCHEIBEN .....	35
ABB. 8.4: PROTOTYP BEGA SCHEIBEN, LINKS: GESAMTER BLICK, RECHTS: SCHEIBEN-PACKUNG .....	36
ABB. 8.5: BEGA PACKUNG SCHEMA .....	37
ABB. 8.6: BEGA PACKUNG, PHOTO .....	37
ABB. 8.7: STRUKTURIERTE PACKUNG VOM PROTOTYP BEGA PACKUNG .....	38
ABB. 8.8: BERIESELUNG ÜBER VOLLKEGELDÜSEN .....	38
ABB. 8.9. BEGA TROMMEL (BT), BEGA SCHEIBEN (BS) UND BEGA PACKUNG (BP), VERGLEICH DER ABBAULEISTUNG VON ISOPROPANOL $C_{ROH}=107-214\text{MG/MN}^3$ (40-80PPM) FÜR DIVERSE VOLUMENSTRÖME $\dot{V}=250, 500, 800$ (FÜR BEGA PACKUNG 1000) $\text{M}^3/\text{H}$ UND SPANNUNGEN .....	40

ABB. 8.10. BEGA TROMMEL (BT), BEGA SCHEIBEN (BS) UND BEGA PACKUNG (BP),

GESAMTABSCHIEDEGRADE (ANZAHLBEZOGEN) VOM STAUB FÜR DIVERSE VOLUMENSTRÖME $\dot{V} = 250, 500, 800$ (FÜR BEGA PACKUNG 1000) $M^3/H$ .....	40
ABB. 8.11: BEGA TROMMEL IM EINSATZ BEI DER PELLETIERUNGSANLAGE DER FA. SÜDZUCKER BIOETHANOL IN ZEITZ.....	41
ABB. 8.12: ERGEBNISSE DER GERUCHSABSCHIEDUNG DURCH BEGA TROMMEL.....	42
ABB. 8.13: VERSUCHANORDNUNG .....	44
ABB. 8.14: ABBAU DES ORGANISCHEN KOHLENSTOFFS, $C_{\text{BEGA-ROHGAS}} = \text{CA. } 20\text{PPM}$ , $T_{\text{BEGA-ROHGAS}} = 40\text{-}50^\circ\text{C}$ , WERTE BEZOGEN AUF DIE REAL BEHANDELTEN VOLUMENSTRÖME (BEGA-ROHGAS/BEGA-REINGAS).....	44
ABB. 8.15: GERUCHSKONZENTRATIONEN UND ABSCHIEDELEISTUNG, $\dot{V}_{\text{BEGA}} = 900$ UND $1800 M^3/H$ , $T_{\text{BEGA-ROHGAS}} = 47^\circ\text{C}$ , BEI $900 M^3/H$ MIT/OHNE SPANNUNG .....	45
ABB. 8.16: VERSUCHANORDNUNG .....	46
ABB. 8.17: ABBAU DES ORGANISCHEN KOHLENSTOFFS, $C_{\text{MOKO-ROHGAS}} = \text{CA. } 50\text{-}70\text{PPM}$ , $T_{\text{MOKO-ROHGAS}} = 30^\circ\text{C}$ .....	47
ABB. 8.18: ABBAU DES ORGANISCHEN KOHLENSTOFFS FÜR SPANNUNGEN $-26\text{kV}$ UND $-28\text{kV}$ , OHNE UND MIT OZON-UNTERSTÜTZUNG .....	47
ABB. 0.1: CHROMATOGRAMM DES ABWASSERS AUS DEM TEST MIT NASS-EA .....	52
ABB. 0.2: ANLAGE ZUR STAUB UND GERUCHSABSCHIEDUNG, SCHLAUCHFILTER + AKTIVKOHLE.....	54
ABB. 0.3: STAUB UND GERUCHSABSCHIEDUNG IM BEGA.....	54

# **1 Zusammenfassung**

Der vorliegende Bericht schließt das Projekt ab, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az.: 21479 gefördert wurde. Der volle Titel lautet: „Hocheffiziente Abscheidung von Stäuben und Geruchsstoffen mittels eines neuen Bio-Elektrischen Geruchs-Abscheiders (BEGA)“.

Das Ziel des Projekts war es, das im LS MVT der BTU Cottbus entstandene Konzept BEGA (DBPA: 103 19 351.0), eines einstufigen Geruchs- und Staubabscheiders, zu einem funktionsfähigen Verfahren zu entwickeln.

Im Laufe des Projekts wurde das Verfahren zur bio-elektrischen Gasreinigung von einer Versuchsanlage zum Prototyp entwickelt, der unter industriellen Bedingungen erprobt wurde.

Die Entwicklung beinhaltete auch Grundlagenuntersuchungen. Es wurde der Einfluss des elektrischen Winds auf die Quermischung im BEGA untersucht. Der Einfluss wurde mittels Tracer-Messungen nachgewiesen. Es wurde ein Konzept zum Biomasseaustrag entwickelt. Es wurde die Abscheidung von VOCs über das im Elektroabscheider entstandene Ozon untersucht. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass BEGA keine sekundäre Keimemission von Bakterien und Schimmelpilzen verursacht.

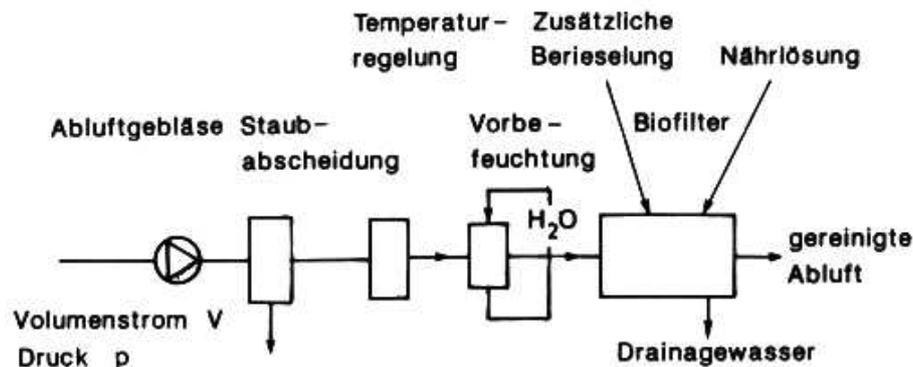
Der Prototyp wurde in drei technischen Varianten entwickelt. In der ersten Phase wurden BEGA Trommel und BEGA Scheiben gebaut, und zuerst im Labormaßstab getestet. Der Prototyp BEGA Trommel wurde bei einem potentiellen Kunden ausprobiert. In der zweiten Phase des Projekts wurde die dritte Variante der Anlage (BEGA Packung) basierend auf den in der ersten Projektphase gewonnenen Erfahrungen entwickelt. BEGA Packung wurde während der nächsten Tests bei zwei weiteren Kunden erprobt. Der Prototyp besitzt die bei der Industrie anerkannte Siemens-Steuerung.

Die Ökobilanz zeigt, dass BEGA ein interessantes Verfahren zur Geruchs- und Staubentfernung ist, das deutliche ökologische und finanzielle Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen bietet.

Beim Abschluss des Projekts sind konkrete Auftragsverhandlungen mit Kunden im Gange. Die Antragstellerin Fa. Junker entwickelt eine Anlage, die an industrielle Bedingungen angepasst ist, für Volumenströme von 5000m<sup>3</sup>/h.

## 2 Einleitung

In bisherigen Lösungen zur kombinierten Staub- u. Geruchsabscheidung wird die Abscheidung von Stäuben u. Gerüchen schrittweise in getrennten Stufen realisiert. Ein Beispiel wird in Abb. 2.1 dargestellt. Die dargestellte Anlage besteht prinzipiell aus zwei Anlagen, die in Reihe geschaltet sind, einem Staubabscheider und einem Geruchsabscheider (Biofilter). Sie können jedoch als zwei unabhängige Anlagen funktionieren.



**Abb. 2.1.: Bisherige Lösung zur Abscheidung von Stäuben und Gerüchen [Roo89]**

Da Stäube und Gerüche bzw. organische Dämpfe aus vielen Prozessen (in der Tierhaltung, beim Braten und Backen von Lebensmitteln, bei der Holzverarbeitung, beim Laserschneiden von Textilien, bei der Müllsortierung und Kompostierung sowie in Kläranlagen u. v. a. (z.B.: [Koh83], [Rap03], [Mac95]) gemeinsam emittiert werden, besteht ein großer Entwicklungsbedarf für ein kombiniertes Verfahren, das effizienter und sparsamer hinsichtlich Invest- und Betriebskosten ist. Erwünscht wäre eine einstufige Anlage, in der Staub- und Geruchsabscheidung simultan geschehen.

BEGA ist verfahrenstechnisch gesehen ein Nass-Elektroabscheider mit einer porösen Niederschlags Elektrode. Die Niederschlags Elektrode funktioniert als ein Tropfkörper, auf dem Mikroorganismen immobilisiert sind. Durch die Verbindung von Elektroabscheider und Tropfkörperanlage entsteht ein neues interessantes Verfahren, das zur gleichzeitigen Reinigung des Gases vom Staub und Geruch (bzw. allgemeiner VOCs) dienen kann. Der Entwicklung liegen die folgenden Erkenntnisse und Ideen zugrunde:

- Der Elektroabscheider ist geeignet für die Abscheidung von Stäuben und insbesondere auch von feinen Aerosolen, die z.B. bei thermischen Prozessen entstehen,
- Nasselektroabscheider zeichnen sich durch sehr sicheres Betriebsverhalten auch bei klebrigen, selbstentzündlichen Stäuben, Stäuben mit sehr hoher/niedriger Leitfähigkeit aus,
- Der Biofilm toleriert das im Elektroabscheider gebildete Ozon,

- Ozon kann den biologischen Abbau durch chemischen Abbau unterstützen,
- Der elektrische Wind fördert den Gasaustausch zwischen dem Kanal des Elektroabscheiders und der Schüttung, wobei die Schüttung eine Niederschlagsselektrode mit einer vergrößerten Fläche darstellt. Durch die Intensivierung des Stoffaustauschs kann die Anlage kleiner gebaut werden,
- Große Moleküle z.B. wie Geruchsstoffe werden in der Coronaentladung des Elektroabscheiders bevorzugt ionisiert und werden als Ionen direkt zum Biofilm transportiert.

Das Kombinationsverfahren „BEGA“ erscheint günstig wegen der direkten Materialersparnis, eines kleineren Druckverlustes und eines niedrigeren Energieverbrauches. Erwartet werden auch Synergieeffekte, die die Effizienz der Anlage erhöhen können.

BEGA, der Bio-Elektrische Geruchs- Abscheider, ist ein Konzept, das im LS Mechanische Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus entstanden ist.

Das Verfahren wurde als deutsches Patent mit der Nr. 103 19 351.0 angemeldet.

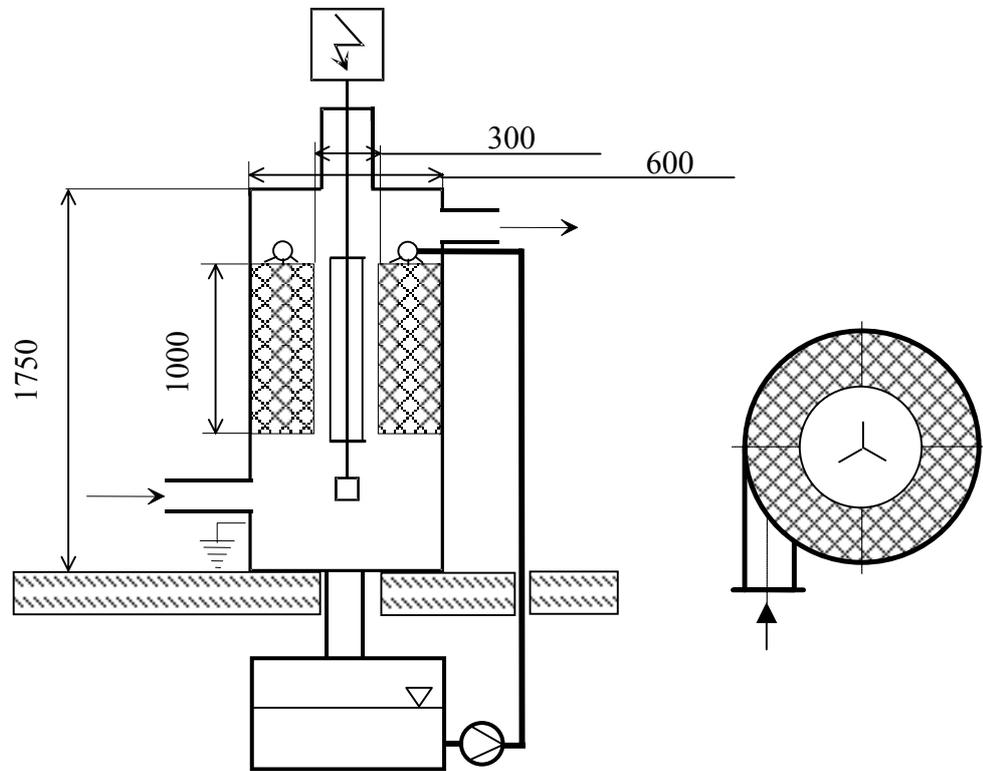
Die Zielsetzung des Projekts ist es, in Zusammenarbeit der Antragstellerin Fa. Junker-Filter mit dem LS Mechanische Verfahrenstechnik der BTU Cottbus die genaue Funktionsweise und die Auslegungsgrundlagen von BEGA zu untersuchen, verschiedene Anwendungsbereiche zu erproben und BEGA als Produkt in den Markt einzuführen.

Im Laufe des Projekts wurde an folgenden Themen und Problemen gearbeitet:

- Untersuchungen zum elektrischen Wind,
- Untersuchungen zur Kinetik des Geruchsabbaus im Biofilm,
- Untersuchungen zum Abscheideverhalten für Aerosole,
- Untersuchungen zur Begrenzung des Biofilm-Wachstums,
- Untersuchungen zum Abbau von VOCs über im Elektroabscheider entstandenes Ozon,
- Entwicklung eines Prototyps,
- Entwicklung einer industriellen Steuerung,
- Erprobung des Prototyps im Labor,
- Erprobung des Prototyps im industriellen Umfeld.

### 3 Versuchsanlage

Als Versuchsanlagen für die Grundlagenuntersuchungen dienten grundsätzlich zwei baugleiche Anlagen. Ein Schema wird in Abb. 3.1 dargestellt.



**Abb. 3.1: Versuchsanlage**

Den Hauptteil der Anlage bildet eine Füllkörperkolonne mit  $\phi_{\text{Innen}}=300\text{mm}$ ,  $\phi_{\text{Außen}}=600\text{mm}$  und der Höhe 1000mm, was ein Volumen von  $0,212\text{m}^3$  gibt. Mittig ist der Elektroabscheider integriert. Als Sprühelektroden wurden normalerweise 6 Tantaldrähte mit  $\phi=0,5\text{mm}$  eingesetzt. Der Elektroabscheider wurde durch ein Hochspannungsnetzgerät mit  $U_{\text{max}}=35\text{kV}$ ,  $I_{\text{max}}=10\text{mA}$  bei umschaltbarer Polarität versorgt. Die Schüttung wird kontinuierlich mit ca. 20 ltr/min berieselt, was eine Berieselungsdichte von  $5,7\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$  gibt.

Die Zufuhr des Gases ist tangential, was für eine gleichmäßige Strömungsverteilung sorgt. Es wurden Volumenströme bis  $200\text{m}^3/\text{h}$  realisiert.

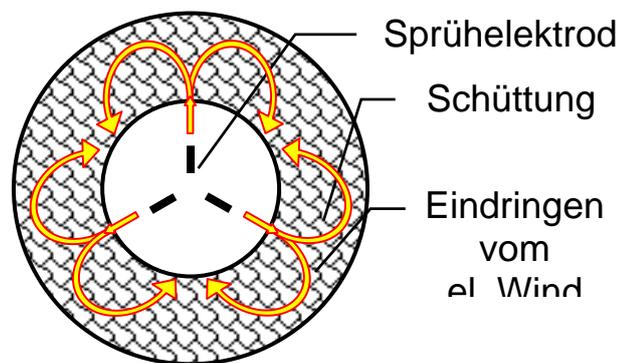
Die Konzentration der Geruchsstoffe bzw. gasförmigen organischen Komponenten wird mittels Flammen-Ionisations-Detektor (FID) von der Fa. Testa gemessen, wobei die Konzentrationsangabe in der Regel in signalhöhen-äquivalenten ppmv Propan erfolgt, da die Kalibrierung mittels Propan erfolgt.

Die Staubkonzentration wird (nur im abscheidetechnisch besonders kritischen Bereich der Feinstaerosole 10 nm – 700 nm) mittels Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) von der Fa. TSI gemessen. Die Ozon-Konzentration wird mittels eines elektrochemischen Ozon-Sensors von der Fa. Dräger erfasst.

#### 4 Elektrischer Wind

Gasionen und geladene Aerosolteilchen, die sich im elektrischen Feld von der Sprühelektrode in Richtung Niederschlagslektrode bewegen, übertragen durch elastische Stöße mit neutralen Gasmolekülen einen Teil ihrer kinetischen Energie auf das Gas. So entsteht im Elektroabscheider durch die Corona-Entladung eine Strömung, die in der Literatur als elektrischer Wind (ev. „Corona-Wind“, „Secondary Flow“, „EHD-Wechselwirkung“ – Elektro-Hydro-Dynamische Wechselwirkung) bezeichnet wird [Ker70], [Woo91], [Afo00], [Loi02].

Im Bezug auf BEGA ist der elektrische Wind ein Phänomen, das sehr wichtig für die Funktion der Anlage ist. Der elektrische Wind sorgt für den Stoffaustausch zwischen dem Elektroabscheider-Kanal und der mit dem Biofilm bewachsenen Schüttung und intensiviert den Stoffaustausch zwischen Biofilm und Gasphase, s. Abb. 4.1.

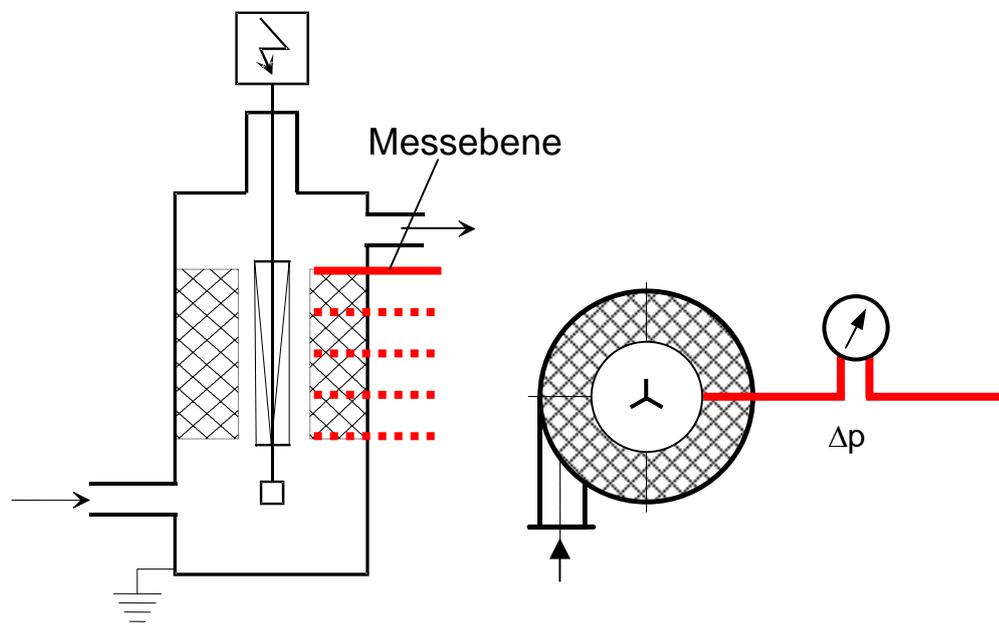


**Abb. 4.1: Vermischung der Strömung durch den elektrischen Wind**

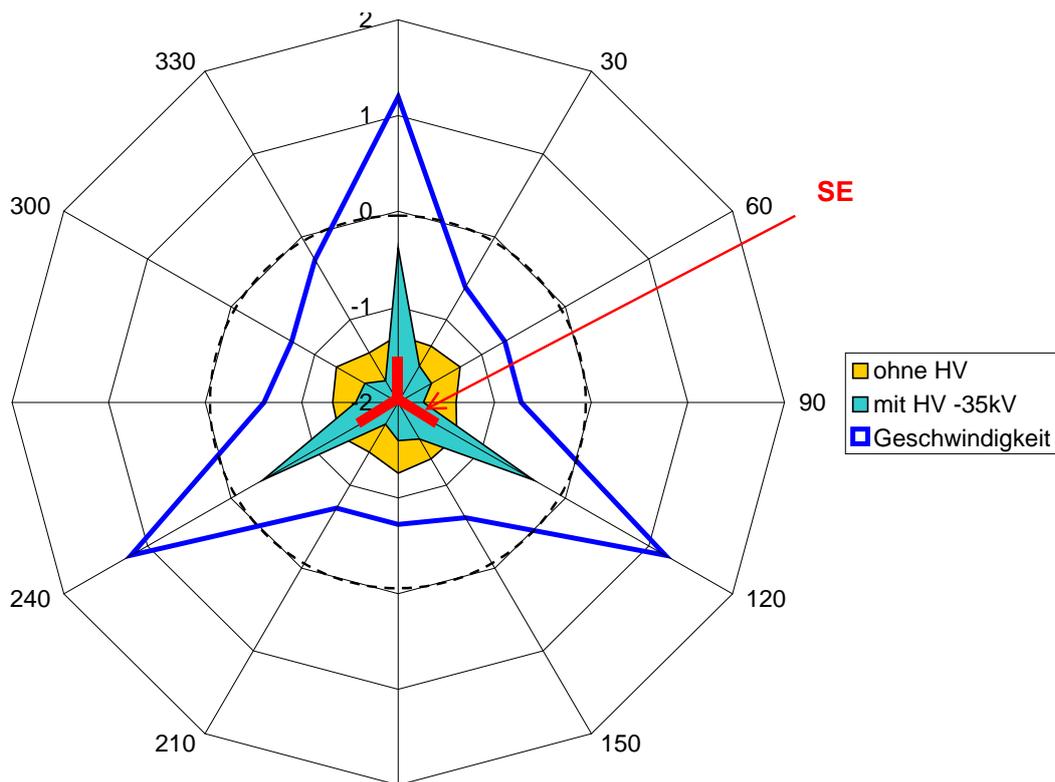
## 4.1 Messung des elektrischen Winds über den dynamischen Druck

Die in Abb. 4.1 dargestellte theoretische Erwartung wurde durch Messung der Druckverteilung in der Versuchsanlage nachgewiesen. Es wurde der dynamische Druck (genau: der statische Druck in der Anlage mit und ohne angelegte Spannung, der Unterschied ist der dynamische Druck, der durch den elektrischen Wind verursacht wurde) gegen Atmosphärendruck gemessen. Die SE war dreieckig gebaut, deswegen wurde der Druck für  $120^\circ$  gemessen, die restlichen  $2/3$  des Kreises wurden symmetrisch ergänzt. Die Messung wurde in fünf Ebenen durchgeführt. In Abb. 4.2 wird die Versuchsanordnung dargestellt.

