

5 DISKUSSION

In der anschließenden Diskussion sollen ein Funktionsmodell für die Vorgänge in der Abluftreinigungsanlage vorgestellt und die quantitativen und qualitativen Effekte der Abluftreinigungsanlage betrachtet werden. Außerdem werden die messtechnische Beeinflussung der Ergebnisse erläutert und die Bioaerosolzusammensetzung im Stall diskutiert.

5.1 ABLUFTREINIGUNGSANLAGE

5.1.1 FUNKTIONSMODELL DER ABLUFTREINIGUNGSANLAGE

Theoretisch gab es vier verschiedene Möglichkeiten, was mit dem Bioaerosol aus dem Stall im Inneren der Abluftreinigungsanlage hätte passieren können (Abb. 28):

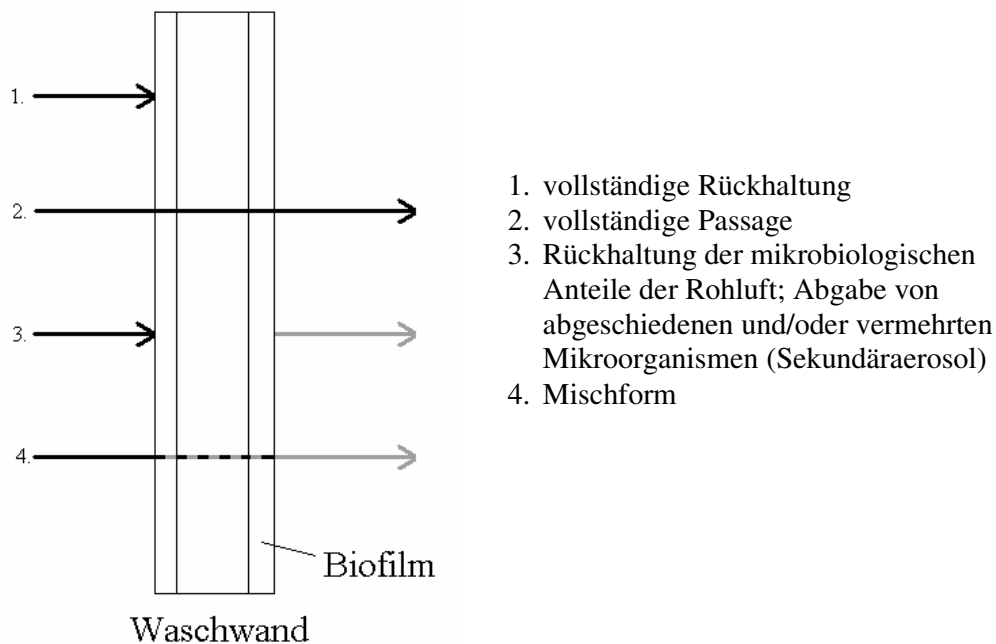


Abbildung 28: Hypothesen zur Funktionsweise der Abluftreinigungsanlage

5.1.1.1 vollständige Rückhaltung

Im Falle einer Rückhaltung aller Mikroorganismen durch die Abluftreinigungsanlage hätten die Konzentrationen in der Reinluft (Tab. 16 bis 20) gegen Null streben bzw. gleich den Hintergrundkonzentrationen in einer fiktiven Außenluft (vgl. Tab. 26) sein müssen. Dies war nicht der Fall.

5.1.1.2 vollständige Passage

Wenn das Bioaerosol aus dem Stall die Abluftreinigungsanlage unverändert passiert hätte, wären sowohl die Konzentrationen der gemessenen Parameter als auch die qualitative Zusammensetzung der Keimflora in Roh- und Reinluft identisch. Bis auf vier Ausnahmen (Tab. 21) wurden aber unterschiedliche Konzentrationen in Roh- und Reinluft ermittelt. Außerdem waren die Zusammensetzungen von gramnegativer Keimflora (Abb. 23 und 24) und Schimmelpilzflora (Abb. 25 und 26) verschieden, daher schied diese Hypothese aus.

5.1.1.3 Rückhaltung der mikrobiologischen Anteile der Rohluft; Abgabe von abgeschiedenen und/oder vermehrten Mikroorganismen (Sekundäraerosol)

Wenn die Abluftreinigungsanlage alle mikrobiologischen Bestandteile der Rohluft zurückgehalten hätte und alle mikrobiologischen Anteile der Reinluft der Abluftreinigungsanlage entsprungen wären, so hätten die Konzentrationen in der Rohluft unabhängig von den Konzentrationen in der Reinluft sein müssen. Gegenteiliges zeigten aber die Korrelationskoeffizienten von Roh- und Reinluftkonzentrationen (Tab. 28).

Tabelle 28: Korrelationskoeffizienten der logarithmierten Roh- und Reinluftkonzentrationen 2-seitig nach Pearson (SPSS 11.0)

Parameter	Korrelationskoeffizient lg (Rohluft/Reinluft)
Konzentration an einatembarem Staub	0,295
luftgetragene aerobe Gesamtkoloniezahl	0,821
luftgetragene aerobe gramnegative Gesamtkoloniezahl	0,569
Konzentration an einatembaren Endotoxinen (PGP)	0,598
Konzentration an einatembaren Endotoxinen (AGI)	0,619
luftgetragene Schimmelpilzkoloniezahl	0,536

Abgesehen von den Konzentrationen an einatembaren Staub, korrelieren alle logarithmierten Konzentrationen der gemessenen Parameter in Roh- und Reinluft auf einem Signifikanzniveau von **0,01**.