Ein beispielhaftes Ergebnis mit eingetragenen SE ist in Abb. 4.3 dargestellt. Auf dieser Abbildung kann man sehen, dass die Entladung erheblich die Druckverteilung im BEGA beeinflusst. Es ist auch die Geschwindigkeit eingetragen, die über den elektrischen Wind generiert wird. Die generierte Geschwindigkeit kann bis über  $1\text{m/s}$  direkt gegenüber der SE betragen.



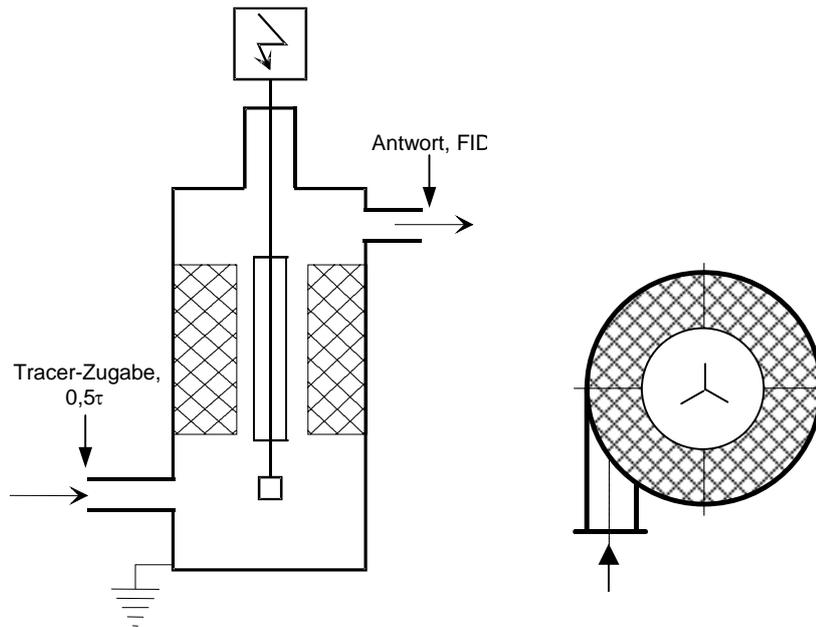
**Abb. 4.2:** Versuchsanordnung bei Messungen des dynamischen Drucks vom elektrischen Wind



**Abb. 4.3: Verteilung des Drucks im BEGA, mit/ohne Spannung,  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ ,  $U=-35\text{kV}$**

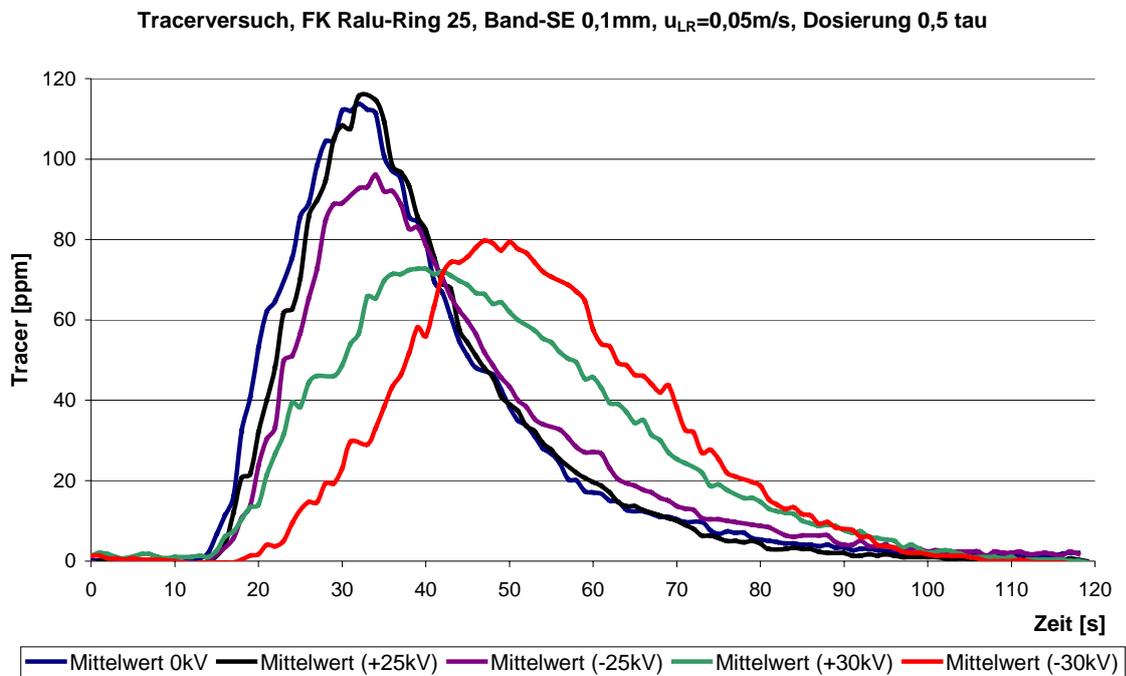
## **4.2 Auswirkung des elektrischen Winds auf die Verweilzeitverteilung**

Um den Einfluss des elektrischen Winds auf die Verweilzeitverteilung im BEGA zu untersuchen, wurden Tracerversuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.4 dargestellt. Als Tracer wurde Propan in der Konzentration 200ppm stoßweise ins Rohgas zudosiert. Die Dosierungszeit des Tracers betrug jeweils die Hälfte der mittleren geometrischen Verweilzeit (s. Anhang 1). Die Antwortfunktion wurde mittels FID-Analysator mit der maximal einstellbaren Auflösung (1s) gemessen. Es war während dieser Versuche kein Biofilm und keine Berieselung vorhanden.



**Abb. 4.4: Versuchsanlage für Tracerversuche**

Beispielhafte Ergebnisse werden in Abb. 4.5 dargestellt. Der Volumenstrom in der Anlage wurde im Bereich von 50 bis 200m<sup>3</sup>/h variiert, das entspricht einer Leerrohrgeschwindigkeit von  $u_{LR}=0,05$  bis  $u_{LR}=0,2$ m/s. Als Schüttung wurden Füllkörper Ralu-Ring 25 verwendet. Die Sprühelektrode war aus einem Metallband mit der Dicke 0,1mm gefertigt.



**Abb. 4.5: Verweilzeitverteilung im BEGA als Funktion der angelegten Hochspannung,  $u_{LR}=0,05$ m/s**

Die aus der Verweilzeitverteilung berechnete dimensionslose Verweilzeit (s. Anhang 1) beschreibt spiegelt den Einfluss des elektrischen Winds wider, s. Tab. 4.1.

**Tab. 4.1: Verweilzeit in der Anlage als Funktion der angelegten Spannung für verschiedene Geschwindigkeiten, ausgerechnet anhand der Tracermessungen**

$\theta$		U [kV]				
		0	+25	+30	-25	-30
$u_{LR}$ [m/s]	0,05	1,22	1,22	1,52	1,36	1,68
	0,10	1,37	1,34	1,54	1,43	1,66
	0,15	1,52	1,52	1,54	1,54	1,65
	0,20	1,64	1,57	1,86	1,70	1,91

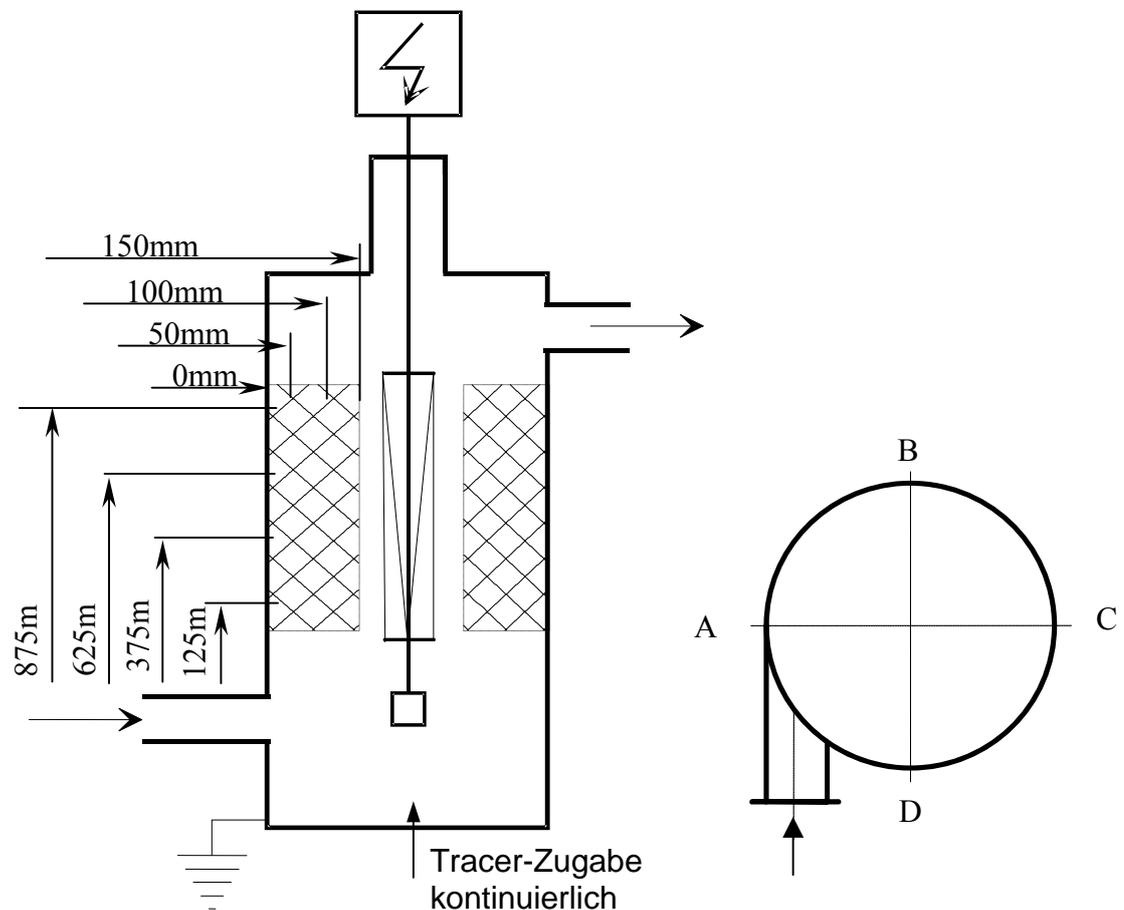
Die in Tab. 4.1 dargestellten Ergebnisse bestätigen die in den Abbildungen sichtbare Verschiebung der Verweilzeitverteilung in Richtung zu größeren Werten. Mit steigender Spannung wächst die Verweilzeit in der Anlage. Das beweist, dass der elektrische Wind eine Quervermischung im BEGA verursacht.

Im mittigen EA-Kanal erreicht die Strömung eine höhere Geschwindigkeit als in der Schüttung, wo der Strom durch die Füllkörper gebremst wird. Der Druckverlust muss über beide Teile EA-Kanal und Schüttung gleich sein. Im Test ohne angelegte Spannung wird der überwiegende Teil des Tracers schnell durch den EA-Kanal ausgetragen und dann erst kommt ein kleiner Anteil des Tracers mit längerer Verweilzeit aus der Schüttung. Der Peak ist ziemlich hoch und schmal, wie es für eine Pfropfenströmung mit einer longitudinaler Vermischung typisch ist. Nach dem Einschalten der Hochspannung dringt die Strömung aus dem EA-Kanal in die Schüttung ein, wo eine geringere Geschwindigkeit herrscht. So wird der Tracer im Mittel langsamer durch die Anlage transportiert. Der gemessene Antwortpeak ist niedriger und breiter.

### **4.3 Auswirkung des elektrischen Winds auf die Quervermischung und die Beaufschlagung der Schüttung**

Die Tracerversuche zeigen, dass durch die Corona-Entladung im EA-Teil die Verweilzeit im BEGA vergrößert wird. Die nächste Messreihe hatte das Ziel, in Schüttung „reinzugucken“. Der Tracer (Propan) wurde mittig von unten in die Anlage dosiert. Die Konzentration des Tracers wurde von der Seite über die Höhe und die Breite in vier verschiedenen Ebenen der

Schüttung mittels FID gemessen. Die Messungen wurden ebenfalls ohne Biofilm und ohne Berieselung durchgeführt. Die Versuchskonfiguration ist in Abb. 4.6 dargestellt.



**Abb. 4.6: Versuchsanordnung bei Messungen zur Tracerverteilung in der Schüttung**

Beispielhafte Ergebnisse werden in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 für 0kV bzw. -30kV dargestellt. Beide Diagramme zeigen Ergebnisse für die Schüttung Ralu-Ring 25, bandförmige SE und die  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ . Der einzige Unterschied ist die angelegte Spannung. Die gemessenen Konzentrationen wurden auf die Reingaskonzentration (nach der vollen Vermischung) bezogen.

Tracer-Verteilung in der Schüttung, FK: Ralu Ring 25, SE: Band,  $U=0\text{kV}$ ,  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ , Ebene A

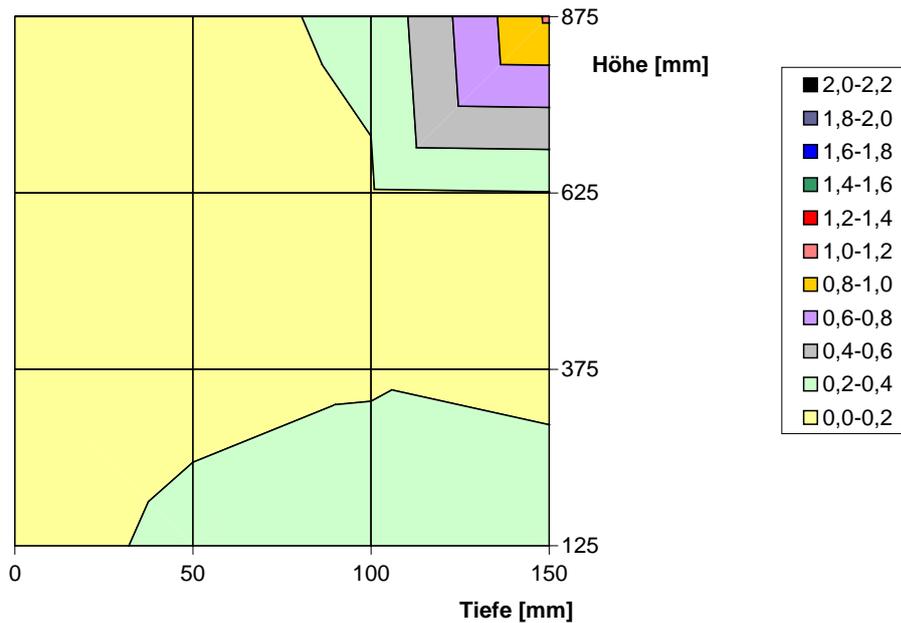


Abb. 4.7: Verteilung des Tracers in der Schüttung, die Konzentrationen in einzelnen Punkten sind auf die Reingaskonzentration bezogen (nach der vollen Vermischung, 200ppm), Füllkörper Ralu Ring 25, SE – Bandförmig,  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ ,  $U=0\text{kV}$ , Koordinaten s. Abb. 4.6

Tracer-Verteilung in der Schüttung, FK: Ralu Ring 25, SE: Band,  $U=-30\text{kV}$ ,  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ , Ebene A

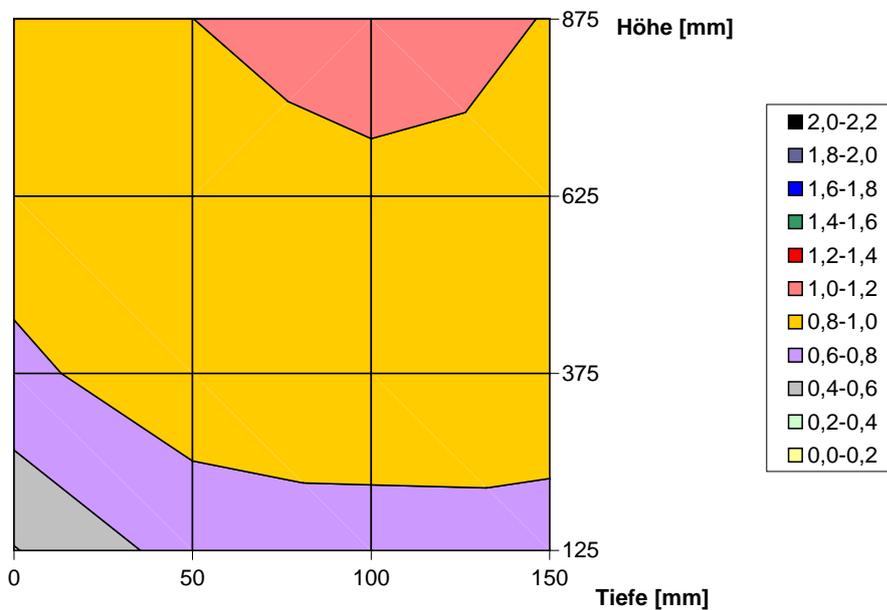


Abb. 4.8: Verteilung des Tracers in der Schüttung, die Konzentrationen in einzelnen Punkten sind auf die Reingaskonzentration bezogen (nach der vollen Vermischung, 200ppm), Füllkörper Ralu Ring 25, SE – Bandförmig,  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$ ,  $U=-30\text{kV}$ , Koordinaten s. Abb. 4.6

Beide Diagramme veranschaulichen sehr gut den Einfluss des elektrischen Winds auf die Vermischung im BEGA. Ohne angelegte Spannung beträgt die Tracerkonzentration in der Schüttung 0 bis ca. 40% der Tracerkonzentration, die im Reingas gemessen wird. Nur in einer schmalen Ringzone um das obere Ende des Schüttungskanals kann man Tracerkonzentrationen im Bereich 40-100% der Reingaskonzentration beobachten. Nach dem Einschalten der Spannung (-30kV) ist die Schüttung deutlich besser mit dem Tracer beaufschlagt, Abb. 4.8. Schon im unteren Bereich der Schüttung beträgt die Konzentration des Tracers zwischen 60-80% der Reingaskonzentration. Das Gas wird bei der Geschwindigkeit in der Anlage gut vermischt.

In dieser Versuchsreihe zur Beaufschlagung der Schüttung durch Geruchsstoff wurden Spannung, Leerrohrgeschwindigkeit und Sprühelektrodeart variiert. Für jede Messreihe wurde eine globale Größe gebildet, die ein Mittelwert für alle Messpunkte ist. Der Mittelwert ist auf die Konzentration des Tracers im Reingas bezogen. So bekommt man eine Größe, die als Beaufschlagung bezeichnet wurde, Gl. 4.1.

$$B = \frac{\sum_n C_{xyz}}{n} \cdot \frac{1}{C_{\text{Rein}}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Die Beaufschlagung zeigt, wie weit das Gas vermischt wurde. Ein Wert in der Höhe 1 zeigt, dass das Gas im vollständig vermischt ist. Die Ergebnisse werden in Abb. 4.9 dargestellt.

Ohne angelegte Spannung beträgt die Beaufschlagung für alle Messreihen ca. 30%. Bei der geringsten untersuchten Geschwindigkeit  $u_{LR}=0,05\text{m/s}$  wächst die Beaufschlagung auf über 80% schon bei der Spannung 25kV. Mit der Zunahme der Spannung wächst die Beaufschlagung weiter. Der Effekt wird schwächer bei höheren Geschwindigkeiten, ist aber auch bei 0,2m/s noch erheblich, z.B. + 50- 60% bei 0,2m/s und 30kV.

Beaufschlagung als Funktion der Spannung, Geschwindigkeit, Polarität und SE-Art

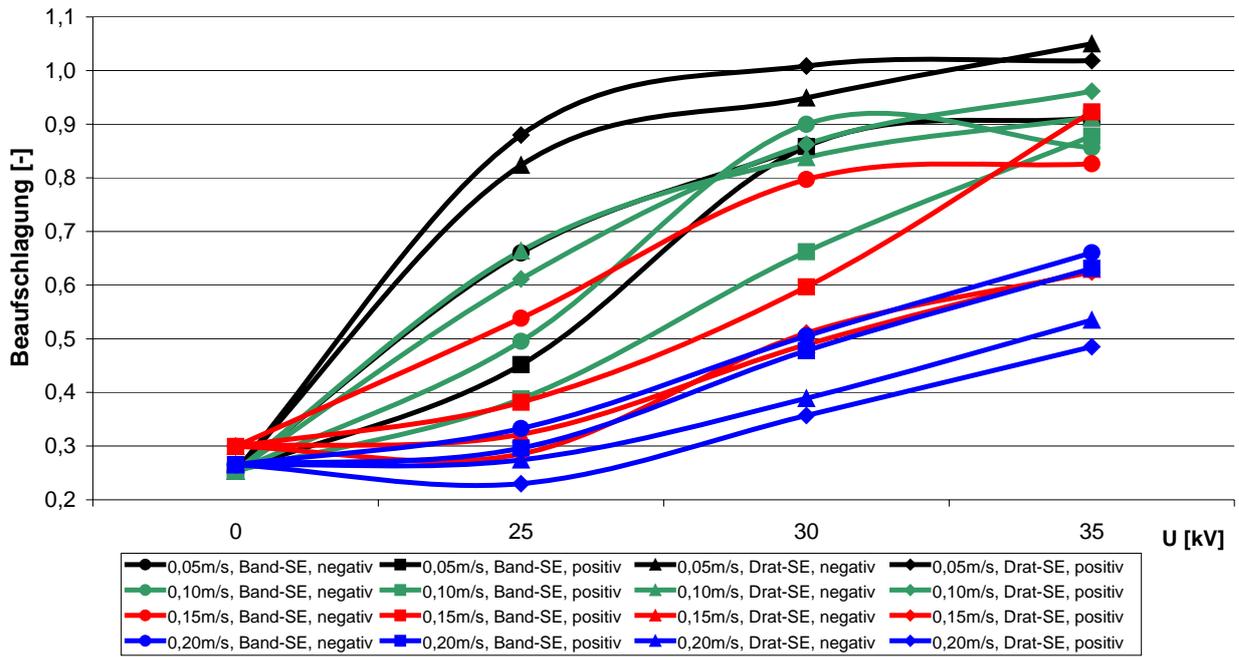
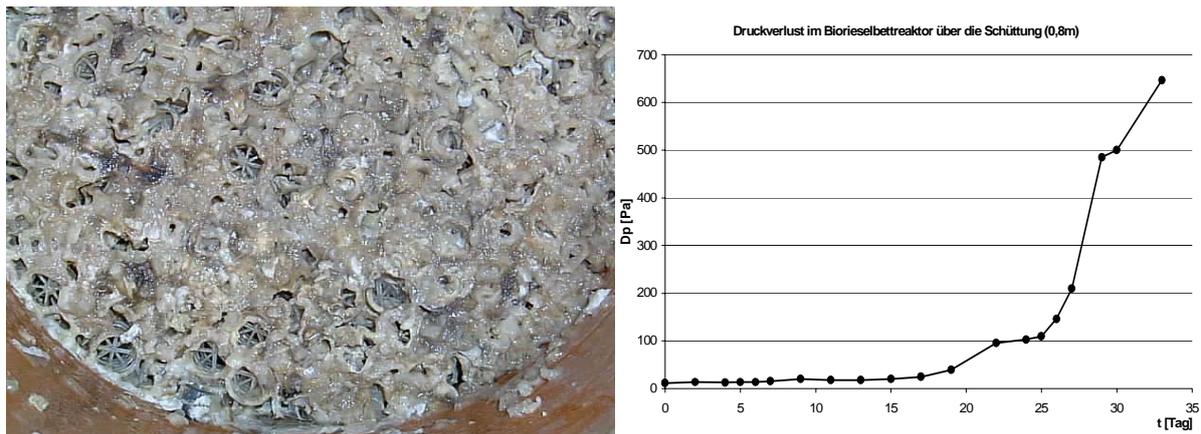


Abb. 4.9: Einfluss des elektrischen Winds auf die Beaufschlagung der Schüttung mit dem Tracer

## 5 Kontrolle von Biofilm und Wasserhaushalt

Ein großes Problem bei biologischen Verfahren ist das des Wasserhaushalts in der Anlage. Die Feuchte muss auf einem entsprechenden Niveau gehalten werden. Zu geringe Feuchte führt zum Austrocknen des Biofilms und zum Wachstum von Schimmelpilzen, zu starke Befeuchtung ist ungünstig wegen des verschlechterten Stoffaustausches. Die zu geringe Befeuchtung ist der gefährlichere Fall, weil sie zum Ausfall der Anlage führen kann. Hier spielt die Gleichmäßigkeit der Berieselung im ganzen Volumen des Biofilters eine wichtige Rolle. Abb. 5.1 zeigt eine Schüttung, die in einer Kolonne mit der Höhe 1m und dem Durchmesser 0,24m als konventioneller Biorieselbettreaktor (ohne Strömungskanal und Elektrode) betrieben wurde. Die Schüttung wurde von oben mit Wasser über einen Ring berieselt. Bereits nach einem Monate war die Schüttung durch das stetige Wachstum des Biofilms verklebt.



**Abb. 5.1: Schüttung nach 1-monatigen optimalen Wachstum ohne Biomasseaustrag (rechts) mit zugehöriger Druckverlustkurve (rechts)**

Das Ereignis: Die Verstopfung der Schüttung mit Zonen von unterschiedlich dickem Biofilm wird nach dem Englischen „Clogging“ genannt. In der Literatur sind folgende Strategien beschrieben, die zur Clogging – Vermeidung führen sollen:

- Limitierung von Mineralsalzen [Goß90] [Web94];
- Bremsen des Wachstums der Mikroorganismen durch Erhöhung der Salzkonzentration [Web94];
- Mechanische Biomasseabreinigung (z.B. in einer externen Wirbelschicht oder durch das Rückspülen der Anlage) [Gai01], [Hei97];
- „Verfressen“ des Biofilms durch Protozoen [Gai01];

Im Rahmen eigener Untersuchungen stellten wir fest, dass man den Biofilm auch zersetzen kann. Der feuchte Biofilm verflüssigt sich unter Luftabschluss innerhalb von 2-3 Tagen. Eine andere Möglichkeit ist, den Biofilm auszutrocknen. Der Druckverlust geht stark zurück, und nach der Wiederbefeuchtung aktiviert sich der Biofilm innerhalb von 1-2 Tagen wieder. Beide Methoden sind eher Notbehelfe, wenn es schon zum Clogging gekommen ist. Die Anlage muss bei ihnen nicht auseinander genommen werden, um die Füllkörper mechanisch zu reinigen, wenn keine Vorrichtung zu diesem Zweck vorgesehen wurde. Trotzdem erfolgt, ebenso wie bei den meisten der aus der Literatur bekannten Methoden, eine deutliche Störung der Biofilter-Funktion.

Für einen hoch belastbaren Biofilter wie im Fall von BEGA mit Abbauleistungen von bis zu ( $200 \text{g}_{\text{org. Substanz}}/\text{m}^3 \text{Schüttung h}$ ) spielt die Kontrolle des Biofilms eine besonders wichtige Rolle, da pro 1g abgebaute org. Substanz ca. 20g feuchter Biofilm zu erwarten sind.

Die Abreinigung des Biofilms soll möglichst so erfolgen, dass die Dicke des Biofilms gleichmäßig reduziert wird (in zu dicken Biofilmen würden anaerobe Verhältnisse entstehen mit der Folge von Geruchsbildung und Stickstoff-Verlusten durch Denitrifikation), wobei die Füllkörper-Oberfläche überall noch von einem dünnen Biofilm bedeckt bleiben soll.

Von der idealen Abreinigung sollte man auch erwarten:

- keine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen;
- keine längeren Unterbrechungen des Anlagenbetriebs;
- Erhaltung der niedrigen Investitionskosten für biologische Anlagen;
- geringe Störanfälligkeit.

Aus diesen Gründen wurde beim Bau des Prototyps eine mechanische Abreinigung gewählt. Es wurden zwei Konzepte ausgearbeitet: eine Spülung mittels Wasserstrahl und ein „Waschmaschine-Konzept“ (s. Kapitel 8).

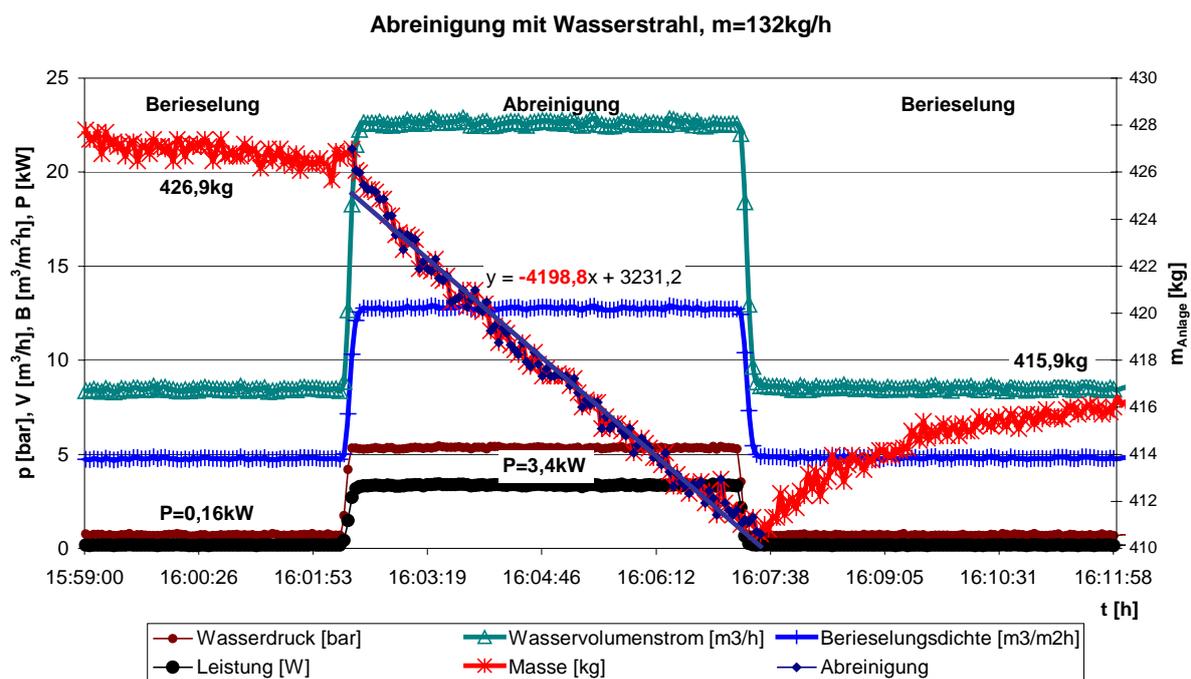
Beim Prototyp BEGA Scheiben ist die Füllkörper-Packung als strukturierte Packung ausgelegt. Seitlich zur Packung sind Wasserlanzen eingebaut. Der Biofilm wird durch die Kanäle der strukturierten Packung mit dem Wasserstrahl ausgetragen.

Beim Prototyp BEGA Trommel befinden sich lose Füllkörper in einer zu ca. 90% gefüllten Trommel. Die Trommel wird wie eine Wassermühle mit Wasser angetrieben. Die kontinuierliche Bewegung der Trommel zerstört den Biofilm zwischen den Füllkörpern, die ihre Lage in der Schüttung durch das Rotieren auch wechseln können. Der untere Teil der Trommel ist in Wasser eingetaucht, so kann der überschüssige Biofilm ausschwimmen.

Diskontinuierlich wird ein Wasserstrahl eingeschaltet, der den Biofilm aus den tieferen Schichten austragen soll (s. Kapitel 8).

Das Prinzip wurde beim Prototyp BEGA Packung weiter verfolgt. Über der stationären Packung sind Lanzen mit Düsen eingebaut. Es gibt zwei Arbeitsregime: Berieselung (ca. 30% der vollen Drehzahl, 5% der vollen Pumpleistung) und Abreinigung (volle Pumpleistung). Die Zunahme des Biofilms wurde über die Gesamtmasse der Anlage überwacht. Diese Lösung ist technisch aufwendig, aber sie liefert Daten, die zur Automatisierung des Biomasseaustrags verwendbar sind, s. Abb. 5.2. Durch die dargestellte Abreinigung wurden innerhalb 5 Minuten ca. 11kg Biofilm abgereinigt.

Der mittlere Zuwachs der Biomasse während des industriellen Tests betrug (ausgenommen Tage mit Betriebsstörungen, wie keine Versorgung mit Zuluft wegen z.B. Wartung der Anlage bzw. Ausfall der Berieselung) durchschnittlich ca. 8kg/Tag. Es wird mit einer Abreinigung pro Tag ein Gleichgewicht hinsichtlich Biofilmmasse in der Anlage erreicht.



**Abb. 5.2: BEGA Packung, Abreinigung der Biomasse mit dem Wasserstrahl**

## 6 Keimemission

Weil Biofilter mit einem breiten Spektrum von Mikroorganismen besiedelt sind, muss man sich Gedanken machen, ob es zu gesundheitsbelastenden Emissionen von Mikroorganismen aus Biofiltern kommen kann.

Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft berichtet in [Bun93], dass bei Biofiltern in der gereinigten Abluft Bakterien und auch Sporen von Pilzen und Actinomyzeten nachgewiesen werden können. Die Zahl und das Verhältnis von Bakterien zu Pilz- bzw. Actinomyzeten sporen ist abhängig vom Filtermaterial und der Flächenbelastung, aber auch von der Jahreszeit und vom Wetter.

Biowäscher emittieren vorwiegend Bakterien, jedoch systembedingt in geringerem Ausmaß als Biofilter, da die Mikroorganismen in der Waschflüssigkeit suspendiert sind. Von der Reinluft mitgerissene Feuchtigkeitstropfen und anhaftende Organismen werden überwiegend am Tropfenabscheider abgeschieden.

Emissionen in der Größenordnung von  $10^3$  bis  $10^4$  KBE/m<sup>3</sup> in der gereinigten Abluft können mit Innenraumbelastungen in Bürohäusern und Tierställen verglichen werden und gelten daher als unproblematisch. Es wird dennoch empfohlen, bei direktem Umgang mit Biofiltern Staubschutzmasken zu tragen. Zusammenfassend wird in [Bun93] festgestellt, dass die Sekundäremission von Bakterien, Pilzen und Sporen aus Biofiltern für den Menschen keine Gefährdung darstellt.

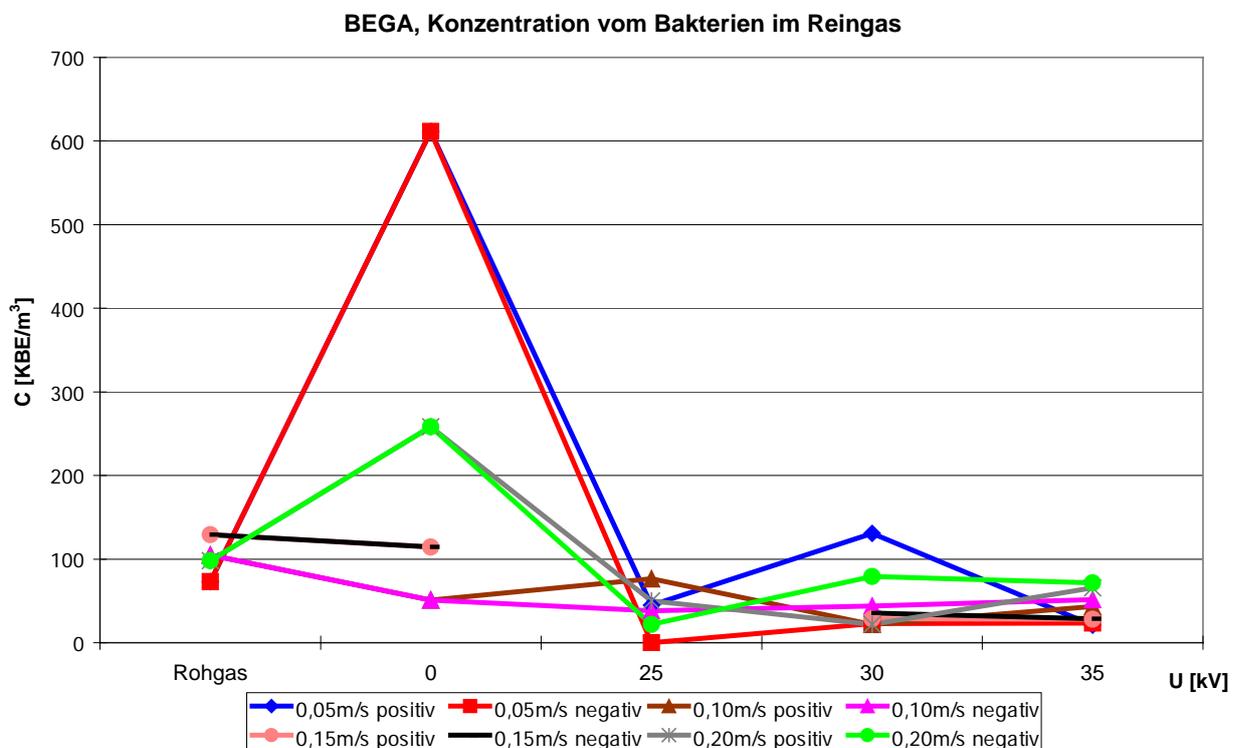
Herold untersuchte unter Laborbedingungen die Keimrückhaltung durch Biowäscher und Biofilter in der Abluft aus einer Kompostierungsanlage, [Her01]. Kummer führte Untersuchungen für ein ähnliches Verfahren, aber im industriellen Maßstab durch, [Kum03]. Beide Verfasser stellten fest, dass die Kombination Biowäscher/Biofilter für die Keimrückhaltung gut geeignet ist. Die Rohgaskonzentrationen (Rohgas bedeutet Abluft der Kompostierungsanlage) lagen im Bereich  $10^4 \div 10^5$  KBE/m<sup>3</sup>. Hinter der Anlage lagen die Keimkonzentrationen unter Nachweisgrenze ( $6 \cdot 10^1$  KBE/m<sup>3</sup>), wenn der Biowäscher und der Biofilter richtig betrieben wurden. Probleme können auftreten, wenn der Biofilter nicht optimal befeuchtet wird. Dann kann es zu erhöhten Keimemissionen kommen. Die Verbindung Biowäscher/Biofilter ist vorteilhaft, weil der Biowäscher die Luft vor dem Biofilter befeuchtet.

Es wurden keine Veröffentlichungen direkt zur Keimemission aus Rieselbettreaktoren (BEGA ist diesem Typ des Biofilters ähnlich) gefunden. Vorsichtshalber wurden daher

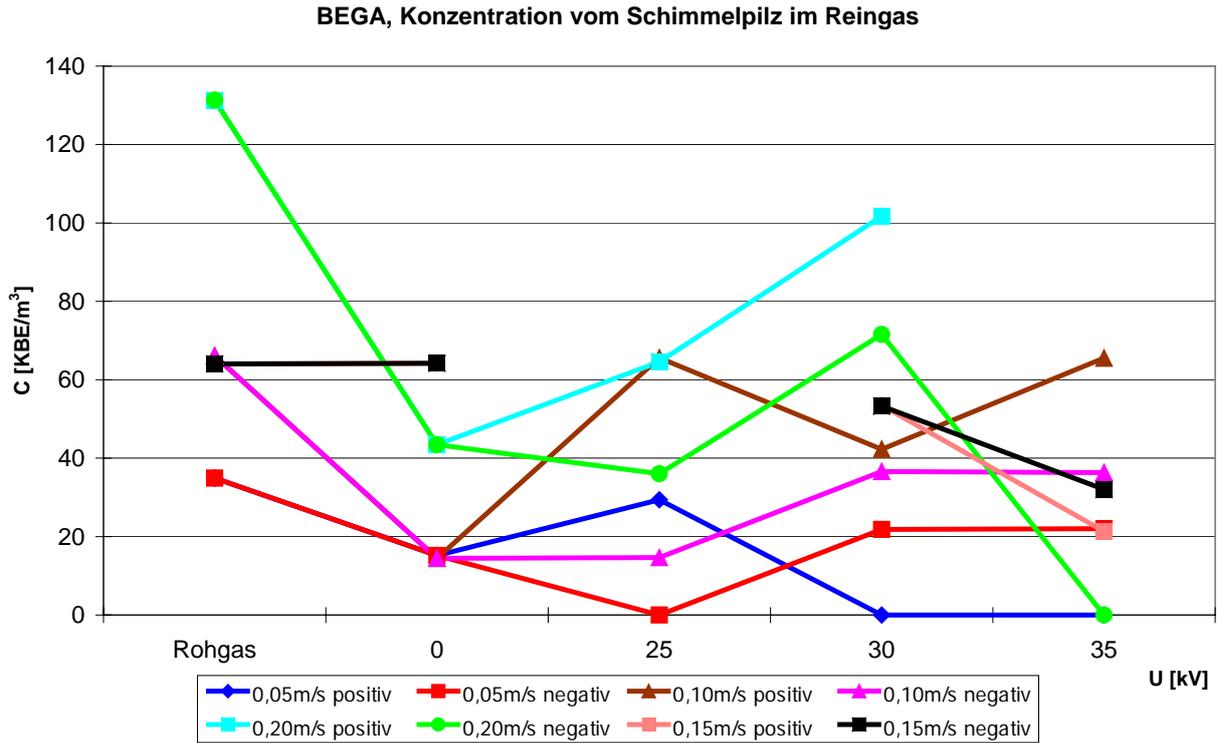
Untersuchungen durchgeführt, um die Emission von Bakterien und Schimmelpilz aus BEGA zu überprüfen.

Die Keimkonzentrationen von Bakterien und Schimmelpilzen wurden im mesophilen Bereich gemessen. Die Messungen, d.h. Probenahme, Durchführung, Anzuchtung, Auszählung, wurden nach der in [BIA89] vorgeschlagenen Methodik durchgeführt. Als Versuchsanlage dient die in Abb. 4.4 dargestellte Anlage. Die Messungen wurden im Labor durchgeführt, d.h. als Rohgas diente die Umgebungsluft aus dem Labor.

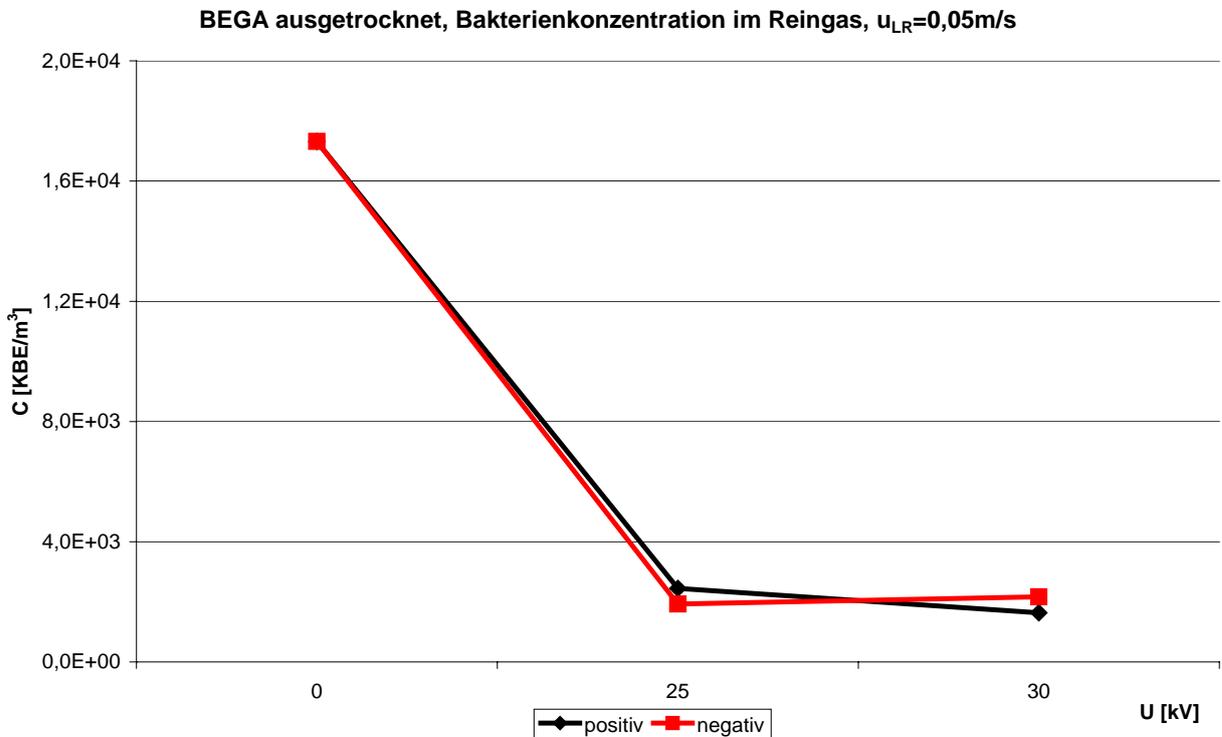
Die gemessenen Keimkonzentrationen der Bakterien und der Schimmelpilzen werden in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 dargestellt. Abb. 6.3 zeigt die Bakterienkonzentration, die beim ausgetrockneten Biofilm gemessen wurde.