Diese Zahlen lassen annehmen, dass ein großer Teil der luftgetragenen Mikroorganismen und Endotoxine die Abluftreinigungsanlage ungehindert passierten, wohingegen einatembarer Staub zum Teil ausgewaschen wurde. Dies widerspricht zuerst einmal der Tatsache, dass die in der Stallluft vorkommenden Keime zu einem hohen Anteil an Stäube gebunden sind (Müller et al. 1977). Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, dass durch den Abluftreinigungsprozess Keime von den Stäuben getrennt wurden. Dann wäre aber auch

anzunehmen, dass die Roh- und Reinluftkonzentrationen nicht korrelierten. Eine andere Erklärungsmöglichkeit besteht darin, dass mit den benutzten Keimsammelmethoden hauptsächlich der Anteil an Keimen nachgewiesen wurde, der nicht staubgebunden vorlag. Dafür fanden sich in der Literatur aber keine Hinweise.

5.1.1.4 Mischform

In Anbetracht der Ergebnisse ist die wahrscheinlichste Hypothese, dass ein Teil des Bioaerosols aus dem Stall von der Abluftreinigungsanlage zurückgehalten wurde, ein weiterer Teil die Anlage unverändert passierte und ein Teil abgeschiedener bzw. sich vermehrt habender Mikroorganismen aus der Abluftreinigungsanlage abgegeben wurde. So funktionieren laut Möritz (1996) auch raumluftechnische Anlagen in öffentlichen Gebäuden. Eine quantitative Aufschlüsselung der Reinluft in die einzelnen Fraktionen dürfte nicht möglich sein. Im nächsten Abschnitt wurden mögliche Einflüsse auf die Fraktion von Bioaerosolbestandteilen, die von der Anlage zuerst abgeschieden wurden bzw. sich in der Anlage vermehrt hatten und aus der Anlage in die Reinluft übertraten, aufgezeigt. Im Folgenden wurde diese Fraktion als Sekundäraerosol bezeichnet.

Mögliche Einflussfaktoren auf den Anteil von Sekundäraerosol an der Reinluft

Der Anteil von Sekundäraerosol an der Reinluft könnte von

- dem hygienischen Zustand des Waschwassers
- der Lüftungsrate
- dem Biofilm auf den Cooling-Pads

abhängig gewesen sein.

Bei einer Betrachtung der Korrelation der möglichen Einflussfaktoren mit den logarithmierten Reinluftkonzentrationen der gemessenen Parameter ließ sich feststellen, dass diese nicht signifikant mit den Konzentrationen im **Waschwasser** korrelierten (Tab.29).

Tabelle 29: Korrelationskoeffizienten (multifaktorielle Regressionsanalyse; SPSS 11.0) der logarithmierten Reinluftkonzentrationen mit den logarithmierten Waschwasserkonzentrationen der jeweiligen Parameter, resp. mit der Lüftungsrate

Parameter in der Reinluft	Korrelationskoeffizient	
	lg (Konzentration im Waschwasser)	Lüftungsrate
lg (Staubkonzentration)	-	0,276
lg (aerobe Gesamtkoloniezahl)	0,133	0,393
lg (aerobe gramnegative Gesamtkoloniezahl)	0,347	0,305
lg (Endotoxinkonzentration, PGP-System)	0,328	-0,117
lg (Endotoxinkonzentration, AGI-30)	0,291	0,001
lg (Schimmelpilzkoloniezahl)	0,185	0,883

Ein Indiz, dass die hygienische Qualität des Waschwassers keinen eindeutigen Einfluss auf den Anteil an Sekundäraerosol in der Reinluft und damit den quantitativen Effekt der Abluftreinigungsanlage hatte, findet sich in Messung Nr. 22. Während dieser Messung war nur der zweite Cooling-Pad der Waschwand in Betrieb. Somit war die wasserberieselte Oberfläche der Abluftreinigungsanlage ausnahmsweise auf etwa die Hälfte reduziert.

Im Waschwasser (vgl. Tab. 23) fanden sich gleichzeitig hohe Konzentrationen bei allen untersuchten Parametern. Diese Konzentrationen waren alle größer als das 3. Quartil ($>x_{0,75}$). Jedoch waren bei dieser Messung auch die Reduktionsfaktoren größer als das 3. Quartil und erreichten zum Teil sogar ihre Maxima (aerobe Gesamtkoloniezahl und mittels AGI-30 gemessene Endotoxine; vgl. Tab. 22). Es war also ein hoher Reduktionseffekt trotz niedriger hygienischer Qualität des Waschwassers vorhanden.

Ohne den ersten Cooling-Pad kam es in diesem einen Fall augenscheinlich zu einer deutlich geringeren Sekundäraerosolbildung. Es lässt sich folgern, dass bei einer kleineren wasserberieselten Oberfläche weniger Sprühnebel erzeugt wurde und somit auch die Sekundäraerosolbildung geringer war.

Anzumerken ist, dass bei einem ungestörten Betrieb der Anlage die wasserberieselte Oberfläche annähernd konstant blieb. Eine Steigerung des Reduktionseffektes lässt sich also nicht durch eine Senkung der Sprühnebelbildung erreichen. Möglicherweise könnte der Reinigungseffekt aber, durch eine Abscheidung der Sprühnebeltröpfchen mittels einer dritten Reinigungsstufe z.B. in Form eines Filters (Bio- bzw. Elektrofilter) erhöht werden.

Mit einem Biofilter könnten auch Geruchs- und Ammoniakabscheidung erhöht werden, so fanden z.B. Martens et al. (2001) bei einem Biofilter eine Geruchsminderung von $>70\%$ und van den Weghe (2000) eine Ammoniakabscheideleistung von 60 bis 75%.

Zwischen den logarithmierten Reinluftkonzentrationen und der **Lüftungsrate** gab es mit einer Ausnahme keine signifikanten Korrelationen (Tab. 29). Die Ausnahme bildete die logarithmierte luftgetragene Schimmelpilzkoloniezahl in der Reinluft, welche mit der Lüftungsrate auf einem Signifikanzniveau von 0,01 korrelierte.