**Abb. 6.1: Konzentration von Bakterien im Roh-/Reingas des BEGA für verschiedene Geschwindigkeiten, Spannungen und Polaritäten**



**Abb. 6.2: Konzentration von Schimmelpilzen im Roh-/Reingas des BEGA für verschiedene Geschwindigkeiten, Spannungen und Polaritäten**



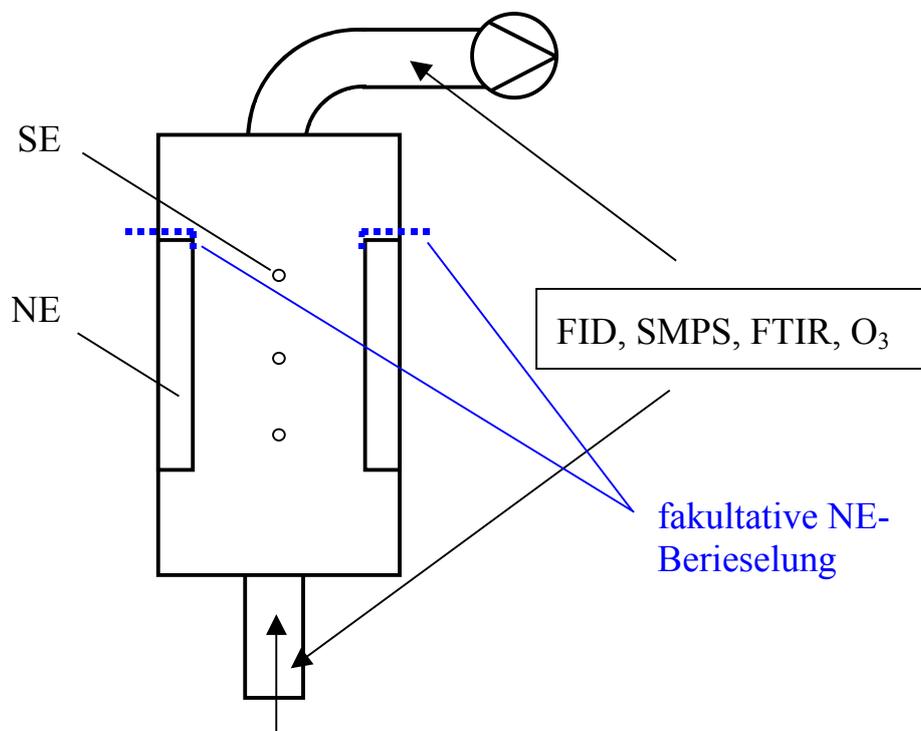
**Abb. 6.3: Konzentration von Bakterien im Reingas des ausgetrockneten BEGA für verschiedene Spannungen und Polaritäten**

Die Ergebnisse zeigen, dass BEGA bei bestimmungsgemäßen Betrieb nur sehr niedrige sekundäre Emission von Bakterien oder Schimmelpilzen verursacht. Es ist dabei keine deutliche Tendenz zu sehen, wie die Geschwindigkeit, die Spannung oder die Polarität die Abscheidung beeinflussen. Lediglich bei ausgeschalteter Spannung ist die Bakterienkonzentration im Reingas höher als im Rohgas. Dies ist durch die Versuchsgestaltung bedingt, als Rohgas diente die Umgebungsluft, die nur schwach mit Sporen beladen war.

Hohe Bakterienkonzentrationen (im Bereich  $10^4$  KBE/m<sup>3</sup>) wurden gemessen, wenn die Berieselung der Schüttung ausgeschaltet war (Abb. 6.3) und der Biofilm ausgetrocknet wurde. Das Einschalten der Spannung reduziert die Bakterienkonzentration auch hierbei erheblich.

## 7 Abbau von VOCs und Gerüchen durch die Corona-Entladung

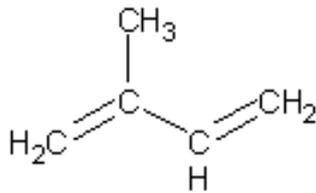
Für die Untersuchungen zum unmittelbaren Einfluss der Corona-Entladung auf den Abbau von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) und Gerüchen wurde eine zusätzliche Versuchsanlage gebaut, um den Abbau über den Biofilm vom Abbau über die Corona-Entladung zu trennen. Die Versuchsanlage wird in Abb. 7.1 dargestellt.



**Abb. 7.1: Versuchsanlage zu Untersuchungen des Abbaus von VOCs durch die Corona-Entladung**

Die Versuchsanlage besteht aus einem Platten-Elektroabscheider mit drei drahtförmigen Sprühelektroden (0,5mm Tantal). Das Volumen des Elektroabscheiders beträgt 4,43dm<sup>3</sup>. Die Fläche beider Elektroden beträgt 0,0624 m<sup>2</sup>. Die NE können mit Wasser berieselt werden. Um die Benetzung der Platten mit Wasser zu verbessern, wurden die Platten mit Kalkstein beschichtet.

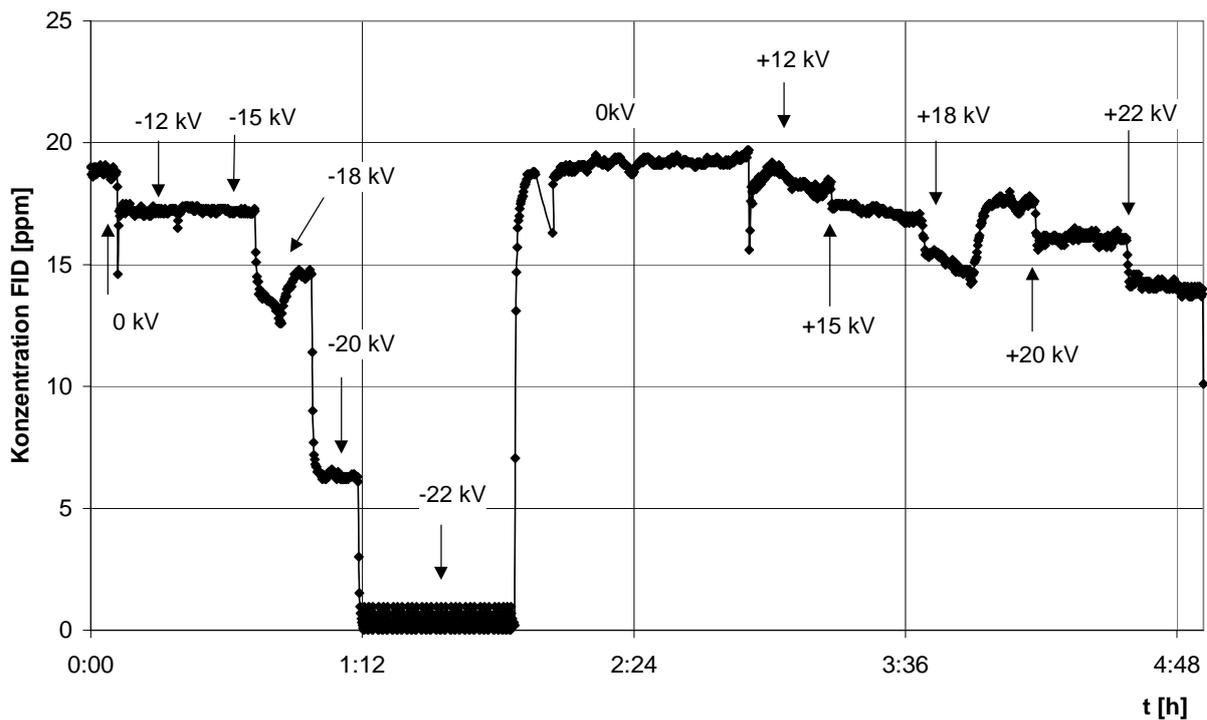
Als Modellsubstanz wurde Isopren verwendet. Isopren ist die meistverbreitete organische Substanz, die durch Pflanzen hergestellt wird (nach manchen Thesen als Schutz gegen Ozon). Isopren besitzt zwei Doppelbindungen, so dass die Reaktionen mit Ozon und Radikalen aus der Corona-Entladung besonders gut ausgeprägt sein sollten. Die Strukturformel wird in Abb. 7.2 dargestellt.



**Abb. 7.2: Strukturformel des Isoprens**

Aus der Literatur ist bekannt, dass Feuchte die Ozonreaktionen stark beeinflusst. Die Messungen wurden also für trockene und feuchte Bedingungen durchgeführt.

In Abb. 7.3 werden beispielhafte Rohergebnisse vom FID zur Abscheidung des Isoprens im Elektroabscheider dargestellt. Der Verlauf zeigt die Konzentration der gasförmigen Komponenten im Reingas bei unterschiedlichen Spannungen, die am Elektroabscheider angelegt wurden, an.



**Abb. 7.3: Rohergebnisse des FID zur Abscheidung des Isoprens im Elektroabscheider, negative und positive Polarität,  $u_{LR}=0,041\text{m/s}$ , Trocken-EA**

Das Beispiel zeigt eindeutig, dass im Elektroabscheider eine deutliche bis fast vollständige Abscheidung des gasförmigen Isoprens realisierbar ist, und zwar bei Betriebsbedingungen und spezifischen Energieverbräuchen, wie sie auch in der Partikelabscheidung üblich sind. Der Abscheidegrad hängt von der Polarität und der angelegten Spannung ab.

Die Mechanismen dieser Abscheidung konnten im Rahmen des Projektes nicht detailliert untersucht werden. Es darf aber angenommen werden, dass die Reaktionsmechanismen weitgehend analog sind zum Abbau von VOCs in der Atmosphäre. Neben der Ozonolyse (die überwiegend zu niedermolekularen, flüchtigen und gut wasserlöslichen Abbauprodukten führen sollte) müssen daher auch radikalische Reaktionen und insbesondere Oligomerisationsreaktionen in Betracht gezogen werden. Es kondensieren daher neugebildete Nanoteilchen aus. Diese werden (je nachdem wo die Kondensation erfolgt) in der Corona-Entladung nur teilweise elektrisch aufgeladen und abgeschieden. Es verwundert daher nicht, dass gleichzeitig mit dem VOCs-Abbau eine Emission von neugebildeten Partikeln aus dem Elektroabscheider gemessen wird, s. Abb. 7.4 und Abb. 7.5.

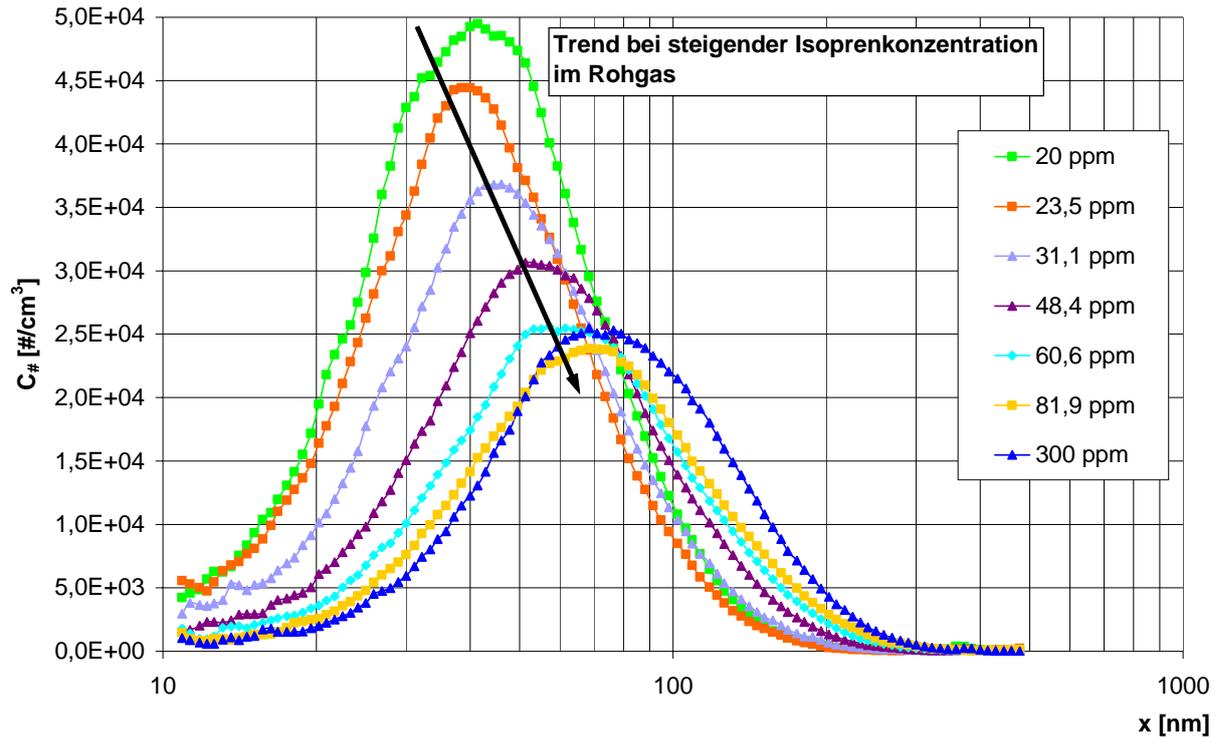


Abb. 7.4: Partikelherstellung im Elektroabscheider bei negativer Polarität bei verschiedener Konzentration des Isoprens,  $U=22$  kV,  $u_{LR}=0,041$  m/s, Trocken-EA

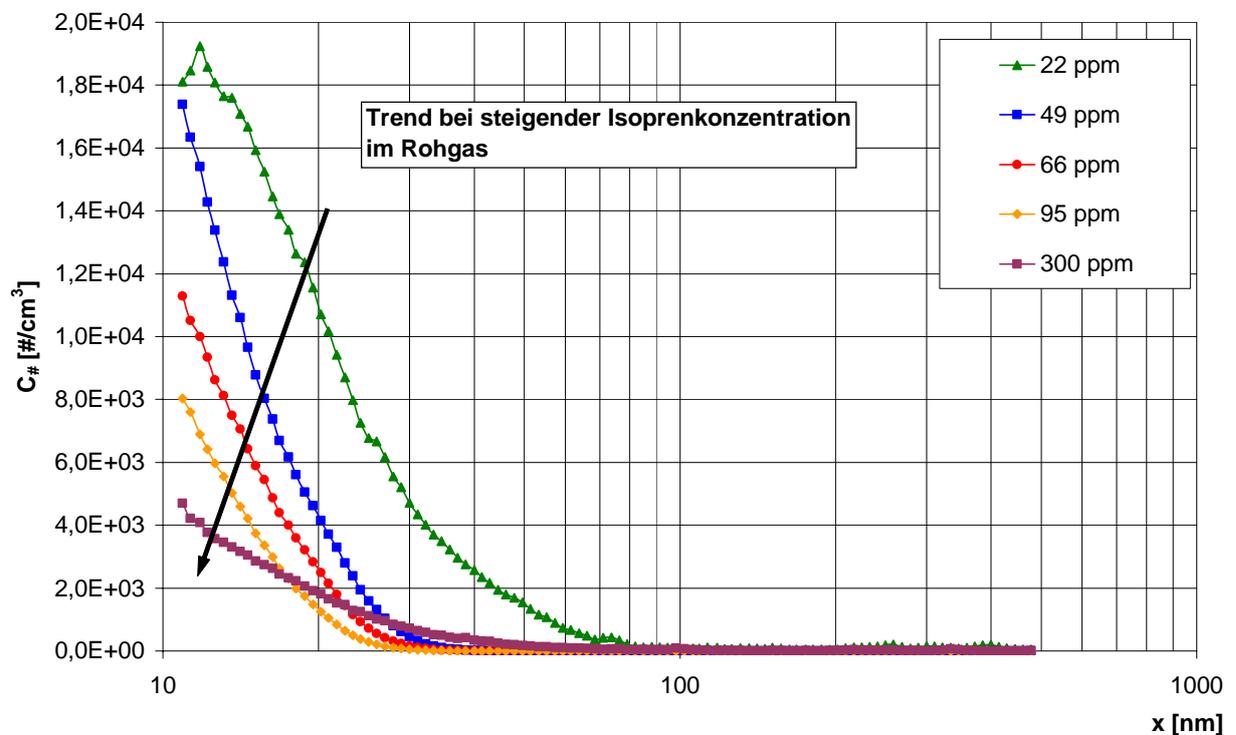
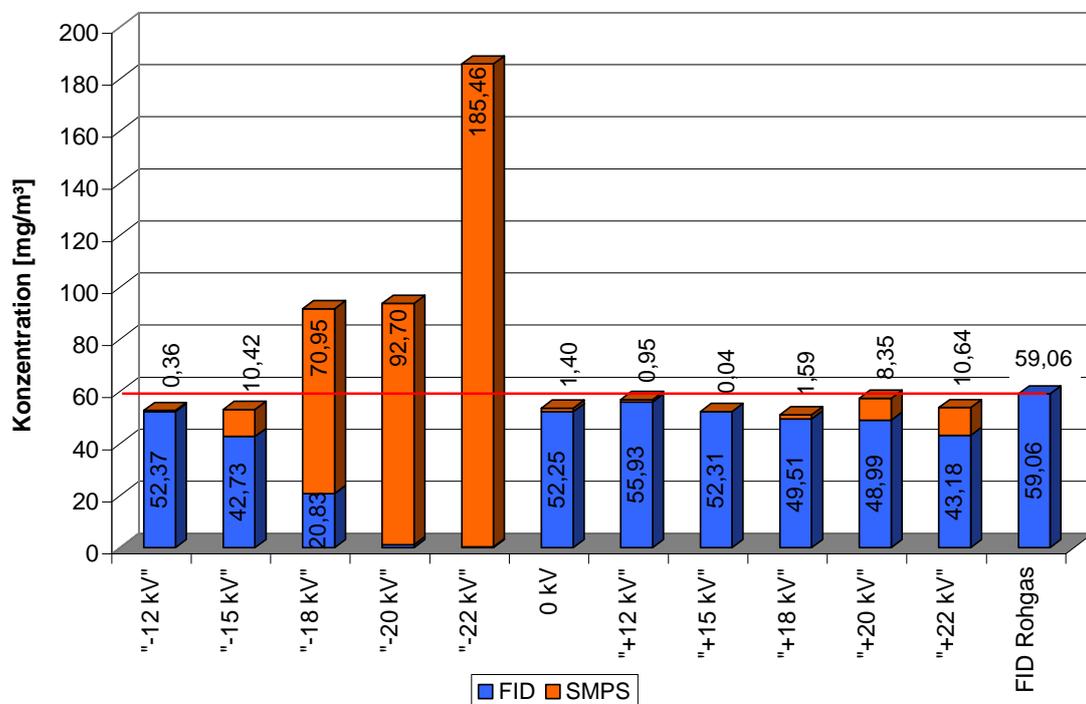


Abb. 7.5: Partikelherstellung im Elektroabscheider bei positiver Polarität bei verschiedener Konzentration des Isoprens,  $U=22$  kV,  $u_{LR}=0,041$  m/s, Trocken-EA

Für beide Messreihen ist ein eindeutiger Trend mit steigender Isoprenkonzentration im Rohgas zu erkennen. Die Anzahlkonzentration der Partikel sinkt, wobei sich die Verteilung bei der negativen Polarität nach rechts (größere Partikel) und bei der positiven Polarität nach links (feinere Partikel) verschiebt. Diese Tendenz ist vorerst nicht erklärbar.

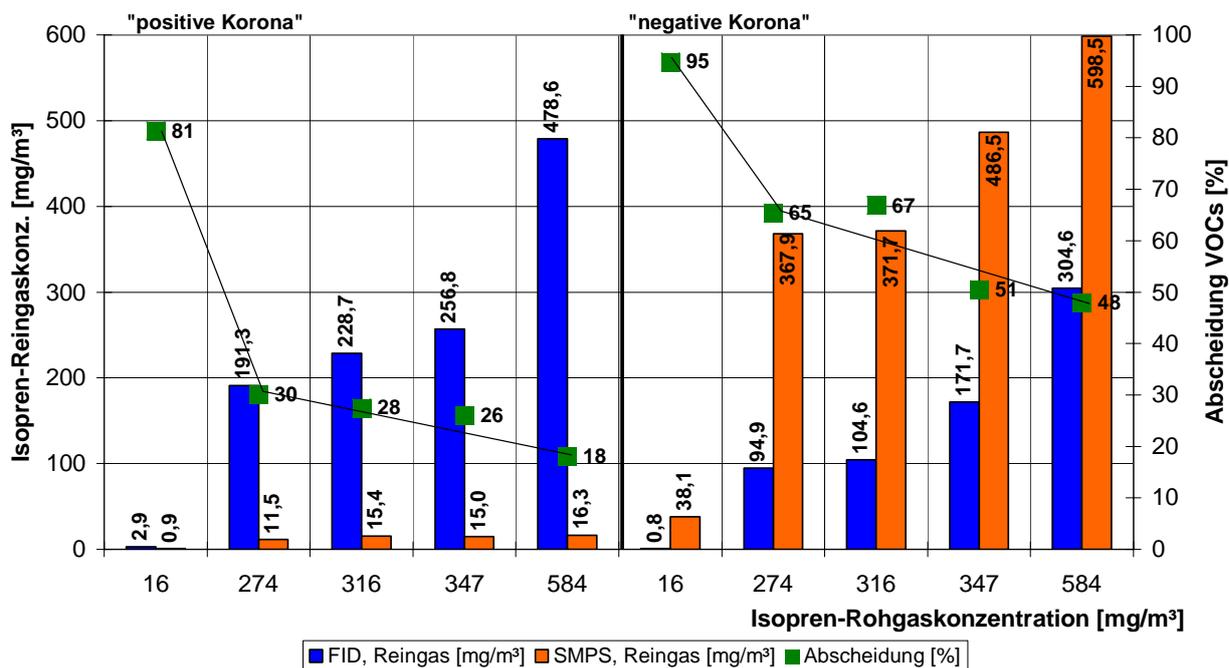
Mit der Annahme, dass die emittierten Partikel aus reinem Isopren bestehen, kann eine quasi-Mengenbilanz aufgestellt werden, d.h. es kann die Emission der gas- und partikelförmigen Komponenten im Vergleich zum Rohgaseintrag dargestellt werden. Dabei fehlt der Anteil, der im Elektroabscheider an der NE abgeschieden wird. Die Ergebnisse für verschiedene Spannungen und Polaritäten bei einer Rohgaskonzentration von 20 ppm werden in Abb. 7.6 dargestellt.



**Abb. 7.6: Kohlenstoffkonzentration (FID-Messung, Rein- und Rohgas) und Partikelanzahlkonzentration (SMPS-Messung, Reingas),  $C_{Roh} = 20$  ppm,  $u_{LR} = 0,041$  m/s, negative/positive Korona, Trocken-Elektroabscheider**

Es ist eindeutig zu sehen, dass die Menge der hergestellten Partikel mit zunehmender Spannung wächst und letztendlich ist die ausgetragene Reingasmassenkonzentration bei der höchsten untersuchten Spannung (22kV) höher als die Rohgasmassenkonzentration. Dies erklärt sich natürlich dadurch, dass die Partikel nicht nur aus Isopren bestehen, sondern weitere aus der Luft aufgenommene Stoffe (Sauerstoff, Stickstoff, Wasser) enthalten. Außerdem kann durch den Partikelform-Einfluss ein Fehler bei der Umrechnung der mit dem SMPS gemessenen Anzahlverteilungen auf die Volumenkonzentration der Teilchen erfolgen.