Die Korrelation der Schimmelpilzkoloniezahl mit der Lüftungsrate könnte darin begründet liegen, dass Schimmelpilze besonders gut an Orten wachsen an denen sowohl Sauerstoff als auch Wasser vorhanden ist (Smith, 1960). Auf der Oberfläche der Cooling-Pads fanden sich Sauerstoff und Feuchtigkeit und somit ein besseres Wachstumsmilieu für Schimmelpilze als im Waschwasser. Es besteht also die Möglichkeit, dass die Schimmelpilze sich vor allem auf den Oberflächen der Cooling-Pads vermehrten und von dort an die Reinluft abgegeben wurden.

Der Biofilm auf den Oberflächen der Cooling-Pads könnte auch auf andere Bestandteile des Sekundäraerosols einen Einfluss gehabt haben und sollte bei zukünftigen Untersuchungen zusätzlich charakterisiert werden.

5.1.2 QUALITATIVE EFFEKTE DER ABLUFTREINIGUNGSANLAGE AUF DAS BIOAEROSOL STALLLUFT

5.1.2.1 Effekt der Abluftreinigungsanlage auf die Partikelgrößen

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mittels Andersensammlers (vgl. 4.2.4) zeigen, dass der Anteil von keim- und schimmelpilztragenden Partikeln mit geringem aerodynamischem Durchmesser, durch die Passage der Abluftreinigungsanlage, zunahm. Somit erhöhte sich die Lungengängigkeit der Partikel.

Eine ähnliche Verteilung der Partikelgrößen fand Zucker (2004) bei einer Messung während einer Reinigung mit einem Hochdruckwasserreinigungsgerät. Die Gemeinsamkeit zu den Vorgängen in der Abluftreinigungsanlage mag in der Erzeugung kleiner Wassertröpfchen (eines Sprühnebels) liegen.

Allgemein ist zu berücksichtigen, dass Arbeitende bei Servicearbeiten in der laufenden Abluftreinigungsanlage, hohen einatembaren Keim- und Endotoxinkonzentrationen ausgesetzt sind. Gegebenenfalls sollten entsprechende Schutzmaßnahmen angewendet werden.

5.1.2.2 Effekt der Abluftreinigungsanlage auf die Zusammensetzung der gramnegativen Bakterienflora der Luft

Durch die Passage der Abluftreinigungsanlage änderte sich die Zusammensetzung der gramnegativen Luftkeimflora. Die gramnegative Keimflora in der Reinluft wies einen hohen Anteil an *Pseudomonadaceae* auf und glich damit eher der Flora des Waschwassers als der Keimflora in der Rohluft. Dies gab einen Hinweis darauf, dass ein Teil der Bestandteile des Waschwassers in die Reinluft übertreten konnten und ein Sekundäraerosol bildeten.

Auch Zucker (2004) fand bei den aus dem luftgetragenen Zustand isolierten gramnegativen Bakterien während einer Hochdruckwasserreinigung deutlich höhere Anteile von *Pseudomonadaceae*. Als Quelle für die Pseudomonaden wurde dort vermutet, dass es bei der Hochdruckwasserreinigung zu einer Vernebelung von mit Pseudomonaden besiedelten Flüssigkeitsrückständen auf den Stalleinrichtungen kam. Feuchtstellen sind ein typischer Lebensraum für Pseudomonaden (Graevenitz, 1992).

Im Hinblick auf den Seuchenschutz ist zu beachten, dass sich unter Umständen aerogen übertragbare tier- oder menschenpathogene Erreger im Waschwasser anreichern und vermehren und über den Prozess der Sekundäraerosolbildung emittiert werden könnten. In der Literatur finden sich als Beispiele für solche Erreger Salmonellen (Dedié et al., 1993), Yersinien (Knapp u. Weber, 1982; Fukushima et al., 1989) und Mycobakterien (Beerwerth 1973; Torvinen et al. 2004).

Im Falle eines Tierseuchenausbruchs ist eine Desinfektion des Waschwassers sowie der gesamten Abluftreinigungsanlage vorzunehmen.

5.1.2.3 Effekt der Abluftreinigungsanlage auf die Zusammensetzung der Schimmelpilzflora der Luft

Bei den Schimmelpilzen kam es durch Passage der Abluftreinigungsanlage zu deutlichen Zunahmen bei den Gattungen *Aspergillus* und *Wallemia* (Abb. 25). Diese Gattungen fanden sich zwar auch im Waschwasser zu 25 und zu 1 % (Abb. 26), jedoch waren ihre Anteile im Waschwasser nicht so hoch, dass sich damit ihre Zunahmen in der Reinluftflora erklären ließen.

Dies könnte ein weiterer Hinweis darauf sein, dass ein großer Teil der Schimmelpilze auf den Oberflächen der Cooling-Pads gewachsen und von dort in die Reinluft übergetreten ist (vgl. 5.1.1.4). Um dies zu belegen oder zu widerlegen sollte die Schimmelpilzflora auf den Cooling-Pads untersucht werden.

5.1.2.4 Effekt der Abluftreinigungsanlage bei Spitzenbelastungen (Sondermessung Respicon)

Die Wirkung der Abluftreinigungsanlage bei Spitzenbelastungen sollte mit Hilfe einer Sondermessung mit Respicons abgeschätzt werden. Während dieser Messung wurde Staub aufgewirbelt und so eine künstliche Spitzenbelastung provoziert (3.2.7.1 und 4.3.1).

Die Messung ergab für alle Parameter eine Reduktion von Rohluft zur Reinluft (vgl. Tab. 24). Auch die drei Konzentrationsspitzen von einatembarem Staub auf der Rohluftseite fanden sich auf der Reinluftseite nicht wieder (vgl. Abb. 27). Ferner lagen die Reduktionsfaktoren bei luftgetragener aerober Gesamtkoloniezahl, bei luftgetragener aerober gramnegativer Gesamtkoloniezahl, bei den mittels AGI-30 erhobenen einatembaren Endotoxinen und bei den luftgetragenen Schimmelpilzen über den Medianen der Reduktionsfaktoren dieser Parameter bei den Hauptmessungen. Bei luftgetragenen aeroben gramnegativen Gesamtkoloniezahlen und luftgetragenen Schimmelpilzen wurden auch die maximalen Minderungen der Hauptmessungen übertroffen.

Diese Ergebnisse zeigten, dass Spitzenbelastungen von der Abluftreinigungsanlage abgefangen werden konnten. Eine andere Erklärung für die hohen Reduktionsleistungen könnte der abweichende Probenahmeort in der Reinluft gewesen sein, da dort andere Strömungsverhältnisse in der Luft vorlagen (vgl. 5.2).

5.1.3 BEURTEILUNG DER QUANTITATIVEN EFFEKTE DER UNTERSUCHTEN ABLUF TREINIGUNGSANLAGE AUF DAS BIOAEROSOL STALLLUFT

Grundsätzlich ist zu bedenken, dass sich die beiden Bioaerosole Roh- und Reinluft in ihrer Qualität unterscheiden (vgl. 5.1.2.). Die Reinluft bestand zu einem Teil aus Sekundäraerosol, einen weiteren Teil bildete die Rohluft. Die Keimzahlen von vor und nach dem Abluftreinigungsprozess sind daher nur durch eine Zahlenwertgleichung nicht aber mathematisch exakt gegenüberzustellen. Dennoch soll der Versuch die quantitativen Effekte der untersuchten Abluftreinigungsanlage mathematisch zu beschreiben im Folgenden unternommen werden.

5.1.3.1 Wirkungsgrad

Der Begriff Wirkungsgrad ist problematisch, weil er schon für Wärmekraftmaschinen belegt ist. Bei einer Abgabe von Stoffen aus der Abluftreinigung würden die errechneten Werte entgegen der DIN Definition (Freeman, 2003) negativ. Dies käme einer Energieerzeugung aus dem Nichts gleich. Da in der Literatur jedoch trotzdem häufig der Wirkungsgrad (Gleichung 1) für die Beurteilung der Abscheideleistung von biologischen Abluftreinigungsanlagen benutzt wurde, sollen in Tabelle 32 die Reduktionsfaktoren den jeweiligen Wirkungsgraden an den einzelnen Messtagen gegenübergestellt werden.

Hierbei wird ein weiterer Nachteil des Wirkungsgrades deutlich. Dieser soll an einem Beispiel aufgezeigt werden. Betrachtet man die Reduktionsfaktoren -4,9 (RF Gram-, Messung Nr. 1) und 4,9 (RF GKZ, Messung Nr. 20), so wird deutlich, dass es sich hier um vom Betrag her gleiche Leistungen handelt, die sich allerdings dadurch unterscheiden, dass es im ersten Fall zu einer Zunahme der Konzentration und im zweiten Fall zu einer Abnahme der Konzentration durch Passage der Abluftreinigungsanlage kam (vgl. Gleichung 2 und 3). Betrachtet man die diesen Reduktionsfaktoren entsprechenden Wirkungsgrade, so stößt man auf die Angabe -3,93 oder -393 % für RF=-4,9 bzw. 0,80 oder 80% für RF=4,9. Diese Zahlen lassen auf den ersten Blick nicht erahnen, dass es sich hierbei um vergleichbare Konzentrationsänderungen handelt.

Tabelle 30: Vergleich der Reduktionsfaktoren (RF) und der Wirkungsgrade (η) der einzelnen Parameter

Nummer der Messung	η Staub	RF Staub	η GKZ	RF GKZ	η Gram-	RF Gram-	η ET (PGP)	RF ET (PGP)	η ET (AGD)	RF ET (AGD)	η SP	RF SP
1	0,94	16,9	0,34	1,5	-3,93	-4,9	0,67	3,0	0,69	3,3	-0,95	-2,0
2	0,57	2,3	0,91	11,0	0,87	8,0	0,91	10,9	0,36	1,6	0,44	1,8
3	0,33	1,5	0,89	8,8	-1,92	-2,9	0,33	1,5	0,63	2,7	0,66	2,9
4	0,67	3,0	0,50	2,7	0,00	1,0	0,95	21,9	0,95	21,3	0,52	2,1
5	0,66	3,0	0,52	2,1	-9,23	-10,2	0,90	9,5	0,81	5,1	-0,46	-1,5
6	0,50	2,0	0,88	8,7	-0,14	-1,1	0,96	24,4	0,92	12,3	0,91	11,1
7	0,77	4,3	0,88	8,0	-1,16	-2,2	0,52	2,1	0,79	4,9	-2,81	-3,8
8	0,67	3,1	0,99	71,1	0,45	1,8	0,94	17,1	0,98	47,3	-1,12	-2,1
9	0,82	5,6	0,37	1,6	0,74	3,9	0,88	8,2	n. u.	n. u.	0,89	9,1
10	0,74	3,8	0,57	2,3	0,48	1,9	0,80	4,9	0,44	1,8	0,57	2,3
11	0,63	2,7	0,94	17,5	0,93	15,1	0,97	31,7	0,96	26,9	0,79	4,8
12	0,72	3,6	0,93	13,4	-0,48	-1,5	0,98	65,0	0,92	12,2	0,67	3,0
13	0,40	1,7	0,50	2,0	-13,85	-14,8	0,82	5,7	0,23	1,3	-0,86	-1,9
14	0,67	3,0	0,35	1,5	0,51	2,0	0,85	6,7	0,92	12,8	0,45	1,8
15	0,56	2,2	0,71	3,4	0,74	3,9	0,88	8,2	0,85	6,8	0,82	5,4
16	0,66	2,9	0,73	3,7	0,72	3,6	0,93	14,1	0,81	5,2	0,70	3,3
17	0,00	1,0	0,86	7,2	0,87	8,0	0,94	17,7	0,88	8,4	0,11	1,1
18	0,00	1,0	0,95	18,9	0,12	1,1	0,91	10,6	0,91	11,5	-0,21	-1,2
19	0,97	33,5	0,77	4,3	0,79	4,7	1,00	512,3	0,91	10,6	0,81	5,3
20	0,89	8,8	0,80	4,9	0,92	12,8	0,97	33,2	0,85	6,6	0,57	2,3
21	0,50	2,0	0,98	59,6	0,05	1,0	0,95	19,9	0,86	10,2	0,87	7,8
22	0,80	5,0	1,00	314,1	0,88	8,7	0,96	26,5	0,98	66,1	0,89	9,1
min. Minderung/max. Vermehrung	0,00	1,0	0,34	1,5	-13,85	-14,8	0,33	1,5	0,23	1,3	-2,81	-3,8
maximale Minderung	0,97	33,5	1,00	314,1	0,93	15,1	1,00	512,3	0,98	66,1	0,91	11,1
Median	0,66	3,0	0,83	6,1	0,47	1,9	0,92	12,5	0,86	8,4	0,57	2,3