Trocken-EA,  $u_{LR}=0,009\text{m/s}$  ( $t_{vWZ}=32\text{s}$ ),  $U=22\text{ kV}$ , negative/positive Polarität



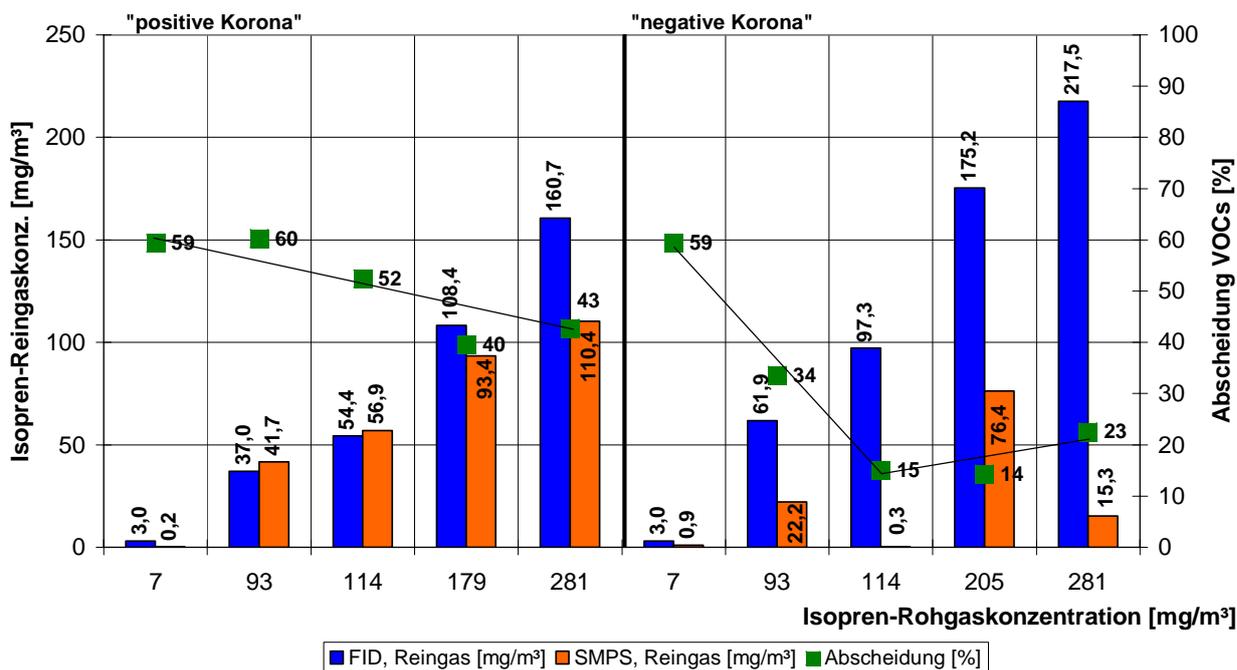
**Abb. 7.7: Reingaswerte von Kohlenstoffkonzentration (FID-Messung) und Partikelanzahlkonzentration (SMPS-Messung) und Abscheidung über der Isopren-Rohgaskonzentration im Trocken-EA,  $u_{LR}=0,009\text{m/s}$  ( $t_{vWZ}=32\text{s}$ ),  $U=22\text{ kV}$ , negative/positive Polarität**

Ergebnisse für verschiedene Isopren-Konzentrationen und Polaritäten bei 22 kV sind in Abb. 7.7 dargestellt.

Dieselben Messreihen wurden für Nass-EA wiederholt, siehe Abb. 7.8. Die Niederschlagselektrode wurde mit Wasser gespült und dadurch wurde eine relative Feuchte von nahezu 100% im Elektroabscheider erreicht.

Bei Testen im Nass-Elektroabscheider werden deutlich weniger Partikel im Vergleich zum Test im Trocken-Elektroabscheider emittiert bzw. gebildet. Weil die Abscheidegrade (bezogen auf die Gasphase – FID-Messung) wesentlich schlechter sind, sollte man annehmen, dass weniger Partikel gebildet werden. Die gebildeten Stoffe werden durch Wasser mindestens teilweise aufgenommen, was die Analyse des Spülwassers aus dem Elektroabscheider beweist, s. Anhang 2.

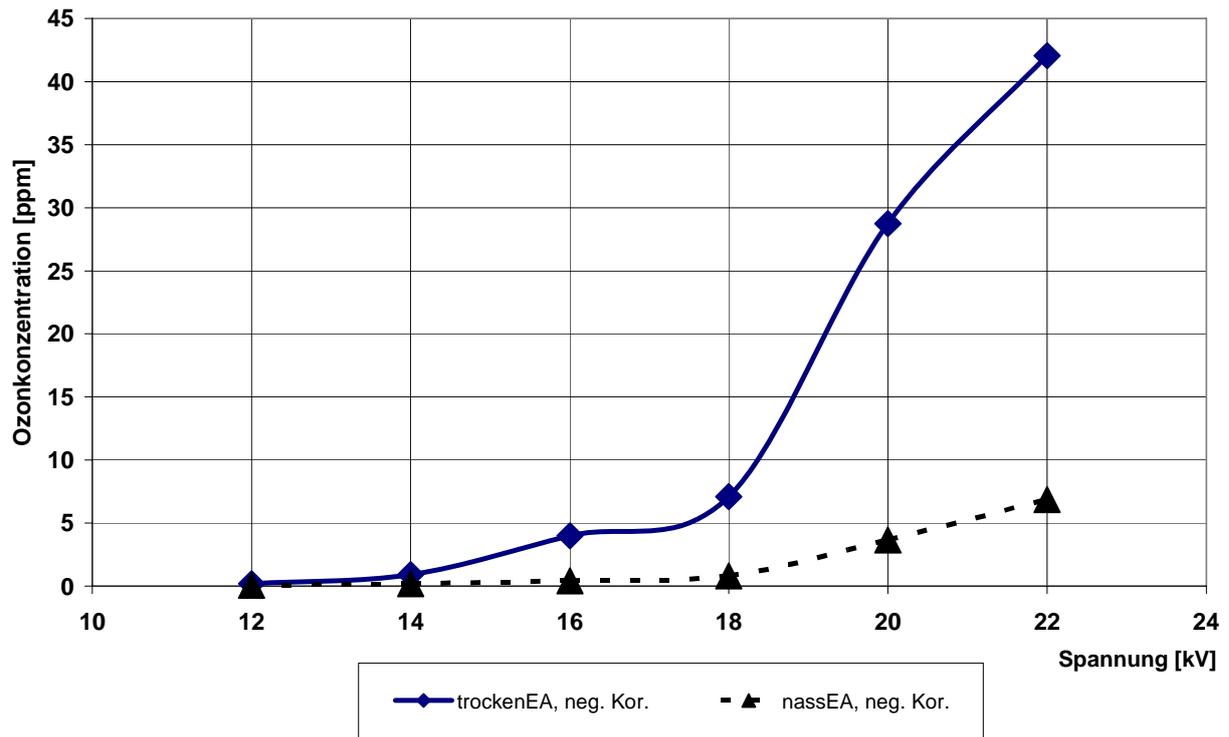
Nass-EA,  $u_{LR}=0,009\text{m/s}$  ( $t_{vWZ}=32\text{s}$ ),  $U=22\text{ kV}$ , negative/positive Polarität



**Abb. 7.8: Reingaskonzentration von Kohlenstoffkonzentration (FID-Messung) und Partikelanzahlkonzentration (SMPS-Messung) und Abscheidung über der Isopren-Rohgaskonzentration im Nass-EA,  $u_{LR}=0,009\text{m/s}$  ( $t_{vWZ}=32\text{s}$ ),  $U=22\text{ kV}$ , negative/positive Polarität**

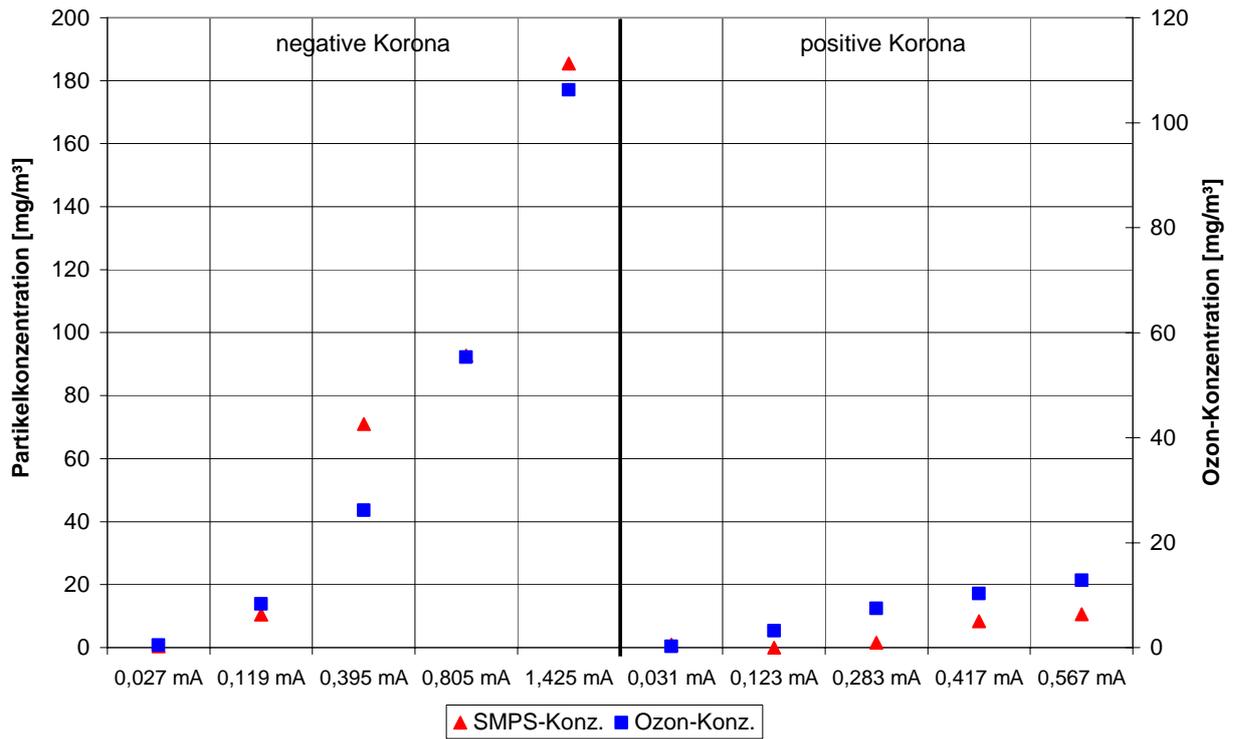
Durch Vergleich der Ergebnisse kommt man zu der Schlussfolgerung, dass man im Trocken-Elektroabscheider im Vergleich mit dem Nass-Elektroabscheider höhere Abscheidegrade des gasförmigen Isoprens erreicht. Die Tatsache lässt sich folgendes erklären. Im Nass-Elektroabscheider geht das im Elektroabscheider entstandene Ozon in die wässrige Phase über (Löslichkeit des Ozons im Wasser ist relativ gut – um Faktor ca. 10 besser als des Sauerstoffs). Dadurch steht das Ozon nicht mehr in der Gasphase zur Verfügung. Im Wasser reagiert Ozon zwar zu Radikalen ab und es folgen weitere Reaktionen, die aber eine untergeordnete Rolle bei Abscheidung aus der Gasphase spielen. Eine untergeordnete Rolle, weil Isopren schlecht wasserlöslich ( $0,7\text{g/l}$  bei  $20^\circ\text{C}$ ) ist und die Reaktionen in der Gasphase die entscheidende Rolle für die Gesamtabseidung des Isoprens.

Wenn Ozon ins Wasser übergeht steht es nicht mehr in der Gasphase zur Verfügung. In Abb. 7.9 wird die Konzentration des Ozons dargestellt, die nach dem Trocken- und Nass-Elektroabscheider gemessen wurde. Die Reingaskonzentration des Ozons ist keine reale Ozonkonzentration im Elektroabscheider, denn Ozon reagiert schon im Elektroabscheider. Trotzdem spiegelt die Reingaskonzentration die Konzentration des Ozons im Elektroabscheider wieder.



**Abb. 7.9: Vergleich der Ozonkonzentration Nass- und Trocken-EA,  $u_{LR}=0,041\text{m/s}$**

Die Vermutung, dass die Partikelbildung mit Ozon verknüpft ist, legen die in Abb. 7.10 dargestellten Ergebnisse nahe. Die Konzentration der Partikel hängt genauso wie die Ozonkonzentration von der Stromstärke ab. Die Abhängigkeit besteht bei allen Isoprenkonzentration, wobei, der Einfluss wesentlich stärker ist bei negativer Polarität, was noch stärker auf diese These verweist (der Mechanismus der Bildung von Ozon bei negativer/positiver Polarität).



**Abb. 7.10: Partikelkonzentration (Reingas) und Ozonkonzentration über der Stromstärke im Nass-EA,  $c_{roh}=20$  ppm,  $u_{LR}=0,041$  m/s, negative/positive Korona**

## 8 Prototypen

Das wichtigste Ziel des Projekts war, das Prinzip der bio-elektrischer Gasreinigung bis zu einem industriellen Prototyp zu entwickeln. Es wurde der Prototyp letztendlich in drei technischen Varianten gebaut. Diese Varianten werden als **BEGA Scheiben**, **BEGA Trommel** und **BEGA Packung** bezeichnet. Alle Anlagen sind modular aufgebaut ( $L \times B \times H = 1,2 \times 0,9 \times 1$  m). Sie unterscheiden sich durch anders ausgelegte Schüttungen/Packung und Sprühelektroden. Eine Folge ist ein unterschiedliches Verhältnis der Austauschfläche zwischen Schüttung und Elektroabscheider.

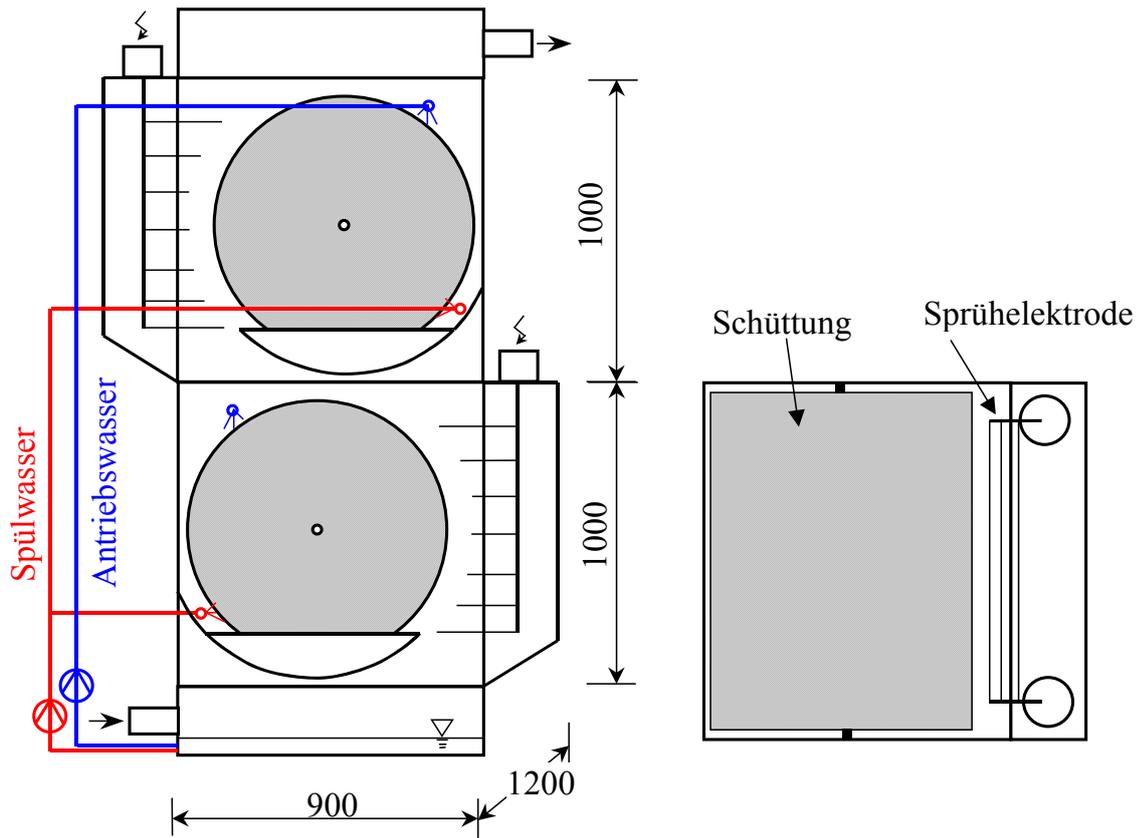
Die Prototypen **BEGA Scheiben** und **BEGA Trommel** wurden unter industriellen Bedingungen getestet. Während der industriellen Tests wurden Erfahrungen gesammelt, die es ermöglichten, die Konstruktion des BEGA zu optimieren (vor allem hinsichtlich der industriellen Tauglichkeit).

### 8.1 BEGA Trommel

Bei dieser Variante des Prototyps sind die Mikroorganismen auf losen Füllkörpern immobilisiert, die sich in einer Trommel befinden. Die Trommel wird nach der Art einer Wassermühle angetrieben. In der Trommel sind Becher eingebaut, die über eine Lanze mit Wasser befüllt werden, wodurch sich die Trommel mit 1,5-2,5 U/min dreht. Die Trommel ist in einer Wanne teilweise eingetaucht. Das kontinuierliche Umdrehen zerstört den Biofilm zwischen den Füllkörpern. In der Wanne hat der Biofilm die Möglichkeit, aus der Schüttung auszuschwimmen. Da die Trommel zu ca. 90% mit Füllkörpern befüllt ist, werden die Füllkörper ständig vermischt. Diskontinuierlich kann ein Wasserstrahl eingeschaltet werden, der den Biofilmaustrag und die Vermischung der Füllkörper unterstützt.

Die Sprühelektrode ist seitlich zur Trommel eingebaut. Es wurden 7 Tantal-Drähte mit  $\phi$  0,5mm verwendet, die die Trommel entlang eingebaut wurden.

Wie schon erwähnt wurde, hat das ganze Modul folgende Abmessungen:  $L \times B \times H = 1,2 \times 0,9 \times 1$  m, die Trommel hat  $L \times D = 1,0 \times 0,8$  m ( $0,5\text{m}^3$ ), die Austauschfläche zwischen Schüttung und Elektroabscheider beträgt  $0,63\text{m}^2$ . Die Gesamtanlage besteht aus 2 gleichartigen Stufen. Das Schema und ein Photo der Anlage sind in Abb. 8.1 und Abb. 8.2 dargestellt.



**Abb. 8.1: BEGA Trommel**



**Abb. 8.2: Prototyp BEGA Trommel, links: Gesamtansicht, rechts: Trommel mit Füllkörpern**

## 8.2 BEGA Scheiben

Bei diesem Prototyp wurde der biologische Teil in Form von Scheiben ausgelegt, die aus einer strukturierten Packung bestehen. In einem Modul befinden sich insgesamt vier Scheiben, zwei mit der Breite 200mm, und zwei mit der Breite 100mm. Zwischen diesen vier Scheiben befinden sich drei Sprühelektroden (auch aus  $\phi$  0,5mm Tantal-Draht). Die Scheiben sind auf einer Achse eingebaut, die mit einem kleinen Elektromotor angetrieben wird. Der Biofilm wird mit einer oben eingebauten Lanze berieselt. Das ganze Modul ist auch:  $L \times B \times H = 1,2 \times 0,9 \times 1$  m groß, das Gesamtvolumen der Scheiben ist  $0,3\text{m}^3$ , die Austauschfläche zwischen Schüttung und Elektroabscheider beträgt  $2,48\text{m}^2$ . Die Gesamtanlage besteht ebenso wie BEGA Trommel aus 2 Stufen. Das Schema und ein Photo der Anlage wurden in Abb. 8.3 und Abb. 8.4 dargestellt.