η : Wirkungsgrad

die Spalten, die den Wirkungsgrad enthalten sind grau unterlegt

RF: Reduktionsfaktor

n. u.: nicht untersucht

Staub: Konzentration an einatembarem Staub

GKZ: luftgetragene aerobe Gesamtkoloniezahl

Gram-: luftgetragene aerobe gramnegative Gesamtkoloniezahl

ET: Konzentration an einatembaren Endotoxinen

SP: luftgetragene Schimmelpilzkoloniezahl

AGI-30: all glas impinger

PGP: PGP-System

-: negatives Vorzeichen, gibt eine Zunahme der Ausgangskonzentration nach Passage der Abluftreinigungsanlage an

Die beiden Wirkungsgrade von 1,00 (GKZ Nr. 22 und ET(PGP) Nr. 19) für die Reduktionsfaktoren 314,1 bzw. 512,3 ergaben sich durch die Rundung auf zwei Nachkommastellen. Es handelt sich um Wirkungsgrade von 99,7 bzw. 99,8 %.

5.1.3.2 Prozentangaben

Mit Prozentangaben lassen sich verschiedene Aussagen zur Leistung von Abluftreinigungsanlagen machen. Am unter Punkt 5.1.3.2 aufgeführtem Beispiel der Reduktionsfaktoren 4,9 (RF GKZ, Messung Nr. 20) und -4,9 (RF Gram-, Messung Nr. 1) soll dies kurz erläutert werden.

Die zugehörigen Wertepaare waren:

- GKZ, Messung Nr. 20: Rohluft: 1.650.000 KE/m³ Reinluft: 334.500 KE/m³ und
- Gram-, Messung Nr. 1: Rohluft: 45,90 KE/m³ Reinluft: 226,10 KE/m³.

Betrachtet man das erste Beispiel, so ergeben sich zwei Perspektiven. Bei Beispiel 1 (Messung Nr. 20) handelt es sich zum Einen um eine Verminderung der Rohluftkonzentration um 79,7 %. Zum Anderen wurde die Rohluftkonzentration auf 20,3% ihres Wertes vermindert.

Auch im Beispiel 2 ergeben sich zwei Möglichkeiten. Die Reinluftkonzentration ist 493 % der Rohluftkonzentration oder die Rohluftkonzentration nimmt um 393% zu.

Aus dem vorhandenen Literaturmaterial geht zumeist nicht klar hervor, wie die Prozentangaben errechnet worden sind. Hierdurch entsteht eine scheinbare Vergleichbarkeit der verschiedenen Anlagen, die nach Meinung der Autorin mathematisch nicht korrekt ist.

Dieses Problem wurde durch das Verwenden eines Reduktionsfaktors umgangen.

5.1.3.3 Reduktionsfaktor

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Beurteilung des qualitativen Effektes der Abluftreinigungsanlage ein Reduktionsfaktor (RF) gewählt. Der Reduktionsfaktor bietet den Vorteil, dass er Zunahme und Abnahme der Konzentration den gleichen Betrag zuordnet (vgl. 5.1.3.1). Eine Reduktion der Rohluftkonzentration wird durch ein positives Vorzeichen ausgedrückt, eine Zunahme durch ein negatives (vgl. Gleichung 2 und 3).

In den vorliegenden Untersuchungen reduzierte die Abluftreinigungsanlage die Konzentration an einatembarem **Staub** maximal um den Faktor 33,5 (RF=33,5). In zwei Fällen blieben die Konzentrationen gleich. Die Konzentration an einatembarem Staub wurde im Median um den Faktor 3 (RF=3) reduziert. Biologische Abluftreinigungsanlagen, die Staub bzw. Partikel reduzierten untersuchten auch Seedorf und Hartung (1999) und van den Weghe (2000). Betrachtet man nur ihre Ergebnisse für Nassabscheider bzw. Biowäscher so finden sich Werte zwischen 22 und 70%. Wenn diese Werte wie bei Siemers (1996) bzw. Seedorf und Hartung (1999) angegeben berechnet wurden, so entsprächen 22% dem Reduktionsfaktor 1,3 und 70% dem Reduktionsfaktor von 3,3. Die hier untersuchte Abluftreinigungsanlage leistete also Ähnliches wie andere biologische Abluftreinigungsanlagen.

Bei der luftgetragenen aeroben **Gesamtkoloniezahl** kam es in allen Fällen zu einer Minderung, maximal um den Faktor 314,1 (RF=314,1). Der Median lag bei 6,1. Vergleicht man mit den Werten von Martens (2001), welcher als Reduktionsleistung eines Biofilters für Mikroorganismen 12,7 bis 99,9% angibt, so entsprachen diese Werte den Reduktionsfaktoren 1,1 bis 1000 damit lag die maximale Reduktionsleistung dieses Biofilters höher als die des untersuchten Biowäschers. Seedorf und Hartung (1999) fanden bei Untersuchung eines Biowäschers eine Reduktionsleistung von 91,4%, dies entsprach einem Reduktionsfaktor von 11,6 und ist somit mit dem Effekt des hier untersuchten Biowäschers Abluftreinigungsanlage vergleichbar.

Bei der luftgetragenen **gramnegativen** aeroben Gesamtkoloniezahl kam es in 7 von 22 Fällen zu einer Zunahme der Konzentrationen, maximal um den Faktor 14,8 (RF=-14,8). In 13 von 22 Fällen wurden die Konzentrationen reduziert, maximal um den Faktor 15,1 (RF=15,1). Der Median lag bei 1,9. Zweimal wurde keine Konzentrationsänderung festgestellt. Auch Herold et al. (2001) fanden nach einem Biowäscher eine deutliche Erhöhung des Austrags gramnegativer Bakterien, ohne jedoch genaue Angaben zu den Größenordnungen zu machen. Die Konzentrationen an einatembaren **Endotoxinen**, sowohl mittels PGP-System als auch mittels AGI-30 ermittelt, wurden in allen Fällen reduziert. Maximal um den Faktor 512,3

(RF=512,3). Im Gegensatz dazu fanden Seedorf und Hartung (1999) bei der Untersuchung eines Biowäschers in der Reinluft höhere Endotoxinkonzentrationen als in der Rohluft (280,5 bzw. 12171%; RF: -2,8 bzw. -12,2).

Die luftgetragene **Schimmelpilzkoloniezahl** wurde in 16 von 22 Fällen vermindert. Maximal um den Faktor 11,1 (RF=11,1). In 6 von 22 Fällen kam es zu Konzentrationserhöhungen maximal um den Faktor 3,8 (RF=-3,8). Bei Martens (2001) wurden in der Reinluft nach einem Biofilter mehr Schimmelpilze gefunden als in der Rohluft. Als Wert wurden -409% angegeben, allerdings ohne dass die Art der Berechnung angegeben wurde. Falls nach der Formel für den Wirkungsgrad (vgl. Gleichung 1) vorgegangen wurde, so entspräche dieser Wert einem Reduktionsfaktor von -5,1. Seedorf und Hartung (1999) fanden auch nach einem Biowäscher erhöhte Schimmelpilzkonzentrationen bis 141%, dies entspräche einem RF von -1,4. Biologische Abluftreinigungsanlagen können also durch Sekundäraerosolbildung sowohl die Emissionen von gramnegativen Bakterien als auch von Schimmelpilzen erhöhen.

Mögliche Einflussfaktoren auf den quantitativen Effekt der biologischen Abluftreinigungsanlage

Ähnliche Einflussfaktoren wie für den Anteil an Sekundäraerosol an der Reinluft (vgl. 5.1.1.4) kamen auch als Einflussfaktoren auf den quantitativen Effekt der biologischen Abluftreinigungsanlage in Frage. Zusätzlich zur Waschwasserqualität, Lüftungsrate und Biofilm auf den Coolingpads waren dies hier die Rohluftkonzentrationen.

So schien es möglich, dass höhere **Rohluftkonzentrationen** stärker reduziert würden als niedrige. Diese Möglichkeit ergab sich aus der Annahme, dass das Sekundäraerosol immer einen gewissen Anteil an der Reinluft bildete. Theoretisch konnte daher eine sehr niedrige Rohluftkonzentration niemals auf Null reduziert werden, sondern nur bis auf den immer vorhandenen Anteil an Sekundäraerosol. Je höher die Roh- und Reinluftkonzentrationen, desto kleiner wäre somit der relative Anteil von Sekundäraerosol an der Reinluft gewesen.

Bei Betrachtung der Korrelationskoeffizienten der Reduktionsfaktoren mit den möglichen Einflussfaktoren, in einer multifaktoriellen Regressionsanalyse (Tab. 31) fiel auf, dass die Reduktionsfaktoren von Staub und Endotoxinen in der einatembaren Staubfraktion signifikant ($\alpha=0,01$) mit der logarithmierten Rohluftkonzentration dieser Parameter korrelierten.

Das heißt je mehr Staub und damit staubgetragene Endotoxine in der Rohluft vorhanden waren, desto mehr wurden ausgewaschen. Dies wirft erneut die Möglichkeiten aus Abschnitt 5.1.1.3 auf bei denen der Abluftreinigungsprozess entweder staubgetragene Keime von den Stäuben trennt oder die verwendeten Keimsammelgeräte hauptsächlich nicht staubgebundene Mikroorganismen nachweisen.

Tabelle 31: Korrelationskoeffizienten (multifaktorielle Regressionsanalyse; SPSS 11.0) der Reduktionsfaktoren mit den logarithmierten Rohluftkonzentrationen der jeweiligen Parameter, resp. mit der Lüftungsrate und den logarithmierten Waschwasserkonzentrationen

Reduktionsfaktor	Korrelationskoeffizient		
	lg (Rohluftkonzentration)	Lüftungsrate	lg (Waschwasserkonzentration)
einatembare Staub	0,862	0,401	-
luftgetragene aerobe GKZ	0,185	-0,294	-0,076
luftgetragene aerobe gramnegative GKZ	0,192	0,009	-0,335
luftgetragene Schimmelpilzkoloniezahl	0,271	-0,288	-0,086
einatembare Endotoxine (PGP)	0,819	0,463	-0,272
einatembare Endotoxine (AGI-30)	0,143	-0,403	-0,200

Die **Lüftungsrate** schien keinen gleichbleibenden Einfluss auf die Reduktionsfaktoren gehabt zu haben.