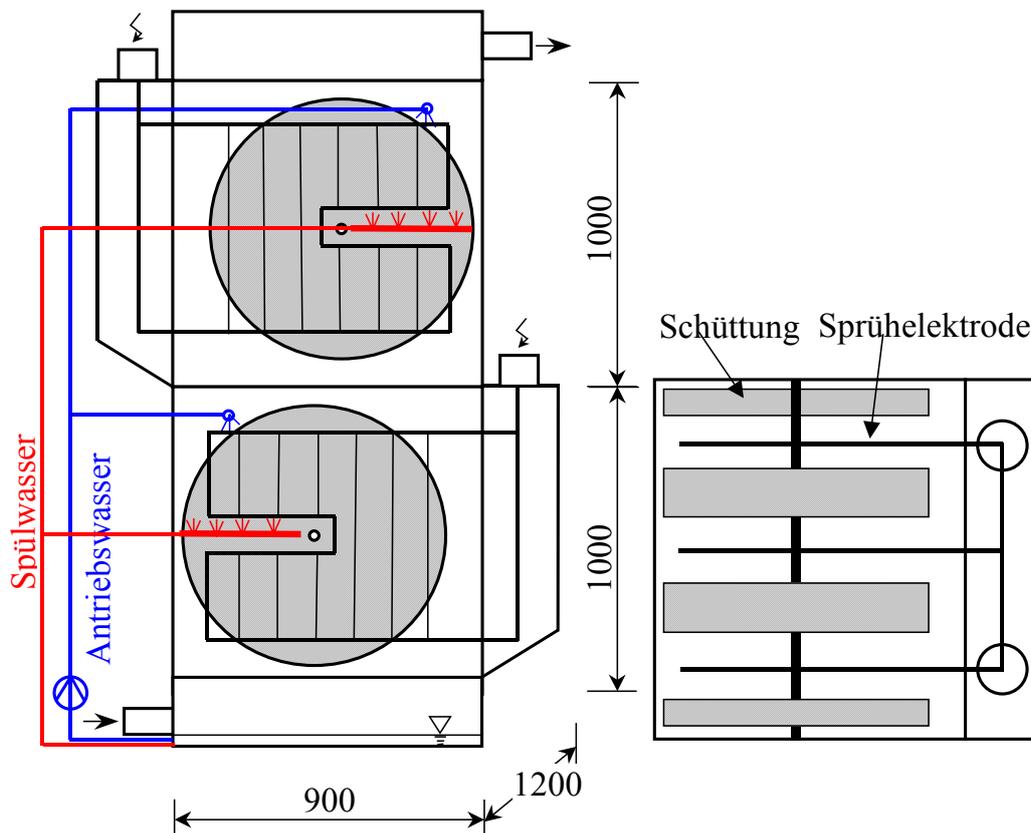


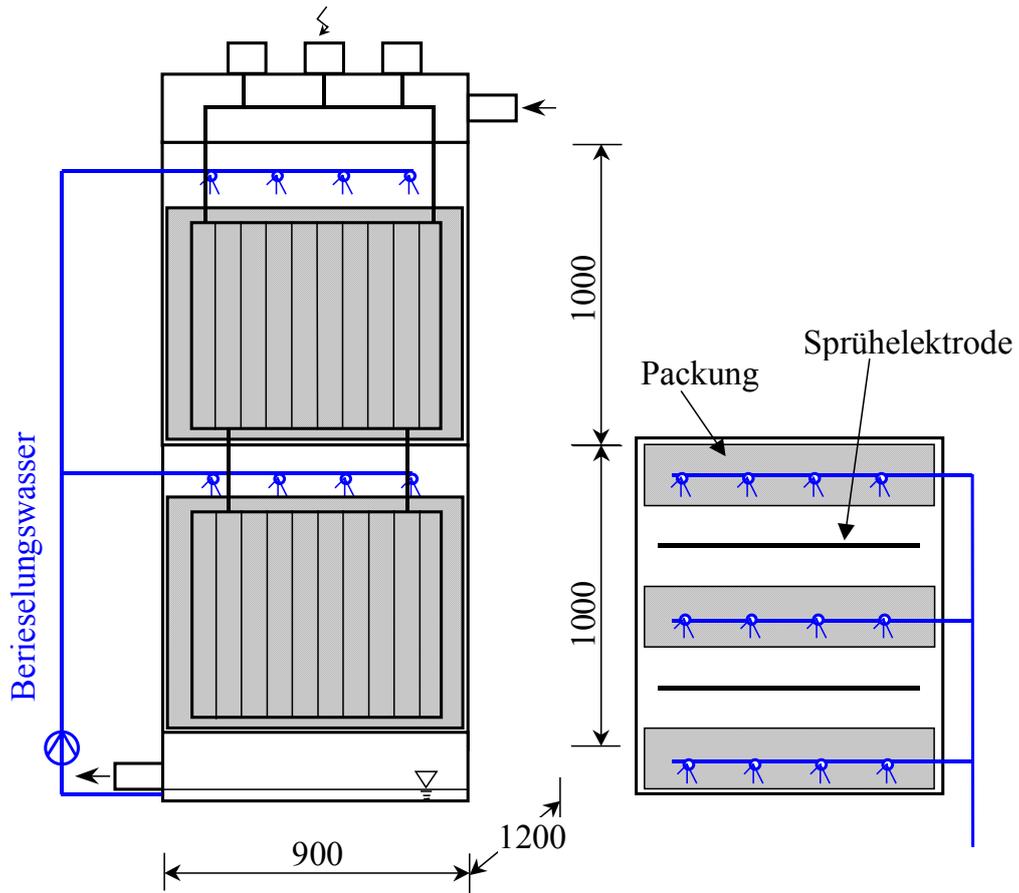
Abb. 8.3 BEGA Scheiben



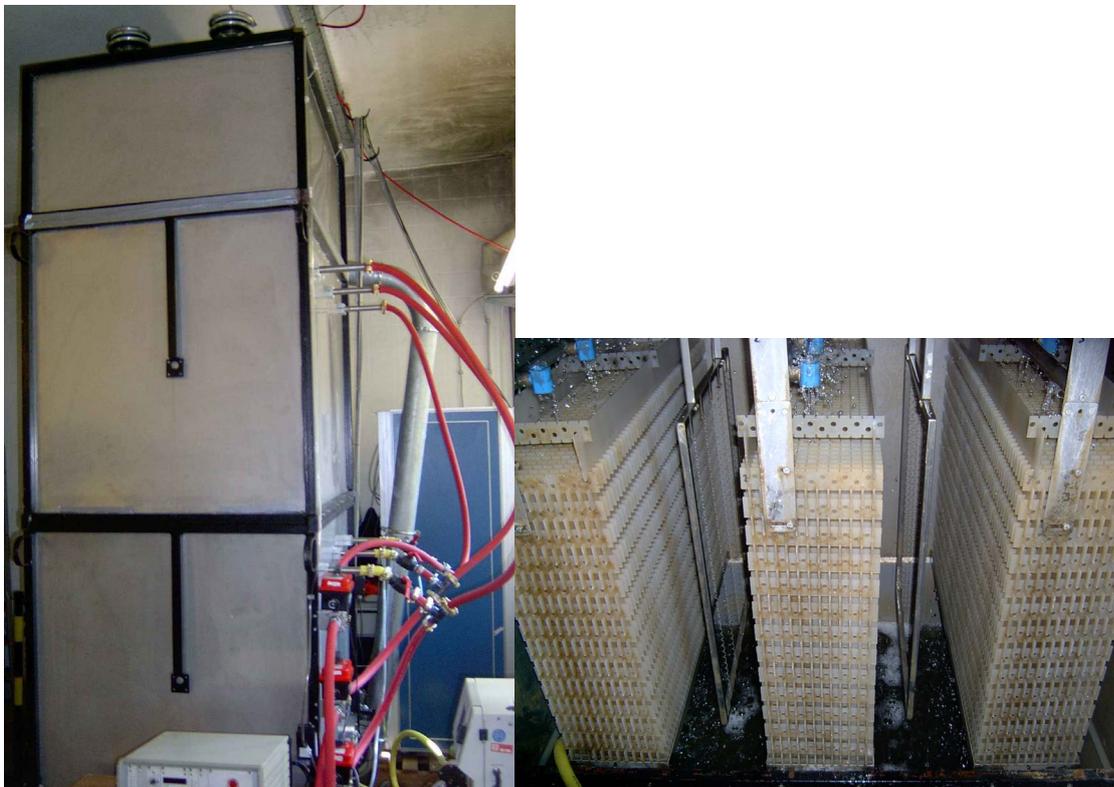
**Abb. 8.4: Prototyp BEGA Scheiben, links: Gesamtansicht, rechts: Scheiben-Packung**

### **8.3 BEGA Packung**

Die dritte technische Variante des Prototyps zeichnet sich dadurch, dass die Biofilter-Zone als eine fest eingebaute strukturierte Packung ausgelegt wurde. Der Prototyp ist wie frühere Prototypen modular aufgebaut ( $L \times B \times H = 1,2 \times 0,9 \times 1\text{m}$ ). Die Sprühelektrode in diesem Prototyp ist am oberen Deckel senkrecht durch die Anlage angehängt. Das gibt zwei SE, die zwischen drei Packungen (je Stufe) hängen. Die EA-Gasse besitzt eine Breite von 220mm und die Packung ist auch 220mm breit. Die Austauschfläche zwischen Schüttung und Elektroabscheider beträgt  $1,05\text{m}^2$ . Das Volumen der Packung beträgt  $0,413\text{m}^3$ . Die Gesamtanlage besteht in diesem Fall auch aus 2 Stufen, s. Abb. 8.5, Abb. 8.6.

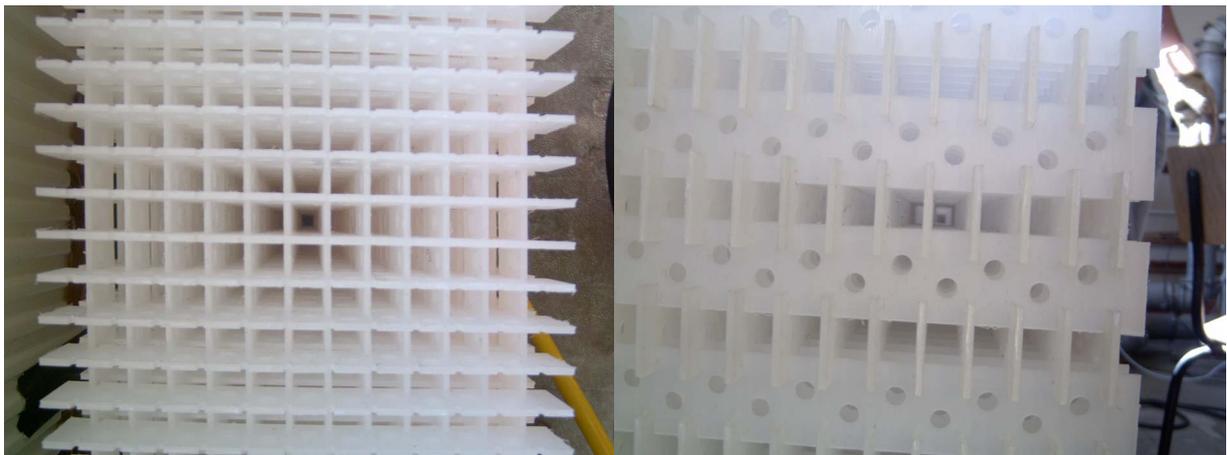


**Abb. 8.5: BEGA Packung Schema**



**Abb. 8.6: BEGA Packung, Photo**

Die Packung wurde selbst entwickelt, um den Biomasseausstrag zu erleichtern. In Abb. 8.7 und Abb. 8.8 ist die Packung dargestellt. Sie wurde aus einer aufgerauten Polypropylen-Platte mit der Dicke von 3mm gefertigt. Die spezifische Oberfläche der Packung beträgt  $169 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Nach Heits [Hei98] und Goßen [Goß90] ist der Lückengrad die Größe, die den Biomasseausstrag aus der Packung/Füllkörper stark beeinflusst. Der Lückengrad beträgt bei dieser Packung in der horizontalen Richtung 24,5% und in der vertikalen Richtung 69,5%, dadurch wird der Biomasseausstrag bei der Spülung ausgerichtet und begünstigt, s. Abb. 8.7.



a) Sicht von oben

b) Sicht von der Seite

**Abb. 8.7: Strukturierte Packung vom Prototyp BEGA Packung**

Die Berieselung und Spülung der Packung wird über 4 Düsen (Vollkegeldüsen aus PVDF von der Fa. Lechler Baureihe 423.008, 49,81 l/min bei 5,0 bar,  $120^\circ$ ) realisiert, die sich jeweils über der Schüttung befinden, Abb. 8.8.



**Abb. 8.8: Berieselung über Vollkegeldüsen**

## **8.4 Technischer Vergleich der Prototypvarianten**

Die drei Varianten des Prototyps unterscheiden sich wesentlich in der Austauschfläche zwischen dem Elektroabscheider und dem Biorieselbettreaktor, Volumen des Biorieselbettreaktors und der spezifischen Oberfläche des Biofilmträgers. Der Vergleich der Parameter befindet sich in Tab. 8.1.

**Tab. 8.1: Parameter des Prototyps BEGA Trommel, BEGA Scheiben, BEGA Packung**

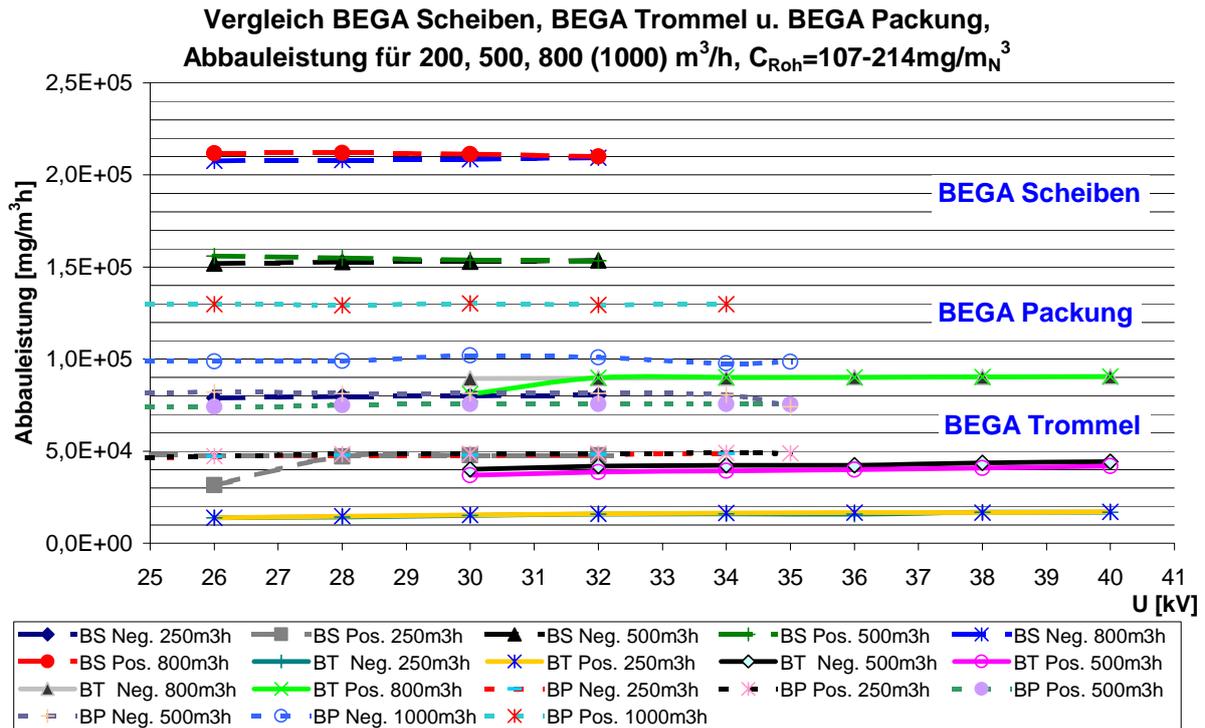
Variante des Prototyps	$A_{EA-BF}$ [m <sup>2</sup> ]	$S_V$ [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	$V_{Schüttung}$ [m <sup>3</sup> ]	$V_{Stufe}$ [m <sup>3</sup> ]
Trommel	0,63	190	0,502	1,08
Scheiben	2,48	180	0,302	1,08
Packung	1,05	169	0,413	1,08

## **8.5 Laborvergleich: BEGA Trommel, BEGA Schieben und BEGA Packung**

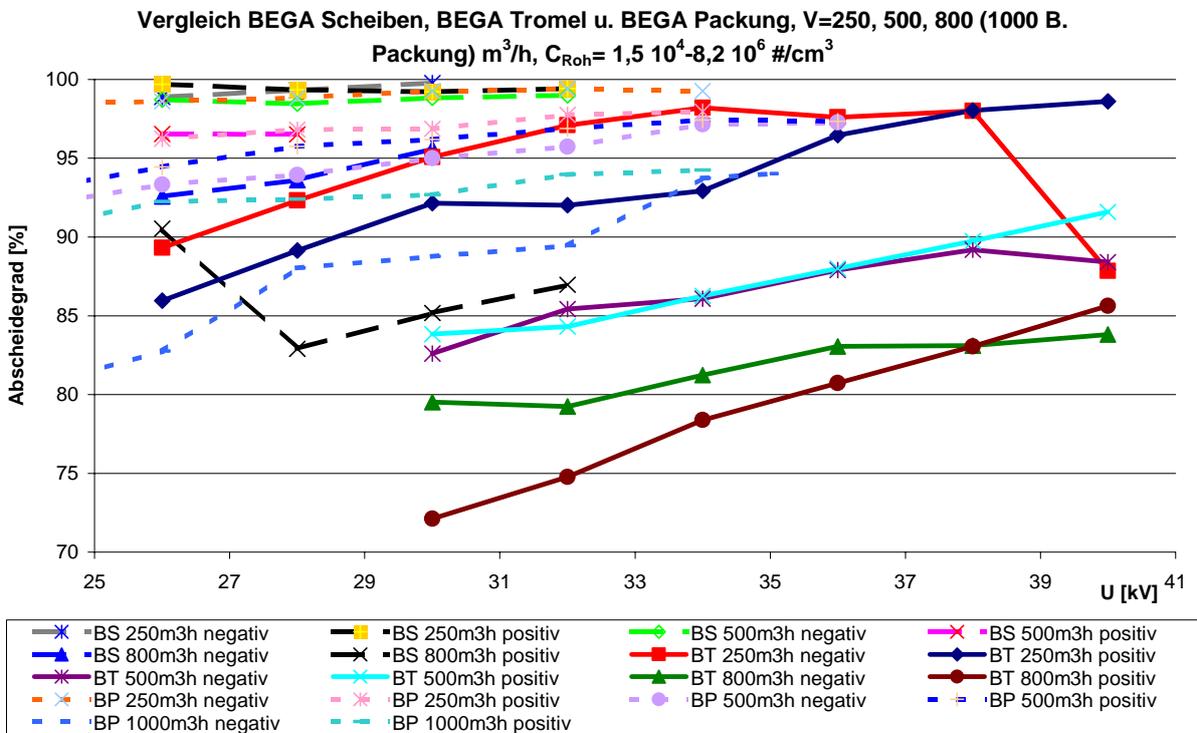
Die Variante des Prototyps wurden im Labor hinsichtlich Staub- und Geruchsabscheidung mit Modellstaub und Modellgeruchsstoff untersucht. Als Modellstaub wurde Pentaerythrit und als Modellgeruchsstoff Isopropanol verwendet. Die Anlage wurde mit Volumenströmen bis 800m<sup>3</sup>/h (bei BEGA Packung 1000m<sup>3</sup>/h) betrieben. Der Volumenstrom ergab sich durch die maximale Leistung des Ventilators.

Der Vergleich zwischen allen drei Prototypen ist in Abb. 8.9 für den VOCs-Abbau und in Abb. 8.10 für die Staubabscheidung dargestellt.

Der Vergleich der technischen Varianten zeigt eindeutig, dass BEGA Trommel die schlechteste Ausführung bezüglich Geruchs- als auch Staubabscheidung ist. Die besten Ergebnisse wurden mit BEGA Scheiben erreicht. Die Varianten BEGA Trommel und BEGA Scheiben wurde in der ersten Projektphase entwickelt. Die Dauertests zeigten, dass die beweglichen Teile (Trommel, Scheiben), eine Quelle technischer Probleme sind, deswegen wurde beim nächsten Prototyp BEGA Packung auf rotierende Teile verzichtet und nach dem positiv ausgefallenen Dauertest wurde diese Variante als Standard anerkannt.



**Abb. 8.9. BEGA Trommel (BT), BEGA Scheiben (BS) und BEGA Packung (BP), Vergleich der Abbauleistung von Isopropanol C<sub>Roh</sub>=107-214mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (40-80ppm) für diverse Volumenströme  $\dot{V}$ =250, 500, 800 (für BEGA Packung 1000) m<sup>3</sup>/h und Spannungen**

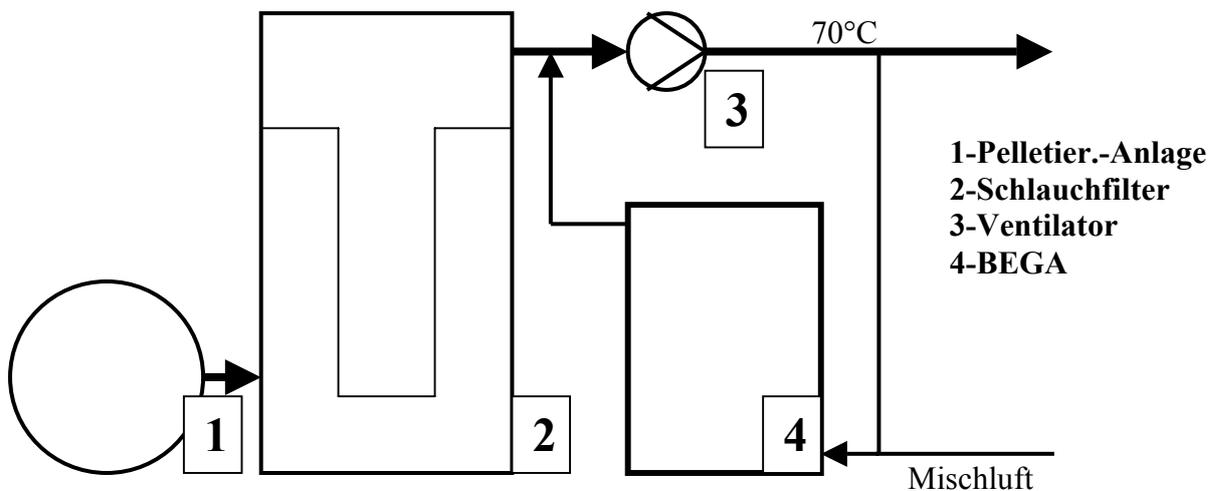


**Abb. 8.10. BEGA Trommel (BT), BEGA Scheiben (BS) und BEGA Packung (BP), Gesamtabscheidegrade (anzahlbezogen) vom Staub für diverse Volumenströme  $\dot{V}$ =250, 500, 800 (für BEGA Packung 1000) m<sup>3</sup>/h**

## 8.6 Industrierversuche

### 8.6.1 Der Industrietest Nr. 1

Ein erster Industrietest mit BEGA Trommel fand im Zeitraum vom November 2005 bis Juni 2006 bei der Fa. Südzucker Bioethanol in Zeitz statt. Fa. Südzucker Bioethanol in Zeitz stellt aus Getreide Ethanol her. Die Produktionsgetreideabfälle werden getrocknet und pelletiert. Die Pellets werden als Tierfutter verkauft. In dieser Produktionsphase entsteht ein Geruch, der von der Nachbarschaft des Werks als sehr belästigend gefunden wird. Der Geruch wird von Probanden der Olfaktometrie als würzig, verbrannt säuerlich, Getreide, frisches Brot, Brühwürfel benannt. Die Temperatur des Abgases beträgt bis 70°C. Es wurden drei Messreihen durchgeführt. Die Versuchen erfolgten zunächst mit verdünntem Abgas (Abgas: Luft ca. 1:1, mittlere Temperatur 40°C) bei Volumenströmen von 500 und 1000m<sup>3</sup>/h, dann auch mit unverdünntem Abgas, Temperatur ca. 55-60°C bei 500m<sup>3</sup>/h. Abb. 8.11 stellt ein Schema der Anordnung dar.

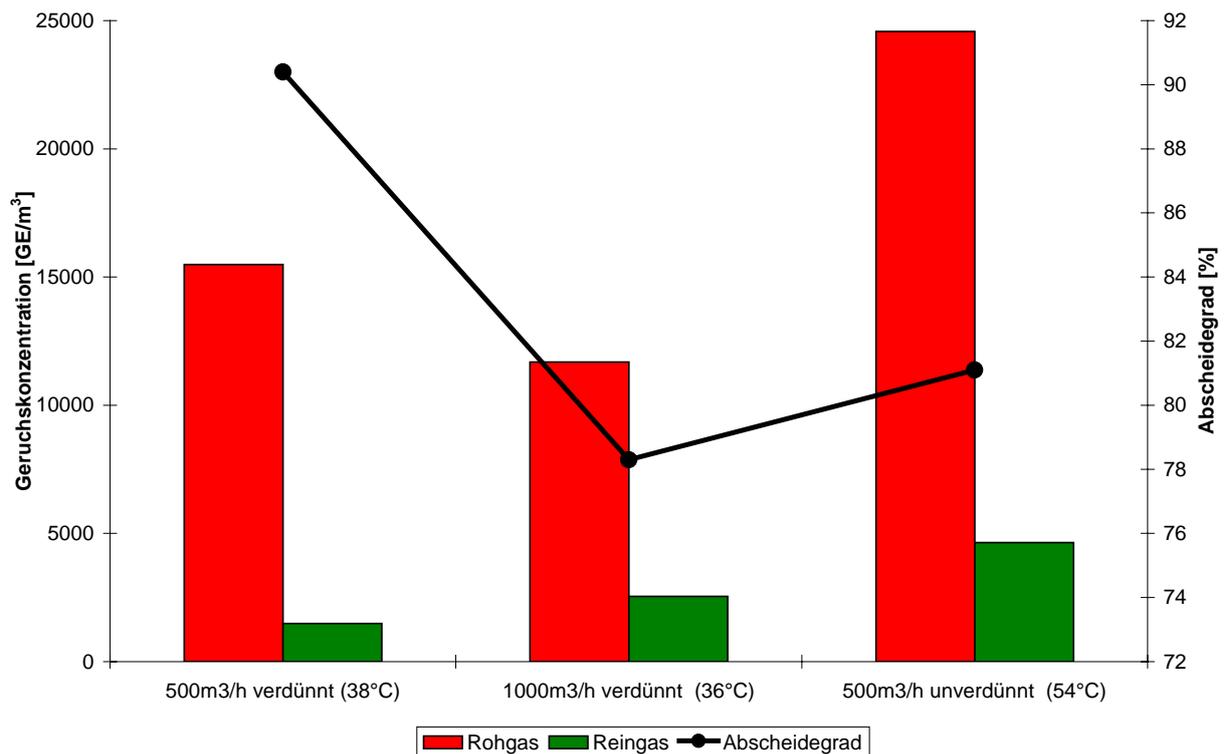


**Abb. 8.11: BEGA Trommel im Einsatz bei der Pelletierungsanlage der Fa. Südzucker Bioethanol in Zeitz**

Die Ergebnisse zur Geruchsabscheidung werden in und in Abb. 8.12 dargestellt. Das Ergebnis zur Staubabscheidung wird in Tab. 8.3 gezeigt.

**Tab. 8.2: Ergebnisse der Geruchsabscheidung durch BEGA Trommel im Einsatz bei der Pelletierungsanlage der Fa. Südzucker Bioethanol in Zeitz**

Test	Rohgas - Temperatur [°C]	Rohgas-Qualität	Reingas-Qualität	Rohgas-Konz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Reingas-Konz. [GE/m <sup>3</sup> ]	Abscheidegrad [%]
500m <sup>3</sup> /h verdünnt	37,6	Würzig, verbrannt, säuerlich, Getreide	Brot, staubig, mehlig	15482	1490	90,4
1000m <sup>3</sup> /h verdünnt	36,3	Würzig, frisches Brot, Brühwürfel	Brot, pilzig	11678	2538	78,3
500m <sup>3</sup> /h unverdünnt	54,2	Herb, säuerlich	Sauer, Brot, süßlich, deutlich	24575	4640	81,1



**Abb. 8.12: Ergebnisse der Geruchsabscheidung durch BEGA Trommel**

**Tab. 8.3: Ergebnisse der Staubabscheidung durch BEGA Trommel (gravimetrische Messung auf Glasfaserfilter, Abgas unverdünnt, 50°C, 500m<sup>3</sup>/h, Spannung variiert: -30kV, 0kV, +30kV)**

	Rohgas [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Reingas [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Abscheidung [%]
BEGA Trommel, Abgas unverdünnt, 54°C, 500m <sup>3</sup> /h	1,373	0,117	91,5*

\* - ein so niedriger Wert entstanden durch teilweisen Betrieb bei 0kV

BEGA lief bei den Versuchen im Vergleich mit weiteren Verfahren zur Geruchsminderung (Aktivkohle-Filter mit Vorbehandlung, Kältekondensation) und wurde als technisch und wirtschaftlich interessante Alternative (siehe auch Ökobilanz, Anhang 3) eingeschätzt.

Es gab allerdings deutliche Mängel bei der technischen Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb und gegenüber betriebstechnischen Ereignissen wie Eintrag von metallischen Fremdkörpern in die Anlage, Unterbrechungen der Strom oder Wasserversorgung. Ausfall der vorgeschalteten Schlauchfilteranlage mit extrem starkem Staubeintrag und Eindringen von sirupartigem Kondensat in den Ventilator etc. BEGA wurde während dieses Einsatzes mehrfach umgebaut und verbessert und es wurde dabei sehr wertvolle Erfahrungen gesammelt, die bei der Entwicklung der nächsten Variante des Prototyps BEGA Packung umgesetzt wurden.

### **8.6.2 Der Industrietest Nr. 2**

Der zweite industrielle Test fand in Zeitraum von Juli 2007 bis Oktober 2007 bei der Fa. Cargill in Barby statt. Zum Einsatz kam BEGA Packung. Es wurde die Abluft vom Vorlagesilo der Futtertrockner im BEGA behandelt. Die Rohgastemperatur lag im Bereich T=70-80°C, deswegen wurde das Rohgas auch mit Luft verdünnt. Die Verdünnung wurde so realisiert, dass im BEGA-Rohgas eine Temperatur von T<sub>BEGA-Rohgas</sub>=40°-50°C erreicht wurde. Die Messungen wurden für Reingas-Volumenströme von ca. 200 bis ca. 1700m<sub>B</sub><sup>3</sup>/h durchgeführt. Die Versuchsanordnung wird in Abb. 8.13 dargestellt. Die Ergebnisse zur VOCs-Konzentration (mit FID gemessen) werden in Abb. 8.14 dargestellt.

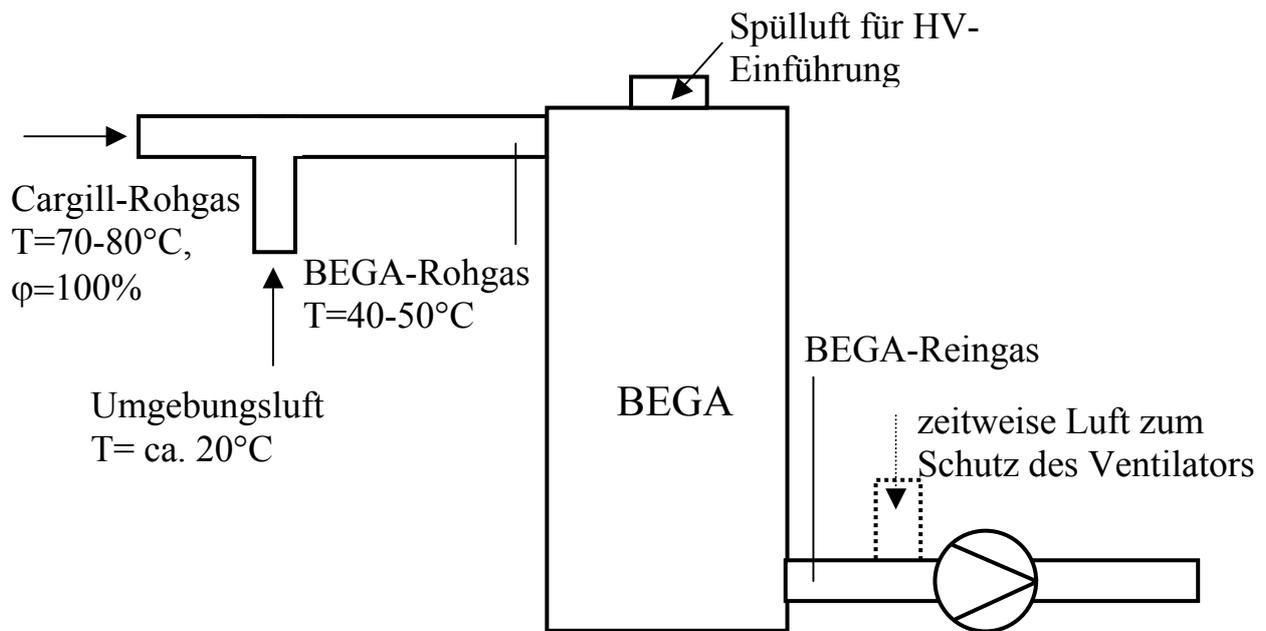


Abb. 8.13: Versuchsanordnung

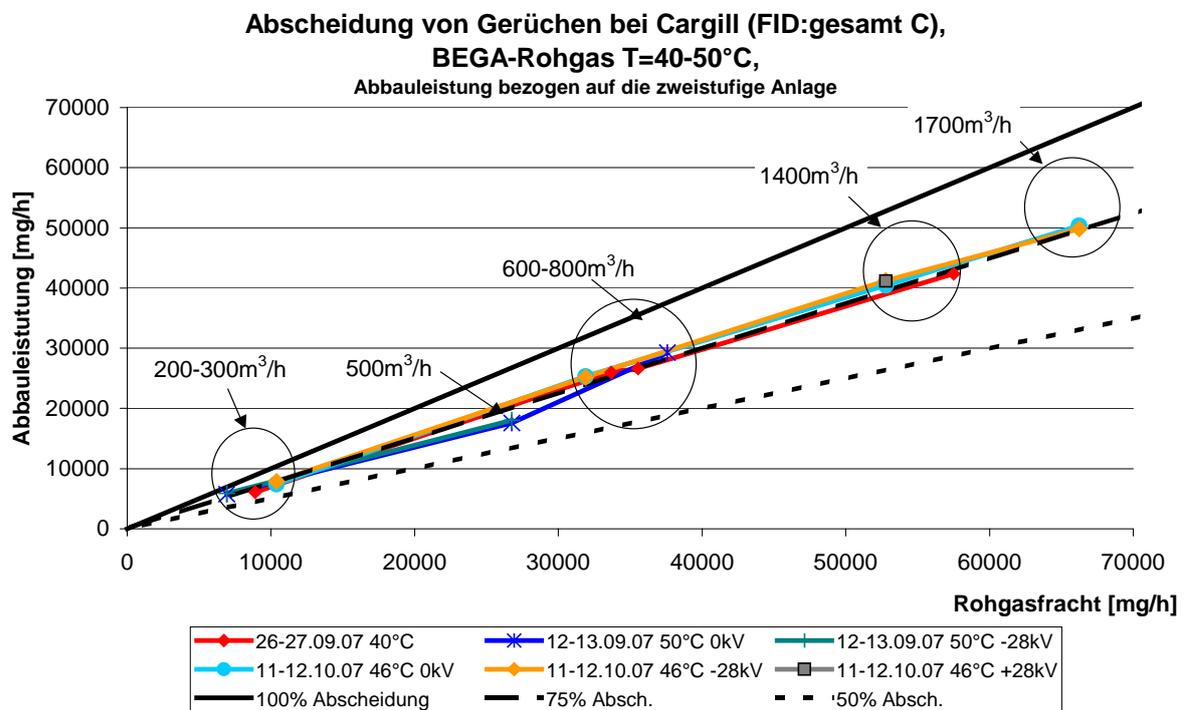
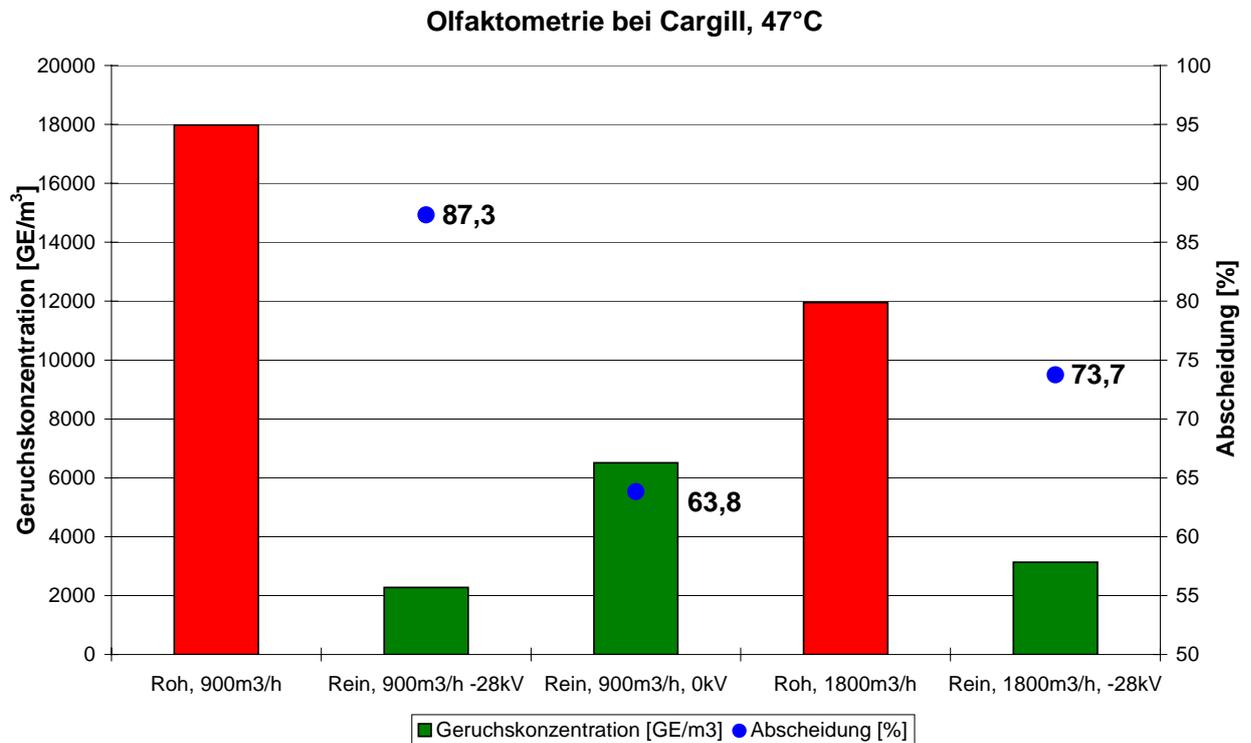


Abb. 8.14: Abbau des organischen Kohlenstoffs,  $C_{\text{BEGA-Rohgas}} = \text{ca. } 20 \text{ ppm}$ ,  $T_{\text{BEGA-Rohgas}} = 40-50^\circ\text{C}$ , Werte bezogen auf die real behandelten Volumenströme (BEGA-Rohgas/BEGA-Reingas)

Die Ergebnisse zur Geruchsabscheidung (olfaktometrisch von TÜV Nord Systems GmbH & Co.KG gemessen) werden in Abb. 8.15 dargestellt. Es wurden Messungen für zwei Volumenströme von 900m<sup>3</sup>/h und 1800m<sup>3</sup>/h durchgeführt, wobei bei 900m<sup>3</sup>/h noch ein zusätzlicher Test mit ausgeschalteter Hochspannung (0kV) durchgeführt wurde.



**Abb. 8.15: Geruchskonzentrationen und Abscheideleistung,  $\dot{V}_{\text{BEGA}} = 900$  und  $1800 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_{\text{BEGA-Rohgas}} = 47^\circ\text{C}$ , bei  $900 \text{ m}^3/\text{h}$  mit/ohne Spannung**

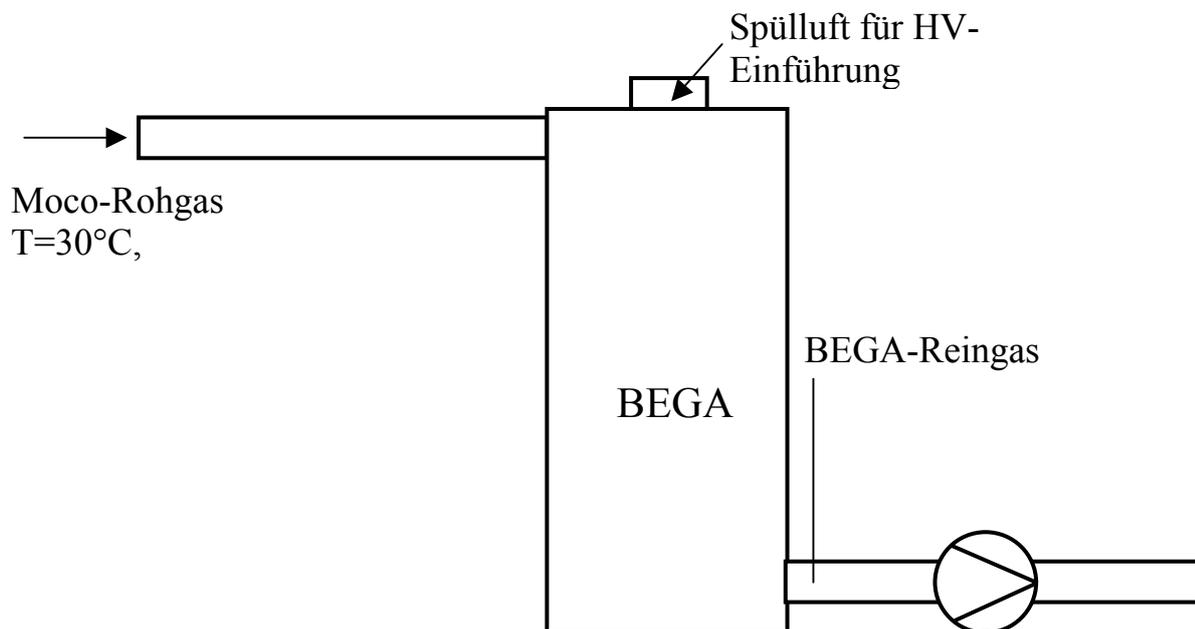
Die olfaktometrischen Ergebnisse zeigen, dass der Elektroabscheider einen erheblichen Einfluss auf den Geruchsabbau hat (900m<sup>3</sup>/h mit und ohne Spannung), was in der FID-Messung nicht widerspiegelt wird.

Dieser Effekt ist auch aus der anderen Messungen bekannt und kann wie folgt geklärt werden: Der größte Anteil der Geruchsbelastung entsteht durch eine Gruppe von stark funktionalisierten Verbindungen (mit -OH, -SH, -NH<sub>3</sub>, -COOH... -Gruppen), die durch Reaktionen in der Coronaentladung besonders effizient abgeschieden werden, aber nur einen geringen Anteil zum Gesamtkohlenstoff beitragen.

Mit der Zunahme des Volumenstroms (von 900m<sup>3</sup>/h auf 1800m<sup>3</sup>/h) sinkt die Abscheidung.

### 8.6.3 Der Industrietest Nr. 3

Der dritte Industrietest fand bei der Fa. Pinufin Moco in Ulm statt. Der Test wurde von der Fa. Junker Filter durchgeführt, nachdem als sie den Prototyp von der BTU Cottbus übernommen hatte. Zur Behandlung kam das Abgas von einem Extruder, in dem Holzspäne mit geschmolzenem Polypropylen vermisch werden. Die volle chemische Analyse befindet sich im Anhang 4. Das Moco-Rohgas hat eine Temperatur von ca.  $T=30^{\circ}\text{C}$ . Die Messungen wurden für Reingas-Volumenströme von ca. 1200 bis ca.  $2200\text{m}_\text{B}^3/\text{h}$  durchgeführt. Die Versuchsanordnung wird in Abb. 8.16 dargestellt.



**Abb. 8.16: Versuchsanordnung**

In Abb. 8.17 werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellt. Die Abscheidegrade für VOCs sind relativ gering bei 30-50%. Dies ist auf die schlechte biologische Abbaubarkeit der einzelnen Stoffe zurückzuführen und die Anwesenheit des Terbutryns, das ein Fungizid ist (es tötet auch andere Mikroorganismen). Schon nach dem Abschluss des Projekts (Mai 2008) wurde durch die Fa. Junker Filter ein zusätzlicher Test, in dem BEGA durch einen Ozon-Generator unterstützt wurde, durchgeführt, s. Abb. 8.18.

Abbauleistung von Gerüchen bei MOKO in Ulm (FID:gesamt C),  
Gleich-/Gegenstrom, 14-15.02.08

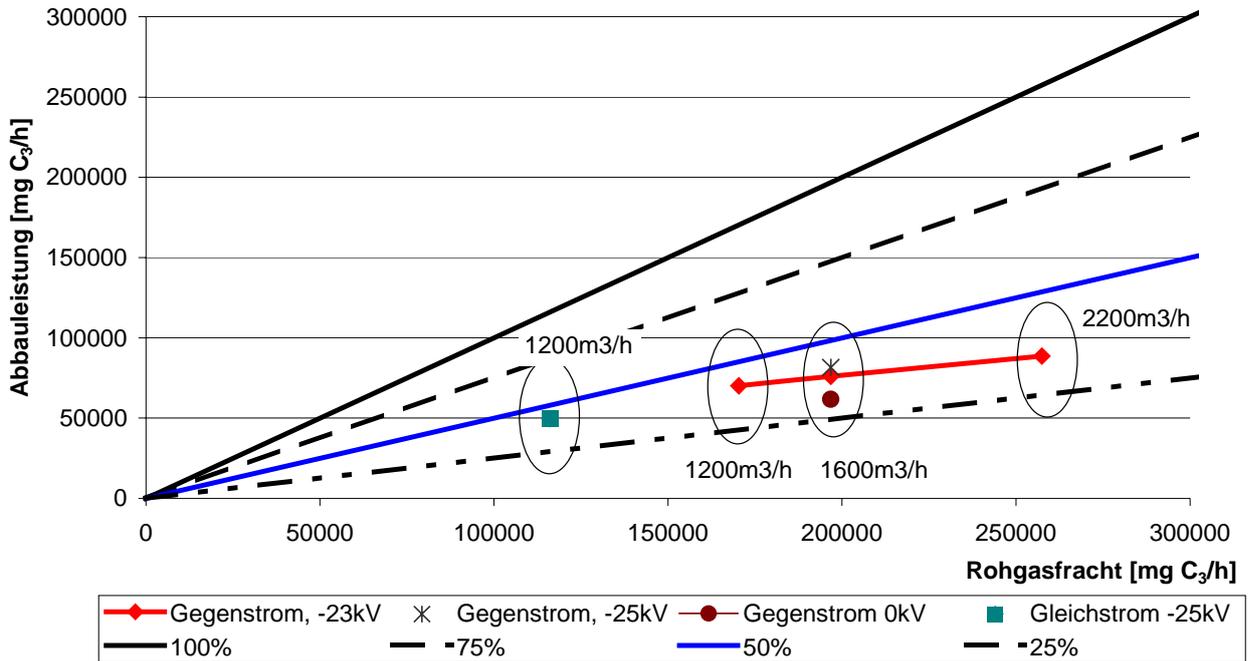


Abb. 8.17: Abbau des organischen Kohlenstoffs,  $C_{\text{MOKO-Rohgas}} = \text{ca. } 50\text{-}70\text{ppm}$ ,  
 $T_{\text{MOKO-Rohgas}} = 30^\circ\text{C}$

Messungen zur Ozon-Unterstützung bei MOCO in Ulm (13.05.08)  
BEGA ohne Biofilm, O<sub>3</sub>-Generator mit 14g/h O<sub>3</sub>

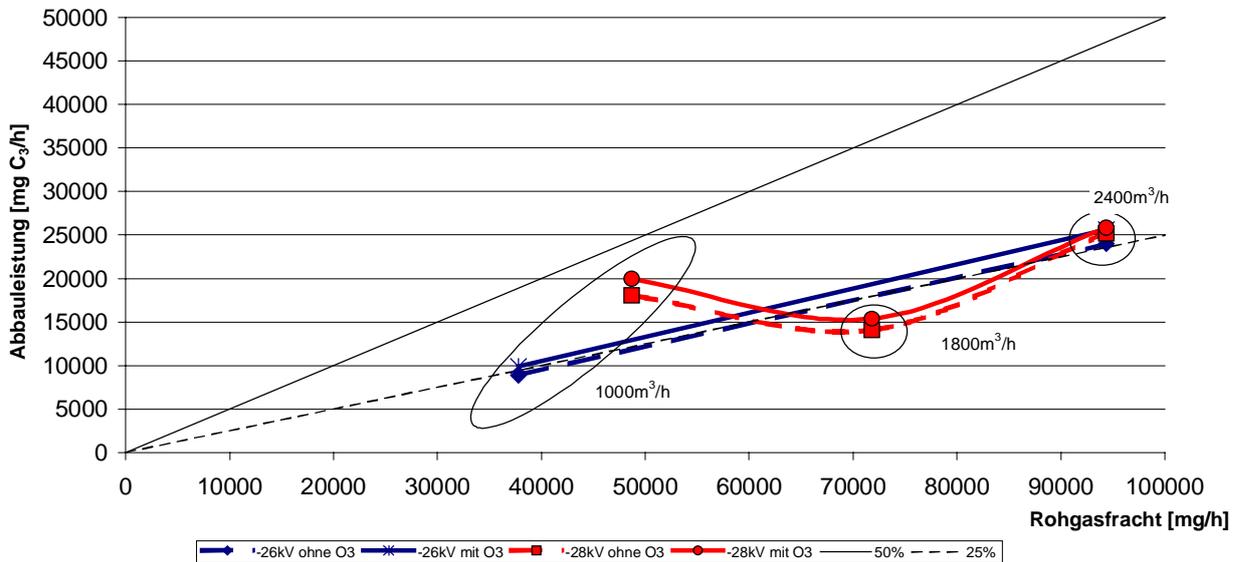


Abb. 8.18: Abbau des organischen Kohlenstoffs für Spannungen  $-26\text{kV}$  und  $-28\text{kV}$ ,  
ohne und mit Ozon-Unterstützung

Die Ozonunterstützung brachte von 0,5 bis 4% Abbauverbesserung als Gesamtkohlenwasserstoff. Die Geruchsnote verbesserte sich (eine olfaktometrische Abschätzung vom Anlagenbetreiber) soweit, dass der Kunde Interesse am Kauf von BEGA mit Ozonunterstützung äußerte.