Bei den Korrelationsfaktoren von Reduktionsfaktoren und logarithmierter **Waschwasserkonzentration** zeigte sich die Tendenz, dass höhere Waschwasserkonzentrationen zu niedrigeren Reduktionsfaktoren führten, da alle Korrelationsfaktoren negativ waren. Deutlicher als bei aerober Gesamtkoloniezahl und Schimmelpilzkoloniezahl zeigte sich diese Tendenz bei gramnegativer Gesamtkoloniezahl und Endotoxinen. Allerdings fanden sich hier für keinen der Parameter signifikante Werte.

Ob auch der **Biofilm** auf den Cooling Pads einen Einfluss auf den quantitativen Effekt der Abluftreinigungsanlage hat bleibt in zukünftigen Untersuchungen abzuklären.

5.2 MESSTECHNISCHE BEEINFLUSSUNG DER ERGEBNISSE

Bei der Probenahme waren folgende Fehler möglich. **Zufällige** Fehler konnten an allen Messorten auftreten, so schwankten die Ergebnisse für luftgetragenen Staub bei ortsfester Sammlung bei Smid et al. 1992 um 11 bis 23 % und die Werte bei der Erfassung luftgetragener Endotoxine schwankten um 31 bis 49 %. Die relativen Standardabweichungen bei Bestimmungen verschiedener Bakterienkonzentrationen in einem Prüfkanal mittels AGI-30 lagen im Durchschnitt bei 21,2 % (3,19 bis 66,25 %; pers. Mitteilung Rabe, 2004).

Zusätzlich konnte bei den Messungen in der Rohluft ein **systematischer** Fehler auftreten, der daher rührte, dass der Messort direkt hinter einem Ventilator lag. Hierbei waren zwei Dinge zu berücksichtigen. Zum Ersten bündelte ein Ventilator den Abluftstrom aus der Abluftreinigungsanlage (Abb. 29). Hierdurch könnten am Messort höhere Werte gemessen worden sein, als in der Reinluft tatsächlich vorhanden waren.

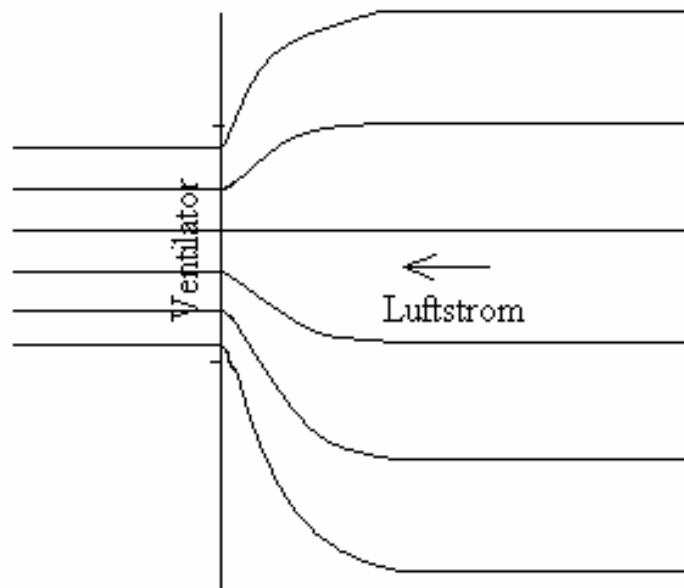


Abbildung 29: Bündelung der Abluftströme durch einen Ventilator

Zum Zweiten betrug die Luftgeschwindigkeit am Ort der Probenahme bei maximaler Leistung des Lüfters von 21.000 m³/h 5,83 Meter pro Sekunde. Die Luftgeschwindigkeit an der Ansaugöffnung des AGI-30 (Durchmesser der Ansaugöffnung: 0,7 cm) betrug 5,4 Meter pro Sekunde. Somit erfolgte diese Probenahme fast isokinetisch. Daher ist anzunehmen, dass in die Ansaugöffnung des AGI-30 auf der Reinluftseite so gut wie keine zusätzlichen Partikel gelangt sind.

Anders beim Andersen-Sammler hier war die Ansaugeschwindigkeit der Luft auf den ersten drei Stufen kleiner als 5 m/s. Ist die Ansaugeschwindigkeit kleiner als die Geschwindigkeit des Hauptluftstromes, können träge Partikel in den Sammler gelangen, die sonst an ihm vorbeigeflogen wären (Anonym, 2004c).

Damit ließe sich das Ergebnis aus Abbildung 20 erklären, wo sich bei der prozentualen Verteilung der keimtragenden Partikel auf Stufe 1 des Andersen-Sammlers in der Reinluft mehr Partikel fanden. Das bedeutet ohne diesen Sammelfehler wäre die Tendenz, dass die Partikel nach Passage der Abluftreinigungsanlage kleiner waren möglicherweise noch deutlicher ausgeprägt.

Um dieses Problem zu beheben könnten die Ansauggeschwindigkeiten der Sammler geändert werden. Die Sammler sind allerdings dafür ausgelegt mit der festgelegten Ansauggeschwindigkeit die einatembare Partikelfraktion abzuscheiden. Eine Änderung der Ansauggeschwindigkeit würde als neues Problem eine veränderte Abscheideleistung aufwerfen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch die beiden systematischen Fehler, nämlich die Bündelung der Abluftströme durch den Ventilator und die höhere Luftgeschwindigkeit auf der Reinluftseite, höhere Konzentrationen gemessen worden sein könnten als tatsächlich vorhanden waren. Damit wären auch die errechneten Reduktionsfaktoren niedriger als die wahren Werte. Hiermit wäre der quantitative Effekt der Abluftreinigungsanlage also niedriger bewertet worden als er tatsächlich war.

5.3 VOR- UND NACHTEILE DER SAMMELGERÄTE

Sammlungen bei **niedrigen Temperaturen** führten bei allen Sammelgeräten früher oder später zu Problemen. Bei den AGI-30 ließ sich das Gefrieren der Sammelflüssigkeit durch Umhüllen des Gerätes mit einem wärmeisolierenden Material z.B. Handschuh ein wenig verzögern. Mit etwas größerem Aufwand könnten die Impingerflaschen auch beheizt werden. Außerdem wäre es möglich der Sammelflüssigkeit Kochsalz zuzugeben bzw. NaCl-Lösung als Sammelflüssigkeit zu benutzen. Hierbei ist allerdings mit Veränderungen der Ergebnisse bei den Keim- und Endotoxinnachweisen zu rechnen.

Beim Andersen-Sammler kam es bei Temperaturen um 0°C zu Kristallbildungen auf den Nährböden und damit zu einer potentiellen Schädigung der Mikroorganismen.

Die Metallkugel im Durchflussregler der GilAir5-Pumpen (Gilian, USA) des PGP-Systems frohr bei -10°C und hoher Luftfeuchtigkeit, bei der Probenahme auf der Reinluftseite, fest.

Bei „winterharten“ Luftkeimsammelgeräten besteht also noch Entwicklungsbedarf.

Ein weiteres Problem waren die unterschiedlichen **Nachweisgrenzen** der Luftkeimsammler.

Bei großen Mengen koloniebildender Einheiten in der Luft, wie sie vor allem bei den luftgetragenen aeroben Gesamtkoloniezahlen vorkamen war häufig die obere Nachweisgrenze des Andersen-Sammlers überschritten. Daher wurden für diesen Parameter die Ergebnisse aus den Impingermessungen (AGI-30) benutzt. Umgekehrt begann der Nachweisbereich beim AGI-30 erst bei 1000 KE/m³ Luft. Dadurch lagen die Ergebnisse bei den Parametern luftgetragene aerobe gramnegative Gesamtkoloniezahl und luftgetragene Schimmelpilzkoloniezahl häufig unter der Nachweisgrenze.

Aus diesen Gründen wurden beide Sammelgeräte genutzt. Die Nachweisgrenzen für die einzelnen Parameter wurden in den Tabellen 13 und 14 aufgeführt.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Sammelgeräte wurden in Tabelle 32 gegenübergestellt.

Tabelle 32: Vor- und Nachteile der Sammelgeräte

Gerät	Vorteile	Nachteile
Andersen-Sammler	<ul style="list-style-type: none"> - niedrige untere Nachweisgrenze - sehr robust - Aussage über Größenverteilung keimtragender Partikel möglich - keine Bearbeitung der Proben im Labor nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - niedrige obere Nachweisgrenze - erfordert stabile Anbringung - benötigt große Anzahl an Nährböden - Kristallbildung auf den Nährböden bei längeren Sammelzeiten (10 min) ab ca. 0°C - Kristallbildung auf den Nährböden bei minus 10°C schon bei kurzen Sammelzeiten (20 sec)
AGI-30	<ul style="list-style-type: none"> - keine obere Nachweisgrenze mit geringem Aufwand anzubringen - einfach sterilisierbar - aus Sammelflüssigkeit viele Fragestellungen beantwortbar 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe untere Nachweisgrenze - zerbrechlich - Gefrieren der Sammelflüssigkeit schon über 0°C (adiabatische Abkühlung)
PGP-System	<ul style="list-style-type: none"> - leicht - gut anzubringen 	<ul style="list-style-type: none"> - bei -10°C und hoher Luftfeuchtigkeit frieren die Pumpen ein

5.4 DAS BIOAEROSOL IM STALL

Der Median der einatembaren **Staubfraktion** (1,4 mg/m³) im Entenmaststall lag in etwa im gleichen Bereich wie die Ergebnisse von Seedorf et al. (1998). Diese fanden 1,9 mg Staub pro m³ Luft.

Die im Entenmaststall ermittelten **aeroben luftgetragenen Gesamtkoloniezahlen** waren vergleichbar mit in Geflügel- bzw. Legehennenbodenhaltung gemessenen Werten (z.B. Hurtienne, 1967; Gebhardt, 1973 und Gärtner, 1975).

Der Anteil von aeroben **gramnegativen** luftgetragenen Bakterien an der luftgetragenen aeroben Gesamtkoloniezahl betrug bei diesen Untersuchungen im Durchschnitt 0,2 % (0,0 bis 2,3 %) und glich damit den von Zucker und Müller (2000b) in verschiedenen Tierställen gefundenen Anteilen.

Die von Seedorf et al. (1998) in der Luft von Entenmastställen gefundenen **Endotoxinkonzentrationen** (7132,4 ng/m³) lagen über den in diesen Untersuchungen gemessenen. Die von Stark (2001) in Broilermastställen, von Nieuwenhuijsen et al. (1999) in Hühnerställen und von Thelin et al. (1984) in Geflügelställen gefundenen Werte waren ähnlich hoch, wie die aus den vorliegenden Untersuchungen.

Die Konzentrationen an luftgetragenen **Schimmelpilzen** lagen in der Stallluft in ähnlichen Größenordnungen wie bei Seedorf et al. (1998) und bei Debey et al. (1995) in der Putenmast.