## 9 Fazit

Mit dem vorliegenden Bericht wird das Projekt unter dem Titel „Hocheffiziente Abscheidung von Stäuben und Geruchsstoffen mittels eines neuen Bio-Elektrischen Geruchs-Abscheiders (BEGA)“ abgeschlossen. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az.: 21479 gefördert.

Das Ziel des Projekts war es, das im LS MVT der BTU Cottbus entstandene Konzept BEGA (DBPA: 103 19 351.0), für einen einstufigen Geruchs- und Staubabscheider zu einem funktionsfähigen Verfahren zu entwickeln.

In Rahmen des Projekts wurden die auch Grundlagenuntersuchungen durchgeführt. Die Grundlagenuntersuchungen beweisen, dass der elektrische Wind eine wichtige Antriebskraft für den Stoffaustausch im BEGA ist. Es wurde ein erfolgreiches Konzept zum Biomasseausttrag erarbeitet. Messungen der Keimemission zeigen, dass BEGA keine sekundäre Keimemission verursacht. Es wurden drei Varianten des Prototyps gebaut, die anschließend im Labormaßstab getestet wurden. Zwei Varianten des Prototyps BEGA Trommel und BEGA Packung wurden im industriellen Maßstab getestet. Nach den Dauer- und Industrietest wurde die Variante BEGA Packung wegen seiner Leistung und mechanischer Zuverlässigkeit als Standard anerkannt, der von der Antragstellerin Fa. Junker Filter vermarktet wird. Die Ökobilanz zeigt, dass BEGA ein interessantes Verfahren zur Geruchs- und Staubbeseitigung ist, das deutliche ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber konventionellen Lösungen besitzt.

*Für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit möchten wir uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Projekt 21479) bedanken.*

## Literaturverzeichnis

[Afo00] Afonso D.: Etude du vent électrique Internal Report LEGP Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2000 zitiert in [Loi02] Loiseau J.F., et al.: „*Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor*“, Journal of Physics D: Applied Physics 35, S. 1020-1031, 2002

[Bae92] Baerns M., et al.: „*Chemische Reaktionstechnik*“, Georg Thieme Verlag Stuttgart New York, 1992, ISBN 3-13-687502-8

[Bun93] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: „*Abluftreinigung mit Biofiltern und Biowäschern*“, Schriftenreihe Umwelt Nr. 204, Luft, 1993

[Gai01] Gai S., et. al.: „*Der Rotationstropfkörper – Ein neues Reaktorkonzept in der biologischen Gasreinigung*“, Chemie Ingenieur Technik (73) 3/2001, S. 171-182

[Ker70] Kercher, H.: „*Elektrischer Wind, Rücksprühen und Staubwiderstand als Einflußgrößen im Elektrofilter*“, Fortschritt-Berichte VDI-Z, Reihe 6, Nr. 27, Düsseldorf, 1970

[Koh83] Kohler H., Lachenmayer U., Paul E.: „*Biologische Abluftaufbereitung*“, WLB Wasser Luft und Betrieb ½ 1983, s. 64-71

[Loi02] Loiseau J.F., Batina J., et al.: „*Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor*“, Journal of Physics D: Applied Physics 35, S. 1020-1031, 2002

[Mac95] Maćkowiak J.: „*Formaldehydentfernung aus der Abluft in einer Biofilteranlage im technischen Maßstab*“ in „*Abluftreinigung, Theorie und Praxis biologischer und alternativer Technologien*“ Konferenz veranstaltet vom Umweltbundesamt Österreich, Wien 1995, Umweltbundesamt Österreich, Wien 1995

[Rap03] Rapp T., Wiesmann U.: „*Biologisch-chemische Verfahrenskombination zur Reinigung von Mischabwässern der Textilveredlung*“, Chemie Ingenieur Technik 75 (2003), 4, , s. 450-453

[Roo89] Roos C., Fischer K.: „*Konstruktionsmöglichkeiten für Biofilter*“, VDI Berichte Nr. 735, 1989, 179-189

[Woo91] Woolsey G.A., et.al.: Proc. SPIE 1584, Fiber Optic and Laser Sensor, IX; s:243-253; 1991 zitiert in [Loi02] Loiseau J.F., Batina J., et al.: „*Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor*“, Journal of Physics D: Applied Physics 35, S. 1020-1031, 2002

## Anhang 1

Die dimensionslose Verweilzeit wird folgendes berechnet:

- aus Verweilzeitverteilungen wird die mittlere Verweilzeit  $\tau_{\text{Real}}$  in der Anlage als der Moment 1.-Ordnung der Verteilung durch die folgende Gleichung ausrechnen[Bae92]:

$$\tau_{\text{Real}} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \text{Gl. 1}$$

- über die Geometrie der Anlage und den jeweiligen Volumenstrom wurde eine theoretische Verweilzeit ( $\tau_{\text{Geom}}$ ) ausgerechnet, die für eine bestimmte Geschwindigkeit eine Konstante ist, s. Gl. 2.

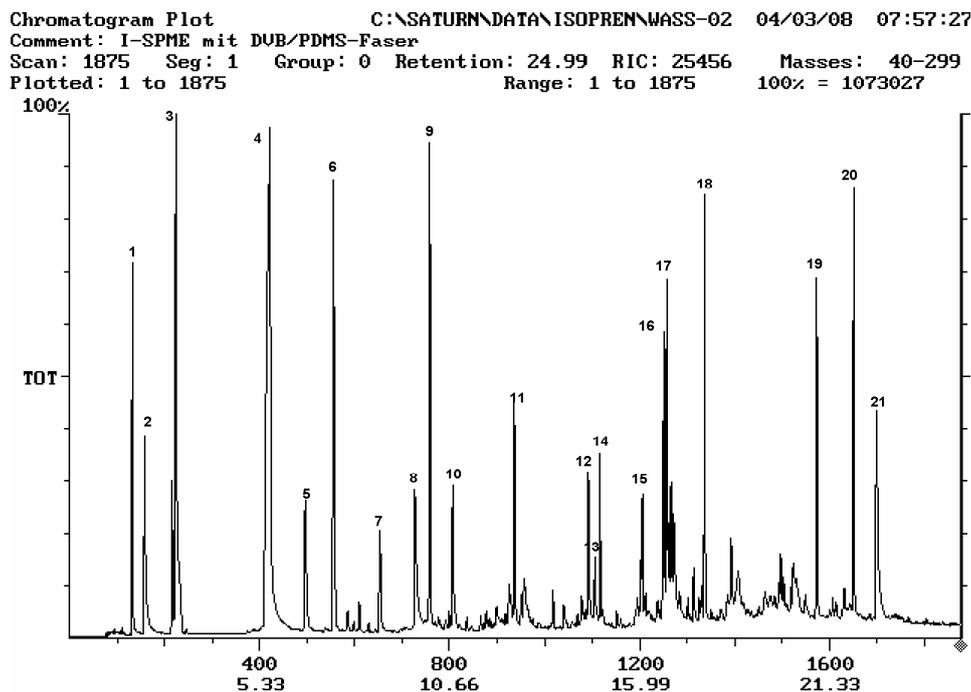
$$\tau_{\text{Geom}} = \frac{V_{\text{Anlage}}}{\dot{V}} \quad \text{Gl. 2}$$

- aus beiden Größen wurde eine dimensionslose Verweilzeit  $\theta$  ausgerechnet, die durch die Gl. 3 gegeben wird.

$$\theta = \frac{\tau_{\text{Real}}}{\tau_{\text{Geom}}} \quad \text{Gl. 3}$$

## Anhang 2

### Analyse des Spülwassers aus dem Nass-Elektroabscheider



**Abb. 0.1: Chromatogramm des Abwassers aus dem Test mit Nass-EA**

Das Abwasser wurde mittels GC-MS-Screening mit SPME-Anreicherung auf organische Inhaltsstoffe untersucht. In der Probe wird eine Menge von organischen Verbindungen nachweisen. In Tab. 0.1 sind für Peaks 1-21 einige Vorschläge eingetragen, die durch den Spektrenvergleich mit der NIST-MS-Datenbank (ca. 6000 Einträge) erhalten worden sind. Es sind nur die Nummern eingetragen, zu denen ein Vorschlag oder eine Bemerkung gemacht werden konnte. Eine genauere Identifizierung der Verbindungen ist nur durch das Einspritzen der vermuteten Verbindung und mit Hilfe der chemischen Ionisierung möglich.

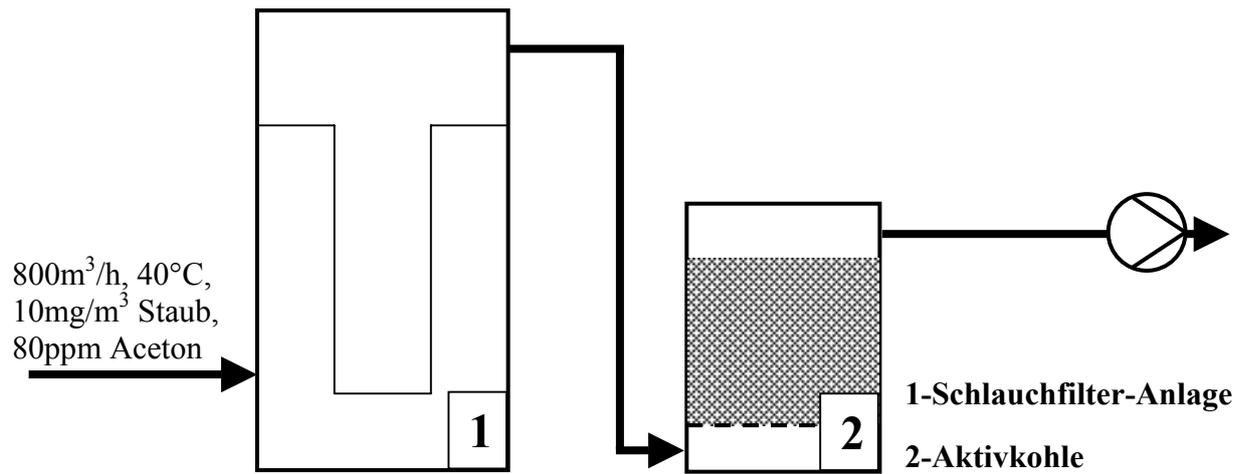
**Tab. 0.1: Auswertung zum Chromatogramm vom Abwasser des Nass-EA**

Peak Nr.	Vorschlag NIST-MS-Datenbank	Bemerkung
01	n-Propylacetat	
02	Kein Vorschlag	polare Verbindung
03	Kein Vorschlag	polare Verbindung
07	Kein Vorschlag	aromatische Verbindung
14	Propanoic acid, 2-methyl-3-hydroxy-2,4,4-triphenyl	
16	Butylated Hydroxytoluene	sehr wahrscheinlich
17	Phosphorsäuretributylester	
18	Diethylphthalat	sehr wahrscheinlich
19	kein Vorschlag	Phthalat (evtl. Verunreinigung)
20	kein Vorschlag	Phthalat (evtl. Verunreinigung)
21	kein Vorschlag	aromatische Verbindung

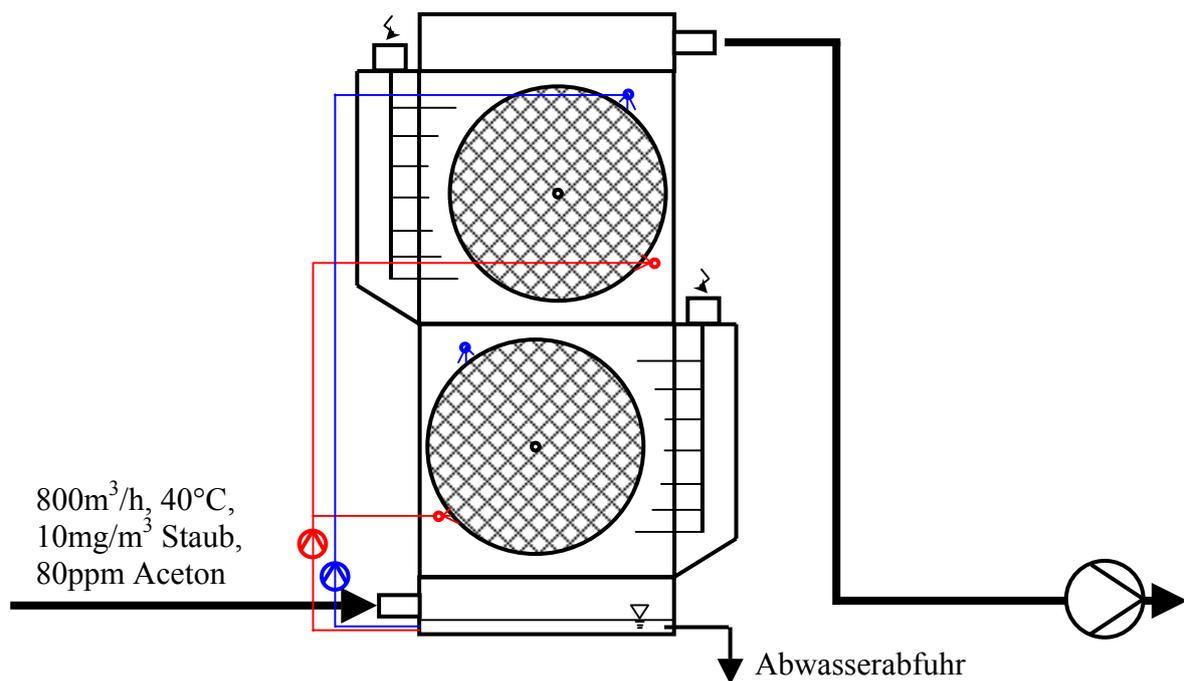
### Anhang 3

Ökobilanz wird normalerweise als ein Vergleich zwischen zwei Verfahren aufgestellt. In diesem Fall wird ein herkömmliches Verfahren mit BEGA verglichen. Eine typische Lösung zur Beseitigung eines Geruchs- und Staubproblems ist Verwendung von Staub- und Geruchsabscheider, die in Reihe geschaltet werden. Die Wahl des Verfahrens und auch die Reihenfolge der Stufen (Staub/Geruchsabscheidung, Geruch/Staubabscheidung) ist das eine Entscheidung, die genau auf das vorkommende Problem abgestimmt werden muss [Roo89]. Die Verfahren, die zur Geruchsentfernung in Frage kommen sind: Verbrennung (thermisch, katalytisch), Adsorptionsverfahren, Kondensation, Ozonierung, Biofilter [Kob95], [Gre90]. Zur Staubentfernung werden üblicherweise folgende Verfahren verwendet: Zykclone, Nassabscheider, Filternde Abscheider, Elektroabscheider [Löf98].

Als Vergleichsverfahren wird hier ein filternder Abscheider (Schlauchfilter) in Kombination mit einem Adsorptionsverfahren (Aktivkohle) angenommen. Das ist eine typische Lösung für niedrige VOCs-Konzentrationen, bei denen die Nachverbrennung unwirtschaftlich ist: Alle nötigen Daten werden für eine Anlage mit einem Durchsatz  $800\text{m}^3/\text{h}$  angenommen. Als Staub wurde ein klebriger Staub mit der Konzentration  $10\text{mg}/\text{m}^3$  angenommen, als Geruchstoff Aceton mit der Konzentration 80ppm. Der verbrauchte Aktivkohle wird verbrannt. Die Aktivkohle könnte auch, z.B. mit Dampf, regeneriert werden, was aber mit einem großen Aufwand (Herstellung und Reinigung des Dampfes) verbunden ist. Das Regenerieren der Aktivkohle ist im Vergleich mit der Verbrennung kostenmäßig günstiger, aber es ist unter dem ökologischen Gesichtspunkt ein schlechteres Verfahren. Die Kosten der Aktivkohle kann man durch die Anwendung von Herdofenkoks senken, dessen Preis um 85% niedriger ist, und dessen Adsorptionskapazität lediglich ein bisschen schlechter ist, [Voo00]. Die Aktivkohlemenge, die zur Entfernung benötigt wird, wurde anhand der Daten (Gleichgewichtsisothermen, Gleichungen) aus der Literatur [Duo98] und [Sil06] berechnet. Der Schlauchfilter wurde für eine typische Filtrationsgeschwindigkeit (ca.  $50\text{m}/\text{h}$ ) ausgelegt. Aktivkohle wird mit der Geschwindigkeit  $0,1\text{m}/\text{s}$  durchgeströmt. Die Höhe der Schüttung beträgt  $1,1\text{m}$  und die Partikelgröße der Aktivkohle beträgt  $1\text{mm}$ . Die Anlage wird in Abb. 0.2 schematisch dargestellt. Für die gleichen Randbedingungen (Volumenstrom, Rohgaskonzentrationen) wird die Ökobilanz und die Kostenbilanz für die Gasreinigung im BEGA aufgestellt, Abb. 0.3. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden in Tab. 0.2 dargestellt.



**Abb. 0.2: Anlage zur Staub und Geruchsabscheidung, Schlauchfilter + Aktivkohle**



**Abb. 0.3: Staub und Geruchsabscheidung im BEGA**

**Tab. 0.2: Ökobilanz für Schlauchfilter + Aktivkohle und BEGA**

	Schlauchfilter	Aktivkohle	Gesamt Filter+AK	BEGA
Ansätzen	Filterfläche: 15m <sup>2</sup>	400kg/Monat		BEGA Trommel (2 Stufen)
Standzeit	1 Jahr	1 Monat		unbegrenzt
Rohgas			10mg/m <sup>3</sup> 80ppm Aceton	10mg/m <sup>3</sup> 80ppm Aceton
Reingas	10mg/m <sup>3</sup>	8ppm	1mg/m <sup>3</sup> Staub 8ppm Aceton	0,2mg/m <sup>3</sup> Staub 16ppm Aceton
Abscheidung			90% 90%	98% 80%
Restemission	0,8g/h	16,58g/h	Staub: 0,8g/h Geruch: 16,58g/h	Staub: 0,16g/h Geruch: 33,15g/h
Wasserverbrauch [m <sup>3</sup> /Monat]	0	0	0	1,5
CO <sub>2</sub> -Emission [CO <sub>2</sub> kg/Monat]	0	1467 (Verbrennung des verbrauchten AK)	1467	132 CO <sub>2</sub> kg/Monat (80%C veratmet)
Druckverlust [kPa]	1,5	2 (für x=1mm)	3,5	1
Stromverbrauch [kW]	Druckverlust: 0,333 Druckluft: 0,100 Regeltechnik: 0,200	Druckverlust: 0,444	Insgesamt: <b>1,077</b>	Druckverlust: 0,222, Elektroabscheider 0,060; Regeltechnik: 0,400; Insgesamt: <b>0,682</b>
Flächebedarf [m <sup>2</sup> ]	1	2,5	3,5	1,5
Volumenbedarf [m <sup>3</sup> ]	2	3,75	5,75	4,5

Die Abscheidegrade sind für beide Verfahren vergleichbar. Die Verfahrensverkopplung Schlauchfilter und Aktivkohle sorgt für eine bessere Geruchsabscheidung. Es ist jedoch eine regelmäßige Wartung des Adsorptionsfilters nötig. Aktivkohle muss monatlich umgetauscht werden, um die gute Abscheidegrade zu leisten. Es ist möglich die Wartungsintervalle zu verlängern. Das ist aber mit größeren Dimensionen der Anlage verbunden. Die Entsorgung der Aktivkohle beeinflusst die Ökobilanz sehr negativ. Die Druckverluste sind auch in einer zwei stufigen Anlage größer, was sich im Stromverbrauch widerspiegelt.

BEGA zeichnet sich aus durch bessere Staubabscheidung. Der abgeschiedene Staub und die überschüssige Biomasse müssen aus der Anlage ausgetragen werden, deswegen ist beim BEGA mit einem Wasserverbrauch zu rechnen, was beim Schlauchfilter mit Aktivkohle nicht

der Fall ist. Die CO<sub>2</sub>-Emission wird durch die mikrobielle Veratmung des Geruchstoffs verursacht. Sie ist aber wesentlich kleiner, als die CO<sub>2</sub>-Menge, die bei Aktivkohleverbrennung emittiert wird. Nicht ohne Bedeutung ist auch der Platzbedarf der Anlage. BEGA benötigt weniger Fläche, weil die Anlage ohne größeren Aufwand in die Höhe gebaut werden kann.

In Tab. 0.3 wird ein Vergleich der Kosten für beide Lösungen dargestellt. Es wird abgeschätzt, dass die Anschaffungskosten für BEGA mit denen für Schlauchfilter und Aktivkohle vergleichbar sind. Anhand der in Tab. 0.2 dargestellten Ergebnisse für die Ökobilanz wurde eine Betriebskostenabschätzung durchgeführt. Die Betriebskosten sind für BEGA um den Faktor 20 geringer.

**Tab. 0.3: Vergleich der Kosten für Schlauchfilter + Aktivkohle und BEGA**

	Gesamt Filter+AK	BEGA
Anschaffungskosten [%]	100	100
Filter [€/Jahr]	6250	–
Aktivkohle [€/Jahr]	9600	–
Wasser [€/Jahr]	–	18
Strom [€/Jahr]	943	597
Dünger und andere Mittel [€/Jahr]	–	50
Personal [€/Jahr]	300	150
<b>Gesamtbetriebskosten [€/Jahr]</b>	<b>17093</b>	<b>815</b>

Ökobilanz und Kostenabschätzung zeigen, dass BEGA ökologisch wie auch finanziell im Vergleich mit der Kombination Schlauchfilter+Aktivkohle die günstigere Lösung ist.

## **Anhang 4**

Chemische Analyse des Abgases aus Ulm